

Erstellung eines Konzeptes zur städtebaulichen Anpassung an den Klimawandel in Gelsenkirchen

Stufe II: Stadtklimamanagement

Durchgeführt im Auftrag der Stadt Gelsenkirchen, Referat Umwelt

vorgelegt von:

Prof. Dr. rer. nat. W. Kuttler

Dr. rer. nat. D. Dütemeyer

Dr. rer. nat. A.-B. Barlag

**Universität Duisburg Essen, Campus Essen
Fakultät für Biologie
Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie**

Essen, im November 2011

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis Anhang	5
Zusammenfassung	6
1 Aufgabenstellung und Einleitung	7
2 Anforderungen an ein Stadtklimamanagementsystem	8
3 Methodik.....	9
3.1 Technische Voraussetzungen	9
3.1.1 Vorteile der GIS-Anwendung	9
3.1.2 Funktionale Einschränkungen	9
3.2 Maßstabebene und Flächentypisierungen	10
3.2.1 Maßstabebene und Abgrenzung zur synthetischen Klimafunktionskarte	10
3.2.2 Flächentypisierungen.....	10
4 Klimaqualität	12
4.1 Indikatoren	14
4.1.1 Kaltluftproduktivität	16
4.1.2 Nächtliche städtische Wärmeanomalie	18
4.1.3 Physiologische Äquivalenttemperatur (PET)	18
4.1.4 Aerodynamische Oberflächenrauigkeit	20
4.1.5 Luftbelastungsindex.....	23
4.2 Berechnung der Klimaqualität	27
4.2.1 Probleme bei der Interpretation von gewichteten Indikatoren	29
5 Anwendung.....	31
5.1 Informationsumfang bei Übergabe	31

5.2	Einzelflächenabfrage.....	32
5.3	Berechnung des Klimaqualitätsflächenwertes von Flächen	32
5.4	Bilanzierungen der Klimaqualität und Ausgleichspotenziale	34
5.4.1	Vergleich zweier Einzelflächen	34
5.4.2	Berechnung der mittleren Klimaqualität verschiedener Flächen.....	35
5.4.3	Gesamtstädtische Bilanzierungen	35
5.4.4	Selektive Bilanzierungen	38
6	Ausblick	41
7	Literatur	42
	Anhang	44

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Übersichtskarte der auf B-Planebene flächenscharfen Klimatope im Stadtgebiet von Gelsenkirchen.....	13
Abb. 2:	Logarithmisches Windprofil über Oberflächen unterschiedlicher Rauigkeit (aus Hupfer & Kuttler 2005).....	22
Abb. 3:	Aerodynamische Rauigkeit z_0 für verschiedene Landschaftstypen (aus Stull 1988).....	23
Abb. 4:	Klimaqualität der Klimatoptypen (sortiert nach normierter Klimaqualität)	29
Abb. 5:	Vergleich der Klimaqualität unter Berücksichtigung verschiedener Gewichtungsfaktoren (blau = lineare Gewichtung für alle fünf Indikatoren; rot = Übergewichtung der PET um den Faktor 2 und Untergewichtung der übrigen Indikatoren um 25%). Erläuterungen siehe Text.	31
Abb. 6:	Abfrage von klimatischen Flächeneigenschaften einer Einzelfläche in ArcMAP	33
Abb. 7:	Berechnung des Klimaqualitätsflächenwertes mit dem Berechnungswerkzeug „Feldberechnung“ für Attributtabelle in ArcMAP	34
Abb. 8:	Abfrage von zusammenfassenden klimatischen Eigenschaften mehrerer (selektierter) Flächen über das „Statistik“-Werkzeug der Attributtabelle einer Einzelfläche in ArcMAP	36
Abb. 9:	Räumliche Lage der unversiegelten (grün) und versiegelten (rot) Flächen im Stadtgebiet von Gelsenkirchen	37
Abb. 10:	Karte der Klimatope zum fiktiven Plangebiet (rote Grenze) am Kraftwerksstandort Gelsenkirchen Heßler im Ist-Zustand (2011).....	39
Abb. 11:	Karte der Klimatope zum fiktiven Plangebiet am Kraftwerksstandort Gelsenkirchen Heßler im Plan-Zustand.....	40

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Aufgaben des Klimamanagementsystems.	8
Tab. 2:	Klimatopklassifizierung nach VDI 3787 Blatt 1 (VDI 1997/2003) und erweiterte Klassifizierung.	11
Tab. 3:	Datenverfügbarkeit geeigneter klimatologisch-lufthygienischer Indikatoren in Gelsenkirchen	15

Tab. 4:	Absolute und relative Kaltluftproduktion (KLP) in Klimatopen der Stadt Gelsenkirchen (sortiert nach normierter Kaltluftproduktion)	17
Tab. 5:	Absolute und relative strahlungsnächtliche Temperaturanomalien (Sommer) in Klimatopen der Stadt Gelsenkirchen (sortiert nach normierter negativer Temperaturanomalie (VDI 2008)).....	19
Tab. 6:	Thermophysiologische Belastungsstufen zur physiologischen Äquivalenttemperatur PET (nach Höppe 1984).....	19
Tab. 7:	Absolute und relative Wärmebelastung für 15 Uhr an heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) in Klimatopen der Stadt Gelsenkirchen (sortiert nach normierter PET)	21
Tab. 8:	Absolute und relative Oberflächenrauigkeit z_0 in Klimatopen der Stadt Gelsenkirchen (sortiert nach normierter Rauigkeit).....	24
Tab. 9:	Typische Werte des Luftbelastungsindex (LBI) in ausgewählten Flächennutzungsstrukturen (nach verschiedenen Quellen, siehe Text).....	26
Tab. 10:	Absolute und relative Luftbelastung in Klimatopen der Stadt Gelsenkirchen (sortiert nach normierter Luftbelastung)	26
Tab. 11:	Klimaqualität der Klimatoptypen (sortiert nach normierter Klimaqualität)	28
Tab. 12:	Klassifizierungsstufen der Klimaqualität.....	29
Tab. 13:	Klimaqualität der versiegelten und unversiegelten Flächen in Gelsenkirchen	38
Tab. 14:	Auswirkung der fiktiven, sukzessiven Umwidmung von Freiflächen zu versiegelten Flächen am Kraftwerksstandort Gelsenkirchen Heßler.	40

Tabellenverzeichnis Anhang

Tab. A1:	Klassifizierung der Gelsenkirchener Flächennutzungsarten (Stadt Gelsenkirchen 2008) zu Klimatopen	44
----------	---	----

Zusammenfassung

Mit Vertrag vom 24.08./10.09.2010 wurde die Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie der Universität Duisburg-Essen beauftragt, ein rechnergestütztes Flächenbewertungskonzept zur städtebaulichen Anpassung an den Klimawandel in Gelsenkirchen auf Basis eines Maßes der Klimaqualität zu entwickeln. Vorgabe war die Anwendbarkeit auf B-Planebene auf sämtliche Flächen Gelsenkirchens sowie die technische Umsetzung im GIS ESRI ArcMAP 9.1.

Die Aufgabe umfasste im ersten Schritt auf Basis der Realflächennutzungskartierung die Klassifizierung sämtlicher Gelsenkirchener Flächen zu Klimatopen, für deren Typen ein Maß zur Klimaqualität angewendet wird.

Im Zweiten Schritt wurde die Klimaqualität auf Grundlage der stadtwweit anwendbaren, fünf klimatisch-lufthygienischen Schlüsselindikatoren Kaltluftproduktivität, nächtliche städtische Wärmeanomalie, physiologische Äquivalenttemperatur, aerodynamische Oberflächenrauigkeit und Luftbelastungsindex entwickelt. Die so für jedes Klimatop ermittelte Klimaqualität wurde in das GIS-System eingespeist und dort den jeweiligen Flächennutzungsklassen über den Klimatoptyp zugeordnet.

Schließlich wurden Anwendungs- und Handhabungsbeispiele mit Schwerpunkten auf der Berechnung von klimatischen Ausgleichspotenzialen sowie der Klimaqualitätsbilanzierung von Flächen mit Bezug zur Gesamtstadt oder zu frei definierten Bezugsräumen entwickelt.

1 Aufgabenstellung und Einleitung

Mit Vertrag vom 24.08./10.09.2010 wurde die Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie der Universität Duisburg-Essen beauftragt, ein rechnergestütztes Flächenbewertungskonzept stadtklimatischer Belange für die Stadt Gelsenkirchen zu entwickeln.

Anlass ist der im Rahmen der kommunalen Flächennutzungsplanung festzustellende stetige Verbrauch von unversiegelten, klimaökologisch wertvollen Flächen, die eine Ausgleichsfunktion zur Kompensation der ungünstigen klimatisch-lufthygienischen Eigenschaften versiegelter urbaner Flächen haben.

Aufgrund der vorgegebenen Stadtgebietsgröße besteht die Gefahr, dass durch fortschreitenden Freiflächenverbrauch in Zukunft eine Situation eintreten könnte, in der eine ausreichende klimaökologische Ausgleichsfunktion zur Entlastung der versiegelten Bereiche über die stadt eigenen Freiflächen nicht mehr gewährleistet werden kann. Die Problematik wird in Hinblick auf den Klimawandel verschärft, da für die Einwohner mit höherer sommerlicher Wärmebelastung zu rechnen ist, so dass zukünftig nicht nur weniger Freiflächen zur Kompensation zur Verfügung stehen, sondern gleichzeitig die human-biometeorologische Situation in den bebauten Bereichen gegenüber heute verschlechtert wird.

Es gilt daher, die weitere bebauungsbedingte Inanspruchnahme des verbleibenden Gelsenkirchener Freiraums nach Möglichkeit zu begrenzen und unter kontrollierten Bedingungen zu steuern. Hierbei sind auch die Auswirkungen von sukzessiven Umwidmungen kleinerer und verstreut liegender Einzelfreiflächen zu berücksichtigen, die im Einzelfall nur geringe Auswirkungen auf das Stadtklima haben können, in der Flächensumme jedoch das Klima der Stadt maßgeblich beeinflussen können.

Um den Freiflächenverbrauch zu steuern, wird eine objektive Grundlage zur Bemessung der klimatischen Bedeutung entsprechender Areale benötigt. Dabei sind gleichermaßen die klimatisch positiven Freiflächen als auch die negativen versiegelten Flächen zu berücksichtigen, um Umwidmungsprozesse im Rahmen von vergleichenden Ist-/Plan-Zustands-Bilanzierungen berücksichtigen zu können.

Für diese Aufgabenstellung wurde das nachfolgend beschriebene „Klimamanagementsystem“ entwickelt. Es ermöglicht die klimatische Quantifizierung und Bilanzierung von Flächen auf B-Planebene und basiert auf der GIS-Anwendung der Gelsenkirchener Stadtverwaltung (ESRI ArcMAP 9.1). Somit ist es möglich,

klimatische Untersuchungen in der Umweltplanung weitestgehend zu vermeiden und dennoch einen Bewertungskatalog zur Verfügung zu haben.

2 Anforderungen an ein Stadtklimamanagementsystem

Ziel des Stadtklimamanagementsystems ist die Charakterisierung von Klimaeigenschaften der Stadtgebietsfläche von Gelsenkirchen. Die klimatische Qualifizierung und Quantifizierung sollen über eine Maßzahl erfolgen, die sowohl die thermischen und austauschrelevanten als auch die lufthygienischen Merkmale der jeweiligen Flächennutzungen objektiv berücksichtigt. Dieser als „Klimaqualität“ bezeichnete Indikator soll auf sämtliche Flächen des Gelsenkirchener Stadtgebietes angewendet werden können. Darüber hinaus soll das Klimamanagementsystem in der Lage zu sein, Klimaqualitätsaussagen zu mehreren Flächen entweder zusammenfassend (Bilanzierung) oder in Relation zu anderen Flächenkontingenten differenzierend zu treffen. Schließlich ist das Klimamanagementsystem für den Anwender operabel zu halten, d. h. die Integration des Systems in die Arbeitsumgebung des Anwenders und die Möglichkeit der anwenderseitigen Untersuchung der Klimaqualitätsänderungen durch potenzielle Flächenumwidmungen ist erforderlich.

Die Aufgaben und Inhalte des Klimamanagementsystems lassen sich wie folgt zusammenfassen (Tab. 1).

Tab. 1: Aufgaben des Klimamanagementsystems

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Objektive Quantifizierung der thermischen, austauschrelevanten und lufthygienischen Klimaeigenschaften von Flächen unterschiedlicher Nutzung • Zusammenführung der thermischen, austauschrelevanten und lufthygienischen Quantifizierung in eine Maßzahl („Klimaqualität“) • Anwendung der Klimaqualität auf sämtliche Flächen im Gebiet der Stadt Gelsenkirchen • Abfrage der Klimaqualität von Flächen • Bilanzierung der Klimaqualität für ausgewählte, frei definierbare Flächenkontingente • Bilanzierung der Klimaqualität in Relation zum Gesamtklimazustand der Stadt Gelsenkirchen • Option der Anwendung für den Planungsfall: nachträgliche Umwidmung von Flächen einschließlich der Änderung der Klimaqualität mit der anschließenden Möglichkeit der Neubilanzierung der Klimaqualität von Flächenkontingenten |
|---|

3 Methodik

3.1 Technische Voraussetzungen

Das Klimamanagementsystem beruht auf der Abfrage von Klimainformationen von Flächen. Da in der Arbeitsumgebung des Anwenders das flächenbasierte Geoinformationssystem ESRI ArcMAP 9.1 ArcEDITOR (Stand 2008) vorhanden ist, wird das Klimamanagementsystem auf diesem System umgesetzt.

3.1.1 Vorteile der GIS-Anwendung

Die Anwendung des Klimamanagementsystems im GIS hat den Vorteil, dass erstens die Klimaqualität aller Gelsenkirchener Flächen auf Basis amtlicher Kartengrundlagen flächenscharf dargestellt werden kann. Zweitens lassen sich über die Selektions- und Statistikwerkzeuge von ArcMAP relativ schnell Bilanzierungen der Klimaqualität verschiedener Flächen erstellen. Schließlich ist es möglich, die Informationen zur Klimaqualität mit anderen, im GIS vorgehaltenen, Themenkarten (z. B. Flächennutzungs-, Relief-, Boden-, Biotop-, Pflanzungskarten, etc.) zu verschneiden, um im Rahmen des Planungsprozesses weiterführende Indikatoren zum Naturhaushalt zu generieren.

3.1.2 Funktionale Einschränkungen

Durch die technische Umsetzung im GIS unterliegt das Managementsystem folgender funktionaler Einschränkung:

Das GIS-basierte Klimamanagementsystem ist **keine Klimasimulationssoftware**, sondern ein **datenbankbasiertes Abfragesystem** von Flächenattributen im Sinne einer „Digitalen Flächenkartei“. Der für das Klimamanagementsystem für jede Fläche anzugebende Klimaqualitätswert hat lediglich die Funktion eines „Zahlenstempels“ und daher die gleiche Funktion wie jedes andere Flächenattribut (z. B. Flächengröße, Postleitzahl oder Flächennutzungstyp). Ferner arbeitet das System flächenscharf, d. h. beiderseits einer Flächengrenze existiert jeweils nur genau ein einziger Klimaqualitätswert. Fließende Übergänge von Eigenschaften zwischen benachbarten Flächen sind systembedingt nicht darstellbar.

Somit kann das Klimamanagementsystem keine atmosphärischen Prozesse abbilden und daher auch keine funktionalen klimatischen oder lufthygienischen Beziehungen zwischen verschiedenen zusammen- oder getrenntliegenden Flächen herstellen. Dieses betrifft insbesondere Aussagen zur Nah- oder Fernwirkung auf andere Flächen (z. B. Beziehungen zwischen Quell- und Wirkgebieten, Gunst- und Lasträumen und daran geknüpfte Ventilationsschneisen, Grünzüge, etc.).

Es obliegt damit dem Anwender, aus den abgefragten Informationen zur Klimaqualität die richtigen Schlüsse zur klimatisch-lufthygienischen Interaktivität zwischen Flächen zu ziehen.

