



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

DIPLOMARBEIT

GIS-basierter Hitzevulnerabilitätsschnelltest für Österreichs Gemeinden

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades

eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Dipl.-Ing. Robert Kalasek

E280/2

Forschungsbereich Stadt- und Regionalforschung

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Christoph Foglar-Deinhardstein, BSc

00649709

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

Christoph Foglar Deinhardstein, Wien am 20.12.2023

Kurzzusammenfassung

Durch den Klimawandel treten Naturkatastrophen wie Hitzewellen, Überschwemmungen und Dürren immer häufiger auf. Radikale Klimaschutzmaßnahmen allein werden nicht ausreichen, um diese Gefahren vollständig in den Griff zu bekommen. Daher sind maßgeschneiderte Anpassungsmaßnahmen notwendig.¹

Da der Großteil der österreichischen Bevölkerung in Siedlungen lebt², sind Anpassungsmaßnahmen vor allem in diesen Räumen umzusetzen. Klimawandelanpassungen sind ortsgebunden und sollten daher auf lokaler oder regionaler Ebene geplant und angewendet werden.³

Vulnerabilitätsanalysen können dabei helfen, eine Übersicht zu verschaffen, in welchen Orten und Handlungsbereichen Klimawandelanpassungen besonders kritisch sind. Damit lassen sich alternative Zukunftsszenarien auf deren Folgen hin analysieren.⁴

Als Inspirationsgrundlage für diese Diplomarbeit diente das FFG-Forschungsprojekt „VESPA“. Dieses Projekt hatte den Auftrag, den Prototypen eines Vulnerabilitäts-Schnelltests für österreichische Städte zu entwickeln, der als evidenzbasierte Grundlage für politische Entscheidungsträger*innen und Stadtverwaltungen herangezogen werden kann.

In der vorliegenden Arbeit wurde ein GIS-basiertes Modell eines Hitzevulnerabilitäts-Schnelltests erstellt, das auf der Berechnung lokaler Hitzeinseln, der Vulnerabilität der betroffenen Bewohner*innen, abhängig von Alter und Geschlecht, sowie der Erreichbarkeit durch Notfallrettungsdienste beruht. Das Modell basiert auf bundesweiten Daten, wodurch Analysen für alle österreichischen Gemeinde möglich sind.

¹ Vgl. ETC-CCA and ETC-SIA (2012), S.6

² Vgl. Statista.com (2023), online

³ Vgl. ETC-CCA and ETC-SIA (2012), S.6

⁴ Vgl. Stock, Kropp, Walkenhorst (2009), S.1

Abstract

As a result of climate change natural disasters such as heat waves, floods and droughts are becoming more frequent. Radical climate protection measures alone will not be enough to fully address these threats. Therefore, tailor-made adaptation measures are necessary.⁵

Since most of the Austrian population lives in settlements⁶, adaptation measures must be implemented primarily in these areas. Adaptation to climate change is site-specific and should therefore be planned and implemented at the local or regional level.⁷

Vulnerability assessments can help to provide an overview of the locations and areas in which climate change adaptation is particularly critical. This allows alternative future scenarios to be analyzed regarding their consequences.⁸

The FFG research project "VESPA" served as the inspiration for this diploma thesis. This project was commissioned to develop the prototype of a vulnerability quick test for Austrian cities, which can be used as an evidence-based basis for political decision-makers and city administrations.

In this thesis, a GIS-based model of a heat vulnerability quick test was created, which is based on the calculation of local heat islands, the vulnerability of the affected residents, depending on age and gender, and the accessibility of ambulance services. The model is based on nationwide data, which makes analyses for all Austrian municipalities possible.

⁵ Vgl. ETC-CCA and ETC-SIA (2012), S.6

⁶ Vgl. Statista.com (2023), online

⁷ Vgl. ETC-CCA and ETC-SIA (2012), S.6

⁸ Vgl. Stock, Kropp, Walkenhorst (2009), S.1

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	iii
Abstract.....	iv
Inhaltsverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis	ix
Abkürzungsverzeichnis.....	xvi
1 Einleitung.....	1
Themenstellung	1
VESPA	2
Forschungsfragen	2
Hypothesen.....	3
Methodik.....	3
2 Theoretische Grundlagen.....	4
Herausforderung Klimawandelanpassung	4
Definition relevanter Begriffe	4
Anpassungsfähigkeit	4
Bewältigungsfähigkeit	5
Empfindlichkeit.....	5
Exposition.....	5
Klimawandel	6
Reaktionsvermögen	6
Vulnerabilität.....	6
Analyse regionaler Vulnerabilität im Kontext des Klimawandels.....	8
3 Vulnerabilitätskriterien	10
Definition von Indikatoren	10

Wien, am 20.12.2023

Allgemeine Festlegungen.....	10
Die drei Vulnerabilitätskriterien des ETC-CCA und ETC-SIA Reports.....	10
Eingrenzung des Untersuchungsrahmens	11
Untersuchungsraum	12
Urbane Hitzeinseln (Exposition).....	12
Definition	16
Methodik.....	16
Bevölkerungszahlformel nach Hupfer und Kuttler (2006)	16
Das Oke Modell („Straßenschlucht“)	17
Good Practice Beispiele	20
Wohnorte vulnerabler Personen (Empfindlichkeit).....	25
Definition	26
Vulnerable Personen.....	26
Hochgradige Hitzeinsel	26
Methodik.....	27
Erreichbarkeit durch Notfallrettungsdienste (Reaktionsvermögen)	30
Definition	30
Methodik.....	31
Geschwindigkeit von Rettungswägen mit Blaulicht.....	31
4 Modellentwicklung	33
Definition modelleigener Begrifflichkeiten.....	33
Hitzeintensität	33
Hitzesensibilität.....	33
Hitzevulnerabilität	33
Hochgradige Hitzeinsel	33
Vulnerable Bewohner*innen	33

Datengrundlage.....	34
Exposition.....	34
Empfindlichkeit.....	34
Reaktionsvermögen	35
Legende der Arbeitsprozess-Flussdiagramme	36
Datenaufbereitung	36
Allgemeine Vorkehrungen	36
Ausgangsdaten	38
Support Tools	41
GIP-Netzwerk.....	41
Feature Dataset anlegen	41
Import des GIP-Straßennetzes in das Feature Dataset.....	41
Erstellung des Netzwerks	41
Netzwerk routenfähig machen	42
Sommertage.....	43
Auswahl urbaner Wohngebiete.....	43
Berechnung der durchschnittlichen Sommertageanzahl	43
Hitzevulnerabilitätsschnelltest	44
Wichtige Vorkehrungen	44
Aufbau des Hitzevulnerabilitätsschnelltests	46
Datenvorbereitung.....	47
Hitzeinsel Temperaturen	49
Hitzesensibilität	52
Hitzevulnerabilität.....	54
Hitzeintensität	57
Rettungswagen-Erreichbarkeit.....	58

Inhaltsverzeichnis

5 Ergebnisse	61
6 Diskussion der Ergebnisse.....	68
Limitationen	68
Qualität der Daten.....	68
Technische Grenzen und Probleme	69
Welchen Beitrag kann das Modell für die Raumplanung leisten?	71
Entwicklungspotential.....	74
Fazit.....	76
Quellenverzeichnis.....	77
Literaturquellen.....	78
Datenquellen.....	82
ModelBuilder Modelle	83
GIP Netzwerk.....	83
Sommertage.....	83
Hitzevulnerabilitätsschnelltest	84

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: IPCC Vulnerability framework (EEA 2012b).....	7
Abbildung 2: The concepts of risk and vulnerability in the risk-hazard framework (EEA, 2012b).....	7
Abbildung 3: Regionale Vulnerabilität (Stock, Kropp, Walkenhorst 2009).....	9
Abbildung 4: Entstehung einer urbanen Hitzeinsel (Memon et al. 2008).....	13
Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Straßenschlucht (Nunez und Oke 1977).....	15
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Reflektion kurzweiliger Strahlung im (a) ländlichen und (b) urbanen Raum (Vuckovic 2015).....	16
Abbildung 7: Zusammenhang der maximalen Hitzeinselintensität und dem Höhe - Breite Seitenverhältnis der Straßenschluchten in den Siedlungszentren (Basiert auf den Beobachtungen von 31 Städten in Nordamerika, Europa und Australasien) (International Association for Urban Climate 2023).....	19
Abbildung 8: THIS - Tool for Heat Island Simulation (Pandya 2021).....	21
Abbildung 9: Zusammenfassung der Implementierung des Oke Modells (Nakata-Osaki, Souza, Rodrigues 2018).....	22
Abbildung 10: Delaunay Triangulierung basieren auf den Zentroiden der Baublöcke (Glawischnig 2016).....	23
Abbildung 11: Algorithmus (Glawischnig 2016).....	23
Abbildung 12: Resultat der Seitenverhältnissberechnung (Glawischnig 2016).....	24
Abbildung 13: Sterbewahrscheinlichkeiten nach Alter und Geschlecht (eigene Darstellung).....	28
Abbildung 14: Arbeitsprozess-Flussdiagramm Legende (eigene Darstellung).....	36
Abbildung 15: GIP-Netzwerk Tool, ArcGIS Pro ModelBuilder Programmierung (eigene Darstellung).....	37

Abbildung 16: Sommertage Tool, ArcGIS Pro ModelBuilder Programmierung (eigene Darstellung).....	37
Abbildung 17: Digitales Landschaftsmodell - Bauwerke. Median Höhe der Gebäude (eigene Darstellung)	38
Abbildung 18: Gliederung der österreichischen Gemeinden (eigene Darstellung).....	38
Abbildung 19: Ausschnitt des österreichweiten Verkehrsnetz der GIP (eigene Darstellung).....	39
Abbildung 20: Krankenhäuser innerhalb von Österreich (eigene Darstellung)	39
Abbildung 21: Durchschnittliche Sommertageanzahl, pro Gemeinde, für bewohnte Gebiete (eigene Darstellung).....	40
Abbildung 22: Bevölkerungsraster - Wohnadressen, 250x250 Meter (eigene Darstellung)	40
Abbildung 23: Arbeitsprozess der Erstellung des Erreichbarkeits-Netzwerks (eigene Darstellung).....	41
Abbildung 24: Einstellungen des Reisemodus aus der Vorlage (eigene Darstellung) ...	42
Abbildung 25: Einstellung der Kosten aus der Vorlage (eigene Darstellung).....	42
Abbildung 26: Arbeitsprozess der Sommertage-Berechnung (eigene Darstellung).....	43
Abbildung 27: Einstellungen des Hitzevulnerabilitätsschnelltest (eigene Darstellung) .	44
Abbildung 28: Das Feature Line im Table of Content (eigene Darstellung)	45
Abbildung 29: Übersicht aller notwendigen Schritte des Hitzevulnerabilitätsschnelltests (eigene Darstellung)	46
Abbildung 30: Arbeitsprozess der Datenvorbereitung (eigene Darstellung).....	47
Abbildung 31: Gebäudehöhen innerhalb eines ausgewählten Ortsgebiets (eigene Darstellung).....	47
Abbildung 32: GIP-Straßennetz innerhalb eines ausgewählten Untersuchungsgebiets (eigene Darstellung)	48
Abbildung 33: Auswahl der mit Pkws befahrbaren Straßen, innerhalb des Untersuchungsgebiets (eigene Darstellung)	48

Abbildung 34: Arbeitsprozess der Hitzeinsel-Temperatur-Berechnungen (eigene Darstellung).....	49
Abbildung 35: Winkelberechnung der Near Funktion zwischen Punkt und Line (desktop.arcgis).....	50
Abbildung 36: Straßenseitenzuordnung, Python Code (eigene Darstellung).....	50
Abbildung 37: Oke´s Hitzeinsel Formel (eigene Darstellung).....	51
Abbildung 38: Arbeitsprozess der Hitzesensibilitätsberechnung (eigene Darstellung).	52
Abbildung 39: Hitzesensibilitätsindikator, auf Gebäudeebene, gewichtet nach Alter und Geschlecht (eigene Darstellung).....	53
Abbildung 40: Arbeitsprozess der Hitzesensibilitätsberechnung (eigene Darstellung).	54
Abbildung 41: Python-Funktion mit der festgestellt wird, welche Gebäude sich innerhalb hochgradiger Hitzeinseln befinden (eigene Darstellung)	54
Abbildung 42: Hitzesensibilität, Python Code (eigene Darstellung)	55
Abbildung 43: Python Code innerhalb der Calculate Field Funktion: Bewohner*innen jener Gebäude, die sich in Hitzeinseln befinden, werden als Hitzevulnerabel eingestuft (eigene Darstellung)	56
Abbildung 44: Berechnung der Summe alle vulnerablen Bewohner*innen des Untersuchungsgebiets (eigene Darstellung)	56
Abbildung 45: Berechnung des Anteils vulnerabler Bewohner*innen an der Gesamtbevölkerung (in %)	56
Abbildung 46: Arbeitsprozess der Hitzeintensitätsberechnung (eigene Darstellung) ...	57
Abbildung 47: Beispielhaftes Ergebnis einer Hitzeintensitätsberechnung (eigene Darstellung).....	57
Abbildung 48: Arbeitsprozess der Rettungswagen-Erreichbarkeitsberechnung (eigene Darstellung).....	58
Abbildung 49: Python Code zur Bestimmung der Wohnadressen die innerhalb von 6 Minuten von Rettungswägen erreicht werden können (eigene Abbildung).....	60

Abbildung 50: Berechnung aller vulnerabler Bewohner*innen außerhalb der Erreichbarkeit von Rettungswägen innerhalb der 6 Minuten Hilfsfrist (eigene Darstellung).....	60
Abbildung 51: Ausschnitt der Hitzeinseln im Untersuchungsgebiet Wien Favoriten (eigene Darstellung, Hintergrundkarte von ESRI).....	61
Abbildung 52: Ausschnitt der Hitzeinseln im Untersuchungsgebiet Feldkirch (eigene Darstellung, Hintergrundkarte von ESRI).....	62
Abbildung 53: Ausschnitt der Hitzeinseln im Untersuchungsgebiet Achau (eigene Darstellung, Hintergrundkarte von ESRI).....	62
Abbildung 54: Ausschnitt der Hitzeinsel-Betroffenheit aller Gebäude des Untersuchungsgebiets Wien Favoriten (eigene Darstellung, Hintergrundkarte von ESRI).....	63
Abbildung 55: Ausschnitt der Hitzeinsel-Betroffenheit aller Gebäude des Untersuchungsgebiets Feldkirch (eigene Darstellung, Hintergrundkarte von ESRI).....	64
Abbildung 56: Ausschnitt der Hitzeinsel-Betroffenheit aller Gebäude des Untersuchungsgebiets Achau (eigene Darstellung, Hintergrundkarte von ESRI).....	64
Abbildung 57: Kartenausschnitt der Erreichbarkeit von hochgradigen Hitzeinsel betroffenen Gebäuden in Wien Favoriten, durch Fahrzeuge des Notfallrettungsdienstes, innerhalb der Hilfsfrist von 6 Minuten (eigene Darstellung, Hintergrundkarte von ESRI).....	65
Abbildung 58: Kartenausschnitt der Erreichbarkeit von hochgradigen Hitzeinsel betroffenen Gebäuden in Feldkirch, durch Fahrzeuge des Notfallrettungsdienstes, innerhalb der Hilfsfrist von 6 Minuten (eigene Darstellung, Hintergrundkarte von ESRI).....	66
Abbildung 59: Kartenausschnitt der Erreichbarkeit von hochgradigen Hitzeinsel betroffenen Gebäuden in Achau, durch Fahrzeuge des Notfallrettungsdienstes, innerhalb der Hilfsfrist von 6 Minuten (eigene Darstellung, Hintergrundkarte von ESRI).....	66
Abbildung 60: Analyseergebnisse des Hitzevulnerabilitätsschnelltests für Wien Favoriten (eigene Darstellung).....	67

Abbildung 61: Analyseergebnisse des Hitzevulnerabilitätsschnelltests für Feldkirch (eigene Darstellung)	67
Abbildung 62: Analyseergebnisse des Hitzevulnerabilitätsschnelltests für Achau (eigene Darstellung).....	67
Abbildung 63: Problematische Straßenseitenzuordnung erzeugt fälschlicherweise eine Straßenschlucht (eigene Darstellung).....	69
Abbildung 64: Selbst entwickeltes ArcGIS Pro ModelBuilder Tool "GIP Netzwerk" (eigene Darstellung).....	83
Abbildung 65: Selbst entwickeltes ArcGIS Pro ModelBuilder Tool "Sommertage" (eigene Darstellung).....	83
Abbildung 66: Prozessschritt „Datenaufbereitung“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung).....	84
Abbildung 67: Prozessschritt „Gebäude-Straßen Beziehung“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung).	84
Abbildung 68: Prozessschritt „Durchschnittliche Gebäudehöhe auf beiden Seiten“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)	85
Abbildung 69: Prozessschritt „Berechnung der Straßenschluchten“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung).....	85
Abbildung 70: Prozessschritt „Hitzeinseltemperaturen im Bevölkerungsraster“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung).....	86
Abbildung 71: Prozessschritte „Hitzeinseltemperaturen auf Gebäudeebene“ und „Aufteilung der Bevölkerung auf einzelne Gebäude“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung).....	86
Abbildung 72: Prozessschritt „Umwandlung der Bevölkerungsfelder in den Datentyp Double“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung).....	87

Abbildung 73: Prozessschritt „Berechnung der Hitzesensibilität“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung).	87
Abbildung 74: Prozessschritt „Auswahl der Sommertage für das gewünschte Untersuchungsgebiet“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung).....	88
Abbildung 75: Prozessschritte „Anzahl der Sommertage wird an Hitzesensibilitätstabelle angefügt“ und „Verständlichere Tabellenbezeichnungen werden erstellt“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)	88
Abbildung 76: Prozessschritt „Durchschnittliche Hitzesensibilität auf Bevölkerung gewichtet“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung).....	89
Abbildung 77: Prozessschritt „Berechnung der Hitzeintensität“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung).	89
Abbildung 78: Prozessschritt „Berechnung der Hitzeintensität im Vergleich zum 1. Bezirk Wiens“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung).....	89
Abbildung 79: Prozessschritt „Anteil vulnerabler Bevölkerung“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung).	90
Abbildung 80: Prozessschritt „Erstellung der Gebäudepunkte für die Erreichbarkeitsanalyse“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung).....	90
Abbildung 81: Prozessschritte „Erstellung einer OD Cost Matrix“, „Berechnung der kürzesten Wege der Gebäude innerhalb hochgradiger Hitzeinseln zum nächsten Krankenhaus“ und „Berechnung der Einhaltung der Hilfsfristen für alle Gebäude“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)	91
Abbildung 82: Prozessschritt „Wie viel Prozent der Gebäude innerhalb von hochgradigen Hitzeinseln können von Rettungswägen innerhalb der Hilfsfrist erreicht werden“ des	

selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)	91
Abbildung 83: Prozessschritt „Rettungswagen Erreichbarkeit wird an Hitzesensibilitäts-Tabelle angefügt“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung).....	92
Abbildung 84: Prozessschritt „Reduktion der Nachkommastellen“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung).....	92
Abbildung 85: Prozessschritt „Berechnung der vulnerablen Bevölkerung außerhalb der Hilfsfrist“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung).....	92
Abbildung 86: Gesamtübersicht des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tool "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung).....	93

Abkürzungsverzeichnis

FFG	Die österreichische Förderagentur für wirtschaftsnahe Forschung, Entwicklung und Innovation.
GIS	Geographische Informationssysteme
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
Z.B.	Zum Beispiel
UHI	Urbane Hitzeinseln
u.a.	Unter anderem
SVF	Sky-View-Factor

1 Einleitung

Themenstellung

Durch den Klimawandel steigen die Temperaturen und der Meeresspiegel an, Niederschlagsmuster ändern sich und einige extreme Wetterereignisse treten häufiger auf, wodurch Gefahren wie Hitzewellen, Überschwemmungen und Dürren entstehen. Selbst wenn radikale Klimaschutzmaßnahmen durch die Politik umgesetzt werden, müssen wir in Zukunft mit starken Klimaveränderungen rechnen. Daher sind entsprechende Anpassungen notwendig.⁹

Da der Großteil der österreichischen Bevölkerung in Siedlungen lebt¹⁰, werden städtische Klimawandelanpassungen nicht nur für eine hohe Lebensqualität wichtig sein, sondern auch zur Erhaltung stabiler wirtschaftlicher Verhältnisse und dem Wohlstand innerhalb dieser Gebiete. Klimawandelanpassungen sind ortsgebunden und müssen meistens auf lokaler oder regionaler Ebene geplant und umgesetzt werden.¹¹

Vulnerabilitätsanalysen ermöglichen es die Auswirkungen und damit einhergehenden Risiken des Klimawandels auf regionaler Ebene abzubilden. Man kann sich keine Prognosen, so wie es bei Wettervorhersagen gemacht wird, erwarten, jedoch lassen sich damit alternative Zukunftsszenarien auf deren Folgen hin analysieren.¹²

Eine kartographische Darstellung klimawandelspezifischer Vulnerabilitäten ist für ein praktisch orientiertes Feld, wie es die Vulnerabilitätsanalyse ist, sehr hilfreich, weil dadurch das schwer begreifbare Thema der Vulnerabilität abstrahiert, vereinfacht und visuell nachvollziehbar gemacht werden kann. Besonders hilfreich ist es, wenn Endnutzer*innen aus der Planung ein Modell parat haben, bei dem sie eigene Daten einbringen können, um es an die stetig verändernden Umstände (Klima, Bevölkerung, Infrastruktur, usw..) anzupassen, um auch zukünftig, für ihren spezifischen Planungsraum, aktuelle Ergebnisse zu erhalten.

⁹ Vgl. ETC-CCA and ETC-SIA (2012), S.6

¹⁰ Vgl. Statista.com (2023), online

¹¹ Vgl. ETC-CCA and ETC-SIA (2012), S.6

¹² Vgl. Stock, Kropp, Walkenhorst (2009), S.1

Die Idee zum Thema dieser Arbeit ist durch das FFG-Forschungsprojekt „VESPA“ entstanden.

VESPA

*„Österreichs Städte sind zunehmend mit den Auswirkungen des Klimawandels konfrontiert, der mit einer Gefährdung ihrer baulichen, blauen und grünen Infrastruktursysteme sowie der Lebensqualität ihrer Bevölkerung einhergeht. Daraus ergibt sich für die Städte die dringende Notwendigkeit, sich eingehend mit ihrer Vulnerabilität gegenüber Krisen- und Schockereignissen auseinander zu setzen, um geeignete Planungsstrategien und Steuerungsansätze entwickeln zu können. Effektive Maßnahmen für robustere Infrastrukturen und verbesserte adaptive Kapazitäten erfordern eine umfassende Abschätzung des spezifischen Vulnerabilitätsrisikos einer Stadt. In diesem Zusammenhang entwickelt das Projekt VESPA einen Prototypen, für einen Vulnerabilitäts-Schnelltest für österreichische Städte, der als evidenzbasierte Grundlage für politische Entscheidungsträger*innen und Stadtverwaltungen herangezogen werden kann.*

Ziel ist es dabei, gemeinsam mit Städten offene Fragestellungen in Bezug auf deren Vulnerabilität zu klären, geeignete Indikatoren für einen web-basierten Vulnerabilitäts-City-Check zu definieren und die dafür notwendigen Daten zu identifizieren.“¹³

Forschungsfragen

- Forschungsfrage 1: Welchen Beitrag kann ein GIS-basiertes Modell, für die komplexe Thematik der Hitzevulnerabilität, als Kommunikationswerkzeug für Siedlungsentwicklung zwischen Planung und Entscheidungsträger*innen, leisten?
- Forschungsfrage 2: Welche Limitationen haben technische, datenbasierte Modelle bei der Abbildung hochkomplexer systemischer Wirkungszusammenhänge?
 - Beantwortung anhand meines Modells

¹³ Vgl. Tötzer, (2023), S.1

Hypothesen

- Hypothese 1: Ein GIS-basierter Hitzevulnerabilitätsschnelltest kann dabei helfen, das schwer begreifbare Thema der Hitzevulnerabilität, durch kartographische und rechnerische Ergebnisse, anschaulicher zu machen.
- Hypothese 2: Ein GIS-basierter Hitzevulnerabilitätsschnelltest ermöglicht die Identifizierung von Siedlungsgebieten, die von Hitzevulnerabilität besonders nachteilig betroffen sind.
- Hypothese 3: Ein GIS-basierter Hitzevulnerabilitätsschnelltest hat technische und methodische Grenzen.
- Hypothese 4: Ein GIS-basierter Hitzevulnerabilitätsschnelltest kann die Kommunikation zwischen Planer*innen und Entscheidungsträger*innen verbessern.

Methodik

- Ausführliche Literaturrecherche zu den Themen:
 - Klimawandel
 - Vulnerabilitätsindikatoren
 - Hitzeinsel
 - Erreichbarkeitsanalyse
 - GIS-Analysen
- Datenrecherche auf öffentlich zugänglichen Plattformen:
 - Es sollten möglichst kostenfreie, öffentlich zugängliche und aktuelle Datensätze verwendet werden.
- Entwicklung eines GIS-Tools, mit Hilfe von ArcGIS Pro „ModelBuilder“ (Flussdiagramm-Programmierungswerkzeug).

2 Theoretische Grundlagen

Herausforderung Klimawandelanpassung

Der Bericht des IPCC (2021) über die Entwicklung der Klimasignale und die Folgen des Klimawandels zeigt eine dramatische Dynamik des Klimawandels auf. Er kommt zu dem Schluss, dass der Klimaschutz deutlich ambitionierter verfolgt werden muss und eine wirksame Anpassung an den Klimawandel in allen relevanten Handlungsfeldern notwendig ist.¹⁴

Die Raumplanung wird dabei ihre Rolle als vorausschauende Institution wahrnehmen und Lösungsvorschläge entwickeln müssen, um die negativen Auswirkungen des Klimawandels abzumildern bzw. zu vermeiden.

Bereits im Klimaschutzinstrument „Kyoto-Protokoll“ wurde der Raumplanung als Motor von Anpassungsprozessen an den Klimawandel ein hoher Stellenwert eingeräumt. Dabei wurde der Querschnittscharakter der Raumplanung und ihre Fähigkeit zur Entwicklung integrierter Strategien betont. Im Mittelpunkt standen die Themen Naturgefahren (v.a. Hochwasser) und Belastungen durch Hitzewellen.¹⁵

Definition relevanter Begriffe

Anpassungsfähigkeit

Anpassungskapazität (adaptive capacity) charakterisiert in dieser Diplomarbeit die Fähigkeit eines Systems (z.B. einer Siedlung), sich an die Folgen des Klimawandels anzupassen. Dabei geht es darum, Schäden zu vermeiden, Chancen zu nutzen oder mit den langfristigen Folgen des Klimawandels umzugehen.¹⁶

Anpassungsfähigkeit bezieht sich auf die Fähigkeit, die Auswirkungen des Klimawandels langfristig zu verhindern und/oder zu bewältigen.¹⁷

¹⁴ Vgl. Schindelegger et al. (2021), S.9

¹⁵ Vgl. Hemis (2010), S.90

¹⁶ Vgl. ETC-CCA and ETC-SIA (2012), S.13

¹⁷ Vgl. Omann et al (2010)

Bewältigungsfähigkeit

Bewältigungsfähigkeit (coping capacity) beschreibt in dieser Arbeit die Art und Weise, wie Systeme vorhandene Ressourcen nutzen, um unter ungewöhnlichen und schwierigen Bedingungen (z.B. Katastrophen) Lösungen für ihre Probleme zu finden. Durch solche Prozesse entwickeln Systeme in der Regel eine erhöhte Widerstandsfähigkeit, die den Umgang mit zukünftigen Gefahren erleichtert.¹⁸

Die Bewältigungsfähigkeit bezieht sich auf die aktuelle Fähigkeit, auf die kurzfristigen Auswirkungen eines klimabedingten Extremereignisses zu reagieren.¹⁹

Empfindlichkeit

Die Empfindlichkeit (sensitivity) beschreibt in dieser Diplomarbeit, wie stark ein System (z.B. eine Siedlung) durch klimabedingte Einflüsse negativ oder positiv beeinflusst wird. Sie ist abhängig von biophysikalischen, sozialen oder einer Kombination dieser Faktoren.²⁰

Exposition

Unter Exposition (exposure) wird in dieser Arbeit der Grad, das Ausmaß und die Dauer der Störung eines Systems (z.B. einer Siedlung) durch den Klimawandel verstanden.

Exposition setzt laut IPCC das Vorhandensein von Schutzgütern voraus, die von negativen Auswirkungen betroffen sein können. Schutzgüter können Menschen, Lebensgrundlagen, Arten bzw. Ökosysteme, Umweltfunktionen, -dienstleistungen und -ressourcen, Infrastrukturen oder wirtschaftliche, soziale oder kulturelle Güter sein.²¹

Die Exposition wird nicht nur durch klimatische Faktoren beeinflusst, sondern auch durch morphologische Faktoren (z.B. Topografie die Windgeschwindigkeit und -richtung verändert und damit die Wärmeentwicklung beeinflusst), hydrologische Faktoren (Flusseinzugsbereiche die für Überschwemmungen relevant sind) und menschliche

¹⁸ Vgl. ETC-CCA and ETC-SIA (2012), S.13

¹⁹ Vgl. ETC-CCA and ETC-SIA (2012), S.11

²⁰ Vgl. ETC-CCA and ETC-SIA (2012), S.13

²¹ Vgl. IPCC (2013/2014), S.13

Faktoren (z. B. Bebauung und Bodenversiegelung die Hitze und Überschwemmungen beeinflussen).²²

Klimawandel

Unter Klimawandel oder Klimaänderung wird hier eine Änderung des Klimazustandes über einen längeren Zeitraum verstanden. Dabei ändert sich der Mittelwert und/oder die Schwankungsbreite seiner Eigenschaften. Außerdem wird zwischen natürlichen und anthropogenen Klimaänderungen unterschieden.²³

Reaktionsvermögen

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird unter Reaktionsvermögen die summierte Anpassungs- und Bewältigungsfähigkeit eines Systems im Kontext des Klimawandels verstanden.²⁴

Vulnerabilität

Für den Fachbegriff Vulnerabilität gibt es keine einheitliche Definition. Der Begriff stammt ursprünglich aus der Psychologie. Vulnerabilität ist zu verstehen als Verwundbarkeit oder Verletzbarkeit.

Vulnerabilität ist ein theoretisches Konzept, mit dem versucht wird, ein nicht beobachtbares komplexes Phänomen verständlicher zu machen. Es ist objektorientiert (Risikoelemente), gefährdungsspezifisch (Schadensereignis) und multidimensional (mehrere Einflussfaktoren). Vulnerabilität umfasst auch Handlungskapazitäten in Form von Bewältigungs- und Anpassungsprozessen.²⁵

Nach dem IPCC-Bericht von 2007 lässt sich die Verwundbarkeit eines Systems aus der Funktion seiner **Exposition**, seiner **Empfindlichkeit** und seiner potenziellen **Anpassungskapazität** gegenüber einem Klimasignal ableiten. Das IPCC-Konzept von 2014 fügt eine Risikoperspektive hinzu. Dabei wird zwischen der Vulnerabilität und der Gefahrenkomponente unterschieden, die zusammen das Risiko bestimmen. In dieser

²² Vgl. ETC-CCA and ETC-SIA (2012), S.12

²³ Vgl. ETC-CCA and ETC-SIA (2012), S.13

²⁴ Vgl. ETC-CCA and ETC-SIA (2012), S.11

²⁵ Vgl. Climate Service Center Germany (2013), online

Diplomarbeit basiert das GIS-Modell auf der Vulnerabilitätsdefinition die bereits seit dem IPCC-Bericht von 2007 existiert.

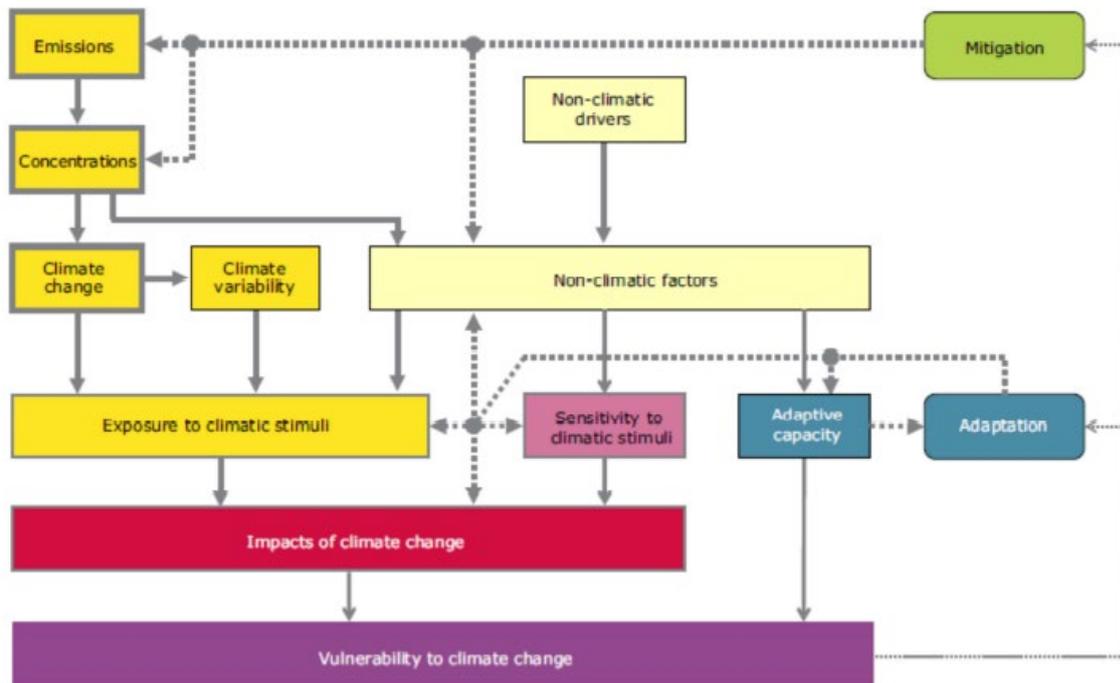


Abbildung 1: IPCC Vulnerability framework (EEA 2012b)

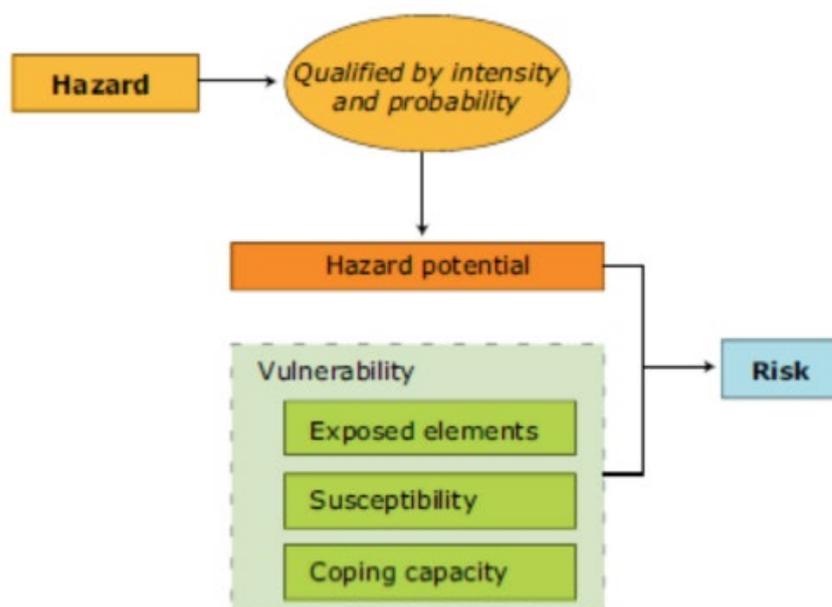


Abbildung 2: The concepts of risk and vulnerability in the risk-hazard framework (EEA, 2012b)

Das IPCC versteht unter Vulnerabilität (Verwundbarkeit) die Neigung oder Prädisposition, nachteilig betroffen zu sein. Vulnerabilität umfasst eine Vielzahl von Konzepten und Elementen. Im Wesentlichen geht es jedoch um die Empfindlichkeit oder

Anfälligkeit gegenüber Schäden (Exposition) und die mangelnde Fähigkeit, mit diesem Problem umzugehen und sich anzupassen (Anpassungsfähigkeit).²⁶

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es bei der Vulnerabilität um die Frage geht, wie empfindlich ein System (z.B. eine Siedlung) auf interne und externe Störereignisse reagiert. Da es jedoch keine allgemeingültige Definition von Vulnerabilität gibt, muss immer damit gerechnet werden, dass die Bedeutung von Vulnerabilität je nach Fachthema variieren kann.²⁷

Unter Vulnerabilität wird in dieser Diplomarbeit die Verwundbarkeit eines räumlichen Mensch-Umwelt-Systems gegenüber den negativen Auswirkungen des Klimawandels verstanden. Im engeren Sinne geht es um die Frage, wie verwundbar / anfällig Siedlungsräume gegenüber sich ändernden klimabedingten Entwicklungen sind. Exemplarisch wird in dieser Arbeit das Phänomen der Hitzeinseln untersucht.

