

# Kaltluftabflusssimulationen mit KLAM\_21 für die Stadt Naumburg

Auswirkung der potenziellen Grünflächen auf  
das Durchlüftungsvermögen

Kerstin Uiboupin  
Dezember 2022



# Inhalt

Einführung.....	3
1 Hintergrund und Methoden .....	4
1.1 Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21 .....	4
1.2 Das Modellgebiet .....	4
1.3 Die Eingabedaten.....	7
1.3.1 Flächennutzungen im Gesamtgebiet .....	7
1.3.2 Flächennutzungen im Kerngebiet .....	9
1.3.3 Mit den Landnutzungsklassen verknüpfte Flächenparameter im Modellgebiet.....	10
1.3.4 Potenzialanalyse im Kerngebiet .....	12
1.3.5 Erstellung des Input-Files für KLAM_21 .....	13
2 Analyse .....	15
2.1 Ist-Zustand .....	15
2.2 Auswirkung der potenziellen Grünflächen auf das Durchlüftungsvermögen.....	18
2.2.1 Potenzielle Grünflächen als unversiegelte Flächen.....	18
2.2.2 Potenzielle Grünflächen als Stadtbäume .....	21
Zusammenfassung und Ausblick .....	26
Literatur .....	28

# Einführung

Ein bekanntes Phänomen, das großen Einfluss auf das Leben der Menschen in Städten hat, ist die sogenannte „Städtische Wärmeinsel“ oder im englischen „Urban Heat Island“. Dieser Begriff beschreibt, dass die Temperaturen während sonnenscheinreicher, windschwacher Wärmeperioden in den dicht bebauten Innenstädten vor allem nachts um bis zu 10 °C höher liegen können als im Umland (Spohr und Riediger 2018, Hardin und Jensen 2007, Kirchner 1999). Die Ursachen dafür sind gut untersucht: Höherer Versiegelungsgrad, Baumaterialien wie Beton und Asphalt mit hoher Wärmespeicherkapazität, geringe Begrünung und eingeschränkte Durchlüftung spielen eine wichtige Rolle (z.B. Stewart 2011, Oke 1987, Landsberg 1981, Kratzer 1937). An heißen Sommertagen kann es dadurch in den Städten zur Gefährdung der Gesundheit der Bewohner kommen (Habeeb et al. 2015, CDC 2006, Wainwright et al. 1999). Der menschengemachte Klimawandel und die bauliche Verdichtung der Städte aufgrund der Urbanisierung verschärfen die Situation weiter.

Aus diesem Grund sind städtebauliche Maßnahmen, die für das Wohlbefinden der Menschen zuträglich sind, von großem Interesse. Dazu gehören unter anderem die Anlage neuer Grünflächen, aber auch die Schaffung von Belüftungskorridoren, um eine Durchlüftung der Städte mit kühler, sauberer Luft zu verbessern. Beide Maßnahmen können auch miteinander in Konkurrenz stehen, da Kaltluftkorridore durch Bepflanzung mit Bäumen an Wirksamkeit verlieren können.

Die vorliegende Arbeit, die im Rahmen des Projektes „KlimaKonform“ entstanden ist, befasst sich am Beispiel der Stadt Naumburg mit der Frage, welchen Einfluss die Bepflanzung potenzieller Grünflächen auf die Kaltluftströmungen und damit die nächtliche Durchlüftung hat. Die Stadt Naumburg befindet sich in einem hügeligen Weinanbaugebiet am Zusammenfluss von Saale und Unstrut und erscheint für diese Analyse besonders geeignet, da sich in ihrer Umgebung aufgrund der geographischen Lage nachts Kaltluftflüsse ausbilden können. Voraussetzung für die Bildung von Kaltluftflüssen ist eine ausgeprägte Topographie.

Unter Nutzung des Kaltluftabflussmodells KLAM\_21, welches im Deutschen Wetterdienst entwickelt wurde, werden unter verschiedenen Simulationsbedingungen die Kaltluftflüsse in Naumburg und deren Umgebung berechnet. Für die Anwendung des Kaltluftabflussmodells KLAM\_21 werden ein digitales Geländemodell und detaillierte Flächennutzungsdaten benötigt. Daraus wird die Kaltluftvolumenstromdichte als Funktion von Kaltfluthöhe und Strömungsfeld berechnet. In der Auswertung wird zunächst der Ist-Zustand betrachtet, danach wird er verglichen mit zwei Zuständen, in denen entweder alle potenziellen Grünflächen durch unversiegelte Freiflächen ersetzt oder durch Stadtbäume begrünt werden. Ziel ist es, aus den Ergebnissen Handlungsempfehlungen abzuleiten.

# 1 Hintergrund und Methoden

## 1.1 Das Kaltluftabflussmodell KLAM\_21

Für die Ermittlung und Beurteilung der Auswirkungen von Kaltluft wurde das Kaltluftabflussmodell KLAM\_21, welches im Deutschen Wetterdienst entwickelt wurde, verwendet. Dabei handelt es sich um ein zweidimensionales, mathematisch-physikalisches Simulationsmodell zur Berechnung von Kaltluftflüssen und Kaltluftansammlungen in Gelände mit ausgeprägter Topographie. Es kommt zum Beispiel zum Einsatz bei der Klärung von Fragen der Standort-, Stadt- und Regionalplanung. KLAM\_21 berechnet die bei nächtlicher Abkühlung entstehenden Schwereströmungen sowie die zeitliche Entwicklung der Kaltluflhöhe für den ausgewählten Zeitraum von mehreren Stunden bis zur gesamten Nacht. Außerdem ermöglicht KLAM\_21 die Modellierung der Ausbreitung von Luftverunreinigungen, die aber in dieser Arbeit nicht untersucht werden. (Sievers 2008)

Die Grundannahme des Modells ist, dass sich der Einfluss der nächtlichen Abkühlung in einer Strahlungsnacht auf eine Unterschicht begrenzt, die von der übrigen Atmosphäre getrennt betrachtet werden kann. Für diese Unterschicht werden universelle Profile für die Strömungsgeschwindigkeit und die Temperaturabweichung angenommen und über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelt. Das Modell gibt in Abhängigkeit vom Nutzungstyp der Bodenoberfläche eine effektive nächtliche Ausstrahlung des Bodens vor. Diese führt zur Abkühlung der Unterschicht. Die kühlere und somit schwere Unterschicht wird auf geneigten Flächen durch die Schwerkraft hangabwärts in Bewegung gesetzt, was in Summe zur Kaltluftströmung führt. Die Modellierung basiert auf zwei Grundgleichungen: Die erste Grundgleichung berechnet die Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft, die zweite Grundgleichung die ortsabhängige Kaltluflhöhe. (Sievers 2008)

Die Größe der rechteckigen und nordsüd-orientierten Untersuchungsgelände ist frei definierbar. Typischerweise bleibt die Modellgitterweite zwischen 10 m und 100 m und die maximale Anzahl der Gitterpunkten liegt aufgrund der Software bei 3000 x 3000 (Sievers und Kossmann 2016). Zu jeder Gitterzelle wird eine Flächennutzung sowie eine Geländehöhe zugeordnet. KLAM\_21 gibt neun Standard-Landnutzungsklassen und elf alternative Nutzungen vor und es gibt die Möglichkeit zehn weitere Nutzungen frei dazu zu definieren, d.h. das Modell ist insgesamt auf 30 Flächennutzungsklassen begrenzt, die alle entsprechende Werte von Bodenrauigkeit, effektiver Ausstrahlung sowie die Höhe und Dichte der Hindernisse wiedergeben. (Sievers 2008)

Die genauere Vorgehensweise bezüglich der Eingabedaten für das Kaltluftabflussmodell wird im Abschnitt 1.3 zusammengefasst.

## 1.2 Das Modellgebiet

Das Untersuchungsgebiet Naumburg ist eine Mittelstadt mit 31 815 Einwohner (Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt 2022) und liegt mit einer Höhe von 130 m über NHN im Süden von Sachsen-Anhalt nahe der Grenze zu Thüringen. Die vom hügeligen Weinanbaugebiet Saale-Unstrut umgebene Stadt befindet sich an der Grenze zwischen Erzgebirgsvorland und Sächsischem Hügelland sowie dem Thüringer Becken mit Randplatten (BfN 2011). Gemäß Köppen-Geiger Klimakarte wird diese Region als Cfb eingestuft, d.h. das Klima ist warmgemäßigt, vollkommen humid mit warmen Sommern (Kottek et al. 2006). Ca. 10 km südöstlich der Stadt befindet sich die Station Osterfeld des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Dort beträgt die Jahresdurchschnittstemperatur 9,8 °C und der durchschnittliche Jahresniederschlag 584,6 mm.

Die Rechnungen zu den Kaltluftflüssen in und um die Stadt Naumburg wurden in einem 14 km x 15 km großen Gesamtgebiet mit einer Gitterweite von 5 m durchgeführt (Ausdehnung aus Westen: 686000.0; Osten: 700000.0; Süden: 5665000.0; Norden: 5680000.0; in UTM 32N), siehe Abbildung 1.2.1. Die Größe des Modellgebietes der KLAM\_21 Rechnungen wurde dabei so festgelegt, dass alle relevanten Kaltlufteinzugsgebiete möglichst mit erfasst werden. Der wichtigste „Kaltluftlieferant“ für die Stadt Naumburg ist das Flusstal der aus Richtung Nordthüringen kommenden Unstrut mit den Seitentälern (besonders das Hasselbachtal). Da das Programm KLAM\_21 eine maximale Gebietsgröße von 3000 x 3000 Gitterzellen zulässt, wurde das Rechenggebiet so ausgewählt, dass es die höchsten Punkte aus den westlichen, nördlichen und südlichen Bergen zusammen mit den in die Ebenen von Unstrut und Saale laufenden Tälern beinhaltet. Das Modellgebiet reicht von den kleineren Ortschaften wie z.B. Saaleck und Janisroda im Süden bis nördlich von Freyburg und Laucha an der Unstrut. Auch die Stadt Bad Kösen westlich von Naumburg liegt in dem Rechenggebiet.

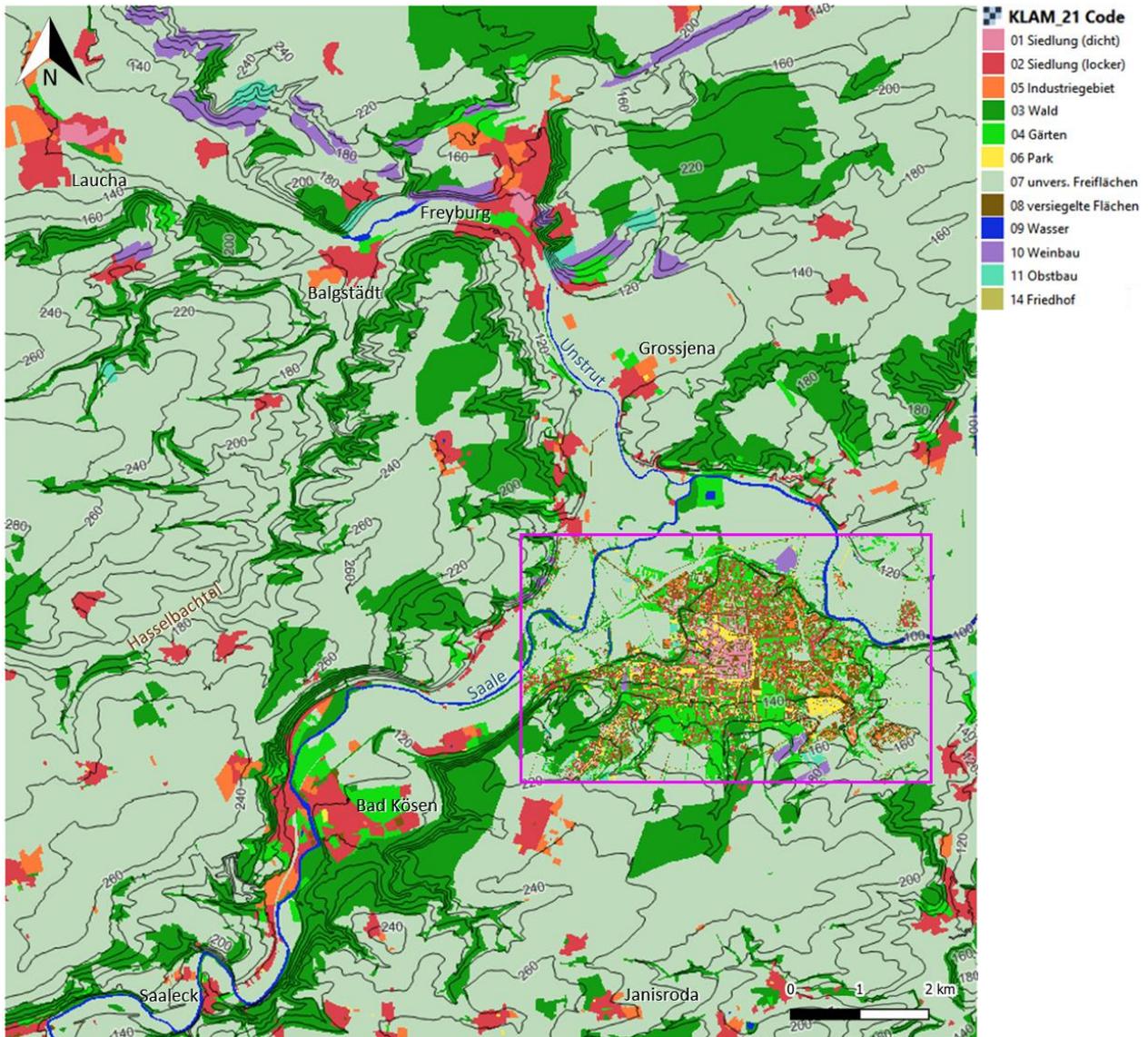


Abb. 1.2.1: Landnutzungsklassen-Verteilung mit 20 m Höhenlinien im Rechengebiet für die KLAM\_21 Simulationen, gerastert auf eine Maschenweite von 5 m. Auszug 14 km x 15 km von 686000.0; 5665000.0 bis 700000.0; 5680000.0 (UTM). Das rosa Rechteck stellt das ausgewählte „Kerngebiet“ in Naumburg dar, die Definition der Farben folgt aus Abbildung 1.2.2. Ausgewählte Orts-, Fluss- und Talbezeichnungen sind hinzugefügt.

In diesem großen Gesamtmodellgebiet liegt das auf das Kaltluftgeschehen Naumburgs untersuchte „Kerngebiet“. Dies entspricht einem etwa 5,9 km x 3,6 km (Ausdehnung aus Westen: 693400.0; Osten: 699290.0; Süden: 5668755.0; Norden: 5672345.0; in UTM 32N) großen Ausschnitt aus der Stadt Naumburg (siehe Abbildungen 1.2.2). In der Analyse wird auch ein weiterer Ausschnitt aus dem Kerngebiet betrachtet, das als „Kernstadt“ bezeichnet wird und einen etwa 1,0 km x 1,0 km (Ausdehnung aus Westen: 696020.0; Osten: 697000.0; Süden: 5670055.0; Norden: 5671035.0; in UTM 32N) großen Ausschnitt von Naumburg beinhaltet (Abbildung 1.2.3). Das „Kerngebiet“ ist das gleiche Gebiet, für das auch die Potenzialanalyse in Naumburg im Rahmen des Projektes „KlimaKonform“ durchgeführt wurde. Die „Kernstadt“ entspricht dem Gebiet aus den ENVI-met Simulationen, die ebenfalls im Rahmen des Projektes „KlimaKonform“ berechnet wurden. Die Bezeichnungen der in der Analyse genutzten Stadtviertel innerhalb der Stadt Naumburg sind in der Abbildung 1.2.4 dargestellt.