3.2 Maßstabebene und Flächentypsierungen

3.2.1 Maßstabebene und Abgrenzung zur synthetischen Klimafunktionskarte

Um das Klimamanagementsystem im Planungsalltag einsetzen zu können, müssen Aussagen zur Klimaqualität flächenscharf mindestens auf B-Plan-Ebene bereitgestellt werden. Damit beträgt der Bearbeitungsmaßstab 1:5.000 oder größer. So unterscheidet sich das Klimamanagementsystem grundlegend von der synthetischen Klimafunktionskarte Gelsenkirchen (Kuttler et al. 2011), die zum Zwecke der gesamtstädtischen Übersicht auf dem Maßstab 1:20.000 basiert und damit eine Generalisierung bezüglich der Klimatopabgrenzung aufweist.

3.2.2 Flächentypsierungen

Die Aussagen zur Klimaqualität müssen für sämtliche Flächen Gelsenkirchens getroffen werden. Als Grundlage auf B-Planebene dient die Realnutzungskartierung der Stadt Gelsenkirchen (Stadt Gelsenkirchen 2008). Für das Stadtgebiet von Gelsenkirchen werden 14.257 Einzelflächen ausgewiesen, die in 128 Flächennutzungsarten klassifiziert sind. Für jede dieser Flächennutzungsarten muss die Klimaqualität quantifiziert werden. Dabei treten folgende Probleme auf:

- Zur eindeutigen Quantifizierung jeder Flächennutzungsart müssten jeweils die entsprechenden Klimaindikatoren (siehe Kap. 4.1), aus denen die Klimaqualität (Kap. 4.2) errechnet wird, bekannt sein. Dieses würde voraussetzen, dass in jeder Flächennutzungsart repräsentative Klimainformationen erhoben wurden. Das ist jedoch mit vertretbarem Aufwand für den Anwender nicht möglich bzw. soll durch dieses System auf besondere Einzelfälle reduziert werden.
- Da nicht jede der 14.257 Einzelflächen per Ortsbegehung in Augenschein genommen werden kann, ist eine Zuordnung von Klimainformationen per Analogieschluss über die vorgegebene Bezeichnung der Flächennutzungsarten erforderlich.

Das Problem wird dadurch gelöst, dass den 128 Flächennutzungsarten Klimatope zugordnet werden, deren Klimaeigenschaften bekannt sind und somit zur

Qualitätsmaßberechnung herangezogen werden können. Als Grundlage der Klimatopklassifizierung dient die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (VDI 1997/2003), die bereits 10 Klimatope unterscheidet (Tab. 2). Diese Klassifikation bedarf jedoch einer Erweiterung, da es Flächennutzungen gibt, für die in der Richtlinie keine Klimatopklassifizierung vorgesehen ist. Hierbei handelt es sich um Verkehrsflächen, die zumindest aus lufthygienischer Sicht genauso relevant sind wie Industriegebiete. Es erfolgt hierbei eine Einteilung in Verkehrsflächen mit übergeordnetem Verkehr (d. h. hohem Verkehrsaufkommen) und „normalem“ Verkehr. Ferner werden „ungenutzte versiegelte Flächen“ als eigenes Klimatop definiert, da sie bis auf die thermische Komponente keine weiteren negativen Eigenschaften aufweisen. Die in der VDI-Richtlinie bereits definierten Klimatope „Freiland“ und „Wald“ sind die Klimatope mit dem höchsten, strahlungsächtlichen Kaltluftbildungspotenzial, bei dem die Kombination aus Bodenverhältnissen und Pflanzenbewuchs von großer Bedeutung ist. Daher werden diese beiden Klimatope weiter differenziert in Acker, Brache und Wiese bzw. in Laub-, Misch- und Nadelwald. Schließlich wird in Hinblick auf einen optimalen thermischen Komfort das Klimatop der Baumwiese definiert, das die positiven Eigenschaften von hoher Kaltluftproduktion, guten Austauschbedingungen und wärmebelastungsreduzierender Beschattung kombiniert.

Tab. 2: Klimatopklassifizierung nach VDI 3787 Blatt 1 (VDI 1997/2003) und erweiterte Klassifizierung

Klimatope nach VDI	Erweiterte Klimatopklassifizierung
Freiland	<ul style="list-style-type: none"> — Acker — Brache — Wiese
Gartenstadt/Dorf	Gartenstadt/Dorf
Gewässer	Gewässer
Gewerbe	Gewerbe
Industrie	Industrie
Innerstädtische Grünfläche	Park
Stadtkern	Innenstadt
Stadttrand	Stadttrand
Verdichtete Bebauung	Verdichtete Bebauung
Wald	<ul style="list-style-type: none"> — Laubwald — Mischwald — Nadelwald
<i>Nicht dargestellt</i>	Verkehrsfläche (normal)
<i>Nicht dargestellt</i>	Verkehrsfläche (übergeordneter Verkehr)
<i>Nicht dargestellt</i>	Versiegelte Fläche (ungenutzt)
<i>Nicht dargestellt</i>	Baumwiese

Damit stehen zur klimatischen Flächenklassifizierung 18 Klimatope zur Verfügung, für die die Klimaqualität objektiv definiert wird (siehe nächstes Kapitel). Um die Maße zur Klimaqualität später den Flächennutzungsarten zuordnen zu können, erfolgt zuvor die Attributierung der 128 Flächennutzungsarten zu Klimatopen per Analogieschluss (siehe Tab. A1 im Anhang). Die Lage der Klimatope ist in Abb. 1 dargestellt.

Auf zwei Besonderheiten ist hier explizit hinzuweisen, die ggf. einer nachträglichen manuellen Klimatopänderung bedürfen:

- Es gibt zahlreiche Flächennutzungen, deren vorgegebene Bezeichnungen in klimatischer Hinsicht derart unspezifisch sind (z. B. „*Brachflächen - 463¹ - Sonstige Flächen*“, die z.B. im FNP für andere Nutzungen vorgesehen sind oder „*Gemischte Bauflächen - 40 - Mischbauflächen*“), dass eine klimatische Klassifizierung ohne prüfende Ortbegehung nicht möglich ist. In diesen Fällen wurde die Klimatopzuordnung aus der jeweils übergeordneten Flächennutzungsklasse abgeleitet.
- Ferner gibt es Flächennutzungsarten, die unabhängig von den Grundstückseigenschaften ausschließlich als Gebäude klassifiziert sind und die Außenbereiche nicht berücksichtigen (z. B. Schalke-Arena als „*Spiel- und Sportanlagen - 74 – Stadion*“ oder Hallenbadgebäude als „*Spiel- und Sportanlagen - 71 - Hallenbäder*“). Für derartig isolierte Gebäude kann ein Klimatop nicht definiert werden. Diesen Flächennutzungsarten wird hier zunächst das Klimatop der „verdichteten Bebauung“ zugeordnet.

4 Klimaqualität

Die Klimaqualität soll mit einer einzigen Zahl den human-biometeorologischen Zustand einer Fläche beschreiben. Dabei sind die human-biometeorologischen Wirkungskomplexe „Wärmebelastung“ und „Lufthygiene“ (VDI RL 3787, Bl. 2, 2008) zu berücksichtigen. Entsprechend werden geeignete Indikatoren benötigt, um die Klimaqualität berechnen zu können.

¹ Amtlicher Flächentypisierungscode

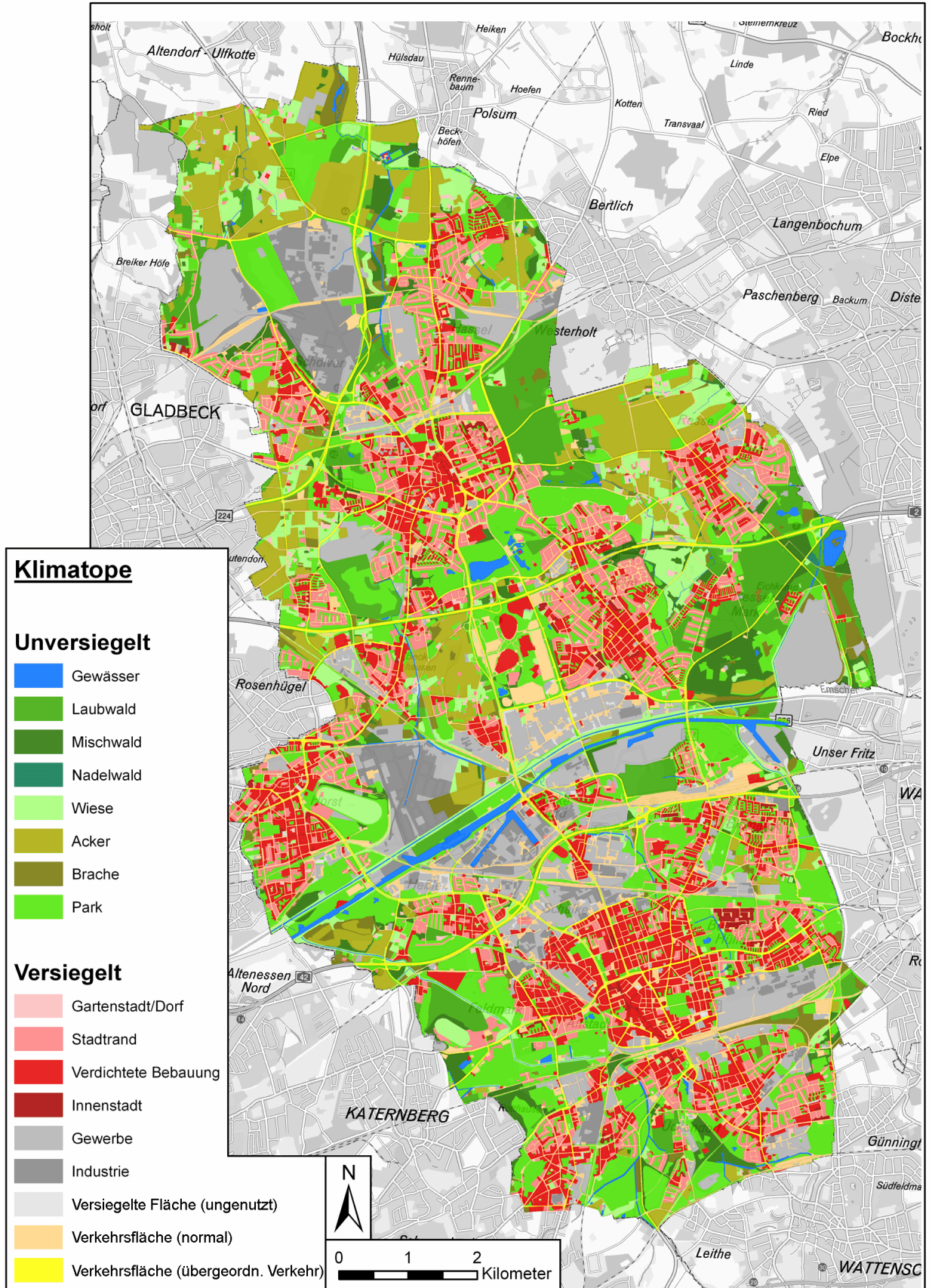


Abb. 1: Übersichtskarte der auf B-Planebene flächenscharfen Klimatope im Stadtgebiet von Gelsenkirchen

4.1 Indikatoren

Die Indikatoren sind objektive Zahlen, mit denen die klimatisch-lufthygienischen Eigenschaften der Gelsenkirchener Flächen beschrieben werden können. Hierbei handelt es sich entweder um Klimaelemente oder standortspezifische Klimafaktoren, die die lokalen Klimaelemente prägen.

Um für alle Flächen der Stadt Gelsenkirchen die Klimaqualität berechnen zu können, sollten idealerweise nur solche Indikatoren herangezogen werden, die für das gesamte Stadtgebiet flächendeckend vorliegen. Bei lückenhaften Flächendaten sowie bei Linien- und Punktdaten müssten die Informationen für die fehlenden Flächen mittels statistischer Regression oder Analogieschlussbetrachtung übertragen werden.

Eine Recherche nach geeigneten Indikatoren in der städtischen Verwaltung Gelsenkirchens durch den Auftraggeber im November 2010 ergab zusammen mit den Ergebnissen aus dem Messprogramm der Klimaanalyse Gelsenkirchen 2010/2011 (Kuttler et al. 2011) den in Tab. 3 dargestellten Katalog klimatisch-lufthygienischer Indikatoren.

An flächendeckenden Indikatoren stehen lediglich die Flächennutzungs- und Biotopkartierung sowie das digitale Geländemodell (Relief) zur Verfügung. Mit dem Ziel der stadtweiten, einheitlichen Anwendung der Klimaqualität bietet sich hier die Flächennutzung als Grundlage für die Bewertung an, da gemäß Kap. 3.2.2 die Flächennutzungen in Klimatope klassifiziert werden können, deren Typen sich klimatisch-lufthygienisch deutlich voneinander unterscheiden.

Im nächsten Schritt muss für die einzelnen Klimatoptypen die Klimaqualität quantifiziert werden. Da die Qualität sowohl klimatische als auch lufthygienische Eigenschaften berücksichtigen soll, werden zunächst entsprechende Schlüsselmerkmale generiert und später zur Klimaqualität verrechnet.

Die nachfolgend benutzten fünf Schlüsselindikatoren haben den Vorteil, dass ihre Eigenschaften in den jeweiligen Klimatoptypen hinlänglich bekannt sind, so dass eine objektive Zuordnung per Analogieschluss auf Grundlage der einschlägigen Literatur möglich ist. Im lokalen Kontext Gelsenkirchens können einige Indikatoren durch die Ergebnisse aus Messungen der Klimaanalyse Gelsenkirchen (Kuttler et al. 2011) präzisiert werden.

Folgende fünf Schlüsselmerkmale werden zur objektiven Beschreibung der klimatisch-lufthygienischen Eigenschaften benutzt:

Tab. 3: Datenverfügbarkeit geeigneter klimatologisch-lufthygienischer Indikatoren in Gelsenkirchen

Klimaparameter Quelle: Städtische Verwaltung der Stadt Gelsenkirchen (2010)	Klimaphänomene Quelle: Messprogramm 2010/2011 der Univ. DUE, Angewandte Klimatologie (Kuttler et al. 2011)
Flächendaten	
- gesamtstädtisch Flächennutzungskartierung (128 FN-Typen) Biotopkartierung (142 Biotopklassen) Digitales Geländemodell (DGM)	drei Kaltluftausbreitungsgebiete
- nicht gesamtstädtisch digitales Gebäudemodell Bodenkartierung	
Liniendaten	
DTV-Werte Ampelkarten PM ₁₀ und NO ₂	Streckenabschnittswerte „Klima“ (Lufttemperatur aus drei Profilmessfahrten) Streckenabschnittswerte „Lufthygiene“ (Immissionskonzentrationen von CO, CO ₂ , NO ₂ , PM _x und O ₃ aus drei Profilmessfahrten)
Punktdaten	
Baumkataster für Einzelbäume (ohne Wald)	Stationäre Messungen „Klima“ (einjährige Messungen Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und -richtung in 4 Klimatopen (2 x Innenstadt, 1 x Stadtrand, 1 x Freiland, 1 x städtische Parkfläche)) Stationäre Messungen „Lufthygiene“ (24 h-Messungen von CO, CO ₂ , NO ₂ , PM _x , O ₃ , BTEX, Temp, rF, Wind an 4 Standorten (3 x Verkehr, 1 x Blockrandbebauung))

- **Kaltluftproduktivität**

Die Kaltluftproduktivität ist für Freiflächen, insbesondere in der urbanen Peripherie, von Bedeutung, da die darauf produzierte Kaltluft über Ventilationsbahnen in die Stadt eindringen (Fernwirkung) kann und der dortigen potenziellen Wärme- und Spurenstoffbelastung entgegenzuwirken vermag (**nachts**).

- **Nächtliche städtische Wärmeanomalie**
Die nächtliche Überwärmung beeinträchtigt die Erholungsfunktion des Schlafes.
- **Physiologische Äquivalenttemperatur (PET)**
Die Physiologische Äquivalenttemperatur PET eignet sich besonders zur Bewertung der **Wärmebelastung** im Freien **am Tage**, da sie unter anderem die Wirkung der Sonnenstrahlung im Strahlungshaushalt berücksichtigt.
- **Aerodynamische Oberflächenrauigkeit**
Die Rauigkeit der Erdoberfläche beeinflusst unmittelbar die bodennahe **Windgeschwindigkeit**, die für den Abtransport von Wärme, Feuchtigkeit und Spurenstoffen aus dem bebauten Bereich heraus von Bedeutung ist.
- **Luftbelastungsindex**
Der Luftbelastungsindex fasst die **Immissionskonzentrationen** für verschiedene Spurenstoffe als Summe zusammen und ist damit ein geeigneter Indikator für die Luftqualität.

