Bachelorarbeit

Entwicklung von Algorithmen zur Berechnung der aerodynamischen Oberflächenrauigkeit für mikroskalige Strukturen

Marcel Gangwisch

26. August 2014

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Institut für Informatik

Professur für Meteorologie und Klimatologie

Bearbeitungszeitraum

27. 05. 2014 – 27. 08. 2014

Gutachter

Prof. Dr. Hannah Bast

Prof. Dr. Andreas Matzarakis

Zusammenfassung

Das thermische Wohlbefinden der Bewohner einer Stadt wird durch unterschiedliche meteorologische Größen beeinflusst. Eine wichtige Steuergröße stellt die Windgeschwindigkeit dar, da durch eine erhöhte Windgeschwindigkeit eine Reduzierung der thermischen Belastung stattfinden kann. Die bewegten Luftmassen in der Atmosphäre über einer Stadt werden durch die geometrischen Eigenschaften der Erdoberfläche beeinflusst. Insbesondere stellen Gebäude und die Vegetation ein Hindernis für die durchströmende Luft dar. Diese Wirkung wird durch die aerodynamische Oberflächenrauigkeit ausgedrückt.

Zur Beurteilung dieser Wirkung wurden in der Arbeit verschiedene Ansätze zur Berechnung der Rauigkeit miteinander verglichen. Im Anschluss daran wurde das mikroskalige Modell "SkyHelios" vorbereitend für räumliche Berechnungen um eine räumliche Datenbank erweitert um das Management der Daten zu verbessern. Nachfolgend konnten der "Morphometrische Ansatz" (Lettau 1969), der "Effektive Höhen Ansatz" (Matzarakis und Mayer 1992; Mayer und Matzarakis 1992), sowie der "vereinfachte Ansatz" (Gál und Sümeghy 2007; Gál und Unger 2008) zur Berechnung der aerodynamischen Oberflächenrauigkeit implementiert werden. Dafür wurden die Daten in die Datenbank eingelesen und für jedes Gebäude mit der Rotationsmatrix für den zweidimensionalen Raum die frontale Fläche berechnet. Um eine räumliche Differenzierung der Oberflächenrauigkeit zu erhalten, wurde für jedes Gebäude eine Voronoizelle auf Basis der Gebäudeform berechnet. Im Anschluss daran konnte jeweils die Rauigkeit des Gebäudes auf Basis der Gebäudegeometrien bestimmt werden.

Abschließend wurde das Verfahren für ein Modellgebiet in Stuttgart angewendet. Es wurden sowohl windrichtungsunabhängige Rauigkeitslängen, sowie effektive Höhen als auch windrichtungsabhängige Rauigkeitslängen berechnet. Die Ergebnisse der drei Ansätze wurden jeweils analysiert und miteinander verglichen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt dabei Prof. Dr. Andreas Matzarakis, der mir die Bearbeitung dieses interessanten Themas ermöglicht hat. Gleichermaßen bin ich auch Prof. Dr. Hannah Bast, die es mir ermöglicht hat, dieses interdisziplinärer Thema zu bearbeiten, zu großem Dank verpflichtet. Außerdem möchte ich mich an dieser Stelle insbesondere auch bei Christine Ketterer, Dominik Fröhlich sowie allen Mitarbeitern der Hebelstraße bedanken, die mir stets mit ihrem Rat beiseite standen.
Mein Dank gilt auch meiner Familie und meinen Freunden, welche mich stets unterstützt und ermutigt haben.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **I**

Danksagung **III**

1 Einführung und Zielsetzung **1**

1.1 Einführung 1
1.2 Stand der Wissenschaft 2
1.3 Motivation 2
1.4 Zielsetzung 3

2 Grundlagen **5**

2.1 Mikroskalige Modelle 5
2.2 SkyHelios 7
2.2.1 SkyViewFactor (SVF) und Sonnenscheindauer 8
2.2.2 Berechnung abgeleiteter human-biometeorologischer Größen 9
2.3 Aufbau der Atmosphäre über einer Stadt 10
2.4 Aerodynamische Oberflächenrauigkeit 10
2.5 Mikrometeorologische Feldbeobachtung 13
2.6 Rauigkeitsklassifikation 14
2.7 Geometrische Oberflächenrauigkeit 14
2.8 Methoden zur geometrischen Berechnung 16
2.8.1 Morphometrischer Ansatz nach Lettau 16
2.8.2 Geometrische Oberflächenrauigkeit nach Kondo und Yamazawa . . . 16
2.8.3 Effektive Höhen nach Matzarakis und Mayer 17
2.8.4 Komplexer Ansatz zur Berechnung der Rauigkeitslänge nach Bottema 18
2.8.5 Vereinfachter Ansatz zur Berechnung der Rauigkeitslänge nach Gál . 20
2.9 Übersicht über die Ansätze 24
2.10 Bezugsraum 26
2.10.1 Rastermethode 26
2.10.2 Voronoi-Diagramm-Methode 27

3 Methodik **31**
3.1 Organisation der Daten 32
3.1.1 SQLite 33
3.1.2 GDAL 33
3.1.3 Spatialite 34
3.2 Aufbereitung der Eingangsdaten 35
3.2.1 Bestimmung der Frontalflächen in Abhängigkeit der Windrichtung . . 35
3.2.2 Gebäudegruppenbildung 35
3.3 Aufteilung des Raums in Cluster 37
3.3.1 Erzeugung der Voronoi Punkte 37
3.3.2 Fortunes Algorithmus: Erzeugung des Voronoi Diagramms für Punkte 38
3.3.3 Anwendung für Polygone 40
3.4 Berechnung der Oberflächenrauigkeit 43

4 Anwendung: Berechnung der Oberflächenrauigkeit **45**
4.1 Charakteristika des Modellgebietes 45
4.2 Ergebnisse 45

5 Evaluation **61**

6 Diskussion **65**

7 Schlussfolgerung **67**

8 Ausblick **69**

Literaturverzeichnis **VII**

Abkürzungsverzeichnis **XVII**

1 Einführung und Zielsetzung

1.1 Einführung

Im Jahr 1800 lebten ca. 3% der Weltbevölkerung in Städten mit mehr als 5000 Einwohnern. 1900 stieg der Anteil der in Städten lebenden Menschen auf 13% (Brunn et al. 2012) und im Jahr 2013 auf 53% (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2013). Durch diesen starken Bevölkerungsanstieg in Städten verändern sich diese. Künstliche Oberflächen, die anthropogene Freisetzung von Luftschadstoffen und die anthropogene Wärmeproduktion verändern die Atmosphäre. Die Strahlungsflüsse und das Windfeld weisen in urbanen Gebieten eine sehr starke Variabilität auf (Matzarakis 2001; Oke 1973). Der Wind wird besonders durch die aerodynamische Oberflächenrauigkeit der Hindernisse (z.B. Gebäude, Bäume) beeinflusst. In Städten, die in topografisch geprägten Gebieten liegen (z.B. Kessellage von Stuttgart), ist der Kaltluftabfluss für die städtische Durchlüftung und die nächtliche Abkühlung wichtig (z.B. der Höllentäler in Freiburg, der Nessenbachtäler in Stuttgart).
In der Stadtplanung ist es daher besonders wichtig, den Einfluss städtebaulicher Maßnahmen (z.B. beim Bau von Industrieanlagen) auf den Kaltluftabfluss zu bestimmen. Insbesondere müssen hierbei Luftleitbahnen (in ihren sowohl thermischen als auch lufthygienischen Eigenschaften) durch Modelle oder Messungen hinsichtlich ihrer Ausdehnung und lufthygienischen Qualität charakterisiert werden. Durch den starken Bevölkerungsanstieg in den Städten änderte sich die Morphologie der Städte. Die Gebäude wurden immer größer und immer dichter aneinander gebaut. Es entstanden schmale Straßenschluchten mit einem geringen Seitenverhältnis (Breite/Höhe). Durch die Veränderung der Stadtgeomorphologie verändern sich die aerodynamischen Eigenschaften der Oberfläche. Die aerodynamische Oberflächenrauigkeit steigt an, sodass durch planerischen Veränderungen Luftleitbahnen (Mayer et al. 1994) verbaut werden. Durch die Behinderung der städtischen Durchlüftung steigt in manchen Städten die Konzentration der Luft-Verunreinigungen (NO_x) an. Über manchen Städten erstreckt sich eine große Smog-Wolke aus Ruß und Feinstaub (PM_{10}) (Umweltbundesamt 2013). Ein erhöhtes gesundheitliches Risiko der Bevölkerung in den Städten ist die Folge. (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen 2010)

1.2 Stand der Wissenschaft

Es gibt einige Ansätze zur Bestimmung der aerodynamischen Oberflächenrauigkeit. Die aerodynamische Oberflächenrauigkeit gehört zu den Eigenschaften der Erdoberfläche, durch die horizontale Luftströmungen beeinflusst werden. Die Ansätze werden in Abschnitt 2.5 - Abschnitt 2.8 genauer erläutert. Diese basieren zum Teil auf einer Feldbeobachtung von Wind und Turbulenz. Die Feldbeobachtung ist für die meisten Gebiete räumlich nicht vorhanden. Insbesondere gibt es aus dem mittleren Bereich der Atmosphäre einer Stadt, zwischen der Urban Boundary Layer sowie der Urban Canopy Layer kaum Messwerte zur Windgeschwindigkeit. Des Weiteren gibt es deskriptive Ansätze zur Rauigkeitsklassifikation. Diese basieren auf allgemeinen Landschaftsbeschreibungen und sind somit für die räumliche Differenzierung der Rauigkeit in einer Stadt zu ungenau und damit ungeeignet. Des weiteren gibt es auch einige theoretische Ansätze zur Berechnung der geometrischen Rauigkeit (siehe: Abschnitt 2.8). Es gibt bisher allerdings keine Implementierung dieser Ansätze in einem mikroskaligen Modell (siehe: Abschnitt 2.1).

1.3 Motivation

Mit Hilfe der aerodynamischen Oberflächenrauigkeit ist es möglich, Luftleitbahnen innerhalb einer Stadt zu identifizieren. Diese sind für die städtische Durchlüftung von großer Bedeutung, da damit die Konzentration der Luft-Verunreinigungen im urbanen Raum reguliert wird. Außerdem lässt sich durch die Rauigkeit ein genaueres Windfeld berechnen, das nötig ist, um human-biometeorologische, thermische Bewertungsindizes genauer zu bestimmen, da diese durch den Wind modifiziert werden. Mit Hilfe der human-biometeorologischen Bewertungsindizes ist eine human-biometeorologische Bewertung möglich, die den thermischen Komfort eines Menschen beurteilt.
Aktuelle unterstützte biometeorologische Bewertungsindizes sind die “Physiologisch Äquivalente Temperatur” (Höppe 1999; Matzarakis et al. 1999; Mayer und Höppe 1987) (PET) und der “Universal Thermal Climate Index” (UTCI). Diese basieren derzeit aber noch nicht auf simulierten Winddaten. Um den Wind in mikroskaligen Modell korrekt zu simulieren, wird die aerodynamische Oberflächenrauigkeit benötigt.

Damit solche Berechnungen mit Hilfe mikroskaliger Modelle durchgeführt werden können, müssen die unterschiedlichen Eingangsdaten, dir zur Berechnung benötigt werden, in einer geeigneten Weise verwaltet werden, so dass z.B. unterschiedliche räumliche Bezugssysteme für die eigentliche Berechnung irrelevant sind. Das erfordert zusätzliche Mechanismen die eine schnelle Bereitstellung und Bearbeitung der Daten ermöglichen. Gleichzeitig muss die

Berechnung der Rauigkeit auf Algorithmen basieren, die eine effiziente Ausführung ermöglichen, sodass die Simulation in einer annehmbaren Zeit für den Anwender eines mikroskaligen Modells durchführbar ist.

1.4 Zielsetzung

Im Rahmen der Arbeit sollen bestehende Ansätze zur Berechnung der aerodynamischen Oberflächenrauigkeit betrachtet und miteinander verglichen werden. Anschließend soll ein Ansatz in das mikroskalige Modell "SkyHelios" (Matuschek und Matzarakis 2010; Matzarakis und Matuschek 2010) (siehe: Abschnitt 2.2) implementiert werden. "SkyHelios" muss so angepasst werden, dass die Berechnung der aerodynamischen Oberflächenrauigkeit modular in "SkyHelios" integriert werden kann. Die Berechnung soll mit allen unterstützten Datenformaten korrekt funktionieren.

2 Grundlagen zur Berechnung der Oberflächenrauigkeit

2.1 Mikroskalige Modelle

Mikroskalige Modelle sind Computermodelle zur Berechnung des Mikroklimas.

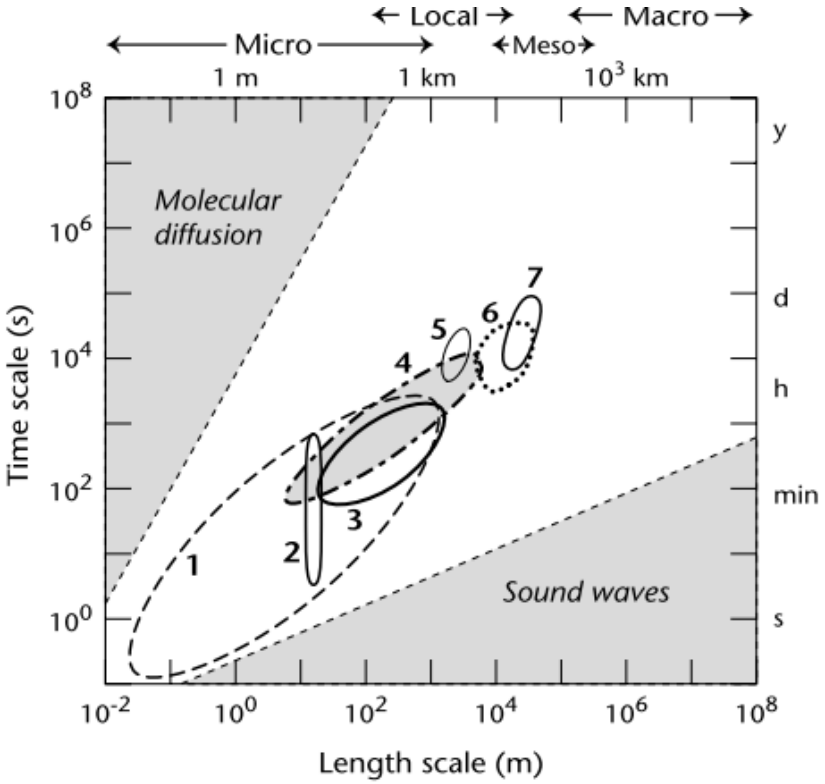


Abbildung 2.1: Räumliche und zeitliche Größenordnungen der Stadtklimatologie. 1-7 beschreiben beispielhaft die räumliche und zeitliche Ausdehnung von Windphänomenen: 1. durch Hindernisse induzierte Luftwirbel, 2. Vortex in einer Straßenschlucht, 3. einzelne Wirbel durch Gebäude, 4. Abluftfahne von Schornsteinen, 5. durch Grünflächen induzierte Windsysteme, 6. Stadt-Umland Windsystem, 7. Abluftfahne der Stadt

Das Mikroklima beschreibt das kleinräumige Klima in einer horizontalen Größenordnung von bis zu einigen Kilometern. In Abbildung 2.1 sind die räumlichen und zeitlichen Größenordnungen der Stadtklimatologie zu sehen.

Im Folgenden sollen die unterschiedlichen mikroskaligen Modelle, RayMan, ENVI-met V. 3.5 und SkyHelios, genauer erläutert werden:

- RayMan ist ein mikroskaliges Modell (Matzarakis et al. 2007; Matzarakis et al. 2010) und erfüllt im Wesentlichen drei Aufgaben:
  - die Berechnung der Globalstrahlung und Strahlungsflüsse in komplexer Umgebung.
  - die Berechnung der Mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} (Fanger 1972) für komplexe Umgebungen.
  - die Berechnung verschiedener human-biometeorologischer, thermischer Indizes, wie Predicted Mean Vote (PMV (Fanger 1972)), PET, UTCI, Standard Effective Temperature (SET* (Gagge et al. 1986)) oder die gefühlte Temperatur (pT (Staiger et al. 2012)) auf der Grundlage von Mess- oder Modelldaten.

  Die notwendigen meteorologischen Eingangsparameter sind Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Bewölkung oder Globalstrahlung. Die topographisch-morphologischen Eingangsparameter können als Fischaugfotos, GIS-Daten eingelesen werden oder selbst gezeichnet werden.

- ENVI-met V. 3.5 ist ein dreidimensionales, nicht-hydrostatisches Computermodel zur Berechnung von Mikroklima und Luftqualität in urbanen Räumen unter Berücksichtigung der Interaktionen zwischen Pflanzen, Oberflächen (Gebäude und Vegetation) und der Luft (Bruse und Fleer 1998; Huttner 2012). Die horizontale Auflösung beträgt zwischen 0,5 und 10 m, die zeitliche 10 s. Dabei ist der übliche Zeitrahmen für die Simulation ein bis mehrere Tage und das Modellgebiet kann maximal 250 x 250 Gitterpunkte beinhalten.

  Ein eindimensionales Antriebsmodell gibt die Randbedingungen für das dreidimensionale atmosphärische Hauptmodell vor. Die Gesetzten der allgemeinen Atmosphärenphysik, der Strömungsmechanik und Thermodynamik bilden die Grundlage zur Berechnung der kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse und folgend der Energiebilanz, sowie der Turbulenz. Die Vegetation wird mithilfe des Blattflächenindexes (LAI), der Fotosynthesezyklus, Blatttemperatur, Filtration, Transpiration, Evaporation und Abschattung beachtet. Bei den Gebäuden werden Wärmefluss, Abschattung und Oberflächentemperatur simuliert. Das Bodenmodell besteht aus 10 Gitterpunkten bis zu einer Tiefe von 1,75 m, wobei Bodentemperatur und -wassergehalt berücksichtigt werden. Das Modell nimmt eine neutrale Schichtung (konstante Potentielle Temperatur mit der Höhe), ein logarithmisches Windprofil, konstante Windrichtung und ein lineares Feuchtigkeitsprofil an.

  Die Eingangsparameter für die Initialisierung des eindimensionalen Randmodells sind:

- Windgeschwindigkeit und -richtung 10 m über Grund
- Auswahl der Rauhigkeitslänge z_0
- Initialtemperatur der Atmosphäre
- Initialtemperatur und -feuchte des Bodens
- Spezifische Feuchte in 2500 m Höhe
- Relative Feuchte auf 2 m.

Aber auch Bewölkung und CO_2 Konzentration können vorgegeben werden. Zusätzlich kann das Modell durch stündliche Richtwerte der Lufttemperatur und -feuchte "geforct" werden. Des Weiteren ist aufgrund der Überschätzung der Globalstrahlung auch die Anpassung des Ausgleichsfaktors für die kurzwellige Strahlung von Bedeutung.

2.2 SkyHelios

SkyHelios (Matuschek und Matzarakis 2010; Matzarakis und Matuschek 2010) ist ein mikroskaliges Simulationsmodell zur Berechnung mikrometeorologischer Kenngrößen im urbanen Raum. Bei der Entwicklung von SkyHelios wurde besonderen Wert auf bestimmte Punkte gelegt:

- Reduzierung der Laufzeitkomplexität durch intensiven Einsatz des Grafikprozessors (GPU)
- Reduzierung der Kosten durch die Verwendung quelloffener und freier Drittsoftware
- Möglichkeit zur Berechnung mikrometeorologischer Kenngrößen für gezielte Punkte, sowie räumlich für ein komplettes Modellgebiet

Als Datengrundlage zur Berechnung der mikrometeorologischen Kenngrößen unterstützt SkyHelios Daten aus digitalen Geländemodellen (DEM), meist in Form von Rasterdaten sowie aus Vektordaten. Es können unterschiedliche Rasterformate (siehe: GDAL im Unterabschnitt 3.1.2), sowie unterschiedliche Vektordaten (siehe: OGR im Unterabschnitt 3.1.2 und Daten von urbanen Hindernissen (OBS) (Matzarakis et al. 2007) eingelesen werden.

Aus den eingelesenen Daten wird mit Hilfe der 3D Grafik Engine Mogre (Ogre Team 2014) ein dreidimensionales Modellgebiet in einer Renderszene nachgebaut, wodurch indirekt Berechnungen auf der GPU möglich werden.

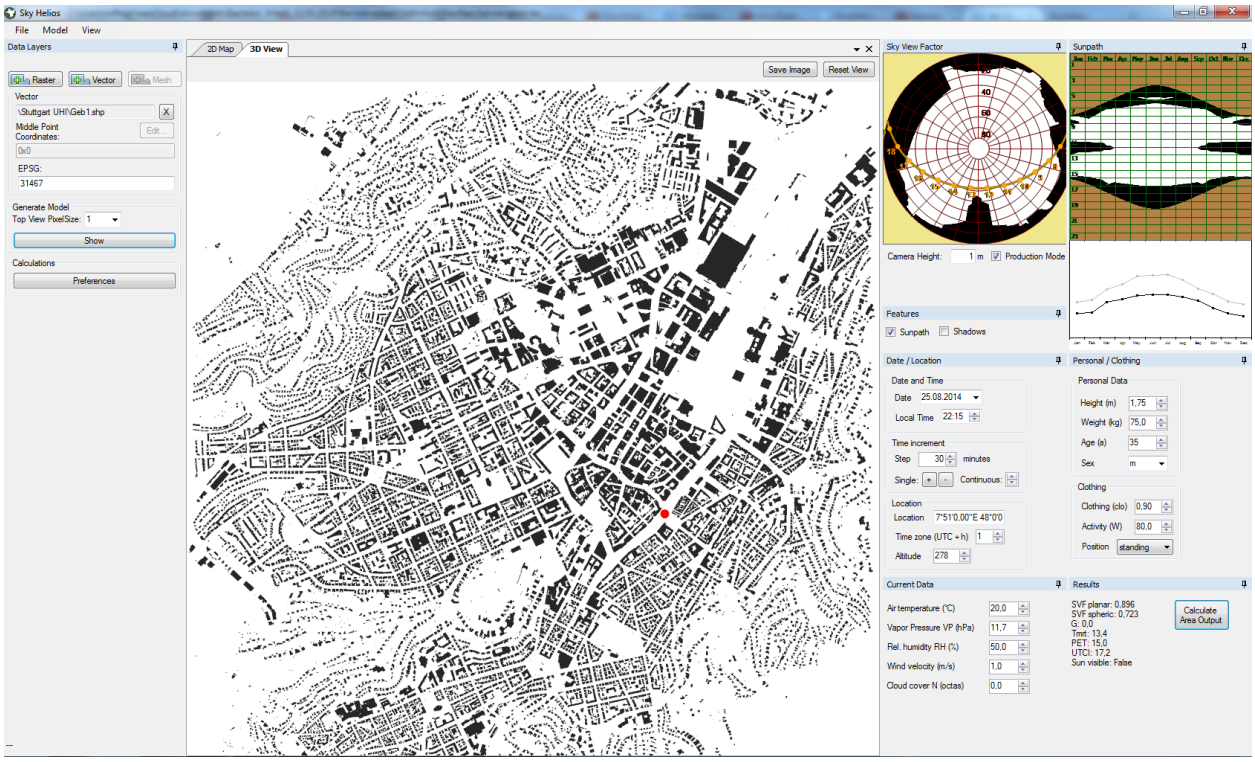


Abbildung 2.2: Hauptfenster von SkyHelios; Links: Verwaltung der Eingangsdaten, Mitte: dreidimensionale Ansicht des Modellgebietes, Rechts: Konfiguration der Simulation; Ausgabe des SVF, Roter Punkt: aktuell betrachtete Position

2.2.1 SkyViewFactor (SVF) und Sonnenscheindauer

Das ursprüngliche Ziel von SkyHelios war es, ein Modell zu entwickeln, das den Sky View Factor flächendeckend für ein Modellgebiet berechnen kann.

Sky View Factor (SVF): Der Sky View Factor ist ein Maß für die Horizontüberhöhung des oberen Halbraums durch Hindernisse (z.B. Gebäude, Bäume). Der SVF beschreibt somit den Anteil des direkt sichtbaren Himmels an einem gegebenen Ort in Bezug zum maximal möglichen sichtbaren Himmels.

In Kombination mit dem Sonnenstand zu einem gegebenen Datum und Ort kann in SkyHelios anschließend die reale Sonnenscheindauer berechnet werden.

Reale Sonnenscheindauer: Die reale Sonnenscheindauer gibt an, wie lange die Sonne an einem Ort direkt sichtbar ist. Die reale Sonnenscheindauer wird direkt durch den SVF beeinflusst.

Exemplarisch zeigt Abbildung 2.3 den Sky View Factor (weiß) und den Sonnenverlauf (gelb) am 03.06.2014 für den Platz der Alten Synagoge in Freiburg.

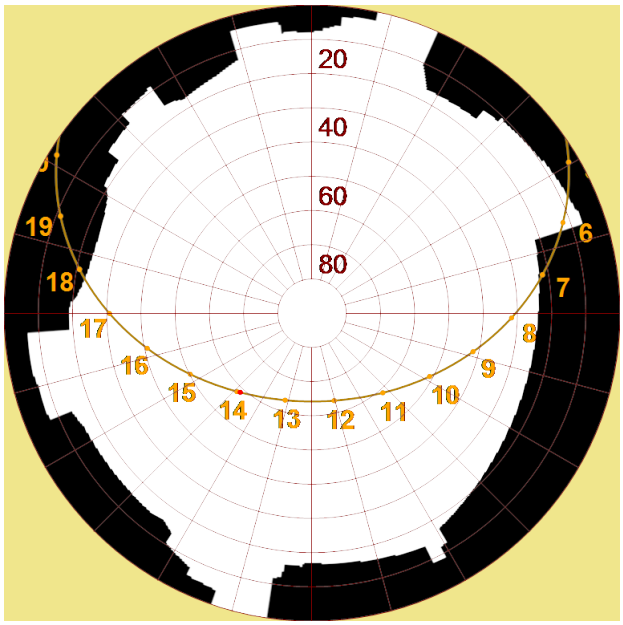


Abbildung 2.3: Sky View Factor (weiß) und Sonnenstand (gelb) am 03.06.2014 in Freiburg auf dem Platz der Alten Synagoge.

2.2.2 Berechnung abgeleiteter human-biometeorologischer Größen

Das ursprüngliche Ziel wurde erfolgreich erreicht, so dass das Model um zusätzliche Berechnungen erweitert wurde.