Das Modell KLAM\_21 rechnet in den Kerngebieten mit voller Gitterauflösung (5 m Auflösung) und im Umgebungsbereich wird die Auflösung um den Faktor 5 vermindert (d.h. 25 m Auflösung), um Rechenzeit zu sparen. Diese Vorgehensweise ist empfohlen, wenn das Untersuchungsgebiet einen großen Einflussbereich außerhalb des Kerngebiets besitzt, der bei der Simulation des Kaltluftgeschehens mitberücksichtigt werden muss.

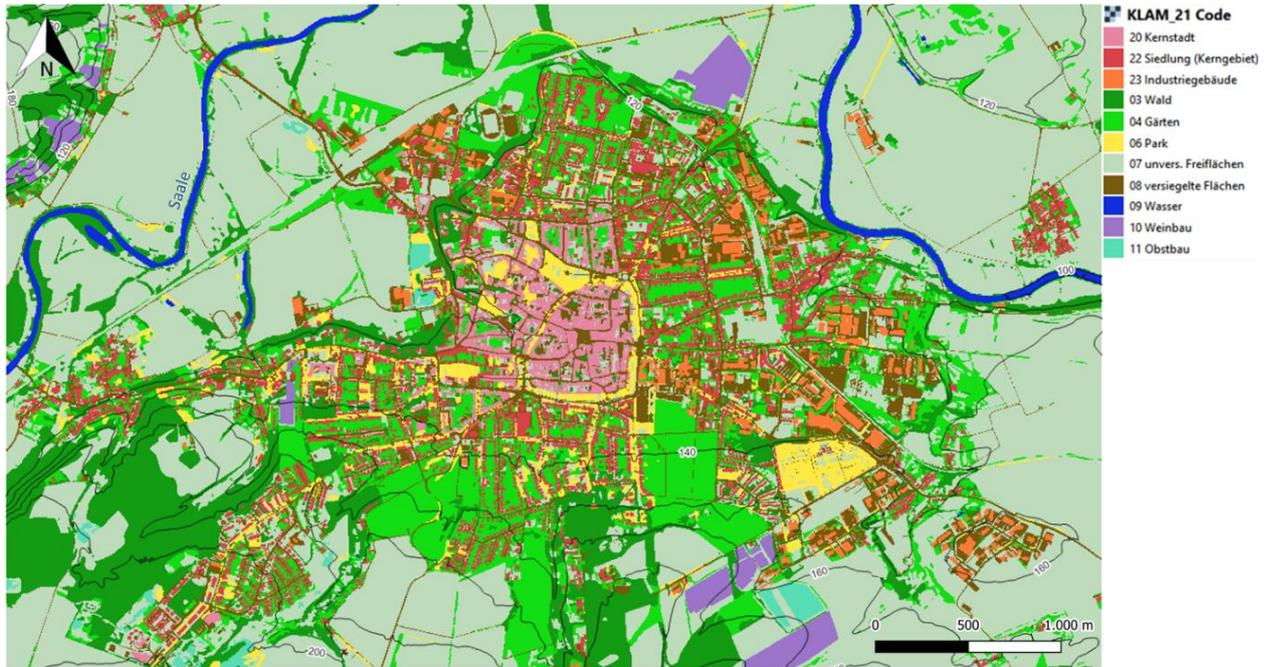


Abb. 1.2.2: Landnutzungsklassen mit 20 m Höhenlinien im „Kerngebiet“ für die KLAM\_21 Simulationen, gerastert auf eine Maschenweite von 5 m. Auszug etwa 5,9 km x 3,6 km von 693400.0; 5668755.0 bis 699290.0; 5672345.0 (UTM).

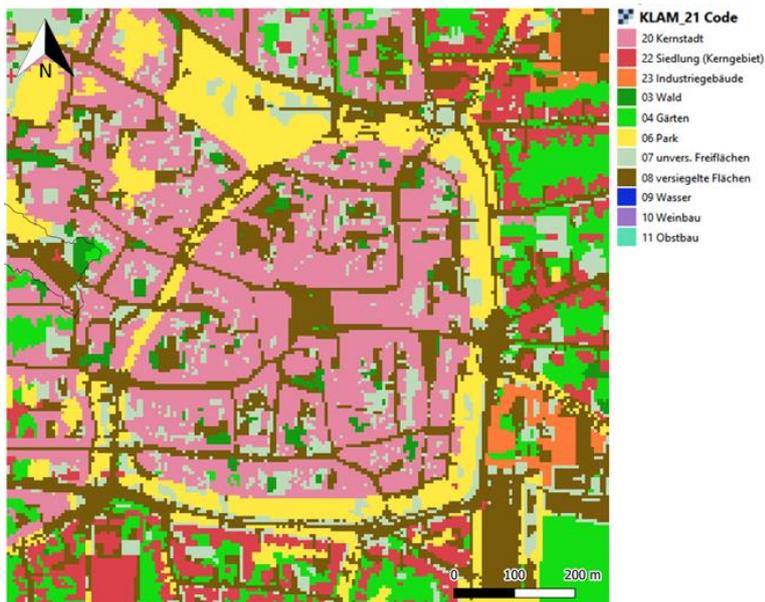


Abb. 1.2.3: Landnutzungsklassen mit 20 m Höhenlinien in der „Kernstadt“ für die KLAM\_21 Simulationen, gerastert auf eine Maschenweite von 5 m. Auszug etwa 1 km x 1 km von 696020.0; 5670055.0 bis 697000.0; 5671035.0 (UTM).

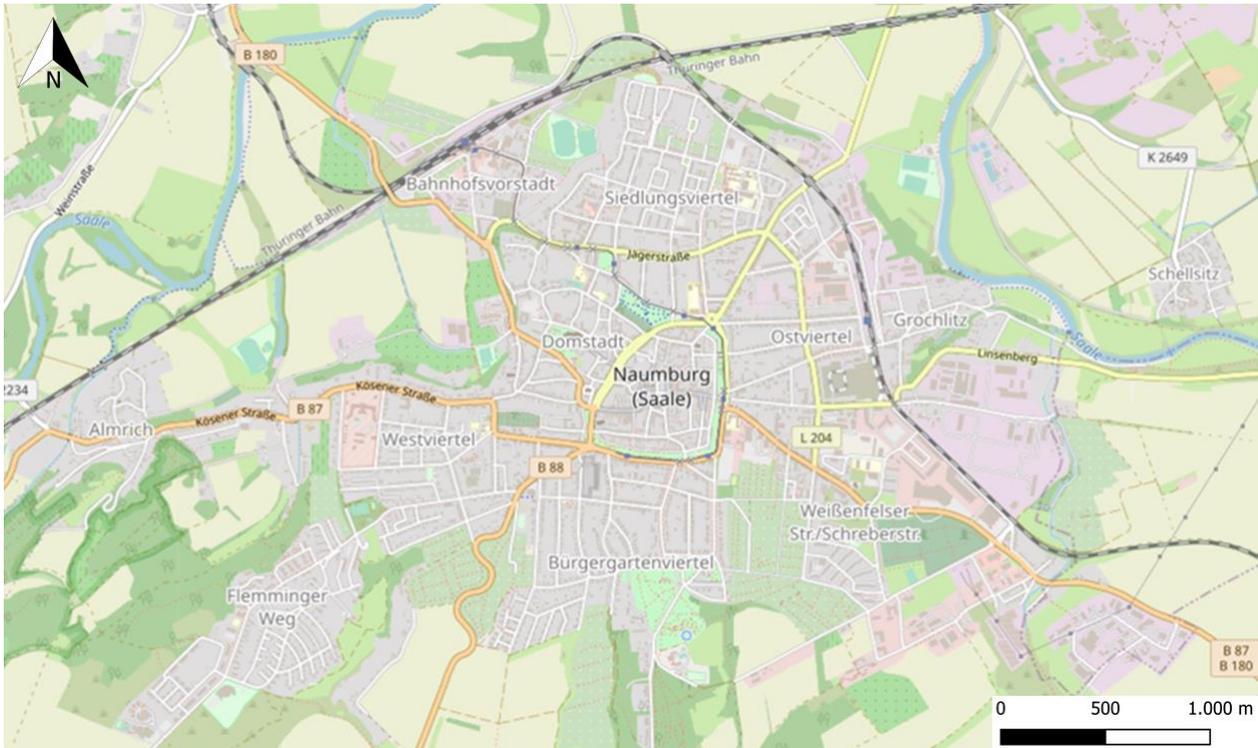


Abb. 1.2.4: Die Bezeichnungen der in der Analyse genutzten Stadtviertel in der Stadt Naumburg (OpenStreetMaps 2022).

## 1.3 Die Eingabedaten

Für die Anwendung des Kaltluftabflussmodells KLAM\_21 werden folgende Eingabeparameter benötigt:

- Digitales Geländemodell (DGM),
- Landnutzungsdaten (in diesem Fall DLM, CLC5, mit Hilfe der RGBI-Orthofotos definierte Grünflächen und Grünflächen aus der Potenzialanalyse).

Dazu wurden für Naumburg folgende Dateien verwendet:

- Topographie, DGM2 in Sachsen-Anhalt (ETRS89/UTM32): <https://www.lvermgeo.sachsen-anhalt.de/de/dgm2.html> (aufgerufen am 23.08.2022)
- Topographie, DGM1 in Thüringen (ETRS89/UTM32), Höhendaten von 2020-2025: <https://www.geoportal-th.de/de-de/Downloadbereiche/Download-Offene-Geodaten-Th%C3%BCrtingen/Download-H%C3%B6hendaten> (aufgerufen am 23.08.2022)
- Digitale Landschaftsmodell (DLM) aus Sachsen-Anhalt wurde in Naumburg freigegeben (Daten von Niels Wollschläger)
- CORINE Land Cover 5 ha, Stand 2018 (CLC5-2018), Georeferenzierung: UTM32s, Format: Shape (ZIP, 1,24 GB): <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/open-data/corine-land-cover-5-ha-stand-2018-clc5-2018.html> (aufgerufen am 23.08.2022)

### 1.3.1 Flächennutzungen im Gesamtgebiet

Bei Erstellung der Flächennutzungsdaten für das Gesamtgebiet wurde eine Mischung aus DLM und CLC5 verwendet. Da die DLM-Daten nur in der Umgebung von Naumburg für die Arbeit freigegeben wurden, wurden im restlichen Modellgebiet die Landnutzungen nach CLC5 kategorisiert. Die DLM-Daten sind detaillierter aufgenommen als die CLC5 Daten, grundsätzlich ist die Vergleichbarkeit beider Landnutzungsklassen aber gegeben. Die Abbildung 1.2.1 zeigt die Landnutzungsklassen-Verteilung im Gesamtgebiet. Diese Landnutzungsklassen wurden im Kerngebiet mit Hilfe der GoogleMaps Satellitenbilder und der durch RGBI-Orthofotos definierten Grünflächen angepasst.

Die verschiedenen Landnutzungsklassen von DLM und CLC5 wurden so unter KLAM\_21-Klassen aufgeteilt, dass jede DLM- und CLC5-Nutzung ungefähr mit der KLAM\_21-Nutzung und den dazu verknüpften Flächenparametern übereinstimmt (siehe Tabellen 1.3.1 und 1.3.2). Bei einigen Nutzungsklassen wurde auch mit Hilfe der Google-Earth Satellitenbilder nachgeprüft, was unter der DLM- und CLC5-Klassen hauptsächlich zu finden ist, und wurde

so eine KLAM\_21-Nutzungsklasse zugeordnet (z.B. wurden Sport, Freizeit und Erholungsflächen nach DLM als „Gärten“ nach KLAM\_21 definiert, da es sich hauptsächlich um Kleingärten gehandelt hat).

Tabelle 1.3.1: Definition der DLM Landnutzungsklassen im KLAM\_21

<b>KLAM_21 Code</b>	<b>KLAM_21 Landnutzungsklassenname</b>	<b>DLM-Code</b>	<b>DLM Objektart</b>
01	Siedlung (dicht)	-	-
02	Siedlung (locker)	41007; 41006; 41001	Fläche Besonderer Funktionaler Prägung; Fläche Gemischter Nutzung; Wohnbaufläche
03	Wald	43002; 43003	Wald; Gehölz
05	Industriegebiet	41002	Industrie und Gewerbefläche
07	unversiegelte Freiflächen	43001; 43006; 43007; 42010; 41005	Landwirtschaft; Sumpf; Umland Vegetationslose Fläche; Bahnverkehr; Tagebau Grube Steinbruch
08	versiegelte Flächen	42009; 42001	Platz; Straßenverkehr
09	Wasser	44001; 44006	Fließgewässer; Stehendes Gewässer
12	Gärten	41008	Sport, Freizeit und Erholungsfläche
14	Friedhof	41009	Friedhof

Tabelle 1.3.2: Definition der CLC5 Landnutzungsklassen im KLAM\_21

<b>KLAM_21 Code</b>	<b>KLAM_21 Landnutzungsklassenname</b>	<b>CLC-Code</b>	<b>CLC-Klassenname</b>
01	Siedlung (dicht)	111	Durchgängig städtische Prägung
02	Siedlung (locker)	112	Nicht durchgängig städtische Prägung
03	Wald	311; 312; 313; 324	Laub-; Nadel-; und Mischwälder; Wald-Strauch-Übergangsstadien
05	Industriegebiet	121	Industrie und Gewerbeflächen, öffentliche Einrichtungen
06	Park	141	Städtische Grünflächen
07	unversiegelte Freiflächen	131; 132; 211; 231; 321; 322	Abbauflächen; Deponien und Abraumhalden; Nicht bewässertes Ackerland; Wiesen und Weiden; Natürliches Grünland; Heiden und Moorheiden

08	versiegelte Flächen	122	Straßen-, Eisenbahnnetze und funktionell zugeordnete Flächen
09	Wasser	511	Gewässerläufe
10	Weinbau	221	Weinbauflächen
11	Obstbau	222	Obst- und Beerenobstbestände
12	Gärten	142	Sport- und Freizeitanlagen

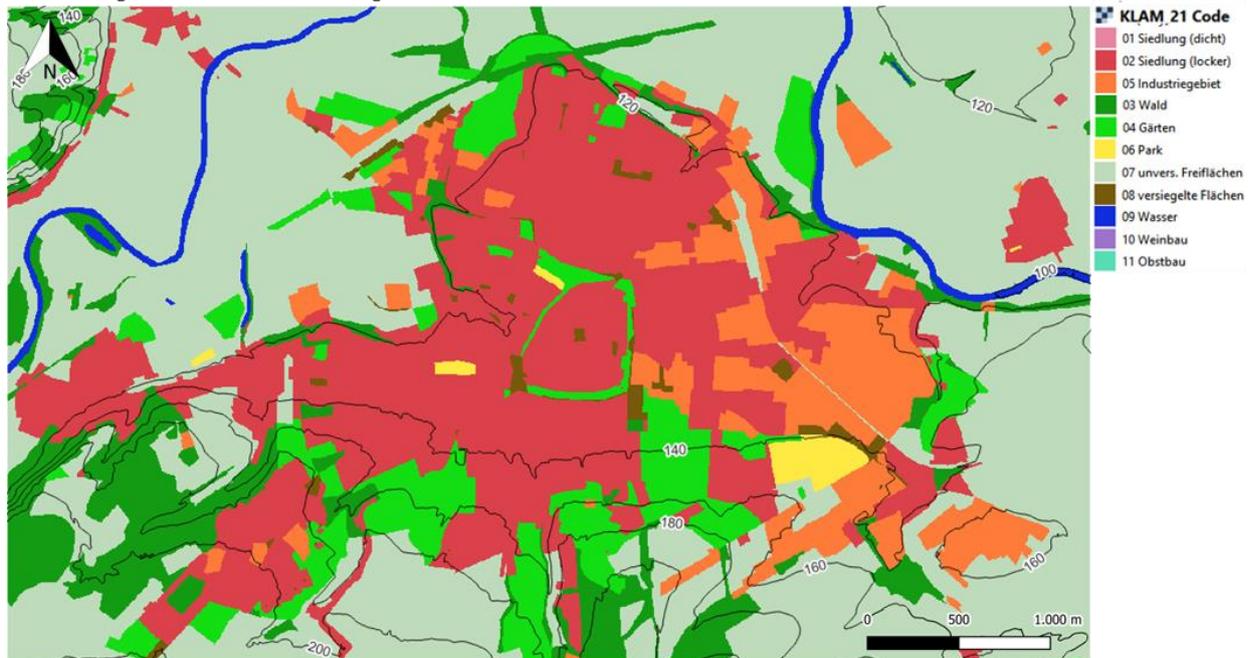
### 1.3.2 Flächennutzungen im Kerngebiet

Im Kerngebiet wurde die Landnutzung von DLM und CLC5 mit Hilfe der GoogleMaps Satellitenbilder und mit Hilfe der durch RGBI-Orthofotos definierten Grünflächen angepasst. Ein Großteil der Flächen, die im Ausgangsfile als „bereits existierende Grünfläche“ definiert waren, wurden für die detailliertere Simulation entweder als „Wald“, „Park“, „Gärten“, „Obstbau“, „Weinbau“ oder „unversiegelte Freifläche“ umdefiniert. Nur einzelne Grünflächenpixel wurden ignoriert, wenn sie auf den Gebäuden oder neben/zwischen den Gebäuden lagen, wo der Anteil an Grün sehr niedrig war – in diesen Fällen wurden die Kategorien „Kernstadt“, „Siedlung (Kerngebiet)“ oder „Industriegebäude“ bevorzugt. Andere Pixel im Kerngebiet, die vorher nicht als Grünfläche definiert waren, wurden mit Hilfe der GoogleMaps Satellitenbilder spezifiziert (z.B. „versiegelte Flächen“, „Kernstadt“, „Siedlung (Kerngebiet)“, „Industriegebäude“ und an einigen Stellen wurde auch noch extra Grünflächen dazu definiert). Die automatisch generierten Landnutzungsklassen von DLM und CLC5 und die im KLAM\_21 angewendeten detaillierten Landnutzungsklassen mit den Grünflächen im Kerngebiet sind zum Vergleich in Abbildung 1.3.1 dargestellt.