Die Quantifizierung der fünf Indikatoren wird nachfolgend beschrieben. Dabei werden für jeden Indikator sowohl objektive Werte als auch relative Werte in Relation zum jeweiligen Indikatoroptimum dargestellt. Die relativen Werte werden für die spätere Berechnung der Klimaqualität herangezogen.

4.1.1 Kaltluftproduktivität

Die Kaltluftproduktivität beschreibt die Fähigkeit einer Oberfläche zur Abkühlung der bodennahen Luftschicht während der Nacht. Die wesentlichen Steuerungsgrößen sind der thermische Emissionskoeffizient und die Luftfeuchtigkeit. Ein bewährter Berechnungsansatz für die Kaltluftproduktionsrate ist der auf der ÅNGSTRØM-Gleichung basierende Ansatz von Wiesner (1986) (siehe Gl. 1 im Anhang). Setzt man die so ermittelte Kaltluftproduktionsrate in Beziehung zur Flächengröße und Andauer des Abkühlungsprozesses, erhält man die Kaltluftproduktionsrate in der Einheit $[\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}]$.

In Anbetracht der Variablenvielfalt der meteorologischen und pedologischen Einflussfaktoren, können für konkrete Flächen in natura Kaltluftvolumenangaben oftmals nur mittels Parametrisierungen getroffen werden, da aufgrund der normalerweise heterogenen Oberflächenstruktur die Variablenwerte flächen-

mäßig nicht exakt bestimmt werden können oder für diverse Oberflächentypen unbekannt sind. Wiesner (a.a.O.) hat für die Freilandnutzungen Wiese, Brache, Acker, Laubwald, Nadelwald und Gewässer typische Werte für die Kaltluftproduktion in Abhängigkeit der Jahreszeiten berechnet. Diese Nutzungstypen finden auch in entsprechenden Klimatopen Berücksichtigung, so dass darauf bezogene Kaltluftproduktionsraten angegeben werden können (Tab. 4).

Tab. 4: Absolute und relative Kaltluftproduktion (KLP) in Klimatopen der Stadt Gelsenkirchen (sortiert nach normierter Kaltluftproduktion)

		Messgröße Datenquelle, abgeleitet aus Einheit	KLP Wiesner (1986) $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$	
Klimatop			normiert	
1	Baumwiese		14,7	= 100,0%
2	Wiese		14,7	100,0%
3	Acker		14,6	99,3%
4	Park	80% Wiese + 20% Wald	14,5	98,4%
5	Brache		14,4	98,0%
6	Gewässer		13,5	91,8%
7	Laubwald		13,5	91,8%
8	Nadelwald		13,5	91,8%
9	Mischwald		13,5	91,8%
10	Gartenstadt/Dorf	50% Wiese	7,4	50,0%
11	Stadttrand		0	0,0%
12	Verdichtete Bebauung		0	0,0%
13	Innenstadt		0	0,0%
14	Industrie		0	0,0%
15	Gewerbe		0	0,0%
16	Versiegelte Fläche (ungenutzt)		0	0,0%
17	Verkehrsfläche (normal)		0	0,0%
18	Verkehrsfläche (übergeordneter Verkehr)		0	0,0%
Bester Wert		Kriterium Wert	Max 14,7	

Demnach zählen Wiesen und Baumwiesen zu den größten Kaltluftproduzenten, während Wälder in der Ebene eine vergleichsweise geringere Kaltluftproduktion aufweisen, die für die Umgebung wichtig sein könnte. Auf versiegelten Arealen ist aufgrund der nächtlichen Überwärmung die Kaltluftproduktion bezüglich des Kaltluftvolumens und der erzielbaren Untertemperatur vernachlässigbar.

Die Kaltluftproduktion wird anhand des Maximums (Wiese, Baumwiese = 100%) normiert.

4.1.2 Nächtliche städtische Wärmeanomalie

Die Angaben zur strahlungsächtlichen städtischen Wärmeinsel Gelsenkirchens konnten aus den drei Temperaturmessfahrten (Kuttler et al. 2011) gewonnen werden. Die zugrundeliegende Messroute deckte alle Klimatotypen ab, so dass entsprechende Streckenabschnittsmittelwerte benutzt werden konnten. Um die Repräsentativität zu erhöhen, wurde ein arithmetischer Mittelwert aus den drei Messfahrten gebildet. Die räumlichen Temperaturdifferenzen wurden als Abweichung vom Gebietsmittwert (Anomalie) dargestellt.

Tab. 5 zeigt für die einzelnen Klimatotypen die mittleren Temperaturanomalien. Wiesen und Baumwiesen stellen die kältesten Areale dar, gefolgt von Wäldern und Gewässern. Im Gegenzug sind die Innenstadtkerne die wärmsten Gebiete, gefolgt von der verdichteten (innenstadtnahen) Bebauung sowie von Industrie und Gewerbegebieten. Die Temperaturanomalie zwischen kältestem und wärmstem Klimatop beträgt 6,5 K.

Hinsichtlich der Klimaqualität ist die Überwärmung im Sommer unerwünscht. Stattdessen muss die Abkühlung die höhere Bewertung erfahren. Als Maßzahl ist daher die Temperaturanomalie aufgrund ihrer positiven Korrelation („je wärmer, desto höher der Wert“) ungeeignet. Stattdessen wird die Temperaturanomalie als Abweichung zum Minimum (Wiese, Baumwiese) dargestellt (Spalte „Transformation“) und anschließend anhand des Minimums (= 100%) normiert.

4.1.3 Physiologische Äquivalenttemperatur (PET)

Die physiologische Äquivalenttemperatur PET ist ein objektives thermisches Behaglichkeitsmaß, welches das subjektive Temperaturempfinden in Abhängigkeit weiterer atmosphärischer Zustandsgrößen ausdrückt (VDI Richtlinie 3787, Blatt 2 (VDI 2008). Hierzu zählen neben der Lufttemperatur die Sonnenexposition, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit sowie der Einfluss der Bekleidung und die körperliche Aktivität eines Menschen. Gerade durch Berücksichtigung der Sonnenexposition ist die PET geeignet, die Wärmebelastung im Freien (u. a. auch „in der direkten Sonne“) während der Tagstunden zu beschreiben. Die PET wird in Grad Celsius (°C) ausgedrückt und umfasst eine Skala von 0°C PET bis >40 °C PET, wobei die (ausgeglichene) Behaglichkeit bei 20,5°C liegt (Tab. 6).

Tab. 5: Absolute und relative strahlungsnächtliche Temperaturanomalien (Sommer) in Klimatopen der Stadt Gelsenkirchen (sortiert nach normierter negativer Temperaturanomalie (VDI 2008))

		1. Basis ▶	2. Transformation		
Messgröße		T- Anomalie	neg. UHI		
Datenquelle, abgeleitet aus		3 TMF*	T-Anomalie		
Einheit		K	K		
Klimatop		▼		normiert	
1	Wiese	-3,5	6,5	= 100,0%	
2	Baumwiese	-3,4	6,4	97,7%	
3	Brache	-2,5	5,5	84,6%	
4	Laubwald	-2,0	5,0	76,9%	
5	Nadelwald	-2,0	5,0	76,9%	
6	Mischwald	-2,0	5,0	76,9%	
7	Acker	-1,5	4,5	69,2%	
8	Gewässer	-1,0	4,0	61,5%	
9	Park	80% Wiese + 20% Wald	0,0	3,0	46,2%
10	Gartenstadt/Dorf	50% Wiese	0,0	3,0	46,2%
11	Stadtrand	1,5	1,5	23,1%	
12	Industrie	2,0	1,0	15,4%	
13	Gewerbe	2,0	1,0	15,4%	
14	Versiegelte Fläche (ungenutzt)	2,0	1,0	15,4%	
15	Verkehrsfläche (normal)	2,0	1,0	15,4%	
16	Verkehrsfläche (übergeordneter Verkehr)	2,0	1,0	15,4%	
17	Verdichtete Bebauung	2,5	0,5	7,7%	
18	Innenstadt	3,0	0,0	0,0%	
Beste Wert		Kriterium	Min	Max	
		Wert	-3,5	6,5	

* TMF = Temperaturmessfahrt

Tab. 6: Thermophysiological Belastungsstufen zur physiologischen Äquivalenttemperatur PET (nach Höppe 1984)

PET	Thermisches Empfinden	Thermophysiological Belastungsstufe	Physiologische Wirkung
4 °C	sehr kalt	extreme Belastung	Kältebelastung
8 °C	kalt	starke Belastung	
13 °C	kühl	mäßige Belastung	
18 °C	leicht kühl	schwache Belastung	
23 °C	behaglich	keine Belastung	Wärmebelastung
29 °C	leicht warm	schwache Belastung	
35 °C	warm	mäßige Belastung	
41 °C	heiß	starke Belastung	
	sehr heiß	extreme Belastung	

Die PET wurde anhand der Stationsmesswerte aus der Klimaanalyse Gelsenkirchen (Kuttler et al. 2011) mittels der Software „RayMan Pro“ (Matzarakis et al. 2000) berechnet. Allerdings wurden mit den Stationen nur die vier Klimatoptypen Innenstadt, Stadtrand, Freiland und Innerstädtische Grünfläche erfasst. Um die PET auch für weitere Klimatope anwenden zu können, wurde auf das *dynaklim*-Messnetz in Oberhausen (Kuttler et al. 2009) zurückgegriffen. Diese Analogieschlussmethode ist sinnvoll, da das *dynaklim*-Messnetz nur 8 km westlich Gelsenkirchens in einer Stadt mit vergleichbarer Nutzungsstruktur und naturräumlicher Lage (Emscherraum) betrieben wurde und für Untersuchungen auf einen gemeinsamen Messzeitraumausschnitt zurückgegriffen werden konnte. Neben den in Gelsenkirchen mittels Stationsmessungen untersuchten Klimatopen liegen für Oberhausen ergänzende Messdaten für die Klimatoptypen Wald, Gewässer, dichte Bebauung und Gewerbe vor. Für die übrigen Klimatoptypen können die PET-Werte per Analogieschluss auf Grundlage der typischen Vegetations- oder Bebauungsanteile abgeleitet werden. Die Untersuchung der PET-Werte beruhte auf den beiden „heißen Tagen“ vom 09./10.07.2010. Die Auswertung erfolgte für 15 Uhr MEZ als heißeste Stunde des Tages für Personen in leichter Sommerbekleidung und mit durchschnittlicher körperlicher Aktivität.

In Tab. 7 ist die PET für die verschiedenen Flächennutzungen als Anomalie zur PET-Untergrenze für behagliches Empfinden (18°C) dargestellt.

Relativ niedrige PET-Werte werden in denjenigen Klimatoptypen erreicht, die durch ein hohes Maß an guter Durchlüftung (Gewässer) oder Beschattung (Wald, Baumwiese) gekennzeichnet sind. In den übrigen Klimatoptypen führen Kombinationen aus ungünstigen klimatischen Randbedingungen (geringe Beschattung, hohe Luftfeuchtigkeit und/oder geringe Ventilation) zu höheren PET-Werten und damit zu höheren Wärmebelastungen. In dieser Hinsicht stellen die bebauten Areale die belasteten Gebiete dar.

Wie bei der nächtlichen Wärmeinsel auch, erfolgt die relative Normierung anhand des PET-Gebietsminimums (=100%).

4.1.4 Aerodynamische Oberflächenrauigkeit

Die aerodynamische Oberflächenrauigkeit z_0 ist ein Maß, welches die bremsende Wirkung von Objekten auf der Erdoberfläche auf den übergeordneten Wind beschreibt. Je höher die Anzahl, Dichte und Höhe der Hindernisse, desto stärker wird der Wind abgebremst. Aus denselben Hindernismerkmalen errechnet sich auch die Rauigkeit.

Tab. 7: Absolute und relative Wärmebelastung für 15 Uhr an heißen Tagen ($t_{\max} \geq 30^\circ\text{C}$) in Klimatopen der Stadt Gelsenkirchen (sortiert nach normierter PET)

		1. Basis ►	2. Transformation		
Messgröße		PET (15:00)	Diff. zu 18°C PET (behaglich)		
Datenquelle, abgeleitet aus		Messungen	PET 15:00		
Einheit		°C	°C		
Klimatop		-	▼	normiert	
1	Gewässer	41,4	23,4	= 100,0%	
2	Laubwald	41,9	23,9	97,9%	
3	Nadelwald	41,9	23,9	97,9%	
4	Mischwald	41,9	23,9	97,9%	
5	Baumwiese	42,5	24,5	95,5%	
6	Wiese	45,3	27,3	85,7%	
7	Verdichtete Bebauung	45,3	27,3	85,7%	
8	Industrie	45,3	27,3	85,7%	
9	Gewerbe	45,3	27,3	85,7%	
10	Acker	46,0	28,0	83,6%	
11	Versiegelte Fläche (ungenutzt)	46,3	28,3	82,7%	
12	Verkehrsfläche (normal)	46,3	28,3	82,7%	
13	Verkehrsfläche (übergeordneter Verkehr)	46,3	28,3	82,7%	
14	Brache	46,7	28,7	81,5%	
15	Park	80% Wiese + 20% Wald	47,2	29,2	80,1%
16	Gartenstadt/Dorf	50% Wiese	47,4	29,4	79,6%
17	Stadttrand		47,4	29,4	79,6%
18	Innenstadt		48,0	30,0	78,0%
Bester Wert		Kriterium	Min	Min	
		Wert	41,4	23,4	

Absteigende Sortierung nach normierter PET

Da für die Klimatoptypen die topografische Flächenausstattung in Grundzügen bekannt ist, lassen sich entsprechende Rauigkeitswerte bestimmen, aus denen die Wirksamkeit zur Durchlüftung abgeleitet werden kann.

Bei gegebener Rauigkeit nimmt der Bremseffekt nach dem logarithmischen Windgesetz nach Prandtl (1957) mit abnehmender Höhe zu (siehe Abb. 2 und Gl. 2 im Anhang)

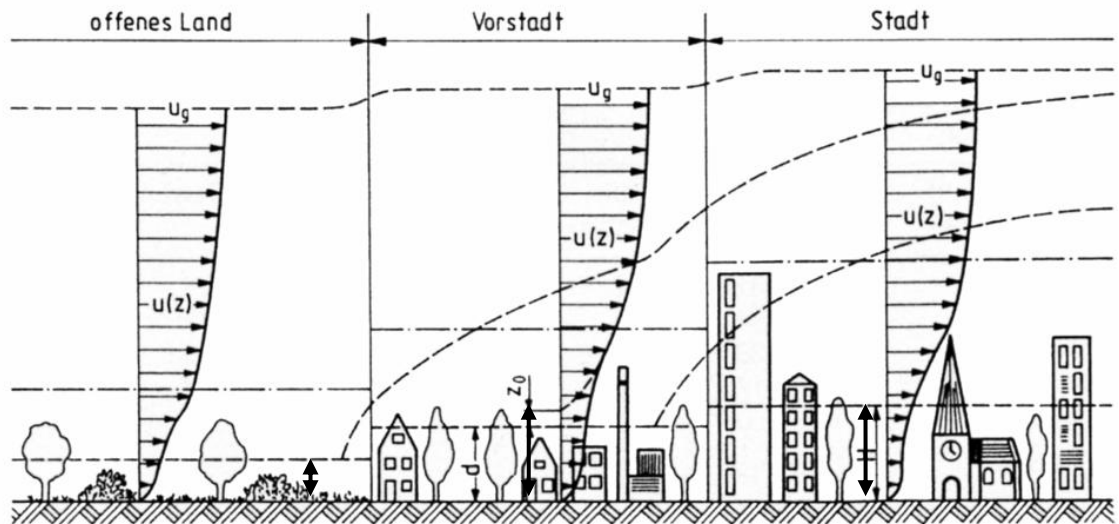


Abb. 2: Logarithmisches Windprofil über Oberflächen unterschiedlicher Rauigkeit (aus Hupfer & Kuttler 2005)

Die Oberflächenrauigkeit lässt sich nach LETTAU (1969) unmittelbar über die Anordnung und Geometrie der Hindernisse berechnen. In vereinfachter Form besteht nach Monteith (1978) zwischen der Rauigkeit z_0 und der mittleren Hindernishöhe h_H die hinreichend genaue Beziehung:

$$z_0 \approx 0,13 h_H \quad [\text{m}] \quad (3)$$

Entsprechend lassen sich für verschiedene Landschaftformen die Rauigkeiten bestimmen (Abb. 3) und auf Klimatoptypen übertragen (Tab. 8).