Besonders wichtig ist die Berechnung der Globalstrahlung (G), die gesamte Solarstrahlung, und der mittleren Strahlungstemperatur (T_{mrt}), "die als einheitliche Temperatur einer schwarz strahlenden Umschließungsfläche definiert [ist], die zum gleichen Strahlungsenergiegewinn eines Menschen führt wie die aktuellen, unter Freilandbedingungen meist sehr uneinheitlichen kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse". Diese meteorologische Größen haben einen großen Einfluss auf das thermische Wohlbefinden eines Menschen. (Matzarakis et al. 2000)

Um das Wohlbefinden bzw. den Komfort eines Menschen unter bestimmten Bedingungen zu simulieren, werden abgeleitete human-biometeorologische Größen berechnet. Diese biometeorologischen Größen basieren nicht nur auf G, T_{mrt}, dem SVF und dem Sonnenstand, sondern außerdem auch auf der Lufttemperatur, dem Dampfdruck, der relativen Luftfeuchte, der Windgeschwindigkeit und der Wolkenbedeckung. Diese meteorologischen Größen können bisher nur als Parameter in SkyHelios eingegeben werden. Tabelle 2.1 zeigt eine Übersicht über die in SkyHelios implementierten human-biometeorologischen Bewertungsindizes und die benötigten Eingangsgrößen.

human-biometeorologischer, thermischer Bewertungsindex	Eingangsgrößen
PET	Körpergröße, Gewicht, Alter, Geschlecht, Aktivität, Lufttemperatur T_{a}, mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt}, Windgeschwindigkeit v, Dampfdruck VP, Kleidungsdurchgangswiderstand clo
UTCI	Lufttemperatur T_{a}, mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt}, Dampfdruck VP, relative Feuchtigkeit RH, Windgeschwindigkeit v

Tabelle 2.1: Übersicht über PET und UTCI, mit den jeweiligen Eingangsgrößen.

2.3 Aufbau der Atmosphäre über einer Stadt

Die planetarische Grenzschicht (Planetary boundary layer (PBL)) beschreibt die Atmosphäre über der Erdoberfläche, die durch die Eigenschaften der Erdoberfläche beeinflusst wird. Die PBL über einer Stadt wird, wie in Abbildung 2.4 gezeigt, in unterschiedliche Schichten eingeteilt. Die Auswirkungen der Stadt sind in der städtischen Grenzschicht (Urban Boundary Layer (UBL)) messbar. Diese Grenzschicht wird auch als urbane Abluftfahne (urban plume) bezeichnet. Unterhalb dieser UBL liegt die städtische Dachschicht. Im weiteren Verlauf interessieren wir uns vor allem für die Eigenschaften der städtischen Dachschicht (Urban canopy layer (UCL)), die durch die aerodynamische Oberflächenrauigkeit beeinflusst wird.

2.4 Aerodynamische Oberflächenrauigkeit

Die aerodynamische Oberflächenrauigkeit beschreibt den Reibungswiderstand, den einzelne Oberflächen aufgrund ihrer Oberflächenstruktur der horizontalen Luftströmung entgegensetzen (Bendix 2004). Die wichtigsten Kenngrößen zur Beschreibung des Reibungswiderstandes sind die Rauigkeitslänge und die Nullpunktverschiebung.

Rauigkeitslänge (z_0) nach (Bendix 2004, S.239): "Die Rauigkeitslänge entspricht der Höhe über der Unterlage, in der die Windgeschwindigkeit theoretisch Null wird."

Nullpunktverschiebung (z_{d}) nach (Bendix 2004, S.240): "(...) [Die Nullpunktverschiebung] gibt an wie weit die theoretischen meteorologischen Profile (die Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe nach dem logarithmischen Windprofil) aufgrund von Bewuchs oder Bebauung in der Vertikalen zu verschieben sind."

Abbildung 2.5 macht deutlich, wie das Windprofil durch die beiden Kenngrößen modifiziert wird. Dargestellt sind drei unterschiedliche Windprofile (das einer flachen Oberfläche, einer

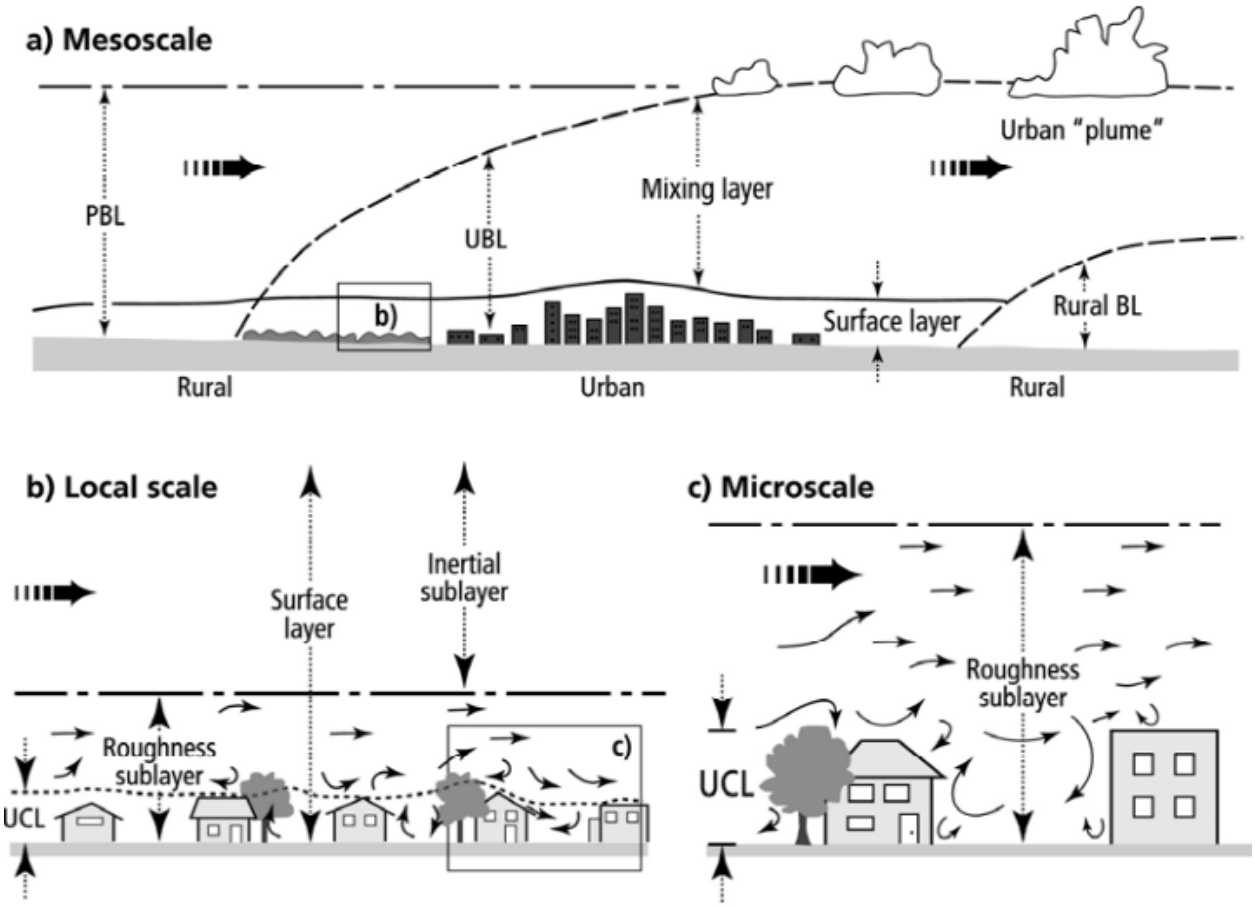


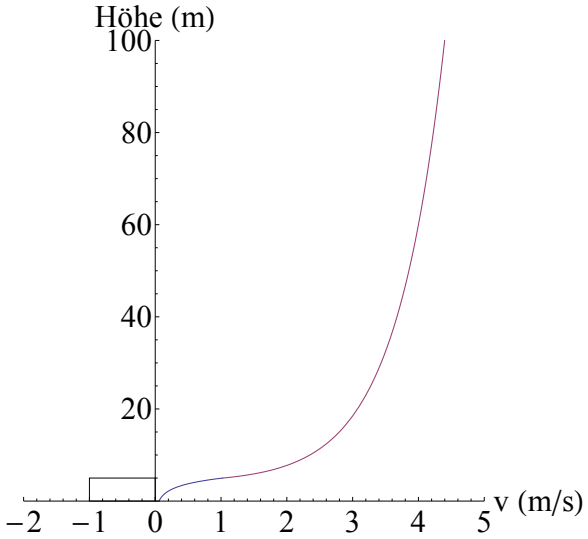
Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der Größenordnungen für eine Stadt in Kombination mit der atmosphärischen Schichtung über der Stadt. PBL: Planetarische Grenzschicht, UBL: städtische Grenzschicht, UCL: städtische Dachschicht (Grafik: (Oke 2004))

Vorstadt, einer Stadt). Die Windprofile sind aus einem exponentiellen Profil (gelb) und einem logarithmischen Profil (blau) zusammengesetzt. Das gesamte Windprofil wird dabei durch ein exponentielles Windprofil im unteren Bereich bis zur Nullpunktverschiebung und ein logarithmischen Windprofil im oberen Bereich oberhalb der Nullpunktverschiebung beschrieben. Die Abbildung soll insbesondere die Verschiebung des logarithmischen Windprofils aufgrund der Nullpunktverschiebung und der Rauigkeitslänge in y-Richtung deutlich machen.

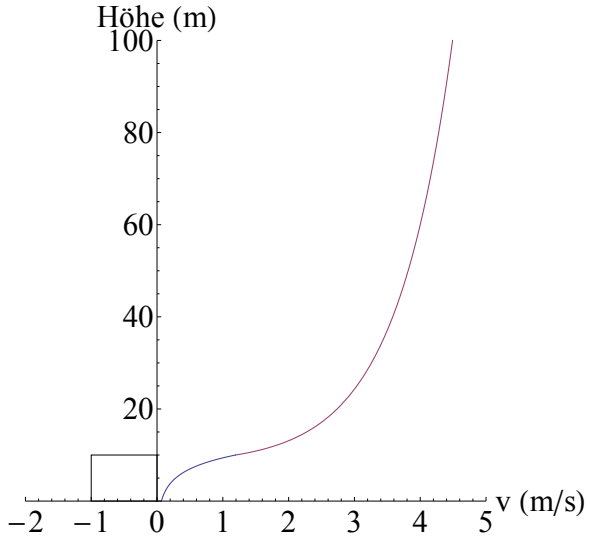
Zur Bestimmung der Rauigkeitslänge und der Nullpunktverschiebung werden drei verschiedene Möglichkeiten vorgestellt:

- Mikrometeorologische Feldbeobachtung von Wind und Turbulenz
- Rauhigkeitsklassifikation
- Geometrische Oberflächenrauhigkeit

z_0: 0.25 m, z_d: 4 m, H = 5 m, u(50m) = 4 m/s



z_0: 0.5 m, z_d: 8 m, H = 10 m, u(50m) = 4 m/s



z_0: 0.8 m, z_d: 32 m, H = 40 m, u(50m) = 4 m/s

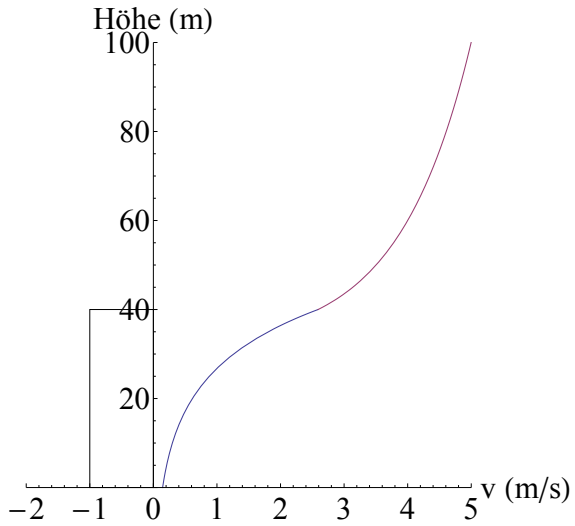


Abbildung 2.5: Modifizierung des Windprofils durch eine Veränderung der Oberflächenrauigkeit; Umland mit einer Gebäudehöhe von $5\,m$ ($z_0 : 0.25\,m$, $z_\mathrm{d} : 4\,m$), Vorstadt mit einer Gebäudehöhe von $10\,m$ ($z_0 : 0.5\,m$, $z_\mathrm{d} : 8\,m$), Stadt mit einer Gebäudehöhe von $40\,m$ ($z_0 : 0.8\,m$, $z_\mathrm{d} : 32\,m$) mit einer festen Referenz Windgeschwindigkeit von 4 m/s in einer Referenzhöhe von 50m

2.5 Mikrometeorologische Feldbeobachtung von Wind und Turbulenz

Das allgemeine, logarithmische Windprofil wird durch Gleichung 2.1 beschrieben und ist ab einer Höhe $z > z_{\mathrm{d}}$ anwendbar.

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \tag{2.1}$$

- $u(z)$: Windgeschwindigkeit in Höhe z
- u_*: Schubspannungsgeschwindigkeit
- κ: von-Kármán Konstante
- z_0: Rauigkeitslänge

Aus diesem Windprofil kann die Oberflächenrauigkeit abgeleitet werden kann. Nach z_0 aufgelöst ergibt sich folgende Gleichung für die Rauigkeitslänge:

$$z_0 = z \cdot e^{-\frac{u(z) \cdot \kappa}{u_*}} \tag{2.2}$$

Leider lässt sich die Schubspannungsgeschwindigkeit nicht einfach aus der Windgeschwindigkeit bestimmen, da die Reibungskraft unbekannt ist.

Die Schubspannung, definiert nach (Schirmer und Buschner 1987) ist: "die parallel zu einer Fläche wirkenden Reibungskraft pro Flächeneinheit, die in der bodennahen Reibungsschicht von einer unteren Schicht auf die unmittelbar darüberliegende Schicht ausgeübt wird."

Durch Messungen der Windgeschwindigkeit ($\bar{u}_{\mathrm{ref}}$) in einer Referenzhöhe (z_{ref}) kann jedoch ein logarithmisches Windprofil nach einem vereinfachten Ansatz (Röckle 1990), ohne Schubspannungsgeschwindigkeit, berechnet werden. Das vereinfachte logarithmische Windprofil wird durch Gleichung 2.3 beschrieben.

$$\bar{u}(z) = \bar{u}_{ref} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z - z_d}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref} - z_d}{z_0}\right)} \tag{2.3}$$

wobei:

- $\bar{u}_{\mathrm{ref}}$: mittlere Windgeschwindigkeit in einer Referenzhöhe z_{ref}
- z_0: Rauigkeitslänge

- z_d: Nullpunktverschiebung

Das exponentielle Windprofil (Macdonald 2000, S. 7) wird durch Gleichung 2.4 beschrieben und ist ab einer Höhe $z < z_\mathrm{d}$ anwendbar. Damit ist das exponentielle Windprofil für die UCL anwendbar.

$$u(z) = u_\mathrm{H} \cdot e^{a \cdot \left(\frac{z}{H}\right)^{-1}} \tag{2.4}$$

wobei:

- u_H: Windgeschwindigkeit in Gebäudehöhe
- H: Gebäudehöhe

2.6 Rauigkeitsklassifikation

Unterschiedliche Oberflächen lassen sich entsprechend ihrer aerodynamischen Oberflächenrauigkeit klassifizieren. Tabelle 2.2 zeigt eine Klassifizierung bestimmter Oberflächen in Rauigkeitsklassen. Dabei werden unterschiedliche Landnutzungen entsprechend der Landschaftsbeschreibung einer Rauigkeitsklasse zugewiesen. Diese Methode greifen z.B. (Stewart und Oke 2012) zur Bestimmung der Local Climate Zones (LCZ) auf. Durch die deskriptive Beschreibung ist eine Anwendung der Rauigkeitsklassifikation im mikroskaligen Bereich ungeeignet. Sie ist für den lokalen, mesoskaligen Bereich besser geeignet.

2.7 Geometrische Oberflächenrauigkeit

Unterschiedliche Hindernisse weisen unterschiedliche geometrische Eigenschaften auf. Bei Gebäuden können folgende Eigenschaften variieren:

- Gebäudehöhe
- Gebäudegrundfläche
- Orientierung des Gebäudes
- Frontale Fläche
- Volumen
- Gebäudeform

Tabelle 2.2: Rauigkeitsklassifikation nach (Davenport et al. 2000): Einteilung unterschiedlicher Landnutzungen, beschrieben durch eine Landschaftsbeschreibung in Rauigkeitsklassen. Zuweisung der Rauigkeitslänge zur Davenportklasse.

Davenport Klasse	Rauigkeitslänge, $z_0(m)$	Landschaftsbeschreibung
1. Meer	0.0002	Offenes Gewässer, Schnee bedeckte Ebene, homogene Wüste, Asphalt und Beton mit einer Ausdehnung von mehreren Kilometern.
2. Glatt	0.005	Homogene Landschaft ohne Hindernisse mit wenig bis kaum Vegetation (z.B., Marsch, Schnee bedeckte oder unbebautes, offenes Land)
3. Offen	0.03	Ebenes Land mit niedriger Vegetation und einzelnen Hindernissen mit einem Abstand der 50 fachen Hindernishöhe (z.B., Wiesen, Tundra, Start- und Landebahnen von Flughäfen).
4. Offen - Rau	0.10	niedrige Pflanzen oder Pflanzenbedeckungen; mäßig offenes Land, gelegentlich mit Hindernissen (z.B., einzelne Bäume, kleine Gebäude) mit einem Abstand der 20 fachen Hindernishöhe.
5. Rau	0.25	große Pflanzen, oder Pflanzen mit einer heterogenen Größe; verstreute Hindernisse mit einem Abstand der 8-15 fachen Hindernishöhe, abhängig von der Porosität des Hindernisses (z.B., Gebäude, Baumgürtel).
6. Sehr rau	0.5	Intensiv bearbeitetes Land mit großen Bauernhöfen und Wäldern mit einem Abstand der 8 fachen Hindernishöhe; Buschland, Obstgärten. Urbane Flächen mit niedrigen Gebäuden, mit einem Abstand der 3-7 fachen Hindernishöhe; Keine hohen Bäume.
7. Homogen und rau	1.0	Landschaft mit großen, homogenen Hindernissen, mit einem Abstand der 1 fachen Hindernishöhe (z.B., Alte Waldbestände). Dichte urbane Flächen ohne signifikante Abweichungen der Gebäudehöhen.
8. Chaotisch	≥ 2	Landschaft mit unregelmäßig verteilten, großen Hindernissen (z.B., dichte urbane Flächen mit Hochhäusern und Flachbauten, große Wälder mit vielen Lichtungen).

Die Ansätze für z_0 und z_d, basierend auf der Berechnung der geometrischen Oberflächenrauigkeit, berücksichtigen die Geometrien, die für die horizontale Luftströmung ein Hindernis darstellen (Lettau 1969).

Die Berechnung der geometrischen Oberflächenrauigkeit, ist für die numerische Simulation der aerodynamischen Oberflächenrauigkeit in einem mikroskaligen Model am wichtigsten. Deswegen werden im weiteren Teil der Arbeit nur Ansätze zur Berechnung der geometrischen Oberflächenrauigkeit genauer betrachtet.

2.8 Methoden zur geometrischen Berechnung der Oberflächenrauigkeit

Nachfolgend werden vier unterschiedliche Ansätze zur Berechnung der geometrischen Oberflächenrauigkeit in chronologischer Reihenfolge vorgestellt.

2.8.1 Morphometrischer Ansatz nach Lettau

Lettau beschreibt einen einfachen Ansatz, der sich auf die durchschnittliche Höhe (h^*), die frontale Fläche (A_{frontal}) und eine Bezugsfläche (A_{total}) bezieht:

$$z_{\text{o}} = 0.5 \cdot \frac{1}{A_{\text{total}}} \cdot A_{\text{frontal}} \cdot h^* \tag{2.5}$$

wobei:

- A_{total}: Bezugsraum
- A_{frontal}: frontale Fläche
- h^*: durchschnittliche Hindernishöhe

Mit Hilfe von Gleichung 2.5 lässt sich direkt die aerodynamische Oberflächenrauigkeit berechnen. Mit der frontalen Fläche, der "Silhouette des Gebäudes", und der durchschnittlichen Hindernishöhe berücksichtigt der Ansatz die wichtigsten geometrischen Parameter. Der Faktor $\frac{1}{A_{\text{total}}} \cdot A_{\text{frontal}}$ wird in späteren Ansätzen als frontale Flächendichte (λ_{f}) bezeichnet.
Über die frontale Fläche ist dieser Ansatz von der Windrichtung abhängig. Der Ansatz hat jedoch keinen Bezug zu einzelnen Gebäuden.

2.8.2 Geometrische Oberflächenrauigkeit nach Kondo und Yamazawa

Kondo und Yamazawa definieren in ihrem Ansatz die geometrische Oberflächenrauigkeit (h) (Kondo und Yamazawa 1986) wie folgt:

$$h = \frac{1}{A_{\text{total}}} \cdot \sum_{i=0}^{n} h_{\text{i}} \cdot A_{\text{i,frontal}} \tag{2.6}$$

wobei:

- h: geometrische Rauigkeit
- A_{total}: Bezugsraum
- n: Anzahl der Hindernisse

- h_i: Hindernishöhe von Hindernis i
- A_i: Grundfläche von Hindernis i

Die Gleichung berücksichtigt die einzelnen Hindernisse im Bezugsraum. Das Produkt $h_\mathrm{i} \cdot A_\mathrm{i}$ entspricht gerade dem Volumen von Gebäude i. Einen Bezug zur Windrichtung ist nicht gegeben, da keine frontale Flächen berechnet werden. Der Ansatz von Kondo und Yamazawa berechnet die aerodynamische Oberflächenrauigkeit nicht direkt. Sie haben aber einen linearen Zusammenhang für Städte zwischen der geometrischen Rauigkeit und der Rauigkeitslänge gefunden:

$$z_0 = 0.25 \cdot h \tag{2.7}$$

2.8.3 Effektive Höhen nach Matzarakis und Mayer

Mayer und Matzarakis definieren in ihrem Ansatz eine effektive Höhe h_eff (Matzarakis und Mayer 1992; Mayer und Matzarakis 1992):

$$h_\mathrm{eff} = G_\mathrm{f} \cdot G_\mathrm{h} + V_\mathrm{f} \cdot V_\mathrm{h} + F_\mathrm{f} \cdot F_\mathrm{h} \tag{2.8}$$

wobei:

- h_eff: effektive Höhe pro Bezugsraum (m)
- G_f: Flächenanteil der Gebäude pro Bezugsraum (Faktor)
- G_h: mittlere Gebäudehöhe pro Bezugsraum (m)
- V_f: Flächenanteil der Vegetation pro Bezugsraum (Faktor)
- V_h: mittlere Vegetationshöhe pro Bezugsraum (m)
- F_f: Flächenanteil sonstiger Flächen pro Bezugsraum (Faktor)
- F_h: mittlere Höhe der sonstigen Flächen pro Bezugsraum (m)

Zunächst wird das arithmetische Mittel der Höhen von den Gebäuden, den Vegetationen und den sonstigen Flächen berechnet. Danach werden die Flächenanteile für die Gebäude, der Vegetationen und der sonstigen Flächen innerhalb der Bezugsfläche bestimmt. Anschließend können die gemittelten Höhen mit dem prozentualen Flächenanteil gewichtet werden. Die effektive Höhe berechnet sich dann als Summe aus den gemittelten und gewichteten Höhen der Gebäude, der Vegetation und der sonstigen Flächen für einen Bezugsrau. Abbildung 2.6 verdeutlicht die Flächenanteile der Gebäude (blau), Vegetation (rot) und der sonstigen Flächen (grün). Die sonstigen Flächen ergeben sich aus der Bezugsfläche - Vegetationsflächen - Gebäudegrundflächen.

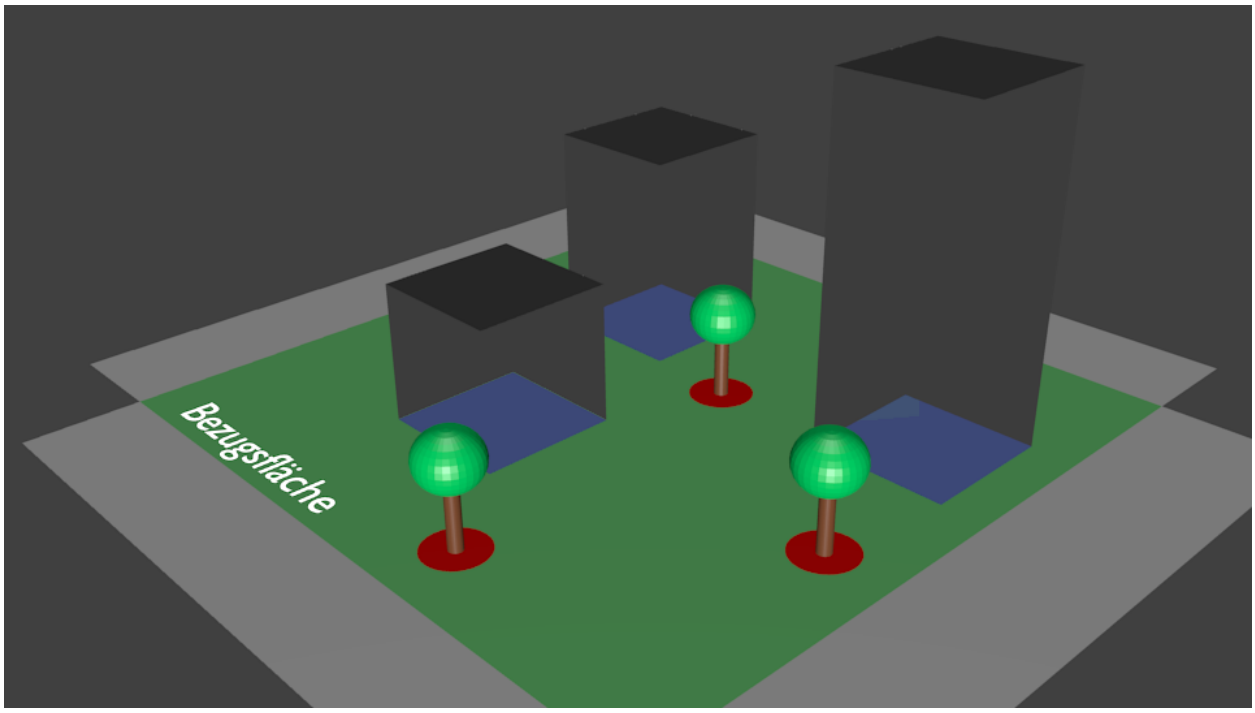


Abbildung 2.6: Flächenanteile der Gebäude (blau), der Vegetation (rot) und sonstiger Flächen (grün) von der gesamten Bezugsfläche für den Ansatz “Effektive Höhen”.

Ein Bezug zur Windrichtung ist auch hier nicht gegeben, da keine frontale Flächen berechnet werden.

2.8.4 Komplexer Ansatz zur Berechnung der Rauigkeitslänge nach Bottema

Bottema entwickelte einen komplexen Ansatz zur Berechnung der Oberflächenrauigkeit für reguläre Gebäudeanordnungen (Bottema 1997).

Hierzu wurde zunächst die frontale Flächendichte für eine regelmäßige Bebauung definiert.