Analyse regionaler Vulnerabilität im Kontext des Klimawandels

Aus planerischer Sicht ist es wichtig, geeignete Vulnerabilitätsanalysen durchzuführen, um die unvermeidbaren Klimaänderungen auch bei Planungsentscheidungen besser berücksichtigen zu können.

Laut Dr. Jochen Hinkel, Senior Researcher beim Global Climate Forum (GCF), ist es am sinnvollsten, Vulnerabilitätsanalysen auf lokaler Ebene durchzuführen, da so die spezifischen räumlichen Gegebenheiten berücksichtigt werden können.

Zivilisatorische Einflüsse verändern die Umweltbedingungen. Diese Einflussfaktoren können mit Hilfe regionaler Indikatoren berücksichtigt werden, sofern sie in Form von Geodaten vorliegen. Regionale Indikatoren können eine Abschätzung der Klimasensitivität auch in Regionen mit unsicheren Klimaszenarien ermöglichen.²⁸

Die Vulnerabilität einer Region (klimasensitives System) wird bestimmt durch die regionale Klimaänderung (Klimastimulus), deren Ausmaß, die Sensitivität

²⁶ Vgl. IPCC (2013/2014), S.13

²⁷ Vgl. Climate Service Center Germany (2013), online

²⁸ Vgl. Stock, Kropp, Walkenhorst (2009), S.98

(Empfindlichkeit gegenüber dem Klimastimulus) der Region gegenüber dieser Änderung und ihre Anpassungsfähigkeit (zivilisatorische Einflüsse).²⁹

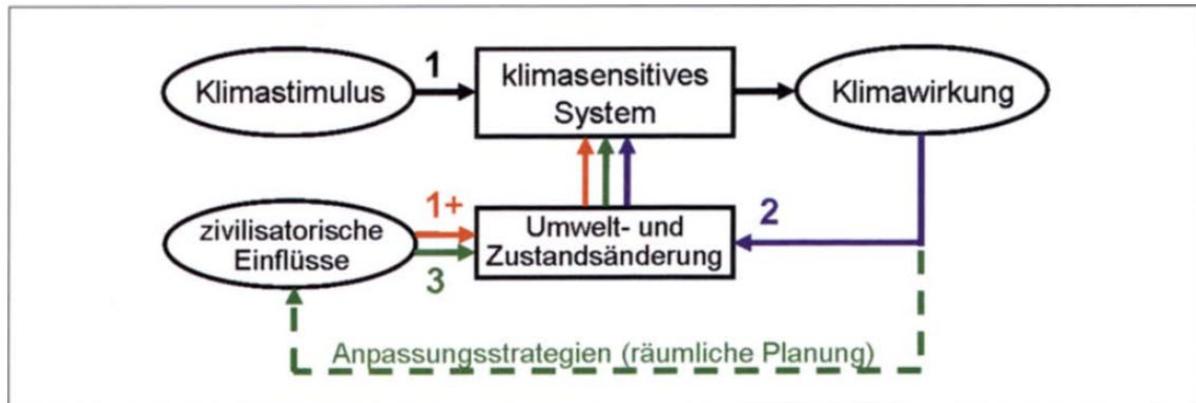


Abbildung 3: Regionale Vulnerabilität (Stock, Kropp, Walkenhorst 2009)

„1) Die Klimaänderung ist ein Stimulus zur Zustandsänderung des Systems = Klimawirkung. 1+) parallel wirken zivilisatorische Umwelt- und Zustandsänderungen, z. B. Landnutzungsänderungen. 2) Rückwirkungen von Klimawirkungen auf die Umwelt oder interne Systemparameter ergeben sekundäre Klimawirkungen. 3) proaktive Anpassung an zukünftig erwartete Klimawirkungen, z.B. in der räumlichen Planung.“³⁰

²⁹ Vgl. Stock, Kropp, Walkenhorst (2009), S.98

³⁰ Vgl. Stock, Kropp, Walkenhorst (2009), S.98

3 Vulnerabilitätskriterien

Definition von Indikatoren

Um Wirkungen messbar und die Erreichung von Wirkungszielen nachvollziehbar zu machen, müssen diese durch objektiv messbare Größen konkretisiert werden. Diese objektiv messbare Größe wird als Indikator bezeichnet. Die Auswahl der Indikatoren ist entscheidend für die Aussagekraft der Messung.³¹

Laut der europäischen Kommission sollte ein guter Indikator **SMART** sein.

Specific: die Indikatoren sollen eindeutige und präzise definiert werden.

Measurable: die Indikatoren sollen messbar sein.

Available: die Indikatoren sollen innerhalb akzeptabler Kosten verfügbar sein.

Relevant: die Indikatoren sollen für den Informationsbedarf des Nutzers relevant sein.

Time-bound: die Indikatoren müssen vorgeben, wann das Ziel erreicht wird.³²

Allgemeine Festlegungen

Die drei Vulnerabilitätskriterien des ETC-CCA und ETC-SIA Reports

Unter **Exposition** wird der Grad, das Ausmaß und die Dauer der Beeinträchtigung eines Systems (z.B. einer Siedlung) durch den Klimawandel verstanden. Dabei geht es um den negativen Einfluss auf bestehende Güter, Dienstleistungen, Ressourcen und Infrastrukturen. Diese sind je nach Thema sehr unterschiedlich.³³

Der Report der ETC-CCA and ETC-SIA (2012) geht davon aus, dass neben

- klimatischen Treibern auch
- hydrologische und morphologische Faktoren,

³¹ Vgl. Zewo (2023), online

³² Vgl. Europäische Kommission (2004), 81

³³ Vgl. IEA (2022), online

- sowie menschliche Faktoren (z.B. Versiegelung) berücksichtigt werden müssen.

34

Für die **Empfindlichkeit** (Sensitivity) eines Systems schlägt der Report der ETC-CCA and ETC-SIA (2012) eine Unterscheidung nach

- Bevölkerung,
- wirtschaftsrelevanten Anlagen in der Siedlung und
- Abhängigkeiten von externen Dienstleistungen (kritische Infrastruktur) vor.³⁵

Als drittes Merkmal schlägt der Bericht von ETC-CCA und ETC-SIA (2012) das **Reaktionsvermögen** (Response capacity) vor. Dabei wird die kurzfristige Bewältigungskapazität mit der langfristigen Anpassungskapazität kombiniert.³⁶

Eingrenzung des Untersuchungsrahmens

Für den Hitzevulnerabilitätsschnelltest dieser Diplomarbeit werden bauliche (Gebäudehöhen und -abstände), demographische (Altersstruktur und Geschlecht), meteorologische (Sommertage) und infrastrukturelle (Hilfsfristen) Indikatoren verwendet.

Da es sich um die Analyse eines nahezu unendlich komplexen Systems handelt, könnten nahezu beliebig viele weitere Indikatoren in das Modell integriert werden. Dies würde jedoch nicht nur den Rahmen dieser Diplomarbeit sprengen, sondern auch den Rechenaufwand des Hitzevulnerabilitätsschnelltest ungebremst in die Höhe treiben, damit seine Anwendungsgeschwindigkeit zunehmend verlangsamen und letztlich seinen praktischen Nutzen mindern.

Aus diesem Grund wurden auf Basis der Rechercheergebnisse nur jene Indikatoren berücksichtigt, die für die Entstehung von Hitzevulnerabilität am relevantesten sind und für die eine gute Datenverfügbarkeit gegeben ist.

Im GIS-Modell dieser Diplomarbeit werden alle drei Vulnerabilitätskriterien des ETC-CCA und des ETC-SIA Reports (Exposition, Empfindlichkeit und Reaktionsvermögen) anhand geeigneter Beispiele berücksichtigt.

³⁴ Vgl. ETC-CCA and ETC-SIA (2012), S.6

³⁵ Vgl. ETC-CCA and ETC-SIA (2012), S.6

³⁶ Vgl. ETC-CCA and ETC-SIA (2012), S.13

Untersuchungsraum

Aufgrund der guten Datenlage und des flexiblen Algorithmus des Hitzevulnerabilitätsschnelltest kann jede Gemeinde in Österreich als Untersuchungsgebiet ausgewählt werden.

Urbane Hitzeinseln (Exposition)

Als Beispiel für das Vulnerabilitätskriterium Exposition (siehe ETC-CCA und ETC-SIA Report) wird die Thematik der Hitzeinseln untersucht.

Innerhalb von Ballungsräumen werden Landschaft und Klima stark verändert. Es entstehen städtische Mikroklimata. Empirische Beobachtungen haben gezeigt, dass selbst innerhalb eines kleinen Stadtgebietes, das nur aus wenigen Straßenzügen besteht, Variationen des Mikroklimas möglich sind.

Unterschiedliche städtische Gebiete weisen oft heterogene physische Strukturen auf (Oke 1982). Daher ist innerhalb einer Stadt mit einer hohen Variabilität unterschiedlich ausgeprägter städtischer Hitzeinseln zu rechnen. Dabei können Temperaturunterschiede ($T_s - u$) von bis zu 9°C zwischen städtischen Gebieten und dem Umland auftreten, man spricht hier von urbanen Hitzeinseln (UHI).³⁷

UHI entstehen durch das Zusammenwirken vieler Faktoren. Es gibt kontrollierbare und unkontrollierbare Faktoren. Letztere können weiter in zwei Hauptkategorien unterteilt werden:

- Meteorologische Faktoren (u.a. Wolkendecke, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit)
- Stadtstruktur (u.a. Größe der Stadt, Seitenverhältnis, Bebauungsdichte, Sky-view Faktor, Begrünung, anthropogene Hitzequellen)

³⁷ Vgl. Stadtschreiber (2017), S. 35

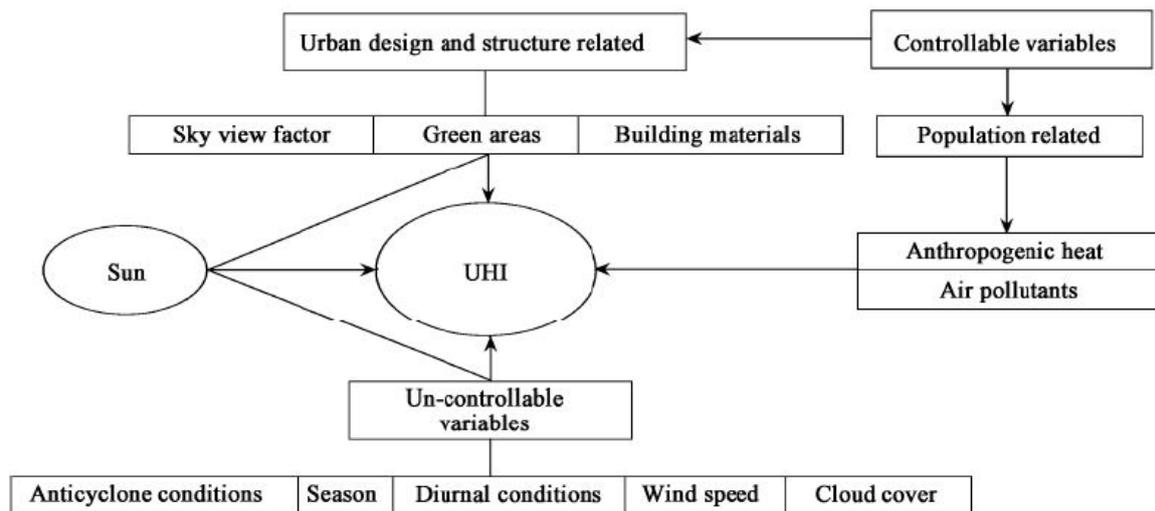


Abbildung 4: Entstehung einer urbanen Hitzeinsel (Memon et al. 2008)

Mögliche Einflussfaktoren sind:

- Die Stadtgeometrie: Sie beeinflusst die lokale Temperatur durch dessen Reflexion, Absorption und Wärmespeicherung beim Prozess des Strahlungsaustausches zwischen Erde und Himmel.³⁸
- Die Bodenversiegelung: Die luft- und wasserundurchlässige Bebauung von Flächen.³⁹
- Grüne Infrastruktur: Diese kann durch ihre kühlende Wirkung die Entstehung und Intensität von städtischen Hitzeinseln verringern.
- Eine höhere Anzahl von Sommertagen: Kann zu einem häufigeren Auftreten von Hitzeinseln führen.⁴⁰

Als Folge des Klimawandels wird die Entstehung von städtischen Hitzeinseln in den nächsten Jahrzehnten zunehmen. Die mittleren Tagestemperaturmaxima werden steigen, während die nächtliche Abkühlung abnimmt. Dabei sind es vor allem die kühleren Nächte, die für die Erholung der Bewohner*innen von großer Bedeutung sind.

³⁸ Vgl. Nakata-Osaki, Souza, Rodrigues (2018), S. 157

³⁹ Vgl. Sung (2014), S.17

⁴⁰ Vgl. Ali-Toudert, Mayer (2006)

Es wird davon ausgegangen, dass sich Städte im Laufe dieses Jahrhunderts um durchschnittlich 2 bis 4 Grad Celsius erwärmen werden. Dabei spielt vor allem die physische Gestalt (Stadtgeometrie) eine zentrale Rolle.⁴¹

Man kann zwischen drei verschiedenen Hitzeinselebenen unterscheiden:

- Bodenhitzeinseln
- Stadthindernisschichthitzeinseln
- Stadtgrenzschichthitzeinseln

Die Bodenhitzeinsel bezieht sich auf die erhöhte Oberflächentemperatur.

Die Stadthindernisschichthitzeinsel (städtische Überdachungsschicht) beschreibt die Temperatur des Luftkörpers zwischen Boden und mittlerer Dachhöhe.

Die Stadtgrenzschichthitzeinsel beschreibt die Überwärmung in einem bis mehreren Kilometern Höhe.⁴²

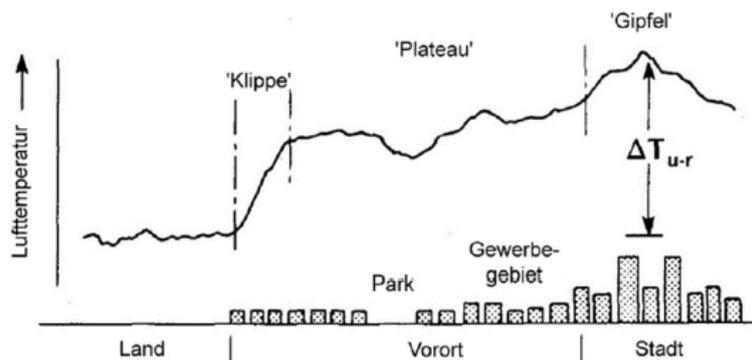


Abbildung 5: Schnitt durch eine urbane Hitzeinsel (Oke 1987)

Diese Diplomarbeit befasst sich speziell mit der Stadthindernisschichthitzeinsel, da dies der Bereich ist, der den größten direkten Einfluss auf die Befindlichkeit der Bewohner*innen hat. Sie halten sich innerhalb dieser Wärmeinsel auf, wenn sie sich außerhalb ihrer Wohnung aufhalten. Darüber hinaus wird die nächtliche Erholungsqualität durch diese Hitzeinselebene am stärksten negativ beeinflusst.

Für die Entstehung von Hitzeinseln dieser Ebene spielen vor allem Straßenschluchten eine entscheidende Rolle.⁴³

⁴¹ Vgl. Stadtschreiber (2017)

⁴² Vgl. Stadtschreiber (2017), S. 35

⁴³ Vgl. Stadtschreiber (2017), S. 32

Straßenschluchten entstehen durch die Kombination verschiedener geometrischer Konfigurationen. Unter Straßenschluchten versteht man im Allgemeinen eine städtebauliche Einheit, die typischerweise aus zwei parallelen Gebäudereihen, einer Straße und dem Luftraum dazwischen besteht. Straßenschluchten weisen im Vergleich zum ländlichen Umland eine wesentlich größere Oberfläche (Straßen, Fassaden, Dächer) auf.⁴⁴

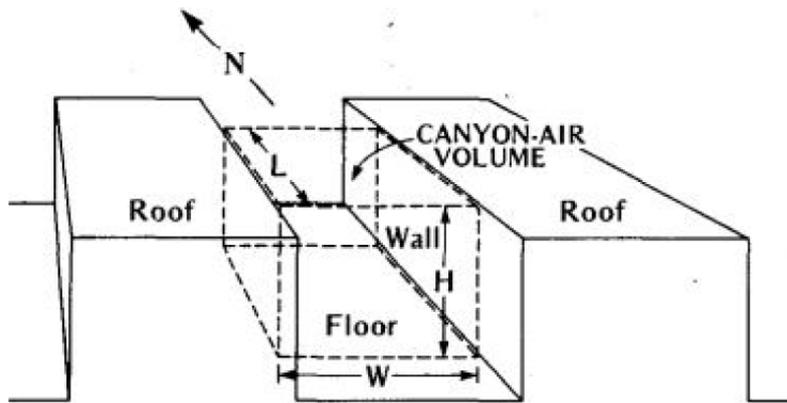


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Straßenschlucht (Nunez und Oke 1977)

Nach Rajagopalan, Lim und Jamei (2014) haben mikroskalige Klimastudien gezeigt, dass die Geometrie der offenen Räume (Stadtgeometrie) der wichtigste Parameter ist, um die Variation des Mikroklimas zu erklären.

Geometrische Variationen der städtischen Umgebung können die Zunahme oder Abnahme der Lufttemperaturwerte, der Windgeschwindigkeit und -richtung und des Strahlungsaustausches beeinflussen.

Je größer das Verhältnis der Gebäudehöhe zur Breite des Straßenraums (H/B -Verhältnis) ist, desto kleiner ist die Fläche des sichtbaren Himmels (SVF - Sky-View-Factor) und desto geringer ist die Abstrahlung langwelliger Strahlung. Darüber hinaus verringert ein größeres H/B Seitenverhältnis die Transportleistung des Windes und erhöht die anthropogene Wärmeproduktion. So nimmt die Abkühlungsrate in städtischen Gebieten mit zunehmender Gebäudehöhe im Verhältnis zur Straßenraumbreite ab.⁴⁵

⁴⁴ Vgl. Vuckovic, M. (2015), S. 18

⁴⁵ Vgl. Oke, T. R. (1987)

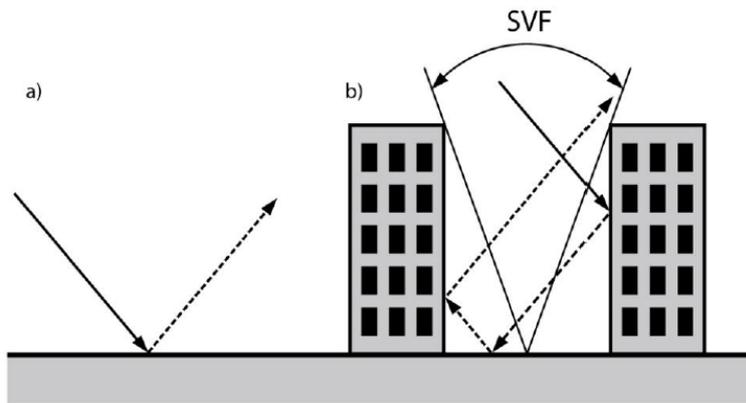


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Reflektion kurzwelliger Strahlung im (a) ländlichen und (b) urbanen Raum (Vuckovic 2015)

Definition

Das Phänomen der städtischen Hitzeinsel wird in dieser Diplomarbeit als erhöhte Temperatur innerhalb einer Stadt im Vergleich zum Umland definiert.⁴⁶

Die Intensität der städtischen Hitzeinsel wird üblicherweise als ΔT_{u-r} oder $\Delta \theta$ dargestellt. Diese beiden Darstellungsformen sind weltweit anerkannt.

Zur Berechnung der Hitzeinselintensität werden in der Regel Wetterdatensätze eines stark verstädterten Gebietes mit denen eines ländlichen Gebietes verglichen.⁴⁷

Methodik

Bevölkerungszahlformel nach Hupfer und Kuttler (2006)

Aufgrund der Komplexität der Berechnung von urbanen Hitzeinseln und der oft unzureichenden Datenlage wird in vielen Studien eine einfache Formel zur Abschätzung der maximalen urbanen Hitzeinsel (UHI_{max}) in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl verwendet. Diese Formel ist für europäische Städte anwendbar und schätzt die maximale Hitzeinsel bei windschwachen Strahlungswetterlagen (Hupfer und Kuttler 2006).⁴⁸

$$UHI_{max} = 2,01 \times \log EW - 4,06$$

⁴⁶ Vgl. Nakata-Osaki, Souza, Rodrigues (2018), S. 157

⁴⁷ Vgl. Vuckovic, M. (2015), S. 11

⁴⁸ Vgl. Stadtschreiber (2017), S. 37

Für die Stadt Feldkirch in Vorarlberg mit einer Bevölkerungszahl von ca. 35.000 Einwohner*innen ergibt das eine maximale urbane Hitzeinselintensität von ca. 5° Celsius und für Wien mit ca. 1,9 Mio. Einwohner*innen wird eine maximale urbane Hitzeinselintensität von 8,5° Celsius geschätzt.

Für den Untersuchungsgegenstand dieser Diplomarbeit kann diese Formel jedoch nur als erster Anhaltspunkt herangezogen werden, da nicht nur das maximale Hitzeinselpotenzial einer Stadt, sondern konkret lokalisierbare Hitzeinseln gesucht werden. Dazu ist ein komplexes räumliches Simulationsmodell erforderlich.

Das Oke Modell („Straßenschlucht“)

In jüngster Zeit werden in der stadtklimatologischen Forschung drei verschiedene Arten von Modellen verwendet. Numerische, physikalische und empirische Modelle.⁴⁹

- Numerische Modelle können normalerweise für jede Stadt und jede Simulation unter verschiedenen Bedingungen entwickelt werden. Sie müssen jedoch vor ihrer Verwendung validiert werden.
- Physikalische Modelle tragen in der Regel zum Verständnis eines bestimmten Prozesses oder einer Reihe von Bedingungen bei, für die sie explizit entwickelt wurden. Es ist jedoch besonders schwierig, Daten über die thermische Masse in der geeigneten Skalierung zu erhalten.
- Empirische Modelle können aufgrund der Ähnlichkeit der Bedingungen, unter denen sie entwickelt wurden, eine hohe Vorhersagekraft haben. Sie erlauben jedoch nur Simulationen unter den spezifischen gemessenen Bedingungen, für die sie entwickelt wurden.

Aufgrund der Skalierungsprobleme physikalischer Modelle und der Notwendigkeit von Langzeitmessungen empirischer Modelle werden überwiegend numerische Modelle verwendet.⁵⁰

Ein etabliertes numerisches Modell für die Klimaforschung im städtischen Kontext ist das Oke-Modell (1981). Dieses Modell kann den Einfluss der Stadtgeometrie auf den UHI-Effekt isoliert berechnen. Die Berechnung der maximalen städtischen Hitzeinsel

⁴⁹ Vgl. Oke, T. R. (1984)

⁵⁰ Vgl. Nakata-Osaki, Souza, Rodrigues (2018), S. 158

basiert auf dem Zusammenhang zwischen der maximalen städtischen Hitzeinsel ($\Delta T_{s-u(\max)}$) und dem Straßenschluchtverhältnis (H/B - Gebäudehöhe zu Straßenbreite). Auf der Grundlage von 31 Beobachtungen in nordamerikanischen, europäischen und australasiatischen Städten definierte Timothy R. Oke einen funktionalen Zusammenhang zwischen der Intensität der städtischen Hitzeinsel und dem H/B-Verhältnis.

$$\Delta T_{s-u(\max)} = 7.45 + 3.97 \ln(H/B)$$

Die maximale Intensität städtischer Hitzeinseln (UHI_{max}) wird auf der Grundlage städtischer Geometriedaten berechnet. Der geometrische Vergleich von horizontalen und vertikalen städtischen Flächen wird oft als „Straßenschlucht“ bezeichnet. Sie wird in der Regel anhand der durchschnittlichen Gebäudehöhe und der Straßenbreite (H/B-Parameter) gemessen. UHI_{max} steigt mit zunehmendem H/B-Verhältnis.⁵¹

Bei einem großen Seitenverhältnis (hohe Gebäude, enger Straßenraum) spricht man von einer tiefen Straßenschlucht, bei einem kleinen Seitenverhältnis von einer seichten Straßenschlucht. Bei einem Seitenverhältnis von 1 spricht man von einer einheitlichen Straßenschlucht.

Für zwei Gebäude kann das Höhen-Breiten-Verhältnis (H/B) berechnet werden, indem die mittlere Höhe durch den Abstand zwischen den beiden Gebäuden dividiert wird.⁵²

$$\frac{H}{B} = \frac{\frac{H_1 + H_2}{2}}{S_{12}}$$

H1: Erstes Gebäude

H2: Zweites Gebäude

S12: Horizontale Distanz zwischen H1 und H2

Die Berechnung wird für jedes benachbarte Elementpaar einer Gebäudeanordnung durchgeführt. Bei komplexen Geometrien kann dies sehr aufwendig sein.

Um die Berechnung zu vereinfachen, wird in der Regel mit einem mittleren Seitenverhältnis gearbeitet. Dabei wird die mittlere Gebäudehöhe durch die mittlere Straßenraumbreite (Abstand) zwischen den gegenüberliegenden Gebäuden dividiert:

⁵¹ Vgl. Nakata-Osaki, Souza, Rodrigues (2018), S. 157

⁵² Vgl. Vuckovic (2015), S. 19

$$\frac{H}{B} = \frac{\overline{Z}_H}{\overline{B}}$$

\overline{Z}_H : Durchschnittliche Gebäudehöhe

\overline{B} : Durchschnittliche Distanz zwischen Gebäuden⁵³

Um eine Abschätzung der maximalen städtischen Hitzeinsel zu erhalten, die durch die Geometrie erzeugt wird, muss nur das Seitenverhältnis in das Oke-Modell eingefügt werden:

$$\Delta T_{s-u(\max)} = 7.45 + 3.97 \ln(H/B)$$

$\Delta T_{s-u(\max)}$ ist die maximale urbane Hitze Insel. Maximale Stadt Temperatur (s) minus maximaler Umland Temperatur (r).

H: ist die Gebäudehöhe innerhalb der Straßenschlucht

B: ist die Breite der Straße innerhalb der Straßenschlucht

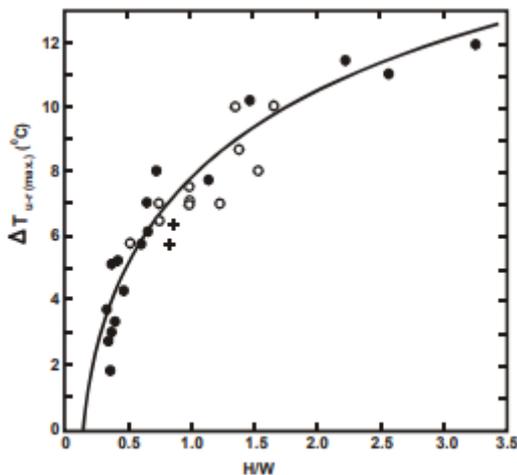


Abbildung 7: Zusammenhang der maximalen Hitzeinselintensität und dem Höhe - Breite Seitenverhältnis der Straßenschluchten in den Siedlungszentren (Basiert auf den Beobachtungen von 31 Städten in Nordamerika, Europa und Australasien) (International Association for Urban Climate 2023)

Das Oke-Modell funktioniert gut in nordamerikanischen und europäischen Städten, da es für diese Klimazonen entwickelt wurde.⁵⁴

Die größten Hitzeinsel-Intensitäten (Temperaturunterschiede) können einige Stunden nach Sonnenuntergang beobachtet werden, da städtische Gebiete langsamer abkühlen

⁵³ Vgl. Vuckovic (2015), S. 18

⁵⁴ Vgl. Nakata-Osaki, Souza, Rodrigues (2018), S. 158

als die umliegenden ländlichen Gebiete.⁵⁵ Man spricht hier vom Temperaturhalteeffekt⁵⁶.

Das theoretisch-numerische Modell von Oke simuliert den Einfluss der Stadtgeometrie auf die maximale nächtliche Wärmebelastung.⁵⁷

Good Practice Beispiele

THIS – Tool for Heat Island Simulation

THIS ist eine ArcGIS 10 Erweiterung, die mit der Programmiersprache Visual Basic entwickelt wurde.

Durch die Bildung von Achsen-, Gebäude- und Blockelementen können die durchschnittlichen H/B-Verhältnisse aller Straßenschluchten im Untersuchungsgebiet berechnet werden. Diese werden schließlich in das numerische Modell von Oke eingesetzt, um die maximalen Wärmeinseltemperaturen für jeden Straßenabschnitt zu berechnen.

Der Benutzer wird um folgende Eingabedaten gebeten:

- Lage der Straßenachsen (Linien),
- Umfänge der Gebäude (Polygone),
- die Gebäudehöhe (Muss in den Objektpolygonen vorhanden sein) und
- der Näherungsradius der Gebäudeachse (Einzelwert).

Der letzte Parameter dient zur Auswahl der Gebäude, die für die Berechnung des H/B-Verhältnisses benötigt werden.

Die ursprüngliche Eingabedatei muss mindestens die Objekte „Linien“ und „Polygone“ enthalten.⁵⁸

⁵⁵ Vgl. Oke, T. R. (1981)

⁵⁶ Vgl. Stadtschreiber (2017), S. 35

⁵⁷ Vgl. Fortuniak (2003)

⁵⁸ Vgl. Nakata-Osaki, Souza, Rodrigues (2018), S. 159

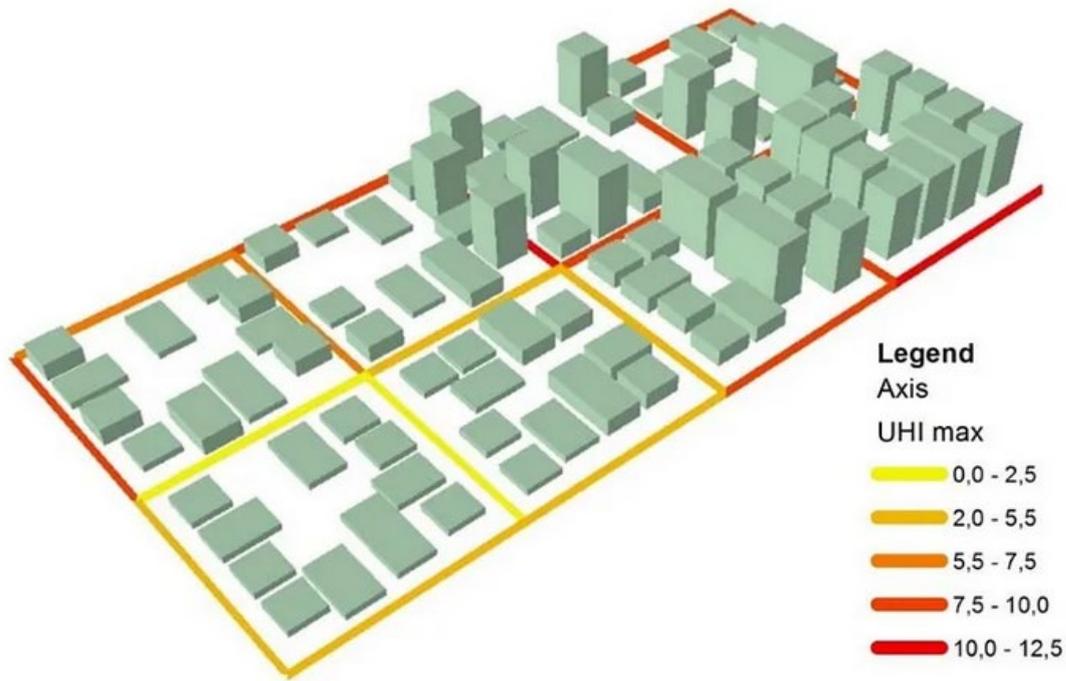


Abbildung 8: THIS - Tool for Heat Island Simulation (Pandya 2021)

Für die Berechnungen mit dem Oke-Modell wurden die Definitionen der Parameter H und B an den THIS-Algorithmus angepasst (siehe unten).