Klimatope mit weiten, offenen Flächen (z. B. Gewässer, Wiesen) haben sehr geringe Rauigkeiten und weisen daher bessere Ventilationsbedingungen auf als Klimatope mit dichter Topographieausstattung (Innenstädte, Wälder), die hohe Rauigkeiten aufweisen und somit markante Strömungshindernisse darstellen.

Für die Bewertung sind die Unterschiede der Rauigkeitsdifferenzen zwischen rauigkeitsarmen und rauigkeitsstarken Klimatopen mit zwei Größenordnungen ($0,01 \leq z_0 < 1,00$) zu groß, um in Hinblick auf die zu erzielenden Windgeschwindigkeiten sinnvolle Aussagen zu treffen, da diese über die Logarithmusfunktion (Gl. 2, s.o.) von der Rauigkeit abhängen. Daher wird für die Bewertung die Rauigkeit logarithmisch (dekadischer Logarithmus) entzerrt, das negative Ergebnis positiv gesetzt und anhand des Minimums (=100% für Wasserflächen) referenziert.

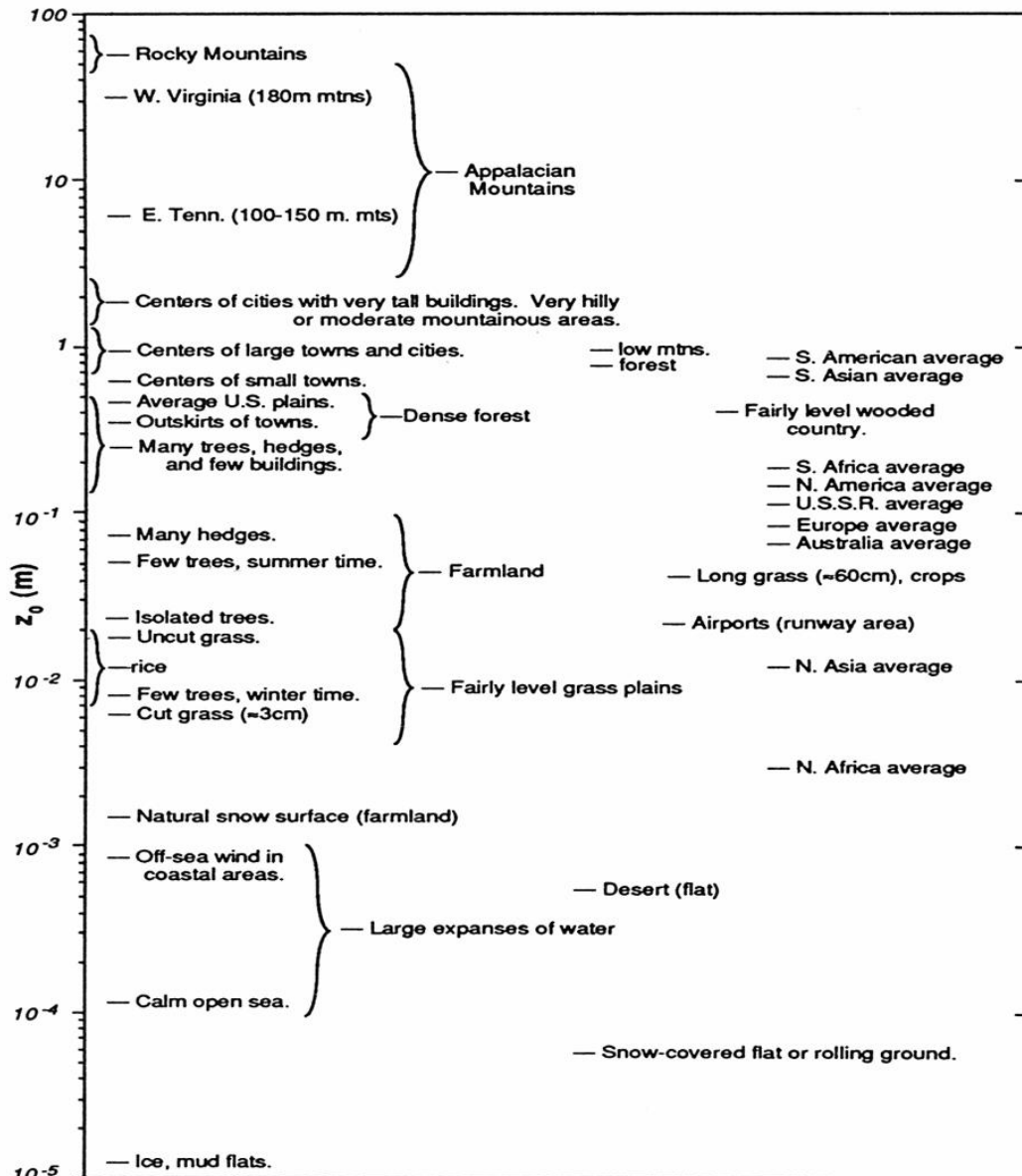


Abb. 3: Aerodynamische Rauigkeit z_0 für verschiedene Landschaftstypen (aus Stull 1988)

4.1.5 Luftbelastungsindex

Die Berücksichtigung der Luftqualität ist insofern aufwendig, als dass für die Vielzahl der umweltrechtlich relevanten Spurenstoffe die jeweils typischen Immissionskonzentrationen in jedem Klimatotyp bestimmt werden müssten. Selbst wenn dieses im Rahmen der Aufgabenstellung machbar wäre, bleibt zu diskutieren, ob für die Bewertung die Messwerte der einzelnen Spurenstoffe zu einer gemeinsamen Maßzahl zusammengefasst oder jeweils separat betrachtet werden sollen.

Tab. 8: Absolute und relative Oberflächenrauigkeit z_0 in Klimatopen der Stadt Gelsenkirchen (sortiert nach normierter Rauigkeit)

		1. Basis ►	2. Transformation		
Messgröße Datenquelle, abgeleitet aus Einheit		Rauigkeit z_0 Stull 1988 m	$\text{abs}(-\log(z_0))$ Rauigkeit z_0 m		
Klimatop		▼		Normiert	
1	Gewässer	0,01	2,00	= 100,0%	
2	Wiese	0,02	1,69	84,9%	
3	Versiegelte Fläche (ungenutzt)	0,02	1,69	84,9%	
4	Verkehrsfläche (übergeordneter Verkehr)	0,02	1,69	84,9%	
5	Baumwiese	0,025	1,60	80,1%	
6	Acker	0,03	1,52	76,1%	
7	Verkehrsfläche (normal)	0,03	1,52	76,1%	
8	Brache	0,05	1,30	65,1%	
9	Park	80% Wiese + 20% Wald	0,2	0,69	34,9%
10	Gartenstadt/Dorf	50% Wiese	0,2	0,69	34,9%
11	Laubwald		0,3	0,52	26,1%
12	Stadttrand		0,3	0,52	26,1%
13	Mischwald		0,35	0,46	22,8%
14	Nadelwald		0,4	0,39	19,9%
15	Verdichtete Bebauung		0,5	0,30	15,1%
16	Industrie		0,5	0,30	15,1%
17	Gewerbe		0,5	0,30	15,1%
18	Innenstadt		0,9	0,04	2,3%
Beste Wert		Kriterium	Min	Max	
		Wert	0,01	2,0	

Im Rahmen der Klimaanalyse Gelsenkirchen (Kuttler et al. 2011) konnten für die Leitsubstanzen CO, CO₂, NO₂, PM_x und O₃ während drei Profilmessfahrten die Immissionskonzentrationen für zahlreiche Flächennutzungen und Klimatope ermittelt werden; allerdings wurden die Messfahrten aus Reproduzierbarkeitsgründen nur während der Tagstunden zwischen den Hauptverkehrszeiten durchgeführt. Aufgrund der Methodik sind daher keine Langzeitimmissionsprognosen möglich, welche diurnale und saisonale Effekte berücksichtigen und eine Bewertung anhand von Jahresmittelgrenzwerten erlauben.

Daher wird hier ein analoger Ansatz verfolgt, der sowohl eine integrierende Bewertung der einzelnen Spurenstoffe in einer Maßzahl als auch die lufthygienische Differenzierung der Klimatoptypen erlaubt. Das Verfahren findet insbesondere in Baden-Württemberg seit vielen Jahren eine etablierte Anwendung

(LUBW 2004, Baumüller & Reuter 1995). Das Prinzip beruht auf der Berechnung einer integrierten Luftqualitätszahl „Langzeitluftbelastungsindex (LBI1)“ oder „planungsrelevanter Langzeitluftqualitätsindex (LAQx)“, welche für einen Standort die Immissionskonzentrationen einzelner Spurenstoffe zunächst in Relation zum jeweils gültigen Grenzwert setzt und anschließend diese relativen Belastungen zu einer Zahl aufsummiert. In vereinfachter Form erfolgt die Berechnung nach Gl. 4:

$$LQI = \frac{\frac{MW_{Stoff1}}{GW_{Stoff1}} G_1 + \frac{MW_{Stoff2}}{GW_{Stoff2}} G_2 + \frac{MW_{Stoff3}}{GW_{Stoff3}} G_3 + \dots + \frac{MW_{Stoffi}}{GW_{Stoffi}} G_i}{\sum G_i} * 100 \quad (4)$$

mit *LQI* : Luftqualitätsindex
MW : Messwert eines Spurenstoffes
GW : Grenzwert eines Spurenstoffes
G : Gewichtungs- oder Korrekturfaktor

Statt des Messwertes *MW* kann auch die Abweichung des Messwertes vom Grenzwert (*MW* – *GW*) verwendet werden. Als Leitsubstanzen werden i. d. R. CO, NO₂, O₃, PM₁₀ und SO₂ verwendet.

LBI1 und LAQx weisen verschiedene Referenzierungsmethoden auf, deren Berechnung im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht notwendig ist und daher hier nicht beschrieben wird (zur Berechnung der verschiedenen Indices siehe LUBW 2004). Für die hiesige Aufgabenstellung ist wichtig, dass diese Indices in zahlreichen Studien auf verschiedenen Flächennutzungen angewendet wurden (z. B. LUBW (2004), Rost & Mayer (2004), Straßburger (2004), Stadt Aalen (2000), Baumüller & Reuter (1995)), so dass eine typisierende Bemaßung der Luftqualität für typische Flächennutzungen und damit Klimatope möglich ist, wobei hier die relative Differenzierung zwischen den Klimatopen im Vordergrund steht. Da nicht alle Studien jeweils sämtliche Flächennutzungstypen untersucht haben, war eine Zusammenschau der Studien mit Quervergleichen und abschließender Zusammenfassung erforderlich. Die Ergebnisse dieser Studien sind in Tab. 9 final zusammengefasst, wobei der LBI zur besseren Lesbarkeit auf eine Skala von 0 bis 1 justiert wurde.

Anhand der Spezifizierung der lufthygienischen Eigenschaften in einzelnen Klimatopen in der VDI RL 3787, Blatt 1 (VDI 1997/2003) kann den Klimatoptypen per Analogieschluss ein Luftbelastungswert zugewiesen werden (Tab. 10).

Tab. 9: Typische Werte des Luftbelastungsindex (LBI) in ausgewählten Flächennutzungsstrukturen (nach verschiedenen Quellen, siehe Text)

Stufe	Wert	Belastung	Vorkommen
I	<0,2	sehr gering	Reinluftgebiet
II	0,2 - 0,4	gering	ländlicher Raum, Kleinstädte
III	0,4 - 0,6	mittel	Mittelstädte, Stadtrand
IV	0,6 - 0,8	hoch	Großstadt, Industrienähe, Hauptstraßen
V	>0,8	sehr hoch	Großstadt, Industrie

Tab. 10: Absolute und relative Luftbelastung in Klimatopen der Stadt Gelsenkirchen (sortiert nach normierter Luftbelastung)

		1. Basis ►	2. Transformation		
Messgröße		Immissionen	neg. LB (L-Güte)		
Datenquelle, abgeleitet aus Maß		LBI1, LAQx (JahresM) 1	LBI1 1		
Klimatop		▼		normiert	
1	Gewässer	0,2	0,7	= 100,0%	
2	Baumwiese	0,2	0,7	100,0%	
3	Wiese	0,2	0,7	100,0%	
4	Brache	0,2	0,7	100,0%	
5	Laubwald	0,2	0,7	100,0%	
6	Nadelwald	0,2	0,7	100,0%	
7	Mischwald	0,2	0,7	100,0%	
8	Acker	0,3	0,6	85,7%	
9	Park	80% Wiese + 20% Wald	0,4	0,5	71,4%
10	Gartenstadt/Dorf	50% Wiese	0,4	0,5	71,4%
11	Stadtrand		0,4	0,5	71,4%
12	Versiegelte Fläche (ungenutzt)		0,4	0,5	71,4%
13	Verdichtete Bebauung		0,6	0,3	42,9%
14	Gewerbe		0,6	0,3	42,9%
15	Verkehrsfläche (normal)		0,6	0,3	42,9%
16	Innenstadt		0,8	0,1	14,3%
17	Verkehrsfläche (übergeordneter Verkehr)		0,8	0,1	14,3%
18	Industrie		0,9	0,0	0,0%
Bester Wert		Kriterium	Min	Max	
		Wert	0,2	0,7	

Erwartungsgemäß haben Freiflächen mit fehlender oder extensiver Landnutzung die geringste Luftbelastung, während im Gegenzug Innenstadt- und Industriegebiete sowie Hauptverkehrsflächen die höchste Belastung aufweisen.

Für die Qualitätsberechnung wird die Belastungsskala umgekehrt, um weniger belasteter Luft eine höhere Bewertung beizumessen.

4.2 Berechnung der Klimaqualität

Mit Hilfe der im vorigen Kapitel definierten und quantifizierten fünf Indikatoren wird nunmehr die Klimaqualität berechnet.

Da die Indikatormaße als normierte Werte vorliegen, erfolgt die Berechnung der Qualität durch einfache Addition mit anschließender Normierung am Klimatop mit der optimalen Qualität (Maximalwert) gemäß Gl. 5:

$$KQ = \frac{KLP \cdot G_{KLP} + UHI \cdot G_{UHI} + PET \cdot G_{PET} + VENT \cdot G_{VENT} + LQ \cdot G_{LQ}}{G_{KLP} + G_{UHI} + G_{PET} + G_{VENT} + G_{LQ}} * 100 \quad (5)$$

- mit
- KQ* : Klimaqualität in %
 - KLP* : Kaltluftproduktivität in %
 - UHI* : Urban Heat Island = nächtliche städtische Wärmeanomalie in %
 - PET* : Physiologische Äquivalenttemperatur (PET) in %
 - VENT* : Ventilation, repräsentiert durch die aerodynamische Oberflächenrauigkeit z_0 in %
 - LQ* : Luftqualität, repräsentiert durch den Luftbelastungsindex
 - G_i : Gewichtungsfaktor der Indikatoren in %

Der Gewichtungsfaktor G erlaubt die selektive Hervorhebung oder Herabsetzung einzelner Indikatoren. Die Anwendung der Gewichtung ist jedoch aus interpretatorischer Sicht nicht unproblematisch, siehe Kapitel 4.2.1.

Im vorliegenden Fall werden alle fünf Indikatoren gleich gewichtet, so dass die

Berechnungsgleichung vereinfacht wird zu:

$$KQ = \frac{KLP + UHI + PET + VENT + LQ}{5} * 100 \quad (6)$$

Auf diese Weise wurde die Klimaqualität der einzelnen Klimatoptypen berechnet (Tab. 11 und Abb. 4).