Frontale Flächendichte (λ_f) für eine regelmäßige Bebauung nach (Bottema 1997): Die frontale Flächendichte für ein Gebäude ist das Verhältnis aus der Frontalfläche des Hindernisses zur Bezugsfläche

$$\lambda_f = \frac{w \cdot h}{d_x \cdot d_y} \tag{2.9}$$

wobei:

- w: Breite des Hindernisses

- h: Höhe des Hindernisses
- d_{x}: Abstand zum nächsten Hindernis in x-Richtung
- d_{y}: Abstand zum nächsten Hindernis in y-Richtung

Nullpunktverschiebung des Bezugsraums nach (Bottema 1997) (z_{d}): Die Nullpunktverschiebung des Bezugsraums wird über die Rezirkulationszonen, die Luv und Lee Bereiche for und hinter einem Gebäude, in denen es zu einer Wirbelbildung kommt, des Gebäudes definiert. Sie entspricht der Summe der frontalen sowie der leewärtigen Rezirkulationszone und dem Gebäudevolumen pro Bezugsfläche.

$$z_{\mathrm{d}} = \frac{V}{S} \tag{2.10}$$

wobei:

- V: Summe der frontalen sowie der leewärtigen Rezirkulationszone und dem Gebäudevolumen
- S: Bezugsfläche

Planare Nullpunktverschiebung des Bezugsraums nach (Bottema 1997) ($z_{\mathrm{d,pl}}$):

$$z_{\mathrm{d,pl}} = \frac{h \cdot l_{\mathrm{x}} + \frac{1}{3} \cdot (L_{\mathrm{R}} + L_{\mathrm{F}}) \cdot h}{d_{\mathrm{x}}} \tag{2.11}$$

wobei:

- L_{F}: Länge des frontalen Vortex
- L_{R}: Länge der Rezirkulationszone
- l_{x}: Tiefe des Gebäudes
- d_{x}: Abstand zum nächsten Gebäude in x-Richtung

$z_{\mathrm{d,pl}}$ beschreibt somit eine seitliche Ansicht auf die Nullpunktverschiebung. Multipliziert man den Dividenden mit der Breite des Gebäudes, steht im Dividenden die Summe aus dem Volumen des Gebäudes und den Rezirkulationszonen.
(Vorausgesetzt, dass die Rezirkulationszonen eine Breite entsprechend der Gebäudebreite aufweisen). Multipliziert man anschließend noch den Divisor mit dem Abstand zum nächsten Gebäude in y-Richtung, steht im Divisor gerade die Summe der Grundflächen von Gebäude und der Rezirkulationszonen.

Planare Nullpunktverschiebung des Bezugsraums nach (Bottema 1997) ($z_{\mathrm{d,pl}}$):

$$z_{\mathrm{d}} = z_{\mathrm{d,pl}} \cdot \frac{w}{d_{\mathrm{y}}} = \frac{V}{S} \tag{2.12}$$

- w: Breite des Hindernisses
- d_{y}: Abstand zum nächsten Gebäude in y-Richtung

Rauigkeitslänge des Bezugsraums (z_0): Die Rauigkeitslänge ergibt lässt sich verglichen mit Gleichung 2.2 auch ohne die Schubspannungsgeschwindigkeit angeben:

$$z_0 = (h - z_{\mathrm{d,pl}}) \cdot e^{-\frac{\kappa}{\sqrt{0.5\lambda_{\mathrm{f}} \cdot c_{\mathrm{W}}}}} \tag{2.13}$$

wobei:

- h: Gebäudehöhe
- $z_{\mathrm{d,pl}}$: Planare Nullpunktverschiebung des Bezugsraums
- κ: von-Kármán-Konstante ($\kappa \approx 0.4$)
- λ_{f}: Frontale Flächendichte
- c_{W}: Luftwiderstandsbeiwert; zusätzliche Eigenschaft des Gebäudes, die die "Windschlüpfrigkeit" eines Hindernisses beschreibt

2.8.5 Vereinfachter Ansatz zur Berechnung der Rauigkeitslänge nach Gál

Gál vereinfachte den Ansatz von Bottema (siehe: Gleichung 2.13) und fasste dabei die frontale und planare Flächendichte allgemeiner auf (Gál und Unger 2008; Gál und Sümeghy 2007). Die Flächendichten können dadurch nicht nur für einzelne, freistehende und regelmäßig angeordnete Hindernisse berechnet werden, sondern auch für unregelmäßige Gebäudegruppen.

Frontale Flächendichte (λ_{f}): Die frontale Flächendichte ist das Verhältnis aus der Summe der einzelnen Frontalflächen und der gesamten Bezugsfläche (siehe: Gleichung 2.14).

$$\lambda_{\mathrm{f}} = \frac{\sum_{i=0}^{n} A_{\mathrm{i,f}}}{A_{\mathrm{total}}} \tag{2.14}$$

wobei:

- $A_{i,f}$: frontale Fläche von Hindernis i
- A_{total}: gesamte Bezugsfläche

Da die Frontalflächen von der Windrichtung abhängig sind, ist auch die frontale Flächendichte von dieser abhängig. In Abbildung 3.2 sind die Frontalflächen blau und die gesamte Bezugsfläche grün dargestellt. Die Abhängigkeit der Frontalflächen zur Windrichtung wird durch die schwarze Schattierung bei Hindernis Drei deutlich. Die schwarze Fläche darf nicht zu der Frontalfläche A3 dazu gezählt werden, da sie von der Frontalfläche A1 verdeckt wird.

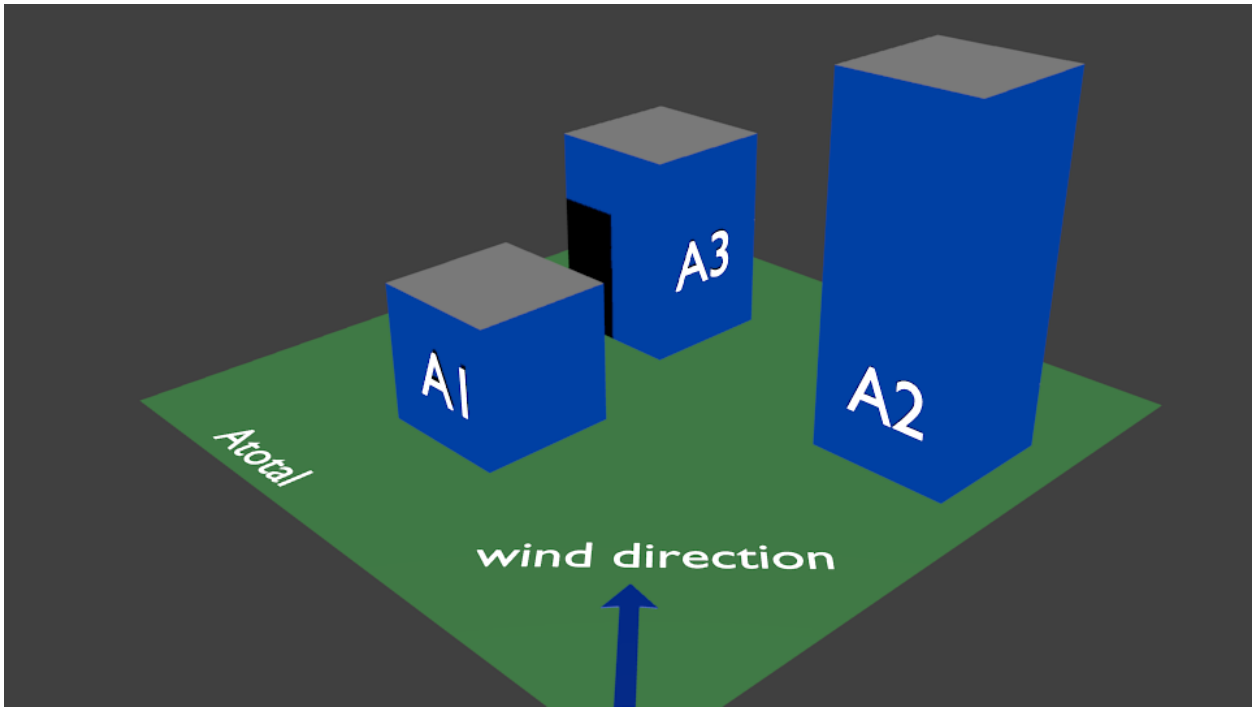


Abbildung 2.7: Frontale Flächendichte aus der Summe der frontalen Flächen der Gebäude (A_i) aus einer bestimmten Windrichtung (WD) zu der gesamten Bezugsfläche (A_{total}).

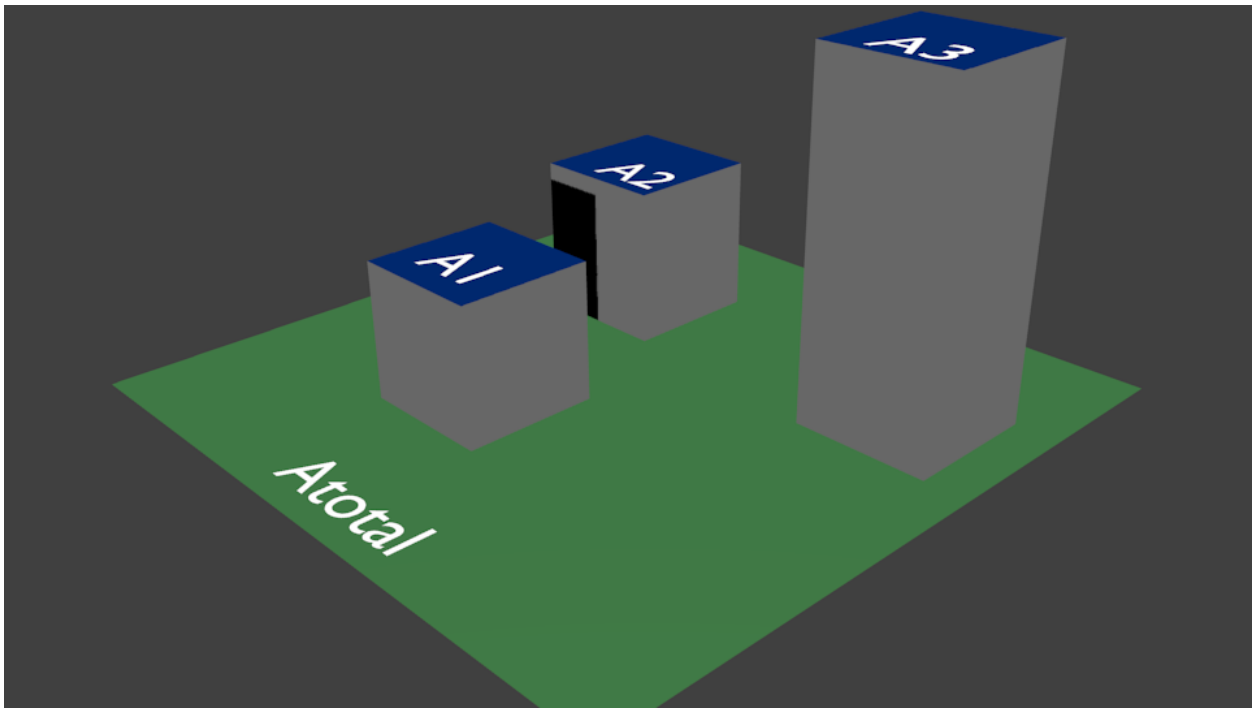


Abbildung 2.8: Planare Flächendichte aus der Summe der planaren Flächen der Gebäude (A_{i}) zu der gesamten Bezugsfläche (A_{total}).

Planare Flächendichte (λ_{p}): Die planare Flächendichte ist das Verhältnis aus der Summe der einzelnen Planflächen, die projizierten Dachflächen der Hindernisse, und der gesamten Bezugsfläche (siehe: Gleichung 2.15).

$$\lambda_{\mathrm{p}} = \frac{\sum_{i=0}^{n} A_{\mathrm{i,p}}}{A_{total}} \tag{2.15}$$

- $A_{\mathrm{i,p}}$: Planare Fläche von Hindernis i; entspricht der Grundfläche des Hindernisses
- A_{total}: Gesamte Bezugsfläche

In Abbildung 2.8 sind die Planflächen blau und die gesamte Bezugsfläche grün dargestellt.

Volumetrisch durchschnittliche Hindernishöhe: Die volumetrisch durchschnittliche Hindernishöhe

$$h = \frac{\sum_{i=0}^{n} V_i \cdot h_i}{\sum_{i=0}^{n} V_i} \tag{2.16}$$

wobei:

- V_{i}: Volumen von Hindernis i
- h_{i}: Höhe von Hindernis i

Rauigkeitslänge des Bezugsraum nach (Gál und Unger 2008; Gál und Sümeghy 2007) (z_{o}):

$$z_0 = (h - z_d) \cdot e^{-\sqrt{\frac{0.4}{\lambda_{\mathrm{f}}}}} \tag{2.17}$$

wobei:

- h: Volumetrisch durchschnittliche Hindernishöhe
- λ_{f}: Frontale Flächendichte

Die Nullpunktverschiebung wurd dabei durch folgende Gleichung berechnet:

$$z_{\mathrm{d}} = h \cdot (\lambda_{\mathrm{p}})^{0.6} \tag{2.18}$$

wobei:

- h: Volumetrisch durchschnittliche Hindernishöhe
- λ_{p}: Planare Flächendichte

2.9 Übersicht über die Ansätze zur Berechnung der aerodynamischen Oberflächenrauigkeit

Tabelle 2.3: Übersicht über alle Ansätze in chronologischer Ordnung, unter Angabe der bestimmenden Größen (vereinheitlicht)

Ansatz	Gleichungen	bestimmende Größen
Morphometrischer Ansatz nach (Lettau 1969)	$z_\mathrm{o} = 0.5 \cdot \frac{1}{A_\mathrm{total}} \cdot A_\mathrm{frontal} \cdot h^*$	VC_i, WD, h_i
Geometrische Rauigkeit nach (Kondo und Yamazawa 1986)	$h = \frac{1}{A_\mathrm{total}} \cdot \sum_{i=0}^{n} h_\mathrm{i} \cdot s_\mathrm{i}$	VC_i, A_i, h_i
Effektive Höhe nach (Matzarakis und Mayer 1992; Mayer und Matzarakis 1992)	$h_\mathrm{eff} = G_\mathrm{f} \cdot G_\mathrm{h} + V_\mathrm{f} \cdot V_\mathrm{h} + F_\mathrm{f} \cdot F_\mathrm{h}$	VC_i, A_i, h_i
Komplexer Ansatz nach (Bottema 1997; Bottema und Mestayer 1998)	$z_0 = (h - z_\mathrm{d,pl}) \cdot e^{-\frac{\kappa}{\sqrt{0.5\lambda_\mathrm{f} \cdot c_\mathrm{w}}}}$	VC_i, WD, A_i, h_i, c_W
Vereinfachter Ansatz nach (Gál und Sümeghy 2007; Gál und Unger 2008)	$z_0 = (h - z_d) \cdot e^{-\sqrt{\frac{0.4}{\lambda_\mathrm{f}}}}$	VC_i, WD, A_i, h_i

wobei:

- VC_i: zu Gebäude i gehörige Voronoizelle; Bezugsraum, A_total
- WD: Windrichtung
- A_i: Grundfläche zu Gebäude i
- h_i: Gebäudehöhe von Gebäude i
- c_W: Luftwiderstandsbeiwert

Die Ansätze lassen sich in zwei große Gruppen einteilen:

1. Die Gruppe der allgemein geometrischen Rauigkeiten (Morphometrischer Ansatz, Effektive Höhen, Geometrische Rauigkeit) basieren auf den geometrischen Eigenschaften der Objekte in dem Modellgebiet.
2. Die Gruppe der geometrischen Rauigkeiten basierend auf dem logarithmischen Windprofil (Komplexer Ansatz, vereinfachter Ansatz).

Die Berechnungen der ersten Gruppe unterscheiden sich durch einen Bezug zur Windrichtung, durch eine Berücksichtigung andere Geometrien (Vegetation, sonstige Flächen), sowie

einem empirischen Faktor. Die Berechnungen der zweiten Gruppe unterscheiden sich insbesondere durch eine Vereinfachung des Luftwiderstandsbeiwert und einer Generalisierung für eine allgemeine Bebauung.

2.10 Bezugsraum

Alle genannten Ansätze berechnen die Oberflächenrauigkeit für einen bestimmten Bezugsraum. Deswegen kommt der Einteilung des Modellgebiets in Bezugsräume eine große Bedeutung zu. An die Einteilung werden dabei bestimmte Anforderungen gestellt.

Um eine räumliche Differenzierung zu erreichen, ist eine hohe Auflösung des Modellgebiets bzw. eine hohe Anzahl an Bezugsräumen nötig. Die einzelnen Bezugsräume sollten einzelne Gebäude auflösen, um den Einfluss einzelner Gebäude auf die aerodynamischen Oberflächenrauigkeit zu bestimmen.

Gleichzeitig sollen die Gebäude als Entität betrachtet werden, um zu vermeiden, dass Teile von einem Gebäude in unterschiedlichen Bezugsräumen liegen.

2.10.1 Rastermethode

Eine einfache Möglichkeit Bezugsräume zu definieren, stellt ein Raster dar.

Raster: Ein Raster ist eine Aufteilung des zweidimensionalen Raums in Rasterzellen, wobei alle Rasterzellen die gleiche Größe und Form haben.

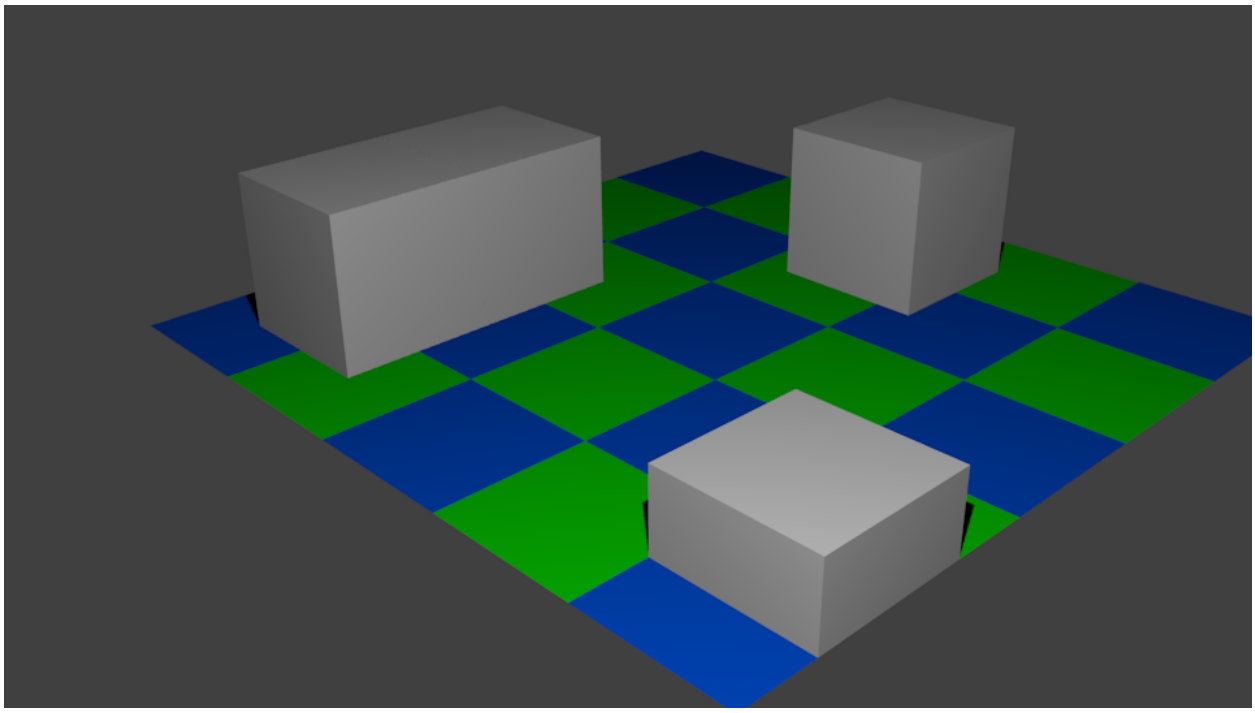


Abbildung 2.9: Raster - Aufteilung des zweidimensionalen Raums in gleich große Rasterzellen.

Ein Raster hat die Eigenschaft, dass die räumliche Auflösung "beliebig" gewählt werden kann. Dabei ist unklar, welche Gitterweite gewählt werden sollte. Außerdem ist es nicht gegeben, dass das Raster einzelne Gebäude auflöst und jedes Gebäude als Ganzes in einer Rasterzelle liegt. Wie in Abbildung 2.9 zusehen ist, kreuzen die Gebäude die Voronoizellen.

2.10.2 Voronoi-Diagramm-Methode

Eine Alternative zur Rastermethode stellt das Voronoi-Diagramm dar, mit dem ebenfalls Bezugsräume berechnet werden können. Zwei Halbebenen bilden das kleinste, nicht-triviale Voronoi-Diagramm für zwei Bezugsräume.

Halbebene $H(p_1|p_2)$: Eine Halbebene $H(p_1|p_2)$ ist der geometrische Ort aller Punkte der Ebene, die näher bei p_1 liegen als bei p_2 (Ottmann und Widmayer 2012).

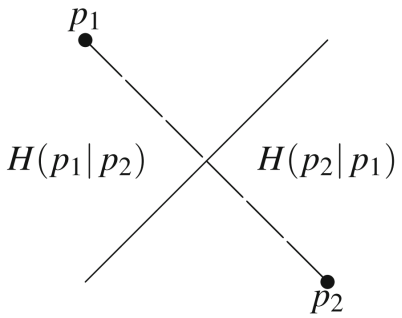


Abbildung 2.10: Darstellung der Halbebenen $H(p_1|p_2)$ und $H(p_2|p_1)$ als Voronoi-Diagramm für zwei Punkte p_1 und p_2 in einer Ebene. (Grafik: (Ottmann und Widmayer 2012))

Abbildung 2.10 zeigt die beiden Halbebenen $H(p_1|p_2)$ und $H(p_2|p_1)$. Die beiden Halbebenen werden durch die Mittelsenkrechten zwischen den beiden Punkten p_1 und p_2 begrenzt. Die Halbebene $H(p_1|p_2)$ entspricht der Voronoizelle $VC(p_1)$ für den Punkt p_1, die Halbebene $H(p_2|p_1)$ entspricht der Vornoizelle $VC(p_2)$ für den Punkt p_2.

Voronoizelle VC(p): Sollen Bezugsräume für mehr als zwei Punkte definiert werden, sodass der geometrische Ort aller Punkte der Ebene näher bei Punkt p liegt als bei Punkt $x \in X \setminus \{p\}$, so ergibt sich $VC(p)$ durch die Schnittmenge aller Halbebenen von p zu allen Punkten $x \in X \setminus \{p\}$:

$$VC(p) = \bigcap_{x \in X \setminus \{p\}} H(p, x) \tag{2.19}$$

- VC(p): Voronoizelle für Punkt p
- X: Menge aller Punkte der Ebene

- H(p,x): Halbebene von Punkt p zu Punkt x

Voronoi-Diagramm: Ein Voronoi-Diagramm VD(X) einer Punktmenge X ist eine Aufteilung des zweidimensionalen Raums in Voronoizellen $VC(x) : x \in X$.

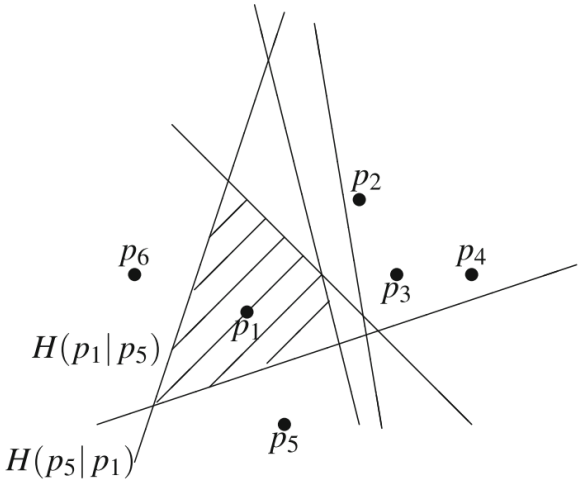


Abbildung 2.11: Voronoizelle p_1 unter einer gegebenen Punktemenge X; Halbebenen $H(p_1|p_i)$, $H(p_i|p_1)$ (Grafik: (Ottmann und Widmayer 2012))

Ein Voronoi-Diagramm hat die Eigenschaft, dass die räumliche Auflösung von der Anzahl der Punkte abhängig ist, da gerade für jeden Punkt eine Voronoizelle berechnet wird. Um Bezugsräume für einzelne Gebäude / Polygone zu definieren, ist diese Definition eines Voronoi-Diagramms nicht ausreichend, da nur eine Punktmenge betrachtet wird. Für die Betrachtung von Polygonen muss die Definition erweitert werden.

Polygon-Voronoi-Diagramm: Sollen Bezugsräume für Polygone definiert werden, sodass der geometrische Ort aller Punkte der Ebene näher bei Polygon p liegt als bei Polygon $x \in X \setminus \{p\}$, so ergibt sich $VC(p)$ durch die Vereinigung aller $VC(x) : x \in p$

$$VC(p) = \bigcup_{x \in p} VC(x) \tag{2.20}$$

- $VC(p)$: Voronoizelle für Polygon p
- $VC(x)$: Voronoizelle für Punkt x
- x: Punkt aus dem Streckenzug um das Polygon p

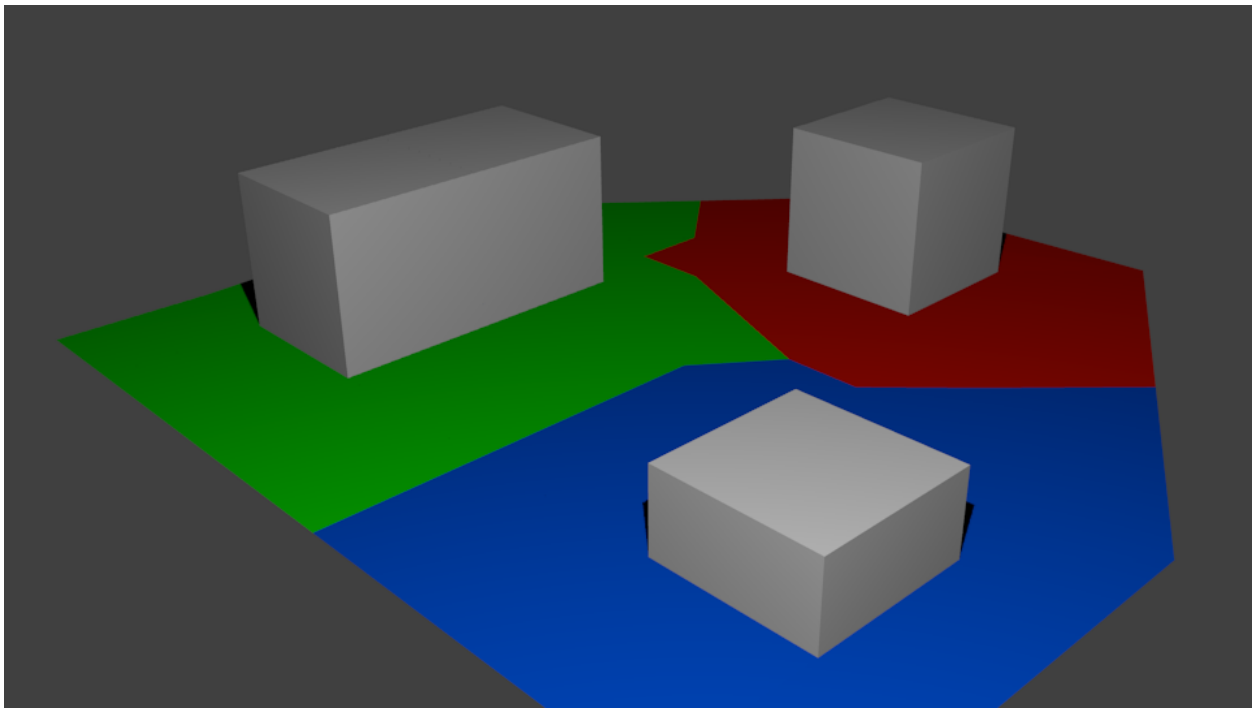


Abbildung 2.12: Voronoi-Diagramm auf Grundlage gegebener Gebäude.