Oke Modell (1981):

$$\Delta T_{u-r(\max)} = 7.45 + 3.97 \ln(H/B)$$

$\Delta T_{u-r(max)}$: ist die maximale Urbane Hitze Insel in Grad Celsius.

H: ist die durchschnittliche Höhe der Gebäude eines Blocks in Metern.

B: ist die durchschnittliche Spurbreite der Straßenschlucht in Metern, gemessen anhand der Gebäude, die sich gegenüberstehen. Dabei werden alle Freiräume inklusive Gehsteige berücksichtigt.

Der für die Berechnungen notwendige räumliche Zusammenschluss findet durch die drei Hauptelemente: Achse, Gebäude und Block statt.

a) Achse-Gebäude: Festlegung eines Näherungsradiuswertes. Es werden alle Gebäude selektiert, die für die Berechnung relevant sind.

b) Gebäude-Block: Die selektierten Gebäude werden zu gemeinsamen Blöcken zusammengefasst. Ein Block wird durch die umgrenzenden Straßenachsen definiert.

c) Block-Achse: Identifizierung der Achse, an der sich die Blöcke berühren, in denen sich die für die Berechnung notwendigen Gebäude befinden. ⁵⁹

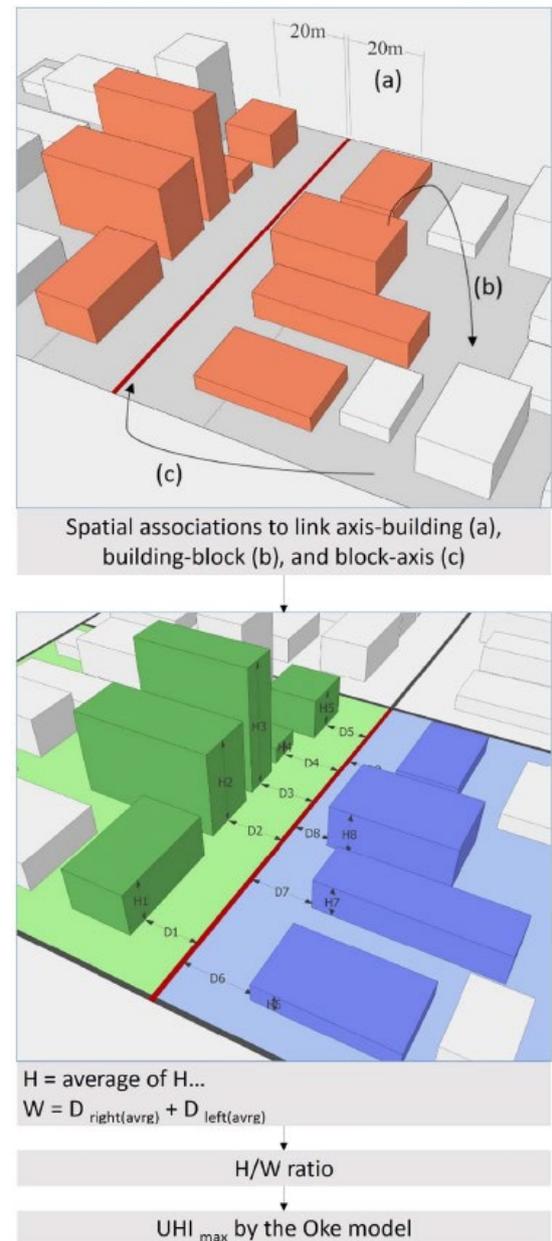


Abbildung 9: Zusammenfassung der Implementierung des Oke Modells (Nakata-Osaki, Souza, Rodrigues 2018)

Da das Simulationsmodell THIS für zwei brasilianische Städte entwickelt wurde, musste die Formel des Oke-Modells, das für das amerikanische und europäische Klima entwickelt wurde, angepasst werden. Diese Anpassungsschritte sind in dieser Diplomarbeit jedoch nicht notwendig, da alle potentiellen Untersuchungsgebiete des GIS-Modells dieser Diplomarbeit in Europa liegen. Daher ist eine nähere Beschreibung der Klimaanpassungsschritte des THIS-Simulationsmodells nicht weiter relevant.

⁵⁹ Vgl. Nakata-Osaki, Souza, Rodrigues (2018), S. 160

Delaunay Triangulierung

Die Delaunay-Triangulation erzeugt ein Polygonnetz aus Dreiecken. Für die Berechnung von Straßenschluchten können die Zentroide der Gebäudeblöcke miteinander verbunden werden. Innerhalb dieser Dreiecke werden die Seitenverhältnisse der Gebäudehöhe zur Straßenbreite (H/B) berechnet. Ein Gebäudeblock ist definiert als eine Gruppe von Gebäuden, die gemeinsam von Straßen umgeben sind. Innerhalb jedes Dreiecks werden die Gebäude definiert, die der Straße zugewandt sind. Für jedes Gebäudepaar wird dann die Breite der Straßenschlucht und die durchschnittliche Höhe der Gebäude berechnet.⁶⁰



Abbildung 10: Delaunay Triangulierung basieren auf den Zentroiden der Baublöcke (Glawischnig 2016)

```

1 Float buildingHeight, canyonWidth;
2 tempBuildingMatrix = list()
3 calculateTIN()
4 for i < getTinList().length do
5   for j < getBuildingBlocks.length do
6     if buildingBlock(j) ∈ getTinList(i) then
7       selectBorderBuildings()
8       updateTempBuildingMatrix()
9       updateBuildingHeight(calculateHeight(mode))
10      updateCanyonWidth(calculateCanyonWidth(mode))
11      removeTriangleFromTinList()
12      setAspectRatio(getTinList(i),  $\frac{getBuildingHeight}{getCanyonWidth}$ )
13     end
14   end
15 end

```

Abbildung 11: Algorithmus (Glawischnig 2016)

⁶⁰ Vgl. Vuckovic, S. 54

Dieses Tool hat gegenüber dem THIS-Modell den Vorteil, dass der Rechenaufwand bei Änderungen der Bebauung geringer ist. Bei Änderungen der Bebauung muss die Berechnung nur für die betroffenen Dreiecke (und nicht für die gesamte Projektfläche) durchgeführt werden, da die aufwendigen Einzelberechnungen erst am Ende des Algorithmus erfolgen.



Abbildung 12: Resultat der Seitenverhältnissberechnung (Glawischnig 2016)

Wohnorte vulnerabler Personen (Empfindlichkeit)

Exemplarisch für das Vulnerabilitätskriterium Empfindlichkeit (siehe ETC-CCA und ETC-SIA Report) wird die Thematik der vulnerablen Personen untersucht.

Auf Basis der Klimadaten der ZAMG ist in Österreich ohne globalen Klimaschutz mit einer Verdoppelung bis Verdreifachung der Hitzetage bis zum Jahr 2100 zu rechnen.

Laut ZAMG gibt es bereits mehrere Studien, die zeigen, dass in Europa deutlich mehr Menschen durch Hitzewellen sterben als durch Stürme, Hochwasser oder andere Wetterextreme.⁶¹

Frau DI Helene Steiner (2015) beschreibt in ihrer Diplomarbeit, dass vor allem ältere Menschen ein erhöhtes Sterberisiko bei Hitzewellen haben. Sie bezieht sich dabei auf die wissenschaftlichen Arbeiten von Baccini et al. (2008) sowie Hajat und Kosatky (2010). Baccini et al. fanden eine erhöhte Sterblichkeit bei Personen über 74 Jahren, Hajat und Kosatky eine erhöhte Sterblichkeit bei Personen über 65 Jahren.⁶²

Die Verschlechterung der Schweißbildung und Schwierigkeiten bei der Thermoregulation sind die wichtigsten physiopathologischen Faktoren, die mit zunehmendem Alter die Hitzeanfälligkeit erhöhen.⁶³

In der wissenschaftlichen Publikation „Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022“ wurde auf der Grundlage der Mortalitätsdatenbank von Eurostat festgestellt, dass im Sommer 2022 die 65- bis 79-Jährigen eine zehnmal höhere Sterbewahrscheinlichkeit als die 0- bis 64-Jährigen und die 80-Jährigen und Älteren eine zehnmal höhere Sterbewahrscheinlichkeit als die 65- bis 79-Jährigen haben. Männer im Alter von 0-64 Jahren hatten eine 41% höhere Sterbewahrscheinlichkeit als Frauen und im Alter von 65-79 Jahren eine 14% höhere Sterbewahrscheinlichkeit als Frauen. Im Alter von 80 Jahren und älter war die Sterbewahrscheinlichkeit der Frauen um 27% höher als die der Männer.⁶⁴

Diese alters- und geschlechtsspezifischen Faktoren werden im GIS-Modell dieser Diplomarbeit durch Gewichtungen berücksichtigt.

⁶¹ Vgl. Tiroler Tageszeitung (2022)

⁶² Vgl. Steiner (2015), S.11

⁶³ Vgl. Staffoglia et al (2006), S.320

⁶⁴ Vgl. Ballester et al (2023)

Auch die Mortalität bei Neugeborenen, Kleinkindern und Schwangeren ist höher als bei jungen Erwachsenen.⁶⁵ Die diesbezügliche Datenlage ist derzeit jedoch so schlecht, dass diese Personengruppen vorerst nicht individuell im Hitzevulnerabilitätsschnelltest berücksichtigt werden. Sollte sich die Datenlage in Zukunft verbessern und diese Personengruppen in einer zukünftigen groß angelegten Mortalitätsstudie berücksichtigt werden, wäre eine Implementierung in das GIS-Modell dieser Arbeit nachträglich leicht möglich.

Definition

Vulnerable Personen

Alle Bewohner*innen mit ihren individuellen hitzebedingten Sterbewahrscheinlichkeiten, die abhängig von Alter und Geschlecht sind, werden in dieser Arbeit als vulnerable Personen verstanden.

Da ältere Menschen eine 10- bis 100-fach höhere hitzebedingte Sterbewahrscheinlichkeit haben als jüngere Menschen, sind die Wohnorte älterer Menschen von besonderer Bedeutung.

Hochgradige Hitzeinsel

Eine besonders hohe gesundheitliche Belastung tritt bei lang anhaltender Hitzebelastung auf. Diese entsteht vor allem dann, wenn heiße Tage mit Tropennächten einhergehen. In diesen Perioden ist die nächtliche Erholung von hohen Tagestemperaturen aufgrund der fehlenden nächtlichen Abkühlung stark eingeschränkt.⁶⁶

Nächte, in denen die Temperatur nicht unter 20 °C fällt, werden als Tropennächte bezeichnet.⁶⁷

In dieser Diplomarbeit werden Straßenabschnitte als Hitzeinseln definiert, wenn die nächtlichen Temperaturen an Sommertagen mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht unter 20 °C fallen.

⁶⁵ Vgl. Luber et al (2014)

⁶⁶ Vgl. Umweltbundesamt Deutschland

⁶⁷ Vgl. Deutscher Wetterdienst

In den Sommermonaten ist es nachts durchschnittlich 10 Grad kühler als tagsüber.⁶⁸ Die von der ZAMG erfassten Sommertage weisen Temperaturen von mindestens 25°C oder mehr auf. Aufgrund der durchschnittlichen nächtlichen Abkühlung von 10° Celsius tritt eine Tropennacht an den kühlestn Sommertagen (25°C) im Mittel erst ab einem Hitzeinseleffekt auf, der die Temperatur um mindestens 5° Celsius ansteigen lässt (25°C - 10°C + 5°C = 20°C).

Daher werden im GIS-Modell dieser Diplomarbeit alle Straßenabschnitte, die einen Hitzeinseleffekt von 5° Celsius oder mehr aufweisen, als hochgradige Hitzeinseln definiert.

Methodik

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde österreichweit mit einem Bevölkerungsraster von 250x250 Metern gearbeitet. Innerhalb jeder Zelle wurden alle Personen mit Hauptwohnsitz innerhalb dieser Fläche, differenziert nach Altersgruppen, aufsummiert. Um die durchschnittlichen Bewohner*innen pro Gebäude zu erhalten, wurden alle Personen innerhalb jedes Rasters gleichmäßig auf diese verteilt.

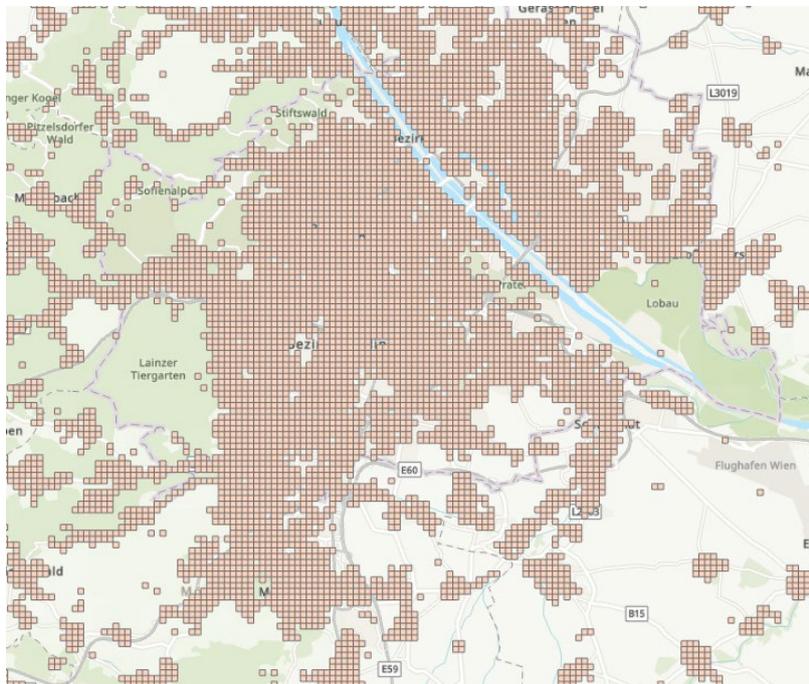


Abbildung 13: 250x250m Bevölkerungsraster, Statistik Austria (eigene Darstellung)

⁶⁸ Vgl. Laenderdaten.info

Basierend auf den Ergebnissen der Publikation "Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022" wurden die Altersklassen 0-64, 65-79 und 80+ in Abhängigkeit von der hitzebedingten Sterbewahrscheinlichkeit unterschiedlich gewichtet.

Resultate der Gewichtungen:

Frauen	Sterbewahrscheinlichkeit	Männer	Sterbewahrscheinlichkeit
0 - 64	0,000013243	0 - 64	0,000018672
65 - 79	0,000149614	65 - 79	0,00017056
80 und mehr	0,001884396	80 und mehr	0,001483772

Abbildung 13: Sterbewahrscheinlichkeiten nach Alter und Geschlecht (eigene Darstellung)

	Frauen	Männer	Geschlechterverhältnis
0 - 64	0,82766	1,167	Männer 41% höher
65 - 79	0,93509	1,066	Männer 14% höher
80 +	1,119	0,8811	Frauen 27% höher

	Frauen	Männer	Altersfaktor
0 - 64	0,82766	1,167	1
65 - 79	9,3509	10,66	10
80 +	111,9	88,11	100

Abbildung 14: Gewichtung der Sterbewahrscheinlichkeiten nach Alter und Geschlecht (eigene Darstellung)

Die Vulnerabilität gegenüber Hitze nimmt mit der Anzahl der Hitzetage (30°C und mehr) zu. Um diese lokalen Temperaturunterschiede zu berücksichtigen, wird im Hitzevulnerabilitätsschnelltest die Anzahl der Sommertage für jede Gemeinde individuell berechnet, basierend auf den Ergebnissen der durchschnittlichen Sommertage der Jahre 1971-2000 (österreichweit).

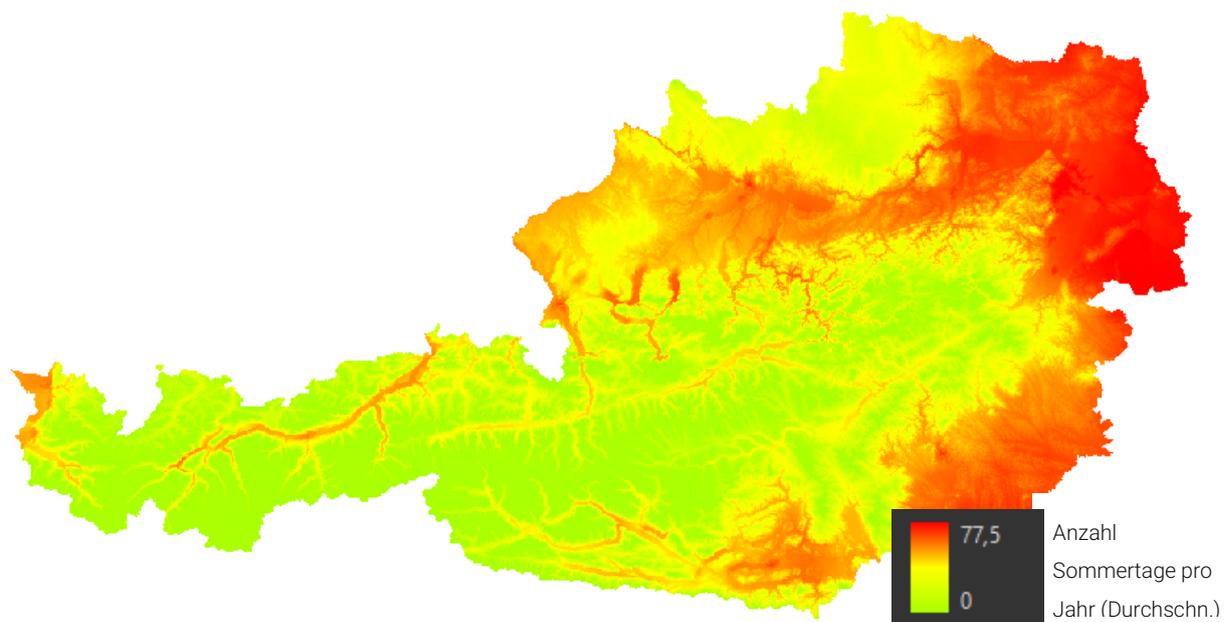


Abbildung 15: Durchschnittliche Sommertage Anzahl in den Jahren 1971-2000, ZAMG (eigene Darstellung)

Erreichbarkeit durch Notfallrettungsdienste (Reaktionsvermögen)

Exemplarisch für das Vulnerabilitätskriterium Reaktionsvermögen (siehe ETC-CCA und ETC-SIA Report) wird die Thematik der Erreichbarkeit durch Notfallrettungsdienste untersucht.

Eine kurze Hilfsfrist des Rettungsdienstes soll ein schnelles Erreichen des Notfallortes gewährleisten und damit die gesundheitlichen Schäden für die Betroffenen möglichst gering halten. Sie liegt in Europa zwischen 10 und 20 Minuten. Das Österreichische Rote Kreuz empfiehlt folgende Definition der Hilfsfrist: *"Jeder an einer öffentlichen Straße gelegene Notfallort soll in der Regel (95% aller Fälle) innerhalb der festgelegten Hilfsfrist von 15 Minuten (Zeitraum vom Eingang der Notfallmeldung in der zuständigen Rettungsleitstelle bis zum Eintreffen des Rettungsmittels am Notfallort) erreicht werden."*⁶⁹

Definition

Für den Begriff Erreichbarkeit wird in dieser Diplomarbeit die Definition von Gather, Kagermeier und Lanzendorf (2008) verwendet. Sie definieren den Einzugsbereich als potenzielles Ziel, das innerhalb bestimmter Reisezeit oder mit einem begrenzten Kostenaufwand erreicht werden kann.⁷⁰

Da in dieser Arbeit eine gesundheitliche Notfallsituation simuliert wird, ist für die Erreichbarkeitsanalyse die Nähe zu Krankenhäusern und die damit verbundene Hilfsfrist des Rettungsdienstes von primärem Interesse. In der Erreichbarkeitsanalyse dieser Diplomarbeit wird von einer besonders kurzen Hilfsfrist (8 Minuten) ausgegangen, da es um die Vermeidung von Hitzebelastungen mit tödlichem Ausgang geht. Bereits nach 5 Minuten kommt es bei einem Herz-Kreislauf-Stillstand zum irreversiblen Absterben von Gehirnzellen. Die notfallmedizinische Empfehlung liegt daher in der Regel bei einer Hilfsfrist von 8 Minuten.⁷¹

⁶⁹ Vgl. Rotes Kreuz (2014), S. 7

⁷⁰ Vgl. Kagermeister, Gather, Lanzendorf (2008)

⁷¹ Vgl. Schehadat, Groneberg, Bauer, et al., S. 256

Aus diesen beiden Festlegungen wurde die Leitfrage für das Vulnerabilitätskriterium Reaktionsvermögen formuliert: „Wie viel Prozent der vulnerablen Personen (Bewohner*innen, die in hochgradigen Hitzeinseln leben) können durch den Rettungsdienst der umliegenden Krankenhäuser innerhalb der Hilfsfrist von 8 Minuten erreicht werden?“.

In der Realität spielen Faktoren wie Wetter, Verkehrslage und Lichtverhältnisse (Tageszeit) eine wesentliche Rolle. Die Berechnung in meiner Diplomarbeit bezieht sich daher auf den optimalen Fall (gutes Wetter ohne Verkehr).⁷²

Methodik

Die Erreichbarkeitsanalyse wird über einen Geoverarbeitungsworkflow in ArcGIS Pro mit Hilfe der visuellen Programmiersprache ModelBuilder durchgeführt. Als Grundlage für die Erreichbarkeitsberechnungen dient das multimodale Verkehrsreferenzsystem Österreich (GIP).

Ziel der Erreichbarkeitsanalyse ist die Ermittlung des Erreichbarkeitsgrades (in %). Der Erreichungsgrad wird definiert als der prozentuelle Anteil der vulnerablen Bewohner*innen (Personen, die in hochgradigen Hitzeinseln wohnen), welche innerhalb der Hilfsfrist (8 Minuten) durch Rettungseinsatzfahrzeuge erreicht werden können.

Die Hilfsfrist setzt sich aus der Erstbearbeitungszeit in der Leitstelle, der Ausrückzeit und der Fahrzeit zusammen.⁷³ Die Planungszeit für die Gesprächs- und Dispositionszeit sowie die Ausrückzeit im Rettungsdienst sollte laut Beratungsstelle *Notrufnoe* zwischen 6:00 und 22:00 Uhr nicht mehr als 2 Minuten betragen.⁷⁴ Daraus ergibt sich eine ideale Fahrzeit von 6 Minuten.

Geschwindigkeit von Rettungswägen mit Blaulicht

Basierend auf einer Auswertung von 4.479 Notfallrettungswagen des Rettungsdienstes Cottbus aus den Jahren 2008 bis 2011 wurde für diese eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 41,3 km/h ermittelt. Ein Pkw fährt auf der gleichen Strecke mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 30,4 km/h. Damit benötigt ein

⁷² Vgl. Seip, Bill, Kinskofer (2015), S. 100

⁷³ Vgl. Schehadat, Groneberg, Bauer, et al., S. 255

⁷⁴ Vgl. Notrufnoe

Notfallrettungswagen im Vergleich zu einem Pkw für die gleiche Strecke nur 74 Prozent der Fahrzeit. Benötigt ein Pkw für eine Strecke beispielsweise 30 Minuten, so kann ein Notfallrettungswagen die gleiche Strecke in ca. 22 Minuten zurücklegen.⁷⁵ Das Erreichbarkeitsnetzwerk basiert auf der Fahrgeschwindigkeit von Personenkraftwagen. Wären für die Analyse nicht Rettungsdienstfahrzeuge, sondern PKWs relevant, so wäre das Ziel der Erreichbarkeitsanalyse zu ermitteln, welche Gebäude innerhalb der idealen Fahrzeit von 6 Minuten (Hilfsfrist minus Gesprächs-, Dispositions- und Ausrückzeit) für eine medizinische Versorgung erreicht werden können. Da in der Erreichbarkeitsanalyse dieser Diplomarbeit jedoch die im Durchschnitt 9,9 km/h schnelleren Rettungsdienstfahrzeuge betrachtet werden, muss nicht eine Fahrzeit von 6 Minuten, sondern von 8 Minuten eingehalten werden, da die Rettungsdienstfahrzeuge für die gleiche Strecke nur ca. 74 % der Zeit benötigen.

⁷⁵ Vgl. Leitstelle Lausitz

4 Modellentwicklung

Definition modelleigener Begrifflichkeiten

Hitzeintensität

Die Hitzeintensität dient als Indikator für die durchschnittliche jährliche Hitzebelastung der Bevölkerung. Diese berechnet sich aus der durchschnittlichen Hitzevulnerabilität einer Bewohner*in multipliziert mit der Anzahl der durchschnittlichen jährlichen Sommertage.

Hitzesensibilität

Die Hitzesensibilität eines Gebäudes berechnet sich aus der Summe der geschlechts- und altersbedingten Hitzesterbewahrscheinlichkeit seiner Bewohner*innen.

Hitzevulnerabilität

Die Hitzevulnerabilität entspricht der Hitzesensibilität aller Gebäude, die sich innerhalb von hochgradigen Hitzeinseln befinden.

Hochgradige Hitzeinsel

In dieser Diplomarbeit werden Straßenabschnitte als Hitzeinseln definiert, wenn die nächtlichen Temperaturen an Sommertagen mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht unter 20°C sinken.

Vulnerable Bewohner*innen

In dieser Diplomarbeit werden nur jene Bewohner*innen als vulnerabel eingestuft deren Wohngebäude sich innerhalb einer hochgradigen Hitzeinsel befindet.

Datengrundlage

Exposition

- Bauwerke: Digitales Landschaftsmodell - Bauwerke Stichtag 25.01.2023, BWK_8100_BAUWERK_F_3035, Online unter: <https://data.bev.gv.at/geonetwork/srv/ger/catalog.search#/metadata/0e36cab1-698a-42a7-b72d-9631d2d7ad28>
Es handelt sich um einen österreichweiten, vollständigen und homogenen Bauwerksbestand in Vektorform. Jedes Polygon besitzt Höheninformationen (Bodenhöhe, mittlere Objekthöhe, maximale Objekthöhe, ...), sowie eine Darstellung der Bauwerke.
- Gemeindegrenzen: Die Gliederung der österreichischen Gemeinden, STATISTIK_AUSTRIA_GEM_20230101, Online unter: https://www.data.gv.at/katalog/dataset/stat_gliederung-osterreichs-in-gemeinden14f53#additional-info
Es handelt sich um einen Datenbestand aller österreichischen Gemeinden in Polygonform.

Empfindlichkeit

- Bevölkerungsdaten (Altersklassen): Österreich - Raster 250m / Bevölkerung (stand 2020), R250_pop2020, Datenquelle: Statistik Austria (Daten vom SRF, für die ausschließliche Verwendung im Rahmen dieser Diplomarbeit, erhalten).
*Es handelt sich um ein österreichweites Raster mit 250x250 Meter großen Rasterzellen, in dem innerhalb jeder Zelle, alle Bewohner*innen die ihren Hauptwohnsitz dort besitzen, nach Altersklassen differenziert, aufsummiert wurden.*
- Hitzebedingte Sterbewahrscheinlichkeiten: Ballester, J., Quijal-Zamorano, M., Méndez Turrubiates, R.F. et al. Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022. *Nat Med* 29, 1857–1866 (2023).
Das Ziel dieser Publikation war es, die hitzebedingte Sterblichkeitsbelastung im Sommer 2022, der heißesten Jahreszeit seit Beginn der Aufzeichnungen in

Europa, zu quantifizieren. Es wurde die Sterblichkeitsdatenbank von Eurostat analysiert, die 45 184 044 Sterbefälle aus 823 zusammenhängenden Regionen, in 35 europäischen Ländern, umfasst. Das entspricht der Gesamtbevölkerung von über 543 Millionen Menschen.

Online unter: <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02419-z>

- Sommertage für ganz Österreich: Summer_Days, Datenquelle: Dieser Klimakarten-Datensatz enthält Rasterfelder zur Beschreibung der durchschnittlichen räumlichen Verteilung von Sommertagen über Österreich für den Zeitraum 1971 bis 2000. Datenquelle: GeoSphere Austria, Online unter: <https://data.hub.geosphere.at/dataset/klimakarten>

Reaktionsvermögen

- GIP-Straßennetz: *main_GIP_LINKNETZ_OGD*, Intermodales Verkehrsreferenzsystem Österreich (GIP.at) Österreich (Aufbereitet & zur Verfügung gestellt durch den Forschungsbereich SRF der TU Wien), ÖVDAT Straßennetz, Online unter: <https://gip.gv.at/>
Die Graphenintegrations-Plattform GIP bietet ein Verkehrsnetz, welches für diverse Routing Operationen genutzt werden kann. Dieses ist für ganz Österreich und mit unterschiedlichen Verkehrsarten einsetzbar.
- Krankenhäuser innerhalb von Österreich: *Krankenhaeuser_Oesterreich*, Datenquelle: Nachdem es zum Zeitpunkt der Recherche keine vollständigen Punktdaten der Krankenhäuser für ganz Österreich auf OpenData Plattformen und auf OpenStreetMap gab, wurden die Krankenhäuser mit Hilfe von Google Maps manuell digitalisiert.

Legende der Arbeitsprozess-Flussdiagramme



Abbildung 14: Arbeitsprozess-Flussdiagramm Legende (eigene Darstellung)

Datenaufbereitung

Allgemeine Vorkehrungen

- **Geodatenbanken verwenden:** alle Daten werden innerhalb von Geodatenbanken gespeichert, um die Bearbeitung und Datenverwaltung zu optimieren.
- **Projektionen vereinheitlichen:** Die räumlichen Ausgangsdaten werden in das ETRS 1989 LAEA-Koordinatensystem projiziert. Dadurch sind bei der eigentlichen Durchführung aller Modellrechnungen keine weiteren Projektionstransformationen erforderlich, was die Berechnung der Ergebnisse des Hitzetests beschleunigt.
- **Erreichbarkeits-Netzwerk erstellen:** Bevor die Erreichbarkeitsanalysen für die einzelnen Gemeinden durchgeführt werden können, muss ein Netzwerk für das gesamte GIP-Sträßennetz erstellt werden. Um diesen Prozess nicht jedes Mal zu wiederholen, wenn der Hitzevulnerabilitätsschnelltest für ein neues Untersuchungsgebiet durchgeführt wird, wurde ein kleines Tool namens „GIP-Netzwerk“ für die einmalige Erstellung des GIP-Netzwerks entwickelt. Dieses Tool muss nur einmal vor der ersten Anwendung des Hitzevulnerabilitätsschnelltests

ausgeführt werden. Danach können Erreichbarkeitsanalysen für jedes beliebige Untersuchungsgebiet durchgeführt werden.

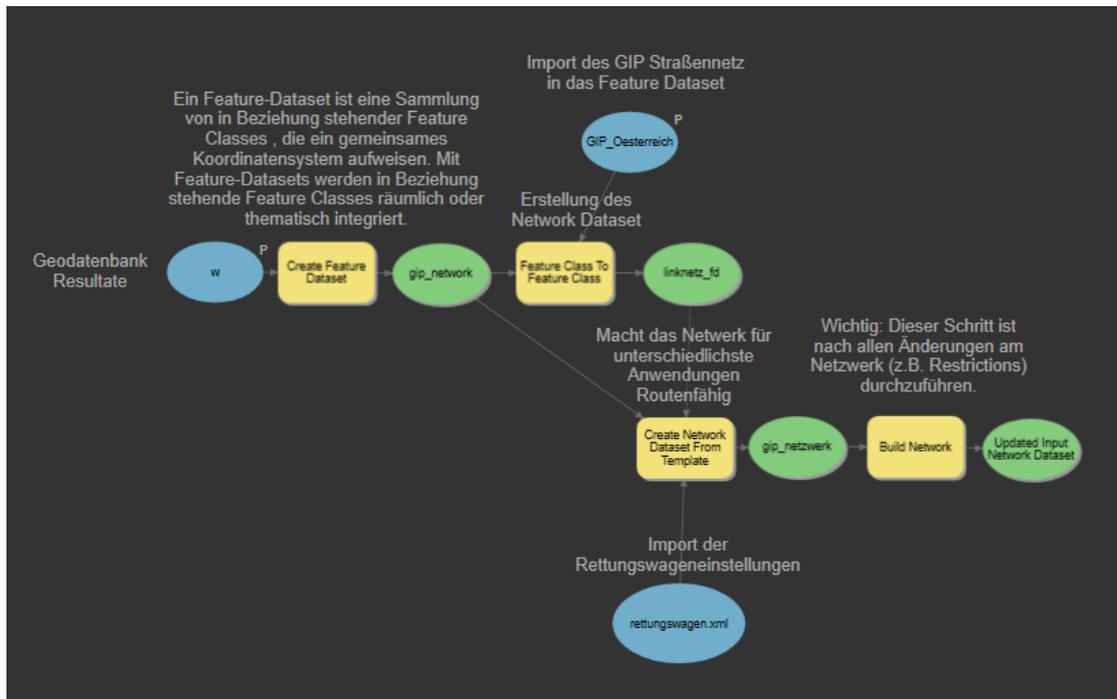


Abbildung 15: GIP-Netzwerk Tool, ArcGIS Pro ModelBuilder Programmierung (eigene Darstellung)

- **Sommertage berechnen:** Diese Berechnung muss ebenso wie die Erstellung des GIP-Netzwerks nur einmal durchgeführt werden. Daher wurde auch für diesen Arbeitsschritt ein eigenes Tool mit dem Namen „Sommertage“ entwickelt. Das Ergebnis wird für die Berechnung der Hitzeintensität des Untersuchungsgebietes verwendet.