Die folgenden Landnutzungsklassen wurden im Kerngebiet definiert:

- Wald: Waldflächen, große und dichte Baumgruppen oder teilweise auch einzelne große Bäume
- Park: größere Baumgruppen, die etwas weniger dicht stehen als im Wald (Parkflächen, Friedhöfe, große Straßenbäume)
- Gärten: unversiegelte Flächen mit niedrigerer Vegetation (Gebüsche, kleinere Bäume, Kleingartengebiete, Gärten)
- Obstbau: Obstanbaugebiete
- Weinbau: Weinbaugebiete
- Unversiegelte Freiflächen: Alle übrigen Vegetationsflächen, hauptsächlich Wiesen, Grasflächen, aber auch Eisenbahnlinsen und andere vegetationslose Flächen, mit niedrigem Anteil an Bäumen und Gebüschen
- Versiegelte Flächen: versiegelte Verkehrsflächen (Straßen, Parkflächen) und Stadien (Laufbahn), Sportplätze
- Kernstadt: Kernstadt mit größeren Gebäuden, dicht besiedelt, hauptsächlich nach CLC5 kategorisiert
- Siedlung (Kerngebiet): Gebäude und Siedlungen, die nach DLM als lockere Siedlung kategorisiert wurden
- Industriegebäude: die Gebäude, die nach DLM als Industriegebiet vordefiniert waren
- Wasser: Fluss Saale und andere stehende Gewässer

Landnutzung von DLM und CLC5 im Kerngebiet:



Detaillierte Landnutzung mit den Grünflächen im Kerngebiet:

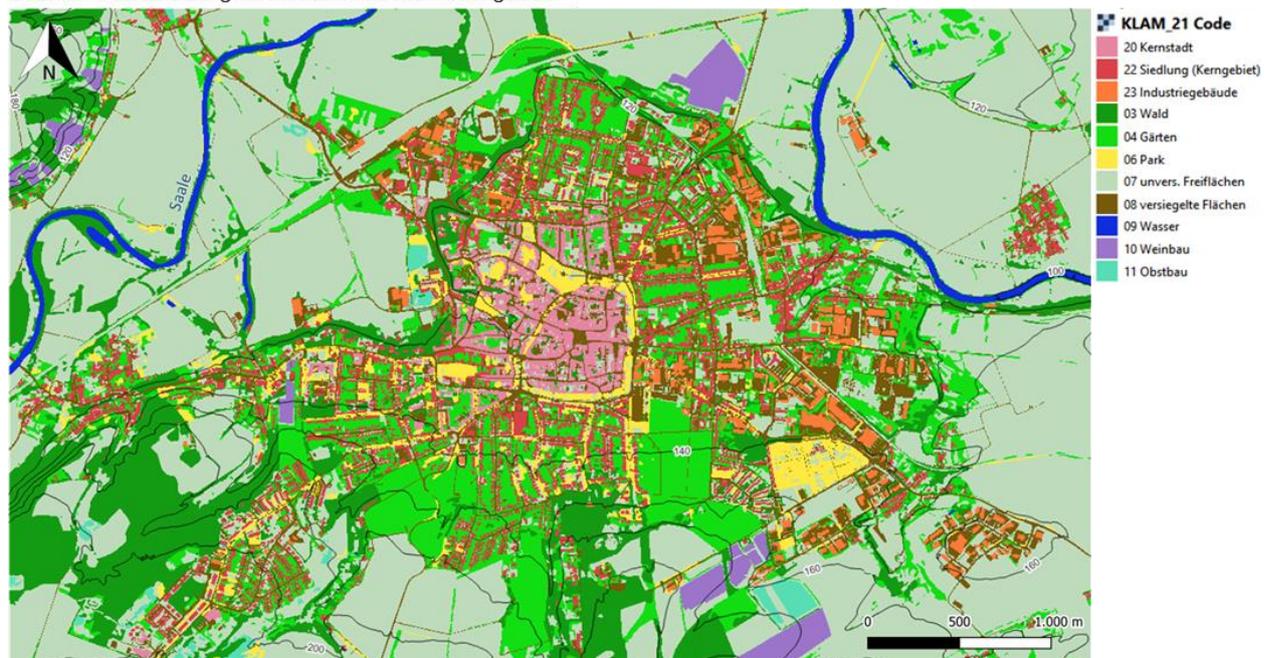


Abb. 1.3.1: Die Landnutzungsklassen von DLM und CLC5 (oben) und die im KLAM\_21 angewendeten detaillierten Landnutzungsklassen mit den Grünflächen (unten) im Kerngebiet.

### 1.3.3 Mit den Landnutzungsklassen verknüpfte Flächenparameter im Modellgebiet

In Tabelle 1.3.3 sind alle verwendeten Landnutzungsklassen zusammen mit den verknüpften Flächenparametern aufgelistet. Die Landnutzungsklassen „Siedlung (dicht)“, „Siedlung (locker)“, „Wald“, „Industriegebiet“, „unversiegelte Freiflächen“, „versiegelte Flächen“, „Wasser“, „Weinbau“, „Obstbau“ und „Friedhof“ sind nach KLAM\_21 definiert. Um die Landnutzung im Kerngebiet möglichst realitätsnah darzustellen, wurde entschieden, neue Landnutzungsklassen zu definieren, bzw. schon existierende anzupassen:

- „Siedlung (Kerngebiet)“ – der Flächenparameter wurde von „Siedlung (locker)“ übernommen und nur die Rauigkeitslänge ( $z0g$ ) und die Grundflächenzahl ( $grz$ ) wurden angepasst:
  - $z0g=0,4$  statt  $0,1$
  - $grz=0,8$  statt  $0,4$
- „Industriegebäude“ – der Flächenparameter wurde vom „Industriegebiet“ übernommen und nur die Rauigkeitslänge ( $z0g$ ), die Grundflächenzahl ( $grz$ ) und die mittlere Gebäudehöhe ( $hg$ ) wurden angepasst:

- z0g=0,4 statt 0,08
- grz=0,9 statt 0,6
- hg=10,0 statt 12,0
- „Stadtbäume“ – der Flächenparameter wurde vom „Friedhof“ übernommen und nur der mittlere Bedeckungsgrad des Bodens mit Bäumen (bg) wurde angepasst (diese Landnutzungs-kategorie wurde nur für die Simulationen mit den potenziellen Grünflächen genutzt):
  - bg=10,0 statt 20,0
- Bei „Kernstadt“ wurden die Rauigkeitslänge (z0g) und die Grundflächenzahl (grz) angepasst:
  - z0g=0,4 statt 0,1
  - grz=0,8 statt 0,6
- Bei „Park“ wurden die Rauigkeitslänge (z0g) und der mittlere Bedeckungsgrad des Bodens mit Bäumen (bg) angepasst:
  - z0g=0,3 statt 0,1
  - bg=0,7 statt 0,2
- Bei „Gärten“ wurden die Rauigkeitslänge (z0g) und der mittlere Bedeckungsgrad des Bodens mit Bäumen (bg) angepasst:
  - z0g=0,2 statt 0,05
  - bg=0,6 statt 0,1

Die Änderungen waren notwendig, weil die Genauigkeit der Kartendarstellung im Kerngebiet deutlich erhöht wurde. Im Kerngebiet sind unter „Kernstadt“, „Siedlung (Kerngebiet)“ und „Industriegebäude“ fast nur einzelne Gebäude oder Hausgruppen definiert, die nach CLC5 und DLM kategorisiert wurden. Deswegen war es wichtig bei diesen Landnutzungstypen die Grundflächenzahl und die Rauigkeitslänge anzupassen. In „Park“ und „Gärten“ ist der abgeschätzte mittlere Bedeckungsgrad des Bodens mit Bäumen nach der Überarbeitung der Landnutzungs-klassen deutlich höher geworden als der vordefinierte und deswegen wurden der mittlere Bedeckungsgrad und daraus folgend auch die Rauigkeitslänge korrigiert. Die Korrektur der Rauigkeitslängen basiert auf den Definitionen gemäß des Europäischen Windatlas. (Troen und Lundtang Petersen 1989).

Tabelle 1.3.3: Übersicht über die Landnutzungs-klassen und der entsprechend definierten Eigenschaften in KLAM\_21

KLAM_21 Code	Landnutzungs-klassen	z0g	grz	hg	wai	bg	hv	xlai	a <sup>1</sup>	vsg
01	Siedlung (dicht)	0.1	0.6	15.0	3.0	0.0	0.0	0.0	-99	1.0
02	Siedlung (locker)	0.1	0.4	8.0	4.0	0.0	0.0	0.0	-99	0.5
03	Wald	0.4	0.0	0.0	0.0	0.9	20.0	6.0	0.56	0.0
05	Industriegebiet	0.08	0.6	12.0	0.9	0.0	0.0	0.0	-99	1.0
06	Park	0.3	0.0	0.0	0.0	0.7	20.0	6.0	1.0	0.05
07	Unversiegelte Freiflächen	0.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
08	Versiegelte Flächen	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-99	1.0
09	Wasser	0.001	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	Weinbau	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
11	Obstbau	0.05	0.0	0.0	0.0	0.3	3.0	3.0	1.0	0.0
12	Gärten	0.2	0.0	0.0	0.0	0.6	3.0	3.0	0.8	0.05

<sup>1</sup> Anmerkung aus Sievers 2008: Die erstmalig in V2.009 eingeführte Vorgabe "-99" fuer die relative Ausstrahlung "a" ist kein echter Wert, sondern steht fuer "undefiniert". In diesen Faellen wird die relative Ausstrahlung programmintern aus dem Versiegelungsgrad "vsg" und den evtl. vorhandenen Wandflaechen pro Grundflaechen ermittelt. Ist andererseits die relative Ausstrahlung mit einem "echten" Wert belegt, so bleibt die Spezifikation von vsg bedeutungslos fuer das Kaltluftverhalten der Fläche.

14	Friedhof	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	20.0	6.0	1.0	0.05
20	Kernstadt	0.4	0.8	15.0	3.0	0.0	0.0	0.0	-99	1.0
22	Siedlung (Kerngebiet)	0.4	0.8	8.0	4.0	0.0	0.0	0.0	-99	0.5
23	Industriegebäude	0.4	0.9	10.0	0.9	0.0	0.0	0.0	-99	1.0
24	Stadtbäume	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	10.0	6.0	1.0	0.05

Bedeutung der Abkürzungen nach Sievers 2008:

- z0g [m]: Rauiglängelänge des Bodens (ohne Beachtung von explizit spezifizierter Bebauung oder Bewaldung)
- grz [dimensionslos]: "Grundflächenzahl", d.h. Anteil der bebauten Fläche an der Gesamtfläche
- hg[m]: mittlere Gebäudehöhe
- wai [dimensionslos]: "wall area index" bzw. Wandflächenindex; das ist das mittlere Verhältnis der Wandfläche eines Einzelgebäudes zu dessen Grundfläche
- bg [dimensionslos]: mittlerer Bedeckungsgrad des Bodens mit Bäumen
- hv [m]: mittlere Baumhöhe
- xlai [dimensionslos]: "leaf area index" bzw. Blattflächenindex; das ist die über die Höhe aufsummierte einseitige Blattfläche eines Baumes im Verhältnis zu seinem Kronenquerschnitt
- a [dimensionslos]: relativer Wirkungsgad der effektiven Ausstrahlung im Vergleich zu einer optimalen Abkühlungsfläche
- vsg: Versiegelungsgrad der Gesamtfläche

### 1.3.4 Potenzialanalyse im Kerngebiet

Nur diejenigen potenziellen Grünflächen wurden für den „Potenzial-Zustand“ ausgewählt, die laut Potenzialanalyse „sehr gut“ oder „gut“ für eine bodengebundene Begrünung geeignet kategorisiert wurden (Wollschläger et al. 2022). Nach Bewertungsschlüssel gehören zu diesen Klassen die Zahlenwerte von 4 bis 9, siehe Abbildung 1.3.2. In Naumburg wurden keine potenziellen Grünflächen mit 4 bewertet. Aus diesen potenziellen Grünflächen wurden nur die ausgewählt, die im „Ist-Zustand“ auf „versiegelten Flächen“ oder „unversiegelten Freiflächen“ lagen (Abbildung 1.3.3). Im Kerngebiet unter „Kernstadt“, „Siedlung (Kerngebiet)“ und „Industriegebäude“ sind fast nur Gebäude mit den Grundflächenzahlen 0,8 und 0,9 definiert, dabei ist 0,9 der höchste Wert, den das Programm ohne Fehlermeldungen zugelassen hat. Deswegen und wegen der Vergleichbarkeit mit dem „Ist-Zustand“ sind die Gebäude im „Potenzial-Zustand“ unverändert geblieben. Nicht alle ausgewählten potenziellen Grünflächen lassen sich in der Realität tatsächlich umsetzen, da sie automatisch generiert sind. Sie müssten vor einer Umsetzung jeweils individuell geprüft werden.

Für die Potenzialanalyse wurden zwei Simulationen durchgeführt. Bei der ersten Simulation wurden alle ausgewählten potenziell begrünbaren Grünflächen als „unversiegelte Freifläche“ definiert und bei der zweiten Simulation wurden alle diese Grünflächen als „Stadtbäume“ definiert. Die potenziell begrünbaren Flächen, die als „versiegelte Flächen“ im „Ist-Zustand“ definiert wurden, liegen hauptsächlich auf den Straßen, Plätzen, Parkplätzen oder Industriegeländen, teilweise auch auf den Sportplätzen. Die „unversiegelten Freiflächen“ sind hauptsächlich verschiedene Grasflächen oder Brachflächen.