3 Methodik

Die Bearbeitung der Problemstellung wurde in mehrere Schritte eingeteilt:

zunächst wird das Graphical User Interface (GUI) ausgewertet. Es wird der Ansatz bestimmt, nach dem die Rauigkeit berechnet werden soll. Entsprechend der Auswahl werden zusätzliche Parameter abgefragt (z.B. Windrichtung).
Nachdem die GUI ausgewertet wurde, werden die Eingangsdaten unbearbeitet in die Datenbank übernommen.

Anschließend beginnt die Vorverarbeitung (preprocessing) der Eingangsdaten. Es werden die Eckpunkte der Gebäude aus der Datenbank gelesen. Dabei wird ein Offset berechnet der gerade dem Punkt mit dem kleinsten x und y-Wert entspricht. Der berechnete Offset wird von allen eingelesenen Punkten abgezogen, sodass eine Verschiebung des ganzen Modellgebiets zum Ursprung erreicht wird. Das ist nötig, weil es ansonsten zu unerwünschten Ungenauigkeiten aufgrund zu großer Zahlen bei der weiteren Berechnung kommen kann. Aus diesem Grund werden alle Koordinaten durch den C# Datentyp “decimal” repräsentiert, der mit 28-29 signifikanten Stellen eine große Genauigkeit hat.
Entsprechend dem ausgewählten Ansatz wird für jedes Gebäude die frontale Fläche für die angegebene Windrichtung bestimmt. Zwischen den verschobenen Eckpunkten werden zusätzliche Punkte eingefügt um ein Voronoidiagramm für Polygone zu berechnen. Nach der Vorverarbeitung fängt die eigentliche Berechnung der Rauigkeit an. Diese ist wiederum in mehrere Schritte gegliedert. Es werden die Bezugsräume (Voronoizellen) auf Basis der bearbeiteten Eingangsdaten berechnet. Danach wird die Rauigkeit für jeden dieser Bezugsräume berechnet. Abschließend werden die Bezugsräume zusammen mit der Rauigkeit in der Datenbank gespeichert.

3.1 Organisation der Daten

Um alle Daten in SkyHelios für neue Berechnungen global und effizient verfügbar zu machen, wurde eine neue Klasse “Datamanager” implementiert, die als Singleton, eine Klasse von der es genau ein global verfügbares Objekt gibt, den Zugriff auf die Daten in SkyHelios ermöglichen und verwalten soll. Abbildung 3.1 stellt den Aufbau der Datenverwaltung schematisch dar.

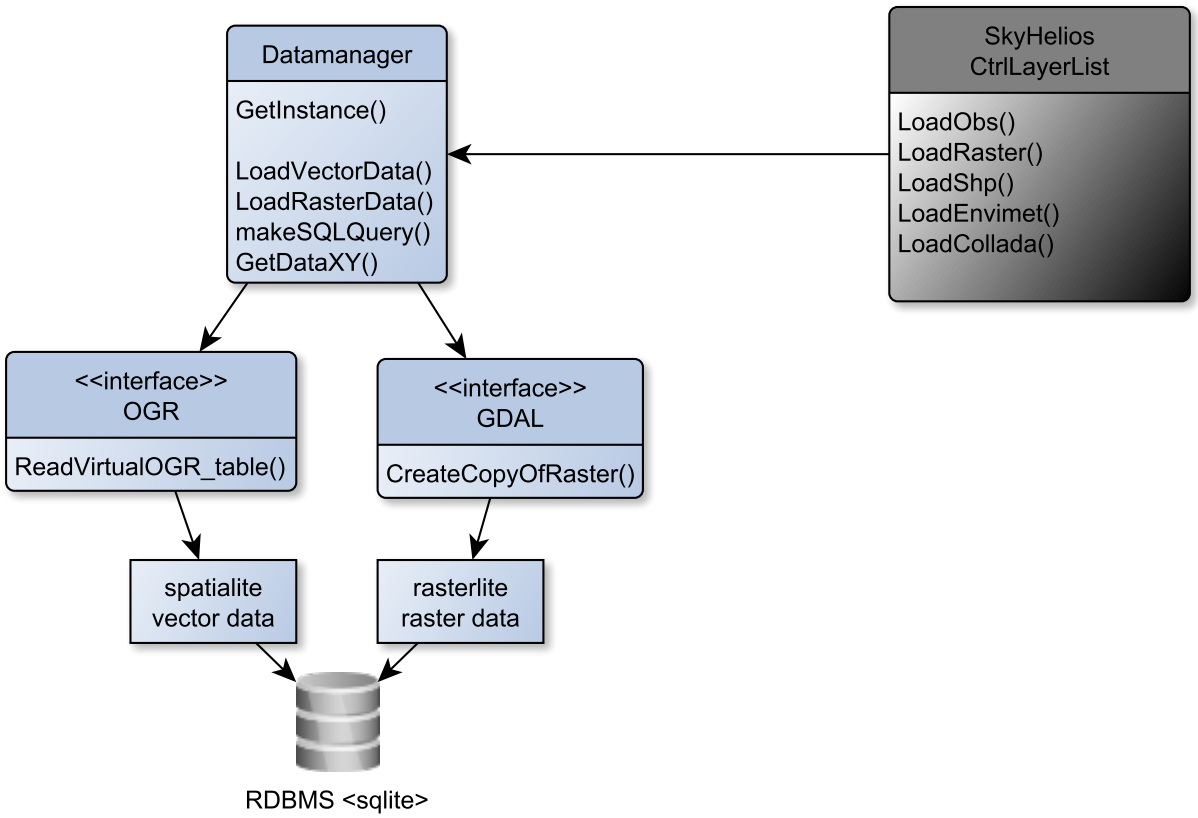


Abbildung 3.1: Erweiterung von SkyHelios um einen Datamanager dem eine räumliche Datenbank zugrunde liegt.

Dem “Datamanager” wurde die Datenbank “SQLite” zugrunde gelegt, die alle eingelesenen Daten enthält. Die Datenbank wurde mit Hilfe von “Spatialite” erweitert, damit ein Datenmanagement zur Verfügung steht, die eine Verwaltung der Daten erheblich vereinfacht. Gleichzeitig wurden mit “Spatialite” räumliche Funktionen eingefügt, die für weitere Berechnungen auf den Daten verfügbar sind. In Kombination mit der räumlichen Datenbank wurde die Bibliothek “GDAL” zur Abstraktion der Eingangsdaten verwendet. Es ist leider nicht so, dass der Datenbanktreiber von “SQLite” für C# mit “Spatialite”, sowie “GDAL” funktioniert, da z.B. der SQLite Treiber und “Spatialite” intern unterschiedliche “SQLite”-Versionen benutzen (“DLL-Hell”). Aus diesem Grund musste “Spatialite” komplett neu für

Windows kompiliert werden. Dazu wurde MinGW (Minimal GNU for Windows), eine Portierung der Entwicklungswerkzeuge des GNU Projektes, insbesondere dem C++ Compiler gcc, verwendet. Zusätzlich wurde MSYS (Minimal SYStem), eine Portierung der Unix-Shell benutzt.

Im Folgenden wird auf die einzelnen Punkte genauer eingegangen:

3.1.1 SQLite

SQLite ist ein Relationales Datenbank Management System (RDBMS). Mit System.Data.SQLite steht eine ADO.NET Datenbankschnittstelle für C# bereit. Im Gegensatz zu anderen RDBMS (wie z.B. PostgreSQL) besteht SQLite nicht aus einer Server-Client Architektur sondern nur aus einer einzelnen Datei ("Small. Fast. Reliable. Choose any three."). Damit kann die Datenbank auch zwischen unterschiedlichen System kopiert werden, das einen direkten Austausch eingelesener Daten ermöglicht. Dies macht SQLite zur passenden Datenbank für SkyHelios. SQLite ist deshalb auch besonders für eingebettete Datenbanksysteme geeignet.

3.1.2 GDAL

Um unterschiedliche "Raster" und "Shape-" bzw. "Vector-" Daten zu unterstützen, wurde in SkyHelios die "Geospatial Data Abstraction Library" (*GDAL - Geospatial Data Abstraction Library* 2014) eingesetzt.

Die Bibliothek beinhaltet zwei Teilbibliotheken:

- **GDAL** selbst unterstützt unterschiedliche Raster Formate und bietet viele Operationen zur Verarbeitung von großen Rasterdaten.

  GDAL bietet mit rasterlite einen Treiber für SQLite (*SQLite* 2014), der es ermöglicht Rasterdaten als rasterlite Tabellen in die Datenbank zu schreiben und aus der Datenbank zu lesen.

- **OGR - Simple Feature Library** unterstützt unterschiedliche Vektordaten Formate.

  GDAL/OGR kann als Erweiterung für SQLite geladen werden. (*The VirtualOGR SQLite extension* 2014) VirtualOGR stellt dann folgende SQL Funktion bereit:

  ```
  SELECT ogr_datasource_load_layers(@file)
  ```

  Mit dieser SQL Funktion ist es möglich, die Vektordaten direkt als virtuelle Tabelle in der Datenbank zu öffnen. Da auf eine virtuelle Tabelle nur ein lesender Zugriff möglich ist, wird die komplette Tabelle im Anschluss komplett in die Datenbank kopiert.

Damit stellt diese Bibliothek eine komplette Schnittstelle für Raster- und Vektordaten dar, so dass die Eingangsdaten, unabhängig von ihrem Format, direkt in die Datenbank geschrieben werden können.

3.1.3 Spatialite

Spatialite ist eine räumliche GIS - Erweiterung für SQLite (Furieri 2014b).
Mit Spatialite ist eine einfache Verwaltung der geodätischen Daten möglich. Zu jedem Layer werden Metadaten gespeichert, die den Spatial Reference Identifier (SRID, EPSG) des räumlichen Bezugsystems, die räumliche Ausdehnung des Layers, sowie die Längeneinheit beinhalten. (Für eine Übersicht über alle möglichen Parameter zum räumlichen Bezugsystems eines Layers siehe (Gerald und USGS 2014)) Dazu werden alle "üblichen" Referenzsysteme zusammen mit der SRID/EPSG-Nummer gespeichert. Tabelle 3.1 zeigt einen Ausschnitt aus den räumlichen Referenz Systemen, der das häufig genutzte räumliche Referenzsystem DHDN3 von Gauss-Krüger zeigt.

Tabelle 3.1: Eigenschaften räumlicher Referenzsysteme, charakterisiert durch die SRID/EPSG-Nummer, sowie zusätzliche Parameter

auth_srid	ref_sys_name	proj4text
31467	DHDN / 3-degree Grauss-Krüger zone 3	+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=12 +k=1 +x_0=4500000 +y_0=0 +ellps=bessel +datum=potsdam +units=m +no_defs

In Spatialite gibt es unterschiedliche unterstützte Geometrien (z.B. Point, Polygon oder Linestring). Die Geometrien werden als Binary Large Object (BLOB) (Furieri 2014a) in einer Tabelle zusammen mit den Attributen gespeichert.

3.2 Aufbereitung der Eingangsdaten

Die Repräsentation der Objekte innerhalb des Shapes sind nicht einheitlich. Gebäude können als Polygon oder Polygon Z repräsentiert werden. Häufig werden die Gebäude durch Polygone, die die Dachflächen darstellen, repräsentiert. Gebäude können aber auch durch Polygon Z, dreidimensionale Polygone, die die Hauswände darstellen, repräsentiert werden. Deswegen werden in der Arbeit nur Polygone aus Vektordaten berücksichtigt, die die Umrisse der Objekte darstellen und die eine relative Gebäudehöhe haben. Umfassen die Vektordaten Polygone, die die Wandflächen enthalten, so müsste aus den einzelnen Wandflächen das eigentliche Gebäude rekonstruiert werden. (Dies ist evtl. bei vorhanden Innenwänden nicht trivial.) Umfassen die Vektordaten Polygone mit absoluten Höhen über Normalnull (NN), wird zusätzlich die Topografie des Modellgebiets benötigt, um die relative Höhe zu berechnen.

3.2.1 Bestimmung der Frontalflächen in Abhängigkeit der Windrichtung

Die frontale Fläche eines Gebäudes ist von der Windrichtung abhängig. Um die frontale Fläche zu berechnen, wird das Koordinatensystem entsprechend der Windrichtung (WD) rotiert. Anschließend werden alle Punkte eines Gebäudes betrachtet, und nach den transformierten x-Werten sortiert. Die größte Ausdehnung der frontalen Fläche des Gebäudes entspricht dann gerade der Strecke zwischen dem kleinsten x-Wert und dem größten x-Wert, multipliziert mit der Höhe des Gebäudes. (Die frontale Fläche liegt dann parallel zur rotierten x-Achse und orthogonal zur Windrichtung) Abbildung 3.2 zeigt die Rotation des Koordinatensystems entsprechend der Windrichtung und die größte Ausdehnung der frontalen Fläche von Gebäude i. Um die Punkte entsprechend der Windrichtung zu rotieren, werden die Punkte mit der Rotationsmatrix im zweidimensionalen Raum transformiert.

Rotationsmatrix R_α: Die Rotationsmatrix R_α dreht jeden Punkt der Hindernisse um den Winkel α um den Ursprung.

$$\begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_\alpha \\ y_\alpha \end{pmatrix} \tag{3.1}$$

3.2.2 Gebäudegruppenbildung

Gebäude, die sich berühren oder die einen sehr geringen Abstand haben, müssen als ein einzelnes Gebäude betrachtet werden. Dazu werden Gebäude, die sich innerhalb eines Ab-

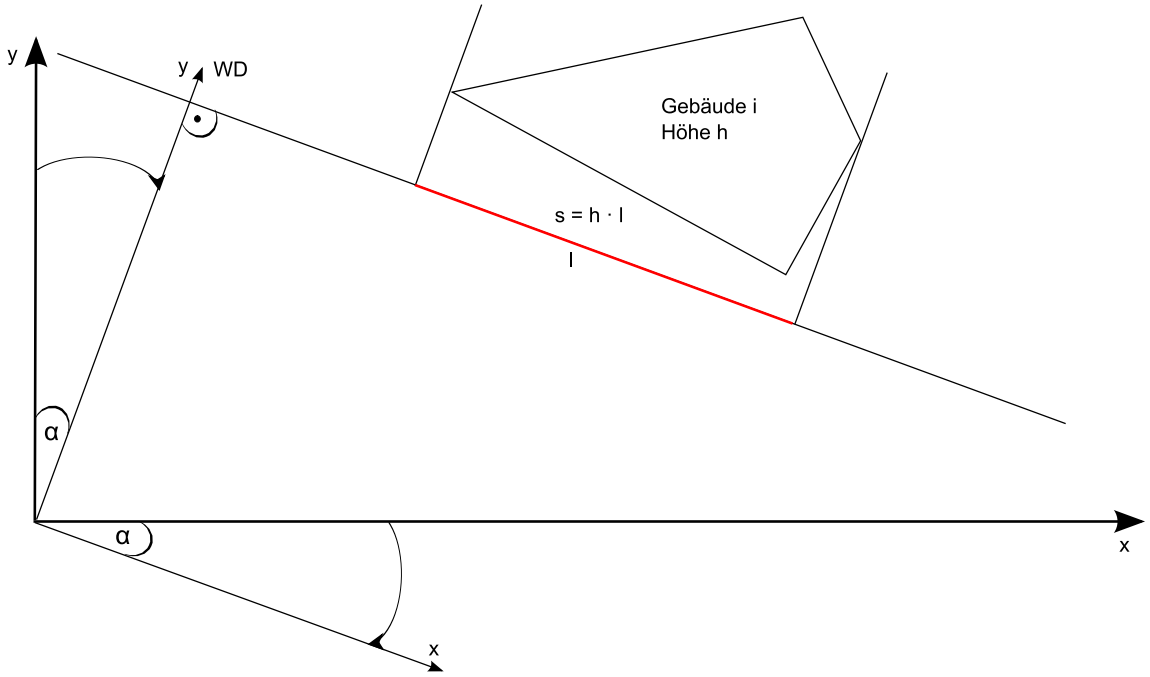


Abbildung 3.2: Rotiertes Koordinatensystem mit der resultierenden frontalen Fläche eines Gebäudes

standes berühren oder schneiden, zu einem Multipolygon zusammengefasst. Anschließend wird für dieses zusammengefasste Polygon eine neue durchschnittliche Höhe berechnet. Die durchschnittliche Höhe kann durch die Fläche der einzelnen Gebäude gewichtet werden.

$$h = \frac{\sum_{i=0}^{n} A_i \cdot h_i}{\sum_{i=0}^{n} A_i} \tag{3.2}$$

Alternativ dazu kann die Höhe jedoch auch durch die Volumina der einzelnen Gebäude gewichtet werden.

$$h = \frac{\sum_{i=0}^{n} V_i \cdot h_i}{\sum_{i=0}^{n} V_i} \tag{3.3}$$

3.3 Aufteilung des Raums in Cluster

Zur Berechnung der aerodynamischen Oberflächenrauigkeit werden Bezugsräume für eine Zuordnung der Rauigkeit zu den einzelnen Hindernissen benötigt. Abbildung 3.3 zeigt solch eine Raumaufteilung auf Basis eines Voronoi Diagramms.

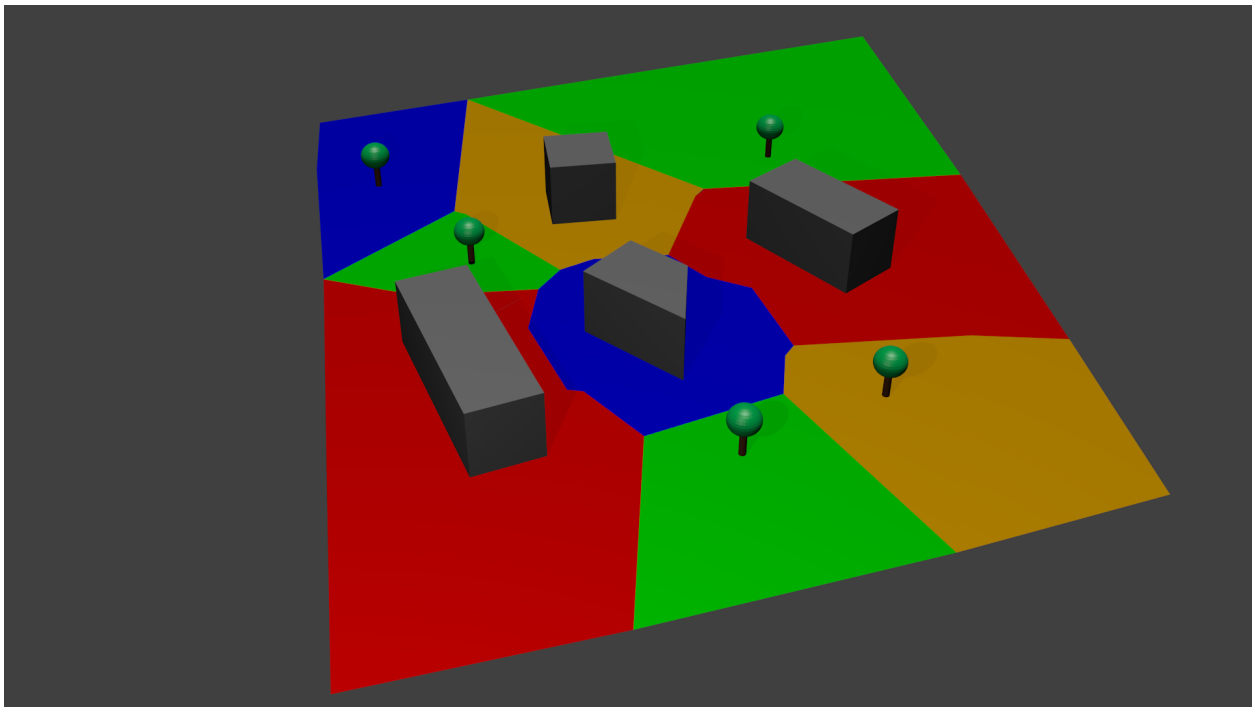


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung eines Modellgebiets in Kombination mit einer räumlichen Aufteilung in Voronoizellen.

3.3.1 Erzeugung der Voronoi Punkte

Für die Berechnung normaler Voronoi Diagramme existieren viele Algorithmen, die eine Laufzeitkomplexität von $O(n \cdot \log n)$ haben. Diese Algorithmen berechnen alle Voronoi Diagramme auf Basis von Punkten. Um annäherungsweise ein Voronoi Diagramm für Polygone zu berechnen, wurden zunächst die Eckpunkte der Polygone benutzt. Um eine bessere Annäherung zu erhalten, reichen diese Punkte allerdings nicht aus. Deshalb wurden zwischen zwei Eckpunkten eines Polygons so lange Punkte eingeführt, bis der Abstand zweier benachbarter Punkte unter einen Schwellenwert fällt. Abbildung 3.4 zeigt die Eckpunkte der Polygone (rot) und die zusätzlich eingeführten Punkte (grün)

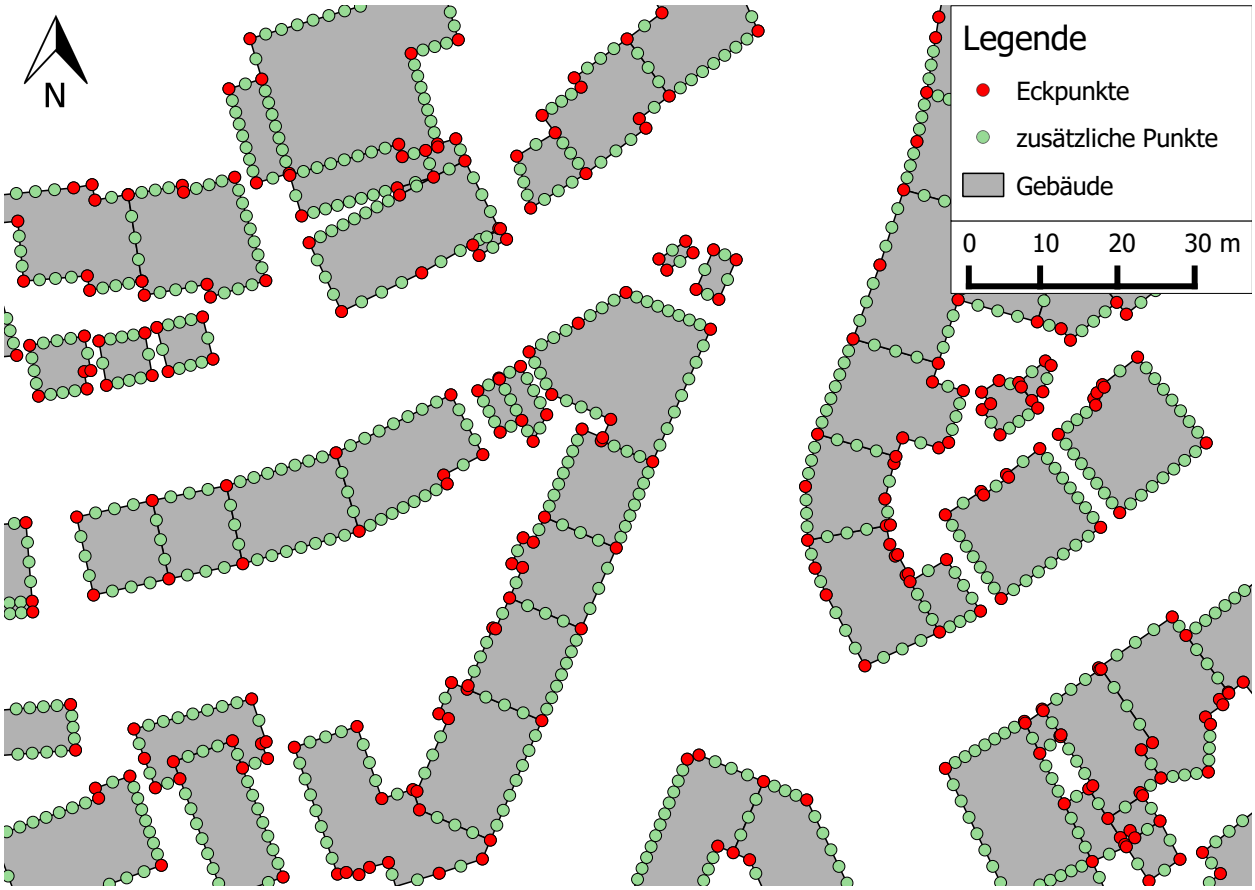


Abbildung 3.4: Dargestellt ist eine komplexe Gebäudeanordnung, die über die Eckpunkte (rot) der einzelnen Gebäude definiert ist. Zusätzlich zu den Eckpunkten wurden zusätzliche Stützpunkte (grüne) zur Berechnung des Voronoidiagramms zwischen den Eckpunkten berechnet.

3.3.2 Fortunes Algorithmus: Erzeugung des Voronoi Diagramms für Punkte

Das Voronoi Diagramm wurde nach Fortunes Algorithmus berechnet. Dieser Algorithmus wurde ausgewählt, da er eine Laufzeitkomplexität von $O(n \cdot \log n)$ besitzt und sich leichter implementieren lässt als andere "Divide and Conquer"-Algorithmen, da bei diesen Algorithmen ein Kantenzug bestimmt werden muss, der die zwei Hälften des "Divide"-Schrittes verbindet.

Fortunes Algorithmus ist ein "Sweepline Algorithmus". Als Eingabe bekommt der Algorithmus alle Punkte, die zur Berechnung des Voronoi Diagramms herangezogen werden sollen. Die Sweepline "fegt" dabei nur einmal über die ganze Ebene, sodass jeder Punkt in der Ebene nur einmal betrachtet werden muss.

Zur Berechnung wird eine Priority Queue verwendet. Priority Queues sind abstrakte Datenstrukturen, die Objekte in Kombination mit einem Schlüssel beinhalten. Die Objekte in

der Queue werden entsprechend ihrem Schlüssel sortiert. (Der Schlüssel entspricht somit der Priorität des Objekts).

Im Bezug auf die Voronoi-Diagramm-Berechnung werden in der Queue Events gespeichert. Jedes Event enthält als Schlüssel eine Position, wodurch die Events nach x- und y-Wert sortiert werden können.