Tab. 11: Klimaqualität der Klimatoptypen (sortiert nach normierter Klimaqualität)

	1	2	3	4	5	6	7	8
Indikator* ►	KLP	UHI	PET	VENT	LQ	Klimaqualität KQ		
Indikatorgewichtung ►	1	1	1	1	1	Summe (Spalten 1 bis 5)	normiert	Bewertung
Klimatop								
Baumwiese	100,0%	97,7%	95,5%	80,1%	100,0%	473%	= 100%	sehr gut
Wiese	100,0%	100,0%	85,7%	84,9%	100,0%	471%	99%	sehr gut
Gewässer	91,8%	61,5%	100,0%	100,0%	100,0%	453%	96%	sehr gut
Brache	98,0%	84,6%	81,5%	65,1%	100,0%	429%	91%	gut
Acker	99,3%	69,2%	83,6%	76,1%	85,7%	414%	87%	gut
Laubwald	91,8%	76,9%	97,9%	26,1%	100,0%	393%	83%	gut
Nadelwald	91,8%	76,9%	97,9%	19,9%	100,0%	387%	82%	gut
Mischwald	91,8%	76,9%	97,9%	22,8%	100,0%	389%	82%	gut
Park	98,4%	46,2%	80,1%	34,9%	71,4%	331%	70%	leicht positiv
Gartenstadt/Dorf	50,0%	46,2%	79,6%	34,9%	71,4%	282%	60%	neutral
Versiegelte Fläche (ungenutzt)	0,0%	15,4%	82,7%	84,9%	71,4%	254%	54%	leicht negativ
Verkehrsfläche (normal)	0,0%	15,4%	82,7%	76,1%	42,9%	217%	46%	schlecht
Stadtrand	0,0%	23,1%	79,6%	26,1%	71,4%	200%	42%	schlecht
Verkehrsfläche (übergeordneter Verkehr)	0,0%	15,4%	82,7%	84,9%	14,3%	197%	42%	schlecht
Gewerbe	0,0%	15,4%	85,7%	15,1%	42,9%	159%	34%	sehr schlecht
Verdichtete Bebauung	0,0%	7,7%	85,7%	15,1%	42,9%	151%	32%	sehr schlecht
Industrie	0,0%	15,4%	85,7%	15,1%	0,0%	116%	25%	sehr schlecht
Innenstadt	0,0%	0,0%	78,0%	2,3%	14,3%	95%	20%	extrem schlecht

* KLP = Kaltluftproduktivität, UHI = nächtliche Wärmeinsel, PET = Physiologische Äquivalenttemperatur (PET), VENT = Durchlüftung, LQ = Luftqualität

Die Werteskala der Klimaqualität liegt im Wertebereich zwischen 20 und 100. Nach Gleichung 5 beträgt die theoretische maximale Spannweite 0 bis 100. Anhand der Werteverteilung bei den Klimatoptypen kann die Skala in acht Klassen unterschieden werden (Tab. 12). Dass die neutrale Klasse erst bei 57 beginnt, hängt damit zusammen, dass schlechte Qualitätsstufen unterhalb des Qualitätswertes von 10 in natura nicht erreicht werden und daher eine relative Anhebung des Skalenniveaus sinnvoll ist.

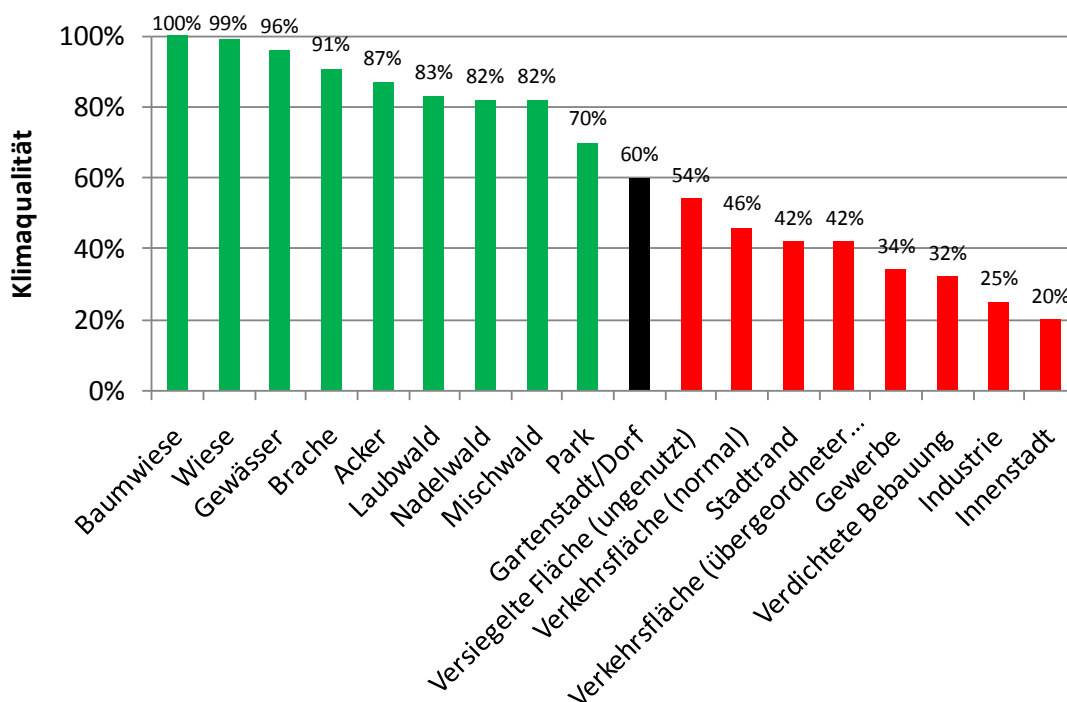


Abb. 4: Klimaqualität der Klimatotypen (sortiert nach normierter Klimaqualität)

Tab. 12: Klassifizierungsstufen der Klimaqualität

Qualitätsstufen		
von	bis	Qualität
92,1 %	100,0 %	sehr gut
80,6 %	92,0 %	gut
69,1 %	80,5 %	leicht positiv
57,6 %	69,0 %	neutral
46,1 %	57,5 %	leicht negativ
34,6 %	46,0 %	schlecht
23,1 %	34,5 %	sehr schlecht
	≤23,0 %	extrem schlecht

4.2.1 Probleme bei der Interpretation von gewichteten Indikatoren

Bei der zuvor hergeleiteten Klimaqualität wurden die fünf Indikatoren Kaltluftproduktivität, nächtliche Wärmeinsel, physiologische Äquivalenttemperatur (PET), aerodynamische Oberflächenrauigkeit und Luftbelastungsindex zu gleichen Anteilen gewichtet, da jeder Indikator einen speziellen Aspekt der humanbiometeorologischen Wirkungskomplexe abdeckt. Damit ist die Klimaqualität objektiv und universell auf möglichst viele Fragestellungen anwendbar.

Zwar lassen sich einzelne Indikatoren in Hinblick auf Spezialfragestellungen anders gewichten, allerdings bedarf dieses einer eingehenden Argumentation und Begründung. Dieses trifft insbesondere dann zu, wenn die Gewichtsänderung nicht sachlich hergeleitet werden kann und damit dem Verdacht der Subjektivität ausgesetzt ist.

Beispiel: Fokussierung der PET um den Faktor 2

Ausgehend von einer linearen Gewichtung der fünf Indikatoren, wird die PET um den Faktor 2 verstärkt und im Gegenzug die Gewichtung der übrigen Indikatoren um 25% gesenkt. In beiden Fällen beträgt die Gewichtungssumme wie üblich 1.

Linear: KLP = 0,20 UHI = 0,20 PET = 0,20 VENT = 0,20 LQ = 0,20
Gewichtet: KLP = 0,15 UHI = 0,15 PET = 0,40 VENT = 0,15 LQ = 0,15

Durch die Gewichtung der PET verzerrt sich die Differenzierung der Klimatoptypen, indem alle Typen eine quantitative Aufwertung erfahren (Abb. 5) und selbst der schlechteste Typ von 20 auf 36 Punkte angehoben wird. Ursache ist die im Vergleich zu den anderen Indikatoren relativ schwache Differenzierung (Amplitude) der PET *zwischen* den Klimatoptypen, sodass sich die Erhöhung des PET-Gewichtungsfaktors sofort auf alle Klimatoptypen auswirkt.

Empfehlung: Die Nutzung der Klimaqualität auf Basis gleichgewichteter Indikatoren ist objektiv nachvollziehbar und deckt einen Großteil möglicher Fragestellungen ab. Sollte dennoch eine spezielle Untersuchung einzelner Indikatoren erforderlich sein, wird empfohlen, unabhängig von der Klimaqualität eine direkte Analyse der betreffenden Indikatoren durchzuführen.

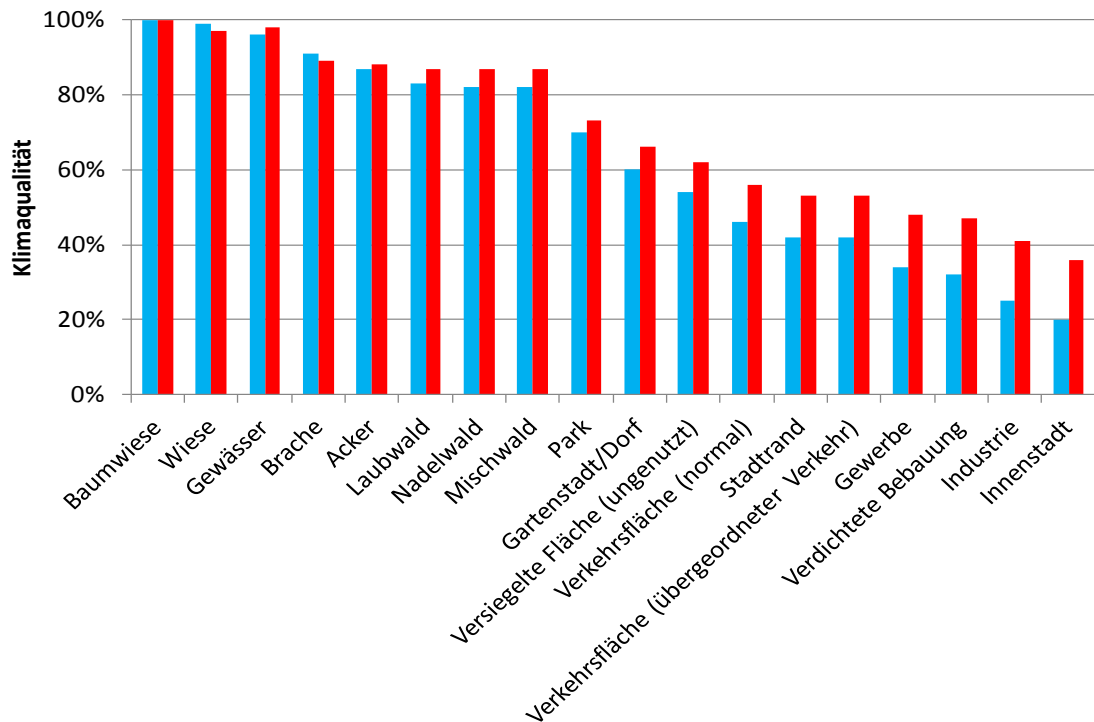


Abb. 5: Vergleich der Klimaqualität unter Berücksichtigung verschiedener Gewichtungsfaktoren (blau = lineare Gewichtung für alle fünf Indikatoren; rot = Übergewichtung der PET um den Faktor 2 und Untergewichtung der übrigen Indikatoren um 25%). Erläuterungen siehe Text.

5 Anwendung

Ausgehend von den theoretischen Grundlagen im vorigen Kapitel wird in diesem Abschnitt erläutert, wie die Klimaqualität mittels der GIS-Software ArcMAP 9.1 abgefragt und verwendet werden kann.

***Hinweis:** Es wird hier vorausgesetzt, dass der Anwender mit der Software ArcMAP 9.x und seinen Programmmodulen hinsichtlich Handhabung und Terminologie vertraut ist. Sollte dieses nicht der Fall sein, wird vor Nutzung dieses Klimamanagementsystems eine Softwareschulung dringend empfohlen. Als Einstiegsliteratur wird auf Wichmann (2008) verwiesen.*

5.1 Informationsumfang bei Übergabe

Bei der erstmaligen Implementierung des Klimamanagementsystems beim Auftraggeber wird ein GIS-Layer der Klimatope geliefert, das in der sogenannten Attributtabelle alle notwendigen Informationen zur Klimaqualität für sämtliche Flächen Gelsenkirchens enthält, die direkt abgerufen werden können. Dabei handelt es sich um folgende Attribute:

- Flächengröße, -nutzungstyp und -nutzungsart auf Grundlage der Gel-senkirchener RFNK (Realfächennutzungskartierung) von 2008
- Klimatopklassifizierung gemäß Kap. 3.2.2
- Klimaqualität gemäß Kap. 4.2
- Flächengröße in ha
- Klimaqualitätsflächenwert absolut (siehe nächstes Kap. 5.3)
- Klimaqualitätsflächenwert in Relation zur Gesamtstadt

Das GIS-System ist so ausgelegt, dass für potenzielle (fallweise) oder reale **Flächenumwidmungen** die genannten Attribute **manuell** geändert werden **müssen**. Dabei muss mangels automatischer Berechnungsfunktionen des GIS der Klimaqualitätsflächenwert der Fläche und derjenige der Stadt manuell neu berechnet werden. Die notwendigen Arbeitsschritte werden hier ebenfalls erläutert.

5.2 Einzelflächenabfrage

Für eine einzelne Fläche können die hinterlegten Klimainformationen mit wenigen Mausklicks abgefragt werden.

Anwendung: *Um die Klimaeigenschaften für eine einzelne Fläche abzufragen, ist in ArcMAP folgendermaßen vorzugehen (Abb. 6):*

1. *Aktivierung des Flächenidentifikationswerkzeuges*
2. *Auswahl der Fläche*
3. *Selektion des GIS-Layers „Klimaqualität“.*

(In der eingeblendeten Tabelle sind die Eigenschaften der ausgewählten Fläche aufgelistet).

5.3 Berechnung des Klimaqualitätsflächenwertes von Flächen

Das „Klimaqualitätsflächenwert“ (KQFW) wichtet die Klimaqualität einer Fläche anhand der Flächengröße mittels der einfachen Beziehung (Gl. 7):

$$\text{KQFW} = \text{KQ} \times \text{A} \quad (7)$$

mit KQFW: Ausgleichspotenzial in ha

KQ: Klimaqualität der Fläche in %

A: Flächengröße in ha

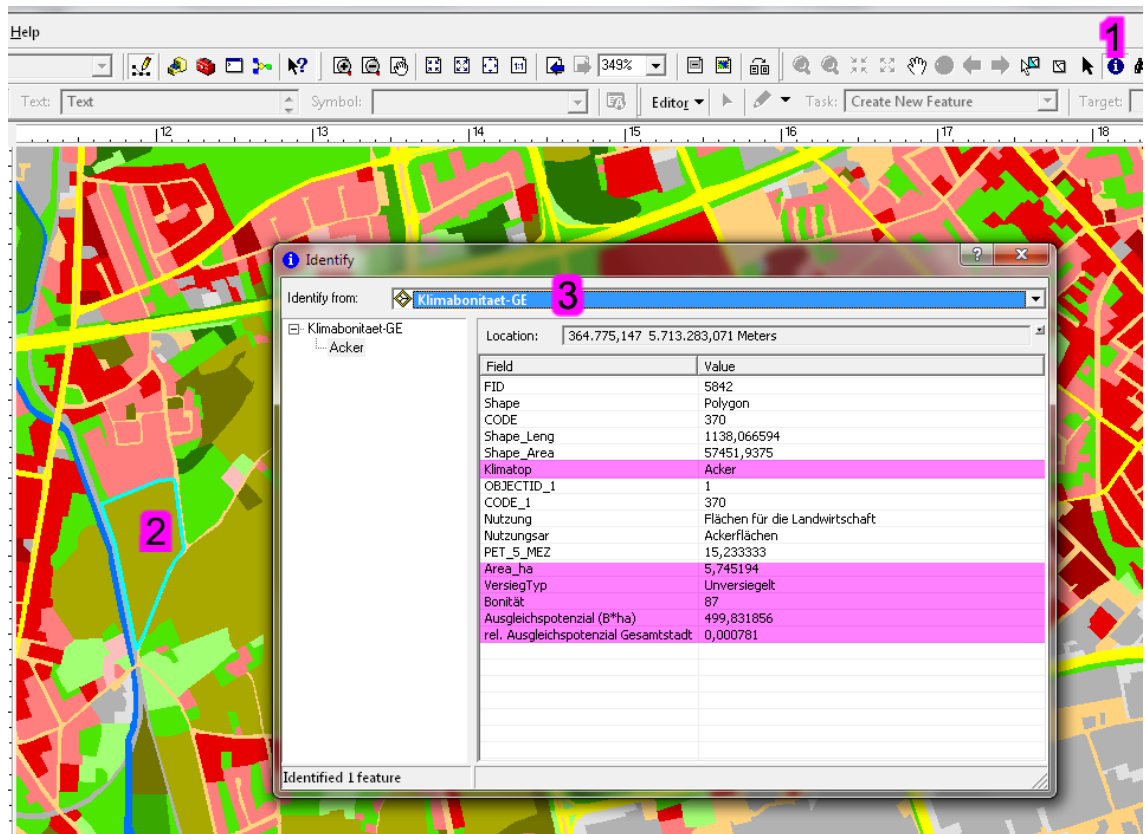


Abb. 6: Abfrage von klimatischen Flächeneigenschaften einer Einzelfläche in ArcMAP

In den Grenzen eines Bezugsgebietes wie beispielsweise des Gesamtgebietes der Stadt Gelsenkirchen gewinnt eine Fläche an klimatischer Bedeutung („Relevanz“) über

- a) die Flächengröße und
- b) die Klimaqualität,

d. h. große oder klimatisch qualitativ hochwertige Flächen haben einen höheren Einfluss auf das Gelsenkirchener Stadtklima als kleine oder klimatisch geringwertige Flächen. Höchste Bedeutung haben demnach große *und* klimatisch hochwertige Flächen.