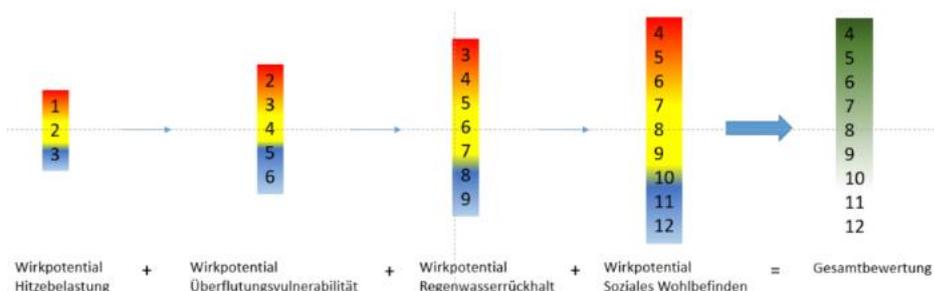


Abb. 1.3.2: Bewertungsschlüssel zur Bewertung der Potenzialflächen am Boden aus der Potenzialanalyse von Naumburg. Je kleiner der Zahlenwert, desto besser eignet sich die Fläche für eine nachträgliche Begrünung bzw. desto größerer Nutzen kann durch eine nachträgliche Begrünung dieser Fläche erwartet werden. (Wollschläger et al. 2022)



Abb. 1.3.3: Die potenziellen Grünflächen (mit grün dargestellt), die im „Ist-Zustand“ auf „versiegelten Flächen“ oder „unversiegelten Freiflächen“ liegen. Im Hintergrund liegt das Satellitenbild von GoogleMaps 2022.

### 1.3.5 Erstellung des Input-Files für KLAM\_21

Für die Eingabedatei von Naumburg wurde als Vorlage das Beispiel Input-File von Dresden genutzt und alle Variablen wurden mit den Naumburg-Dateien angepasst bzw. neu definiert.

Nachfolgend sind für den „Potenzial-Zustand mit Stadtbäumen“ die entsprechenden Eingabedaten protokolliert (Tabelle 1.3.4). Diese sind für den „Ist-Zustand“ und für den „Potenzial-Zustand mit unversiegelten Freiflächen“ nahezu identisch.

Tabelle 1.3.4: KLAM\_21-Eingabedateien für den „Potenzial-Zustand mit Stadtbäumen“

KLAM_21-Eingabedateien	Kommentarfeld
&output	
commres='Naumburg_final_LN_Gruenflaechen'	! in die Ergebnisdateien zu schreibender Kommentar
niozeit=10	! Anzahl der Ausgabezeiten
iozeit= 900,1800,2700,3600,4800,7200,9000,10800,12000,14400	! Ausgabezeiten in s
zaus=10.	! Bezugshoehe fuer das Stroemungsfeld
xtension='txt'	! Namenserweiterung Ergebnisdateien
resdir='E:\KlimaKonform\KLAM_21\Kerstin\Naumburg\Results\Naumburg final LN'	
/end	
&grid	
nx=2800	! Anzahl Gitterabschnitte in x-Richtung
ny=3000	! Anzahl Gitterabschnitte in y-Richtung
dx=5.	! Maschenweite in Metern
h0_file='E:\KlimaKonform\KLAM_21\Kerstin\Naumburg\Results\DGMS Naumburg.txt'	! Datei der Gelaendehoehe
nsth0=0	! Einlesen im Stern-Format
nesting=.true.	
nnest=2	! Anzahl der Kernbereiche (falls nesting=.true)
xOnest(1)=693400., yOnest(1)=5668755.	! Ursprungskoordinaten (unten links) des oder der Kernbereiche in m
xlnest(1)=5890., ylnest(1)=3590.	! Erstreckung des oder der Kernbereiche in m
xOnest(2)=696020., yOnest(2)=5670055.	
xlnest(2)=980., ylnest(2)=980.	
xrmap=686000., yrmap=5665000.	! Rechts- und Hochwert der linken unteren Ecke des Modellgebiets
/end	
&perform	
ttotal=14400	! Simulationsdauer in Sekunden
dtfix=0.	! fester Zeitschritt; wirksam bei Werten >0
dtmax=20.	! Maximaler Zeitschritt
vregio=0.	! Regionalwindgeschwindigkeit
phiregio=90.	! Regionalwindrichtung
ianimat=50	! Bilderneuerung alle 50 Zeitschritte
/end	
&pollution	
pollut=.false.	! mit Ausbreitungssimulation
/end	
&landuse	
fn_file='E:\KlimaKonform\KLAM_21\Kerstin\Naumburg\Results\Naumburg final LN.txt'	! Datei der Flaechenutzung
nstfn=0	! Es wird "listengesteuert" eingelesen
advanced=.true.	! Block "Professional" aktivieren
/end	
&professional	
grz(20)=0.8	
z0g(20)=0.4	
bg(06)=0.7	
z0g(06)=0.3	
bg(12)=0.6	
z0g(12)=0.2	
name(22)='Siedlung (Kerngebiet)'	
z0g(22)=0.4	
grz(22)=0.8	
wai(22)=4.0	
hg(22)=8.0	
bg(22)=0.0	
xlai(22)=0.0	
hv(22)=0.0	
a(22)=-99	
vsg(22)=0.5	
name(23)='Industriegebäude'	
z0g(23)=0.4	
grz(23)=0.9	
wai(23)=0.9	
hg(23)=10.0	
bg(23)=0.0	
xlai(23)=0.0	
hv(23)=0.0	
a(23)=-99	
vsg(23)=1.0	
name(24)='Stadtbäume'	
z0g(24)=0.1	
grz(24)=0.0	
wai(24)=0.0	
hg(24)=0.0	
bg(24)=0.2	
xlai(24)=6.0	
hv(24)=10.0	
a(24)=1.0	
vsg(24)=0.05	
/end	
&zeitreihe	
/endreihe	
/end	

## 2 Analyse

Im Folgenden werden die mit dem zweidimensionalen Modell KLAM\_21 durchgeführten Simulationen des Ist-Zustands in der Stadt Naumburg beschrieben und analysiert. Dabei wird hauptsächlich auf das Kerngebiet mit der Simulationszeit von vier Stunden nach dem Eintritt des Kaltluft-Ereignisses fokussiert. Im zweiten Teil der Arbeit werden die Unterschiede zwischen dem Ist-Zustand und den zwei Potenzial-Zuständen analysiert, um die Auswirkung der potenziellen Grünflächen auf das Durchlüftungsvermögen zu bewerten. Für die Potenzialanalyse wurden zwei Simulationen durchgeführt. Bei der ersten Simulation wurden alle ausgewählten potenziell begrünbaren Grünflächen als „unversiegelte Freifläche“ definiert und bei der zweiten Simulation wurden alle diese Grünflächen als „Stadtbäume“ definiert.

### 2.1 Ist-Zustand

Abbildung 2.1.1 stellt die zeitliche Entwicklung der Kaltluflhöhe und des Strömungsfeldes (Pfeile) dar. Das Strömungsfeld beschreibt die mittlere Fließgeschwindigkeit über die Höhe der Kaltluft. Generell entsteht Kaltluft bei negativer Strahlungsbilanz der Oberfläche während windschwacher Nächte (VDI 2003). Über die Zeit fließt die kalte Luft aufgrund einer höheren Dichte und somit eines höheren Gewichtes aus den Entstehungsgebieten in geneigtem Gelände hangabwärts (Stull 2000). Innerhalb des gesamten gewählten Rechengebiets sind für die Stadt Naumburg der wichtigste Kaltluftlieferant das Flusstal der aus Richtung Nordthüringen kommenden Unstrut mit den Seitentälern (besonders das Hasselbachtal). Im Tal des Hasselbachs, das hauptsächlich mit Feldern und Wäldern bedeckt ist, zeigt die Dicke der Kaltluftschicht schon ab der ersten Stunde nach dem Eintritt des Kaltluft-Ereignisses eine Höhe von 40 m bis maximal 99 m und wächst über die Zeit weiter in die Breite<sup>2</sup>. Dort entstehen die Hang- und Talabwinde mit Geschwindigkeiten von 0,5 m/s bis 3,0 m/s, die Richtung Unstrut fließen. Entlang der Ebene der Unstrut liegen einige Siedlungsbereiche (z.B. Balgstädt, Freyburg und Grossjena), wo die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft durch die höhere Rauigkeit herabgesetzt wird. Mit der Kaltluftzufuhr aus den anderen Seitentälern fließt die kalte und frische Luft über die Nacht mit den Geschwindigkeiten bis zu 1,0 m/s in das Saaletal weiter. Im Bereich des aus der Richtung Fichtelgebirge kommenden Flusses Saale (das Gebiet aus Südwesten bis nach Naumburg) bleiben die Fließgeschwindigkeiten dagegen gering. In der zweiten Stunde, wenn die Kaltluflhöhe im Bereich der Saale bis zu 59 m gewachsen ist, erreicht die Kaltluftströmung bis zu 0,5 m/s. Mit der weiteren Entwicklung der Kaltluflhöhe bis zu 99 m nach vier Stunden Simulationszeit nehmen die schon geringen Geschwindigkeiten weiter ab (0 bis 0,2 m/s). Auch hier spielen die Siedlungsgebiete (z.B. Bad Kösen und Saaleck) eine bedeutsame Rolle, da sie ähnlich zu den vorher genannten Siedlungen den Kaltluftabfluss entlang der Saale sowie aus den Seitentälern abbremsen. Darüber hinaus sind viele von den Seitentälern bewaldet.

Die Simulationen zeigen, dass vier Stunden nach dem Eintritt des Kaltluft-Ereignisses die Kaltluftmächtigkeit ihre höchsten simulierten Werte erreicht. Es wird davon ausgegangen, dass sich im Laufe der Nacht die Werte nicht mehr viel ändern. Deswegen wurde der Fokus in der weiteren Analyse auf den Zeitpunkt nach vier Stunden gesetzt. Da das Gebiet von Interesse die Stadt Naumburg ist, wird im Weiteren das sogenannte Kerngebiet unter die Lupe genommen.

Nach vier Stunden Simulationszeit liegt die Kaltluflhöhe im Gebiet der Stadt Naumburg größtenteils im Bereich von 40 m bis 59 m (Abbildung 2.1.2), die als mittel bis groß nach VDI 2003 eingestuft wird. Nördlich von der Stadt in der Ebene der Saale erreichen die Werte sogar bis zu 99 m (große Schichtdicke nach VDI 2003), aber durch die ca. 20 m höhere Lage der Stadt und dichte städtische Bebauung werden größere Mengen der Kaltluft entlang der Saale an der Stadt Richtung Osten vorbei geleitet. Auch die aus den südlichen Tälern und Hängen Richtung Stadt fließende Kaltluft wird in der Stadt durch die vergrößerte Rauigkeit abgebremst und erwärmt (VDI 2003) und damit bleibt die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft innerhalb der Stadt sehr gering, siehe Abbildungen 2.1.2 und 2.1.3. Im Großteil der Stadt und deren Umgebung bewegt sich die kalte Luft nur mit einer Geschwindigkeit bis zu 0,2 m/s, die nach Beaufort-Skala als Windstille definiert wird (DWD 2022). In den nördlichen Bereichen der Stadt (Siedlungsviertel) erreichen die Geschwindigkeiten bis zu 0,5 m/s und im südlichen Teil der Stadt in den Kleingartengebieten und auf den Wiesen/Feldern, erreichen die Hangwinde bis zu ca. 1,0 m/s, die aber durch die dichte Bebauung in der Stadt deutlich verlangsamt werden. Nach VDI 2003 werden die Geschwindigkeiten bis zu 0,5 m/s als gering, zwischen 0,5 m/s und 1,0 m/s als mittel und zwischen 1,0 m/s und 3,0 m/s als groß eingestuft.

---

<sup>2</sup> Laut VDI 2003 ist eine Kaltluftschichtdicke bis zu 10 m als gering, zwischen 10 m und 50 m als mittel und ab 50 m als groß definiert.

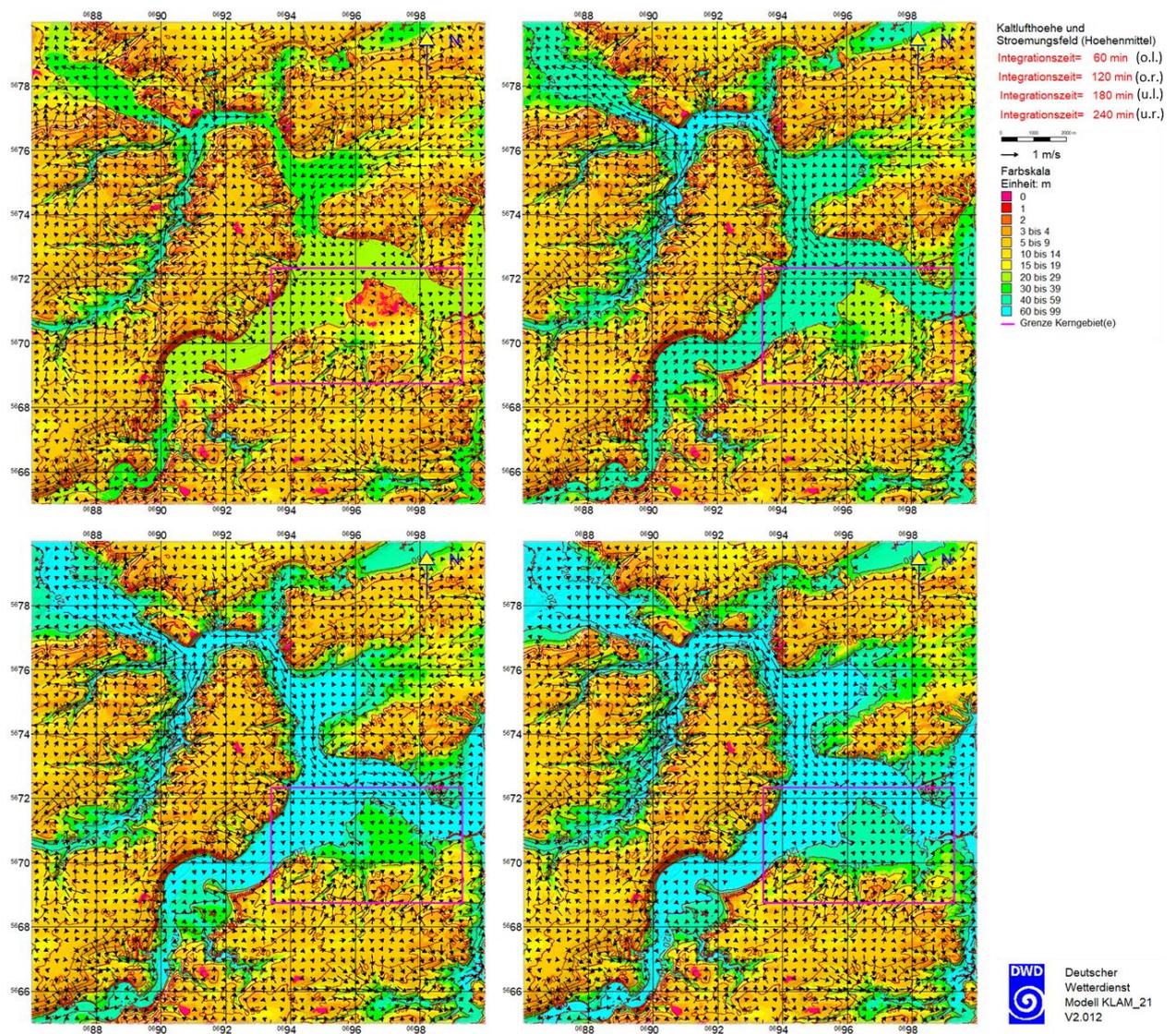


Abb. 2.1.1: Kaltlufthöhe und Strömungsfeld (im Höhenmittel) nach Eintritt eines Kaltluft-Ereignisses im Gesamtrechengebiet im Ist-Zustand: 1 Stunde nach Eintritt (oben links), 2 Stunden nach Eintritt (oben rechts), 3 Stunden nach Eintritt (unten links), 4 Stunden nach Eintritt (unten rechts). Auszug 14 km x 15 km von 686000.0; 5665000.0 bis 700000.0; 5680000.0 (UTM). Der rosa Rahmen stellt das ausgewählte „Kerngebiet“ dar.