Zu Beginn werden alle Punkte als Site-Events mit ihrer Position in der Priority Queue gespeichert. Durch das Entfernen des kleinsten Events aus der Queue wird eine Borderline (manchmal auch Beachline) berechnet. Wenn die Sweepline über einen neuen Punkt in der Ebene fährt (gdw. aus der Priority Queue ein Site-Event entfernt wurde), wird eine Parabel in die Borderline eingefügt. Der Fokus der Parabel liegt dabei genau auf dem Punkt der von der Sweepline abgetastet wurde. Durch die Eigenschaften einer Parabel, ist dann der Abstand zwischen Punkt und Parabel genau gleich groß, wie der Abstand zwischen Parabel und Sweepline. Die Schnittpunkte der Parabeln auf der Borderline repräsentieren die Kanten in dem Voronoi-Diagramm.
Die Knoten des Voronoi-Diagramms werden durch den Schnittpunkt zweier Parabeln berechnet. Der Endknoten einer Kante des Voronoi-Diagramms ist nur dann zu berechnen, wenn er der Mittelpunkt eines Umkreises ist, auf dem sich drei Punkte der Eingangsmenge befinden. Dabei ist es wichtig, dass innerhalb des Umkreises keine weiteren Punkte der Eingangsmenge liegen, da der Abstand von einem Punkt der Eingangsmenge zu dem Schnittpunkt kleiner wäre, als der Abstand von einem anderen Punkt zum Schnittpunkt. Dabei verschwindet eine alte Kante von der Beachline und eine neue wird eingefügt. Dieses Testen auf einen gültigen Schnittpunkt wird durch ein Circle Event hervorgerufen.
Die Circle Events werden, beim Einfügen einer neuen Parabel in die Borderline, in die Priority Queue eingefügt, falls der Umkreis noch nicht komplett von der Sweepline erfasst wurde. In diesem Fall kann es noch dazu kommen, dass ein Punkt noch nicht von der Sweepline abgetastet wurde, und trotzdem näher an dem Schnittpunkt liegen würde. Fährt die Sweepline über einen Punkt, der in einem Umkreis liegt, muss das entsprechende Circle Event aus der Priority Queue gelöscht werden.

Fortunes Algorithmus:

- Instanzierung von Site Events für jeden Punkt
- Einfügen der Site Events in eine Priority Queue (Priority Queue sortiert alle Events nach y-Wert)
- Solange die Queue nicht leer: Entfernen des Events mit dem kleinsten y-Wert aus der Priority Queue.

- a) Event ist ein Site Event:
  Füge die Parabel zur Borderline hinzu. Füge evtl. Circle-Events zur Priority Queue hinzu.
- b) Event ist ein Circle Event:
  Entferne die Parabel von der Borderline.

3.3.3 Anwendung für Polygone

Wendet man Fortunes Algorithmus auf die erzeugten Punkte an, die die einzelnen Polygone begrenzen (siehe Unterabschnitt 3.3.1), wird für jeden Punkt eine Voronoizelle berechnet. Abbildung 3.5 zeigt die erzeugten Punkte der einzelnen Polygone zusammen mit den zugehörigen Voronoizellen. Wenn zu jeder Voronoizelle zusätzlich ein Verweis auf das Po-

Abbildung 3.5: Punkte auf der Begrenzung der Gebäude bilden die Voronoizellen um das Gebäude.

lygon/Gebäude gespeichert wird, können anschließend alle Voronoizellen zusammengeführt werden, die auf das gleiche Polygon/Gebäude verweisen. Abbildung 3.6 zeigt die zusammengefügten Voronoizellen. Jede Voronoizelle beschreibt nun den Bezugsraum für ein ein-

zelnes Gebäude. Für diese Grafik wurde keine Gebäudegruppebildung angewendet (siehe Unterabschnitt 3.2.2).

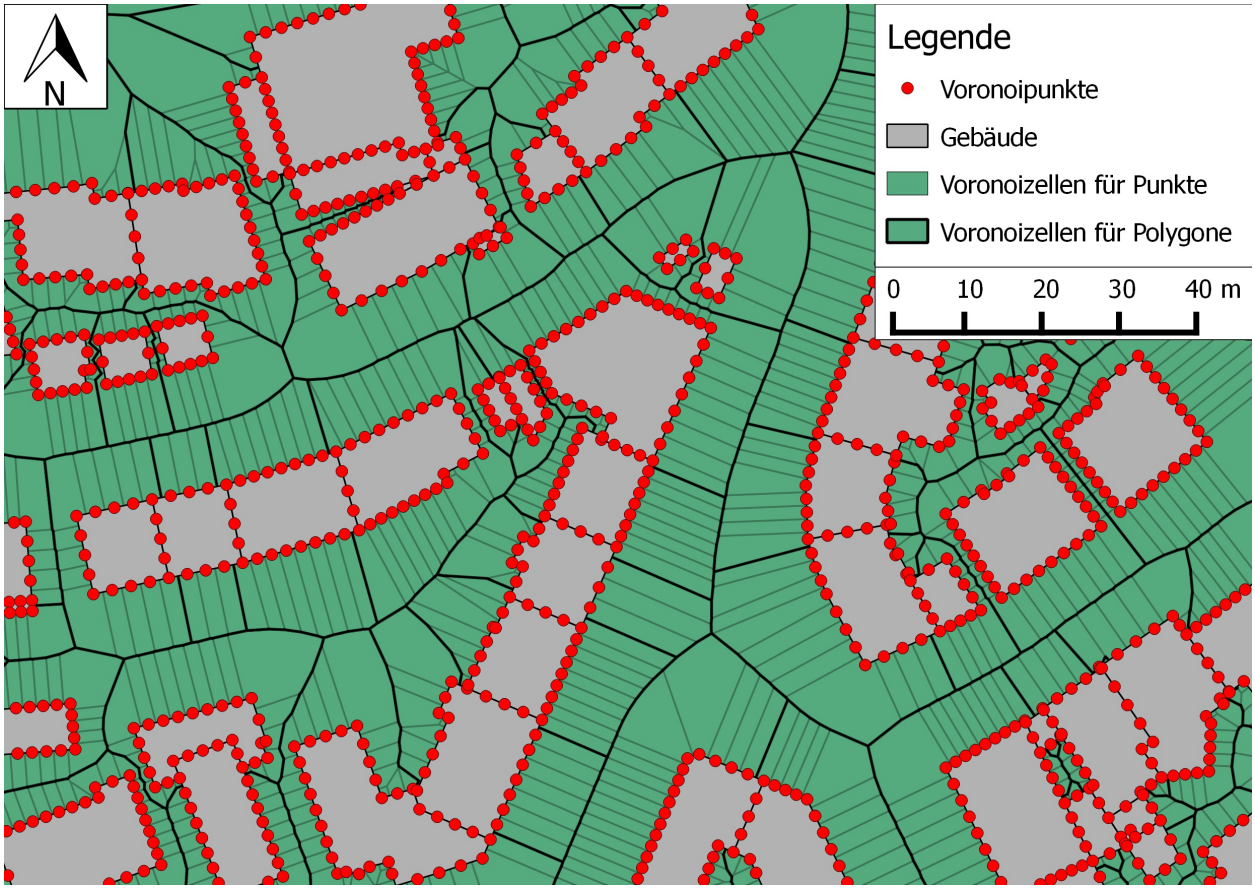


Abbildung 3.6: Zusammengefasste Voronoizellen bilden näherungsweise ein Voronoi-Diagramm für Polygone.

3.4 Berechnung der Oberflächenrauigkeit

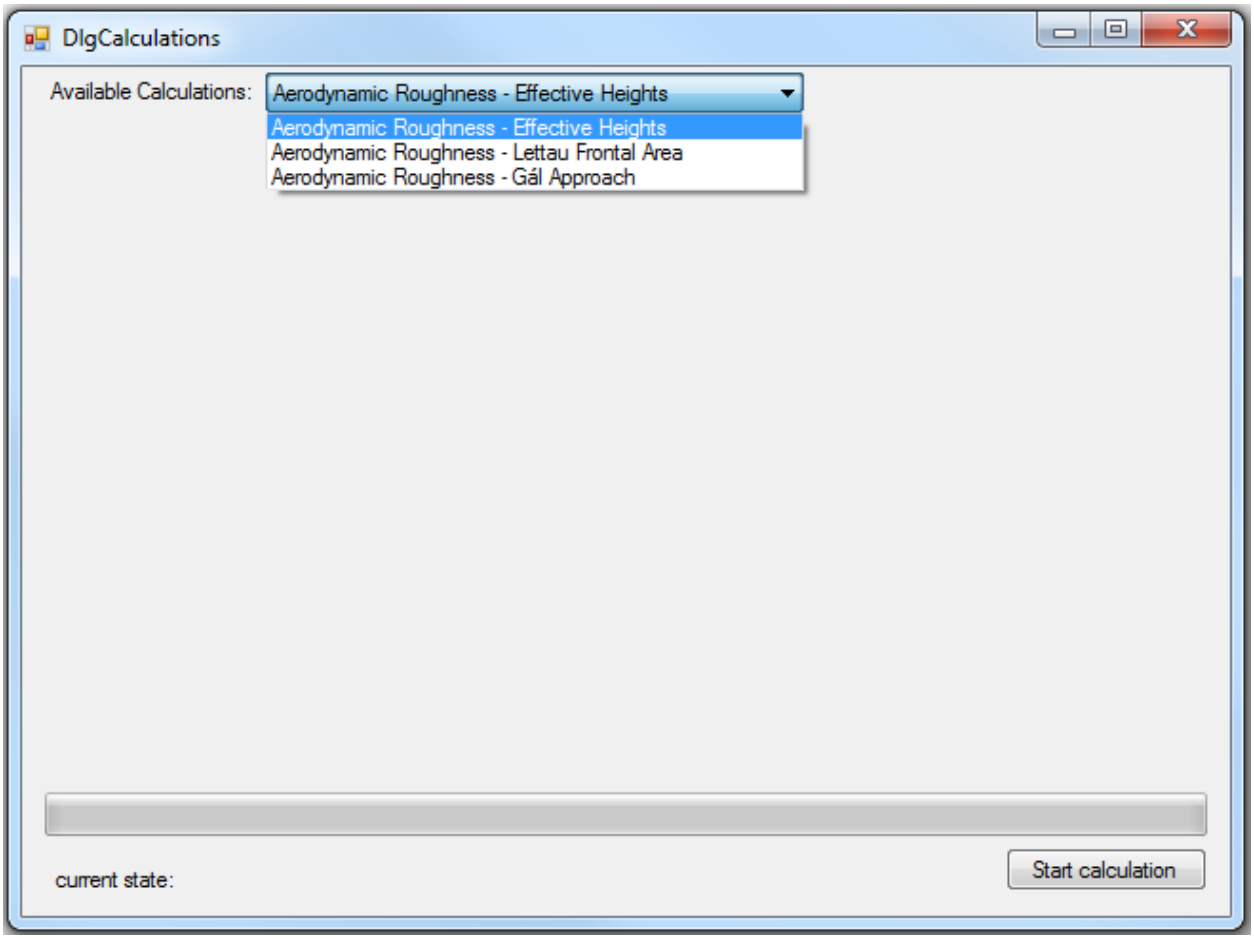


Abbildung 3.7: Erweiterung der GUI von SkyHelios; Auswahlmöglichkeit für die Ansätze; Ladebalken in Abhängigkeit der verarbeiteten Punkte, Gebäude

Für jede Voronoizelle wird die Oberflächenrauigkeit nach einem drei unterschiedlichen Ansätzen berechnet. Hierzu wurden der "morphometrische Ansatz" nach (Lettau 1969) (siehe Unterabschnitt 2.8.1), der "effektive Höhen"-Ansatz nach Mayer und Matzarakis 1992 (siehe Unterabschnitt 2.8.3) und der Ansatz nach Gál und Sümeghy 2007; Gál und Unger 2008 (siehe Unterabschnitt 2.8.5) implementiert. Um den morphometrischen Ansatz mit dem Effektiven Höhen Ansatz vergleichen zu können, wurde die Oberflächenrauigkeit mit dem morphometrischen Ansatz in 10° Schritten berechnet und anschließend gemittelt. Um den Lettau Ansatz mit dem Gál Ansatz zu vergleichen, wurde mit beiden Ansätzen die Oberflächenrauigkeit für eine Windrichtung aus 240° berechnet. Die Windrichtung 240° ist die vorherrschende Windrichtung in dem Modellgebiet.

4 Anwendung: Berechnung der Oberflächenrauigkeit

Die aerodynamische Oberflächenrauigkeit wurde im Rahmen der Arbeit für ein Modellgebiet in Stuttgart berechnet. Dazu wurden die Rauigkeit nach den unterschiedlichen, genannten Methoden berechnet.

4.1 Charakteristika des Modellgebietes

Das Modellgebiet, das durch Abbildung 4.1 gezeigt wird, liegt in der Innenstadt von Stuttgart. Es wird insbesondere durch die Lage der Stadt Stuttgart in einem Kessel, sowie der dichten Bebauung geprägt. Das Modellgebiet umfasst einen Bereich der Größe 3843 m x 3765 m. Die Topografie erstreckt sich von 206 Höhenmeter bis auf 549 Höhenmeter. Insgesamt ist das Gebiet mit 23957 Gebäude mit einer durchschnittlichen Gebäudehöhe von 8.37 m bebaut. Die Anzahl der Punkte zur Voronoidiagramm-Berechnung wurden von 140311 auf 390405 (Faktor 2.78), bei einem Maximalabstand von 3 m erweitert. Die vorherrschende Windrichtung ist 240 °.

4.2 Ergebnisse

Das Ergebnis der Voronoi-Diagramm-Berechnung wird in Abbildung 4.2 dargestellt. Man sieht deutlich, dass für jedes frei stehende Gebäude eine eigene Voronoizelle berechnet wurde, indem eine Aufteilung des zweidimensionalen Raums stattfand. Die Zellen haben dabei mindestens die Größe des zugehörigen Gebäudes.

Es ist an einigen Stellen aufgrund von Fehlern (siehe Abbildung 4.3) in den Eingangsdaten fehlerhaft.

An den Stellen, wo der Fehler auftritt, sind zusammenhängende Gebäude nicht verbunden. Aufgrund dieses Fehlers werden für die beiden einzelnen Gebäude eigene Voronoizellen berechnet, die sich gegenseitig beeinflussen. Durch die falschen Voronoizellen entstehen an

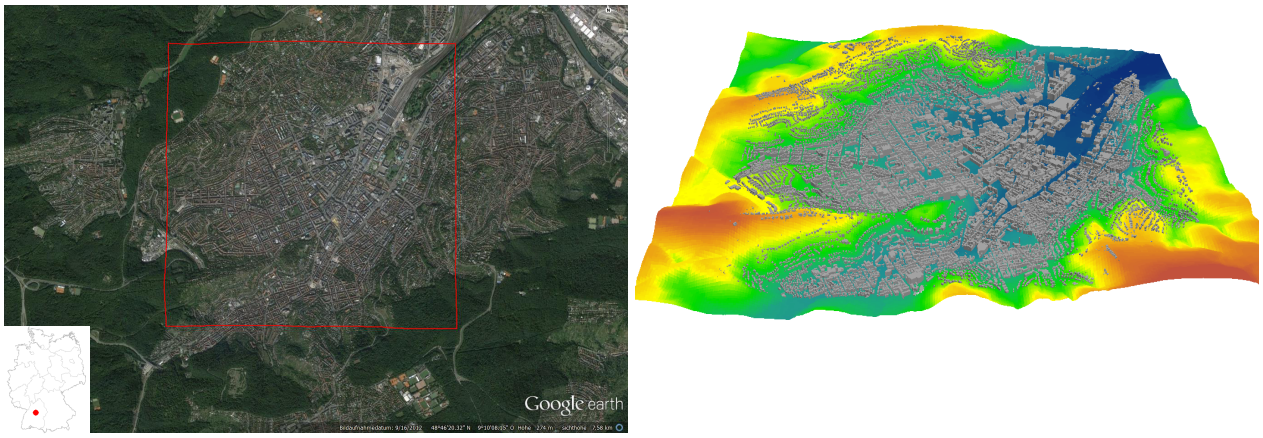


Abbildung 4.1: Links: Ausdehnung des Modellgebiets in Stuttgart; Rechts: Einbettung des Modellgebiets in die besondere Topografie Stuttgarts

diesen Stellen bei der Rauigkeitsberechnung weitere Fehler. Diese Fehler kennzeichnen sich durch extreme Rauigkeitswerte, weshalb diese Ausreiser im Folgenden ausgeschlossen werden. Zusätzlich wird die Anzahl der Ausreiser genannt, die zur Gesamtzahl von 9 Millionen Rauigkeitswerten in Bezug gestellt werden müssen. Später wird diskutiert, warum so ein Fehler in den Eingangsdaten zu dem Fehler in dem Voronoi-Diagramm führt.

Das Ergebnis des "Effektive Höhen"-Ansatz nach (Mayer und Matzarakis 1992), welches durch Abbildung 4.4 gezeigt wird,
führte zu einer räumlichen Differenzierung der aerodynamischen Oberflächenrauigkeit in dem Modellgebiet. Dabei wurden effektive Höhen zwischen 0 m - 32 m (477 Ausreiser ($>$ 32 m) - 0.0053% der Gesamtzahl) ermittelt. Wie Abbildung 4.5 zeigt, konzentrieren sich die effektive Höhen auf Werte kleiner 32 m. Die durchschnittliche effektive Höhe beträgt 3.3 m. Die größten Rauigkeitswerte werden im Stadtzentrum, in der Umgebung des Katharinenhospitals (mit einer effektiven Höhe von bis zu 29 m), so wie des Wilhelmsbaus (mit einer effektiven Höhe von bis zu 16 m) erreicht. Die niedrigsten Rauigkeitswerte werden bei den Gleisanlagen, dem Schlossgarten und auf der Karlshöhe berechnet. Generell treten verglichen mit der dicht bebauten Innenstadt im dünn bebauten Umland vergleichsweise niedrige Werte (0.2 m - 3 m) auf. Wie Abbildung 4.5 zeigt, verteilen sich die effektiven Höhen zum Großteil entsprechend der Rauigkeitsklassifikation nach (Davenport et al. 2000).

Das Ergebnis des morphometrischen Ansatzes nach (Lettau 1969), welches durch Abbildung 4.6 gezeigt wird, unterscheidet sich nicht wesentlich von dem Ergebnis des "Effektiven Höhen"-Ansatz. Es wurden Rauigkeitslängen zwischen 0 m - 8 m (38812 Ausreiser ($>$ 8 m) - 0.4313%

der Gesamtzahl) berechnet. Wie Abbildung 4.7 zeigt, konzentrieren sich die Rauigkeitslängen auf Werte kleiner 8 m. Die durschnittliche Rauigkeitslänge beträgt 1.16 m Die Unterschiede zwischen den Rauigkeitslängen nach (Lettau 1969) sowie den Effektiven Höhen nach (Mayer und Matzarakis 1992) sollen durch Abbildung 4.8 gezeigt werden. Es werden Unterschiede zwischen -16,05 m und +2.49 m berechnet. Die Standardabweichung von $\Delta(z_{0,\text{Lettau}}, h_{\text{eff}})$ beträgt 2.48 m. Nach Unterabschnitt 2.8.2 gibt es einen linearen Zusammenhang zwischen der geometrischen Rauigkeit und der aerodynamischen Rauigkeit. Deshalb werden auch die Unterschiede nach $\Delta\left(z_{0,\text{Lettau}}, \frac{h_{\text{eff}}}{4}\right)$ in Abbildung 4.9 betrachtet. Es stechen besonders die Gebäude heraus, die eine große Grundfläche haben. Diese angepassten effektiven Höhen für diese Gebäude liegen meistens über der Rauigkeitslänge. Betrachtet man dicht bebaute Gebiete mit kleinen Gebäuden ist das Umgekehrte der Fall. Hier ist die angepasste effektive Höhe meistens kleiner als die Rauigkeitslänge.

Das Ergebnis des morphometrischen Ansatzen nach (Gál und Unger 2008), welches durch Abbildung 4.11 gezeigt wird, zeigt nur die Rauigkeitslänge im Bezug auf die vorherrschende Windrichtung 240°. Das Ergebnis kann somit mit dem Ansatz nach (Lettau 1969), siehe Abbildung 4.12 verglichen werden. In Abbildung 4.13 werden die Unterschiede gezeigt. Man stellt dabei fest, dass die Rauigkeitslängen, die durch den Ansatz von Gál berechnet wurden, im Schnitt etwas über der Rauigkeitslänge von Lettau liegen. In dem Balkendiagramm, das die Verteilung der Differenzen zwischen den Rauigkeitslängen nach Lettau und den Rauigkeitslängen nach Gál zeigt sieht man, dass das die häufigsten Abweichungen zwischen 0 m und -0.5 m liegen.

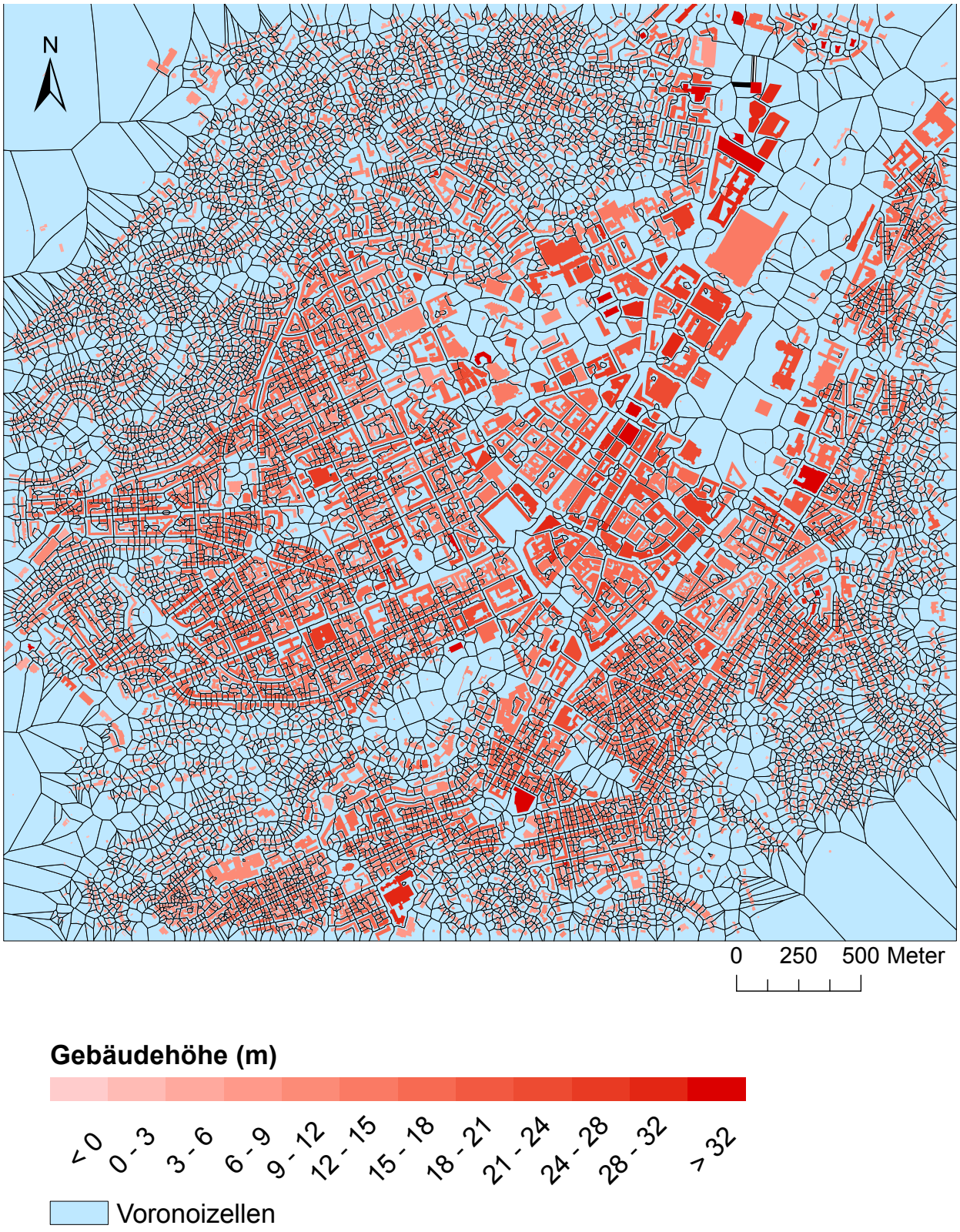


Abbildung 4.2: Dargestellt sind die Hausdachhöhen, sowie das Voronoi-Diagramm auf Basis der Polygone in Stuttgart.

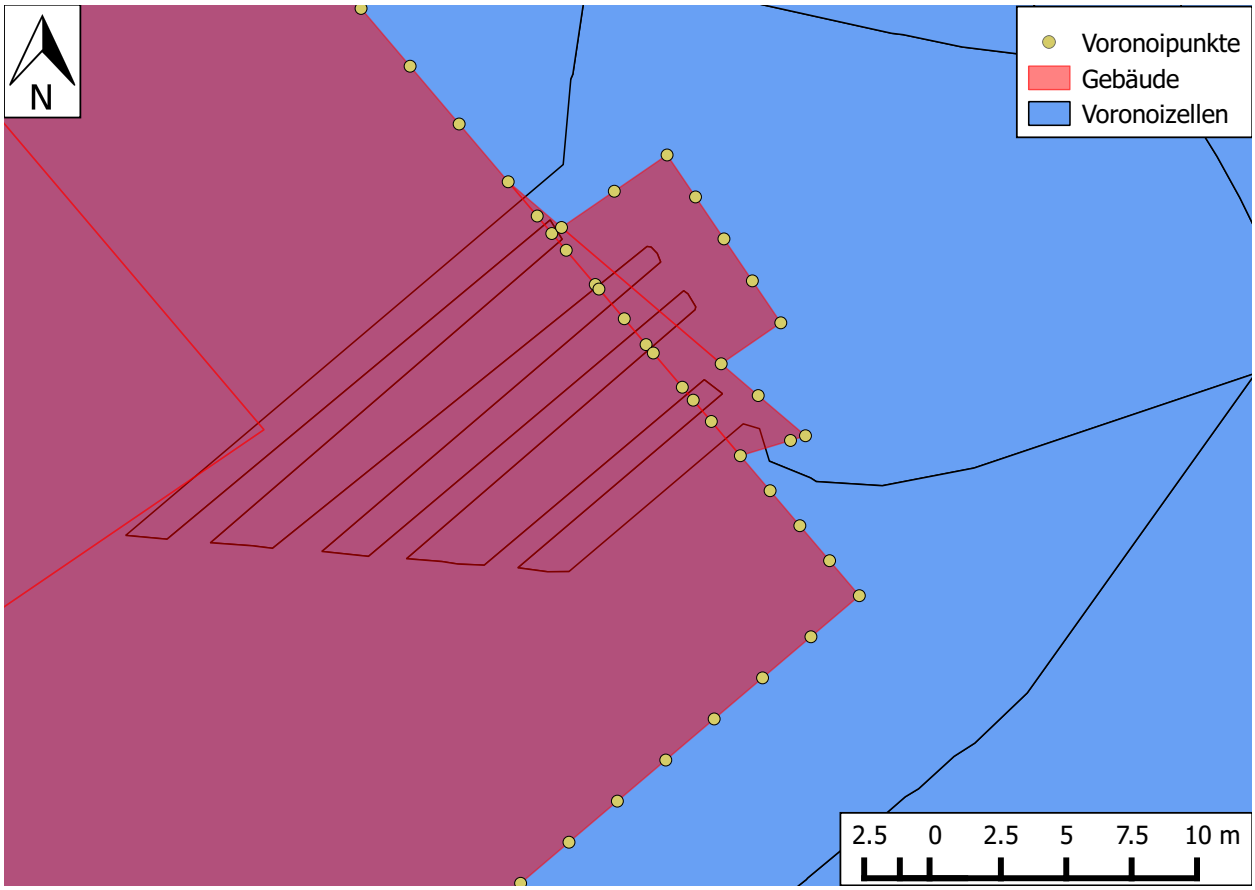


Abbildung 4.3: Durch eine fehlerhafte Datei, ist das Gebäude durch einen kleinen Spalt getrennt. Eigentlich wären die Gebäudeteile miteinander verbunden und hätten nur eine unterschiedliche Höhe. Die Breite des Spalts ist kleiner als die Entfernung zweier benachbarter Voronoipunkte.

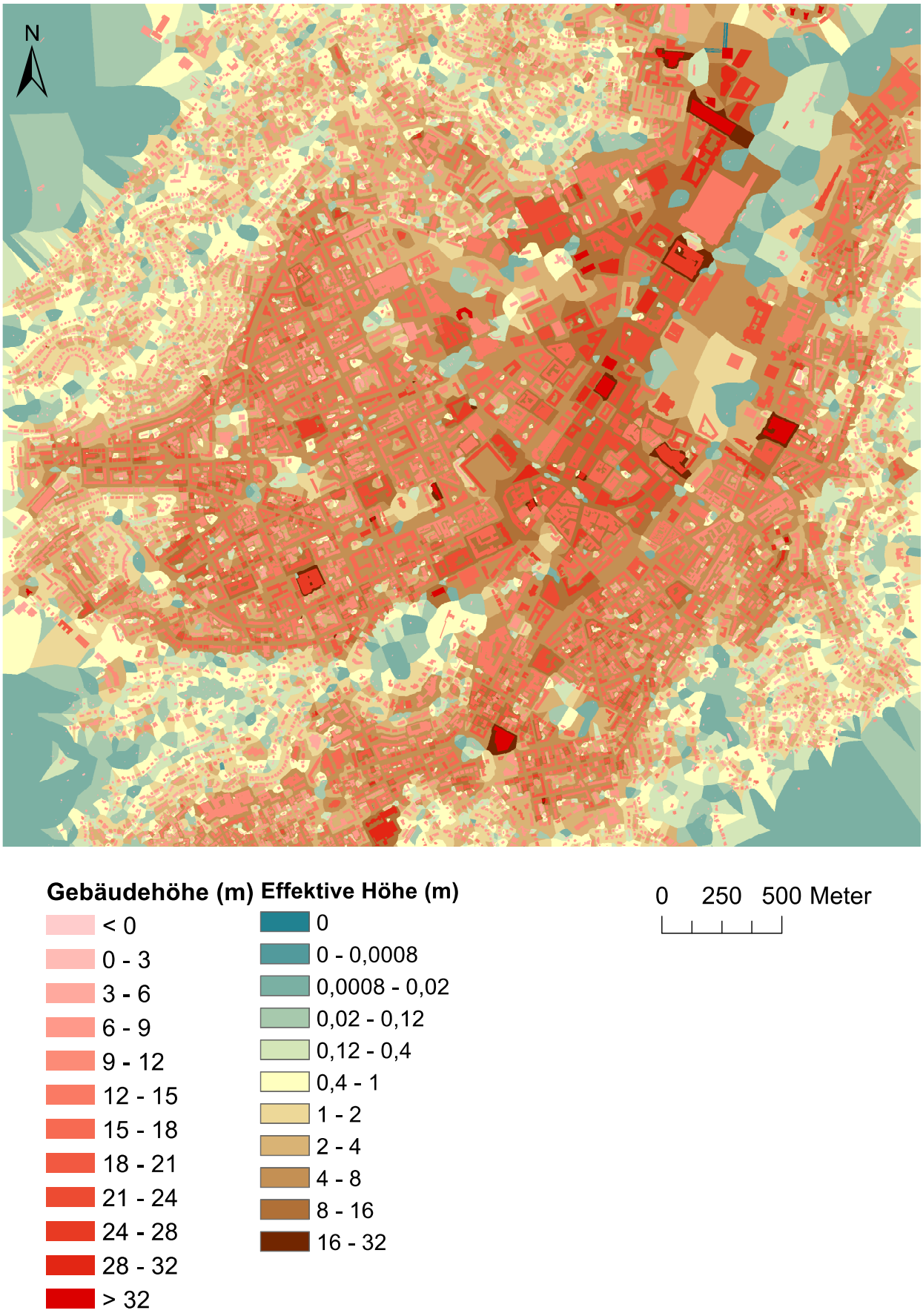


Abbildung 4.4: "Effektive Höhen" nach (Matzarakis und Mayer 1992; Mayer und Matzarakis 1992) in Stuttgart. Durch die Umrisse sind sowohl die berechneten Voronoizellen, als auch die Gebäude dargestellt. Insbesondere wurden die Gebäudehöhen sowie die effektive Rauigkeit farblich dargestellt.

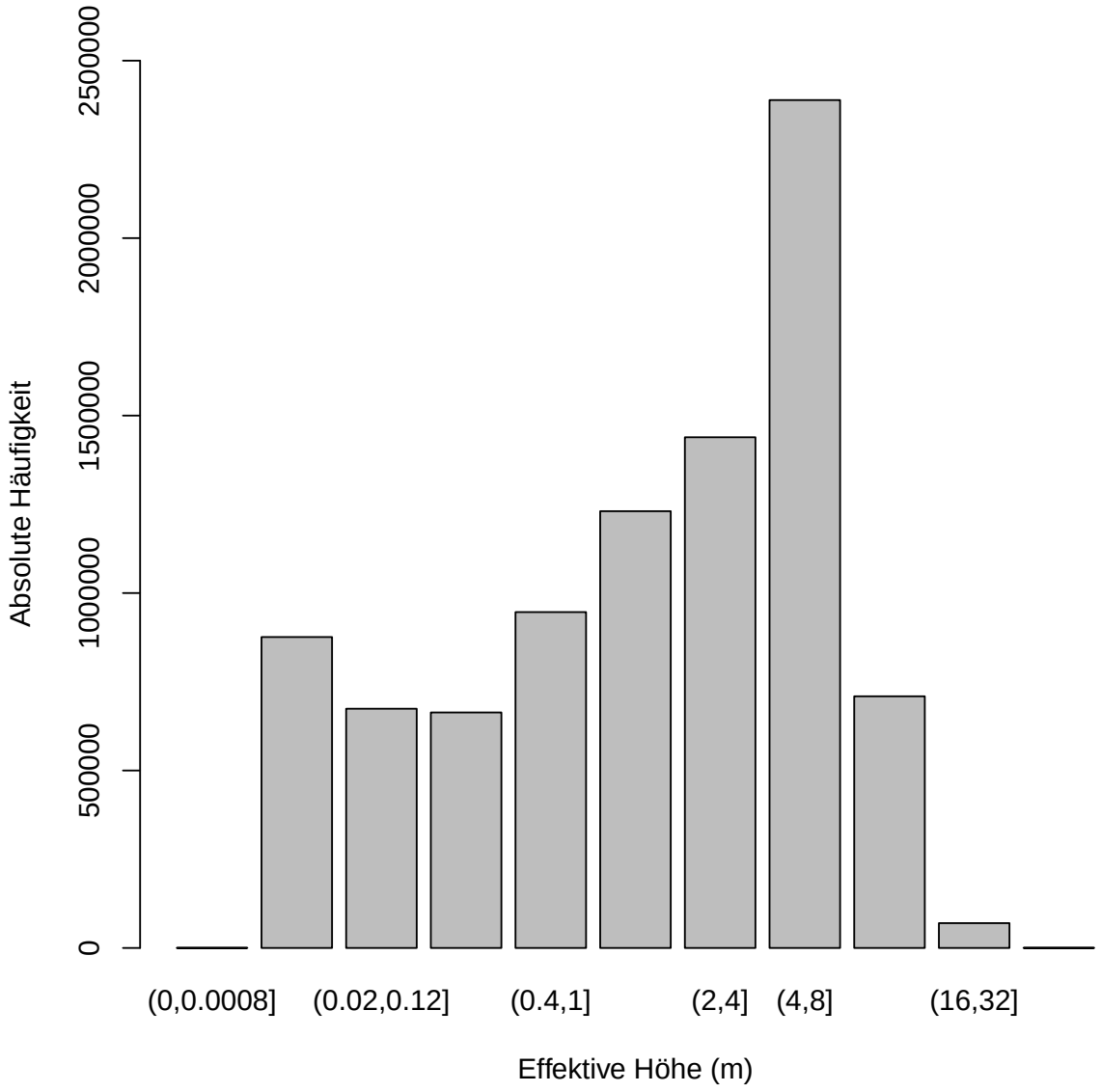


Abbildung 4.5: Häufigkeitsverteilung der "Effektiven Höhen" in Stuttgart. Die Klassen zwischen 0-8 m entsprechen, genau den Rauigkeitsklassen nach (Davenport et al. 2000)

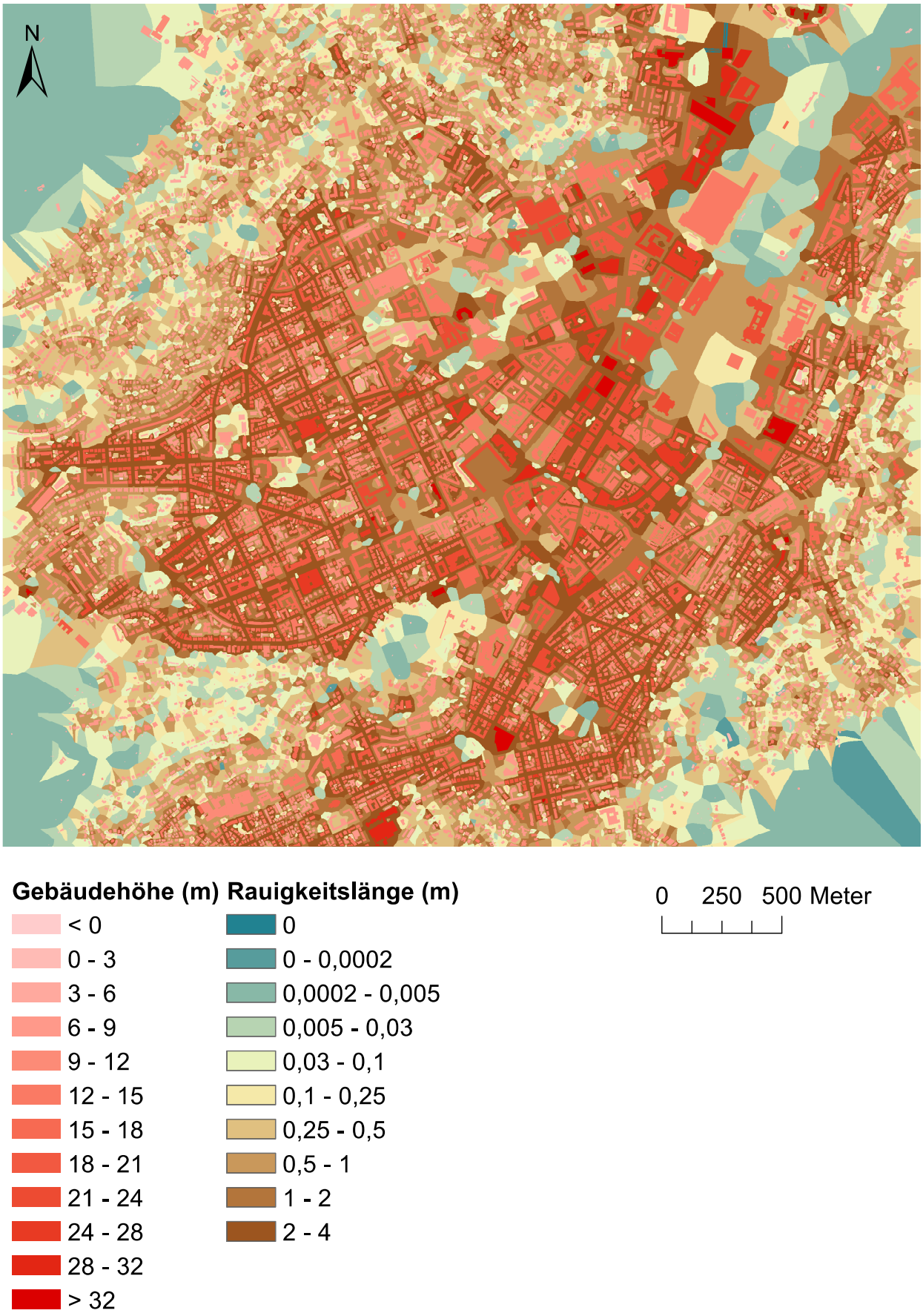


Abbildung 4.6: Durchschnittliche Rauigkeitslänge z_0 nach (Lettau 1969) in Stuttgart. Durch die Umrisse sind sowohl die berechneten Voronoizellen als auch die Gebäude dargestellt. Insbesondere wurden die Gebäudehöhen sowie die effektive Rauigkeit farblich dargestellt. Die Rauigkeitslänge wurde gemittelt aus allen Windrichtungen in 10 ° Schrittweite berechnet.

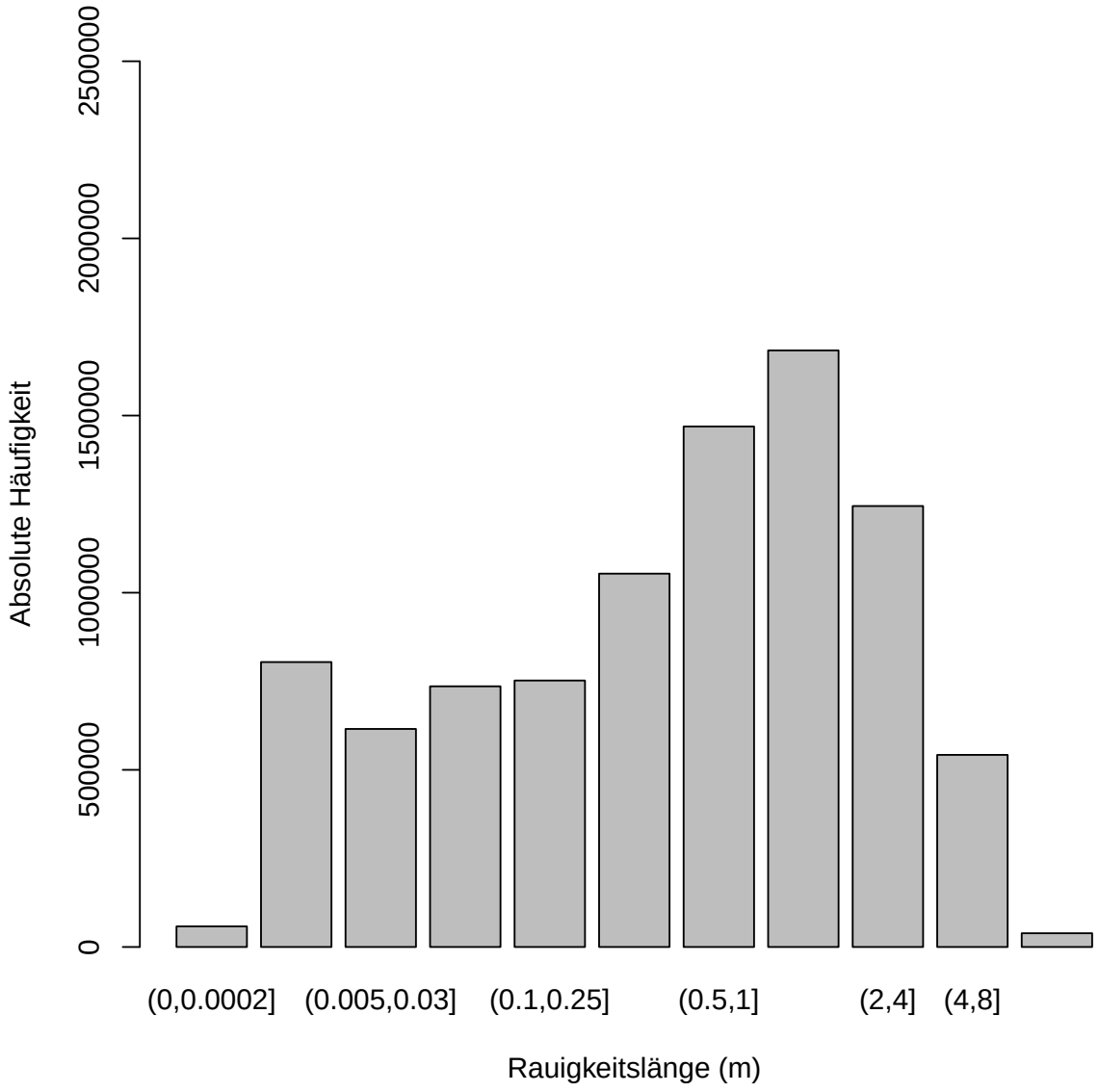


Abbildung 4.7: Häufigkeitsverteilung der Rauigkeitslänge in Stuttgart nach Unterabschnitt 2.8.1(Lettau 1969). Die Klassen zwischen 0-2 m entsprechen, genau den Rauigkeitsklassen nach (Davenport et al. 2000)

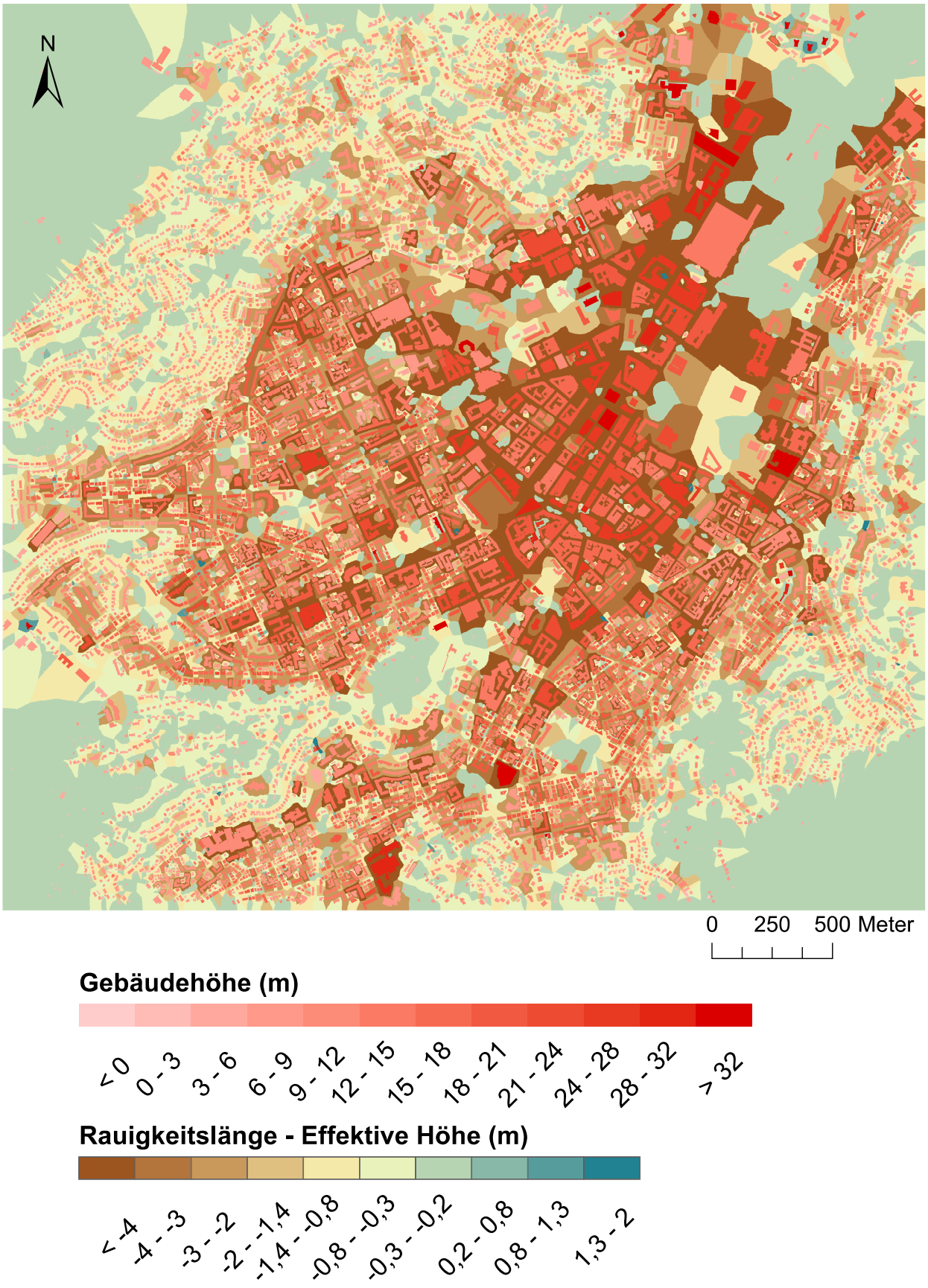


Abbildung 4.8: Dargestellt sind die Unterschiede zwischen der Rauigkeitslänge nach (Lettau 1969) und der Effektiven Höhe nach (Mayer und Matzarakis 1992)
$\Delta(z_{0,\text{Lettau}},\ h_{\text{EffektiveHöhe}}) = z_{0,\text{Lettau}} - h_{\text{eff}}$

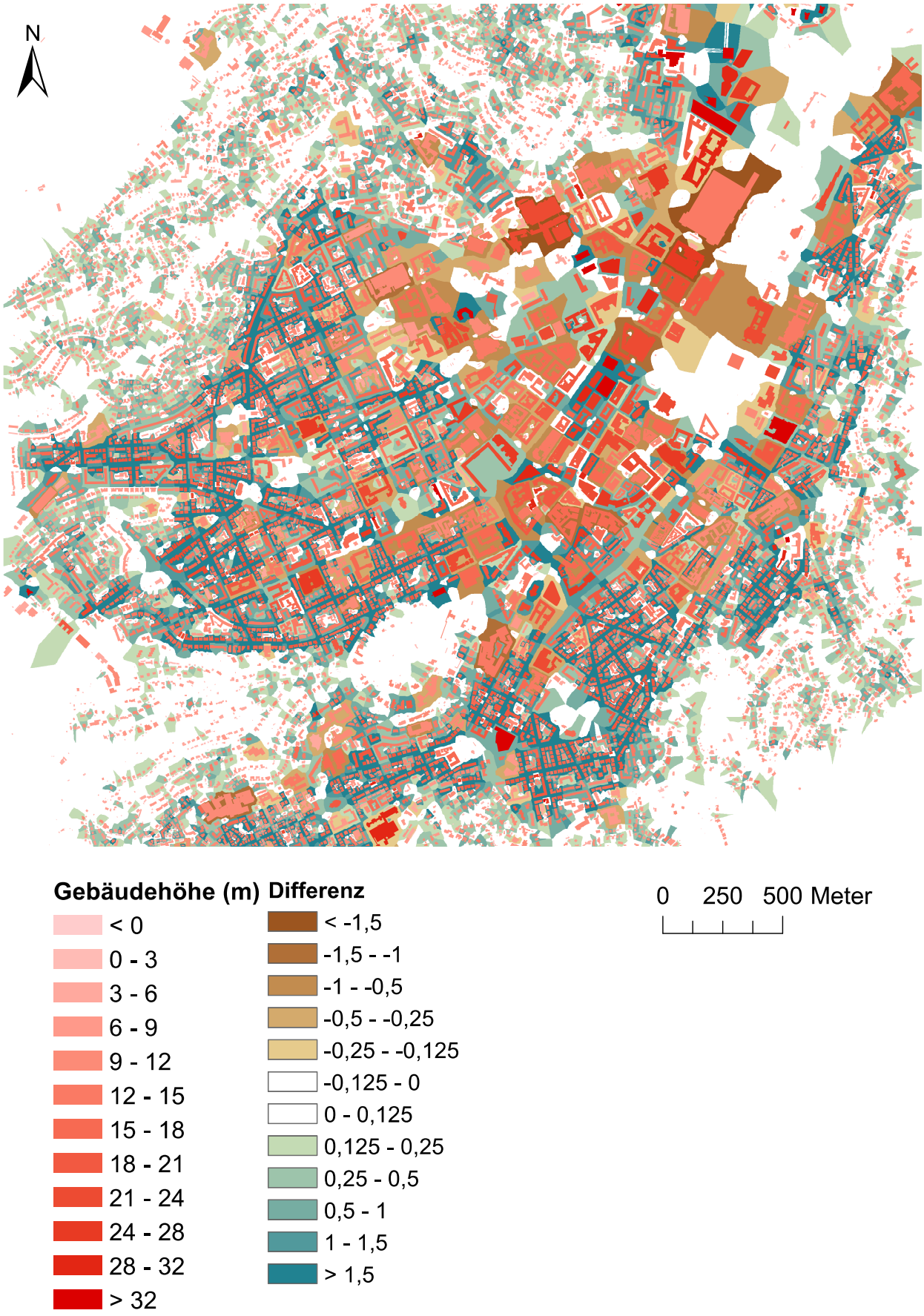


Abbildung 4.9: Dargestellt sind die Unterschiede zwischen der Rauigkeitslänge nach (Lettau 1969) und der Effektiven Höhe nach (Matzarakis und Mayer 1992; Mayer und Matzarakis 1992)

$$\Delta(z_{0,\text{Lettau}}, h_{\text{eff}}) = z_{0,\text{Lettau}} - \frac{h_{\text{eff}}}{4}$$

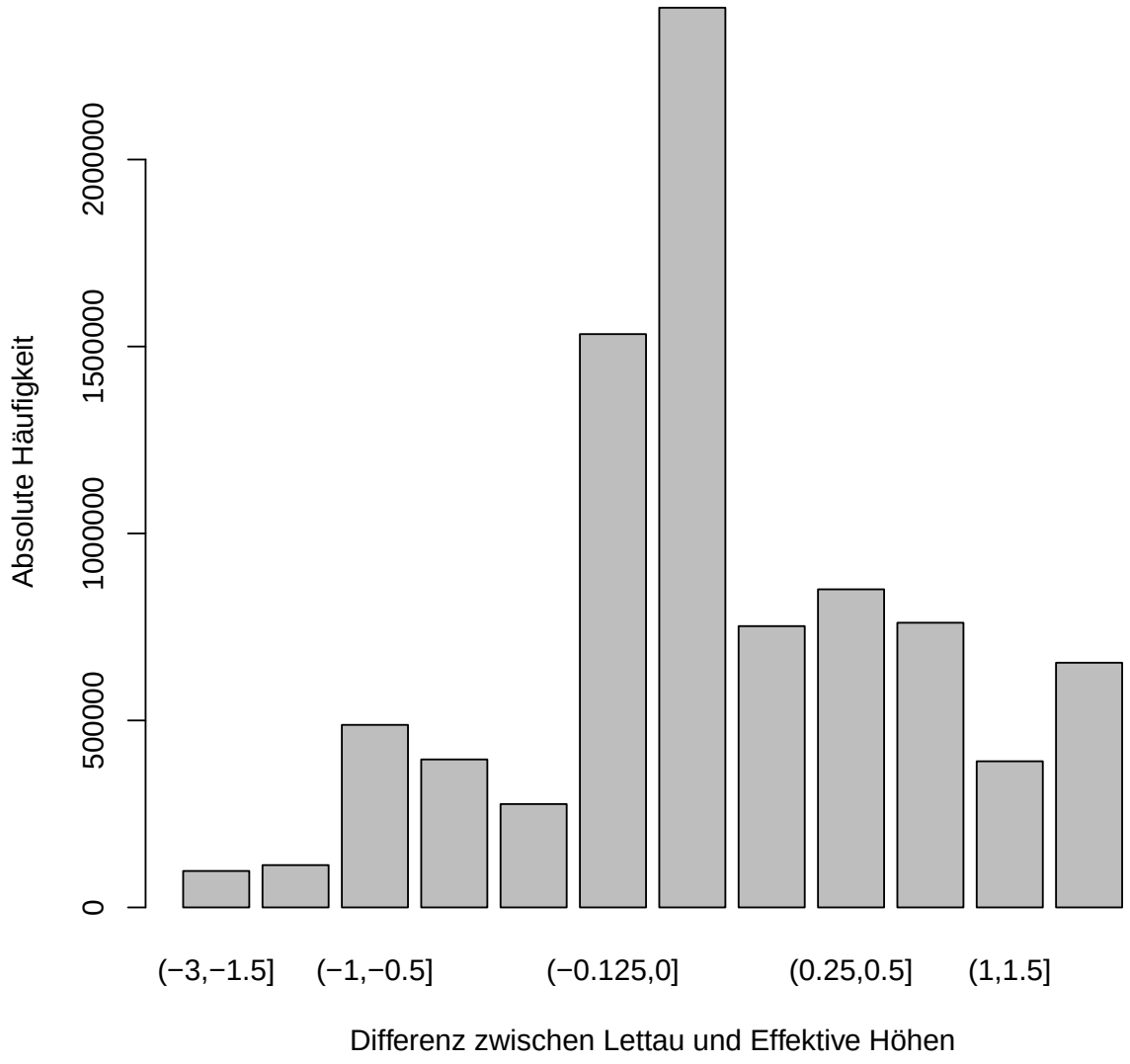


Abbildung 4.10: Häufigkeitsverteilung der Differenz der Rauigkeitslänge nach (Lettau 1969) und $\frac{h_{\text{eff}}}{4}$ nach (Matzarakis und Mayer 1992; Mayer und Matzarakis 1992)