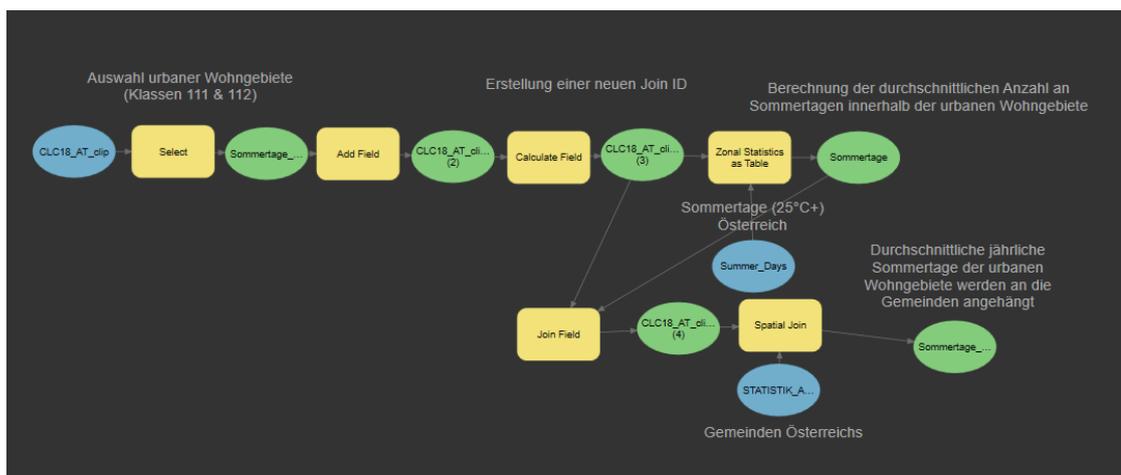


Abbildung 16: Sommertage Tool, ArcGIS Pro ModelBuilder Programmierung (eigene Darstellung)

Ausgangsdaten

Gebäudedatensatz: Als Berechnungsgrundlage für die Straßenschluchten wird ein österreichweiter Gebäudepolygon-Datensatz verwendet, der Informationen über die mediane Gebäudehöhe enthält.

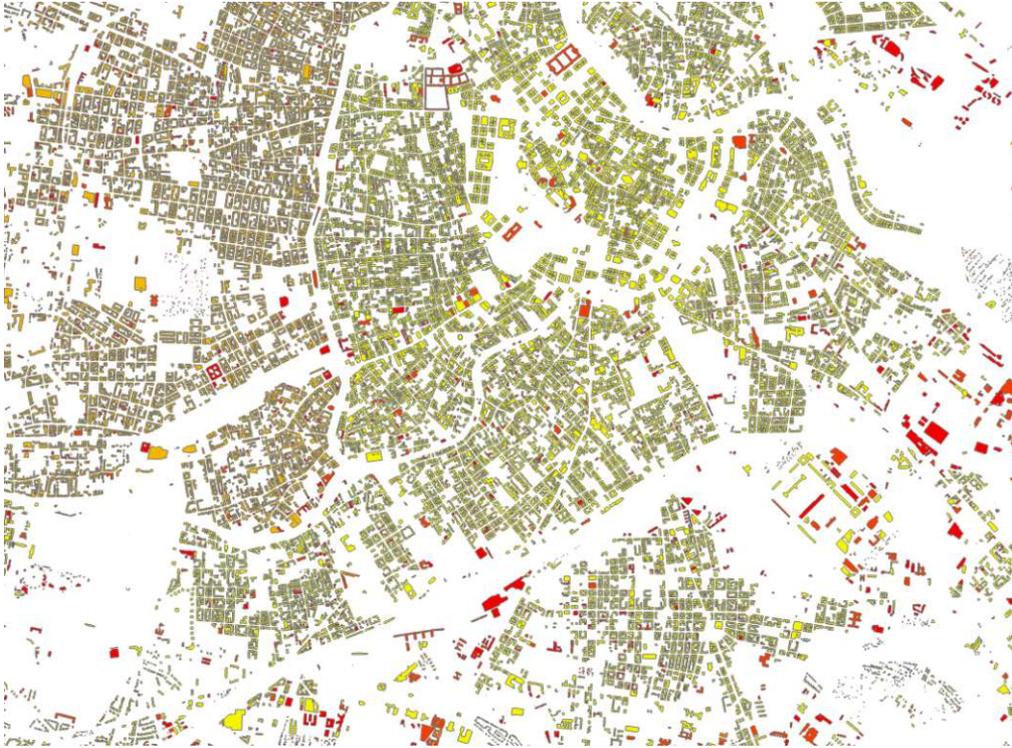


Abbildung 17: Digitales Landschaftsmodell - Bauwerke. Median Höhe der Gebäude (eigene Darstellung)

Gemeindegrenzen: Um die Berechnungen des Hitzevulnerabilitätsschnelltests auf die gewünschte Gemeinde zu beschränken, wird ein Polygondatensatz verwendet, der alle Gemeindegrenzen Österreichs enthält.

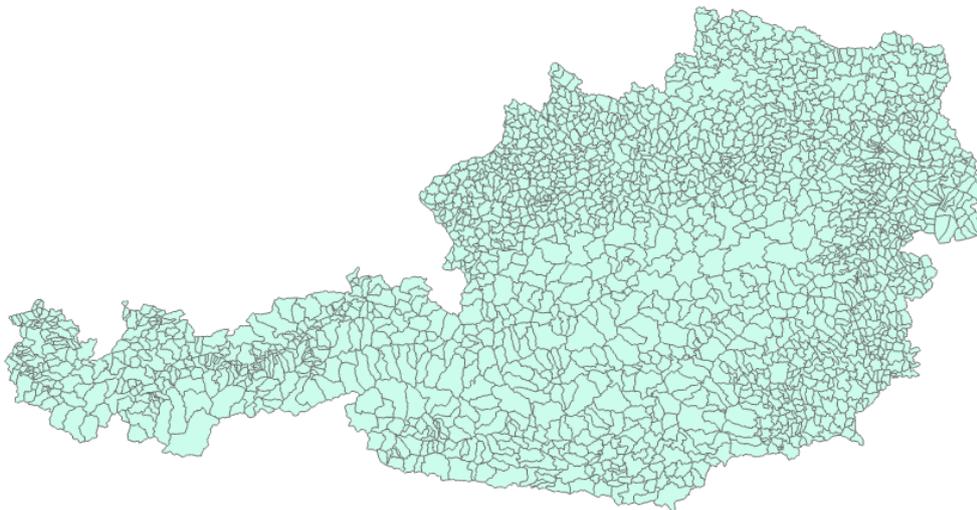


Abbildung 18: Gliederung der österreichischen Gemeinden (eigene Darstellung)

Wien, am 20.12.2023

Straßennetz: Als geographische Grundlage der Hitzeinseln sowie zur Durchführung der Erreichbarkeitsanalysen wird ein österreichweites Straßennetz verwendet.

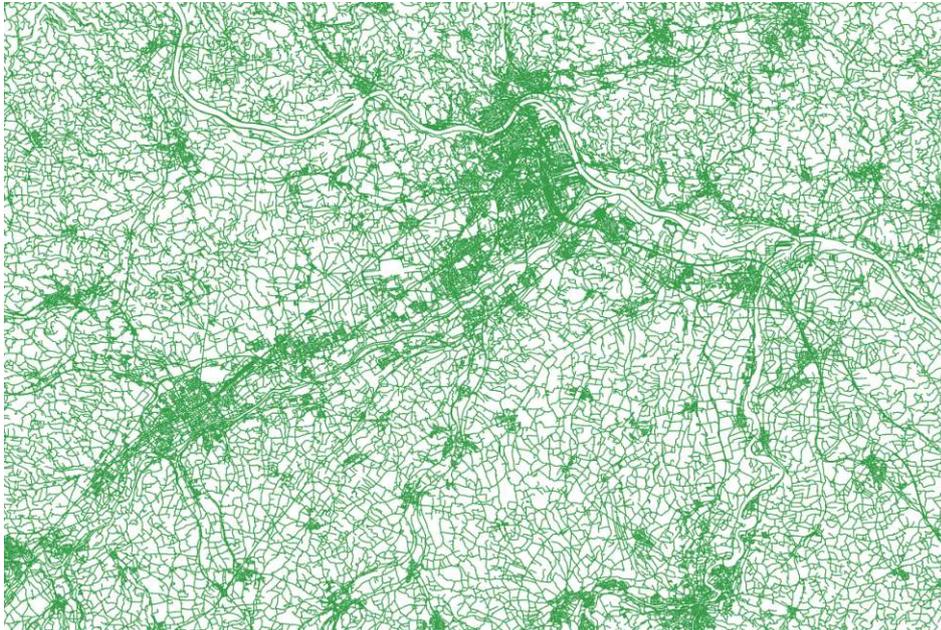


Abbildung 19: Ausschnitt des österreichweiten Verkehrsnetz der GIP (eigene Darstellung)

Krankenhäuserstandorte: Für die Analyse der Erreichbarkeit von Gebäuden in hochgradigen Hitzeinseln durch Fahrzeuge des Rettungsdienstes werden Punktdaten über die Lage aller österreichischen Krankenhäuser verwendet.



Abbildung 20: Krankenhäuser innerhalb von Österreich (eigene Darstellung)

Sommertage: Um die mittlere Anzahl der Sommertage in den besiedelten Gebieten pro Gemeinde zu erhalten, muss der Klimakartendatensatz (Raster der Sommertage der Jahre 1971-2000) mit dem Corine Landcover-Datensatz (Vektor) verschnitten werden. In einem letzten Schritt werden die Ergebnisse mit den Gemeindepolygonen verknüpft.

Wien, am 20.12.2023

Das Ergebnis wird zur Berechnung der Hitzeintensität des Untersuchungsgebietes verwendet.

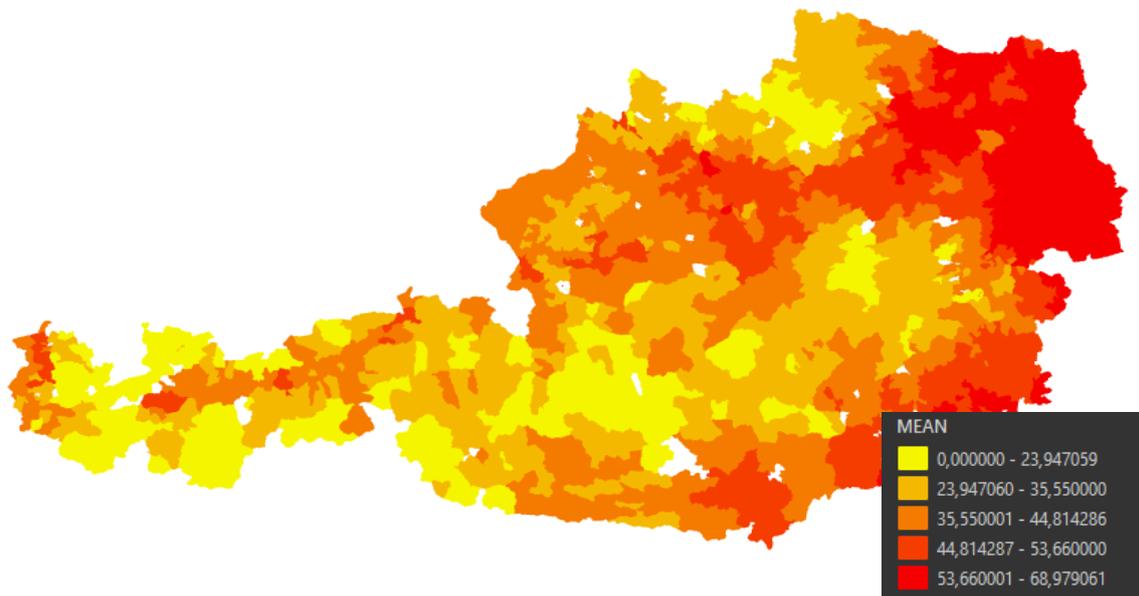


Abbildung 21: Durchschnittliche Sommertageanzahl, pro Gemeinde, für bewohnte Gebiete (eigene Darstellung)

Wohnadressen: Für die Berechnung der Hitzevulnerabilität wird ein österreichweiter Rasterdatensatz von Wohnadressen verwendet. Damit können Abschätzungen zur Anzahl der Personen in Hitzeinseln und zu deren Vulnerabilität (nach Alter und Geschlecht) durchgeführt werden.

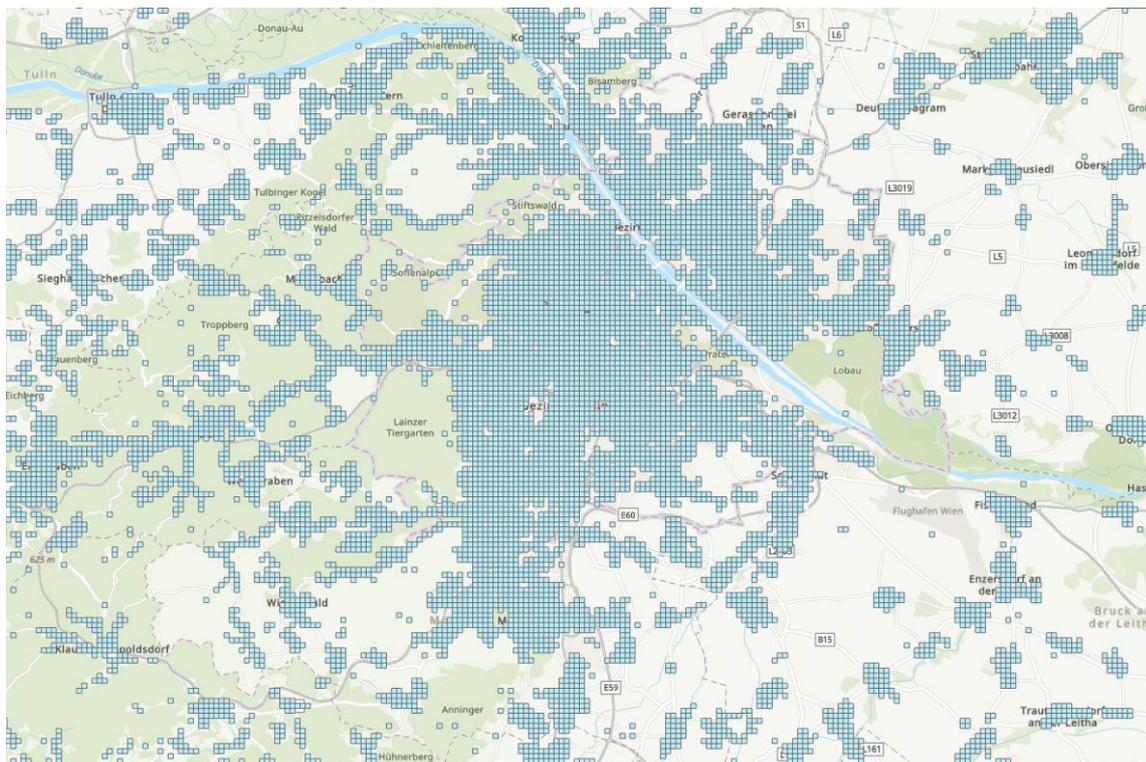


Abbildung 22: Bevölkerungsraster - Wohnadressen, 250x250 Meter (eigene Darstellung)

Wien, am 20.12.2023

Support Tools

GIP-Netzwerk

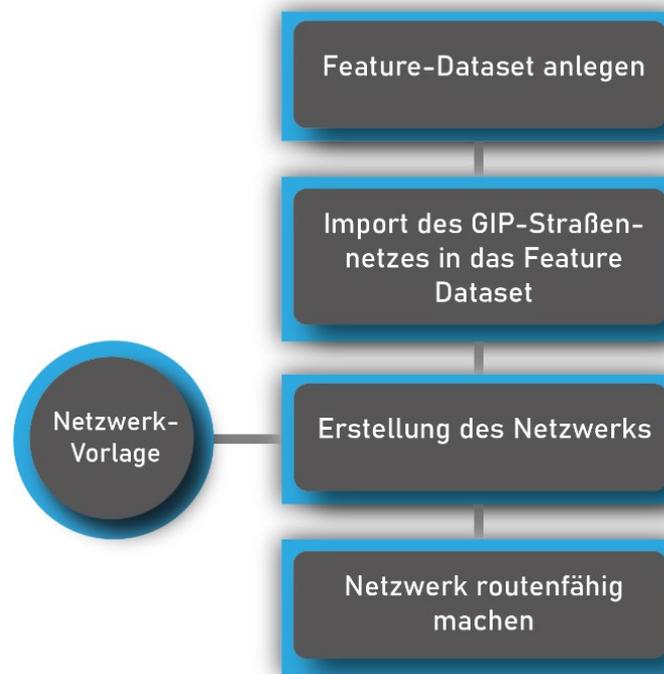


Abbildung 23: Arbeitsprozess der Erstellung des Erreichbarkeits-Netzwerks (eigene Darstellung)

Feature Dataset anlegen

Das Feature Dataset ist der Container für das Erreichbarkeitsnetzwerk. In ihm können verschiedene Feature-Classes mit einem gemeinsamen Koordinatensystem zusammengefasst werden. Mit der Funktion Feature-Datasets werden diese Feature-Classes räumlich oder thematisch miteinander verknüpft.

Import des GIP-Straßennetzes in das Feature Dataset

In einem zweiten Schritt wird das GIP-Straßennetz importiert. Dieses enthält die für die Erreichbarkeitsberechnungen notwendigen Verkehrsdaten.

Erstellung des Netzwerks

Im nächsten Schritt wird mit der Funktion Create Network from Dataset from Template das eigentliche Netzwerk für die Erreichbarkeitsanalysen erstellt. In diesem Schritt wird

auch ein Template für die Berechnung der Erreichbarkeit durch Rettungsfahrzeuge importiert. Dabei wird festgelegt, dass die Fahrzeuge der Erreichbarkeitsanalyse nur auf Straßen fahren dürfen, die für PKW freigegeben sind und dass die Berechnung der Erreichbarkeitsanalyse in Minuten erfolgt. Einbahnstraßenregelungen müssen nicht berücksichtigt werden, da die Einsatzfahrzeuge in Notfallszenarien, in denen es um Leben und Tod geht, nicht auf Einbahnstraßenregelungen Rücksicht nehmen müssen.⁷⁶

Edges			
	linknetz_fd (Along)	Field Script	$[\text{Shape_Length}] / ([\text{SPEEDCAR_T}] * 1000/60)$
	linknetz_fd (Against)	Field Script	$[\text{Shape_Length}] / ([\text{SPEEDCAR_B}] * 1000/60)$

Abbildung 24: Einstellungen des Reisemodus aus der Vorlage (eigene Darstellung)

Costs

Impedance

Length meters ▾

Time Cost

Time_Minutes minutes ▾

Distance Cost

Length meters ▾

Abbildung 25: Einstellung der Kosten aus der Vorlage (eigene Darstellung)

Netzwerk routenfähig machen

Zuletzt wird das Netzwerk routenfähig gemacht. Dabei werden alle Netzparameter festgelegt. Dieser Schritt muss bei jeder Änderung des Netzes wiederholt werden.

⁷⁶ Vgl. Jusline.at

Sommertage

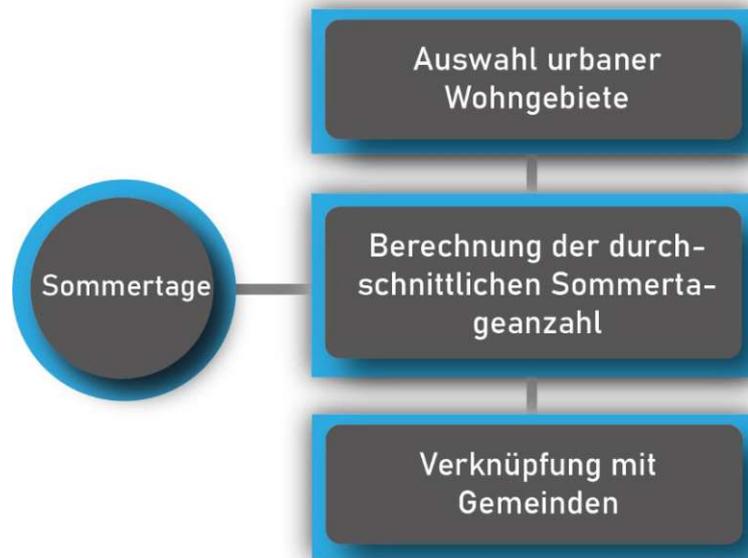


Abbildung 26: Arbeitsprozess der Sommertage-Berechnung (eigene Darstellung)

Auswahl urbaner Wohngebiete

Aus dem CORINE Landcover 2018 Polygonfeature-Datensatz für Österreich werden die Siedlungsflächen (Klassen 111 & 112) mit der Select-Funktion ausgewählt.

Berechnung der durchschnittlichen Sommertageanzahl

Anschließend wird für diese städtischen Siedlungsgebiete die mittlere Anzahl der Sommertage mit der Funktion Zonal Statistics as Table berechnet. Als Datengrundlage werden die Sommertage der Jahre 1971-2000 (österreichweit) der ZAMG verwendet.

Verknüpfung mit Gemeinden

Schließlich werden die mittleren jährlichen Sommertage der städtischen Wohngebiete mit Hilfe der Spatial Join Funktion den Gemeinden zugeordnet.

Hitzevulnerabilitätsschnelltest

Wichtige Vorkehrungen

- In den ArcGIS Pro Tools „Hitzevulnerabilitätsschnelltest“, „GIP Netzwerk“ und „Sommertage“ müssen alle Verknüpfungen mit den Ausgangsdaten hergestellt werden.
- Der nächste Schritt ist die Erstellung einer Geodatenbank für die Zwischenergebnisse und einer Geodatenbank für die Endergebnisse.
 - Alle Daten werden in Geodatenbanken gespeichert, um die Bearbeitung und Datenverwaltung zu optimieren.
 - In allen ArcGIS Pro Tools müssen die Verknüpfungen zu den Geodatenbankpfaden (Zwischenergebnisse & Endergebnisse) hergestellt werden.
- Das „Sommertage“ Tool und das „GIP Netzwerk“ Tool müssen zuerst ausgeführt werden (aber nur einmal).
- Zuletzt muss nur noch das Untersuchungsgebiet ausgewählt werden und die Analyse kann durchgeführt werden.

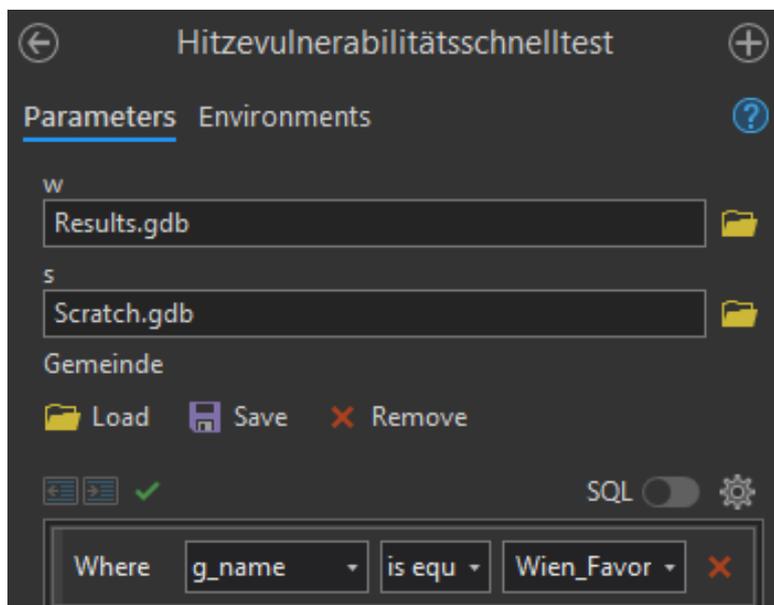


Abbildung 27: Einstellungen des Hitzevulnerabilitätsschnelltest (eigene Darstellung)

- Vor der Durchführung des Hitzevulnerabilitätsschnelltests für ein neues Untersuchungsgebiet muss das Feature „Lines“ aus dem Table of Content gelöscht werden. Andernfalls werden die Ergebnisse der Erreichbarkeit des

ersten durchgeführten Tests verwendet. Dies ist eine technische Einschränkung von ArcGIS ModelBuilder, die hoffentlich in naher Zukunft behoben wird.

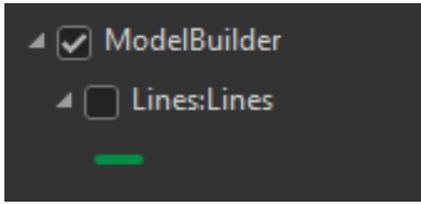


Abbildung 28: Das Feature Line im Table of Content (eigene Darstellung)

Aufbau des Hitzevulnerabilitätsschnelltests

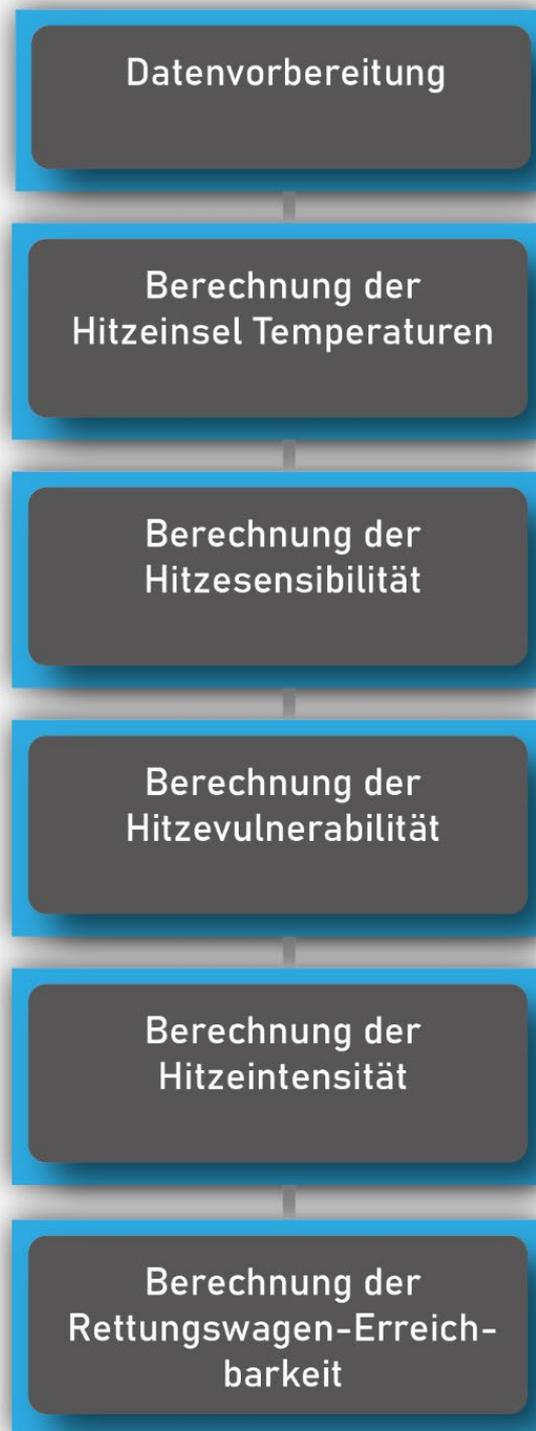


Abbildung 29: Übersicht aller notwendigen Schritte des Hitzevulnerabilitätsschnelltests (eigene Darstellung)

Datenvorbereitung

Um weitere Berechnungen durchführen zu können, müssen die Ausgangsdaten entsprechend aufbereitet werden.

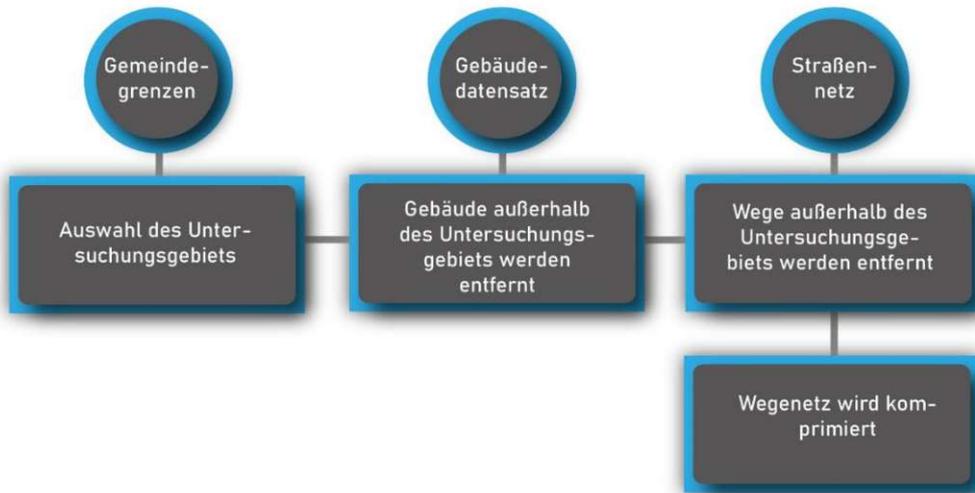


Abbildung 30: Arbeitsprozess der Datenvorbereitung (eigene Darstellung)

1. **Auswahl des Untersuchungsgebiets:** Zuerst muss eine Gemeinde als Untersuchungsgebiet mit Hilfe der „Select“ Funktion ausgewählt werden.
2. **Gebäude außerhalb des Untersuchungsgebiets werden entfernt:** Die Gebäude des digitalen Landschaftsmodells werden mit Hilfe der Funktion „Pairwise Intersect“ auf die Gebäude reduziert, die sich innerhalb der ausgewählten Gemeindegrenzen befinden.

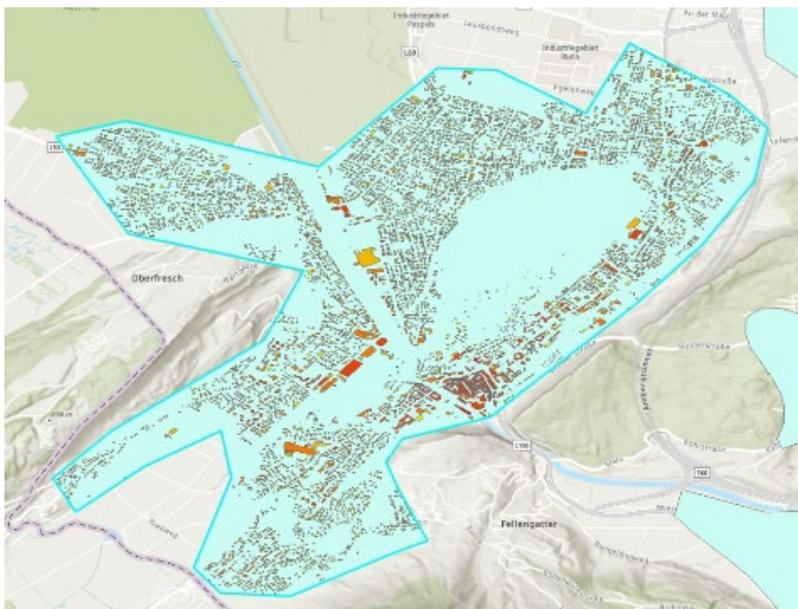


Abbildung 31: Gebäudehöhen innerhalb eines ausgewählten Ortsgebiets (eigene Darstellung)

Hitzeinsel Temperaturen

Das Phänomen der städtischen Hitzeinsel wird in dieser Diplomarbeit als erhöhte Temperatur innerhalb einer Stadt im Vergleich zum Umland definiert.⁷⁷

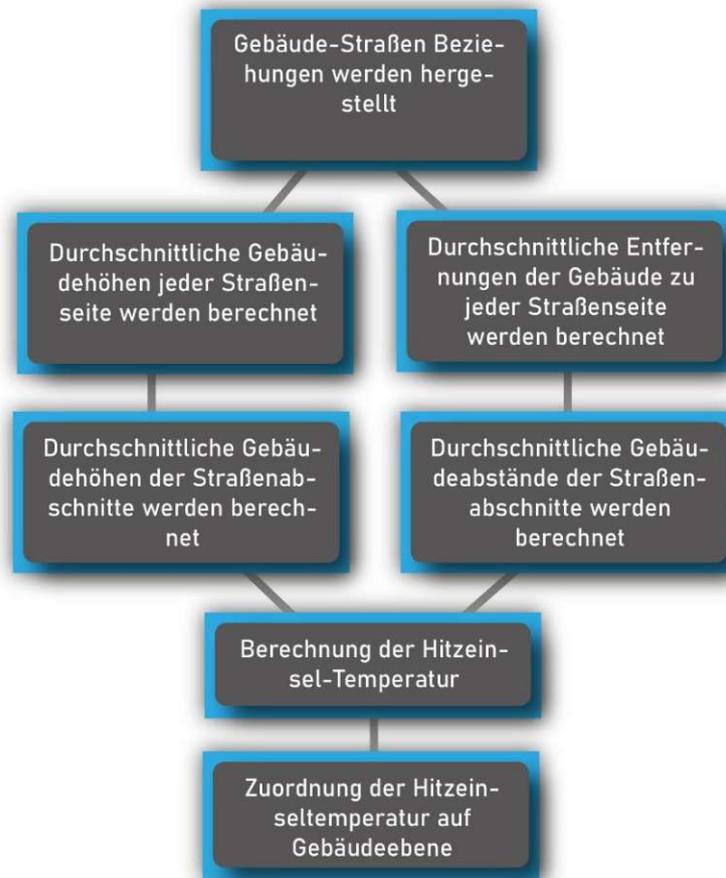


Abbildung 34: Arbeitsprozess der Hitzeinsel-Temperatur-Berechnungen (eigene Darstellung)

- 1. Gebäude-Straßen Beziehungen werden hergestellt:** Mit der Funktion „Generate Near Table“ werden für jedes Gebäude die nächstgelegenen Straßen (innerhalb von 20 m) und zusätzlich der Winkel der Gebäude zur Straße berechnet. Anhand des Winkels kann festgestellt werden, ob die Gebäude auf der einen oder anderen Straßenseite liegen. Alle Gebäude mit einem positiven Winkel und alle Gebäude mit einem negativen Winkel können jeweils einer gemeinsamen Straßenseite zugeordnet werden. Damit sind die Gebäude eindeutig einer Straßenseite zugeordnet und es ist ersichtlich, welche Gebäude sich gegenüberliegen.