Der Klimaqualitätsflächenwert ist geeignet, die Klimaqualität von mehreren Flächen gegeneinander abzuwägen oder zu bilanzieren, siehe nächstes Kapitel.

Anwendung: Falls eine **Einzelfläche** umgewidmet wird, ist zunächst entsprechend der neuen Nutzung das dazugehörige *Klimatop* gemäß Tab. A1 zu ermitteln und dann die entsprechende Klimaqualität gemäß Tab. 11 in die Attributta-

belle einzutragen. Anschließend wird der Klimaqualitätsflächenwert manuell durch Multiplikation der Klimaqualität mit der Flächengröße (in ha) berechnet und ebenfalls in die Tabelle eingetragen.

Falls Umwidmungen für **mehrere Flächen** berechnet werden müssen, kann nach Zuordnung der Klimaqualität die Berechnung des Klimaqualitätsflächenwertes auch über das Werkzeug „Feldberechnung“ (Abb. 7) durchgeführt werden.

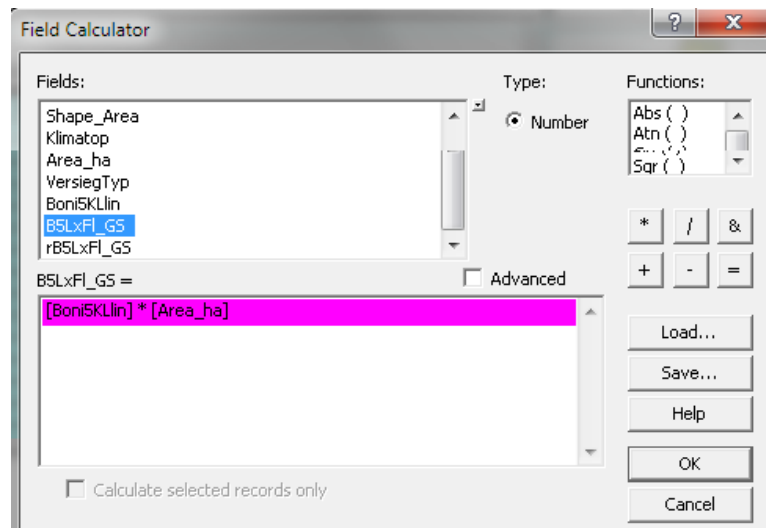


Abb. 7: Berechnung des Klimaqualitätsflächenwertes mit dem Berechnungswerkzeug „Feldberechnung“ für Attributtabelle in ArcMAP

5.4 Bilanzierungen der Klimaqualität und Ausgleichspotenziale

5.4.1 Vergleich zweier Einzelflächen

Der einfachste Fall der Bilanzierung ist der Vergleich von zwei konkurrierenden Einzelflächen. Bereits anhand des Vergleiches beider Klimaqualitätsflächenwerte ist zu erkennen, welche Fläche klimatisch „wertvoller“ ist. Derartige Abwägungen können z .B. zur Abschätzung des Nutzens von Parks in dichter Bebauung dienen.

Beispiel:

Eine Fläche von 3 ha Größe und einer Klimaqualität von 99 % (Wiese) hat einen Klimaqualitätsflächenwert von $3 \text{ ha} \times 99 \% = 297 \text{ ha}$. Angenommen, eine zweite Vergleichsfläche von 14,85 ha Größe hat eine Qualität von 20 % (Innenstadtklimatop), so beträgt das Ausgleichspotenzial ebenfalls 297 ha. Der Unterschied ist der, dass die kleinere „gute“ Fläche die knapp fünfmal so große

„schlechte“ Fläche klimatisch kompensiert. Die kleine Fläche ist damit hochwertiger („*Bessere Klimaqualität auf kleinem Raum*“).

5.4.2 Berechnung der mittleren Klimaqualität verschiedener Flächen

In der Regel ist die Bestimmung der mittleren Klimaqualität von mehreren Einzelflächen oder Flächenverbänden erforderlich. Dieses ist mit dem flächengewichteten Mittelwert der Klimaqualität möglich.

Hierzu wird zunächst die Klimaqualität der betreffenden Einzelflächen mit der jeweiligen Flächengröße multipliziert (= jeweilige Klimaqualitätsflächenwerte), anschließend aufsummiert und durch die Gesamtfläche der betreffenden Flächen dividiert (Gl. 8.)

$$\overline{KQFW}_{Gesamt} = \frac{\sum(KQFW_i A_i)}{(\sum A_{Gesamt})} \quad (8)$$

Anwendung:

1. In ArcMAP werden entweder per Hand oder über das Selektionswerkzeug der Attributtabelle die gewünschten Flächen vorselektiert.
2. Anschließend wird in der Attributtabelle die Auswahlansicht auf die selektierten Flächen eingeschränkt.
3. Nun können für die gewünschten Parameter über das Kontextmenü „Statistik“ der betreffenden Spalten die benötigten Größen abgefragt werden, siehe Abb. 8. Die „Summe“ des Feldes „Area_ha“ gibt die Gesamtflächengröße der selektierten Flächen an, die „Summe“ des Feldes „Klimaqualitätsflächenwert“ das dazugehörige Gesamtausgleichspotenzial.
4. Beide Werte werden in Gl. 8 eingesetzt, um die mittlere Klimaqualität zu berechnen.

5.4.3 Gesamtstädtische Bilanzierungen

Bei der gesamtstädtischen Bilanzierung werden die Klimaqualitätsflächenwerte zu untersuchender Flächenkontingente im Vergleich zum Klimaqualitätsflächenwert der gesamten Stadt betrachtet.

Das Verfahren ist methodisch recht einfach, bedarf aber im GIS einiger Bedienschritte. Zunächst wird in der Attributtabelle für alle Flächen der Stadt über die Statistikfunktion die Summe der Klimaqualitätsflächenwerte abgefragt und der Wert notiert. Anschließend wird die gleiche Prozedur für die untersuchenden Flächen durchgeführt. Man erhält die Klimaqualitätsflächenwertsumme des Flächenkontingents. Diese lässt sich durch Division mit der Klimaqualitätsflächen-

wertsumme der Gesamtstadt als relative Größe bezogen auf die Gesamtstadt darstellen, beispielsweise als Prozentanteil. Dieser Prozentanteil sagt aus, mit welchem Anteil das Flächenkontingent der betrachteten Fläche zum gesamtstädtischen Klimazustand beiträgt.

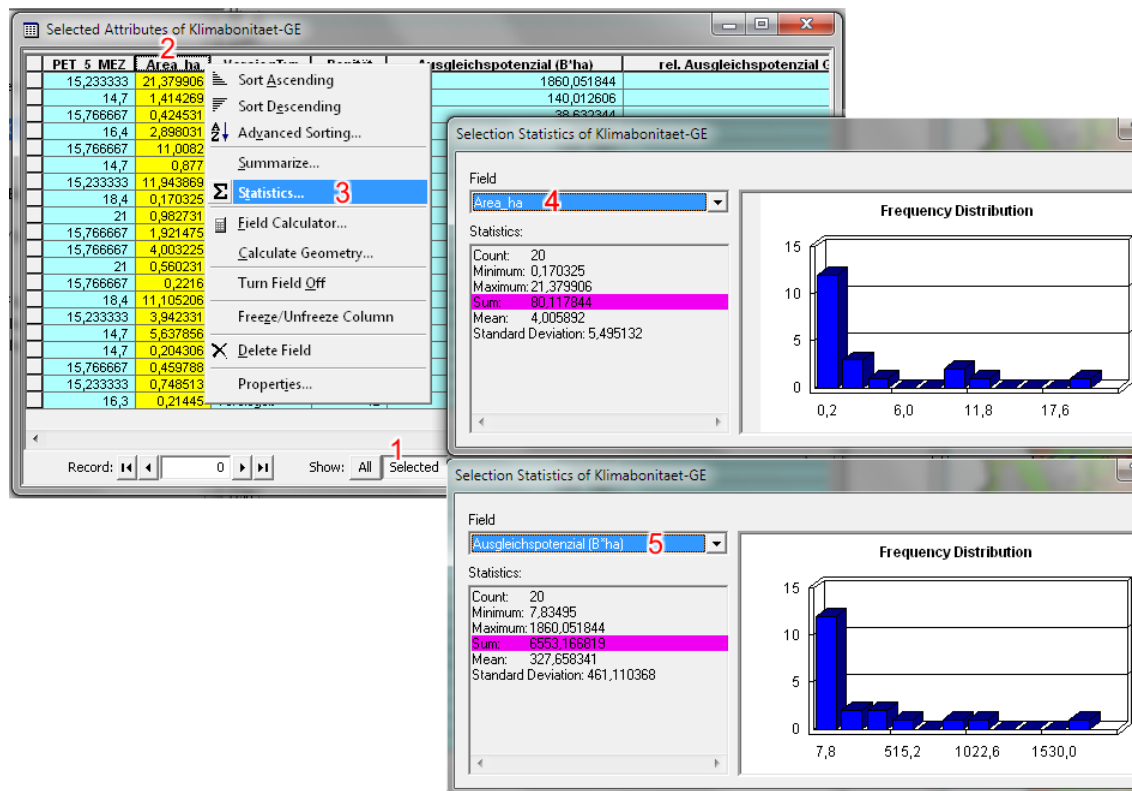


Abb. 8: Abfrage von zusammenfassenden klimatischen Eigenschaften mehrerer (selektierter) Flächen über das „Statistik“-Werkzeug der Attributtabelle einer Einzelfläche in ArcMAP

Beispiel:

In einer Überschlagsrechnung soll der Einfluss aller versiegelten und unversiegelten Flächen auf das Klima der Stadt Gelsenkirchen untersucht werden. Eine entsprechende Klassifizierung „Versiegelungstyp“ ist in der Attributtabelle bereits hinterlegt (vgl. Abb. 1, S. 13) und lässt sich kartografisch darstellen, siehe Abb. 9.

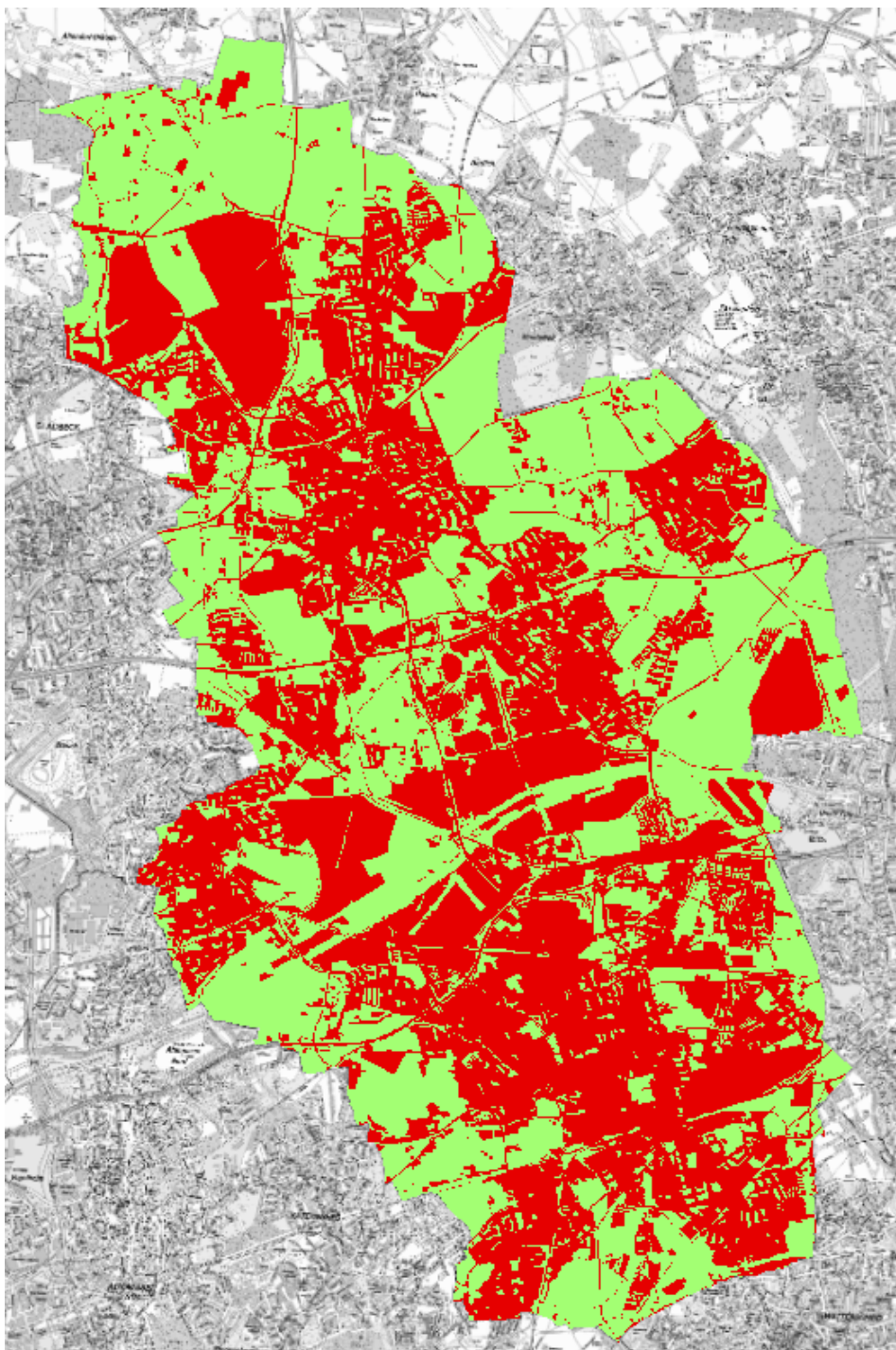


Abb. 9: Räumliche Lage der unversiegelten (grün) und versiegelten (rot) Flächen im Stadtgebiet von Gelsenkirchen

Wenn nacheinander die gesamtstädtischen, unversiegelten und versiegelten Flächen selektiert und über das Statistikwerkzeug ausgezählt werden, erhält man alle Daten, die zur Bilanzierung benötigt werden (Tab. 13). Die Flächengrößen A (Spalte 2), die Klimaqualitätsflächenwerte KQFW (Spalte 4) sowie der Anteil am gesamtstädtischen Klima (Spalte 6) liefert die Attributtabelle. Manuell berechnet werden die relativen Flächenanteile (Spalte 3) sowie die mittlere Kli-

maqualität KQ (Spalte 5). Letztere berechnet sich nach Gl. 8 durch die Division von KP durch A.

Tab. 13: Klimaqualität der versiegelten und unversiegelten Flächen in Gelsenkirchen

	1	2	3	4	5	6
		GIS-Abfrage	manuelle Berechnung	GIS-Abfrage	manuelle Berechnung	GIS-Abfrage
1	Gebiet	Fläche		Klimaqualitätsflächenwert KQFW	Mittlere Klimaqualität KQ	Beitrag zum Stadtklima
2		A		$= \sum (KQ_i \times A_i)$	$= AP / A_t$	$= KQ_i / KQFW_{GesStadt}$
3		Ha	%	ha	%	%
4	Gesamtstadt	10.843,1	100,0%	639.613,2	58,9	100,0%
5	versiegelt	5.469,9	50,4%	204.582,2	37,4	32,0%
6	unversiegelt	5.373,2	49,6%	435.031,1	80,9	68,0%

Diese Tabelle veranschaulicht auch deutlich die unterschiedlichen Wertigkeiten der versiegelten und unversiegelten Flächen. Obwohl der Flächenanteil für beide Versiegelungstypen mit ca. 50% gleich groß ist, ist der Klimaqualitätsflächenwert der unversiegelten Flächen aufgrund der hohen Klimaqualität von 81% („gut“) mit 435.000. ha mehr als doppelt so groß wie bei den versiegelten Flächen (204.000 ha), deren Klimaqualität als „schlecht“ (37,4 %) einzustufen ist. Am Klimazustand der Gesamtstadt mit seiner neutralen Klimaqualität (59%) entsprechend einem Klimaqualitätsflächenwert von 639.000 ha (= 100%) haben die unversiegelten Flächen einen Anteil von 68%.

5.4.4 Selektive Bilanzierungen

Bei der selektiven Bilanzierung werden sowohl die zu untersuchenden Flächen als auch der Bezugsraum frei definiert.

So ist es beispielsweise möglich, die Bedeutung von unversiegelten Flächen nur mit Bezug zu den gesamten unversiegelten Flächen Gelsenkirchens zu betrachten (d. h. unter Ausschluss aller versiegelten Flächen). Dazu reicht es bereits aus, in o. g. Tab. 11 die Klimaqualitätsflächenwerte aller unversiegelten Flächen von ca. 435.000 ha gleich 100% zu setzen und die versiegelten Flächen zu ignorieren und zu löschen.

Ein anderes Beispiel ist die geplante Flächenumwidmung einer Freifläche und seine Auswirkung auf die nähere klimafunktionale Umgebung, beispielsweise ein zugehöriges Kaltlufteinzugsgebiet. In diesem Fall kann die Beurteilung neben dem Bezug zur Gesamtstadt auch in Bezug zu allen unversiegelten Flächen oder nur in Bezug auf den lokalen Wirkraum untersucht werden.

Eine derartige Umwidmung soll nachfolgend am fiktiven Planbeispiel einer Umwidmung von Freiflächen zu einem Wohngebiet am Kraftwerksstandort Heßler dargestellt werden. Abb. 10. zeigt das Plangebiet im Ist-Zustand. Der Plan-Zustand ist in Abb. 11 dargestellt. Tab. 14 enthält die Ergebnisse.

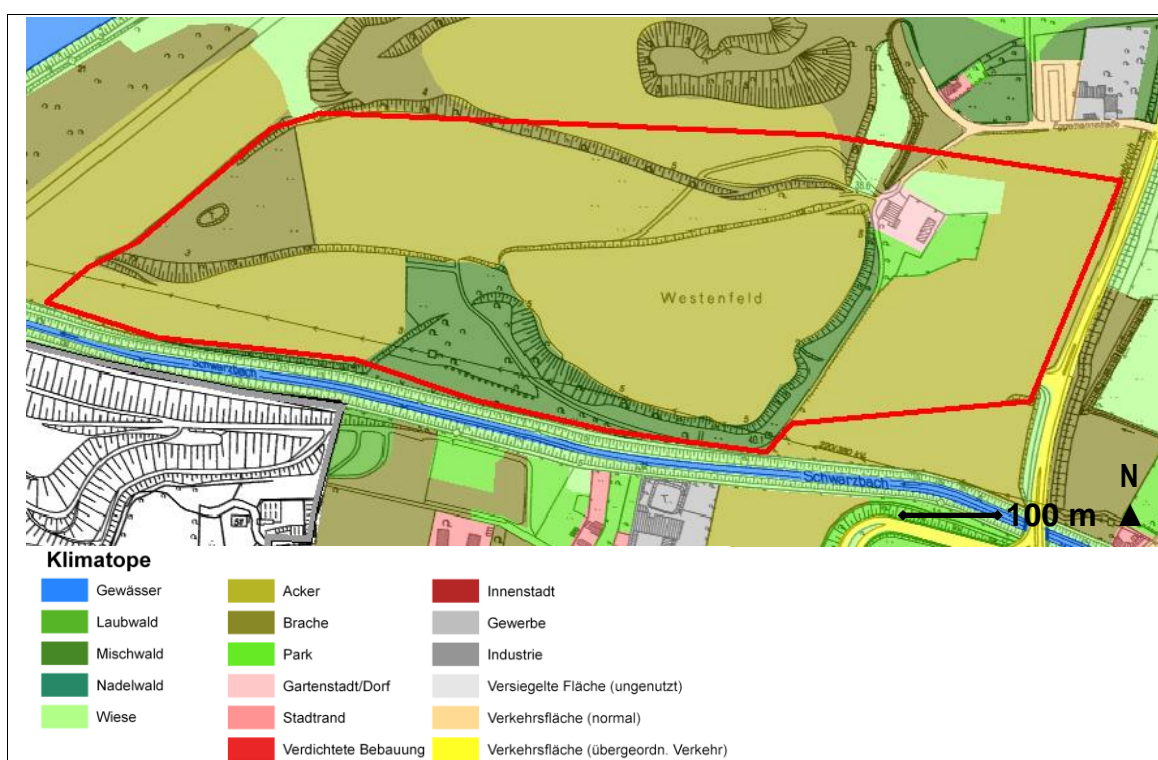


Abb. 10: Karte der Klimatope zum fiktiven Plangebiet (rote Grenze) am Kraftwerksstandort Gelsenkirchen Heßler im Ist-Zustand (2011)

Die 25,5 ha große Fläche ist im Ist-Zustand überwiegend land- und forstwirtschaftlich geprägt. Abgesehen vom Gehöft (im rechten Bereich der Planfläche, rosa) ist daher die Klimaqualität KQ der Areale mit Werten zwischen 70 und 99 Punkten gemäß Tab. 12 (S. 29) als „positiv“ bis „sehr gut“ einzustufen. Die Verrechnung der Klimaqualität der Flächen mit den jeweiligen Flächengrößen ergibt einen Klimaqualitätsflächenwert KQFW von 2.204 ha.

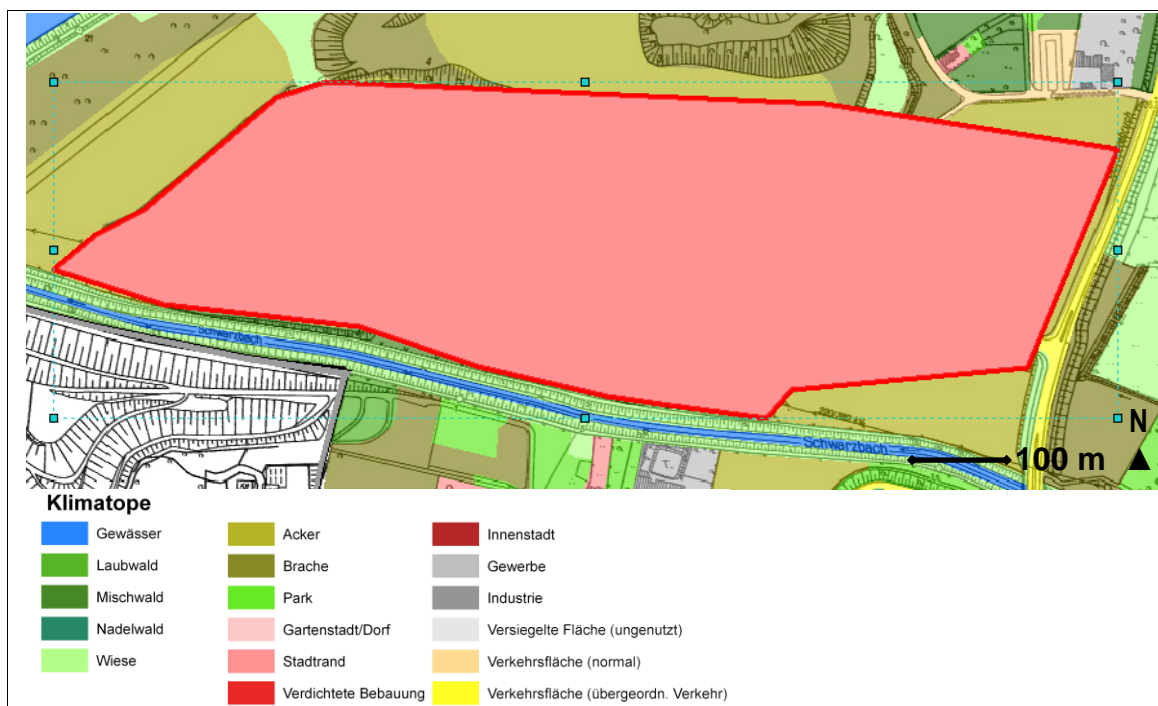


Abb. 11: Karte der Klimatope zum fiktiven Plangebiet am Kraftwerksstandort Gelsenkirchen Heßler im Plan-Zustand

Tab. 14: Auswirkung der fiktiven, sukzessiven Umwidmung von Freiflächen zu versiegelten Flächen am Kraftwerksstandort Gelsenkirchen Heßler

Klimatop	Fläche A ha	Klimaqualität KQ 1	Klimaqualitätsflä- chenwert KQFW ha
Ist-Zustand			
Acker	18,8	87	1.636
Wiese	0,5	99	50
Brache	1,9	91	173
Gartenstadt/Dorf	0,3	60	19
Park	0,4	70	31
Mischwald	3,6	82	295
Gesamtgebiet	25,5	86	2.204
Plan-Zustand			
Stadttrand	25,5	42	1071
Differenz (Plan-Ist-Zustand)			
Absolute Differenz	0,0		-1.133
(Relative Differenz)	(0 %)		(-51 %)

Im Plan-Zustand wird das komplette Areal in ein aufgelockertes Wohngebiet vom Typ des „Stadtrandklimatopes“ umgewidmet. Die Klimaqualität KQ für diesen Klimatoptyp beträgt 42 Punkte und ist damit als „schlecht“ einzustufen. Der entsprechende Klimaqualitätsflächenwert beträgt 1.071 ha. Damit verschlechtert sich der Klimaqualitätsflächenwert des Plangebietes um 1.133 ha bzw. um 51%.

Für dieses fiktive Beispiel lässt sich das Flächenmanagementwerkzeug theoretisch auch für die weiterführende Untersuchung möglicher Ausgleichsmaßnahmen nutzen. Beispielweise könnte der Klimaqualitätsverlust der Flächenumwidmung dadurch kompensiert werden, das an anderer Stelle in der Stadt bestehende Freiflächen von „leicht positiver“ Klimaqualität soweit aufgewertet werden, dass der Anstieg des Klimaqualitätsflächenwertes genau dem Klimaqualitätsflächenwertverlust der Planfläche entspricht.

6 Ausblick

Das in diesem Projekt für die Stadt Gelsenkirchen entwickelte Klimamanagementsystem ermöglicht die objektive klimatisch-lufthygienische Quantifizierung und Bilanzierung von Flächen auf B-Planebene und deckt einen Großteil möglicher Fragestellungen in der Umweltplanung ab. Damit lassen sich klimatische Untersuchungen praxisgerecht durchführen. Das Klimamanagementsystem dient insbesondere als Entscheidungsinstrument zur Beurteilung der Relevanz von Flächenumwidmungen in der Vorplanung und der damit verbundenen Notwendigkeit zur Durchführung weiterführender klimatologischer Untersuchungen.

Da die Umsetzung im GIS auch die spätere Anpassung der Bewertungsmaßstäbe erlaubt (beispielsweise in Hinblick auf sich ändernde Wertmaßstäbe im Zuge der Klimawandelfolgenanpassung), ist das Klimamanagementsystem auch in Zukunft praxisgerecht einsetzbar.

7 Literatur

- Baumüller J. & U. Reuter (1995): Die summarische Bewertung von Luftschadstoffen durch einen Luftbelastungsindex. – In: Staub - Reinhaltung der Luft, Vol. 55, S. 137-141
- Höppe, P. (1984): Die Energiebilanz des Menschen. Wiss. Mitt. Meteorol. Inst. Uni München, 49.
- Hupfer, P. & W. Kuttler (Hrsg.) (2005): Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. 11. Aufl., Teubner, Stuttgart, Leipzig, 554 S.
- Kuttler, W., A. Goldbach, N. Müller, H. Püllen, D. Dütemeyer & A.-B. Barlag (2009): E4.3 - Handlungsleitfaden zur Verbesserung des Stadtklimas. – Teilprojekt des Institutes für Geographie, Abteilung Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie der Universität Duisburg-Essen, Campus Essen, im interdisziplinären BMBF-Forschungsprojekt „*dynaklim* - Dynamische Anpassung regionaler Planungs- und Entwicklungsprozesse an die Auswirkungen des Klimawandels am Beispiel der Emscher-Lippe-Region (Nördliches Ruhrgebiet)“ im Rahmen des Programms "Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten (KLIMZUG)" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), Berlin. (in Bearbeitung)
- Kuttler, W., M. Mersmann, D. Dütemeyer & A.-B. Barlag (2011): Gesamtstädtische Klimaanalyse Gelsenkirchen - Abschlussbericht. Durchgeführt im Auftrag der Stadt Gelsenkirchen, Referat Umwelt. 196 S.
- Lettau, H. (1969): Note on an aerodynamic roughness parameter estimation on the basis of roughness-element distribution. – J. Appl. Meteorol., 8, 828 - 832.
- LUBW - Landesanstalt für Umweltschutz Baden- Württemberg (2004): Entwicklung eines Luftqualitätsindex (langfristige Wirkung) für Baden-Württemberg und seine Integration mit anderen Luftqualitätsindices. Endbericht. 173 S., LUBW, Karlsruhe
- Monteith, J. L. (1978): Grundzüge der Umweltphysik. 183 S. Steinkopf, Darmstadt.
- Mayer, H., F. Kalberlah, D. Ahrens & U. Reuter (2002): Analyse von Indizes zur Bewertung der Luft. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 62, 177-183.
- Prandtl, L. (1957): Führer durch die Strömungslehre. 5. Aufl. Braunschweig.
- Rost, J. & H. Mayer (2004): Berechnungen zur räumlichen und zeitlichen Variabilität des planungsrelevanten FoBiG Luftqualitätsindex an ausgewählten Luftmessstationen in Baden-Württemberg - Teil III: Langzeitindex. Untersuchung im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Freiburg 80S.
- Stadt Aalen (2000): Landschaftsplan – Erläuterungsbericht vom 02.05.2000. – Stadt Aalen, Grünflächen- und Umweltamt. 523 S.
- Stadt Gelsenkirchen 2008: Realflächennutzungskartierung der Stadt Gelsenkirchen (Stand: 2008).
- Straßburger, A. (2004) : Analyse atmosphärischer Spurengase zur Bestimmung des lufthygienischen Erholungswertes eines urbanen Parks. Online Ressource. Diss. Univ. Duisburg-Essen, 175 S.
- Stull, R. B. (1988): An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 666 S.
- VDI RL 3787, Blatt 1 (1997, überprüft 2003): Umweltmeteorologie - Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen.. Düsseldorf
- VDI RL 3787, Blatt 2 (2008): Umweltmeteorologie - Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima. 32 S. Düsseldorf.

Wichmann, H. (2008): ArcGIS 9 - das deutschsprachige Handbuch für ArcView und ArcEditor, Paderborn, 526 S.,

Wiesner, K. P. (1986): Programme zur Erfassung von Landschaftsdaten, eine Bodenerosionsgleichung und ein Modell der Kaltluftentstehung. = Heidelberger Geogr. Arb., 79. Heidelberg, 83 S.

Anhang

Klimatopklassifizierung der Flächennutzungen

Tab. A1: Klassifizierung der Gelsenkirchener Flächennutzungsarten (Stadt Gelsenkirchen 2008) zu Klimatopen

FN-Klasse- FN-Code – FN-Art	KLIMATOP
Brachflächen (gew. /ind.) - 460 - gewerblich und industrielle Brachflächen	Gewerbe
Brachflächen (gew. /ind.) - 461 - z.Z. ungenutzte Flächen mit erkennbaren Erschließungsmaßnahmen (gew. /ind. Brachflächen)	Gewerbe
Brachflächen (gew. /ind.) - 462 - z.Z. ungenutzte Flächen, die im FNP für Gewerbe- und Industrieansiedlungen vorgesehen sind	Gewerbe
Brachflächen (gew. /ind.) - 463 - Sonstige Flächen, die z.B. im FNP für andere Nutzungen vorgesehen sind (gew. /ind. Brachflächen)	Gewerbe
Brachflächen (gew. /ind.) - 481 - Gebäude /Anlagen (Zechenbrachen)	Gewerbe
Brachflächen (gew. /ind.) - 482 - Räume, ungenutzte Betriebsflächen (Zechenbrachen)	Gewerbe
Brachflächen (gew. /ind.) - 483 - Sonstige Flächen (Zechenbrachen)	Gewerbe
Brachflächen (gew. /ind.) - 490 - Nichtgenutzte Verkehrsflächen	Gewerbe
Brachflächen (gew. /ind.) - 491 -	Gewerbe
Flächen für Bahnanlagen - 181 - Bahnhöfe	Gewerbe
Flächen für Bahnanlagen - 182 - Betriebsgebäude (Güterbahnhöfe, Ausbesserungswerke, Lokschuppen)	Gewerbe
Flächen für Bahnanlagen - 183 - Gleisanlagen (Stadtbahn, Straßenbahn)	Verkehrsfläche (normal)
Flächen für Bahnanlagen - 184 - Sonstige Flächen (Bahnanlagen)	Verkehrsfläche (normal)
Flächen für Bahnanlagen - 56 - Bus- und Straßenbahndepot	Verkehrsfläche (normal)
Flächen für den überörtlichen Verkehr - 110 - Autobahn u. autobahnähnliche Straßen	Verkehrsfläche (übergeordneter Verkehr)
Flächen für den überörtlichen Verkehr - 140 - übergeordnete Straßen u. Hauptstraßen	Verkehrsfläche (übergeordneter Verkehr)
Flächen für die Landwirtschaft - 361 - Wiesen und Weiden	Wiese
Flächen für die Landwirtschaft - 362 - Obstwiesen und Obstweiden	Wiese
Flächen für die Landwirtschaft - 370 - Ackerflächen	Acker
Flächen für die Landwirtschaft - 381 - Bauliche Anlagen (Erwerbsgartenbau, z.B. Treibhäuser)	Gartenstadt/Dorf
Flächen für die Landwirtschaft - 382 - Anbauflächen, Sonderkulturen, Baumschulen	Park
Flächen für die Landwirtschaft - 383 - Sonstige Flächen (Erwerbsgartenbau)	Park
Flächen für die Landwirtschaft - 471 - Landwirtschaftliche Brachen	Brache
Flächen für die Landwirtschaft - 91 - Gebäude /Anlagen (Landwirtschaft)	Gartenstadt/Dorf
Flächen für die Landwirtschaft - 93 - Sonstige Flächen (Landwirtschaft)	Gartenstadt/Dorf
Gemeindebedarfsflächen - 81 - öffentliche Verwaltungen, Strafvollzug	Verdichtete Bebauung
Gemeindebedarfsflächen - 82 - Gesundheitswesen (Krankenhäuser, Kliniken)	Verdichtete Bebauung

FN-Klasse- FN-Code – FN-Art	KLIMATOP
Gemeindebedarfsflächen - 83 - öffentliche- u. private Bildungseinrichtungen, Bibliotheken, Berufsbildungszentren	Verdichtete Bebauung
Gemeindebedarfsflächen - 84 - Kindergärten, Hort, Jugend- u. Altenheime /Wohnanlagen	Stadttrand
Gemeindebedarfsflächen - 85 - Kirchen u. Gemeindehäuser, Klöster	Verdichtete Bebauung
Gemeindebedarfsflächen - 86 - Polizei, Feuerwehr, Rettungsstationen, Bunkeranlagen	Verdichtete Bebauung
Gemeindebedarfsflächen - 87 - Post, Fernmeldewesen	Verdichtete Bebauung
Gemeindebedarfsflächen - 88 - Kulturstätten (Museen, Theater)	Verdichtete Bebauung
Gemeindebedarfsflächen - 89 - Sonstige Flächen (Gemeindebedarf, z.B. Tierheime)	Verdichtete Bebauung
Gemischte Bauflächen - 160 - Fußgängerzone	Innenstadt
Gemischte Bauflächen - 40 - Mischbauflächen	Verdichtete Bebauung
Gewerbliche Bauflächen (ASB) - 51 - Gebäude /Anlagen (Gewerbe)	Gewerbe
Gewerbliche Bauflächen (ASB) - 52 - Lagerflächen (Gewerbe)	Gewerbe
Gewerbliche Bauflächen (ASB) - 53 - betriebliche Freiflächen (mögliche Reserveflächen, Gewerbe)	Versiegelte Fläche (ungenutzt)
Gewerbliche Bauflächen (ASB) - 54 - Parkplatzflächen in Gewerbeflächen	Verkehrsfläche (normal)
Gewerbliche Bauflächen (ASB) - 55 - städtischer Bauhof /Fuhrpark, Stadtwerke, Autobahnmeiserei, TÜV	Verkehrsfläche (normal)
Gewerbliche Bauflächen (ASB) - 58 - Fernmeldewesen	Gewerbe
Gewerbliche Bauflächen (GIB) - 61 - Gebäude /Anlagen (Industrie)	Industrie
Gewerbliche Bauflächen (GIB) - 61 - Lagerflächen (Industrie)	Gewerbe
Gewerbliche Bauflächen (GIB) - 62 - Lagerflächen (Industrie)	Gewerbe
Gewerbliche Bauflächen (GIB) - 63 - betriebliche Freiflächen (mögliche Reserveflächen, Industrie)	Gewerbe
Gewerbliche Bauflächen (GIB) - 64 - Parkplatzflächen (Industrie)	Verkehrsfläche (normal)
Gewerbliche Bauflächen (GIB) - 66 - Sonstige Flächen (Industrie)	Industrie
Grünflächen - 271 - Gestaltete Grünflächen im hausnahen Bereich (Kriterien 10, 20, 30, 40, 91)	Park
Grünflächen - 272 - Grünanlagen (Parks, botanische Gärten, Zoo)	Park
Grünflächen - 273 - Sonstige Grünflächen	Park
Grünflächen - 281 - Bauliche Anlagen (Friedhof)	Park
Grünflächen - 282 - Belegungs- u. Grünflächen (Friedhof)	Park
Grünflächen - 283 - Erweiterungsflächen (Friedhof)	Park
Grünflächen - 284 - Sonstige Flächen (Friedhof)	Park
Grünflächen - 291 - Freiflächen im hausnahen Bereich (Kriterien 10, 20, 30, 40, 91)	Park
Grünflächen - 292 - Dauerkleingärten, Kleingartenanlagen, Schrebergärten	Park
Grünflächen - 293 - Grabeland	Park
Grünflächen - 294 - Sonstige Flächen (Kleingärten)	Park
Grünflächen - 301 Sportplätze	Park
Grünflächen - 302 - Frei-, Strandbäder	Park
Grünflächen - 303 - Tennisplätze	Park
Grünflächen - 304 - Anlagen für den Wassersport (Sportbootliegeplätze, Stege)	Park

FN-Klasse- FN-Code – FN-Art	KLIMATOP
Grünflächen - 305 - Hundedressurplätze	Wiese
Grünflächen - 306 - Reit-, Rennplätze	Wiese
Grünflächen - 307 - Golfplätze	Wiese
Grünflächen - 308 - Spiel-, Bolzplätze	Wiese
Grünflächen - 309 - Sonstige Freizeitanlagen (Minigolf, Schießstand, Freizeitpark, etc.)	Park
Grünflächen - 313 - Sonstige Flächen (Campingplätze)	Wiese
Grünflächen - 320 - Begleitgrün	Park
Grünflächen - 321 - Gehölze (Begleitgrün)	Park
Grünflächen - 322 - Rasen, Kleingehölze (Begleitgrün)	Wiese
Halden und Deponien - 243 - Deponieflächen	Gewerbe
Halden und Deponien - 244 - Rekultivierte Deponieflächen	Brache
Halden und Deponien - 250 - Schüttungsflächen für Erde, Schutt	Gewerbe
Halden und Deponien - 501 - Halden, in Schüttung oder Abtragung befindlich	Gewerbe
Halden und Deponien - 502 - Rekultivierte Halden, auch Teile einer Halde	Brache
Halden und Deponien - 503 - Sonstige Flächen (Halden)	Gewerbe
sonstige Verkehrsflächen - 152 - Sonstige Wege /Straßen	Verkehrsfläche (normal)
sonstige Verkehrsflächen - 171 - Parkplatzflächen	Verkehrsfläche (normal)
sonstige Verkehrsflächen - 172 - Parkhäuser	Verkehrsfläche (normal)
sonstige Verkehrsflächen - 173 - Busbahnhöfe	Verkehrsfläche (normal)
sonstige Verkehrsflächen - 174 - Sonstige Flächen (Verkehr, z.B. Garagenhof nicht zu 10-40 gehörend)	Verkehrsfläche (normal)
sonstige Verkehrsflächen - 200 - Sonstige öffentliche Plätze	Versiegelte Fläche (ungenutzt)
Spiel- und Sportanlagen - 71 - Hallenbäder	Verdichtete Bebauung
Spiel- und Sportanlagen - 72 - Turn-, Tennis-, Eissport-, Reithallen	Verdichtete Bebauung
Spiel- und Sportanlagen - 74 - Stadion	Verdichtete Bebauung
Spiel- und Sportanlagen - 75 - bauliche Anlagen zu Sport- u. Freizeistätten	Stadtrand
Spiel- und Sportanlagen - 76 - Sonstige Flächen (Spiel- und Sportanlagen)	Stadtrand
Ver- und Entsorgung - 211 - Gebäude /Anlagen (Energieversorgung)	Gewerbe
Ver- und Entsorgung - 212 - Lagerflächen (Energieversorgung)	Gewerbe
Ver- und Entsorgung - 213 - Umspannanlagen	Gewerbe
Ver- und Entsorgung - 215 - Sonstige Flächen (Energieversorgung, z.B. Freiflächen)	Gewerbe
Ver- und Entsorgung - 221 - Gebäude /Anlagen (Wasserversorgung, z.B. Pumpstationen, Wassertürme)	Gewerbe
Ver- und Entsorgung - 231 - Gebäude /Anlagen (Abwasserbeseitigung, z.B. Pumpstationen)	Gewerbe
Ver- und Entsorgung - 232 - Klärteiche u. -becken	Gewässer
Ver- und Entsorgung - 233 - Regenrückhaltebecken	Wiese
Ver- und Entsorgung - 234 - Sonstige Flächen (Abwasserbeseitigung, z.B. Freiflächen)	Wiese

FN-Klasse- FN-Code – FN-Art	KLIMATOP
Ver- und Entsorgung - 242 - Gebäude /Anlagen (Abfallbeseitigung)	Gewerbe
Ver- und Entsorgung - 246 - Betriebsflächen, Sammelstellen für Recycling /Kompostierungsflächen	Gewerbe
Ver- und Entsorgung - 247 - Sonstige Flächen (Abfallbeseitigung)	Gewerbe
Wald - 400 - Laubwald	Laubwald
Wald - 410 - Nadelwald	Nadelwald
Wald - 420 - Mischwald	Mischwald
Wald - 431 - Gehölzbestand	Mischwald
Wald - 432 - Baumgruppen und Baumreihen	Park
Wald - 441 - Aufforstungen und Anpflanzungen	Park
Wald - 442 - Kahlschlag	Brache
Wald - 472 - Verbuschte Brachflächen	Brache
Wald - 473 - Sonstige Flächen, die z.B. im FNP für Grünflächen vorgesehen sind	Brache
Wasserflächen - 331 - Fließgewässer	Gewässer
Wasserflächen - 332 - Ausgebaute Gewässer	Gewässer
Wasserflächen - 333 - Sonstige Gewässer	Gewässer
Wasserflächen - 341 - Schleusenanlagen (Kanäle und Häfen)	Gewässer
Wasserflächen - 342 - Kanäle	Gewässer
Wasserflächen - 343 - Hafengewässer	Gewässer
Wasserflächen - 344 - Sonstige Flächen (Kanäle und Häfen)	Gewässer
Wasserflächen - 351 - naturnahe, stehende Gewässer	Gewässer
Wasserflächen - 354 - Teiche in Parkanlagen	Gewässer
Wasserflächen - 355 - Fischzuchtgewässer	Gewässer
Wohnbauflächen - 10 - Bebaute Flächen, dem Wohnen dienend, bis 3 Geschosse	Stadttrand
Wohnbauflächen - 151 - Wohn- u. Erschließungsstraßen	Verkehrsfläche (normal)
Wohnbauflächen - 20 - Bebaute Flächen, dem Wohnen dienend, bis 5 Geschosse	Verdichtete Bebauung
Wohnbauflächen - 30 - Bebaute Flächen, dem Wohnen dienend, über 5 Geschosse	Innenstadt
Wohnbauflächen - 451 - Ungenutzte Flächen innerhalb von Wohnbereichen (Baulücken)	Brache
Wohnbauflächen - 452 - z.Z. ungenutzte Flächen mit erkennbaren Erschließungsmaßnahmen (Wohnbrache)	Brache
Wohnbauflächen - 453 - z.Z. ungenutzte Flächen, die im FNP für Wohnbebauung vorgesehen sind	Brache
Wohnbauflächen - 454 - Sonstige Flächen, die z.B. im FNP für andere Nutzungen vorgesehen sind (Wohnbrache)	Brache

Berechnung der Kaltluftproduktion

Auf der ÅNGSTRØM-Gleichung basierender Ansatz von Wiesner (1986)

$$V_{KL} = \frac{\alpha_{ST} \varepsilon (a - b10^{-ce})(T_{KL} - T_B) \Delta t A_F}{\rho_{KL} c_p \Delta T_R} \quad [\text{m}^3] \quad (1)$$

mit V_{KL}	: Kaltluftvolumen	$[\text{m}^3]$
α_{ST}	: Strahlungsübergangskoeffizient	$[\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}]$
ε	: thermischer Emissionskoeffizient	[1]
a, b, c	: empirische ÅNGSTRØM-Konstanten der langwelligen Ausstrahlung; $a = 0,820$; $b = 0,250$; $c = 0,126$	[1]
e	: aktueller Dampfdruck	$[\text{hPa}]$
T_{KL}	: absolute Kaltlufttemperatur	$[\text{K}]$
T_B	: absolute Lufttemperatur in Bodennähe	$[\text{K}]$
Δt	: Andauer der Ausstrahlung	$[\text{s}]$
A_F	: Ausstrahlungsfläche	$[\text{m}^2]$
ρ_{KL}	: Kaltluftdichte	$[\text{kg m}^{-3}]$
c_p	: spezifische Wärmekapazität trockener Luft bei konstantem Druck; $c_p = 1004,67$	$[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$
ΔT_R	: Betrag der Strahlungsabkühlung der Luft	$[\text{K}]$

Logarithmisches Windgesetz

Bei gegebener Rauigkeit nimmt der Bremseffekt nach dem logarithmischen Windgesetz nach Prandtl (1957) mit abnehmender Höhe zu

$$u_{(z)} = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad [\text{m s}^{-1}] \quad (2)$$

mit $u_{(z)}$: Windgeschwindigkeit in der Höhe z	$[\text{m s}^{-1}]$
u_*	: Schubspannungsgeschwindigkeit	$[\text{m s}^{-1}]$
k	: von-Kármán-Konstante = 0,4	[1]
z	: betrachtete Höhe	$[\text{m}]$
z_0	: Rauigkeit	$[\text{m}]$