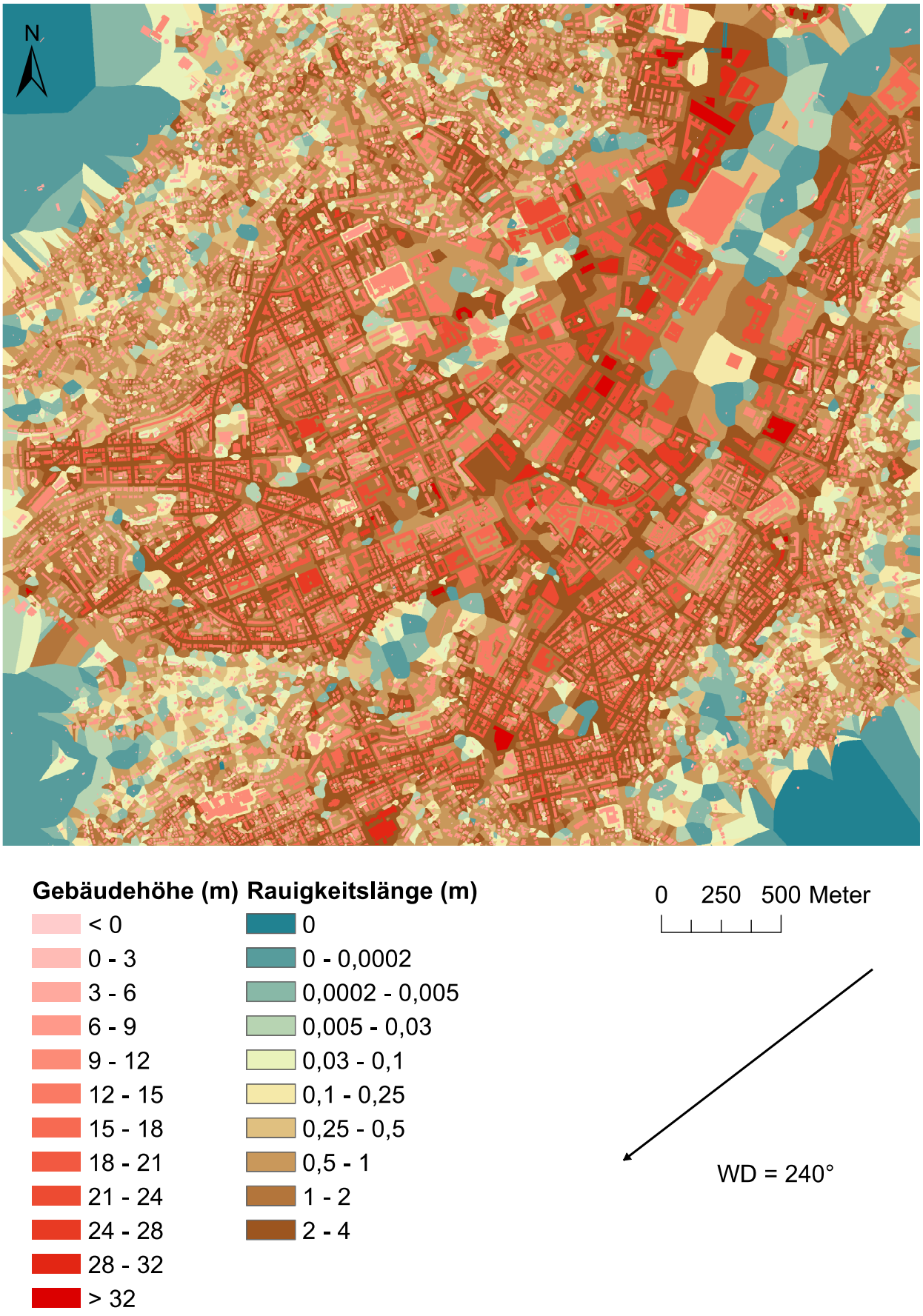


Abbildung 4.11: Rauigkeitslänge z_0 nach (Gál und Sümeghy 2007; Gál und Unger 2008)

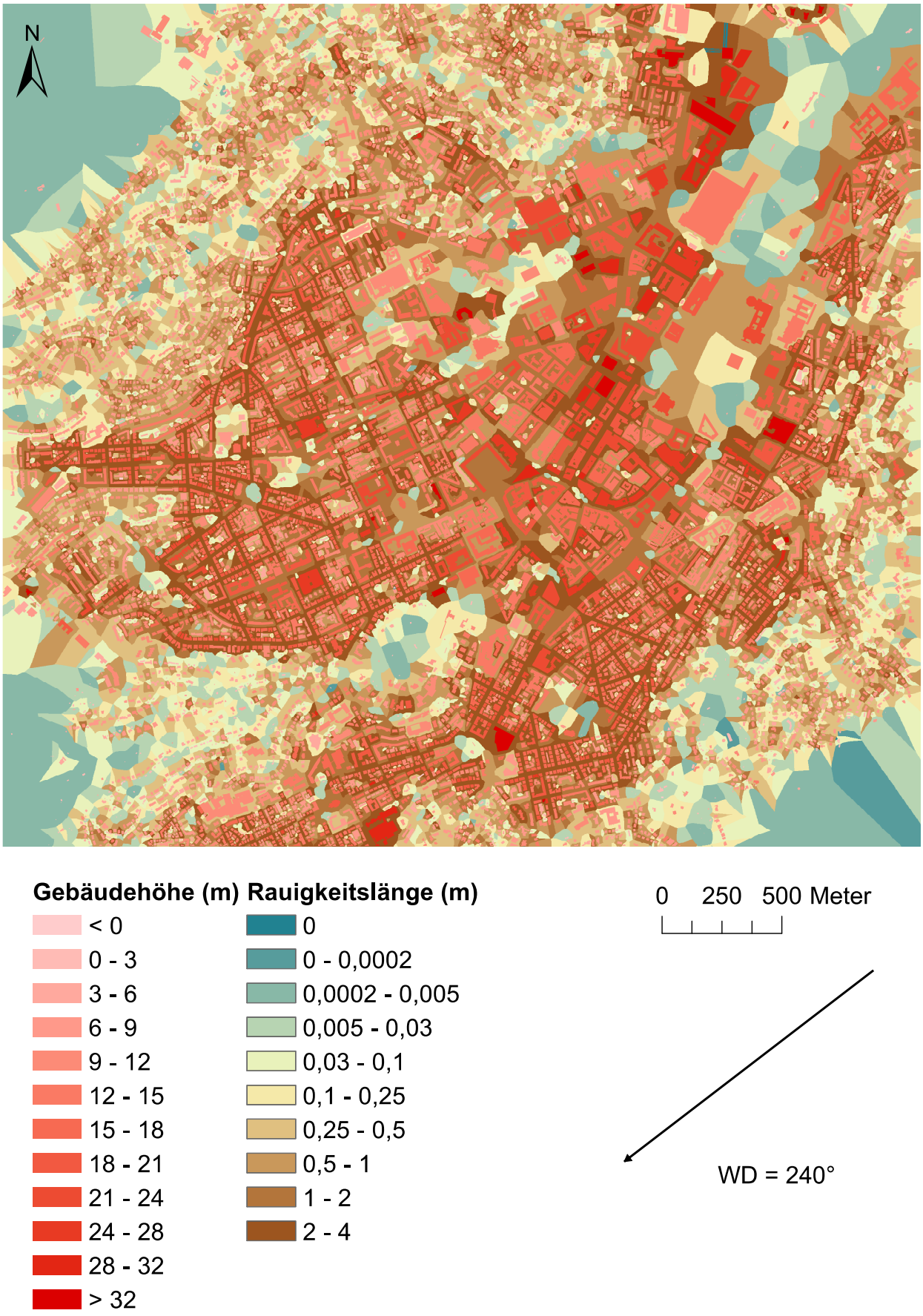


Abbildung 4.12: Rauigkeitslänge z_0 nach (Lettau 1969)

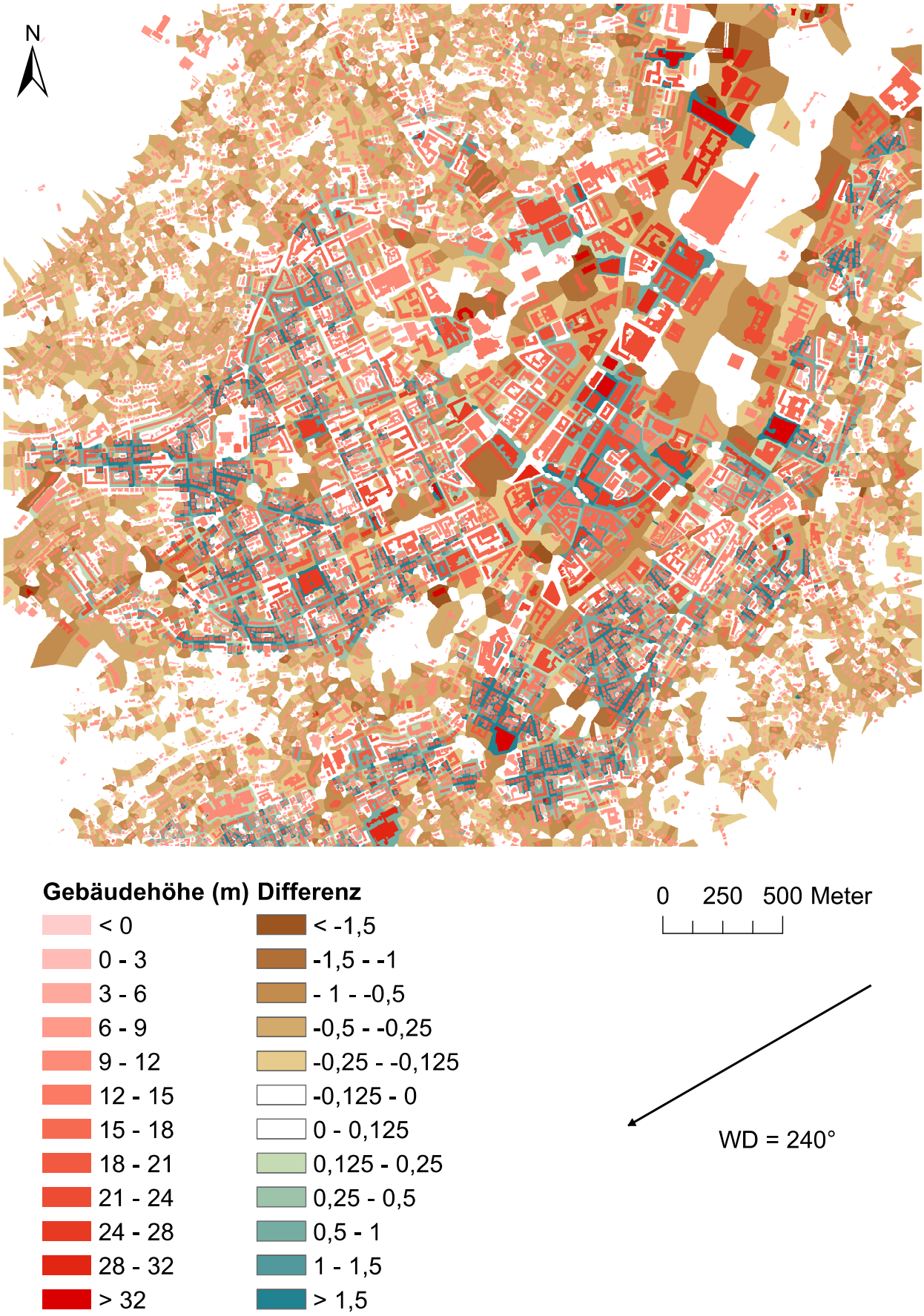


Abbildung 4.13: Differenz der Rauigkeitslänge nach (Lettau 1969) und Rauigkeitslänge nach (Gál und Sümeghy 2007; Gál und Unger 2008)

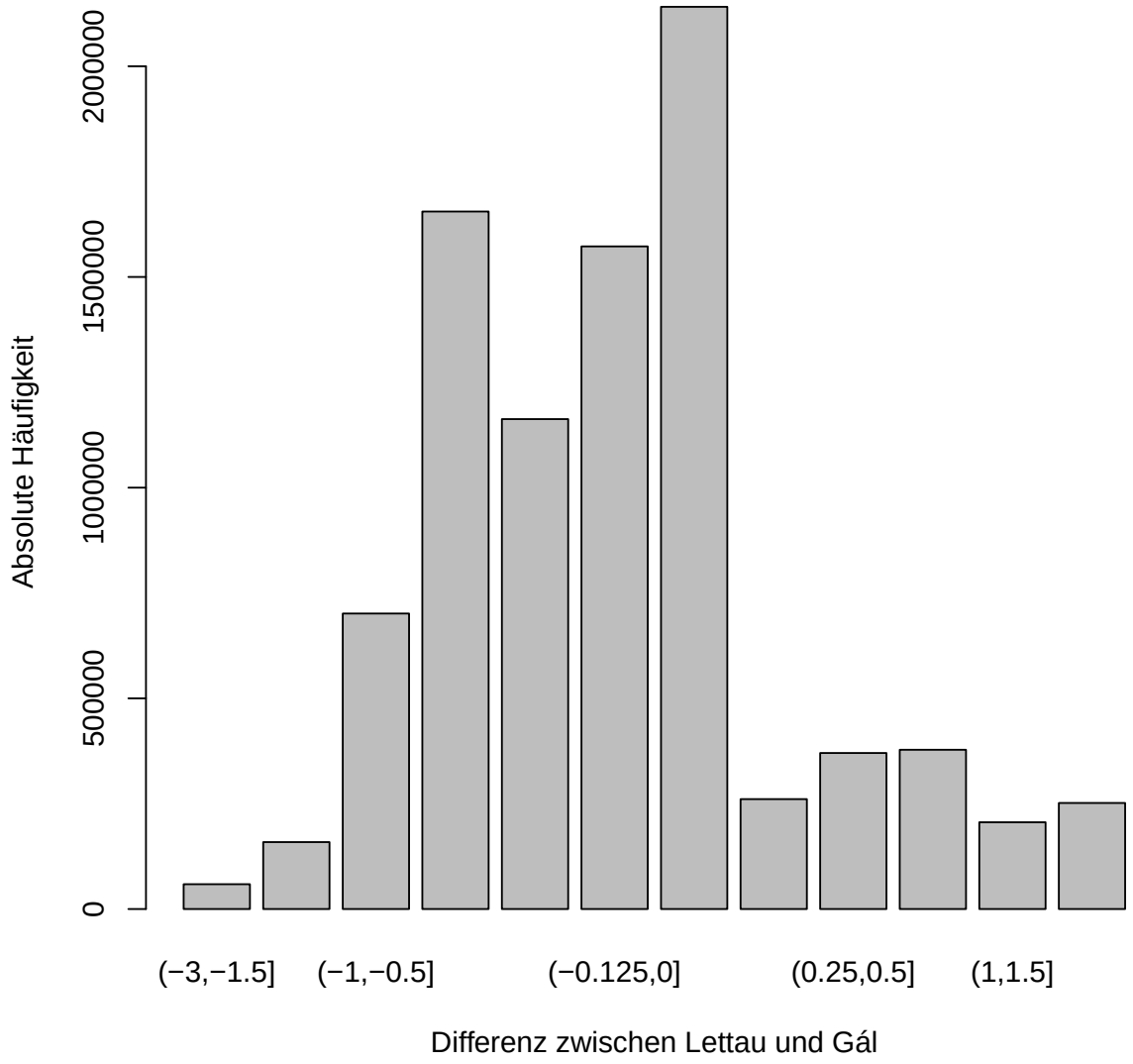


Abbildung 4.14: Häufigkeitsverteilung der Differenz der Rauigkeitslänge nach (Lettau 1969) und Rauigkeitslänge nach (Gál und Sümeghy 2007; Gál und Unger 2008)

5 Evaluation

Um die aerodynamische Oberflächenrauigkeit zu evaluieren, wurden die Ergebnisse mit den Daten einer Windsimulation (Ketterer und Matzarakis 2014) verglichen. (Windmessungen waren zum Vergleich leider nicht verfügbar.) Dazu wurden Windfelder mit dem DULAN Wind Modell (DUrchLüftungsANalyse nach (Röckle 2014, persönliche Kommunikation)) zwischen 0 ° und 360 ° in 10 ° Schritten unter Berücksichtigung der Gebäude sowie der Bäume berechnet. Die Windrichtung wurde mit dem DIWIMO (diagnostic meso-scale wind model) Modell (Lohmeyer 2014) unter Berücksichtigung der Topografie und zusätzlichen Messungen bestimmt. Dazu wurden die simulierten Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der jeweiligen berechneten Rauigkeit in Kombination mit einer Regressionskurve geplottet. Man erkennt, dass in allen vier Fällen eine logarithmische Regressionskurve gefittet wurde. In Abbildung 5.1 wurde die Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von den windrichtungsunabhängigen Ansätzen gezeichnet. Die Streuungen sind in dieser Abbildung kleiner, als in Abbildung 5.2. Allgemein ist dabei festzustellen, dass für kleine Rauigkeitswerte eine große Streuung und für große Rauigkeitswerte eine kleine Streuung zu beobachten ist. Die große Streuung ist dabei auf den Einfluss der Geländehöhe zurück zu führen.

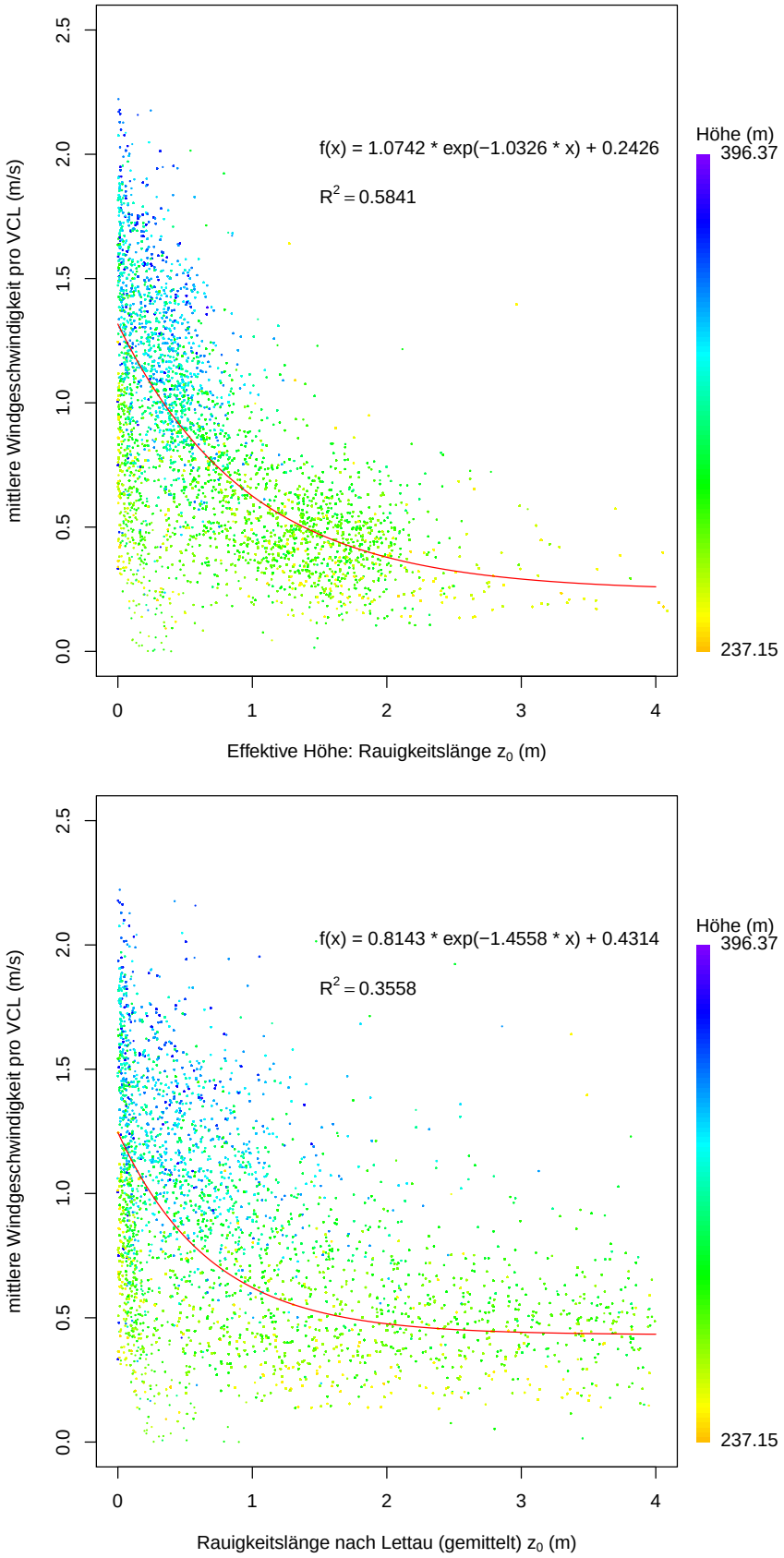


Abbildung 5.1: Abhängigkeit der simulierten Windgeschwindigkeit in Stuttgart nach (Lohmeyer 2014) unabhängig von WD. Farblich ist zusätzlich der Einfluss des Terrains eingezeichnet.

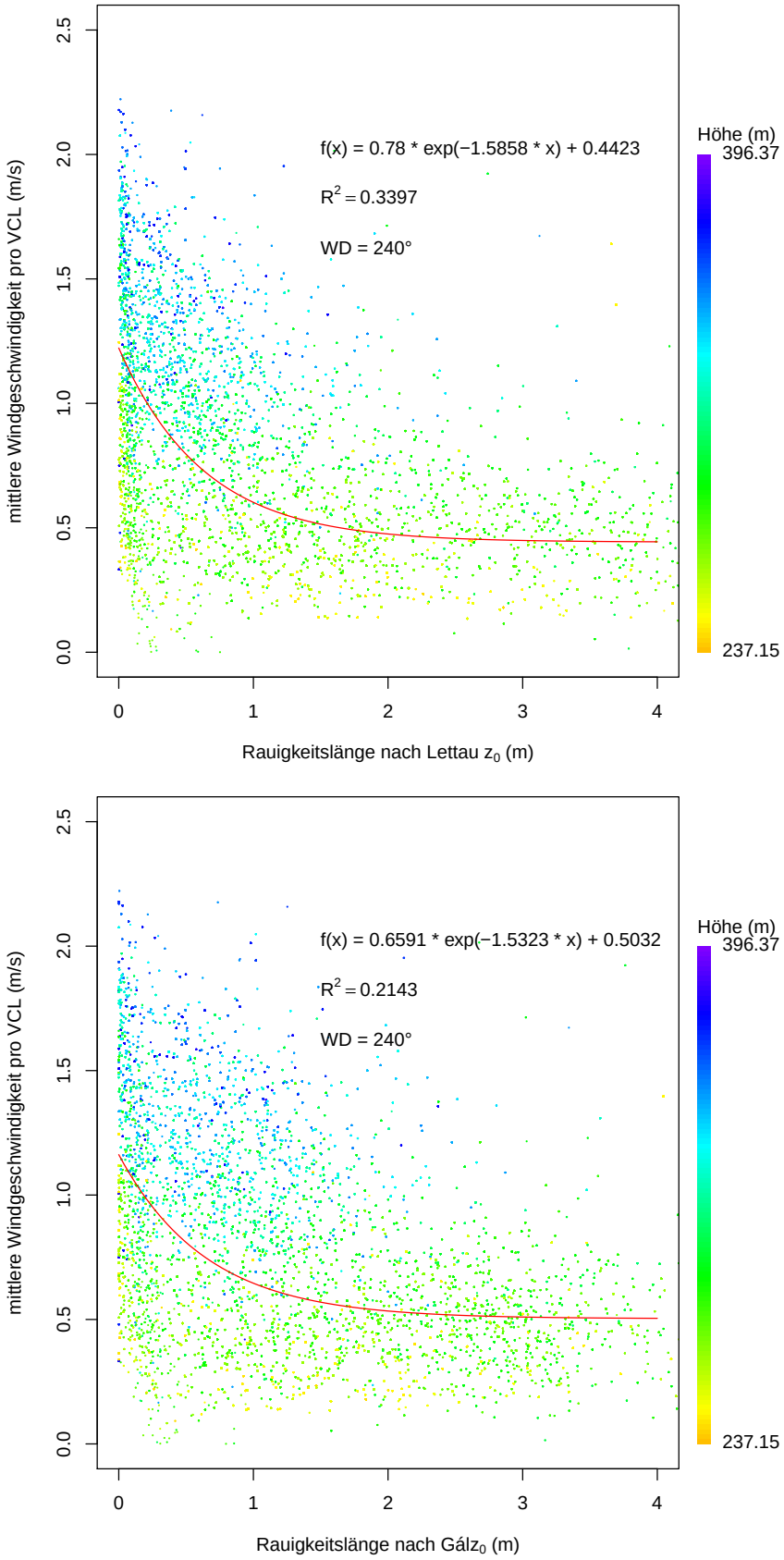


Abbildung 5.2: Abhängigkeit der simulierten Windgeschwindigkeit in Stuttgart nach (Lohmeyer 2014) abhängig von der vorherrschenden Windrichtung: 240°. Farblich ist zusätzlich der Einfluss des Terrains eingezeichnet.