⁷⁷ Vgl. Nakata-Osaki, Souza, Rodrigues (2018), S. 157

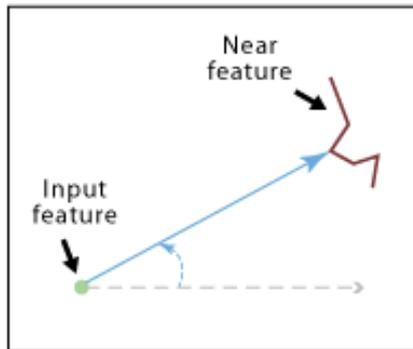


Abbildung 35: Winkelberechnung der Near Funktion zwischen Punkt und Linie (desktop.arcgis)

Die Zuordnung der Straßenseiten innerhalb der Gebäudepolygone erfolgt über die Funktion „Calculate Field“ mit Hilfe eines kurzen Python-Codes.

```
Street_Side =
calcrighside(!NEAR_ANGLE!)

Code Block

def calcrighside(x):
    right=0
    if (x < 0):
        right=0
    elif (x >= 0):
        right=1
    return right
```

Abbildung 36: Straßenseitenzuordnung, Python Code (eigene Darstellung)

2. **Durchschnittliche Gebäudehöhen jeder Straßenseite werden berechnet:** Mit der Funktion "Summary Statistics" werden die durchschnittlichen Gebäudehöhen für beide Straßenseiten und für alle Straßenabschnitte berechnet.
3. **Durchschnittliche Entfernungen der Gebäude zu jeder Straßenseite werden berechnet:** Mit der Funktion "Summary Statistics" werden die durchschnittlichen Abstände der Gebäude zu ihrer Straßenseite berechnet.
4. **Durchschnittliche Gebäudehöhen der Straßenabschnitte werden berechnet:** Mit Hilfe der Funktion „Calculate Field“ werden die durchschnittlichen Gebäudehöhen, für jeden Straßenabschnitt, berechnet.
5. **Durchschnittliche Gebäudeabstände der Straßenabschnitte werden berechnet:** Mit der Funktion „Calculate Field“ werden die mittleren Gebäudeabstände für jeden Straßenabschnitt berechnet.

- 6. Berechnung der Hitzeinsel-Temperatur:** Unter Verwendung der Hitzeinselformel von Timothy Oke werden die Hitzeinseltemperaturen für jeden Straßenabschnitt mit Hilfe der Funktion „Calculate Field“ berechnet.

```
Hitzeinsel_Temperatur =  
7.45 + 3.97 * math.log(!Gebaedehoehe_Avg! / !  
Gebaedeaabstand_Avg!)
```

Abbildung 37: Oke's Hitzeinsel Formel (eigene Darstellung)

- 7. Zuordnung der Hitzeinseltemperatur auf Gebäudeebene:** Mit Hilfe der „Spatial Join“ Funktion wird jedem Gebäude die höchste Hitzeinseltemperatur der Straßenräume im Umkreis von 20 m um das Gebäude zugeordnet.

Hitzesensibilität

Die Hitzesensibilität eines Gebäudes berechnet sich aus der Summe der geschlechts- und altersbedingten Hitzesterbewahrscheinlichkeit seiner Bewohner*innen.

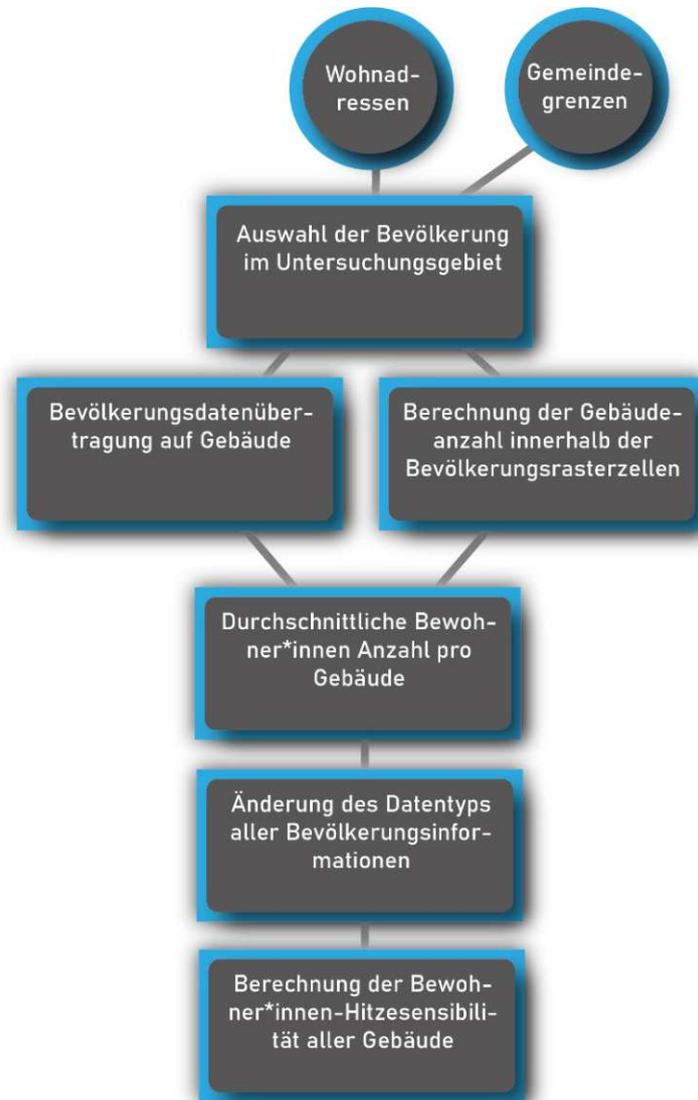


Abbildung 38: Arbeitsprozess der Hitzesensibilitätsberechnung (eigene Darstellung)

- Auswahl der Bevölkerung im Untersuchungsgebiet:** Mit Hilfe der Funktion „Pairwise Intersect“ wird das österreichweite Bevölkerungsraster auf das ausgewählte Untersuchungsgebiet reduziert.
- Bevölkerungsdatenübertragung auf Gebäude:** Mit Hilfe der „Spatial Join“ Funktion erhält jedes Gebäude die Bevölkerungsinformationen (Anzahl der Bewohner*innen, deren Alter und Geschlecht) des Bevölkerungsrasterfeldes, in dem es sich befindet.

3. **Berechnung der Gebäudeanzahl innerhalb der Bevölkerungsrasterzellen:** Um die Bevölkerung innerhalb jeder Rasterzelle anteilmäßig auf alle darin befindlichen Gebäude zu verteilen, muss zunächst für jede Rasterzelle die Anzahl der darin befindlichen Gebäude mit Hilfe der Funktion "Summary Statistics" ermittelt werden.
4. **Durchschnittliche Bewohner*innen Anzahl pro Gebäude:** Um die durchschnittlichen Bewohner*innen pro Gebäude zu erhalten, muss die Anzahl der Hauptwohnsitze durch die Anzahl der Gebäude innerhalb einer Rasterzelle mit Hilfe der Funktion „Calculate Field“ dividiert werden.
5. **Änderung des Datentyps aller Bevölkerungsinformationen:** Bevölkerungsdaten über die Anzahl von Frauen und Männern in verschiedenen Altersklassen liegen nur im Textformat vor. Daher müssen sie, bevor mit ihnen in den folgenden Schritten gerechnet werden kann, zunächst in den Datentyp FLOAT (der Fließkommazahlen speichern kann) umgewandelt werden.
6. **Berechnung der Bewohner*innen-Hitzesensibilität aller Gebäude:** Für jedes Gebäude wird mit Hilfe der Funktion „Calculate Field“ ein Hitzesensibilitätsindikator berechnet, indem die gewichtete Summe der Bewohner*innen, basierend auf der Sterbewahrscheinlichkeit durch Hitzewellen (siehe Kapitel 3.4), durch die Anzahl der Gebäude innerhalb der jeweiligen Bevölkerungsrasterzelle dividiert wird.

```
((!m_0_double! * 1.167) + (!m_10_double! * 10.66) + (!m_11_double! * 88.1) + (!w_0_double! * 0.82766) + (!w_10_double! * 9.3509) + (!w_11_double! * 111.9)) / !Anzahl_Geb_Raster!
```

Abbildung 39: Hitzesensibilitätsindikator, auf Gebäudeebene, gewichtet nach Alter und Geschlecht (eigene Darstellung)

Hitzevulnerabilität

Die Hitzevulnerabilität entspricht der Bewohner*innen-Hitzesensibilität all jener Gebäude, die sich innerhalb hochgradiger Hitzeinseln befinden.

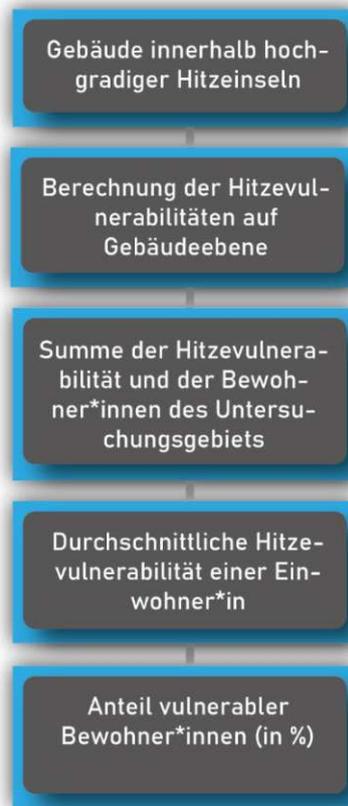


Abbildung 40: Arbeitsprozess der Hitzesensibilitätsberechnung (eigene Darstellung)

1. **Gebäude innerhalb hochgradiger Hitzeinseln:** Mit Hilfe eines kurzen Python-Codes wird überprüft, welche Gebäude sich innerhalb hochgradiger Hitzeinseln befinden (eigene Definition siehe Kapitel 3.4).

```
Hitzeinsel_Test =
calchitzeinsel(!Hitzeinsel_Temperatur!)

Code Block

def calchitzeinsel(x):
    ja=0
    if (x < 5):
        ja=0
    elif (x >= 5):
        ja=1
    return ja
```

Abbildung 41: Python-Funktion mit der festgestellt wird, welche Gebäude sich innerhalb hochgradiger Hitzeinseln befinden (eigene Darstellung)

2. **Berechnung der Hitzevulnerabilitäten auf Gebäudeebene:** Mit Hilfe eines kurzen Python-Codes wird nur den Gebäuden, die sich innerhalb einer Hitzeinsel befinden, die entsprechende Hitzesensibilität zugewiesen.

```
Hitzesensibilitaet =
calchitzesens(!Hitzeinsel_Test!,
Vulnerable_BewohnerInnen_Altersfaktor!)

Code Block

def calchitzesens(x, y):
    ja = 0
    if (x == 0):
        ja = 0
    elif (x == 1):
        ja = y
    return ja
```

Abbildung 42: Hitzesensibilität, Python Code (eigene Darstellung)

3. **Summe der Hitzevulnerabilität und der Bewohner*innen des Untersuchungsgebiets:** Als nächstes werden die Hitzesensibilitäten aller Gebäude mit der Funktion „Summary Statistics“ aufsummiert, um die Hitzesensibilität für das gesamte Untersuchungsgebiet zu erhalten. Gleichzeitig wird die Gesamtbevölkerung berechnet.
4. **Durchschnittliche Hitzevulnerabilität einer Bewohner*in:** Um die Ergebnisse von Gemeinden mit sehr unterschiedlicher Bevölkerungsgröße vergleichbar zu machen, muss die von Hitzeinseln betroffene Gesamtbevölkerung im Vulnerabilitätsindikator berücksichtigt werden. Die gesamte Hitzevulnerabilität des Untersuchungsgebietes wird durch die Gesamtbevölkerung dividiert, um die durchschnittliche Hitzevulnerabilität einer Bewohner*in zu erhalten.
5. **Anteil vulnerabler Bewohner*innen (in %):** Zuletzt wird mit Hilfe der Funktionen „Calculate Field“ sowie „Summary Statistics“ berechnet, wie viel Prozent der Bewohner*innen des Untersuchungsgebietes hitzevulnerabel sind. In dieser

Diplomarbeit werden nur jene Bewohner*innen als vulnerabel eingestuft, deren Wohngebäude sich innerhalb einer hochgradigen Hitzeinsel befindet.

```

Gesamtbevoelkerung_vul =
calcvulbev(!Hitzeinsel_Test!,!
Gesamtbevoelkerung!)

Code Block

def calcvulbev(x, y):
    ja = 0
    if (x == 0):
        ja = 0
    elif (x == 1):
        ja = y
    return ja
  
```

Abbildung 43: Python Code innerhalb der Calculate Field Funktion: Bewohner*innen jener Gebäude, die sich in Hitzeinseln befinden, werden als Hitzevulnerabel eingestuft (eigene Darstellung)

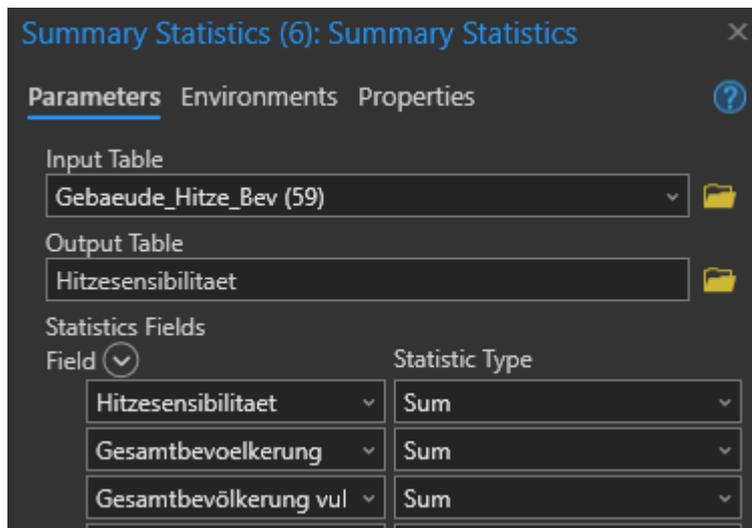


Abbildung 44: Berechnung der Summe alle vulnerablen Bewohner*innen des Untersuchungsgebiets (eigene Darstellung)

```

vul_bev_gesamt_bev =
!Gesamtbevoelkerung_vul! / !
SUM_Gesamtbevoelkerung! * 100
  
```

Abbildung 45: Berechnung des Anteils vulnerabler Bewohner*innen an der Gesamtbevölkerung (in %)

Hitzeintensität

Die Hitzeintensität soll als Indikator für die durchschnittliche jährliche Hitzebelastung der Bevölkerung dienen.

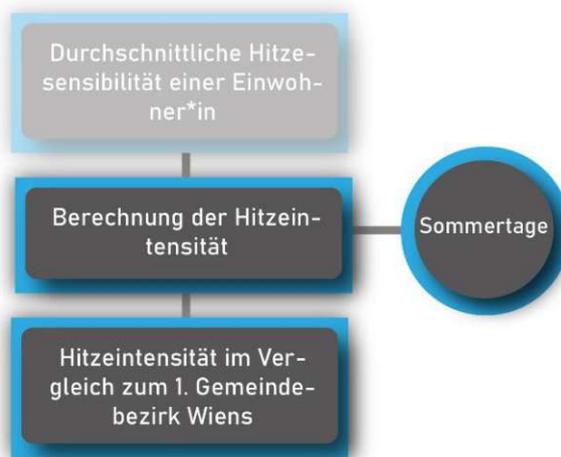


Abbildung 46: Arbeitsprozess der Hitzeintensitätsberechnung (eigene Darstellung)

- 1. Berechnung der Hitzeintensität:** Diese berechnet sich aus der durchschnittlichen Hitzevulnerabilität einer Bewohner*in (Hitzevulnerabilität dividiert durch Gesamtbevölkerung) multipliziert mit der Anzahl der durchschnittlichen jährlichen Sommertage (innerhalb des Untersuchungsgebietes).
- 2. Hitzeintensität im Vergleich zum 1. Gemeindebezirk Wiens:** Um die Ergebnisse verständlicher zu machen, werden sie mit der Hitzeintensität des ersten Wiener Gemeindebezirks verglichen (Anteil in Prozent). Dieser Bezirk weist die höchste Hitzeintensität aller zur Auswahl stehenden Untersuchungsgebiete auf und stellt somit einen guten Orientierungspunkt für die anderen Bezirke und Gemeinden dar.

Hitzeintensität	Hitzeintensität vs Wien 1. Bez (in %)
163,679569	44,268077

Abbildung 47: Beispielhaftes Ergebnis einer Hitzeintensitätsberechnung (eigene Darstellung)

Rettungswagen-Erreichbarkeit

Wie viel Prozent der Wohnadressen, die in einer hochgradigen Hitzeinsel liegen und in denen vulnerable Personen leben, können von den Notfallrettungsdiensten der umliegenden Krankenhäuser innerhalb der Hilfsfrist von 8 Minuten erreicht werden?

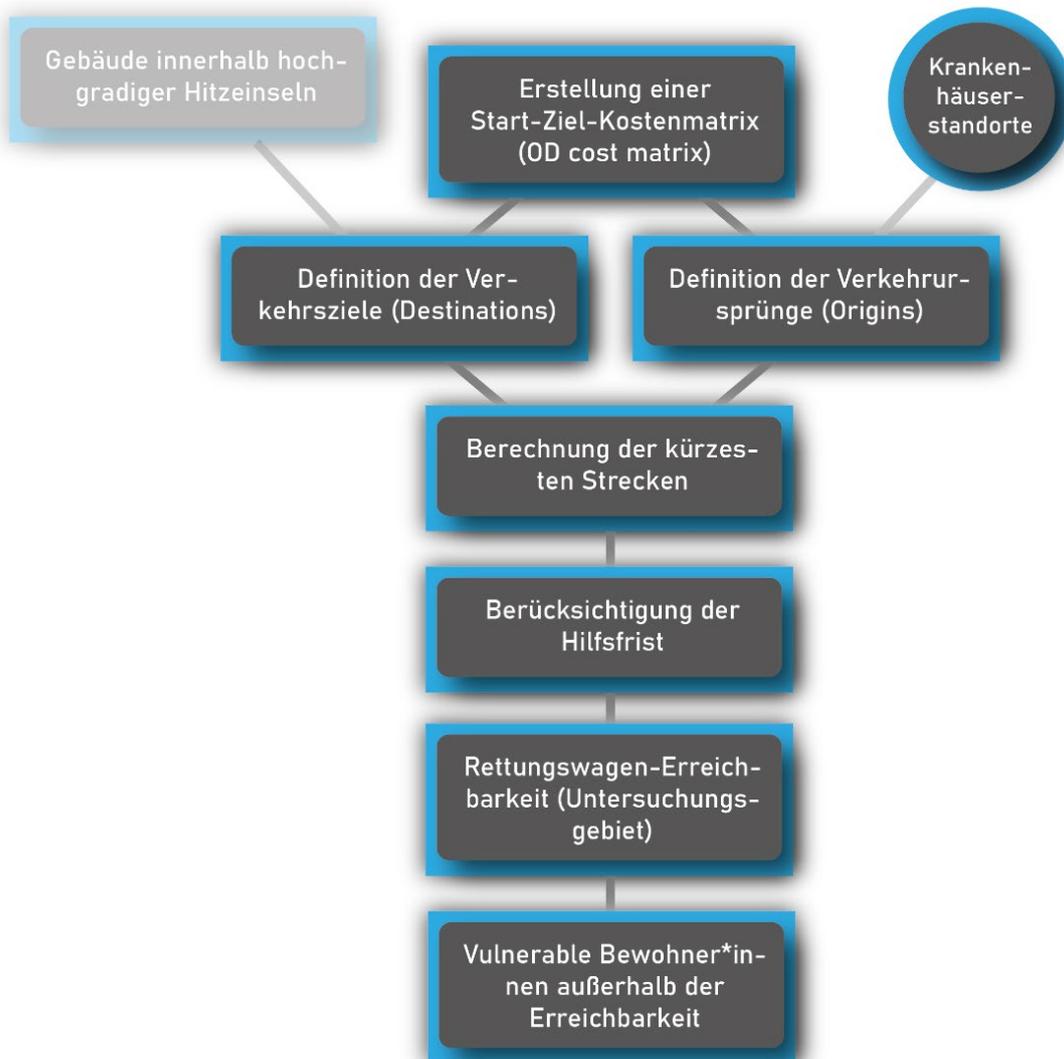


Abbildung 48: Arbeitsprozess der Rettungswagen-Erreichbarkeitsberechnung (eigene Darstellung)

- 1. Erstellung einer Start-Ziel-Kostenmatrix (OD cost matrix):** Mit Hilfe der Funktion „Make OD Cost Matrix Analysis Layer“ wird eine Start-Ziel-Matrix erstellt, die auf Basis des bereits erstellten GIP-Netzwerks die kostengünstigsten Routen (in diesem Fall die mit dem geringsten Zeitaufwand) von jedem Startpunkt zu den nächstgelegenen Zielpunkten berechnet. Die kürzeste Verbindung wird durch die geringste Summe der Kantenwiderstände definiert, die notwendig sind, um von einem Ausgangsknoten zu einem Zielknoten zu gelangen. In dieser Diplomarbeit

wird die Fahrzeit der Rettungsfahrzeuge (in Minuten) als Kantenwiderstand verwendet.

2. **Definition der Verkehrsziele (Destinations):** Als Verkehrsziele für die Erreichbarkeitsanalyse der Rettungswagen werden die Adresspunkte der Krankenhausstandorte mit Hilfe der Funktion Add Location verwendet.
3. **Definition der Verkehrsursprünge (Origins):** Mit Hilfe der „Feature to Point“ Funktion wird im Zentrum jedes Gebäudepolygons, das sich innerhalb einer Hitzeinsel befindet, ein Punkt erzeugt. Diese Wohnadressenpunkte werden mit Hilfe der Funktion Add Location als Verkehrsursprünge für die Erreichbarkeitsanalyse der Krankenwagen verwendet.

Anmerkung zur Zuordnung von Verkehrszielen und Verkehrsursprüngen: Da Rettungsfahrzeuge Einbahnstraßen ignorieren können, macht es zeitlich keinen Unterschied, ob die Berechnung der Anfahrt von Krankenhäusern oder von Gebäuden ausgeht. Die Wahl der Gebäude als Verkehrsursprünge ist ideal, da in der Berechnung für jeden Startpunkt (also für jedes Gebäude) das nächstgelegene Ziel (in diesem Fall das Krankenhaus) berechnet wird. Wären die Krankenhäuser die Startpunkte, so würden nur die nächstgelegenen Gebäude als Ziele berechnet. Da es aber viel weniger Gebäude als Krankenhäuser gibt, würde für die meisten Gebäude keine Erreichbarkeitsanalyse durchgeführt werden.

4. **Berechnung der kürzesten Strecken:** Mit Hilfe der „Solve“ Funktion wird für jeden Wohnadressenpunkt die kürzeste Fahrzeit vom nächstgelegenen Krankenhausstandort berechnet.
5. **Berücksichtigung der Hilfsfrist:** Mit Hilfe eines kurzen Python-Codes in der Funktion „Calculate Field“ wird überprüft, welche Wohnadressen in einer Hitzeinsel innerhalb der Hilfsfrist (in dieser Arbeit definiert als 6 Minuten Fahrzeit) von Rettungswagen der umliegenden Krankenhäuser erreicht werden können.

```

ambulance_help =
CalcHelped(!Total_Time_Minutes!)
Code Block
def CalcHelped(x):
    ja = 0
    if (x < 8):
        ja = 1
    else:
        ja = 0
    return ja

```

Abbildung 49: Python Code zur Bestimmung der Wohnadressen die innerhalb von 6 Minuten von Rettungswägen erreicht werden können (eigene Abbildung)

6. **Rettungswagen-Erreichbarkeit (Untersuchungsgebiet):** Mit Hilfe der Funktion „Calculate Field“ wird der prozentuale Anteil aller Wohnadressen im Untersuchungsgebiet, die in Hitzeinseln liegen und innerhalb der Hilfsfrist erreicht werden können, berechnet.
7. **Vulnerable Bewohner*innen außerhalb der Erreichbarkeit:** Als letztes wird mit Hilfe der „Calculate Field“ Funktion die Summe aller Bewohner*innen gebildet, die vulnerabel sind und nicht innerhalb der Hilfsfrist des Rettungswagens erreicht werden können.

```

vul_per_not_reached =
((100-!Rettungswagen_Erreichbarkeit!)/100) * !
Gesamtbevoelkerung_vul!

```

Abbildung 50: Berechnung aller vulnerabler Bewohner*innen außerhalb der Erreichbarkeit von Rettungswägen innerhalb der 6 Minuten Hilfsfrist (eigene Darstellung)

5 Ergebnisse

Als Ergebnis der Berechnungen der Hitzevulnerabilitätsanalyse erhält der bzw. die Anwender*in vier Outputs. Eine Visualisierung der Hitzeinseln in Form von Straßenschluchten, eine Visualisierung der Hitzebelastungen aller Gebäude, eine Visualisierung der Erreichbarkeit aller Gebäude in hochgradigen Hitzeinseln für Rettungsfahrzeuge und eine Übersicht der relevantesten quantitativen Ergebnisse. Nachfolgend werden beispielhaft die Ergebnisse der Untersuchungsgebiete Wien Favoriten, Feldkirch und Achau dargestellt. Diese wurden ausgewählt, um stichprobenartig einen besseren Überblick über die Ergebnisse von Untersuchungsgebieten mit sehr unterschiedlichen Bebauungsstrukturen und Bevölkerungsdichten zu erhalten. Alle Straßenschluchten, die aufgrund der umgebenden Bebauung einen Hitzeinseleffekt aufweisen, sind mit ihren thermischen Auswirkungen dargestellt.

1. **Visualisierung der Hitzeinseln in Form von Straßenabschnitten:** Es werden die Hitzeinseleffekte aller Straßenschluchten dargestellt.

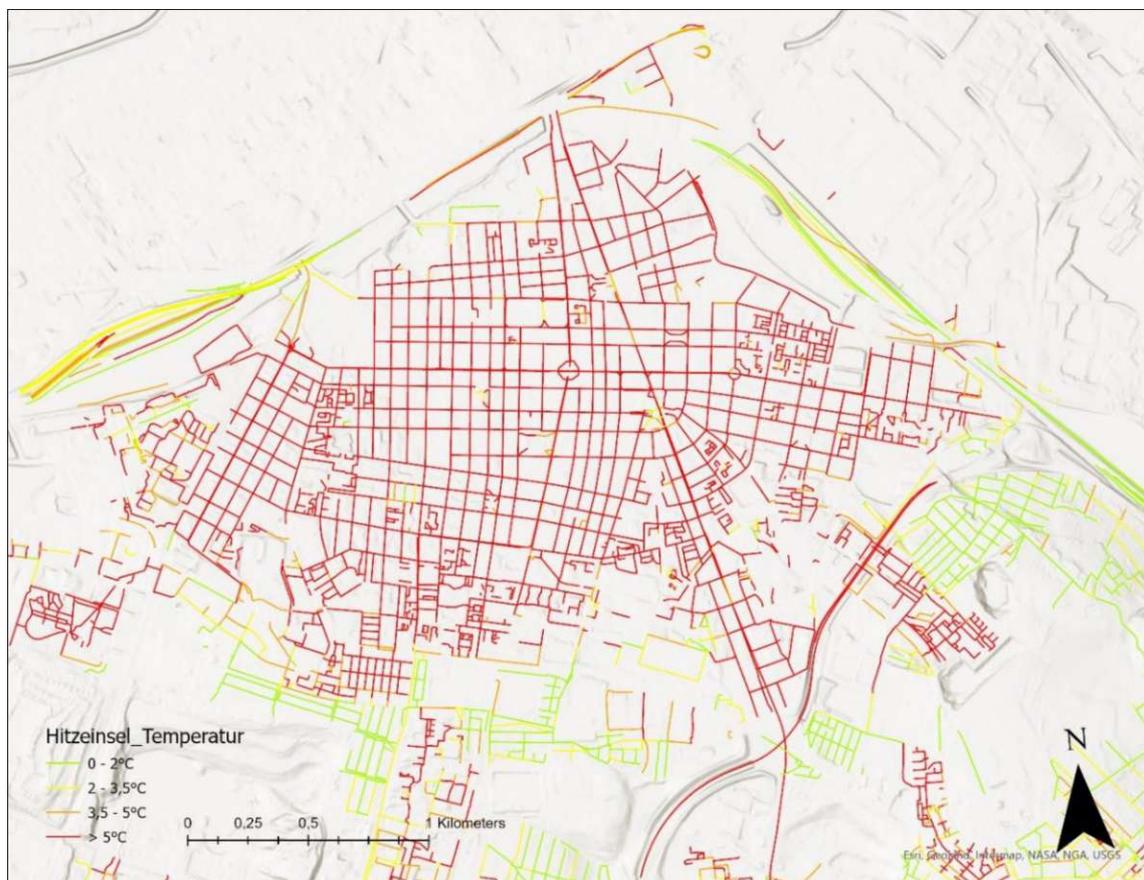


Abbildung 51: Ausschnitt der Hitzeinseln im Untersuchungsgebiet Wien Favoriten (eigene Darstellung, Hintergrundkarte von ESRI)

Wien, am 20.12.2023

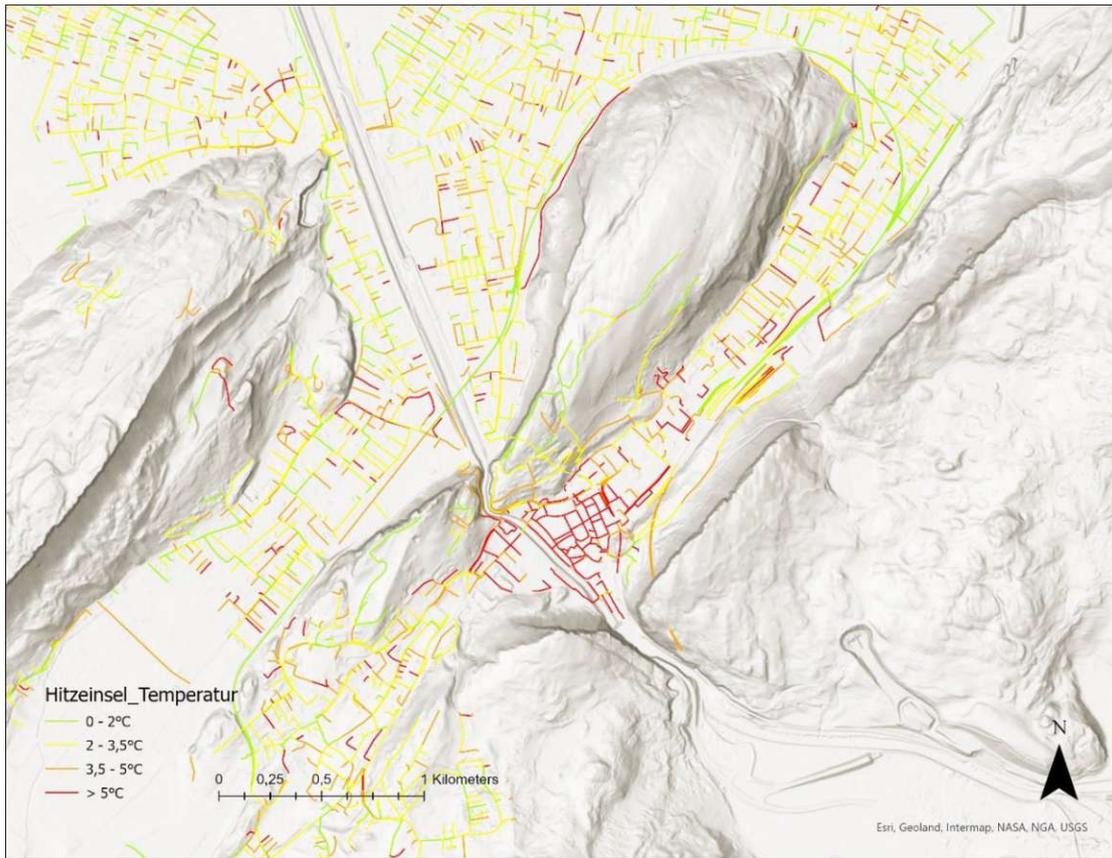


Abbildung 52: Ausschnitt der Hitzeinseln im Untersuchungsgebiet Feldkirch (eigene Darstellung, Hintergrundkarte von ESRI)

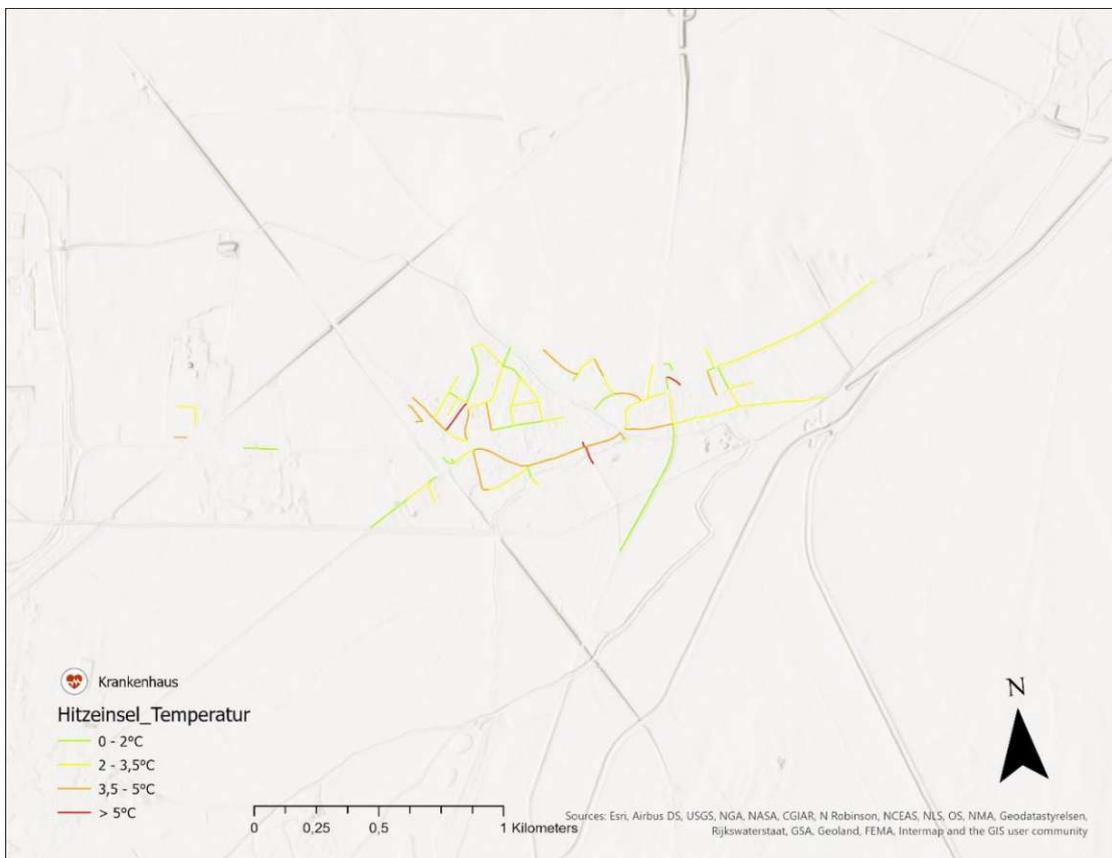


Abbildung 53: Ausschnitt der Hitzeinseln im Untersuchungsgebiet Achau (eigene Darstellung, Hintergrundkarte von ESRI)

2. Visualisierung der Hitzeinselbelastung aller Gebäude: Eine Darstellung für jedes von einer Hitzeinsel betroffene Gebäude mit der aus dem Modell abgeleiteten Hitzebelastung.

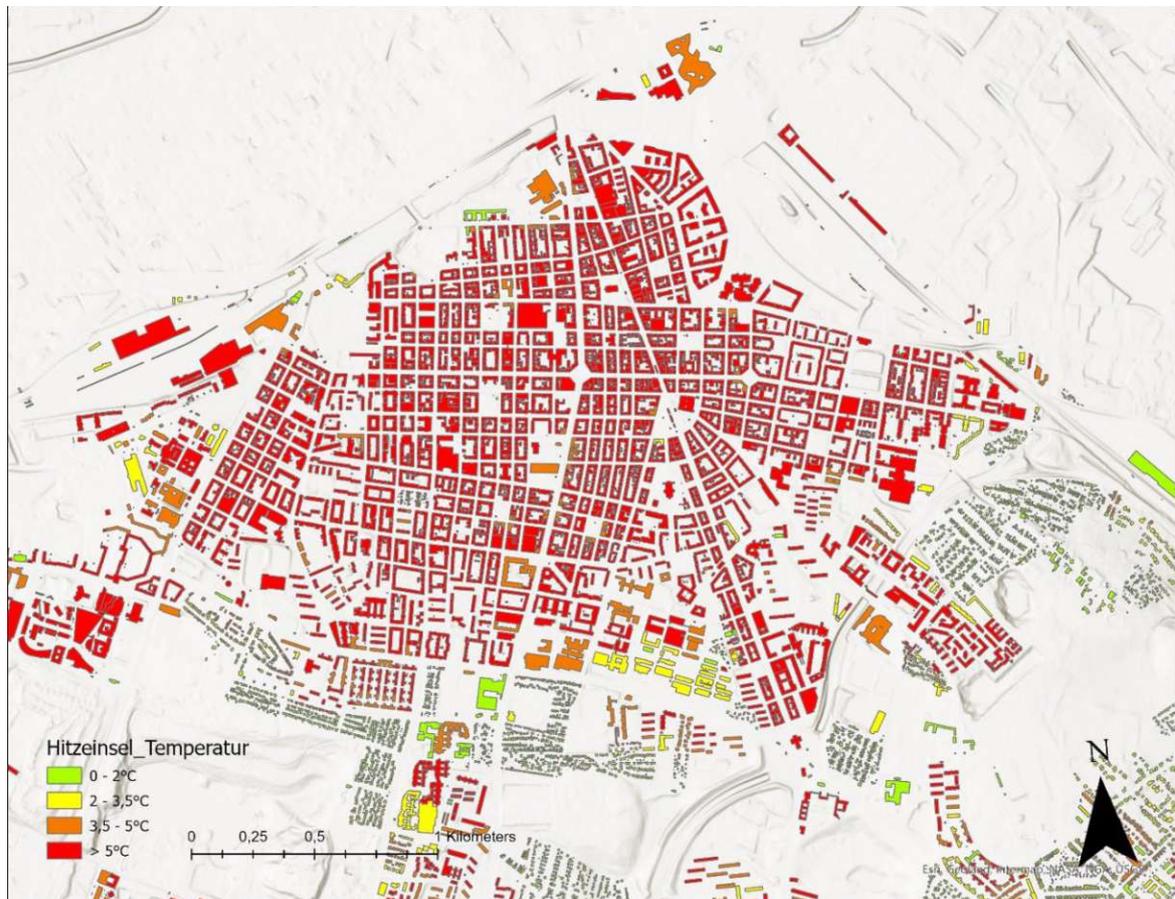


Abbildung 54: Ausschnitt der Hitzeinsel-Betroffenheit aller Gebäude des Untersuchungsgebiets Wien Favoriten (eigene Darstellung, Hintergrundkarte von ESRI)

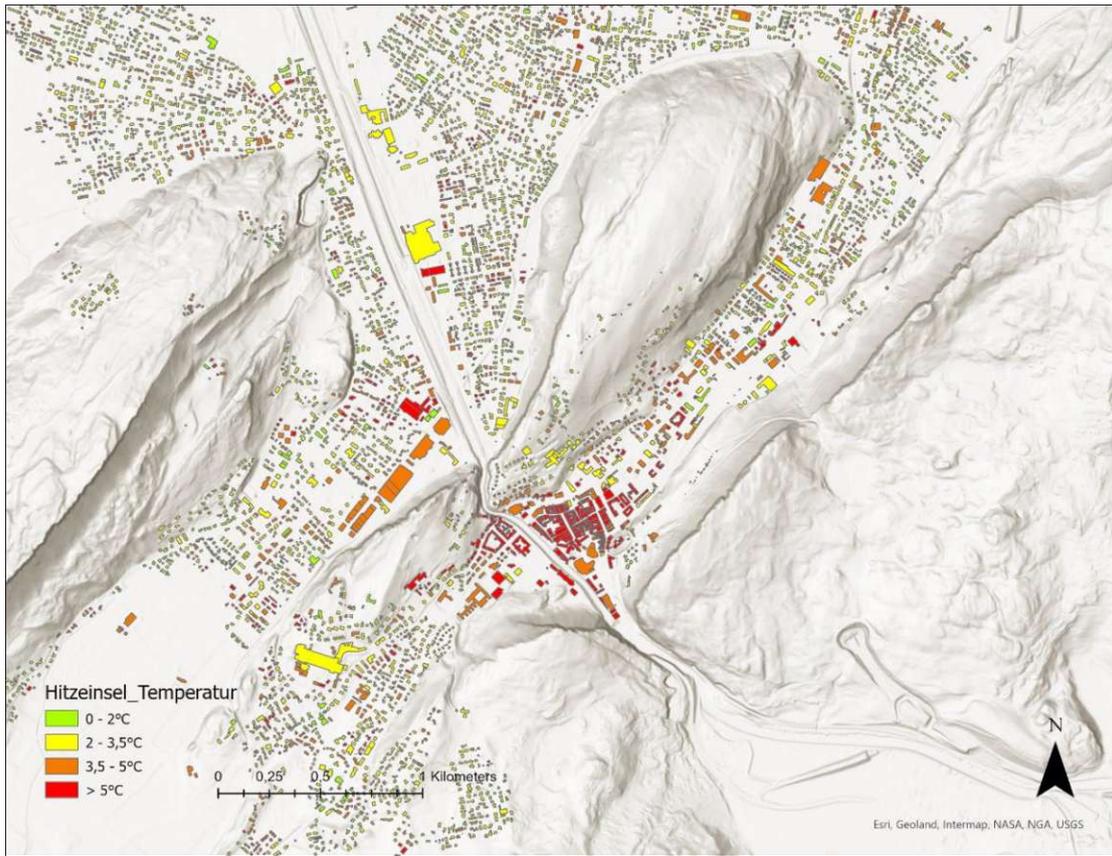


Abbildung 55: Ausschnitt der Hitzeinsel-Betroffenheit aller Gebäude des Untersuchungsgebiets Feldkirch (eigene Darstellung, Hintergrundkarte von ESRI)

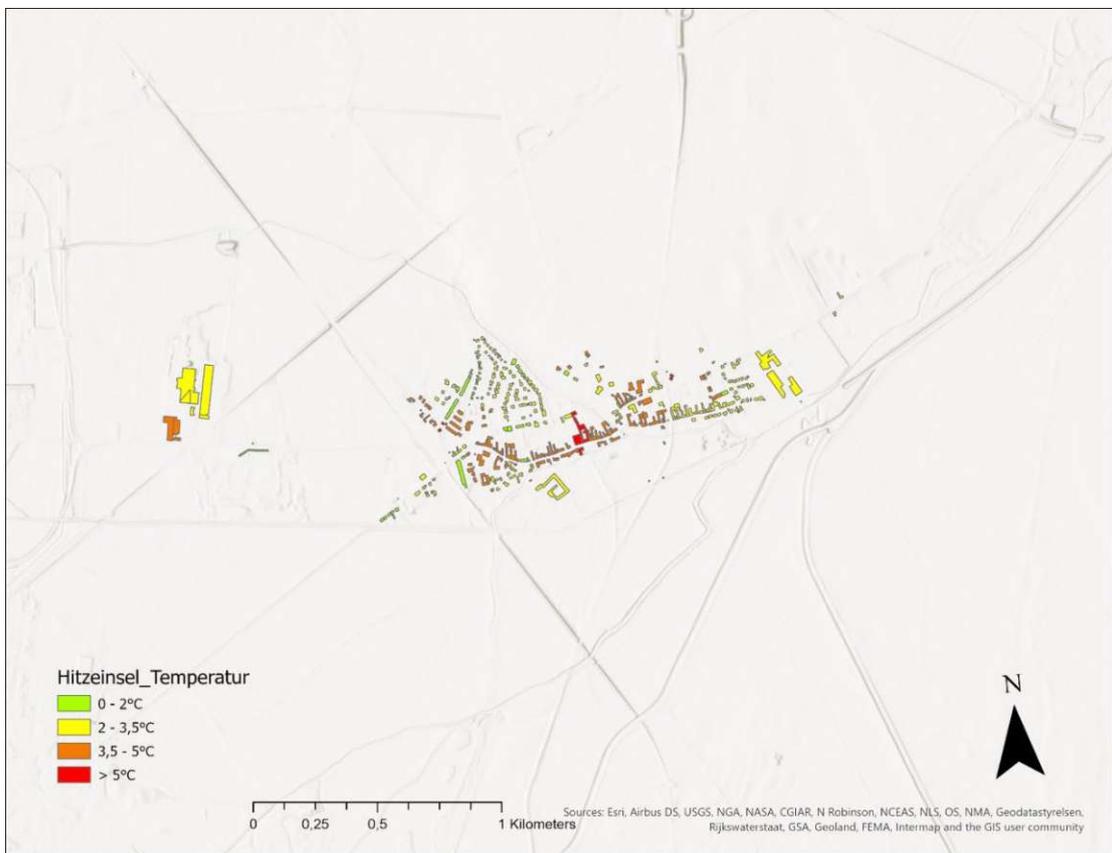


Abbildung 56: Ausschnitt der Hitzeinsel-Betroffenheit aller Gebäude des Untersuchungsgebiets Achau (eigene Darstellung, Hintergrundkarte von ESRI)

3. Visualisierung der Notfallrettungsdienst-Erreichbarkeiten: Darstellung der Erreichbarkeit aller von Hitzeinseln betroffenen Gebäude im Untersuchungsgebiet durch Einsatzfahrzeuge des Rettungsdienstes innerhalb der Hilfsfrist von 6 Minuten.

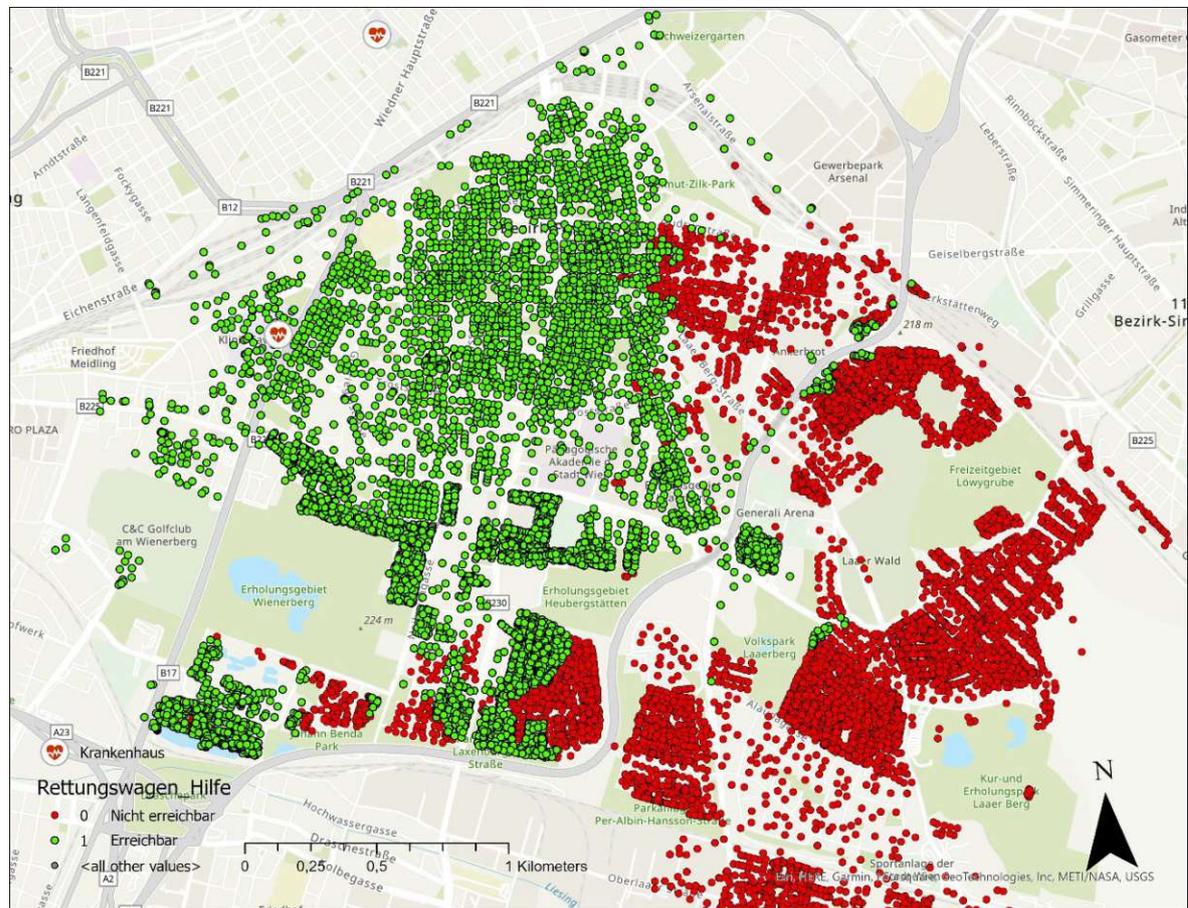


Abbildung 57: Kartenausschnitt der Erreichbarkeit von hochgradigen Hitzeinsel betroffenen Gebäuden in Wien Favoriten, durch Fahrzeuge des Notfallrettungsdienstes, innerhalb der Hilfsfrist von 6 Minuten (eigene Darstellung, Hintergrundkarte von ESRI)

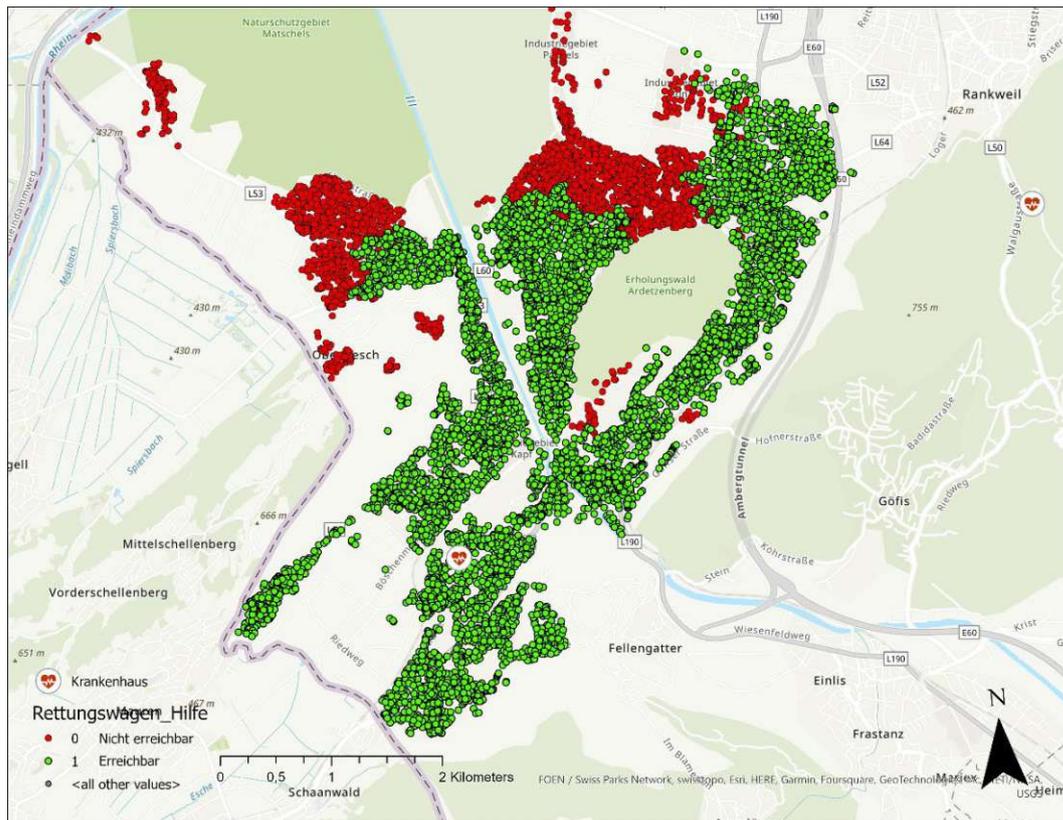


Abbildung 58: Kartenausschnitt der Erreichbarkeit von hochgradigen Hitzeinsel betroffenen Gebäuden in Feldkirch, durch Fahrzeuge des Notfallrettungsdienstes, innerhalb der Hilfsfrist von 6 Minuten (eigene Darstellung, Hintergrundkarte von ESRI)

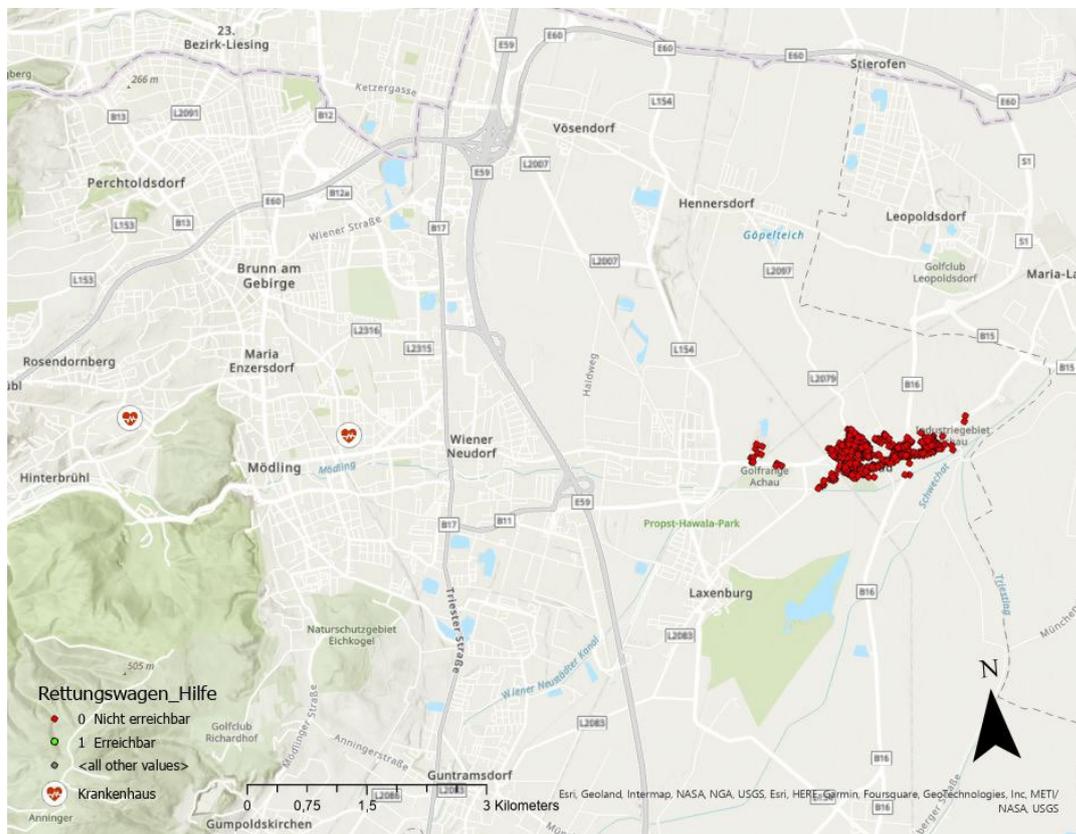


Abbildung 59: Kartenausschnitt der Erreichbarkeit von hochgradigen Hitzeinsel betroffenen Gebäuden in Achau, durch Fahrzeuge des Notfallrettungsdienstes, innerhalb der Hilfsfrist von 6 Minuten (eigene Darstellung, Hintergrundkarte von ESRI)

4. **Quantitative Ergebnisse des Hitzevulnerabilitätsschnelltests:** In einer Output-Datei werden die Analyseergebnisse (siehe vorhergehende Kapitel) des Untersuchungsgebietes in verständlicher Form ausgegeben.

Gemeinde	Anzahl Sommertage	Gesamtbevölkerung	Vulnerable Bewohner*innen
Wien_Favoriten	65	220094	126176
Hitzevulnerabilität_Gesamt	Hitzevulnerabilität / Bevölkerung	Hitzeintensität	Hitzeintensität vs Wien 1. Bez (in %)
493810,27	2,24	145,84	39,44
Anteil vulnerabler Bewohner*innen (in %)	Rettungswagen Erreichbarkeit in %	Vulnerable Bewohner*innen außerhalb der Erreichbarkeit	
57,33	43,47	71327	

Abbildung 60: Analyseergebnisse des Hitzevulnerabilitätsschnelltests für Wien Favoriten (eigene Darstellung)

Gemeinde	Anzahl Sommertage	Gesamtbevölkerung	Vulnerable Bewohner*innen
Feldkirch	41,15	34583	3148
Hitzevulnerabilität_Gesamt	Hitzevulnerabilität / Bevölkerung	Hitzeintensität	Hitzeintensität vs Wien 1. Bez (in %)
16807,93	0,49	20	5,41
Anteil vulnerabler Bewohner*innen (in %)	Rettungswagen Erreichbarkeit in %	Vulnerable Bewohner*innen außerhalb der Erreichbarkeit	
9,1	75,13	783	

Abbildung 61: Analyseergebnisse des Hitzevulnerabilitätsschnelltests für Feldkirch (eigene Darstellung)

Gemeinde	Anzahl Sommertage	Gesamtbevölkerung	Vulnerable Bewohner*innen
Achau	58,68	1479	22
Hitzevulnerabilität_Gesamt	Hitzevulnerabilität / Bevölkerung	Hitzeintensität	Hitzeintensität vs Wien 1. Bez (in %)
106,83	0,07	4,24	1,15
Anteil vulnerabler Bewohner*innen (in %)	Rettungswagen Erreichbarkeit in %	Vulnerable Bewohner*innen außerhalb der Erreichbarkeit	
1,47	0	22	

Abbildung 62: Analyseergebnisse des Hitzevulnerabilitätsschnelltests für Achau (eigene Darstellung)

6 Diskussion der Ergebnisse

Limitationen

Forschungsfrage 2: Welche Limitationen haben technische, datenbasierte Modelle bei der Abbildung hochkomplexer systemischer Wirkungszusammenhänge?

Hypothese 3: Ein GIS-basierter Hitzevulnerabilitätsschnelltest hat technische und methodische Grenzen.

Qualität der Daten

Aufgrund der aktuellen Datenlage (Datenverfügbarkeit) und der pragmatischen Aspekte Zeit, Kosten und Rechenleistung können nicht alle relevanten Faktoren in einem Geoinformationsmodell berücksichtigt werden. So wurden beispielsweise aus Mangel an Daten die Faktoren Wohlstand (räumliche Daten zu Vermögen fehlen) und Vulnerabilität von Kleinkindern nicht in das Modell implementiert.

Zudem können nicht immer alle Faktoren eines komplexen Phänomens, z.B. selten auftretende Ereignisse (geringe Fallzahlen), in aussagekräftigen quantitativen Daten abgebildet werden. Diese Faktoren können nicht in Modelle, die auf quantitativen Daten basieren, wie z.B. Geoinformationsmodelle, implementiert werden.

Die Modelldaten können leicht durch aktuellere Daten ersetzt werden, solange die allgemeine Datenstruktur (v.a. Bezeichnungen) nicht geändert wurde.

Das Modell kann nur binär zwischen Hitzeinseln unter 5°C und über 5°C unterscheiden. Die erhöhte Belastung durch Hitzeinseln deutlich über 5 °C wird nicht zusätzlich berücksichtigt. Eine derart genaue Berechnung wäre nur mit entsprechend detaillierten Hitzesterblichkeitsdaten möglich. Um z.B. die Auswirkungen einer schrittweisen Temperaturerhöhung von 1°C auf die Hitzesterblichkeit zu berücksichtigen, wäre eine sehr aufwändige Studie erforderlich. Eine solche Studie wurde bei der Datenrecherche nicht gefunden.

Technische Grenzen und Probleme

Auswertungen, in denen alle Gemeinden Österreichs miteinander verglichen werden, sind kaum möglich, da der Zeitaufwand für die sehr detaillierten Berechnungen jeder einzelnen Gemeinde sehr hoch ist. Die Analyse pro Gemeinde dauert ca. 5 bis 10 Minuten. Wollte man alle 2.093 Gemeinden analysieren, würde dies ca. 260 Stunden in Anspruch nehmen.

Die Ergebnisse sind immer nur abstrakte Annäherungen an die Realität und müssen als solche hinterfragt werden. Modelltechnische Grenzen können unter Umständen zu ungenauen oder gar falschen Teilergebnissen führen.

Gebäude müssen aufgrund des Zuordnungsalgorithmus immer einer Straße zugeordnet werden. Wenn sich Gebäude am Anfang oder Ende eines Straßenabschnitts befinden, kann die Zuordnung über den Winkel (positiv oder negativ) zu falschen Ergebnissen führen. In diesem Beispiel (siehe Abbildung 63) wird das türkis umrandete Gebäude der nördlichen Straßenseite zugeordnet, wodurch fälschlicherweise eine Straßenschlucht entsteht. Da die Gebäude an Siedlungsrandern in der Regel niedriger sind (wodurch die fehlerhaft berechneten Hitzeinseln in der Regel auch niedrige Werte anzeigen, die noch keine Hitzevulnerabilität erzeugen) und zudem einseitig bebaute Straßenzüge eher selten sind, wirkt sich diese Fehlerquelle nur sehr gering verfälschend auf das Gesamtergebnis des Untersuchungsgebietes aus.

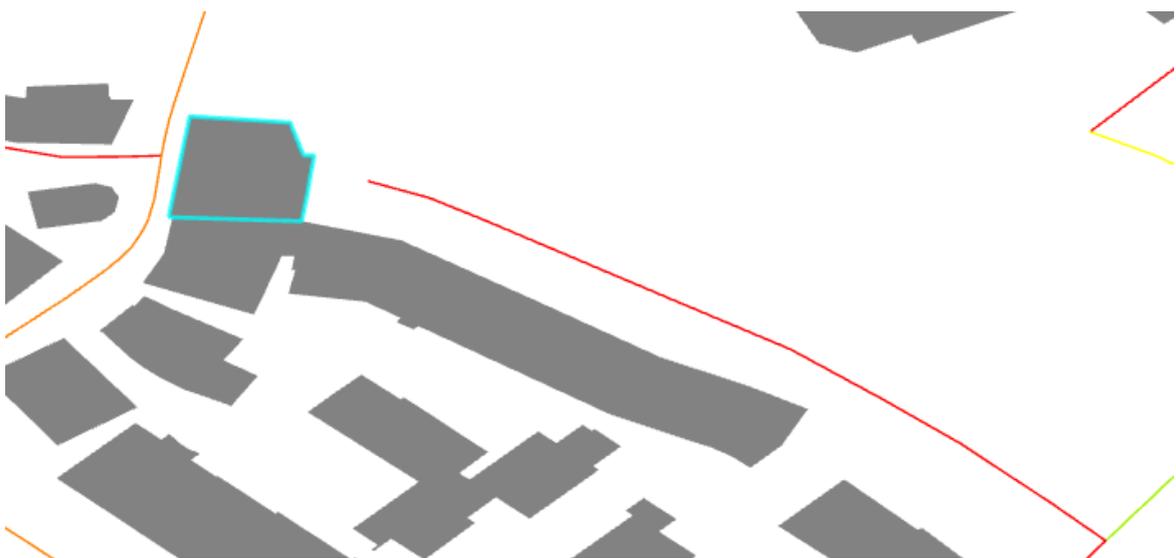


Abbildung 63: Problematische Straßenseitenzuordnung erzeugt fälschlicherweise eine Straßenschlucht (eigene Darstellung)

Das Flussdiagramm-Programmierungstool ModelBuilder ist anfällig für die Ausgabe von Fehlermeldungen, auch wenn die Syntax des Modells fehlerfrei ist. Beispielsweise kam es mehrmals vor, dass ein Prozessschritt plötzlich Fehlermeldungen ausgab, nachdem eine kleine Änderung an einem anderen, unabhängigen Prozess vorgenommen wurde. Bei der Entwicklung des Hitzevulnerabilitätsschnelltests war es sogar einmal notwendig, das gesamte Modell eins zu eins neu aufzubauen. Es war klar, dass die Syntax korrekt war, und auf der Grundlage von Trial-and-Error wurde entschieden, dass es in diesem Fall am besten wäre, das Modell neu zu erstellen. Aus diesem Grund wird den Endnutzer*innen empfohlen, keine algorithmischen Änderungen am Modell vorzunehmen.

Die verschiedenen Computerprogramme, mit denen Daten verarbeitet werden können, verfügen nur über einen begrenzten Funktionsumfang. ArcGIS bietet zwar die Möglichkeit, neue Funktionen zu programmieren, aber auch hier gibt es technische Grenzen, die nicht überschritten werden können.

Damit bestätigte sich die Hypothese, dass ein GIS-basierter Hitzeschnelltest technische und methodische Grenzen hat.

Welchen Beitrag kann das Modell für die Raumplanung leisten?

- *Forschungsfrage 1: Welchen Beitrag kann ein GIS-basiertes Modell, für die komplexe Thematik der Hitzevulnerabilität, als Kommunikationswerkzeug für Siedlungsentwicklung zwischen Planung und Entscheidungsträger*innen, leisten?*

Vulnerabilität kann als Ergebnis der Kombination verschiedener, sich gegenseitig beeinflussender Faktoren (systemischer Zusammenhang) verstanden werden, die auf die Verwundbarkeit eines Objektes oder einer Person durch ein Schadensereignis schließen lassen. Dabei spielt auch eine Rolle, wie das Objekt oder die Personen das Schadensereignis bewältigen bzw. sich daran anpassen können.⁷⁸

In einem Modell eines Geoinformationssystems kann es nur eine begrenzte Anzahl von Variablen geben. Nicht alle Phänomene können in Form von Daten exakt abgebildet werden und selbst dort, wo Daten vorhanden sind, sind diese oft nicht in ausreichender Qualität und Quantität vorhanden. In dieser Diplomarbeit wurde z.B. die Vulnerabilität von Kleinkindern gegenüber Hitze nicht berücksichtigt, da keine Daten in ausreichender Qualität gefunden wurden.

Außerdem ist die Rechenleistung von Computern begrenzt, so dass die Anzahl der Variablen aus rein pragmatischen Gründen (Zeit, Kosten) begrenzt werden muss.

Aufgrund der Einschränkungen des Modells stellte sich zu Beginn der Diplomarbeit die Frage, ob eine sinnvolle Simulation des Phänomens der Hitzevulnerabilität überhaupt möglich ist und wenn ja, welche Parameter dafür am besten geeignet sind.

In dieser Arbeit wurden urbane Hitzeinseln, vulnerable Personen und deren Erreichbarkeit durch Notfallrettungsdienste als die Variablen identifiziert, die innerhalb der Logik und Funktionsweise eines Geoinformationssystemmodells sowie der aktuellen Datenlage (Qualität der verfügbaren Daten) am besten geeignet sind, aussagekräftige Ergebnisse zum Phänomen der Hitzevulnerabilität zu ermöglichen.

Bei den Variablen "urbane Hitzeinseln" und "vulnerable Personen" handelt es sich ebenfalls um komplexe Systeme, bei denen es aufgrund der aktuellen Datenlage und

⁷⁸ Vgl. Climate Service Center Germany (2013), online

pragmatischer Aspekte wie Zeit, Kosten und Rechenleistung nicht möglich ist, alle relevanten Faktoren innerhalb eines Geoinformationsmodells zu berücksichtigen.

Für die Variable "urbane Hitzeinsel" wurde auf Basis einer Literaturrecherche die physische Ausprägung von Straßenschluchten (Verhältnis von Gebäudehöhe zu Straßenraumbreite) als wichtigster Faktor identifiziert, der auch ohne Zuhilfenahme weiterer relevanter Faktoren in der Lage ist, einen Großteil des realen Phänomens zu erklären.

Für die Variable "vulnerable Personen" wurde in dieser Diplomarbeit das Sterberisiko als wichtigster Faktor herangezogen. Auf Basis einer Literaturrecherche konnte das Alter als wichtigster Aspekt des hitzebedingten Sterberisikos identifiziert werden. Mit Hilfe dieses Faktors (Sterberisiko nach Altersklassen) kann ein großer Teil des realen Phänomens erklärt werden.

- Hypothese 4: Ein GIS-basierter Hitzevulnerabilitätsschnelltest kann die Kommunikation zwischen Planer*innen und Entscheidungsträger*innen verbessern.

Die Reduktion auf die Variablen, die allein in der Lage sind, den größten Teil eines komplexen Phänomens zu erklären, ist nicht nur aus pragmatischen Gründen notwendig, sondern ermöglicht auch eine Konzentration auf die relevantesten Aspekte und erhöht damit gleichzeitig die Nachvollziehbarkeit des Phänomens Hitzevulnerabilität.

Aufgrund der guten Datenverfügbarkeit war es möglich, die Berechnungen der Straßenschluchten, des altersbedingten Sterberisikos und der Erreichbarkeit durchzuführen. Damit konnten die drei Vulnerabilitätskriterien Exposition, Empfindlichkeit und Reaktionsvermögen (vgl. IPCC-Definition) anhand der Indikatoren urbane Hitzeinseln, Wohnorte vulnerabler Personen und Erreichbarkeit durch Notfallrettungsdienste berücksichtigt und in das Geoinformationsmodell implementiert werden.

In der Diskussion über das Phänomen der Hitzevulnerabilität sollten jedoch auch andere Faktoren, die eine wesentliche Rolle spielen, berücksichtigt werden. Insbesondere in der Kommunikation mit Gemeindevertreter*innen und lokalen Raumplaner*innen, die einen wesentlichen Einfluss auf die räumliche Gestaltung von Gemeinden haben, sollte von

Wien, am 20.12.2023

Anfang an klar kommuniziert werden, dass es weitere Faktoren gibt, die das Phänomen der Hitzevulnerabilität beeinflussen können, die aber aus pragmatischen Gründen in diesem Geoinformationsmodell nicht berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse (in Form von Karten und Kennzahlen) ermöglichen eine schnelle und auch für Laien verständliche Einschätzung der Situation. Man kann also auch davon ausgehen, dass dieser Hitzevulnerabilitätsschnelltest die Kommunikation zum Thema Hitzevulnerabilität zwischen Planer*innen und Gemeindevertreter*innen verbessern kann.

- Hypothese 2: Ein GIS-basierter Hitzevulnerabilitätsschnelltest ermöglicht die Identifizierung von Siedlungsgebieten, die von Hitzevulnerabilität besonders nachteilig betroffen sind.

Die Ergebnisse vermitteln teilweise einen sehr konkreten Eindruck. Beispielsweise wird die Anzahl vulnerabler Personen außerhalb der Erreichbarkeit durch Notfallrettungsfahrzeuge oder die Anzahl vulnerabler Bewohner*innen in einem bestimmten Gebäude als Ergebnis angeführt. Es ist jedoch Vorsicht geboten, da dieser Eindruck irreführend sein kann.

Daher muss bei der Anwendung des Hitzeschnelltests als erstes den Nutzer*innen klar kommuniziert werden, dass es sich bei allen Detailergebnissen um Schätzungen handelt, die auf niedrig aufgelösten Daten basieren (siehe: 250x250 Meter Bevölkerungsraster). Diese unpräzisen Daten werden mit Hilfe eines Aggregationsalgorithmus auf hochaufgelöste Daten (z.B. Gebäude) des Untersuchungsgebietes verteilt. So kann z.B. abgeschätzt werden, wie viele Personen in einem bestimmten Gebäude wohnen. Einzelne Siedlungsgebiete mit erhöhter Hitzevulnerabilität können identifiziert werden, aufgrund der geringen Auflösung des Bevölkerungsrasters ist bei der Interpretation der Ergebnisse auf hoher Detailebene jedoch Vorsicht geboten.

- *Hypothese 1: Ein GIS-basierter Hitzevulnerabilitätsschnelltest kann dabei helfen, das schwer greifbare Thema der Hitzevulnerabilität, durch kartographische und rechnerische Ergebnisse, anschaulicher zu machen.*

Zusammenfassend sehe ich im Hitzevulnerabilitätsschnelltest dieser Diplomarbeit ein großes Potential, die komplexe Thematik der Hitzevulnerabilität durch die Reduktion auf

die relevantesten Faktoren, die einfachen Visualisierungen und die konkreten quantitativen Kennzahlen auch für fachfremde Personengruppen verständlich aufzubereiten und somit zugänglicher zu machen. Durch die überschaubaren und fachlich anerkannten Modellvariablen sind die Argumentation und die Methodik der Analyse nachvollziehbar und leicht überprüfbar. Die Limitationen des Modells müssen jedoch vor dem ersten Einsatz durch neue Nutzer*innen ausführlich erklärt werden, um falsche Schlüsse basierend auf den Testergebnissen zu vermeiden.

Im Idealfall könnte durch die Anwendung dieses oder eines vergleichbaren Hitzevulnerabilitäts-Schnelltests das Bewusstsein der Gemeindevertreter*innen für die Gefahren der Hitzevulnerabilität im Allgemeinen und für problematische lokale Siedlungsentwicklungen im Besonderen geschärft werden.

Beispielsweise könnten Anreize für den Ausbau bestehender medizinischer Strukturen (Aus- und Neubau verschiedener sozialer und technischer Infrastrukturen, die zu einer Verbesserung der Notfallversorgung führen) oder für die Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen in Quartieren mit besonders hoher Hitzevulnerabilität geschaffen werden.

Entwicklungspotential

Auf der Grundlage neuer Studienergebnisse könnten in Zukunft neue Variablen in das Modell aufgenommen werden.

Die Modellausgabe könnte in einigen Punkten unter Berücksichtigung der Dashboard-Logik noch verbessert werden.

Unter einem Dashboard versteht man die visuelle Darstellung der wichtigsten Informationen, die zur Erreichung eines oder mehrerer Ziele erforderlich sind, in konsolidierter und zusammengefasster Form auf einem Bildschirm, so dass die Informationen auf einen Blick erfasst werden können.⁷⁹

Die quantitativen Analyseergebnisse des Hitzevulnerabilitätsschnelltests folgen bereits teilweise einer Dashboard Logik und geben einen ersten Überblick über bestehende

⁷⁹ Vgl. datenerzaehlerin.de

Problemgebiete und infrastrukturelle Engpässe. Diese könnte jedoch durch weitere Arbeitsschritte noch verfeinert und intuitiv verständlicher gestaltet werden.

Beispielsweise wäre es sehr aufschlussreich, die Ergebnisse der einzelnen Gemeinden mit den Ergebnissen aller Gemeinden zu vergleichen. Derzeit werden die Ergebnisse nur mit dem Untersuchungsgebiet mit der höchsten Hitzevulnerabilität (1. Wiener Gemeindebezirk) verglichen. Ein Vergleich mit den Ergebnissen aller Gemeinden und Bezirke könnte jedoch aussagekräftigere Ergebnisse liefern, insbesondere bei strukturell sehr unterschiedlichen Gemeinden. Die Analyse aller Gemeinden Österreichs wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit aus Zeitgründen nicht durchgeführt. Wie bereits erwähnt, würde die Analyse aller 2.093 Gemeinden ca. 260 Stunden in Anspruch nehmen.

Um eine prozentuale Vergleichbarkeit unterschiedlich großer Untersuchungsgebiete (große Unterschiede in der baulichen und demographischen Struktur) zu ermöglichen, wäre außerdem die Verwendung logarithmischer Skalen sinnvoll.

Eine automatische Visualisierung bestimmter numerischer Ergebnisse der Outputdatei (z.B. relative Zahlen mit Hilfe von Tortendiagrammen) würde eine bessere Nachvollziehbarkeit der Vergleiche zwischen den Untersuchungsgebieten im Rahmen der Dashboard-Logik ermöglichen.

Fazit

Der im Rahmen meiner Diplomarbeit entwickelte Hitzevulnerabilitätsschnelltest erfüllt mein ursprüngliches Ziel, ein Werkzeug zu entwickeln, das allen österreichischen Gemeinden helfen kann, einen ersten Überblick über den Status Quo ihrer Vulnerabilität im Bereich der Hitzebelastung zu erhalten.

Aufgrund zeitlicher und technischer Restriktionen konnte das Potenzial eines solchen Tools zwar nicht voll ausgeschöpft werden, es kann aber bereits jetzt sehr detaillierte und für die Praxis hoch relevante Analyseergebnisse für alle Gemeinden Österreichs auf Knopfdruck liefern.

Das in dieser Diplomarbeit erstellte ArcGIS Pro ModelBuilder Tool könnte in Zukunft problemlos für verschiedene Erweiterungen verwendet werden. Wie bereits erwähnt, wäre beispielsweise eine weitere Verfeinerung der Dashboard Logik sinnvoll, um die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse zu verbessern. Darüber hinaus wäre die Implementierung neuer Variablen, basierend auf neuen Studienergebnissen, die eine genauere Darstellung des realen Phänomens der Hitzevulnerabilität ermöglichen, leicht realisierbar.

Quellenverzeichnis

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Literaturquellen

- Ali-Toudert, F., Mayer, H. (2006): Numerical study on the effects of aspect ratio and solar orientation on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*.
- Baccini, M., Biggeri, A., Accetta, G., Kosatsky, T., Katsouyanni, K., Analitis, A., Ross Anderson, H., Bisanti, L., D'Ipolti, D., Danova, J. (2008): Heat Effects on Mortality in 15 European Cities.
- Ballester, J., Quijal-Zamorano, M., Méndez Turrubiates, R.F. *et al.* (2023) Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022.
Online: <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02419-z>
- Birkmann, J., Greiving, S., Serdeczny, O.M. (2017): Das Assessment von Vulnerabilitäten, Risiken und Unsicherheiten.
Online: https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3_26
- Climate Service Center Germany (2013): Vulnerabilität.
Online: https://www.climate-service-center.de/products_and_publications/publications/detail/063303/index.php.de (abgerufen 13.04.2023)
- datenerzaehlerin.de (2023): Dashboard Design – So einfach geht's! Online: <https://datenerzaehlerin.de/dashboard-design/> (abgerufen am 12.12.2023)
- desktop.arcgis (2023): Near.
Online: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/analysis-toolbox/near.htm> (abgerufen am 19.11.2023)
- Deutscher Wetterdienst (2023): Wetter und Klimalexikon, Tropennacht.
Online: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=102802&lv2=102672> (abgerufen am 29.08.2023)
- ETC-CCA and ETC-SIA, (2012): Urban Vulnerability Indicators - ETC CCA/SIA.
Online: https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-cca/products/etc-cca-reports/tp_3-2012
- Europäische Kommission (2004): Project Cycle Management Guidelines. Volume 1.
- Fortuniak, K. (2003): An application of the urban energy balance scheme for a statistical modeling of the UHI intensity.
- Hajat, S., Kosat, T. (2010): Heat-Related Mortality: A Review and Exploration of Heterogeneity.
- Hemis, H. (2010): Die Klimarelevanz der Raumplanung.

Wien, am 20.12.2023

- Hinkel, J. (2011): Indicators of Vulnerability and Adaptive Capacity. Towards a Clarification of the Science-Policy Interface.
Online: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.08.002>
- Hupfer, P., Kuttler, W. (2006): Witterung und Klima: Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie.
- IEA (2022): Climate Resilience Policy Indicator.
Online: <https://www.iea.org/reports/climate-resilience-policy-indicator>
- International Association for Urban Climate (2023): The Urban Canopy Layer Heat Island - IAUC Teaching Resources. Online: <http://www.urban-climate.org/> (abgerufen am 25.07.2023)
- IPCC (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2016): Klimaänderung 2013/2014: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Beiträge der drei Arbeitsgruppen zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC).
- Jusline (2023): StVO 1960 - Straßenverkehrsordnung 1960. Online: <https://www.jusline.at/gesetz/stvo/paragraf/26> (abgerufen am 19.11.2023)
- Kagermeister, A., Gather, M., Lanzendorf, M. (2008): Geographische Mobilitäts- und Verkehrsforschung.
- Laenderdaten.info (2023): Das Klima in Österreich.
Online: <https://www.laenderdaten.info/Europa/Oesterreich/Klima.php> (abgerufen am 19.08.2023)
- Leitstelle Lausitz (2023): Häufig gestellte Fragen.
Online: <https://www.leitstelle-lausitz.de/leitstelle/haeufig-gestellte-fragen/> (abgerufen am 19.10.2023)
- Luber, G., Knowlton, K., Balbus, J., Frumkin, H., Hayden, M., et al. (2014). Chapter 9: Human Health. In: Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment.
- Memon, R. A., Leung, D. Y. C., Liu, C. (2008): A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island.

- Mitusch, K. (2021): Vulnerabilität und verwandte Konzepte.
Online: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/543595/>
(abgerufen 13.04.2023)
- Nakata-Osaki, C. M., Souza, L. C. L., Rodrigues, D. S. (2018): THIS – Tool for Heat Island Simulation: A GIS extension model to calculate urban heat island intensity based on urban geometry.
- Notrufnoe (2023): Welche Ausrückzeiten sind ab der Alarmierung einzuhalten?
Online: <https://notrufnoe.com/ausrueckzeiten/> (abgerufen am 18.11.2023)
- Nunez, M., Oke, T. R. (1977): The energy balance of an urban canyon.
- Österreichisches Rotes Kreuz (2014): Rahmenvorschrift Rettungsdienst. Online:
https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0CAIQw7AJahcKEwiwzevGu_z_AhUAAAAAHQAAAAAQAg&url=https%3A%2F%2Fwww.rotekreuz.at%2Ffileadmin%2Fuser_upload%2FPDF%2FVorschriften_und_Richtlinien%2FRahmenvorschrift_RD_2014.pdf&psig=AOvVaw2Qhmb-alhiYJeVTMEtBmb6&ust=1688814212465375&opi=89978449 (abgerufen am 07.07.2023)
- Oke, T. R. (1981): Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations.
- Oke, T. R. (1984): Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning.
- Oke, T. R. (1987): Boundary layer climates (2nd ed.).
- Omann, R., et al. (2010): Reliability and Validity of the Youth Asset Survey: An Update.
- Pandya, P. (2021): THIS – Tool for Heat Island Simulation.
Online: <https://medium.com/@pranavspandya/this-tool-for-heat-island-simulation-2e65c312187c> (abgerufen am 10.07.2023)
- Schehadat, M.S., Groneberg, D.A., Bauer, J. et al. Hilfsfristen des Rettungsdienstes in den deutschen Bundesländern.
Online: <https://doi.org/10.1007/s40664-017-0203-3>
- Schindelegger, A., Weichselbaumer, R., Damyanovic, D., Reinwald, F. (2021): „Climate Proofing“ – Ein Framework zur Integration der Klimawandelanpassung in die Raumplanung.

- Seip, C., Bill, R., Kinskofer, A. (2015): Notfallversorgung der Bevölkerung in Mecklenburg-Vorpommern - Erreichbarkeitsanalysen auf Grundlage von OpenStreetMap und ArcGIS Online.
- Stadtschreiber, F. (2017): Hitze in der Stadt - Ausrichtung der Planungsinstrumente auf den Umgang mit sommerlicher Hitze.
- Stafoggia, M., Forastiere, F., Agostini, Daniele†; Biggeri, A., Bisanti, L., Cadum, E., Caranci, N., de'Donato, F., De Lisio, S., De Maria, M., Michelozzi, P., Miglio, R., Pandolfi, P., Picciotto, S., Rognoni, M., Russo, A., Scarnato, C., Perucci, Carlo A. (2006) Vulnerability to Heat-Related Mortality: A Multicity, Population-Based, Case-Crossover Analysis.
- Statista.com (2023): Urbanisierungsgrad in Österreich von 2011 bis 2021. Online: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/217716/umfrage/urbanisierung-in-oesterreich/>
- Steiner, H. (2015) Heat related vulnerability in Vienna in the context of Climate Change.
- Stock, M., Kropp, J., Walkenhorst, O. (2009): Risiken, Vulnerabilität und Anpassungserfordernisse für klimaverletzliche Regionen.
- Sung, J. (2014): The investigation of microclimate variation of urban canyons in Vienna.
- Tiroler Tageszeitung (2022): Zahl fast verdreifacht - Massive Zunahme an Hitzetagen in Österreich. Online: <https://www.tt.com/artikel/30826615/zahl-fast-verdreifacht-massive-zunahme-an-hitzetagen-in-oesterreich> (abgerufen am 10.07.2023)
- Tötzer, T. (2023): VESPA - Vulnerabilitäts-Schnellanalyse für die praxisnahe Anwendung in Städten.
- Umweltbundesamt Deutschland (2023): Gesundheitsrisiken durch Hitze. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze#hitzeperioden> (abgerufen am 29.08.2023)
- Vuckovic, M. (2015): A framework for the representation of the urban environment and the assessment of its microclimatic variation.
- ZEW (2023): Indikatoren. Online: <https://zewo.ch> (abgerufen am 28.08.2023)

Datenquellen

- Ballester, J., Quijal-Zamorano, M., Méndez Turrubiates, R.F. et al. (2023) Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022. Online unter: <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02419-z>
- Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (2023) Bauwerke: Digitales Landschaftsmodell, *BWK_8100_BAUWERK_F_3035*. Online unter: <https://data.bev.gv.at/geonetwork/srv/ger/catalog.search#/metadata/0e36cab1-698a-42a7-b72d-9631d2d7ad28>
- GeoSphere Austria (2021): Sommertage für ganz Österreich, Summer_Days. Online unter: <https://data.hub.geosphere.at/dataset/klimakarten>
- ÖV DAT: GIP-Straßennetz, *main_GIP_LINKNETZ_OGD*. (Aufbereitet & zur Verfügung gestellt durch den Forschungsbereich SRF der TU Wien). Online unter: <https://gip.gv.at/>
- Statistik Austria (2019): Gemeindegrenzen: Die Gliederung der österreichischen Gemeinden, *STATISTIK_AUSTRIA_GEM_20230101*. Online unter: https://www.data.gv.at/katalog/dataset/stat_gliederung-osterreichs-in-gemeinden14f53#additional-info
- Statistik Austria (2020): Bevölkerungsdaten (Altersklassen): Österreich - Raster 250m / Bevölkerung, *R250_pop2020*. (Daten vom SRF, für die ausschließliche Verwendung im Rahmen dieser Diplomarbeit, erhalten).
- Umweltbundesamt - Biologische Vielfalt und Naturschutz (2018): CORINE Landbedeckung. Online unter: <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/76617316-b9e6-4bcd-ba09-e328b578fed2#resources>

ModelBuilder Modelle

GIP Netzwerk

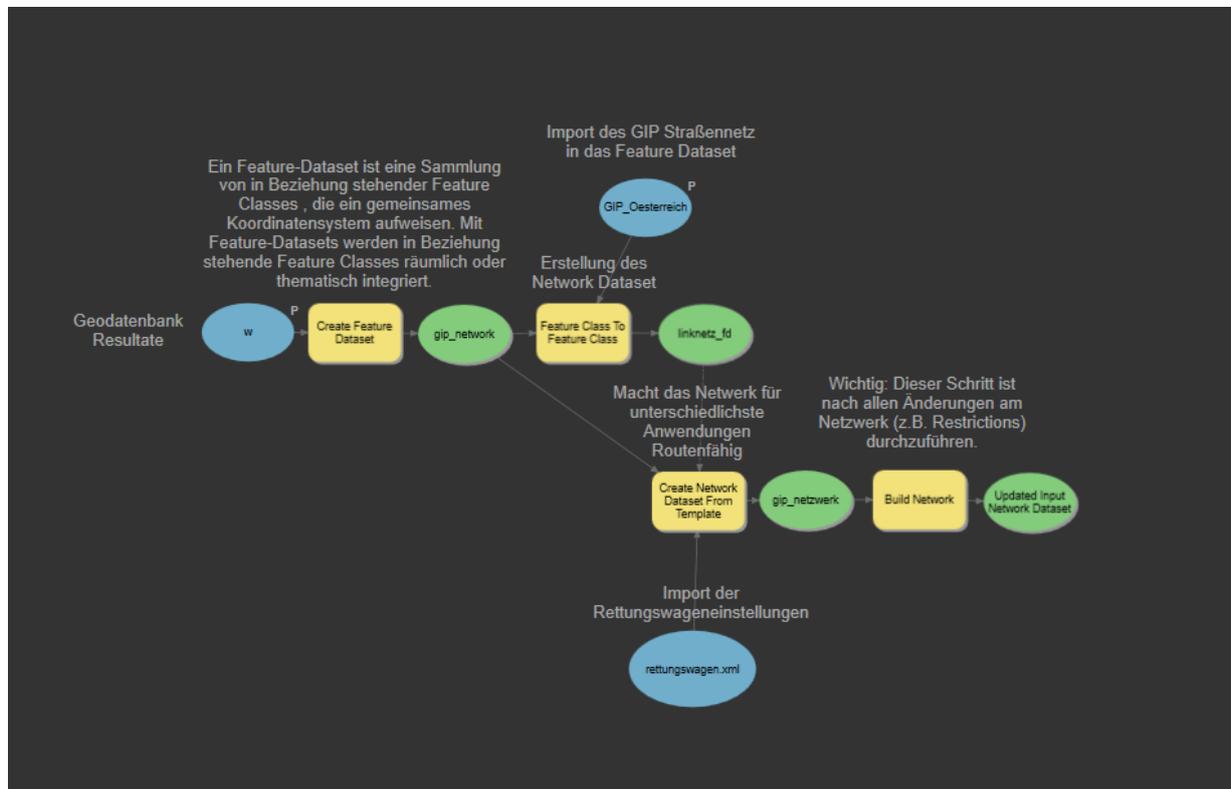


Abbildung 64: Selbst entwickeltes ArcGIS Pro ModelBuilder Tool "GIP Netzwerk" (eigene Darstellung)

Sommertage

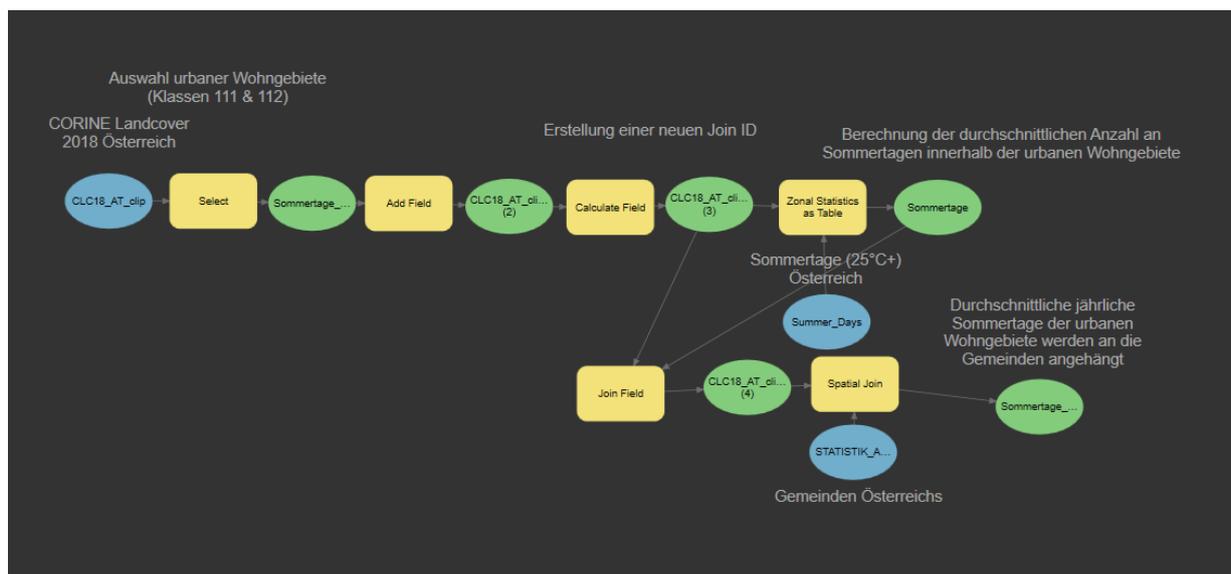


Abbildung 65: Selbst entwickeltes ArcGIS Pro ModelBuilder Tool "Sommertage" (eigene Darstellung)

Hitzevulnerabilitätsschnelltest

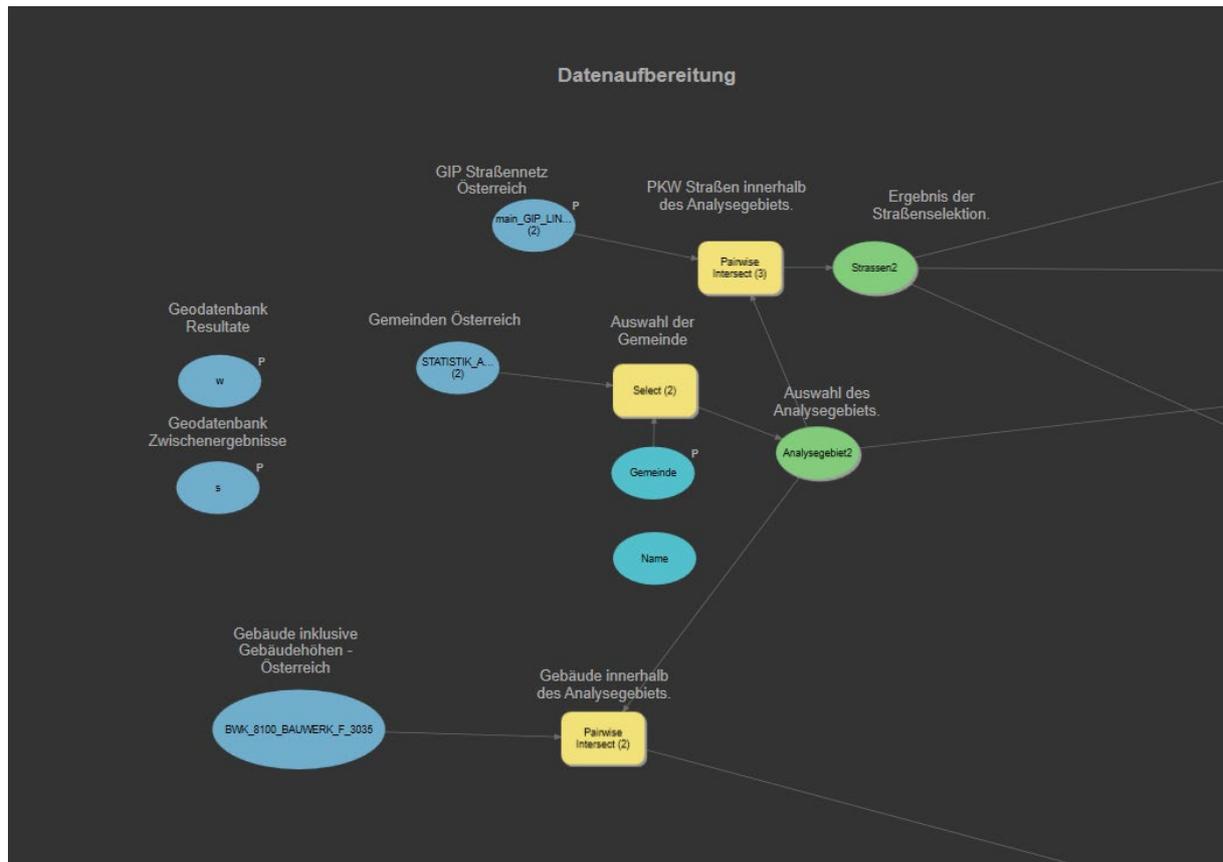


Abbildung 66: Prozessschritt „Datenaufbereitung“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)

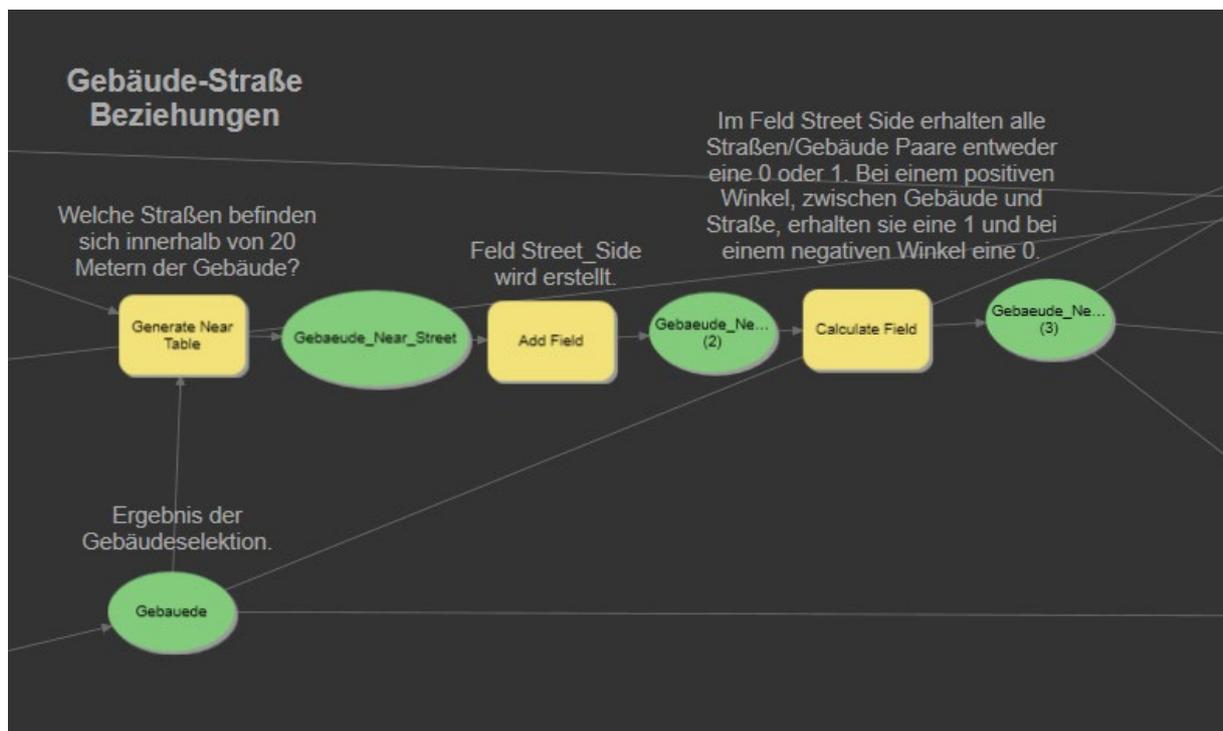


Abbildung 67: Prozessschritt „Gebäude-Straße Beziehung“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)

Wien, am 20.12.2023

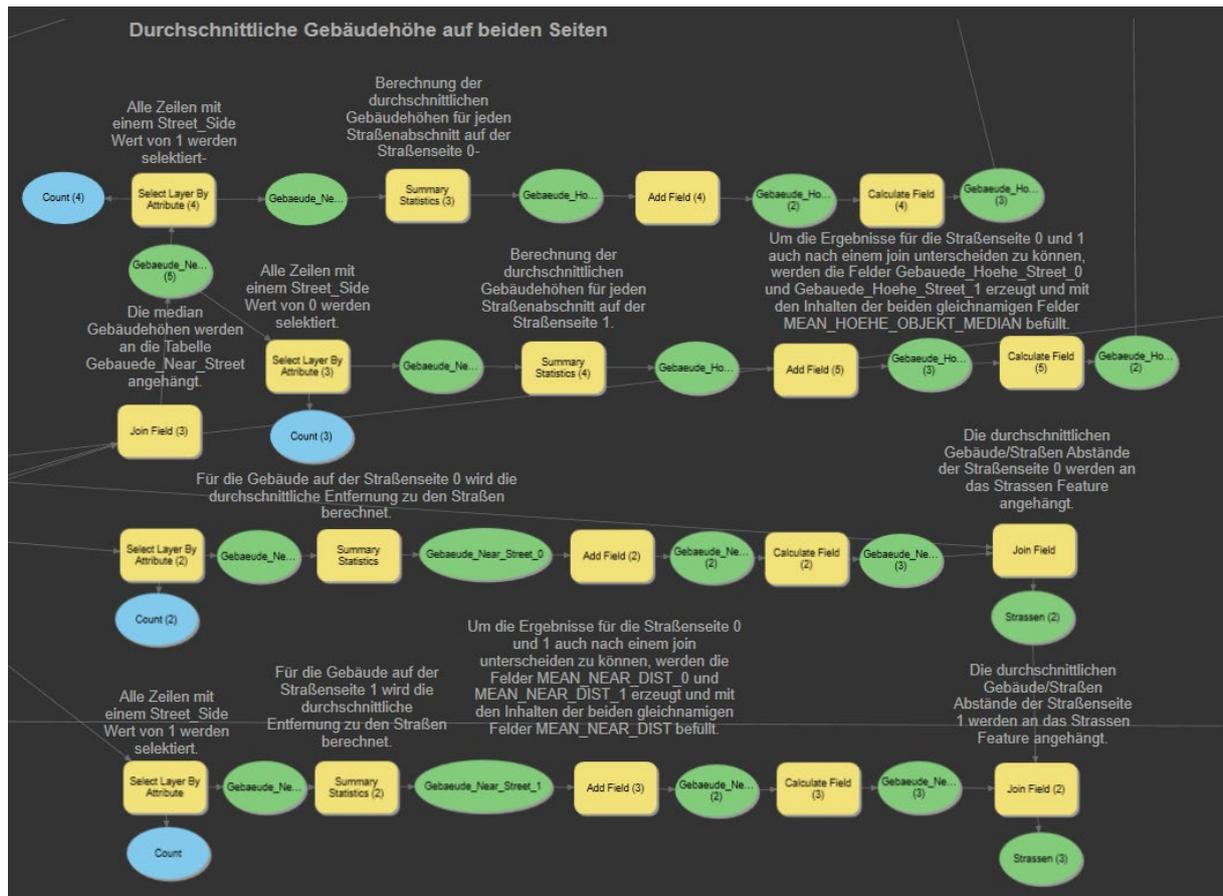


Abbildung 68: Prozessschritt „Durchschnittliche Gebäudehöhe auf beiden Seiten“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)

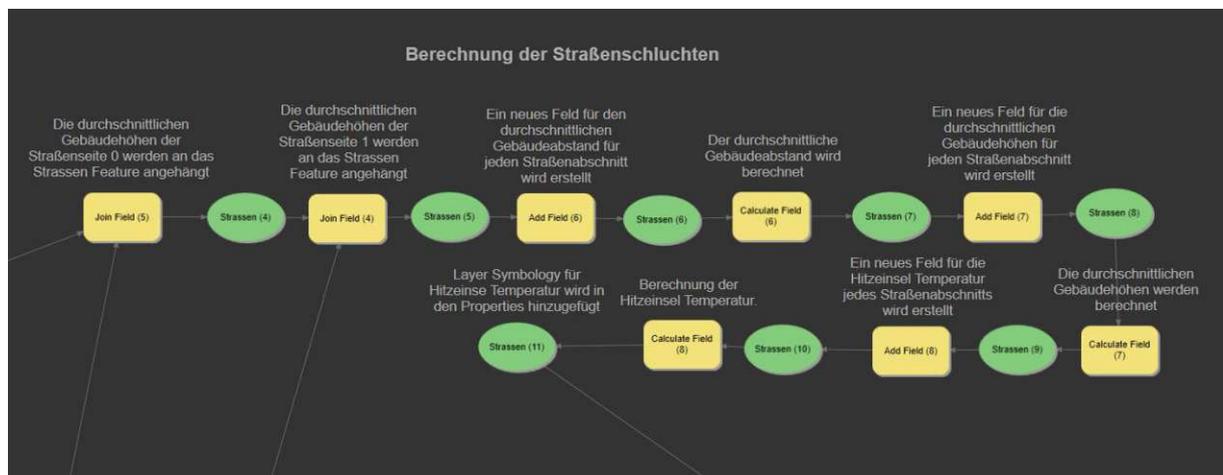


Abbildung 69: Prozessschritt „Berechnung der Straßenschluchten“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

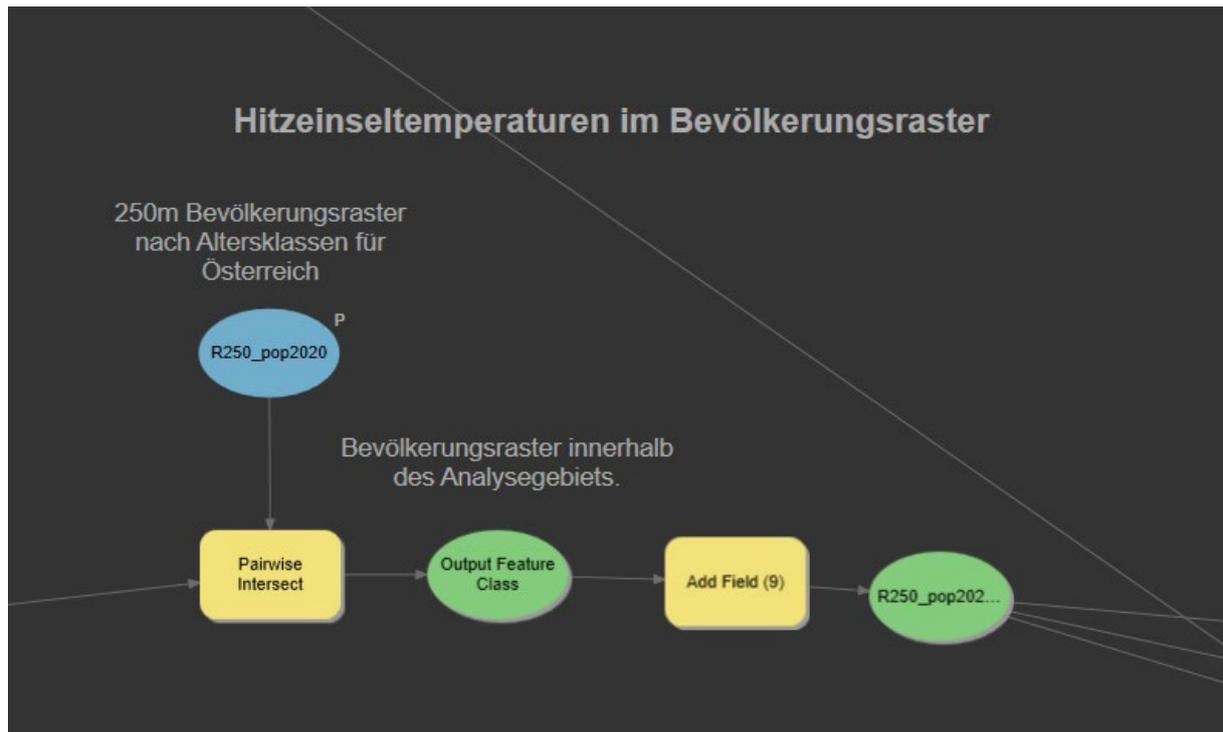


Abbildung 70: Prozessschritt „Hitzeinselttemperaturen im Bevölkerungsraster“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)

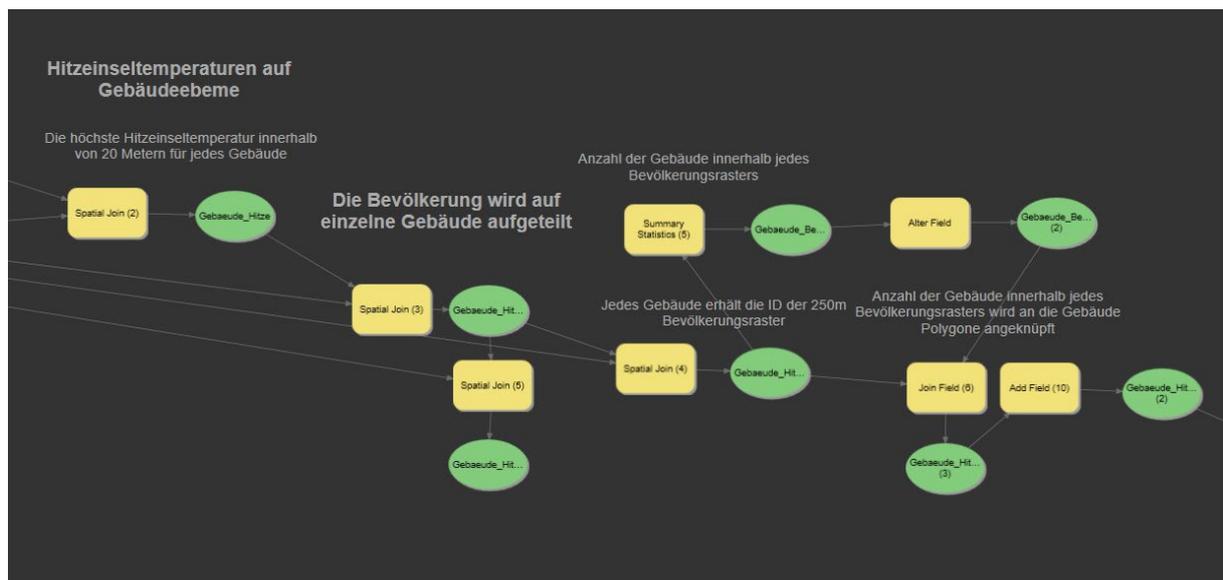


Abbildung 71: Prozessschritte „Hitzeinselttemperaturen auf Gebäudeebene“ und „Aufteilung der Bevölkerung auf einzelne Gebäude“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Abbildung 72: Prozessschritt „Umwandlung der Bevölkerungsfelder in den Datentyp Double“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)

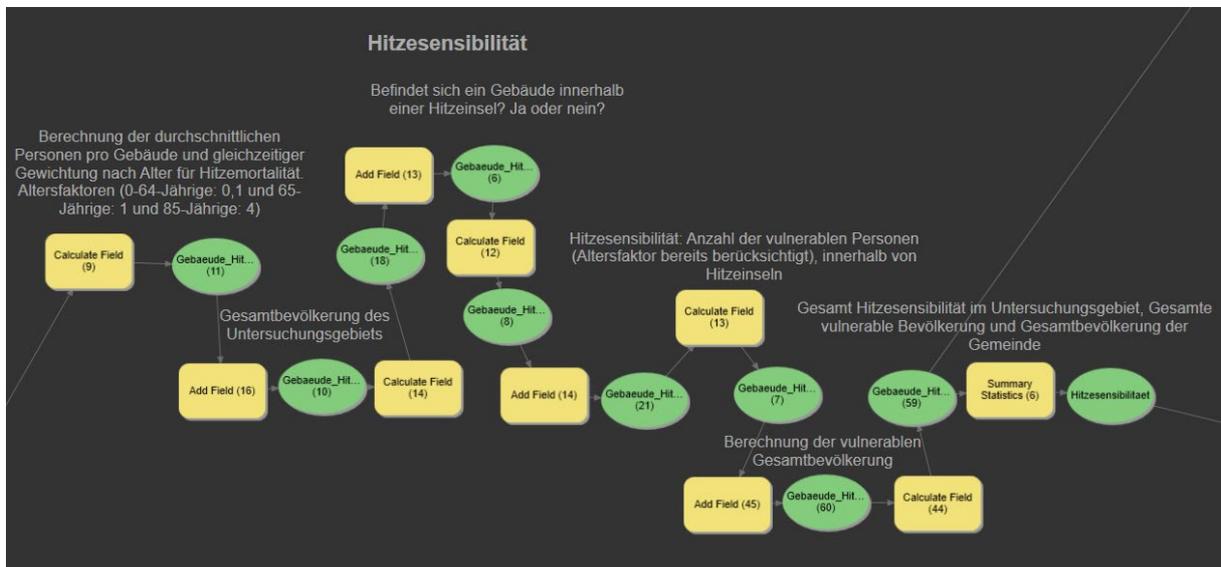


Abbildung 73: Prozessschritt „Berechnung der Hitze Sensibilität“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

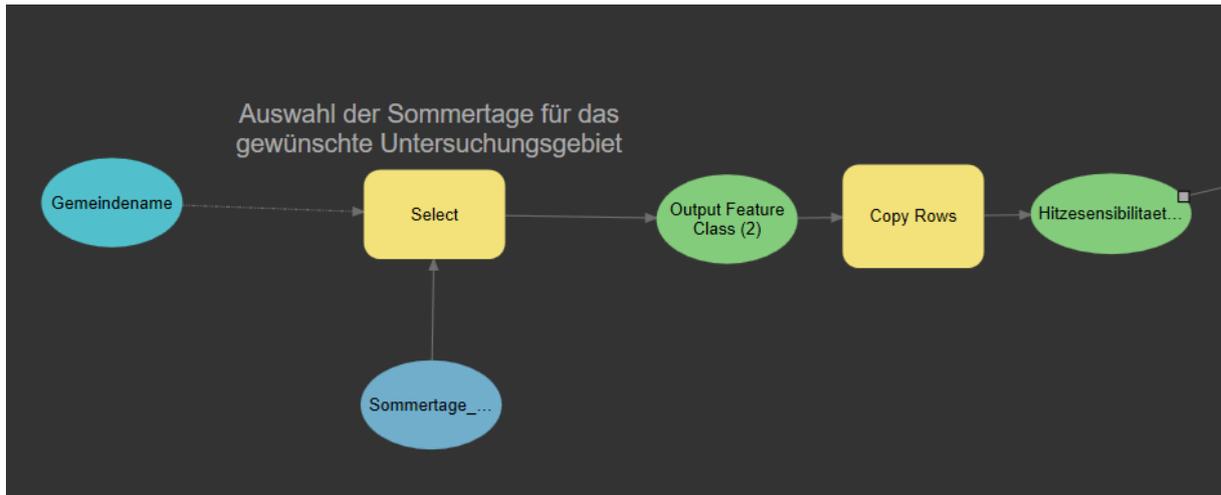


Abbildung 74: Prozessschritt „Auswahl der Sommertage für das gewünschte Untersuchungsgebiet“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)

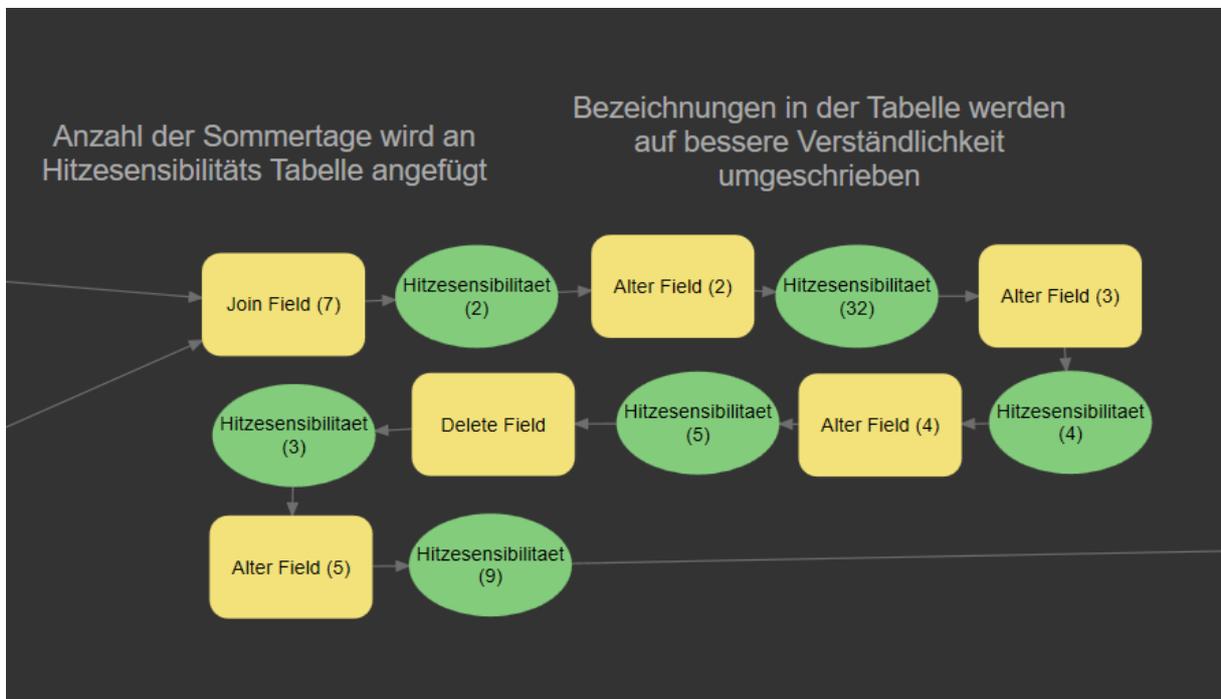


Abbildung 75: Prozessschritte „Anzahl der Sommertage wird an Hitzesensibilitaets-Tabelle angefügt“ und „Verständlichere Tabellenbezeichnungen werden erstellt“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

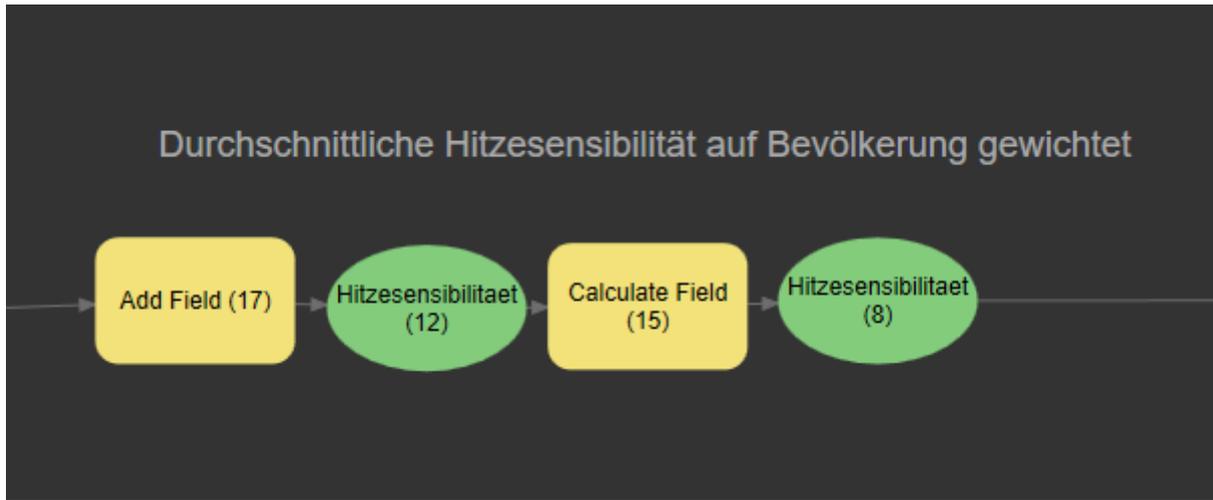


Abbildung 76: Prozessschritt „Durchschnittliche Hitzesensibilität auf Bevölkerung gewichtet“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)

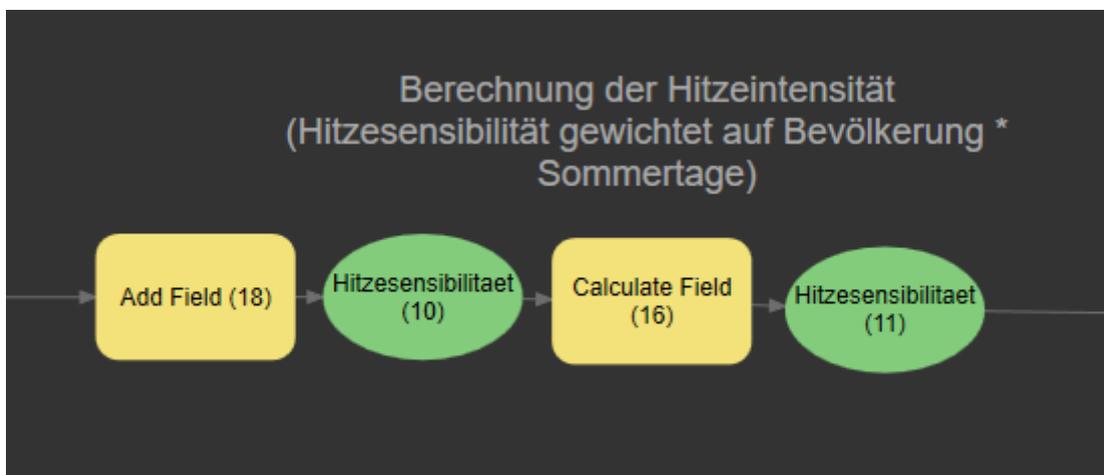


Abbildung 77: Prozessschritt „Berechnung der Hitzeintensität“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)

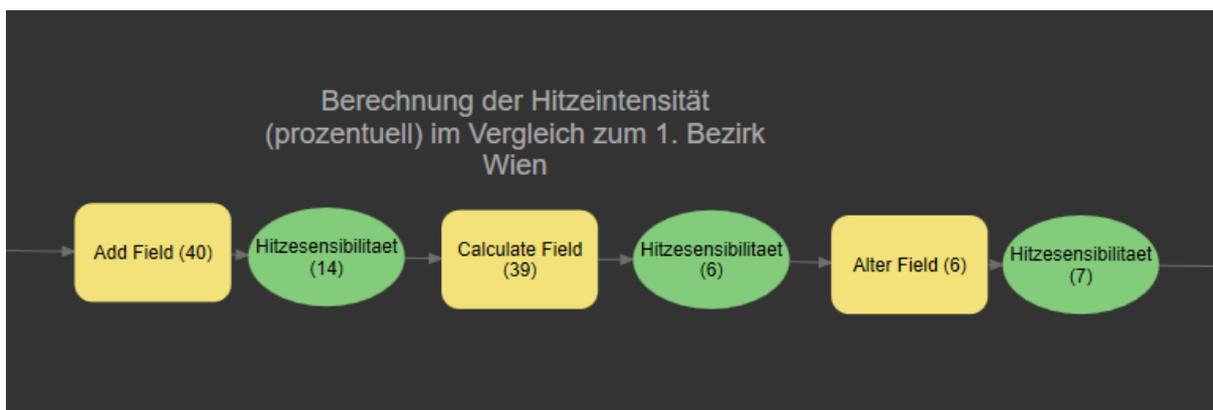


Abbildung 78: Prozessschritt „Berechnung der Hitzeintensität im Vergleich zum 1. Bezirk Wiens“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

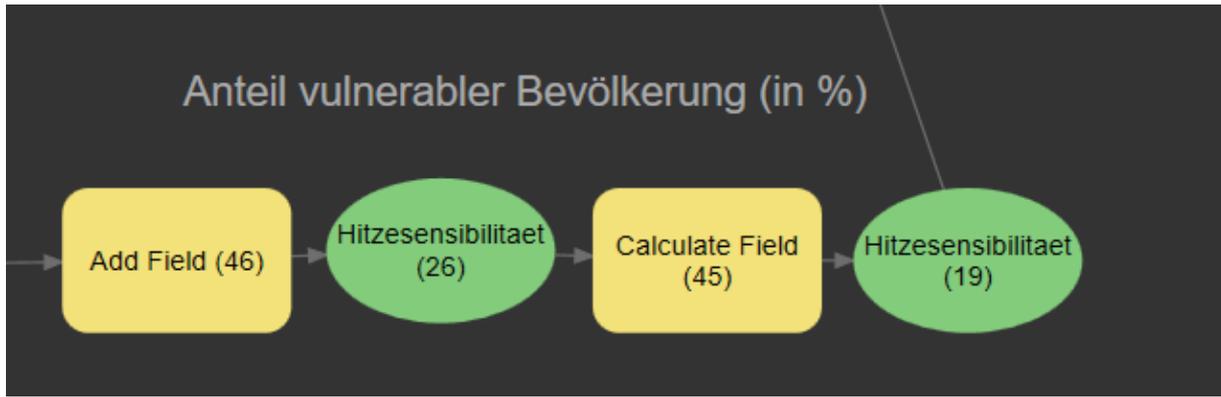


Abbildung 79: Prozessschritt „Anteil vulnerabler Bevölkerung“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)

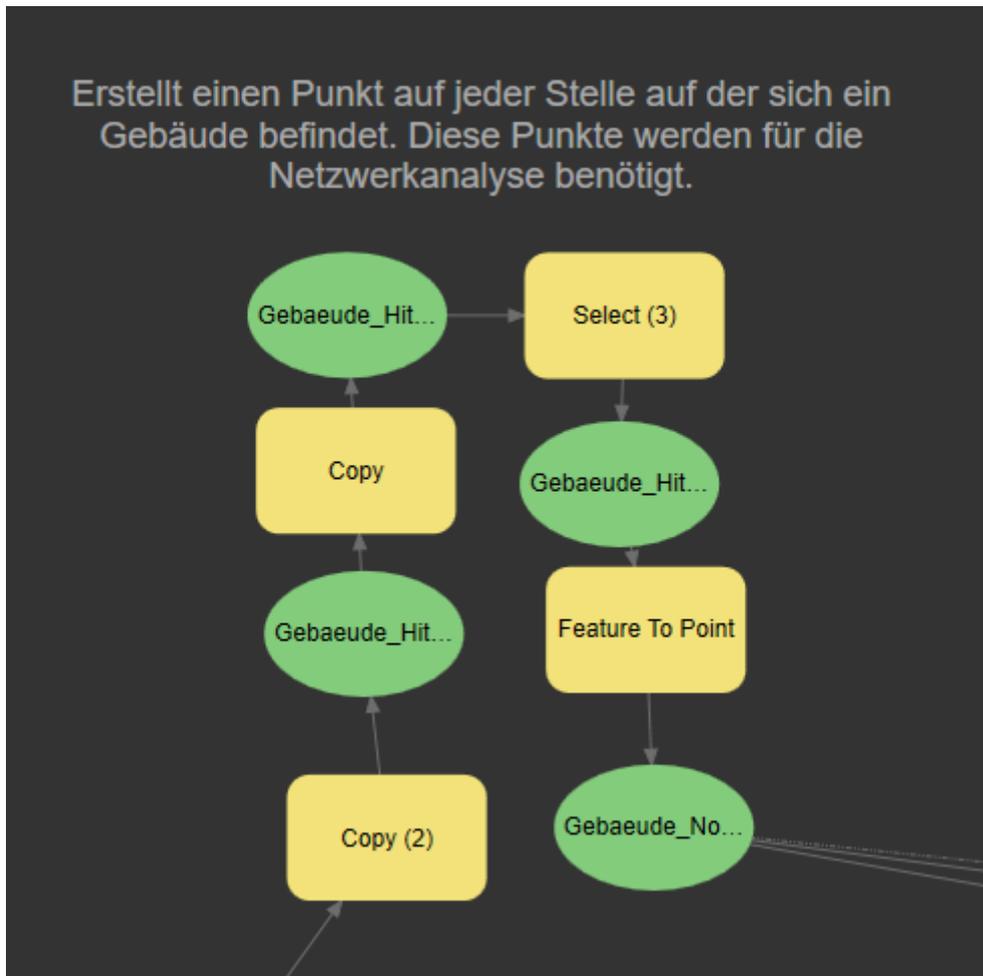


Abbildung 80: Prozessschritt „Erstellung der Gebäudepunkte für die Erreichbarkeitsanalyse“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

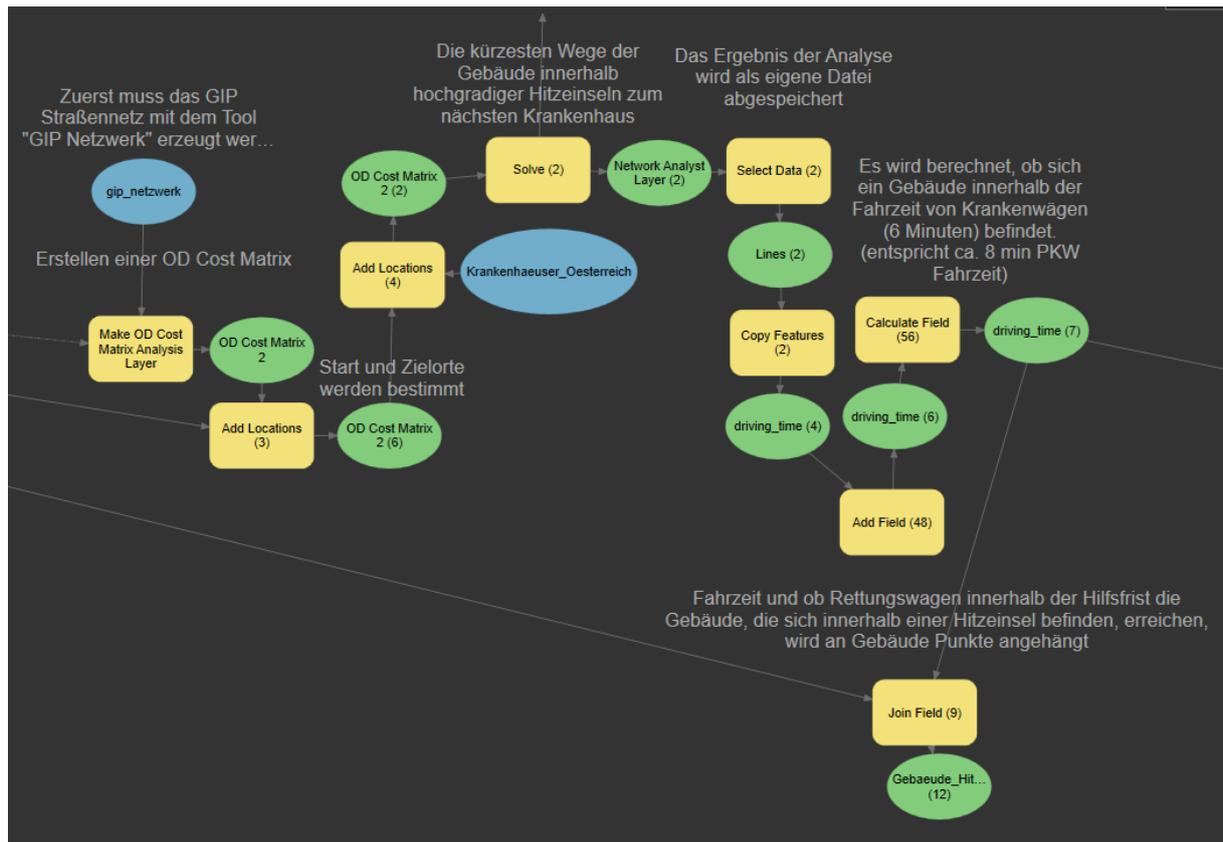


Abbildung 81: Prozessschritte „Erstellung einer OD Cost Matrix“, „Berechnung der kürzesten Wege der Gebäude innerhalb hochgradiger Hitzeinseln zum nächsten Krankenhaus“ und „Berechnung der Einhaltung der Hilfsfristen für alle Gebäude“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)

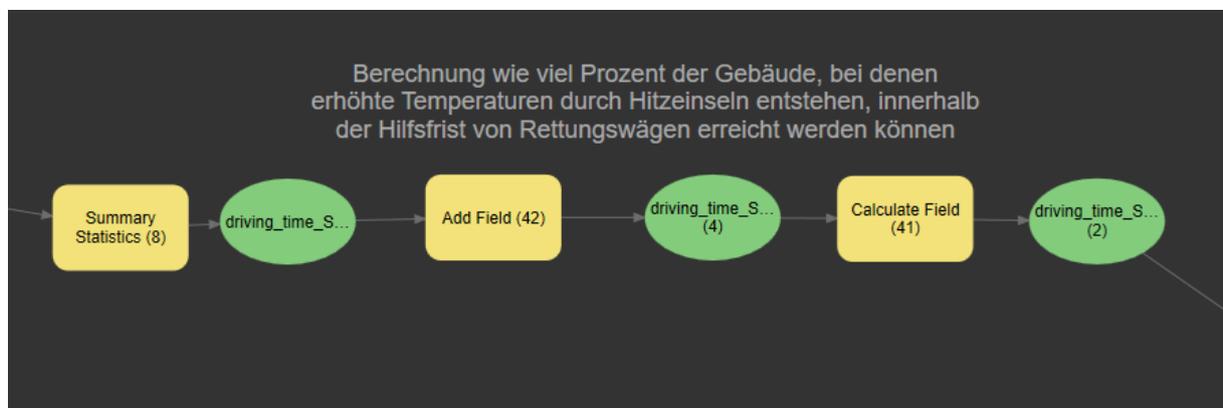


Abbildung 82: Prozessschritt „Wie viel Prozent der Gebäude innerhalb von hochgradigen Hitzeinseln können von Rettungswägen innerhalb der Hilfsfrist erreicht werden“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)

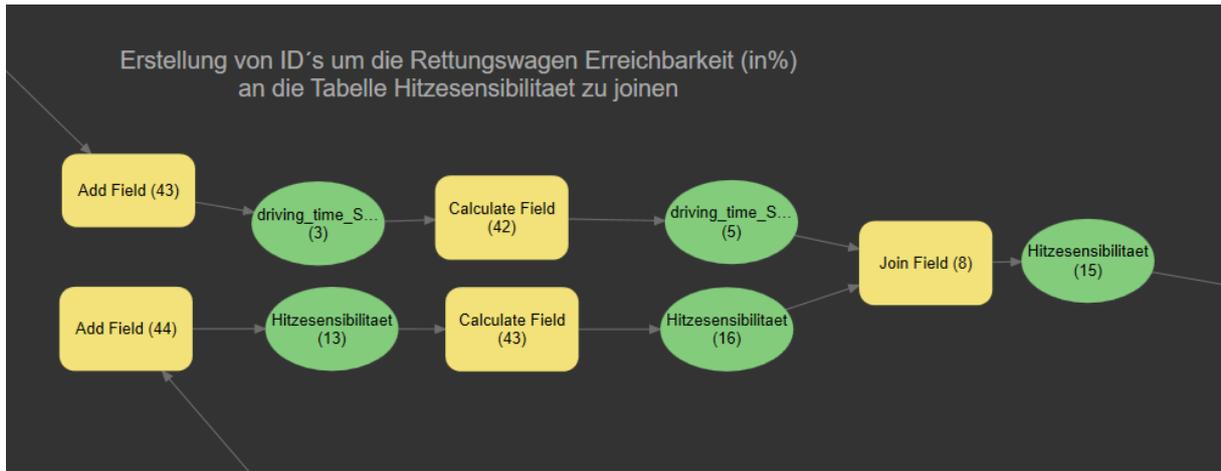


Abbildung 83: Prozessschritt „Rettungswagen Erreichbarkeit wird an Hitzesensibilitaets-Tabelle angefügt“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitaetsschnelltest" (eigene Darstellung)

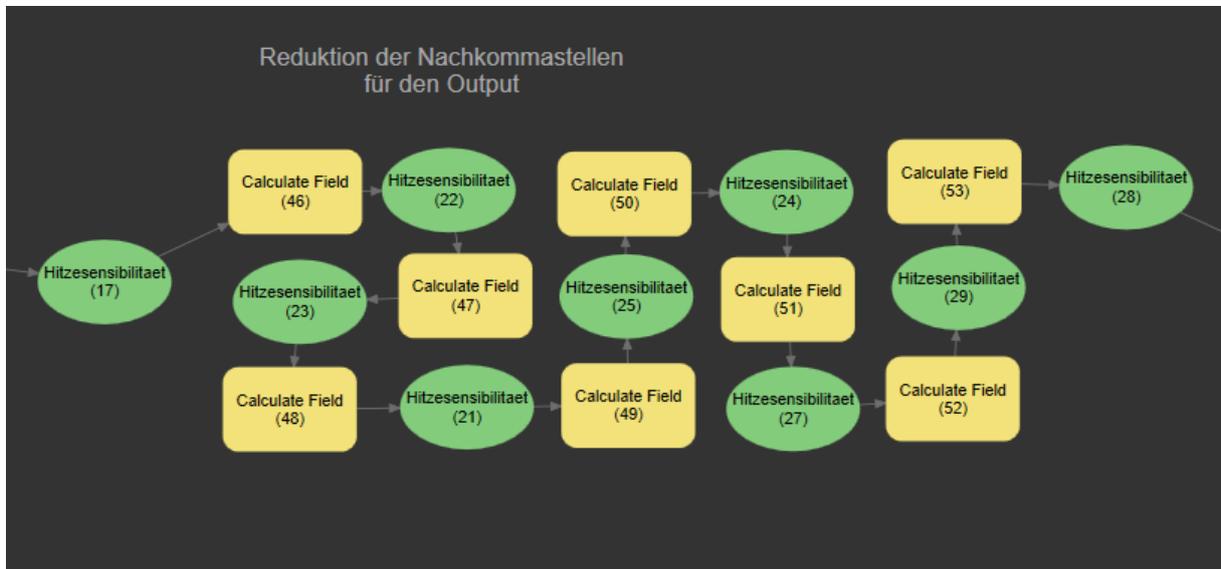


Abbildung 84: Prozessschritt „Reduktion der Nachkommastellen“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitaetsschnelltest" (eigene Darstellung)

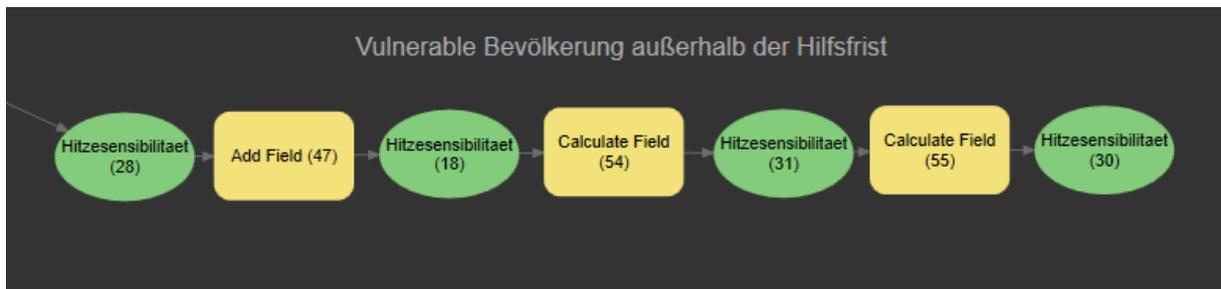


Abbildung 85: Prozessschritt „Berechnung der vulnerablen Bevölkerung außerhalb der Hilfsfrist“ des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tools "Hitzevulnerabilitaetsschnelltest" (eigene Darstellung)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Abbildung 86: Gesamtübersicht des selbst entwickelten ArcGIS Pro ModelBuilder Tool "Hitzevulnerabilitätsschnelltest" (eigene Darstellung)

Wien, am 20.12.2023