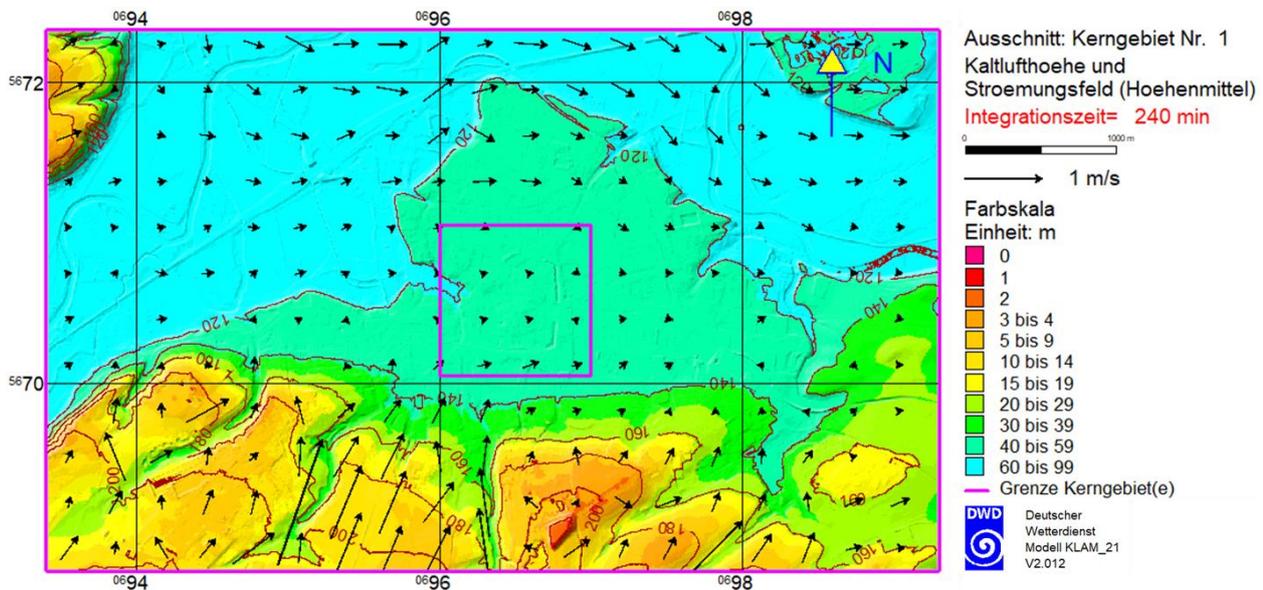


Abb. 2.1.2: Ausschnitt aus der Abbildung 2.1.1. Kaltfluthöhe und Strömungsfeld (im Höhenmittel) im Kerngebiet im Ist-Zustand mit der Integrationszeit von 4 h. Auszug etwa 5,9 km x 3,6 km von 693400.0; 5668755.0 bis 699290.0; 5672345.0 (UTM). Der rosa Rahmen stellt die ausgewählte „Kernstadt“ dar.



Abb. 2.1.3: Fließgeschwindigkeit der Kaltluft (im Höhenmittel) [m/s] im Kerngebiet im Ist-Zustand mit der Integrationszeit von 4 h. Eigene Darstellung mit dem Programm QGIS. Auszug etwa 5,9 km x 3,6 km von 693400.0; 5668755.0 bis 699290.0; 5672345.0 (UTM). Die Gebäude sind mit schwarz und Gewässer mit tiefblau dargestellt (aus DLM).

Die Abbildung 2.1.4 beschreibt die Kaltluftvolumenstromdichte im Kerngebiet nach vier Stunden Simulationszeit. Unter diesem Begriff versteht man das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft (Höhenmittel) und der Kaltluftmächtigkeit. Sie gibt an, wie viele Kubikmeter Luft pro Zeiteinheit durch einen 1 m breiten Talabschnitt strömt und ist damit für planerische Zwecke als Maß für die Durchlüftung interessant (VDI 2003, AMBIMET 2000). Nach der Klassifizierung von GEONET 2002 und DWD 2017 in Anlehnung an Werner et al. 1979 wird die Kaltluftvolumenstromdichte in Zusammenhang mit der klimaökologischen Ausgleichsleistung der Kaltlufteinzugsgebiete wie folgt kategorisiert:

- < 2 m<sup>3</sup>/ms – sehr gering/sehr niedrig
- ≥ 2 - 10 m<sup>3</sup>/ms – gering/niedrig
- ≥ 10 - 20 m<sup>3</sup>/ms – mittel/mäßig
- ≥ 20 - 50 m<sup>3</sup>/ms – hoch
- ≥ 50 m<sup>3</sup>/ms – sehr hoch

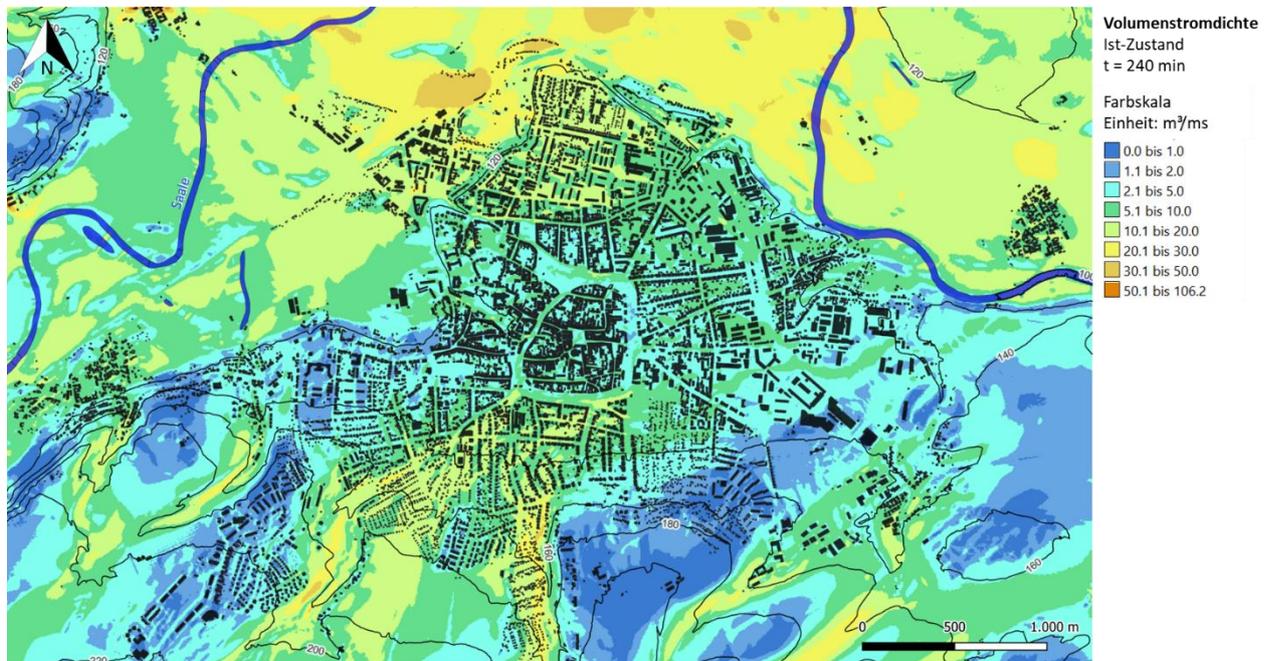


Abb. 2.1.4: Kaltluftvolumenstromdichte [m<sup>3</sup>/ms] im Kerngebiet im Ist-Zustand mit der Integrationszeit von 4 h. Eigene Darstellung mit dem Programm QGIS. Auszug etwa 5,9 km x 3,6 km von 693400.0; 5668755.0 bis 699290.0; 5672345.0 (UTM). Die Gebäude sind mit schwarz und Gewässer mit tiefblau dargestellt (aus DLM).

Die höchste Kaltluftvolumenstromdichte mit Werten zwischen 10 m<sup>3</sup>/ms bis 50 m<sup>3</sup>/ms (mittlere bis hohe Durchlüftung) findet sich nördlich von der Stadt Naumburg in der Ebene der Saale während im nördlichen Teil der Stadt (Siedlungsviertel) nur noch Werte von 5 m<sup>3</sup>/ms bis 20 m<sup>3</sup>/ms (geringe bis mittlere Durchlüftung) erreicht werden, da der Großteil der Kaltluft Richtung Osten an der Stadt vorbei strömt. In den kleineren Tälern südlich der Stadt finden sich ebenfalls hohe Kaltluftströme mit Werten bis zu ca. 30 m<sup>3</sup>/ms, die aber Richtung Stadtzentrum an Dichte deutlich verlieren. So werden die Bürgergartenviertel, Almrich und zum Teil das südöstlich der Stadt Naumburg gelegene Industriegebiet als gering bis mäßig belüftet eingestuft. In der sehr dicht bebauten Kernstadt und in den Stadtbereichen östlich (Ostviertel und Grochlitz), westlich (Domstadt und zum Teil Westviertel) und im südlichen Teil des Siedlungsviertels bleiben die Kaltluftströme größtenteils gering, zwischen 2 m<sup>3</sup>/ms und 10 m<sup>3</sup>/ms. Die Gebiete, die nach vier Stunden Simulationszeit mit einer Kaltluftvolumenstromdichte von weniger als 2 m<sup>3</sup>/ms als sehr gering belüftet eingestuft werden, sind Flemminger Weg, der westliche Teil des Westviertels und zum Teil der Bereich Weißenfelder Str./Schreiberstr.

Allgemein wird die Stadt Naumburg auf Basis dieser Simulationen als gering durchlüftet eingestuft. Die topographische Lage spielt hier eine bedeutsame Rolle, da die Stadt in einem breiten flachen Tal liegt, ca. 20 m oberhalb der Ebene der Saale, und deswegen ein großer Teil der Kaltluft an der Stadt vorbei geleitet wird. Dazu produzieren die kleineren Täler südlich der Stadt im Vergleich zur Unstrut und deren Seitentälern nur geringe Mengen von Kaltluft.

## 2.2 Auswirkung der potenziellen Grünflächen auf das Durchlüftungsvermögen

Im Folgenden wird die Auswirkung der potenziell begrünbaren Flächen auf den Ist-Zustand in der Stadt Naumburg analysiert. Für die Potenzialanalyse wurden zwei Simulationen durchgeführt. Bei der ersten Simulation wurden alle ausgewählten potenziell begrünbaren Grünflächen als „unversiegelte Freifläche“ definiert und bei der zweiten Simulation wurden alle diese Grünflächen als „Stadtbäume“ definiert.

### 2.2.1 Potenzielle Grünflächen als unversiegelte Flächen

Die Abbildung 2.2.1 zeigt die absoluten und relativen Differenzen der Kaltluftvolumenstromdichte zwischen dem Ist-Zustand und dem Potenzial-Zustand mit unversiegelten Freiflächen im Kerngebiet nach vier Stunden Simulationszeit. Bei der Darstellung der relativen Differenzen wurden die absoluten Differenzen zwischen -0,5 m<sup>3</sup>/ms und 0,5 m<sup>3</sup>/ms auf 0 % gesetzt, um zu vermeiden, dass absolut kleine Änderungen der Kaltluftvolumenstromdichte einen großen Effekt in der relativen Darstellung suggerieren. Um die planerischen Auswirkungen von Kaltluftflüssen gegenüber dem Ist-Zustand zu beurteilen, wurde die in VDI 2003 definierte Klassifizierung übernommen:

- $\leq 5\%$  – geringe Auswirkung
- $\leq 10\%$  – mäßige Auswirkung
- $> 10\%$  – hohe Auswirkung

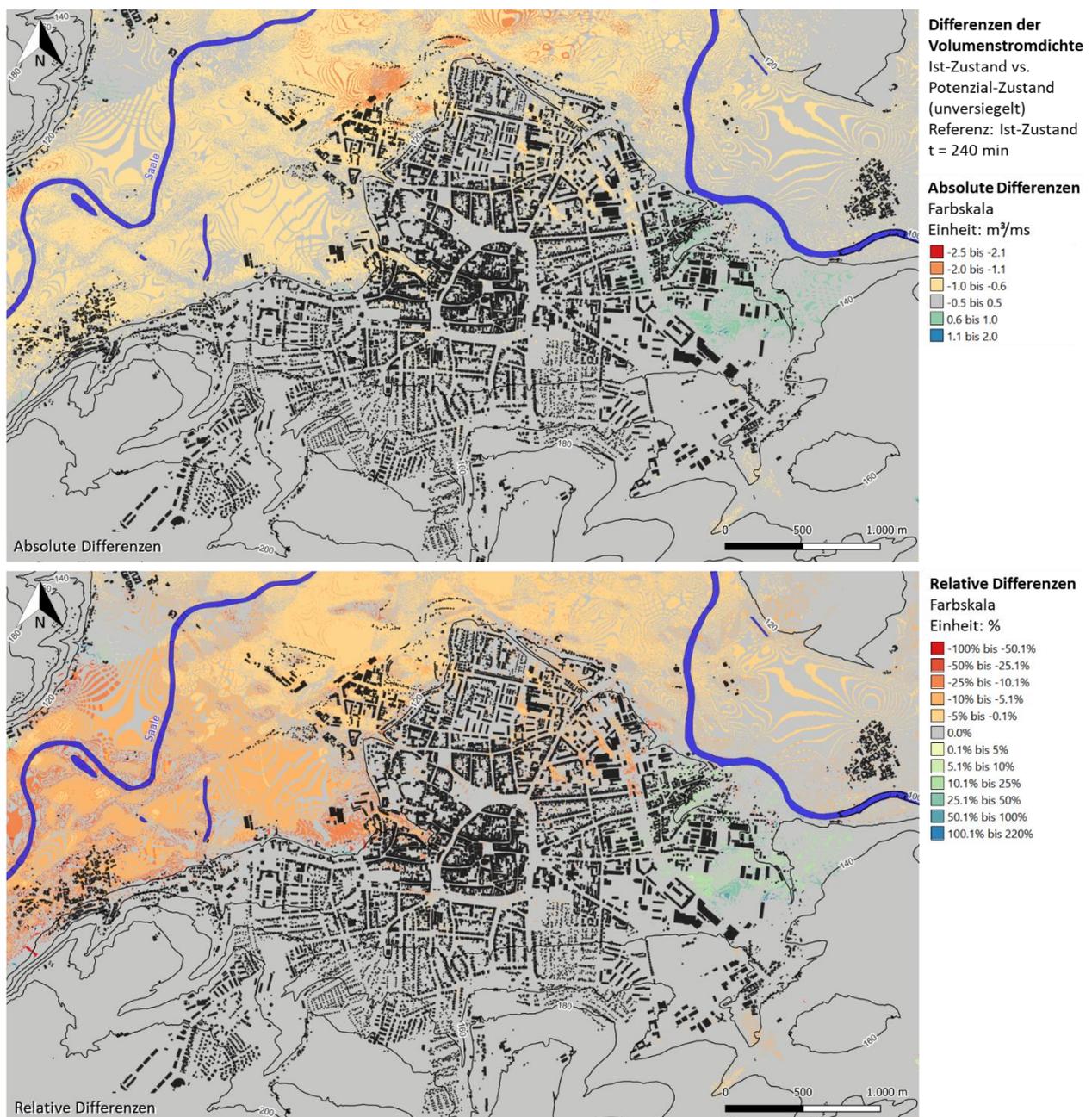


Abb. 2.2.1: Absolute Differenzen (oben) und relative Differenzen (unten) der Kaltluftvolumenstromdichte zwischen Ist-Zustand und Potenzial-Zustand mit unversiegelten Freiflächen im Kerngebiet (mit Integrationszeit 4 h). Als Referenz gilt der Ist-Zustand. Eigene Darstellung mit dem Programm QGIS. Die Gebäude sind mit schwarz und Gewässer mit dunkelblau dargestellt (aus DLM). Für die Bereiche, in denen die absoluten Differenzen zwischen  $-0,5 \text{ m}^3/\text{ms}$  und  $0,5 \text{ m}^3/\text{ms}$  liegen, wurde die relative Änderung auf 0 % gesetzt, um zu vermeiden, dass absolut kleine Änderungen einen großen Effekt in der relativen Darstellung suggerieren.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Ersetzung aller potenziell begrünbaren Flächen mit unversiegelten Freiflächen den größten Einfluss auf die Kaltluftvolumenstromdichte im Bereich nördlich der Stadt Naumburg in der Ebene der Saale hat. Dort nehmen die Kaltluftvolumenströme absolut betrachtet großflächig zwischen  $0,6 \text{ m}^3/\text{ms}$  bis  $1,0 \text{ m}^3/\text{ms}$  ab. An einigen Stellen, wie z.B. nordöstlich vom Hauptbahnhof, erreichen die Werte bis zu  $-2,0 \text{ m}^3/\text{ms}$ . Diese Änderungen könnten mit der kleinen Erhöhung des Rauigkeitsparameters im KLAM\_21 Parameterset begründet sein. Eine unversiegelte Freifläche hat eine Rauigkeit von  $0,05 \text{ m}$ , eine versiegelte Fläche von  $0,01 \text{ m}$ . Relativ gesehen, bedeuten diese Änderungen nördlich der Stadt eine geringe negative Auswirkung (unter 5 %) auf die Belüftung und westlich der Stadt eine mäßige negative Auswirkung ( $\leq 10\%$  großflächig). In einigen Bereichen westlich der Stadt erreichen die Werte sogar bis zu maximal  $-25\%$ , was auf eine hohe negative

Auswirkung auf die Belüftung hindeutet. Allerdings sind dies auch die Bereiche, die schon im Ist-Zustand gering belüftet sind, womit hier schon kleine Änderungen einen starken Einfluss auf die relativen Änderungen verursachen.