6 Diskussion

Mit Hilfe des Voronoi-Diagramms erhält man auf Basis der gegebenen Gebäude eine gute räumliche Differenzierung, die nur auf der Anzahl der Gebäude und der Gebäudeform basiert.
Durch Fehler in den Eingangsdaten, können Fehler in dem Voronoi-Diagramm entstehen. Die Fehler beschränken sich nur auf Gebäude, die unterschiedliche Höhen haben und dadurch aus mehreren Polygonen bestehen. Die einzelnen Polygone sind eventuell nicht verbunden, so dass die einzelnen Teile des Gebäudes als eigenständiges Gebäude gewertet werden. Wenn die einzelnen Teile durch eine "Lücke" getrennt sind, deren Abstand geringer ist, als der Schwellenwert für die Erzeugung der Voronoipunkte, kann es zu dem Fehler kommen. Dabei konkurrieren die Punkte beider Teile um den Raum zwischen den Teilen. (siehe Abbildung 4.3) Es kommt zu falschen Voronoizellen und damit zu falschen Bezugsräumen, womit letztendlich falsche Rauigkeitswerte berechnet werden.

Die Laufzeitkomplexität der kompletten Berechnung der Oberflächenrauigkeit lässt sich insgesamt nur schwer formulieren. Fortunes Algorithmus hat eine Laufzeitkomplexität von $O(n \log n)$. Sei n die Anzahl der Punkte, so ist diese Zahl aber von der Distanz zweier benachbarter Punkte in einem Polygon abhängig (siehe Unterabschnitt 3.3.1). Hinzu kommt noch, dass die Laufzeitkomplexitäten für Funktionen (z.B. Area(geometry)) der Datenbank nicht bekannt sind. Der Overhead der durch die Einführung zusätzlicher Punkte entsteht ist kleiner als ursprünglich gedacht. Für einen Maximalabstand von 3 m wurde nur die 2.7 fache Anzahl der ursprünglichen Punkte berechnet.

Die "Effektiven Höhen" nach (Matzarakis und Mayer 1992; Mayer und Matzarakis 1992) weichen im Mittel um 2.48 m von den gemittelten Rauigkeitslängen nach (Lettau 1969) ab. Der Factor 0.25 in dem lineare Zusammenhang $z_0 = 0.25 \cdot h_{\text{eff}}$ ist deswegen in Frage zu stellen.

Der Ansatz berechnet zwar nicht direkt die Rauigkeitslänge, berücksichtigt allerdings auch die Vegetation.
Die Standardabweichung von $\Delta(z_{0,\text{Lettau}}, \frac{h_{\text{eff}}}{4})$ beträgt nur 0.96 m. Die beiden Ansätze weichen nicht sehr stark voneinander ab.

Die Rauigkeitslängen nach (Lettau 1969) weichen im Mittel nur um 0.35 m von den Rauigkeitslängen nach (Gál und Sümeghy 2007; Gál und Unger 2008) ab. Der mittlere Einfluss der planaren Flächendichte in dem Ansatz von Gal ist also relativ gering.

7 Schlussfolgerung

In dieser Arbeit konnten unterschiedliche Ansätze zur Berechnung der aerodynamischen Oberflächenrauigkeit miteinander verglichen und in das mikroskalige Modell "SkyHelios" implementiert werden.
"SkyHelios" ist nun in der Lage, die geometrische Rauigkeit nach den drei Ansätzen, dem "Morphometrische" Ansatz nach (Lettau 1969), dem "Effektive Höhen" Ansatz nach (Matzarakis und Mayer 1992; Mayer und Matzarakis 1992), sowie dem "vereinfachten Ansatz" nach (Gál und Sümeghy 2007; Gál und Unger 2008) für ein großes Bezugsgebiet effizient und hoch aufgelöst zu berechnen. Dadurch ist es nun möglich, die aerodynamische Oberflächenrauigkeit für ein Modellgebiet zu beurteilen. Gleichzeitig wurde festgestellt, dass sich die Ergebnisse des "Morphometrischen" Ansatzes nach (Lettau 1969), gemittelt über alle Windrichtungen, nicht wesentlich von dem Ergebnis des "Effektiven Höhen" Ansatzes nach (Matzarakis und Mayer 1992; Mayer und Matzarakis 1992) unterscheidet.
Außerdem sieht man, dass die Ergebnisse der windrichtungsabhängigen Ansätze (Morphometrischer und vereinfachter Ansatz) ebenfalls nicht signifikant voneinander abweichen. Das heißt auch, dass sich der morphometrische Ansatz, der nur auf geometrischen Eigenschaften der Gebäude basiert, nicht wesentlich von dem vereinfachten Ansatz, der auf dem allgemeinen logarithmischen Windprofil basiert, unterscheidet.
Zusätzlich wurde ermittelt, dass die Implementierung, ohne eine Berücksichtigung der Topografie, sowie der Vegetation nicht vollständig ist. Generell ist dabei aber auch zu sagen, dass ein Vergleich mit Messdaten nicht möglich war, da hierzu keine Daten vorhanden waren.
Die Bildung der Bezugsräume mit Voronoizellen scheint eine geeignete Methode zu sein, um eine räumliche Differenzierung der Rauigkeit zu erhalten. Die Berechnung der frontalen Flächen mit Hilfe einer Rotationsmatrix ist aus Effizienzgründen zu empfehlen.
Die Erweiterung von "SkyHelios" um eine räumliche Datenbank hat sich gelohnt. Die Verwaltung der Eingangsdaten ist dadurch nun effizient und einfach gelöst. Darauf basierend können nun auch in Zukunft weitere Berechnungen modular in "SkyHelios" integriert werden. Gleichzeitig eröffnet diese Integration die Möglichkeit berechnete Ergebnisse ebenfalls in der Datenbank abzuspeichern und späteren Berechnungen (z.B. Windfeldberechnung) verfügbar zu machen.

8 Ausblick

Nach der Berechnung der aerodynamischen Oberflächenrauigkeit wäre es als nächstes sinnvoll, mögliche Luftleitbahnen zu bestimmen. Hierzu müssten auf Basis der Rauigkeiten Pfade entsprechend der vorherrschenden Windrichtung bestimmt werden. Dazu ist es ratsam, die Anforderungen an stadtklimarelevante Luftleitbahnen (siehe (Mayer und Matzarakis 1992)) zu berücksichtigen.

Um den Einfluss größerer Gebäude besser zu bestimmen, sowie um eine bessere Dämpfung der Rauigkeit zu erhalten, ist folgende Erweiterung des effektiven Höhen Ansatzes bedenkenswert.

$$h_{\text{eff}} = \sum_{i=0}^{\#heights} \frac{Area(b_{height>i}) \cdot (Height(b) - i)}{Area(VC(b))} : \#heights \tag{8.1}$$

wobei:

- #heights: Anzahl der Metaebenen
- Area(b): Grundfläche von Gebäude b
- $b_{\text{height>i}}$: Gebäude mit einer Gebäudehöhe > i
- Height(b): Gebäudehöhe von Gebäude b
- VC(b): Voronoizelle von Gebäude b

Insgesamt werden #heights zusätzliche Metaebenen eingeführt, wobei jede Metaebene gerade die Gebäude enthält, die mindestens so hoch sind wie die Höhe der Metaebene. Die Höhen der Gebäuden auf der Metaebene würden pro Ebene angepasst werden, so dass die Gebäude gerade so hoch sind wie die ursprüngliche Gebäudehöhe - Höhe der Metaebene. Durch die Einführung der Metaebenen werden unterschiedliche Voronoi-Diagramme pro Ebene erzeugt, da die Anzahl der Gebäude pro Metaebene reduziert wird. Die oberste Metaebene wird so nur durch die größten Gebäude aufgeteilt, die gerade größer sind als die Höhe der Metaebene. Im Anschluss würde über die Ebenen gemittelt werden.

Den Einfluss der Vegetation auf die Oberflächenrauigkeit ist generell nicht zu vernachlässigen, sodass die Simulation um die zusätzliche Berechnung der Oberflächenrauigkeit für die

Vegetation auf Basis verfügbarer Vegetationsflächen ergänzt werden kann. Hierzu wäre es notwendig, dass jeder Vegetationsfläche die neue Eigenschaft “Porosität” bzw. “Winddurchlässigkeit” zugewiesen wird.

Des Weiteren muss die Berechnung der aerodynamische Oberflächenrauigkeit dahin gehend erweitert werden, dass auch komplexere Eingangsdaten (z.B. mit Wandflächen) berücksichtigt werden können.

Zur Berechnung der Voronoi-Diagramme für Polygone können effizientere Ansätze benutzt werden, die nicht auf diese große Anzahl an Punkten angewiesen sind und sich direkt auf die Liniensegmente der Polygone beziehen.

Für planerische Zwecke wäre es vielleicht auch sinnvoll, wenn “SkyHelios” Veränderungen (Hinzufügen, Entfernen von Gebäude, Ändern der Gebäudehöhe sowie der Gebäudeform) an dem Modellgebiet erlauben würde, um direkt den Einfluss der Änderungen auf die Rauigkeit zu sehen.

Literaturverzeichnis

Bendix, J. (2004). „Geländeklimatologie: Mit 15 Tabellen“. Studienbücher der Geographie. Berlin und Stuttgart: Borntraeger.

Bottema, M. (1997). „Urban roughness modelling in relation to pollutant dispersion“. *Atmospheric Environment* 31.18, S. 3059–3075.

Bottema, M. und P. G. Mestayer (1998). „Urban roughness mapping – validation techniques and some first results“. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 74-76, S. 163–173.

Brunn, S. D., M. Hays-Mitchell und D. J. Zeigler (2012). „Cities of the world: World regional urban development“. 5th ed. Lanham und Md: Rowman & Littlefield Publishers, Inc.

Bruse, M. und H. Fleer (1998). „Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model: The challenge of awareness in developing societies“. *Environmental Modelling & Software* 13.3-4, S. 373–384.

Davenport, A. G., Grimmond, C. S. B., T. R. Oke und J. Wieringa (2000). „Estimating the roughness of cities and sheltered country“. In: *15th conference on probability and statistics in the atmospheric sciences/12th conference on applied climatology, Ashville, NC, American Meteorological Society*, S. 96–99.

Fanger, P. O. (1972). „Thermal Comfort: Analysis and application in Environment Engineering“. New York: McGraw Hill.

Furieri, A. (2014a). „Internal BLOB-Geometry format“. http://www.gaia-gis.it/gaia-sins/BLOB-Geometry.html, Abruf am 18. 08. 2014.

– (2014b). „The Gaia-SINS federated project homepage“. http://www.gaia-gis.it/gaia-sins/, Abruf am 14. 08. 2014.

Gagge, A. P., A. Fobelets und L. Berglund (1986). „A standard predictive index of human response to the thermal environment“. *ASHRAE Transaction* 92, Pt 1, S. 709–731.

Gál, T. und Z. Sümeghy (2007). „Mapping the roughness parameters in a large urban area for urban climate applications“. *Acta Climatologica et Chorologica* 40.41, S. 27–36.

Gál, T. und J. Unger (2008). „Detection of ventilation paths using high-resolution roughness parameter mapping in a large urban area“. *Building and Environment* 44.1, S. 198–206.

„GDAL - Geospatial Data Abstraction Library“ (2014). http://www.gdal.org/, Abruf am 18. 08. 2014.

Gerald, E. und USGS (2014). „PROJ.4 - General Parameters“. http://trac.osgeo.org/proj/wiki/GenParms, Abruf am 18. 08. 2014.

Höppe, P. (1999). „The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment“. *International Journal of Biometeorology* 43.2, S. 71–75.

Huttner, S. (2012). „Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met“. Mainz: Johannes Gutenberg Universität.

Ketterer, C. und A. Matzarakis (2014). „Comparison of Different Methods for the Assessment of the Urban Heat Island in Stuttgart, Germany“. *International Journal of Biometeorology (IJB) (eingereicht).*

Kondo, J. und H. Yamazawa (1986). „Aerodynamic roughness over an inhomogeneous ground surface“. *Boundary-Layer Meteorology* 35.4, S. 331–348.

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2010). „Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub und Stickstoffdioxid im Zusammenhang mit der Luftreinhalteplanung“. http://www.lanuv.nrw.de/gesundheit/schadstoffe/gesundheitliche_wirkungen.pdf, Abruf am 25. 08. 2014.

Lettau, H. (1969). „Note on Aerodynamic Roughness-Parameter Estimation on the Basis of Roughness-Element Description“. *Journal of Applied Meteorology* 8, S. 828–832.

Lohmeyer, A. (2014). „Diagnostisches mesoskaliges Windfeldmodell DIWIMO“. http://www.lohmeyer.de/de/node/138, Abruf am 25. 08. 2014.

Macdonald, R. W. (2000). „Modelling The Mean Velocity Profile In The Urban Canopy Layer“. *Boundary-Layer Meteorology* 97.1, S. 25–45. Abruf am 18. 08. 2014.

Matuschek, O. und A. Matzarakis (2010). „Estimation of sky view factor in complex environment as a tool for applied climatological studies“. In: *Matzarakis, A., Mayer, H., Chmielewski, F.-M. (Eds.), Proceedings of the 7th Conference on Biometeorology. Ber. Meteorol. Inst. Univ. Freiburg No. 20, 535-540.*

Matzarakis, A. (2001). „Die thermische Komponente des Stadtklimas“. *Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg* 6, S. 287.

Matzarakis, A. und O. Matuschek (2010). „Sky View Factor as a parameter in applied climatology: Rapid estimation by the SkyHelios Model“. *Meteorologische Zeitschrift* 20.1, S. 39–45.

Matzarakis, A. und H. Mayer (1992). „Mapping of urban air paths for planning in Munich“. *Planning Applications of Urban and Building Climatology. Wiss. Ber. Inst. Meteor. Klimaforsch. Univ. Karlsruhe* 16, S. 13–22.

Matzarakis, A., H. Mayer und M. Iziomon (1999). „Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature“. *International Journal of Biometeorology* 43.2, S. 76–84.

Matzarakis, A., F. Rutz und H. Mayer (2000). „Modellierung der mittleren Strahlungstemperatur in urbanen Strukturen“. *Fachtagung METTOOLS*, S. 22–24.

– (2007). „Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model“. *International Journal of Biometeorology* 51.4, S. 323–334.

– (2010). „Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model“. *International Journal of Biometeorology* 54.2, S. 131–139.

Mayer, H. und P. Höppe (1987). „Thermal comfort of man in different urban environments“. *Theoretical and Applied Climatology* 38.1, S. 43–49.

Mayer, H., W. Beckröge und A. Matzarakis (1994). „Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen“. *UVP-report* 5.94, S. 265–268.

Mayer, H. und A. Matzarakis (1992). „Stadtklimarelevante Luftströmungen im Münchner Stadtgebiet: (Forschungsvorhaben STADTLUFT)“. Hrsg. von Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie der Universität München.

Ogre Team (2014). „Ogre“.
http://www.ogre3d.org/, Abruf am 18. 08. 2014.

Oke, T. R. (1973). „City size and the urban heat island“. *Atmospheric Environment (1967)* 7.8, S. 769–779. Abruf am 18. 08. 2014.

Oke, T. R. (2004). „Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites“. Bd. no. 81. Instruments and Observing Methods Report. [S.l.]: World Meteorological Organization.

Ottmann, T. und P. Widmayer (2012). „Algorithmen und Datenstrukturen“. 5. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Röckle, R. (1990). „Bestimmung der Strömungsverhältnisse im Bereich komplexer Bebauungsstrukturen: Darmstadt, Technische Hochschule, Dissertation“.

Schirmer, H. und W. Buschner (1987). „Meyers kleines Lexikon "Meterologie"“. Meyers kleine Lexikon. Mannheim, Wien und Zürich: Meyers Lexikonverlag.

„SQLite“ (2014).
http://www.sqlite.org/, Abruf am 18. 08. 2014.

Staiger, H., G. Laschewski und A. Grätz (2012). „The perceived temperature - a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: scientific basics“. *International Journal of Biometeorology* 56.1, S. 165–176.

Stewart, I. D. und T. R. Oke (2012). „Local Climate Zones for Urban Temperature Studies“. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93.12, S. 1879–1900. Abruf am 18. 08. 2014.

„The VirtualOGR SQLite extension“ (2014).
http://www.gdal.org/ogr/drv_sqlite.html, Abruf am 18. 08. 2014.

Umweltbundesamt (2013). „Feinstaub in Megacities: Ein Thema mit essentieller Bedeutung für Millionen Menschen“.

http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/420/dokumente/feinstaub_megacities.pdf, Abruf am 25. 08. 2014.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2013). „World population prospects: The 2012 Revision, Highlights and Advance Tables“. United Nations Pubns.

Abbildungsverzeichnis

2.1 Räumliche und zeitliche Größenordnungen der Stadtklimatologie. 1-7 beschreiben beispielhaft die räumliche und zeitliche Ausdehnung von Windphänomenen: 1. durch Hindernisse induzierte Luftwirbel, 2. Vortex in einer Straßenschlucht, 3. einzelne Wirbel durch Gebäude, 4. Abluftfahne von Schornsteinen, 5. durch Grünflächen induzierte Windsysteme, 6. Stadt-Umland Windsystem, 7. Abluftfahne der Stadt 5

2.2 Hauptfenster von SkyHelios; Links: Verwaltung der Eingangsdaten, Mitte: dreidimensionale Ansicht des Modellgebietes, Rechts: Konfiguration der Simulation; Ausgabe des SVF, Roter Punkt: aktuell betrachtete Position . . . 8

2.3 Sky View Factor (weiß) und Sonnenstand (gelb) am 03.06.2014 in Freiburg auf dem Platz der Alten Synagoge. 9

2.4 Schematische Darstellung der Größenordnungen für eine Stadt in Kombination mit der atmosphärischen Schichtung über der Stadt. PBL: Planetarische Grenzschicht, UBL: städtische Grenzschicht, UCL: städtische Dachschicht (Grafik: (Oke 2004)) 11

2.5 Modifizierung des Windprofils durch eine Veränderung der Oberflächenrauigkeit; Umland mit einer Gebäudehöhe von $5\,m$ ($z_0 : 0.25\,m$, $z_\mathrm{d} : 4\,m$), Vorstadt mit einer Gebäudehöhe von $10\,m$ ($z_0 : 0.5\,m$, $z_\mathrm{d} : 8\,m$), Stadt mit einer Gebäudehöhe von $40\,m$ ($z_0 : 0.8\,m$, $z_\mathrm{d} : 32\,m$) mit einer festen Referenz Windgeschwindigkeit von 4 m/s in einer Referenzhöhe von 50m 12

2.6 Flächenanteile der Gebäude (blau), der Vegetation (rot) und sonstiger Flächen (grün) von der gesamten Bezugsfläche für den Ansatz “Effektive Höhen”. . . 18

2.7 Frontale Flächendichte aus der Summe der frontalen Flächen der Gebäude (A_i) aus einer bestimmten Windrichtung (WD) zu der gesamten Bezugsfläche (A_total). 21

2.8 Planare Flächendichte aus der Summe der planaren Flächen der Gebäude (A_i) zu der gesamten Bezugsfläche (A_total). 22

2.9 Raster - Aufteilung des zweidimensionalen Raums in gleich große Rasterzellen. 26

2.10 Darstellung der Halbebenen $H(p_1|p_2)$ und $H(p_2|p_1)$ als Voronoi-Diagramm für zwei Punkte p_1 und p_2 in einer Ebene. (Grafik: (Ottmann und Widmayer 2012)) 27

2.11 Voronoizelle p_1 unter einer gegebenen Punktemenge X; Halbebenen $H(p_1|p_i)$, $H(p_i|p_1)$ (Grafik: (Ottmann und Widmayer 2012)) 28
2.12 Voronoi-Diagramm auf Grundlage gegebener Gebäude. 29

3.1 Erweiterung von SkyHelios um einen Datamanager dem eine räumliche Datenbank zugrunde liegt. 32
3.2 Rotiertes Koordinatensystem mit der resultierenden frontalen Fläche eines Gebäudes 36
3.3 Schematische Darstellung eines Modellgebiets in Kombination mit einer räumlichen Aufteilung in Voronoizellen. 37
3.4 Dargestellt ist eine komplexe Gebäudeanordnung, die über die Eckpunkte (rot) der einzelnen Gebäude definiert ist. Zusätzlich zu den Eckpunkten wurden zusätzliche Stützpunkte (grüne) zur Berechnung des Voronoidiagramms zwischen den Eckpunkten berechnet. 38
3.5 Punkte auf der Begrenzung der Gebäude bilden die Voronoizellen um das Gebäude. 40
3.6 Zusammengefasste Voronoizellen bilden näherungsweise ein Voronoi-Diagramm für Polygone. 42
3.7 Erweiterung der GUI von SkyHelios; Auswahlmöglichkeit für die Ansätze; Ladebalken in Abhängigkeit der verarbeiteten Punkte, Gebäude 43

4.1 Links: Ausdehnung des Modellgebiets in Stuttgart; Rechts: Einbettung des Modellgebiets in die besondere Topografie Stuttgarts 46
4.2 Dargestellt sind die Hausdachhöhen, sowie das Voronoi-Diagramm auf Basis der Polygone in Stuttgart. 48
4.3 Durch eine fehlerhafte Datei, ist das Gebäude durch einen kleinen Spalt getrennt. Eigentlich wären die Gebäudeteile miteinander verbunden und hätten nur eine unterschiedliche Höhe. Die Breite des Spalts ist kleiner als die Entfernung zweier benachbarter Voronoipunkte. 49
4.4 “Effektive Höhen” nach (Matzarakis und Mayer 1992; Mayer und Matzarakis 1992) in Stuttgart. Durch die Umrisse sind sowohl die berechneten Voronoizellen, als auch die Gebäude dargestellt. Insbesondere wurden die Gebäudehöhen sowie die effektive Rauigkeit farblich dargestellt. 50
4.5 Häufigkeitsverteilung der “Effektiven Höhen” in Stuttgart. Die Klassen zwischen 0-8 m entsprechen, genau den Rauigkeitsklassen nach (Davenport et al. 2000) 51

4.6 Durchschnittliche Rauigkeitslänge z_0 nach (Lettau 1969) in Stuttgart. Durch die Umrisse sind sowohl die berechneten Voronoizellen als auch die Gebäude dargestellt. Insbesondere wurden die Gebäudehöhen sowie die effektive Rauigkeit farblich dargestellt. Die Rauigkeitslänge wurde gemittelt aus allen Windrichtungen in 10 ° Schrittweite berechnet. 52
4.7 Häufigkeitsverteilung der Rauigkeitslänge in Stuttgart nach Kap. 2.8.1(Lettau 1969). Die Klassen zwischen 0-2 m entsprechen, genau den Rauigkeitsklassen nach (Davenport et al. 2000) 53
4.8 Dargestellt sind die Unterschiede zwischen der Rauigkeitslänge nach (Lettau 1969) und der Effektiven Höhe nach (Mayer und Matzarakis 1992) $\Delta(z_{0,\text{Lettau}},\ h_{\text{EffektiveHöhe}}) = z_{0,\text{Lettau}} - h_{\text{eff}}$ 54
4.9 Dargestellt sind die Unterschiede zwischen der Rauigkeitslänge nach (Lettau 1969) und der Effektiven Höhe nach (Matzarakis und Mayer 1992; Mayer und Matzarakis 1992) $\Delta(z_{0,\text{Lettau}}, h_{\text{eff}}) = z_{0,\text{Lettau}} - \frac{h_{\text{eff}}}{4}$ 55
4.10 Häufigkeitsverteilung der Differenz der Rauigkeitslänge nach (Lettau 1969) und $\frac{h_{\text{eff}}}{4}$ nach (Matzarakis und Mayer 1992; Mayer und Matzarakis 1992) . . 56
4.11 Rauigkeitslänge z_0 nach (Gál und Sümeghy 2007; Gál und Unger 2008) . . . 57
4.12 Rauigkeitslänge z_0 nach (Lettau 1969) 58
4.13 Differenz der Rauigkeitslänge nach (Lettau 1969) und Rauigkeitslänge nach (Gál und Sümeghy 2007; Gál und Unger 2008) 59
4.14 Häufigkeitsverteilung der Differenz der Rauigkeitslänge nach (Lettau 1969) und Rauigkeitslänge nach (Gál und Sümeghy 2007; Gál und Unger 2008) . . 60

5.1 Abhängigkeit der simulierten Windgeschwindigkeit in Stuttgart nach (Lohmeyer 2014) unabhängig von WD. Farblich ist zusätzlich der Einfluss des Terrains eingezeichnet. 62
5.2 Abhängigkeit der simulierten Windgeschwindigkeit in Stuttgart nach (Lohmeyer 2014) abhängig von der vorherrschenden Windrichtung: 240°. Farblich ist zusätzlich der Einfluss des Terrains eingezeichnet. 63

Tabellenverzeichnis

2.1 Übersicht über PET und UTCI, mit den jeweiligen Eingangsgrößen. 10
2.2 Rauigkeitsklassifikation nach (Davenport et al. 2000): Einteilung unterschiedlicher Landnutzungen, beschrieben durch eine Landschaftsbeschreibung in Rauigkeitsklassen. Zuweisung der Rauigkeitslänge zur Davenportklasse. . . . 15
2.3 Übersicht über alle Ansätze in chronologischer Ordnung, unter Angabe der bestimmenden Größen (vereinheitlicht) 24

3.1 Eigenschaften räumlicher Referenzsysteme, charakterisiert durch die SRID/EPSG-Nummer, sowie zusätzliche Parameter 34

Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
κ	von-Kármán-Konstante	0.41 [1]
λ_f	frontale Flächendichte	-
A_{frontal}	frontale Fläche; Silhouette	m^2
A_{total}	Bezugsraum	m^2
clo	Kleidungsdurchgangswiderstand	-
h^*	durchschnittliche Hindernishöhe	m
H_i	Hindernishöhe von Gebäude i	m
h_{eff}	effektive Höhe	m
RH	relative Feuchtigkeit; relative humidity	%
T_{a}	Lufttemperatur	℃
T_{mrt}	mittlere Strahlungstemperatur	℃
v	Windgeschwindigkeit	m/s
VP	Dampfdruck; Vapour Pressure	hPa
z_0	Rauigkeitslänge	m
z_d	Nullpunktverschiebung	m
BLOB	Binary Large Object	-
DEM	Digitales Geländemodell; Digital Elevation Model	-

GDAL, OGR	Geospatial Data Abstraction Library	-
GPU	Grafikprozessor; Graphics Processing Unit	-
gT	gefühlte Temperatur	℃
GUI	Graphical User Interface	-
h	geometrische Rauigkeit	m
LCZ	Local Climate Zone	-
MinGW	Minimal GNU for Windows	-
MOGRE	Managed Ogre	-
MSYS	Minimal SYStem	-
NN	Normalnull	-
OBS	Daten von urbanen Hindernissen; Obstacle File	-
OGRE	Object-Oriented Graphics Rendering Engine	-
PBL	Planetarische Grenzschicht / Planetary boundary layer	-
PET	Physiologisch Äquivalente Tempereatur	℃
PMV	Predicted Mean Vote	-
PT	Perceived Temperature; siehe gT	℃
RDBMS	Relationes Datenbank Management System	-
SRID, EPSG	Spatial Referencesystem Identifier	-
SVF, Ψ_s	Sky View Factor	[0,1]
UTCI	Universal Thermal Climate Index	℃
WD	Wind direction, Windrichtung	°

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Abschlussarbeit selbständig verfasst habe, keine anderen als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel verwendet habe und alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen wurden, als solche kenntlich gemacht habe. Darüber hinaus erkläre ich, dass diese Abschlussarbeit nicht, auch nicht auszugsweise, bereits für eine andere Prüfung angefertigt wurde.

Ort,Datum Unterschrift