Im Stadtgebiet gibt es bezüglich der Kaltluftvolumenstromdichte kleinere absolute Änderungen nordöstlich der Kernstadt (zwischen  $-1,0 \text{ m}^3/\text{ms}$  und  $-0,6 \text{ m}^3/\text{ms}$ ) und östlich an der Stadtgrenze (zwischen  $0,6 \text{ m}^3/\text{ms}$  und  $1,0 \text{ m}^3/\text{ms}$ ). In diesen Bereichen ist die planerische Auswirkung von Kaltluftflüssen als mäßig bis hoch bewertet, wobei der östliche Bereich an der Stadtgrenze sogar eine hohe positive Auswirkung auf die Belüftung aufweist. Jedoch sind auch dies Bereiche, die schon im Ist-Zustand als gering belüftet definiert sind und damit einen großen Einfluss auf die relativen Änderungen verursachen.

Innerhalb der Kernstadt und in großen Teilen der Stadt, sowie in den Gebieten südlich der Stadt hat die Ersetzung aller potenziell begrünbaren Flächen mit unversiegelten Freiflächen keine nennenswerte Auswirkung auf die Kaltluftvolumenströme und damit auf den Belüftungseffekt. Die kleinen Änderungen in den Kaltluftvolumenstromdichten finden sich nicht direkt in den Gebieten mit den potenziell begrünbaren Flächen.

Die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, die in der Abbildung 2.2.2 als absolute Differenz dargestellt ist, zeigt in der Simulation keine bedeutsamen Änderungen nach dem Ersetzen der potenziell begrünbaren Flächen durch unversiegelte Freiflächen. Die Änderungen im Kaltluftabfluss bleiben fast über das ganze Kerngebiet zwischen  $-0,01 \text{ m/s}$  und  $0,01 \text{ m/s}$  und damit minimal. Auf eine Darstellung der relativen Änderungen wurde aufgrund dieser minimalen absoluten Änderungen verzichtet.

Die Abbildung 2.2.3 zeigt die simulierten absoluten Differenzen in der Kaltluflhöhe nach der Umsetzung der unversiegelten Potenzialflächen im Kerngebiet nach vier Stunden Simulationszeit. Die Kaltluftmächtigkeit nimmt im Großteil der Stadt sowie nördlich der Stadt in der Ebene der Saale um maximal etwa  $1 \text{ m}$  zu, relativ gesehen bleiben die Änderungen unter  $1\%$  und deswegen wurde auf eine Darstellung der relativen Änderungen verzichtet.

Diese minimalen Änderungen in den beiden für die Kaltluftvolumenstromdichte bestimmenden Parametern weisen auf einen Rundungseffekt des Simulationssystems hin, weshalb die oben beschriebenen Effekte auf die Belüftung der Stadt vernachlässigbar sind.

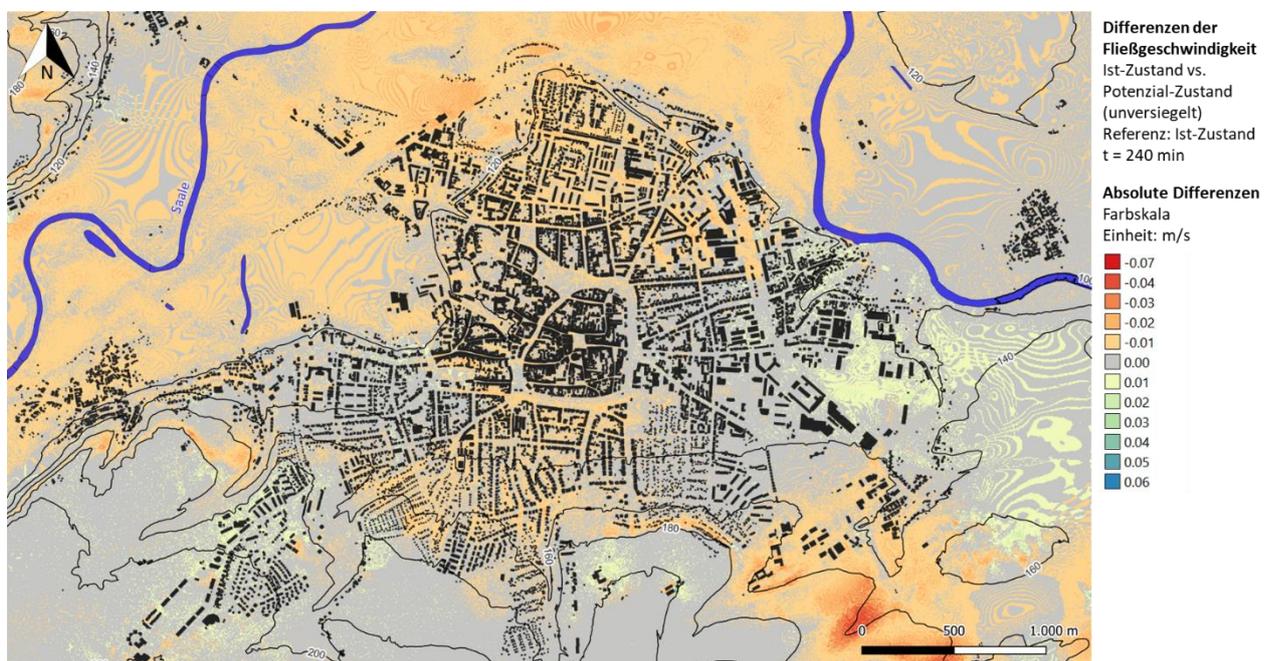


Abb. 2.2.2: Absolute Differenzen der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft (im Höhenmittel) zwischen Ist-Zustand und Potenzial-Zustand mit unversiegelten Freiflächen im Kerngebiet (mit Integrationszeit 4 h). Als Referenz gilt der Ist-Zustand. Eigene Darstellung mit dem Programm QGIS. Die Gebäude sind mit schwarz und Gewässer mit dunkelblau dargestellt (aus der DLM).

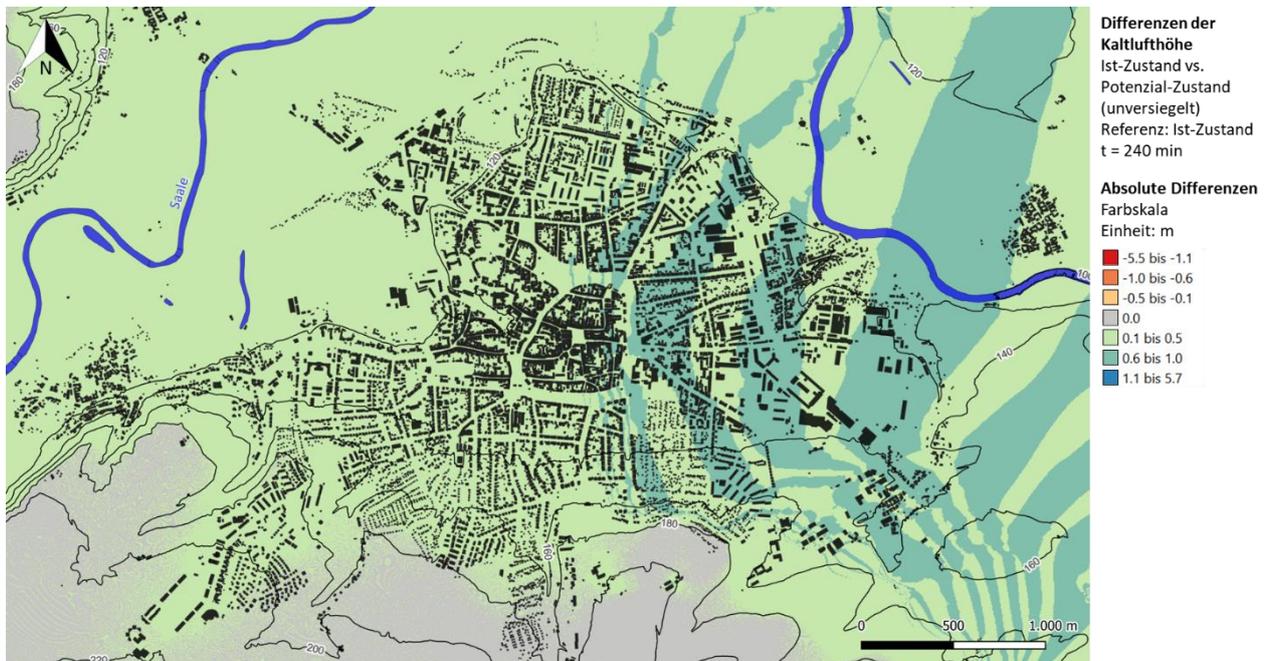


Abb. 2.2.3: Absolute Differenzen der Kaltluflthöhe zwischen Ist-Zustand und Potenzial-Zustand mit unversiegelten Freiflächen im Kerngebiet (mit Integrationszeit 4 h). Als Referenz gilt der Ist-Zustand. Eigene Darstellung mit dem Programm QGIS. Die Gebäude sind mit schwarz und Gewässer mit dunkelblau dargestellt (aus der DLM).

Die absoluten und relativen Änderungen in der Fließgeschwindigkeit und in der Kaltluftmächtigkeit zwischen Ist-Zustand und Potenzial-Zustand mit unversiegelten Freiflächen nach vier Stunden Simulationszeit sind im untersuchten Gebiet minimal und zeigen keinen Zusammenhang mit dem Standort der potenziellen Grünflächen. Daraus folgt, dass die Einführung unversiegelter Freiflächen in diesem Modellgebiet keine Auswirkung auf die Kaltluftvolumenstromdichte bzw. die Durchlüftung der Stadt und deren Umgebung hat. Dieses Ergebnis entspricht den Erwartungen, da sich die KLAM\_21 Parametersätze für versiegelte und unversiegelte Flächen im Wesentlichen nur in der Rauigkeitslänge geringfügig unterscheiden. Alle anderen Flächenparameter sind identisch. Basierend auf diesen Ergebnissen werden daher keine Handlungsempfehlungen formuliert.

## 2.2.2 Potenzielle Grünflächen als Stadtbäume

Die Abbildung 2.2.4 stellt die absoluten und relativen Differenzen der Kaltluftvolumenstromdichte zwischen dem Ist-Zustand und dem Potenzial-Zustand mit Stadtbäumen im Kerngebiet nach vier Stunden Simulationszeit dar. Diese Simulationsergebnisse zeigen einen deutlichen Einfluss der potenziellen Grünflächen auf die Kaltluftvolumenstromdichte. Die höchsten absoluten Differenzen finden sich nordwestlich der Stadt entlang der Gleise um den Hauptbahnhof in der Bahnhofsvorstadt und nordöstlich des Kerngebiets im Kieswerkgelände. In diesen Bereichen nehmen die Kaltluftvolumenströme im Potenzial-Zustand absolut betrachtet großflächig zwischen  $2,1 \text{ m}^3/\text{ms}$  bis  $11,0 \text{ m}^3/\text{ms}$  ab, was relativ gesehen eine Reduktion von über 25 % bedeutet. Dies sind auch die Bereiche, in denen die Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft um bis zu  $0,2 \text{ m/s}$  und über 25 % abnehmen (siehe Abbildung 2.2.5).

In den anderen Bereichen der Stadt um den Stadtkern, wo z.B. die Parkplätze oder andere breite asphaltierte Flächen, teilweise auch unversiegelte Brachflächen im Potenzial-Zustand mit Stadtbäumen ersetzt wurden, zeigt die Kaltluftvolumenstromdichte eine Abnahme bis zu  $5,0 \text{ m}^3/\text{ms}$ , die relativ gesehen großflächig über -10 % liegt und damit eine hohe negative Auswirkung auf die Belüftung der Stadt bedeutet. Die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft nimmt in diesen Bereichen hauptsächlich bis zu  $0,1 \text{ m/s}$  ab. Die größte Reduktion der Kaltluftgeschwindigkeit zeigt die im südwestlich der Stadt im Flemminger Weg gelegene Brachfläche, wo die Werte bis zu maximal  $0,35 \text{ m/s}$  abnehmen. Dies ist auch eine der wenigen Bereiche, wo die Fließgeschwindigkeit im Ist-Zustand über  $0,5 \text{ m/s}$  erreicht, d.h. nur dort kann überhaupt auch eine wirksame Abbremsung der Fließgeschwindigkeit durch Bäume stattfinden. Relativ gesehen bleiben die dargestellten Änderungen zumeist über 25 % (hohe Auswirkung). Allerdings muss man hier beachten, dass die Änderungen in den Fließgeschwindigkeiten absolut gesehen klein sind und deswegen dieser scheinbar große Effekt in der relativen Darstellung missverständlich ist.

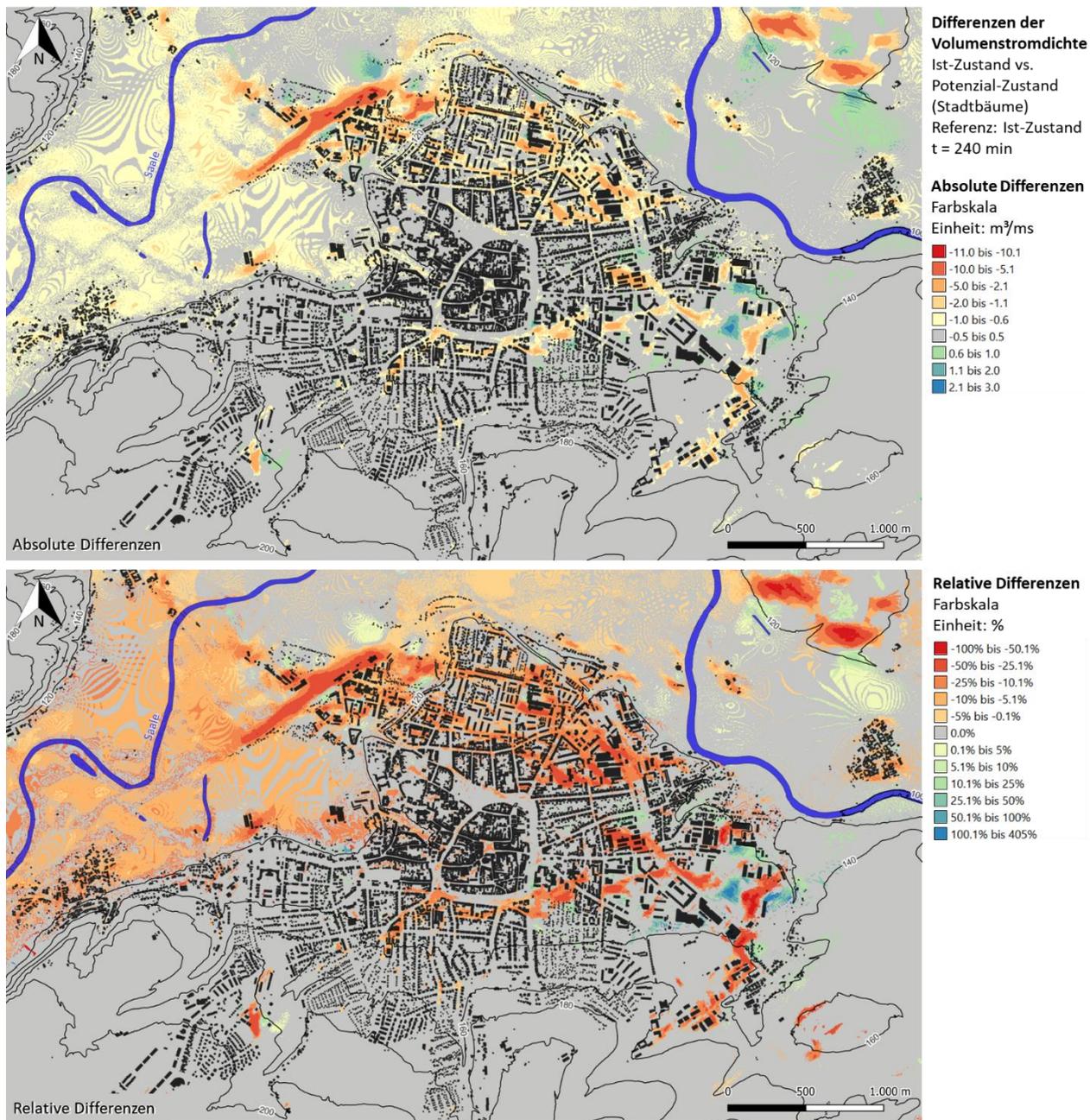


Abb. 2.2.4: Absolute Differenzen (oben) und relative Differenzen (unten) der Kaltluftvolumenstromdichte zwischen Ist-Zustand und Potenzial-Zustand mit Stadt­bäumen im Kerngebiet (Integrationszeit 4 h). Als Referenz gilt der Ist-Zustand. Eigene Darstellung mit dem Programm QGIS. Die Gebäude sind mit schwarz und Gewässer mit dunkelblau dargestellt (aus DLM). Für die Bereiche, in denen die absoluten Differenzen zwischen  $-0,5 \text{ m}^3/\text{ms}$  und  $0,5 \text{ m}^3/\text{ms}$  liegen, wurde die relative Änderung auf 0 % gesetzt, um zu vermeiden, dass absolut kleine Änderungen einen großen Effekt in der relativen Darstellung suggerieren.

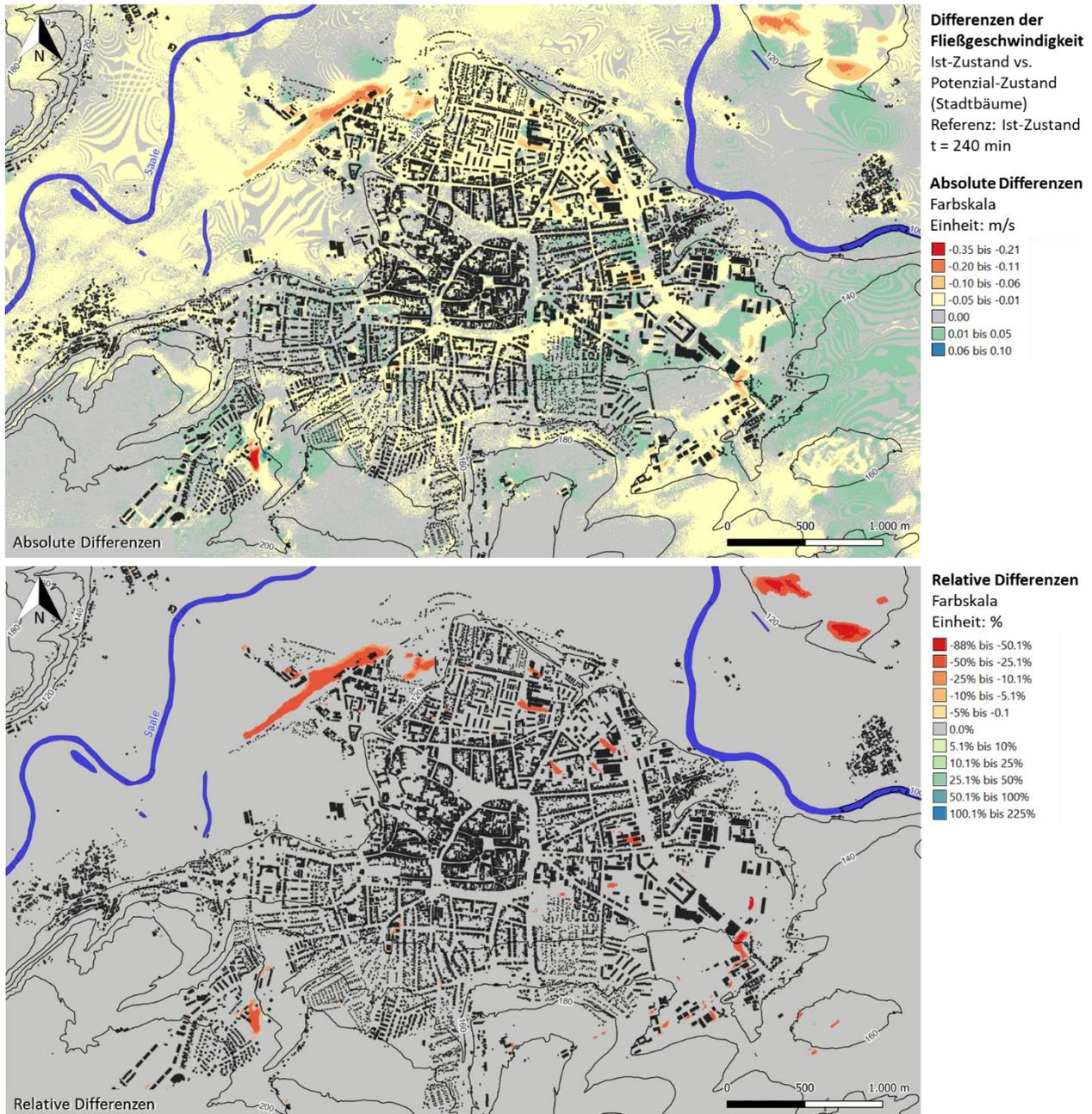


Abb. 2.2.5: Absolute Differenzen (oben) und relative Differenzen (unten) der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft (im Höhenmittel) zwischen Ist-Zustand und Potenzial-Zustand mit Stadtbäumen im Kerngebiet (Integrationszeit 4 h). Als Referenz gilt der Ist-Zustand. Eigene Darstellung mit dem Programm QGIS. Die Gebäude sind mit schwarz und Gewässer mit dunkelblau dargestellt (aus DLM). Für die Bereiche, in denen die absoluten Differenzen zwischen  $-0,05 \text{ m}^3/\text{ms}$  und  $0,05 \text{ m/s}$  liegen, wurde die relative Änderung auf 0 % gesetzt, um zu vermeiden, dass absolut kleine Änderungen einen großen Effekt in der relativen Darstellung suggerieren.

Innerhalb der dicht bebauten Kernstadt zeigen die potenziellen Stadtbäume eine hohe negative Auswirkung (über -10 %) auf die Durchlüftungswirkung auf dem Markplatz im Zentrum der Stadt und in einigen Innenhöfen und Straßen (siehe Abbildung 2.2.6). Allerdings liegen die absoluten Änderungen nur zwischen  $-0,6 \text{ m}^3/\text{ms}$  und  $-1,0 \text{ m}^3/\text{ms}$ . In den Bereichen bleiben die absoluten Änderungen in der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft unter  $-0,05 \text{ m/s}$ .

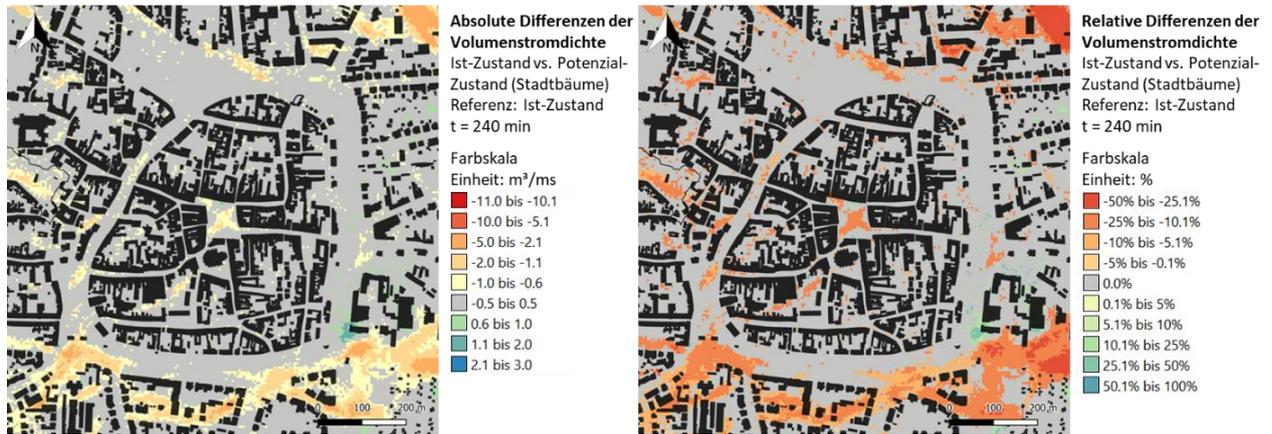


Abb. 2.2.6: Absolute Differenzen (links) und relative Differenzen (rechts) der Kaltluftvolumenstromdichte zwischen Ist-Zustand und Potenzial-Zustand mit Stadtbäumen in der Kernstadt (Integrationszeit 4 h). Als Referenz gilt der Ist-Zustand. Eigene Darstellung mit dem Programm QGIS. Auszug etwa 1 km x 1 km von 696020.0; 5670055.0 bis 697000.0; 5671035.0 (UTM). Die Gebäude sind mit schwarz dargestellt (aus DLM). Für die Bereiche, in denen die absoluten Differenzen zwischen  $-0,5 \text{ m}^3/\text{ms}$  und  $0,5 \text{ m}^3/\text{ms}$  liegen, wurde die relative Änderung auf 0 % gesetzt, um zu vermeiden, dass absolut kleine Änderungen einen großen Effekt in der relativen Darstellung suggerieren.

Ähnlich wie bei den Potenzialflächen mit unversiegelten Freiflächen, nehmen in der Ebene der Saale die Kaltluftvolumenströme auch im Falle der Stadtbäume zum großen Teil zwischen  $0,6 \text{ m}^3/\text{ms}$  und  $1,0 \text{ m}^3/\text{ms}$  ab (siehe Abbildung 2.2.4). Relativ gesehen bedeuten diese Änderungen nördlich der Stadt eine geringe negative Auswirkung (unter 5 %) auf die Belüftung und westlich der Stadt eine mäßige bis hohe negative Auswirkung (zwischen 5 % und 25 %) aufgrund der niedrigen Werte im Ist-Zustand. In der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft liegen die absoluten Änderungen in diesen Bereichen bei unter  $0,05 \text{ m/s}$ , d.h. schon minimale absolute Änderungen verursachen große relative Änderungen in der Kaltluftvolumenstromdichte. In der Ebene der Saale außerhalb der Siedlungsgebiete sind fast keine potenziell begrünbaren Flächen definiert (siehe Abbildung 1.3.3) und die Änderungen in der Belüftung sind eventuell durch Rückstauereffekte verursacht.

In einigen offenen oder halboffenen Gebieten innerhalb des Kerngebiets in der Nähe zu den potenziellen Grünflächen zeigen die Simulationen im Potenzial-Zustand eine bis zu  $2,7 \text{ m}^3/\text{ms}$  höhere Kaltluftvolumenstromdichte als im Ist-Zustand (siehe grüne und blaue Bereiche in den absoluten Differenzen in Abbildung 2.2.4). Eine mögliche Ursache dafür könnte sein, dass die Kaltluft durch die Bäume auf den potenziellen Grünflächen kanalisiert wird. Relativ gesehen bedeuten diese Änderungen eine geringe bis hohe positive Auswirkung auf die Belüftung. Ein besonders starker Effekt ist im östlichen Teil der Stadt im Industriegebiet zu beobachten, dort steigen die Werte teilweise sogar über 100 %. Allerdings bleiben die Änderungen in den Gebieten mit einer positiven Auswirkung auf die Belüftung in der Kaltluftgeschwindigkeit unter  $0,05 \text{ m/s}$  und sind damit vernachlässigbar.

Die Differenzen in der Kaltluftmächtigkeit zwischen dem Ist-Zustand und dem Potenzial-Zustand mit Stadtbäumen bleiben ähnlich zu den Differenz-Simulationen mit den unversiegelten Freiflächen über das ganze Modellgebiet sehr niedrig (siehe Abbildung 2.2.7). Auch hier nimmt die absolute Kaltluflhöhe in der Stadt und deren Umgebung größtenteils bis zu maximal 1 m zu und relativ gesehen bleiben die Änderungen wieder fast überall unter 1 %. Nur in der vorher beschriebenen Brachfläche südwestlich der Stadt im Flemminger Weg erreichen die Werte bis zu 5 % (geringe Auswirkung).

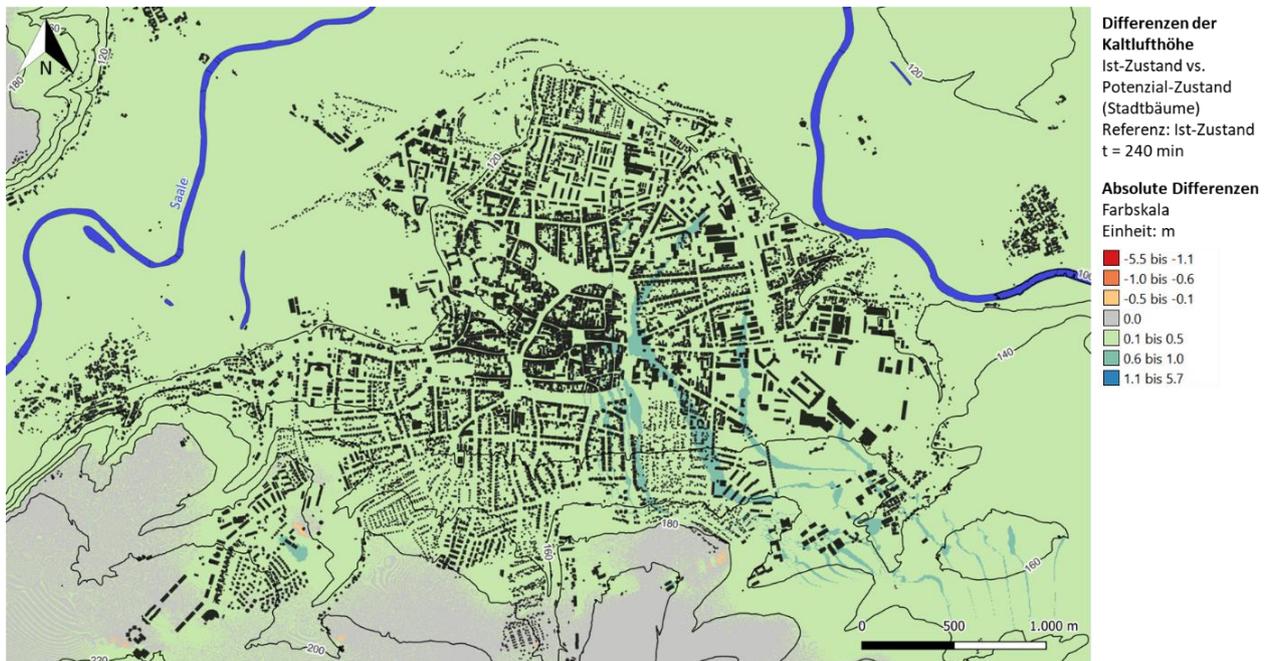


Abb. 2.2.7: Absolute Differenzen der Kaltluflhöhe zwischen Ist-Zustand und Potenzial-Zustand mit Stadtbäumen im Kerngebiet (mit Integrationszeit 4 h). Als Referenz gilt der Ist-Zustand. Eigene Darstellung mit dem Programm QGIS. Die Gebäude sind mit schwarz und Gewässer mit dunkelblau dargestellt (aus der DLM).

Die beobachteten Effekte bezüglich der Kaltluftabflüsse in den Simulationen sind auf die unterschiedlichen Parametersätze im Modell KLAM\_21 für versiegelte und unversiegelte Flächen bzw. Flächen mit Stadtbäumen zurückzuführen. Während sich versiegelte und unversiegelte Flächen lediglich geringfügig im Parameter Rauigkeit unterscheiden, erhöhen sich für Flächen mit Stadtbäumen folgende Parameter:

- Rauigkeitslänge (0,01 m/0,05 m => 0,1 m)
- Mittlerer Bedeckungsgrad mit Bäumen (0 => 0,2)
- Mittlere Baumhöhe (0 => 10 m)
- Blattflächenindex (0 => 6,0)

Welcher der genannten Parameter den größten Einfluss auf die Kaltluftvolumenstromdichte hat, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht. Vermutlich ist es die Kombination aller Parameter.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass auch die Einführung der Stadtbäume auf den Potenzialflächen im Stadtbereich größtenteils nur eine geringe Auswirkung auf die Absolutwerte der Durchlüftung der Stadt Naumburg hat. Punktuell nimmt die Kaltluftvolumenstromdichte – vermutlich durch den Kanalisierungseffekt der Kaltluft – zwar zu, in deutlich mehr Gebieten nimmt sie jedoch ab. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die Durchlüftung im Stadtgebiet Naumburg schon im Ist-Zustand nur als gering eingestuft ist. Durch die Einführung von Stadtbäumen auf den potenziellen Grünflächen, wird diese Durchlüftung nicht verbessert. Damit ergibt sich aber auch, dass nicht mit großen Änderungen der Kaltluftvolumenstromdichte zu rechnen ist. Dieses Bild wurde quantitativ durch die Simulationen bestätigt. Die für die Kaltluftvolumenstromdichte bestimmenden Parameter Kaltluftmächtigkeit und Fließgeschwindigkeit haben sich in Absolutwerten nur wenig geändert. Prozentual gab es in einzelnen Bereichen scheinbar große Auswirkungen, die jedoch vor allem auf die geringen Werten im Ist-Zustand zurückzuführen sind.

Auf einen direkten Vergleich zwischen den beiden Potenzial-Zuständen „Stadtbäume“ und „Unversiegelte Freifläche“ wird in dieser Auswertung verzichtet, da der Ist-Zustand und der Potenzial-Zustand mit den unversiegelten Freiflächen sich nur gering unterscheiden.

# Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen hatten den Zweck zu bestimmen, welche Auswirkungen bestimmte städtebauliche Eingriffe auf die Durchlüftung der Stadt Naumburg haben. Dazu wurden in der Kaltluftsimulation die durch Wollschläger et al. (2022) identifizierten potenziellen Grünflächen im Untersuchungsgebiet in einem ersten Schritt in unversiegelte Freiflächen und in einem zweiten Schritt in Gebiete mit Stadtbäumen umgewandelt. Die so gewonnenen Simulationsdaten wurden mit dem ebenfalls berechneten Ist-Zustand verglichen.

Bei der Betrachtung des Ist-Zustandes fiel bereits auf, dass die Stadt Naumburg auf Basis dieser Simulation nur als gering durchlüftet eingestuft werden kann, was hauptsächlich auf die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft zurückgeführt werden konnte. Im Großteil der Stadt und deren Umgebung bewegte sich die kalte Luft nur mit einer Geschwindigkeit bis zu 0,2 m/s. Lediglich in den nördlichen Bereichen der Stadt erreichten die Geschwindigkeiten bis zu 0,5 m/s und im südlichen Teil der Stadt in den Kleingartengebieten und auf den Wiesen erreichten die Hangwinde bis zu ca. 1,0 m/s. Die Kaltluftmächtigkeit lag im Wesentlichen innerhalb der Kategorisierung mittel bis groß.

Die geringe Durchlüftung wird auch durch eine Spezifik der topographischen Lage der Stadt erklärt. Da Naumburg in einem breiten flachen Tal ca. 20 m oberhalb der Ebene der Saale liegt, wird ein großer Teil der Kaltluft an der Stadt vorbei geleitet. Auch die kleineren Täler südlich der Stadt produzieren nur geringe Mengen Kaltluft, welche darüber hinaus auch noch durch die Bebauung im Stadtgebiet abgebremst werden.

Die Umwandlung der potenziell begrünbaren Flächen in unversiegelte Freiflächen brachte in der Simulation keine nennenswerte Veränderung der Kaltluftmächtigkeit oder der Fließgeschwindigkeit und damit auch nicht der Durchlüftung innerhalb des Stadtgebiets. Dies entspricht den Erwartungen, da in diesem Fall innerhalb der Simulation lediglich der Parameter „Rauigkeitslänge“ leicht erhöht wurde. Während die Schaffung unversiegelter Freiflächen auf die Durchlüftung der Stadt keinen Einfluss hat, kann sie einen positiven Effekt z.B. im Falle von Starkregenereignissen haben.

Ein größerer Durchlüftungseffekt wurde für die Einführung von Stadtbäumen auf den potenziellen Grünflächen erwartet. Insbesondere sollte herausgefunden werden, inwiefern die Einführung dieser Stadtbäume die Durchlüftung innerhalb Naumburgs negativ oder positiv beeinflusst. Die höchsten absoluten Differenzen in den Kaltluftvolumenströmen finden sich nordwestlich der Stadt in der Bahnhofsvorstadt, eines der wenigen Gebiete, in denen schon der Ist-Zustand als mäßig bis hoch durchlüftet bewertet wurde. In dieser Gegend zeigten die Simulationen eine deutliche Verringerung der Kaltluftvolumenstromdichte um bis zu 11 m<sup>3</sup>/ms und prozentual mit über 25 % eine hohe negative Auswirkung auf die Durchlüftung. Allerdings wird dieses Gebiet auch im Potenzial-Zustand mit Stadtbäumen laut Simulation weiterhin als mäßig bis hoch durchlüftet charakterisiert. In den potenziell begrünbaren Bereichen innerhalb der Stadt hat die Kaltluftvolumenstromdichte absolut betrachtet größtenteils um bis zu 5 m<sup>3</sup>/ms abgenommen. Relativ gesehen weisen die Änderungen auf eine hohe negative Auswirkung auf das Durchlüftungsvermögen hin, die jedoch vor allem auf die geringen Absolutwerte im Ist-Zustand zurückzuführen ist. Beide für die Kaltluftvolumenstromdichte bestimmenden Parameter Kaltluftmächtigkeit und Fließgeschwindigkeit haben sich in Absolutwerten nur wenig geändert.

Basierend auf den Simulationsergebnissen kann geschlossen werden, dass die Begrünung mit Stadtbäumen auf den Potenzialflächen im Stadtbereich größtenteils nur eine geringe Auswirkung auf die Absolutwerte der Durchlüftung der Stadt Naumburg haben. An einigen wenigen Stellen nimmt die Kaltluftvolumenstromdichte vermutlich durch den Kanalisierungseffekt der Kaltluft zwar zu, in deutlich mehr Gebieten nimmt sie jedoch ab. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die Durchlüftung im Stadtgebiet Naumburg schon im Ist-Zustand nur als gering eingestuft ist. Die Einführung der Stadtbäume auf den potenziellen Grünflächen ändert die Durchlüftung der Stadt kaum, sie wird weiterhin als gering durchlüftet bewertet. Daraus würde man mit Bezug auf die Durchlüftung zunächst keine Handlungsempfehlung für eine räumliche Verdichtung mit Stadtbäumen ableiten.

Gleichzeitig werden durch Stadtbäume aber eine Reihe positiver Effekte auf das Wohlbefinden der Bewohner erzielt, z.B. Verbesserung des thermischen Komforts, Kühlung der Umgebungsluft durch Beschattung und Evapotranspiration und weitere Ökosystemdienstleistungen (Wollschläger 2022), die diese geringen negativen Effekte überwiegen. Sollte aus diesen Gründen eine Begrünung mit Stadtbäumen geplant werden, wird empfohlen basierend auf den hier vorgestellten Simulationsergebnissen zu prüfen, an welchen Orten gezielt Kaltluftkorridore erhalten bleiben sollen, z.B. im Bereich der Gleise um den Hauptbahnhof in der Bahnhofsvorstadt.

In einem nächsten Schritt muss darüber hinaus auch bestimmt werden, in welchen Bereichen überhaupt eine Bepflanzung mit Stadtbäumen möglich ist. Die für diese Simulation verwendeten Flächen wurden wie im Kapitel „Methoden“ beschrieben automatisch generiert.

Mit der Stadt Naumburg wurde ein Modellgebiet ausgewählt, das bereits im Ist-Zustand eine geringe Durchlüftung zeigt. Die Übertragbarkeit der Resultate auf andere Städte ist nur begrenzt gegeben. Für eine weiterführende Analyse könnte eine Stadt mit besonders guter Durchlüftung ausgewählt werden, für die man dann einen deutlich stärkeren Effekt der Stadtbäume erwarten würde.

Ferner könnte für die Stadt Naumburg das Gesamtmodellgebiet deutlich größer gefasst werden, um zum Beispiel den Einfluss des regionalen Strömungssystems auf die Kaltluftvolumenströme zu studieren. In den hier durchgeführten Simulationen wurde der Regionalwind nicht betrachtet.

# Literatur

AMBIMET, 2000: Simulation der regionalen und bodennahen lokalen Kaltluftabflüsse und Massenströme in Thüringen auf der Grundlage der TK25; Projektbericht; München.

BfN – Bundesamt für Naturschutz, 2011: Biogeografische Regionen und naturräumliche Haupteinheiten Deutschlands. Naturräume und Großlandschaften Deutschlands. Stand der Fachdaten: 2011. Verfügbar unter: <https://www.bfn.de/daten-und-fakten/biogeografische-regionen-und-naturraeumliche-haupteinheiten-deutschlands> (aufgerufen am 14.12.2022)

CDC, 2006: Heat-related deaths – United States, 1999-2003. Morbidity and mortality weekly report, 55, 796-798.

DWD, 2017: Kaltluftabflusssimulationen mit KLAM\_21 für die Stadt Leipzig und Umgebung. Amtliches Gutachten. Klima- und Umweltberatung, Offenbach.

DWD, 2022: Wetter- und Klimalexikon, Beaufort-Skala. Verfügbar unter: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=100390&lv2=100310> (aufgerufen am 01.11.2022)

GEONET, 2002: GIS-basierte Aufbereitung der Modellergebnisse zur Kaltluftsimulation für die Nutzung im Rahmen der Landes- und Regionalplanung in Thüringen; Abschlussbericht; Hannover.

GoogleMaps, 2022: Verfügbar unter: <https://goo.gl/maps/rjn7UCrtc3qwzH359> (aufgerufen am 01.11.2022)

Habeeb, D., Vargo, J., Stone Jr. B., 2015: Rising heat wave trends in large US cities. *Natural Hazards*, 76, 1651-1665.

Hardin, P.J., Jensen, R.R., 2007: The effect of urban leaf area on summertime urban surface kinetic temperatures: A Terre Haute case study. *Urban Forestry & Urban Greening*, 6, 63-72.

Kirchner, B., 1999: Planungsrelevante Ergebnisse zum Stadtklima von Dresden sowie Erfahrungen bei der Nutzung. *Wiss. Mitt. Inst. Meteorol. Univ. Leipzig u. Inst. f. Troposphärenforschg. Leipzig* 13, 126-141.

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006: World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* (2006), 15, 259-263. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130> (aufgerufen am 17.11.2022)

Kratzer, A., 1937: *Das Stadtklima*, Braunschweig.

Landsberg, H. E., 1981: *The Urban Climate*, New York.

Oke, T.R., 1987: *Boundary Layer Climates*, second ed. Routledge, London.

OpenStreetMaps, 2022: Verfügbar unter: <https://www.openstreetmap.org/#map=14/51.1506/11.7885> (aufgerufen am 01.11.2022)

Sievers, U., 2008: *Das Kaltluftabflussmodell KLAM\_21. Theoretische Grundlagen und Handhabung des PC-Modells*. Deutsche Wetterdienst, Klima- und Umweltberatung, Offenbach am Main, März 2008.

Sievers, U., Kossmann, M., 2016: Drainage wind model KLAM\_21. *Weather and Climate*, 36, 2-24.

Spohr, G., Riediger, U., 2018: Stadtklima und Hitze – Kommunale Herausforderungen und Aktivitäten zur Klimaanpassung am Beispiel der Landeshauptstadt Erfurt. *UVP-report*, 32 (4), 160-167.

Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt, 2022: *Statistischer Bericht – Bevölkerungsstand, Natürliche Bevölkerungsbewegung, Wanderungen. Bevölkerung der Gemeinden*. Stand: 31.12.2021. Verfügbar unter: [https://statistik.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Landsaemter/StaLa/startseite/Themen/Bevoelkerung/Berichte/Bevoelkerungsstand/6A102\\_02\\_21-A.pdf](https://statistik.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Landsaemter/StaLa/startseite/Themen/Bevoelkerung/Berichte/Bevoelkerungsstand/6A102_02_21-A.pdf) (aufgerufen am 17.11.2022)

Stewart, I. D., 2011: A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 31, 200-217.

Stull, R. B., 2000: *Meteorology for scientists and engineers*; Belmont.

Troen, I., & Lundtang Petersen, E., 1989: *European Wind Atlas*. Risø National Laboratory, S. 58.

VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, 2003: *Umweltmeteorologie – Lokale Kaltluft*. VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5.

Wainwright, S.H., Buchanan, S.D., Mainzer, H.M., Parrish, R.G., Sinks, T.H., 1999: Cardiovascular mortality – the hidden peril of heat waves. *Prehospital and Disaster Medicine*, 14, 222-231.

Werner, G., Kress, R., Mai, H., Reuter, W., Roth, D., Schulz, V., 1979: Regionale Luftaustauschprozesse und ihre Bedeutung für die räumliche Planung. In: Schriftenreihe Raumordnung des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn.

Wollschläger, N., 2022: Grüne Infrastruktur zur Klimaanpassung im urbanen Raum. Maßnahmenkatalog. KlimaKonform, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Departement Stadt- und Umweltsoziologie.

Wollschläger, N., Zinck, F., Schlink, U., 2022: Potentialanalyse Grünflächen Naumburg. Verfügbar unter: [https://files.ufz.de/~susoz-klimakonform-01/Potentialanalyse\\_Boden\\_Naumburg.html](https://files.ufz.de/~susoz-klimakonform-01/Potentialanalyse_Boden_Naumburg.html) (aufgerufen am 13.12.2022)

Das Projekt wird vom  
Bundesministerium für Bildung und  
Forschung gefördert – TUD 01LR2005A.

Mehr Informationen über folgenden  
Link: [klimakonform.de](https://www.klimakonform.de)

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung**