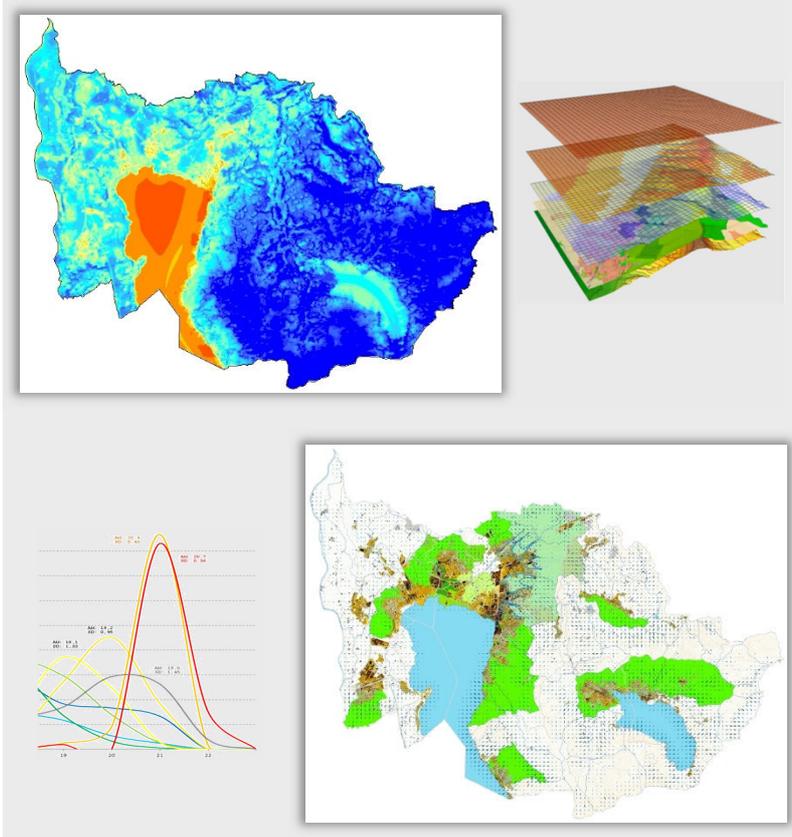


Analyse der klimaökologischen Funktionen und Prozesse für das Gebiet des Kantons Zug

Abschlussbericht



Auftraggeber:

Kanton Zug
Baudirektion
Amt für Umweltschutz
Aabachstrasse 5
6300 Zug



GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Grosse Pfahlstrasse 5a
3 0 1 6 1 Hannover
Tel. (0511) 3887200
FAX (0511) 3887201
www.geo-net.de



Inhaltsverzeichnis

Seite:

Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	III
Glossar.....	IV
1. Aufgabenstellung	6
2 Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis für die Modellrechnungen	8
3. Methode der modellgestützten Stadtklimaanalyse	12
3.1 Das Stadtklimamodell FITNAH 3D	12
3.2 Synoptische Rahmenbedingungen.....	13
3.3 Abgrenzung der klimaökologischen wirksamen Nutzungsstrukturen.....	14
3.4 Klimatische Grundlagen	16
3.4.1 Aktuelles Klima an der Wetterstation Wädenswil	16
3.4.2 Beobachteter Klimawandel in der Nordschweiz	17
4. Ergebnisse der Klimamodellierung.....	22
4.1 Nächtliches Temperaturfeld.....	22
4.2 Physiologisch Äquivalente Temperatur.....	24
4.3 Autochthones Windfeld	27
4.4 Kaltluftvolumenstrom	30
5 Klimaanalysekarte.....	35
5.1 Teilkarte 1: Überwärmung Nachtsituation.....	35
5.1 Teilkarte 2: Kaltlufthaushalt	36
6 Planungshinweiskarten Siedlungsklima.....	39
6.1 Vorgehensweise	39
6.1.1 Bewertung der Nachtsituation.....	39
6.1.2 Bewertung der Tagsituation.....	41
6.2 Ergebnisse	42
6.2.1 Nachtsituation.....	42
6.2.2 Tagsituation.....	44
7 Literatur	48



Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Prozessorientierte Analyse.....	6
Abb. 2.1: Geländehöhe im Untersuchungsgebiet und Messstation Wädenswil (gelber Umring).....	10
Abb. 2.2: Ausschnitt der Nutzungsstruktur im Modellgebiet	11
Abb. 3.1: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen	14
Abb. 3.2: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation.....	15
Abb. 3.3: Prinzipskizze Kaltluftleitbahn	16
Abb. 3.4: Klimadiagramm Station Wädenswil, Normperiode 1981 – 2010.....	17
Abb. 3.5: Entwicklung der sommerlichen Temperatur für die Nordschweiz unter 1.000 m ab 1864 bis heute im Vergleich zur Periode 1961 - 1990.....	18
Abb. 3.6: Entwicklung der Sommer- und Hitzetage an der Station Zürich/Fluntern.....	19
Abb. 3.7: Entwicklung der Tropennächte an der Station Zürich/Fluntern.....	20
Abb. 3.8: Entwicklung der sommerlichen Niederschlagssummen für die Nordschweiz unter 1.000 m ab 1864 bis heute im Vergleich zur Periode 1961 - 1990.....	21
Abb. 4.1: Temperaturfeld in der Stadt Zug zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund).....	23
Abb. 4.2: Temperaturfeld im Bereich in Unterägeri und Oberägeri zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)	24
Abb. 4.3: PET in der Stadt Zug zum Zeitpunkt 14 Uhr mittags (2m ü. Grund)	26
Abb. 4.4: PET im Bereich in Unterägeri und Oberägeri zum Zeitpunkt 14 Uhr mittags (2m ü. Grund).....	27
Abb. 4.5: Prinzipskizze Flurwind	28
Abb. 4.6: Bodennahes Windfeld zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens in der Stadt Zug (2m ü. Grund).....	30
Abb. 4.7: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom	31
Abb. 4.8: Veranschaulichung der Standardisierung zur vergleichenden Bewertung von Parametern	32
Abb. 4.9: Kaltluftvolumenstrom und bodennahes Windfeld zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens in der Stadt Zug (2m ü. Grund)	33
Abb. 5.1: Nächtlicher Wärmeinseleffekt im Siedlungsgebiet (Kernstadt Zug links, Unterägeri rechts).....	36
Abb. 5.2: Kaltlufthaushalt in der Nacht in der Stadt Zug (oben) und im Raum Unter-/Oberägeri (unten).....	38
Abb. 6.1: Planungshinweiskarte Nachtsituation in der Stadt Zug	43
Abb. 6.2: Planungshinweiskarte Tagsituation in der Stadt Zug (links) und Unterägeri (rechts).....	45
Abb. A.1: Workflow der Eingangsdatenaufbereitung für den Kanton Zug.....	51



Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung	8
Tab. 2.2: Übersicht über die unterschiedlichen Datenquellen mit Jahr und Quelle.....	9
Tab. 4.1: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden	25
Tab. 4.2: Qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms.....	32
Tab. 6.1: Bewertung des nächtlichen Wärmeinseleffekts im bebauten Siedlungsraum	41
Tab. 6.2: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden.....	42
Tab. 6.3: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise.....	44
Tab. 6.4: Bioklimatische Belastungssituation am Tage und abgeleitete Planungshinweise.....	46
Tab. 6.5: Aufenthaltsqualität von Grünareale am Tage und abgeleitete Planungshinweise.....	47



Glossar

Albedo: Rückstrahlvermögen einer Oberfläche (Reflexionsgrad kurzwelliger Strahlung). Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Lichtmenge. Die Albedo ist abhängig von der Beschaffenheit der bestrahlten Fläche sowie vom Spektralbereich der eintreffenden Strahlung.

Allochthone Wetterlage: Durch grossräumige Luftströmungen bestimmte Wetterlage, die die Ausbildung kleinräumiger Windsysteme und nächtlicher Bodeninversionen verhindert. Dabei werden Luftmassen, die ihre Prägung in anderen Räumen erfahren haben, herantransportiert.

Ausgleichsraum: Grüngestaltete, relativ unbelastete Freifläche, die an einen → *Wirkungsraum* angrenzt oder mit diesem über → *Kaltluftleitbahnen* bzw. Strukturen mit geringer Rauigkeit verbunden ist. Durch die Bildung kühlerer und frischerer Luft sowie über funktionsfähige Austauschbeziehungen trägt dieser zur Verminderung oder zum Abbau der Belastungen im Wirkungsraum bei. Mit seinen günstigen klimatischen und lufthygienischen Eigenschaften bietet er eine besondere Aufenthaltsqualität für Menschen.

Austauscharme Wetterlage: → *Autochthone Wetterlage*

Autochthone Wetterlage: Durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Wetterlage mit schwacher Windströmung und ungehinderten Ein- und Ausstrahlungsbedingungen, die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung gekennzeichnet ist. Die meteorologische Situation in Bodennähe wird vornehmlich durch den Wärme- und Strahlungshaushalt und nur in geringem Masse durch die Luftmasse geprägt, sodass sich lokale Klimate wie das Stadtklima bzw. lokale Windsysteme wie z.B. Berg- und Talwinde am stärksten ausprägen können.

Autochthones Windfeld: Strömungen, deren Antrieb im Betrachtungsgebiet selber liegt und die nicht durch grossräumige Luftdruckgegensätze beeinflusst werden, z.B. → *Kaltluftabflüsse* und → *Flurwinde*, die sich als eigenbürtige, landschaftsgesteuerte Luftaustauschprozesse während einer windschwachen sommerlichen → *autochthonen Wetterlage* ausbilden.

Bioklima: Beschreibt die direkten und indirekten Einflüsse von Wetter, Witterung und Klima (= atmosphärische Umgebungsbedingungen) auf die lebenden Organismen in den verschiedenen Landschaftsteilen, insbesondere auf den Menschen (Humanbioklima).

Flurwind: Thermisch bedingte, relativ schwache Ausgleichsströmung, die durch horizontale Temperatur- und Druckunterschiede zwischen vegetationsgeprägten Freiflächen im Umland und (dicht) bebauten Gebieten entsteht. Flurwinde strömen vor allem in den Abend- und Nachtstunden schubweise in Richtung der Überwärmungsbereiche (meist Innenstadt oder Stadtteilzentrum).

Grünfläche: Als „Grünfläche“ werden in dieser Arbeit unabhängig von ihrer jeweiligen Nutzung diejenigen Flächen bezeichnet, die sich durch einen geringen Versiegelungsgrad von maximal ca. 25 % auszeichnen. Neben Parkanlagen, Kleingärten, Friedhöfen und Sportanlagen umfasst dieser Begriff damit auch landwirtschaftliche Nutzflächen sowie Wälder.

Kaltluft: Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Untergrundes ist, und über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgrösse des Kaltluftvolumens, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003).

Kaltluftabfluss: Flächenhaft über unbebauten Hangbereichen auftretende Kaltluftabflüsse. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt diese sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung. Der Abfluss erfolgt schubweise. Er setzt bereits vor Sonnenuntergang ein und kann die ganze Nacht andauern.



Kaltlufteinwirkungsbereich: Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb des bebauten Siedlungsraumes (Siedlungsflächen innerhalb des Kantonsgebietes, die von einem klimatisch wirksamen → *Kaltluftvolumenstrom* $> 5 \text{ m}^3 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ überströmt werden).

Kaltluftentstehungsgebiete: Grünflächen mit einem überdurchschnittlichen → *Kaltluftvolumenstrom*, die → *Kaltluftleitbahnen* speisen (→ *Flurwinde* zeigen in Richtung der Kaltluftleitbahnen) bzw. über diese hinaus bis in das Siedlungsgebiet reichen.

Kaltluftleitbahnen: Kaltluftleitbahnen verbinden → *Kaltluftentstehungsgebiete* (→ *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche (→ *Wirkungsräume*) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Beinhalten thermisch induzierte Ausgleichsströmungen sowie reliefbedingte → *Kaltluftabflüsse*.

Kaltluftvolumenstrom: Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der → *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts einer 25 m Rasterzelle (Durchflussbreite). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an → *Kaltluft* in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer → *Kaltluftleitbahn* fließt. Anders als das → *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom somit auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.

Kelvin (K): SI-Basiseinheit der thermodynamischen Temperatur, die zur Angabe von Temperaturdifferenzen verwendet wird. Der Wert kann in der Praxis als Abweichung in Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$) interpretiert werden.

PET (Physiologisch äquivalente Temperatur): Humanbioklimatischer Index zur Kennzeichnung der Wärmebelastung des Menschen, der Aussagen zur Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombiniert und aus einem Wärmehaushaltsmodell abgeleitet wird.

Planungshinweiskarte: Bewertung der bioklimatischen Belastung im bebauten Siedlungsraum sowie an Strassen und Plätze im Kantonsgebiet (→ *Wirkungsräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als → *Ausgleichsräume* für die Tag- und die Nachtsituation und Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.

Städtische Wärmeinsel (Urban Heat Island): Städte weisen im Vergleich zum weitgehend natürlichen, un bebauten Umland aufgrund des anthropogenen Einflusses (u.a. hoher Versiegelungs- und geringer Vegetationsgrad, Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalt) ein modifiziertes Klima auf, das im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen führt. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet.

Strahlungswetterlage → *Autochthone Wetterlage*

Strömungsfeld: Für den Analysezeitpunkt 04:00 Uhr morgens simulierte flächendeckende Angabe zur Geschwindigkeit und Richtung der → *Flurwinde* sowie → *Kaltluftabflüsse* und → *Kaltluftleitbahnen* in 2 m über Grund während einer → *autochthonen Wetterlage*.

Strukturwind: Kleinräumiges Strömungsphänomen, das sich zwischen strukturellen Elementen einer Stadt ausbildet (bspw. zwischen einer innerstädtischen → *Grünfläche* und der Bebauung entlang einer angrenzenden Strasse).

Wirkungsraum: Bebauter oder zur Bebauung vorgesehener Raum (Siedlungs- und Gewerbeflächen), in dem eine bioklimatische oder lufthygienische Belastung auftreten kann.

z-Transformation: Umrechnung zur Standardisierung einer Variablen, sodass der arithmetische Mittelwert der transformierten Variable den Wert Null und ihre Standardabweichung den Wert Eins annimmt. Dies wird erreicht, indem von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und anschliessend durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Dadurch nehmen Abweichungen unterhalb des Gebietsmittels negative und Abweichungen oberhalb des Gebietsmittels positive Werte an, die in Vielfachen der Standardabweichung vorliegen. Die Form der Verteilung bleibt dabei unverändert.



1. Aufgabenstellung

Die Schutzgüter Klima bzw. Luft sind wichtige Aspekte der räumlichen Planung und Bestandteile der Abwägung in der Nutzungsplanung, Umweltverträglichkeitsprüfung und bei Massnahmen in der Bestandsbebauung. Vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zur sachgerechten Beurteilung dieser Schutzgüter. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas sowie der dadurch mitbestimmten lufthygienischen Situation und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmassnahmen zur Verbesserung von Klima und Luft ableiten. Dieser Leitgedanke gilt der Sicherung, Entwicklung und Wiederherstellung klima- und immissionsökologisch wichtiger Oberflächenstrukturen und zielt auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse und die Unterstützung gesundheitlich unbedenklicher Luftqualität ab.

Im Auftrag der Baudirektion des Kantons Zug wurde vom Büro GEO-NET Umweltconsulting GmbH in Kooperation mit Prof. Dr. G. Gross (Universität Hannover, Deutschland) im Zeitraum 2018 bis 2020 eine modellgestützte Analyse zu den klimaökologischen Funktionen für das Kantonsgebiet durchgeführt.

Im Vordergrund standen dabei austauscharme sommerliche Hochdruckwetterlagen (auch autochthone Wetterlagen genannt), die häufig mit einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung in den Siedlungsräumen einhergehen. Technisch ermöglichen nur solche Wetterlagen eine Analyse der lokalklimatischen Situation, da übergeordnete Wetterphänomene aufgrund von grossräumigen Luftdruckdifferenzen die zu analysierenden lokalen Phänomene nicht überlagern. Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen können nächtliche Kalt- und Frischluftströmungen aus dem Umland und Grünflächen im Siedlungsraum zum Abbau der Belastungen beitragen (Abb. 1.1).

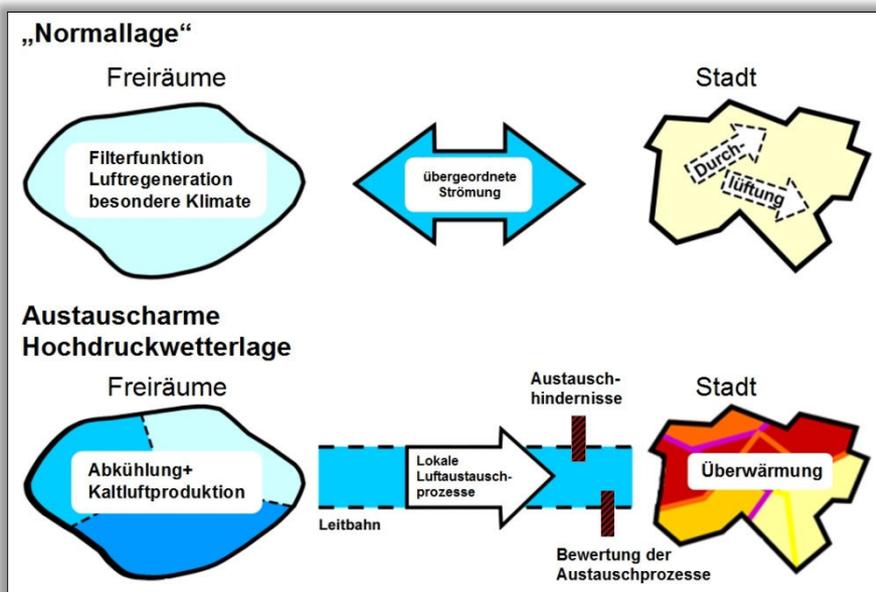


Abb. 1.1: Prozessorientierte Analyse

Zwischen klimatisch wirksamen Grün-/Freiflächen einerseits und städtisch verdichteten Bereichen andererseits sowie verbindender Strukturen ergibt sich ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen im Gebiet des Kantons Zug.

Wesentliches Ziel der Analyse ist, mit der Anwendung des Klimamodells FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat Sources) und den aus der Klimaanalyse gewonnenen Ergebnissen



umfassende Bestandsaufnahme der klimatischen Situation im Kantonsgebiet durchzuführen. Weiterhin besteht das Ziel, klimaökologisch wichtige und bioklimatisch belastete Raumstrukturen herauszuarbeiten und darzustellen. Im Gegensatz zu punkthaften Messungen liegen mit dem modellgestützten Ansatz flächendeckende Daten zum Kaltlufthaushalt für das gesamte Kantonsgebiet vor. Diese erlauben eine optimierte Darstellung der thermischen Belastung und insbesondere des Kaltluftprozessgeschehens in der Nacht. Die Ergebnisse spiegeln neben der Nacht-Situation auch die bioklimatische Belastung am Tage wider (Planungshinweiskarten). Darüber hinaus werden, getrennt für die Nacht- und Tagsituation, eine Bewertung der bioklimatischen Belastung in den Siedlungsräumen bzw. der Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsräume vorgenommen und allgemeine Planungshinweise abgeleitet. Der vorliegende Bericht stellt die Stadtklimaanalyse dar und geht auf die Methodik der Modellrechnung sowie die Analyse- und Planungshinweiskarten ein. Zudem werden die Ergebnisse der lufthygienischen Situation erläutert.



2 Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis für die Modellrechnungen

Bei einem numerischen Modell wie FITNAH 3D werden zur Festlegung und Bearbeitung der Aufgabenstellung eine Reihe von Eingangsdaten benötigt, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind und die grösserskaligen meteorologischen Rahmenbedingungen wie Wetterlage oder Klimaszenario definieren. Das Untersuchungsgebiet für den Kanton Zug wird als rechteckiges Rechengebiet aufgespannt und umfasst damit 473 km². Für eine horizontale 10 x 10 m Auflösung sind das ca. 4,7 Mio. Rasterzellen. Für jede Rasterzelle müssen jeweils als repräsentativer Wert folgende Daten vorliegen:

- Geländehöhe (z.B. Geländehöhe, Neigung, Orientierung)
- Nutzungsstruktur (Verteilung der Landnutzung, Bodenbedeckung)
- Strukturhöhe (Gebäude- und Vegetationshöhen)
- Versiegelungsgrad.

Die Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Nutzungsstruktur mit dem jeweiligen Versiegelungsgrad und der Höhe. Für die Gebäude und Vegetationsklassen (Klasse 6 bis 10) werden die Höhenangaben aus den vorhandenen Datensätzen übertragen.

Tab. 2.1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung

Nutzungs- klasse	Beschreibung	Versiegelungsgrad [%]	Strukturhöhe [m]
1	einzelne, freistehende Gebäude	100	individuell
3	unbebaut versiegelt (Strassen)	95	0
4	Gewässer	0	0
5	Gleis	25	0,5
6	Rasen plus niedrige Vegetation	5	individuell
7	naturferne Böden mit niedriger Vegetation	25	individuell
8	versiegelt plus hohe Vegetation	90	individuell
9	hohe Vegetation über Rasen = grössere zusammenhängende Waldflächen	0	individuell
10	kleinere Strassen/Wege innerhalb von Waldgebieten	30	individuell
11	freiliegender Fels	95	0
12	Geröll, Sand, naturferner Boden ohne Vegetation	0	0

Da der Kanton Zug in einer 10 m Auflösung, also mikroskalig simuliert wurde, sind Gebäude sowohl in Bezug auf ihren Grundriss (aus der Bodenbedeckung der amtlichen Vermessung) als auch ihrer Höhe erfasst, sodass deren Effekte auf das Mikroklima und insb. das Strömungsfeld berücksichtigt werden. Weiterhin wurde das Digitale Oberflächenmodell (DOM) für die Ableitung der Gebäudehöhen und der gerade verfügbare aktuelle LIDAR- Datensatz CHM 2019 (Canopy Height Model) zur Vegetation mit Lage



und Strukturhöhen von Grünbeständen verwendet, ausserhalb des Kantons wurde das schweizweite Vegetationshöhenmodell herangezogen (Ginzler und Hobi 2015). Die räumliche Auflösung von 10 m ermöglichte eine detaillierte Erfassung von Grünstrukturen, allerdings konnten einzelne (insb. kleinkronige) Bäume auf dieser Masstabsebene noch nicht separat ausgewiesen werden.

Die anderen Nutzungsklassen aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..1** wurden über Look-Up Tabellen, die auf die Kategorien der Bodenbedeckung zugegriffen haben, in die Eingangsdaten für FITNAH übertragen. Die Versiegelungsgrade wurden ebenfalls für die Nutzungsklassen per Look-Up-Tabellen übertragen (siehe Tabelle 2.1). Die Herausforderung in der Aufbereitung der Eingangsdaten liegt vor allem in der Harmonisierung der einzelnen Datensätze zwischen den Schweizer Kantonen.

Tab. 2.2: Übersicht über die unterschiedlichen Datenquellen mit Jahr und Quelle.

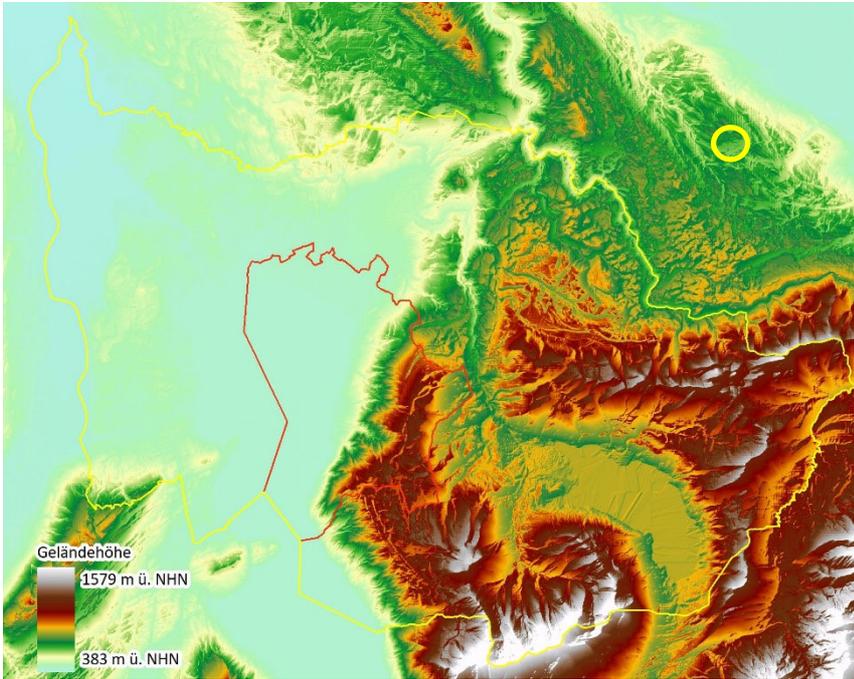
Kanton	Nutzung	Strukturhöhe Vegetation	Strukturhöhe Gebäude	Gelände modell
Zug	Amtliche Vermessung Bodenbedeckung: (www.geodienste.ch , 2019)	LIDAR CHM 2019	Gebäudehöhen aus LIDAR DOM 2019, SwissBuildings 3d	LIDAR DTM 2019
Aargau, Zürich, Luzern, Schwyz	Amtliche Vermessung Bodenbedeckung	Schweizweites Vegetationshöhenmodell von 2018, 1x1m Auflösung, aus Luftbildern abgeleitet, erstellt vom Swiss National Forest Inventory (http://www.mdpi.com/2072-4292/7/4/4343 https://www.envidat.ch/dataset/vegetation-height-model-nfi)	Empirische Werte: 12m Gebäude	SRTM 30m

Die LIDAR Daten, SwissBuildings und weitere Gebäudedaten aus Tabelle 2.2 wurden im Jahr 2019 vom Kanton Zug übermittelt und repräsentieren damit den Stand des Jahres 2019. Die Bodenbedeckungslayer wurden aus dem Internet mit Stand 2019 heruntergeladen.

Die **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** im Anhang zeigt den Workflow der Datenaufbereitung. Die grau hinterlegten Boxen sind dabei die Eingangsdaten und die dunkelgrün eingefärbten Boxen stellen die Eingangsdaten für FITNAH-3D dar.



Bei einer Gesamtgrösse des Untersuchungsraums von ca. 470 km² geht die Abgrenzung des Simulationsraumes deutlich über das Kantonsgebiet hinaus und zielt darauf ab, auch ausserhalb des Kantonsgebietes vorhandene Strukturen wie Wald- und Ackerflächen in die Klimamodellierung zu integrieren und die relevanten



Höhenzüge für den Kanton zu erfassen. Somit ist gewährleistet, dass alle für den Kaltlufthaushalt relevanten Struktureinheiten - insbesondere des Reliefs - berücksichtigt werden. Die für die FITNAH-Modellierung vorgesehene Rasterzellenauflösung beträgt 10 m. Zur Bereitstellung der orographischen Eingangsparameter für die Klimaanalyse konnte auf ein digitales Geländehöhenmodell (DTM aus dem Jahr 2019) mit einer Auflösung von 10 m zurückgegriffen werden, welches

Abb. 2.1: Geländehöhe im Untersuchungsgebiet und Messstation Wädenswil (gelber Umring)

das gesamte Kantonsgebiet repräsentiert. Die umliegenden Kantone wurden mit den frei verfügbaren SRTM Daten aufgefüllt und in den Randbereichen harmonisiert (Abb. 2.1).

Für die Aufbereitung der Nutzungsstrukturen wurden im Wesentlichen Daten aus der Informationsebene Bodenbedeckung (Amtliche Vermessung; Datenstand Mai 2018) verwendet sowie weitere zur Verfügung gestellte Eingangsdaten, die bspw. die noch nicht enthaltenen Gebäude in der Bodenbedeckung beinhalteten. Um den speziellen Anforderungen der Modellanalyse gerecht werden zu können, wurde bei der Aufbereitung der Nutzungsstrukturen ein 11-klassiger Nutzungsschlüssel verwendet (siehe Tabelle 2.1). Der Schlüssel wurde vor allem auch dahingehend definiert, eine problemlose Zuweisung des mittleren Versiegelungsgrades auf Basis der in den Eingangs- und Literaturdaten vorkommenden Nutzungsklassifizierungen zu ermöglichen (Mosimann et al. 1999). Die Abbildung 2.2 zeigt die rasterbasierten Eingangsdaten für den gesamten Kanton für die FITNAH-Modellrechnung mit einer Auflösung von 10 m x 10 m.

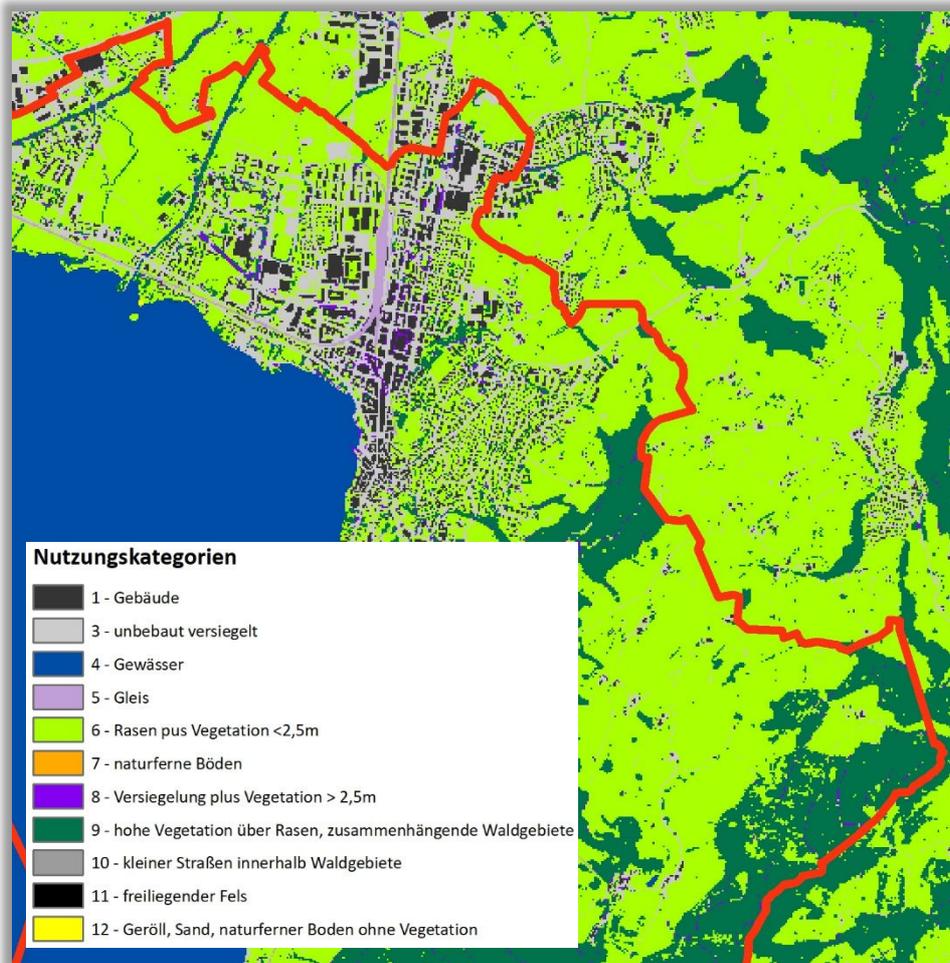


Abb. 2.2: Ausschnitt der Nutzungsstruktur im Modellgebiet

Ein wichtiger Modelleingangsparameter stellt darüber hinaus die Höhe der Baustrukturen und der Vegetation dar, welche einen wesentlichen Einfluss auf das lokale Windfeld ausüben, weil sie als Hindernisse wirken. Da bei der 10 x 10 m Masstabsebene Einzelgebäude und Baumgruppen aufgelöst werden können, sind die realen Gebäude- und Vegetationshöhen auf das Rechenraster übertragen worden. Weiteren massgeblichen Einfluss auf die meteorologischen Parameter üben die Flächeneigenschaften wie der Versiegelungsgrad aus. Dieser wird wie in Tabelle 2.1 dargestellt den jeweiligen Nutzungsklassen angehängt. Diese Werte beruhen auf Analyse und Auswertung von Versiegelungsgraden deutscher Städte. Aus der Verknüpfung der unterschiedlichen Quellen ist somit eine aktuelle Informationsebene zur Nutzung, Strukturhöhe und Oberflächenversiegelung aufgebaut worden.



3. Methode der modellgestützten Stadtklimaanalyse

3.1 Das Stadtklimamodell FITNAH 3D

Neben globalen Klimamodellen und regionalen Wettervorhersagemodellen wie sie zum Beispiel vom Deutschen Wetterdienst (DWD) oder in der Schweiz von der MeteoSchweiz für die tägliche Wettervorhersage routinemässig eingesetzt werden, nehmen kleinräumige Modellanwendungen für umweltmeteorologische Zusammenhänge im Rahmen von stadt- und landschaftsplanerischen Fragestellungen einen immer breiteren Raum ein. Die hierfür eingesetzten mikro- und mesoskaligen Modelle erweitern das Inventar meteorologischer Werkzeuge zur Berechnung atmosphärischer Zustände und Prozesse. Der Grossteil praxisnaher umweltmeteorologischer Fragestellungen behandelt einen Raum von der Grössenordnung einer Stadt bzw. Region. Die bestimmenden Skalen für die hier relevanten meteorologischen Phänomene haben eine räumliche Erstreckung von Metern bis hin zu einigen Kilometern und eine Zeitdauer von Minuten bis Stunden. Unter Verwendung des üblichen Einteilungsschemas meteorologischer Phänomene werden diese in die Meso- und Mikroskala eingeordnet. Beispiele für mesoskalige Phänomene sind Land-See-Winde, Flurwinde oder die Ausbildung einer städtischen Wärmeinsel, wobei der Übergang zur Mikroskala fließend ist (bspw. der Einfluss von Hindernissen auf den Wind wie Kanalisierung, Umströmung bzw. Düseneffekte, aber auch die klimaökologischen Auswirkungen von Begrünungsmassnahmen).

Obwohl die allgemeine Struktur und physikalischen Ursachen dieser lokalklimatischen Phänomene im Wesentlichen bekannt sind, gibt es nach wie vor offene Fragen hinsichtlich der räumlichen Übertragbarkeit auf andere Standorte oder der Sensitivität bezüglich der Wechselwirkungen einzelner Strömungssysteme untereinander. Ein Grund hierfür sind die relativ kleinen und kurzen Skalen dieser Phänomene und deren unterschiedliches Erscheinungsbild in komplexem Gelände. Entsprechend ist es schwierig aus einer beschränkten Anzahl von Beobachtungen eine umfassende Charakterisierung zu erhalten, jedoch kann dieser Nachteil mit Hilfe ergänzender Modelluntersuchungen überwunden werden.

Beginnend mit einem Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG 1988) wurden gerade in Deutschland eine Reihe mesoskaliger Modelle konzipiert und realisiert. Der heutige Entwicklungsstand dieser Modelle ist sehr hoch und zusammen mit den über die letzten Dekaden gewonnenen Erfahrungen im Umgang mit diesen Modellen steht neben Messungen vor Ort und Windkanalstudien ein weiteres leistungsfähiges und universell einsetzbares Werkzeug zur Bearbeitung umweltmeteorologischer Fragestellungen in kleinen, stadt- und landschaftsplanerisch relevanten Landschaftsausschnitten zur Verfügung.

GRUNDLAGEN MESO- UND MIKROSKALIGER MODELLE

Die Verteilung lokalklimatisch relevanter Grössen wie Wind und Temperatur können mit Hilfe von Messungen ermittelt werden. Aufgrund der grossen räumlichen und zeitlichen Variation der meteorologischen Felder im Bereich einer komplexen Umgebung sind Messungen allerdings nur punktuell repräsentativ und eine Übertragung in benachbarte Räume selten möglich. Stadtklimamodelle wie FITNAH



3D können zu entscheidenden Verbesserungen dieser Nachteile herangezogen werden, indem sie physikalisch fundiert die räumlichen und/oder zeitlichen Lücken zwischen den Messungen schliessen, weitere meteorologische Grössen berechnen und Wind- bzw. Temperaturfelder in ihrer raumfüllenden Struktur ermitteln. Die Modellrechnungen bieten darüber hinaus den Vorteil, dass Planungsvarianten und Ausgleichsmassnahmen in ihrer Wirkung und Effizienz studiert und auf diese Art und Weise optimierte Lösungen gefunden werden können.

Für jede meteorologische Variable wird eine physikalisch fundierte mathematische Berechnungsvorschrift aufgestellt. Die Modelle basieren daher, genauso wie Wettervorhersage- und Klimamodelle, auf einem Satz sehr ähnlicher Bilanz- und Erhaltungsgleichungen. Das Grundgerüst besteht aus den Gleichungen für die Impulserhaltung (Navier-Stokes Bewegungsgleichung), der Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung) und der Energieerhaltung (1. Hauptsatz der Thermodynamik). Je nach Problemstellung und gewünschter Anwendung kann dieses Grundgerüst erweitert werden, um z.B. die Effekte von Niederschlag auf die Verteilung stadtklimatologisch wichtiger Grössen zu berücksichtigen. In diesem Falle müssen weitere Bilanzgleichungen für Wolkenwasser, Regenwasser und feste Niederschlagspartikel gelöst werden. Die Lösung der Gleichungssysteme erfolgt in einem numerischen Raster. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom jeweiligen Modell erfasst werden können. Je feiner das Raster gewählt wird, umso mehr Details und Strukturen werden aufgelöst.

Allerdings steigen mit feiner werdender Rasterweite die Anforderungen an Rechenzeit und die benötigten Eingangsdaten. Hier muss ein Kompromiss zwischen Notwendigkeit und Machbarkeit gefunden werden. In der vorliegenden Untersuchung beträgt die für die Modellierung mit FITNAH 3D verwendete horizontale räumliche Maschenweite 10 m. Die vertikale Gitterweite ist dagegen nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Grössen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 4, 10, 15, 20, 30, 40, 50 und 70 m über Grund (ü. Gr.). Nach oben hin wird der Abstand immer grösser und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m ü. Gr. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Orographie und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind. Die Auswertungen der FITNAH-Modellierung beziehen sich auf das bodennahe Niveau der Modellrechnung (2 m ü. Gr. = Aufenthaltsbereich der Menschen).

3.2 Synoptische Rahmenbedingungen

Während sogenannter autochthoner („eigenbürtiger“) Wetterlagen können sich die lokalklimatischen Besonderheiten in einer Stadt besonders gut ausprägen, da es nur eine geringe „übergeordnete“ Windströmung gibt. Eine solche Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwachen überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten einer Stadt besonders gut ausprägen. Dahingehend wurden die grossräumigen synoptischen Rahmenbedingungen folgendermassen festgelegt:



- Relative Feuchte der Luftmasse 50 %
- Bedeckungsgrad 0/8
- Kein überlagernder geostrophischer Wind
- 21 °C Lufttemperatur über Freiland um 21:00 Uhr

Die vergleichsweise geringen Windgeschwindigkeiten bei einer austauscharmen Wetterlage bedingen einen herabgesetzten Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht und tragen zur Anreicherung von Luftschadstoffen bei. Bei gleichzeitiger Wärmebelastung in den Siedlungsflächen können sich lokal bioklimatische und lufthygienische Belastungsräume ausbilden. Diese Wettersituation stellt damit ein „Worst-Case“-Szenario dar. Charakteristisch für diese (Hochdruck-) Wetterlage ist hingegen die Entstehung eigenbürtiger Kaltluftströmungen (Flurwinde und Kaltluftabflüsse), die durch den Temperaturgradienten zwischen kühlen Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetrieben werden und zu einem Abbau der Belastungen beitragen. In Abb. 3.1 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage simulierten tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt.

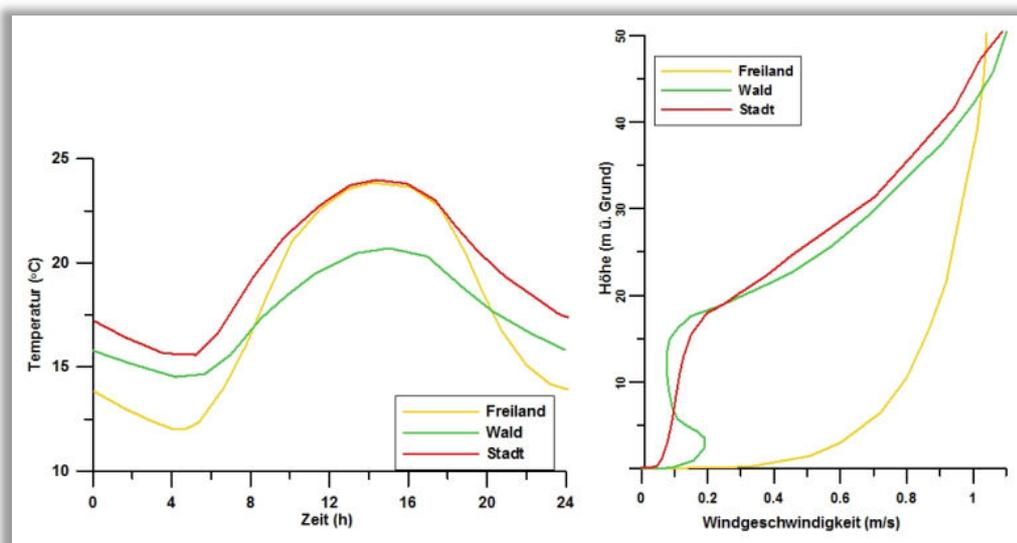


Abb. 3.1: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen

Hinsichtlich des Temperaturverlaufs zeigt sich, dass sowohl Freiflächen wie z.B. Wiesen als auch Bebauung ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, die nächtliche Abkühlung der Siedlungsflächen vor allem durch die Wärme speichernden Materialien hingegen deutlich geringer ist. Bei den durch Wiese geprägten Grünflächen trägt der Mangel an Verschattung zum hohen Temperaturniveau bei, während hier nachts die Abkühlung am stärksten ist. Waldflächen nehmen eine vermittelnde Stellung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird der Einfluss von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.

3.3 Abgrenzung der klimaökologischen wirksamen Nutzungsstrukturen

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den flächenhaft vorliegenden Nutzungsinformationen punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Maschenweite von 10 m zu erzeugen. Aus diesen



punkthaften Repräsentationen der Eingangsvariablen ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten Modellergebnisse in Form feldhaft berechneter Klimaparameter (Abb. 3.2). Qualifizierende Aussagen zur bioklimatischen Bedeutung bestimmter Areale können sich allerdings nicht auf einzelne Rasterzellen beziehen. Hierfür muss eine Zonierung des Untersuchungsraumes in klimatisch ähnliche Flächeneinheiten erfolgen. Diese sollten in der Realität nachvollziehbar und administrativ oder nutzungstypisch abgrenzbar sein. Um die Ausprägung der Klimaparameter auf planungsrelevante und masstabsgerechte Einheiten zu übertragen, wurden den Referenzflächen der verwendeten digitalen Nutzungsinformationen die relevanten Klimaparameter wie z.B. Lufttemperatur oder Kaltluftvolumenstrom zugeordnet. Dafür wurden alle Rasterzellen, die von einer bestimmten Fläche überdeckt werden, mit Hilfe zentraler Analysen zusammengefasst und statistisch ausgewertet. Auf diese Weise erhält jede Fläche den Mittelwert der für eine Bewertung relevanten Klimaparameter, welcher die flächenspezifische Werteausprägung repräsentiert. So führt beispielsweise die hohe Oberflächenversiegelung einer Gewerbebebauung in den Nachtstunden zu einem höheren Flächenmittelwert der Lufttemperatur als eine stark durchgrünte Wohnbebauung am Ortsrand.

Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Klimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als hochaufgelöste rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum (vgl. Kap. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.), zum anderen als planungsrelevante und masstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten (vgl. Kap. 6). Auf diese Weise bleibt, in Ergänzung zur abstrahierten Darstellung der klimatischen Funktionszusammenhänge (als Flächen- und Beziehungstypen in den Synthesekarten), die flächeninterne Heterogenität der Klimaparameter als Detailinformation jederzeit abrufbar.

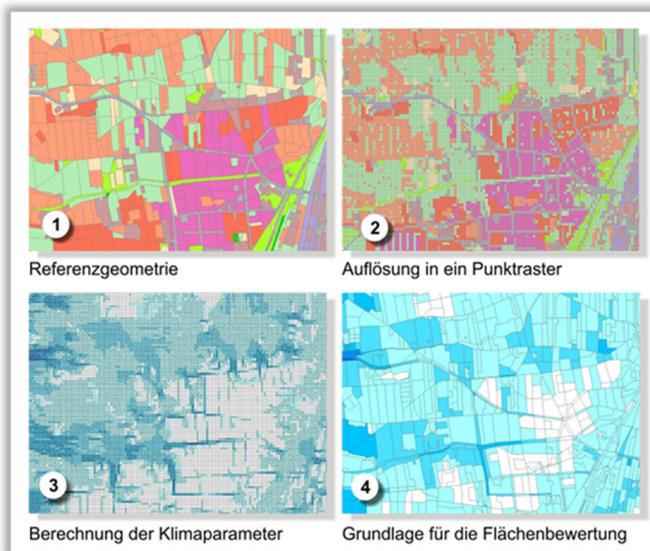


Abb. 3.2: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation

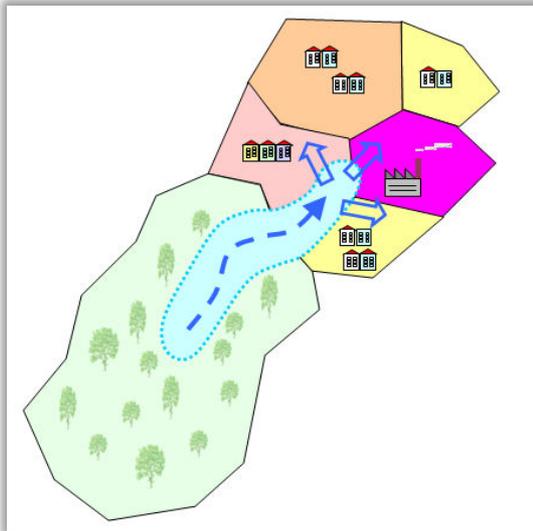
KALTLUFTLEITBAHNEN

Leitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches (Abb. 3.3). Die Ausweisung der Leitbahnbereiche orientiert sich am autochthonen Strömungsfeld der FITNAH-Simulation und wird sowohl in der Klimafunktionskarte als auch der Planungshinweiskarte dargestellt. Als geeignete Oberflächenstrukturen innerhalb von Siedlungsräumen, die ein Eindringen von Kaltluft in die Bebauung



erleichtern, dienen sowohl gering bebaute vegetationsgeprägte Freiflächen, Kleingärten und Friedhöfe als auch Gleisareale und breite Strassenräume.

Kaltluftabflüsse treten über unbebauten Hangbereichen auf, sofern sie Neigungen von $\geq 1^\circ$ aufweisen. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt sie sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung.



Durch diese „Beschleunigung“ weisen Kaltluftabflüsse meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf als Strömungen, die sich nur aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen kühlen Freiflächen und überwärmter Bebauung einstellen. Aus siedlungsklimatischer Sicht sind daher Abflüsse als sehr wirksam zu bewerten. Aufgrund der ausgeprägten Reliefsituation im Kantonsgebiet werden Kaltluftabflüsse nicht gesondert ausgewiesen.

Abb. 3.3: Prinzipskizze Kaltluftleitbahn

3.4 Klimatische Grundlagen

Für die stadtklimatische Analyse des Kantons Zug benötigt das verwendete Modell FITNAH meteorologische Eingangsdaten, die als modellinterner Antrieb fungieren. Idealerweise werden hierfür Messdaten verwendet, die an Tagen mit autochthoner Wetterlage (strahlungsreiche, windschwache Hochdruckwetterlage) erhoben wurden, um die human-biometeorologische Bedeutung bestmöglich abbilden zu können. Die Darstellung der Klimaparameter an dieser Stelle beruht auf den vorhandenen Grafiken und Auswertungen in den Sommermonaten. Sie beziehen sich, sofern nicht anderweitig angegeben, auf den Standort der Station Wädenswil oder je nach Verfügbarkeit der Daten auch auf die Station Zürich / Fluntern. Diese Stationen wurden herangezogen, da hier auch der Wolkenbedeckungsgrad aufgezeichnet wird. Dies ist nicht bei allen Messstationen der Fall. Das Klima charakterisiert gemäss Definition des Deutschen Wetterdienstes (DWD) den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort bzw. Gebiet und wird durch die statistischen Gesamteigenschaften über einen genügend langen Zeitraum repräsentiert (Mittelwerte, Extremwerte, Häufigkeiten, etc.). Im Allgemeinen werden Zeiträume von 30 Jahren zugrunde gelegt. In der Schweiz gilt für die Beschreibung des Klimas jeweils die aktuellste Klimaperiode, momentan die Periode 1981-2010 (Begert et al. 2013) und beinhaltet damit auch schon den bereits beobachteten Klimawandel, der sich seit Mitte der 1980er Jahre bemerkbar macht.

3.4.1 Aktuelles Klima an der Wetterstation Wädenswil

Der Kanton Zug ist dem mitteleuropäischen Kontinentalklima zuzuordnen und in einem Übergangsbereich zwischen den Regionen Zentrales Mittelland – Alpen lokalisiert. Die Abbildung 3.4 zeigt ein Klimadiagramm



für die östlich des Kantons Zug gelegene Station Wädenswil für die Normperiode 1981 – 2010, die im folgenden Abschnitt für die Sommermonate kurz beschrieben werden soll.

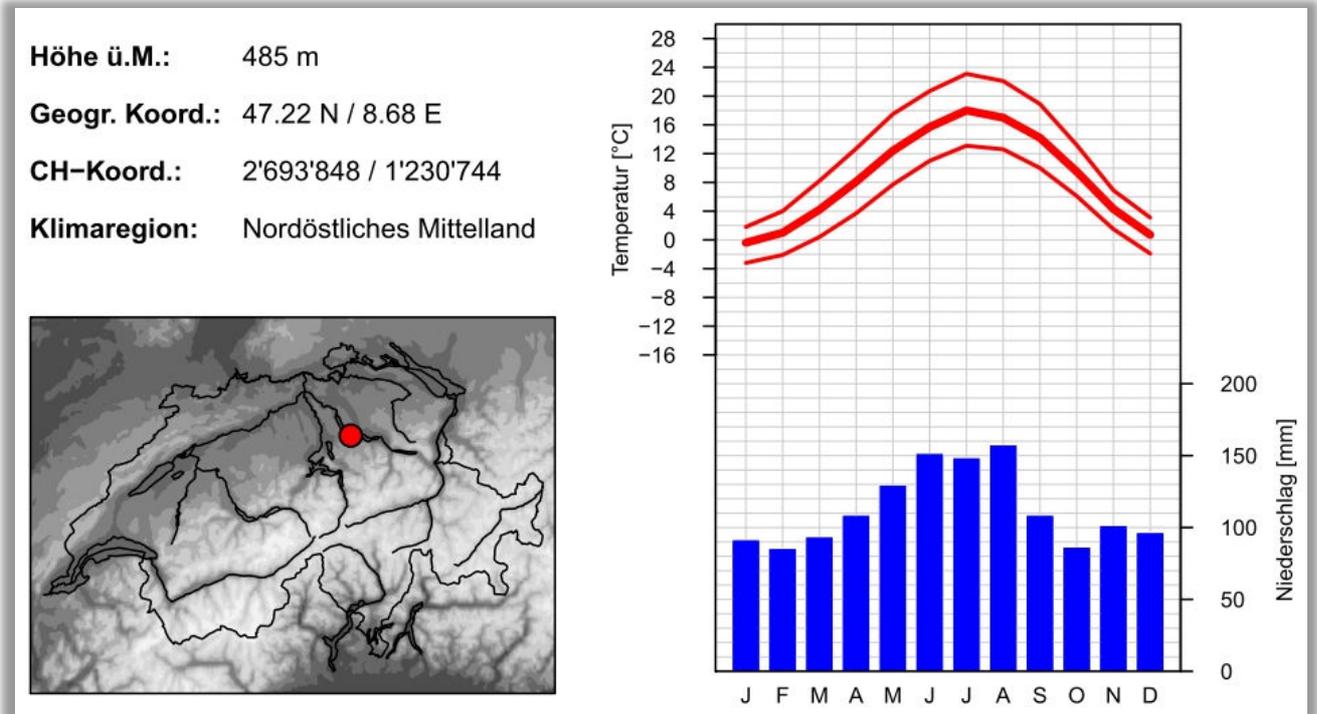


Abb. 3.4: Klimadiagramm Station Wädenswil, Normperiode 1981 – 2010. (Quelle: MeteoSchweiz 2020b)

Für die Sommermonate Juni, Juli und August (JJA) ist zu sehen, dass die Temperaturen im Monatsmittel unter 20° C liegen (mittlere dicke rote Linie im Diagramm). Die Maximaltemperaturkurve (obere rote Kurve) reicht in den Sommermonaten JJA hingegen weit über 20°C, im Juli sind es sogar 24,1°C. Im Juni sind 9 Tage, im Juli ca. 14 Tage und im August etwa 11 Tage als Sommertage (Maximaltemperatur am Tag > 25 °C) im Mittel gemessen worden. Hitzetage (Maximaltemperatur am Tag > 30 °C) gab es in der Anzahl weniger: für Juni 1.2; für Juli 2.6 und für den August 1.5 Tage. Tropennächte sind an der Station Wädenswil für die Normperiode nicht ausgewiesen. Der Juli ist somit der heisseste Monat des Sommers. Damit spiegelt die für die FITNAH-3D angenommene Starttemperatur am Abend von 21 °C in 2 m Höhe eine mittlere sommerliche Situation wieder. Die mittlere Temperatur gibt für die Wintermonate Dezember, Januar und Februar positive Werte über Null °C wider. Die Minimumtemperatur (untere rote Kurve) zeigt jedoch noch geringe Minusgrade von -0,8 für den Dezember bis zu -2,2 für den Januar. Den Temperaturen gegenüber stehen in der Abbildung 3.4 der Niederschlag (blaue Balken). Die monatlichen Niederschlagssummen sind in den Sommermonaten mit jeweils über 150 mm als Monatssumme am höchsten. Aber auch im Mai und September sind mehr als 100 mm zu beobachten. Das bedeutet, dass wenn es besonders warm im Jahr ist, auch der meiste Niederschlag fällt. Ob dieser Niederschlag für die Versorgung der Vegetation ausreichend ist, gibt die Grafik nicht wider.

3.4.2 Beobachteter Klimawandel in der Nordschweiz

Die Zunahme der Schweizer Mitteltemperatur seit 1864 bis heute beträgt rund 2 °C. Das ist im Vergleich zur Zunahme der mittleren globalen Temperatur im gleichen Zeitraum von 0,8 °C deutlich mehr und liegt



hauptsächlich an der zentralen kontinentalen Lage der Schweiz. Wird der Blick gen Zukunft gewandt, so ermitteln die Klimaszenarien CH2018 eine Temperaturzunahme für die Schweiz zum vorindustriellen Zeitalter bis 2100 von +6 °C (Begert et al. 2019), was jedoch mit konsequentem Klimaschutz auf 2,5°C für die Schweiz begrenzt werden kann. Dem Schweizer Mittelland wird eine hohe Zunahme der Temperatur aufgrund des Klimawandels vorhergesagt.

In der Abbildung 3.5 ist die Entwicklung der Sommertemperaturen für die Monate Juni, Juli und August seit dem Jahr 1864 im Vergleich zur Klimaperiode 1961 – 1990 aufgetragen, um die Trends der Entwicklung nachzuvollziehen. Es ist gut zu erkennen, dass es einen signifikanten positiven Trend der Sommertemperaturen (schwarze Linie) gibt. Die Jahre ab 2015 weichen alle von der Periode 1961 – 1990 mit über +3 °C ab. Das Jahr 2003 ist das mit der höchsten positiven Abweichung zur Periode von fast +5°C. Diese Grafik verdeutlicht, dass bereits jetzt der Klimawandel stattfindet und in den Messreihen beobachtet werden kann. Seit den 1980er Jahren steigen die Temperaturen deutlich an und bleiben auch auf hohem Niveau.

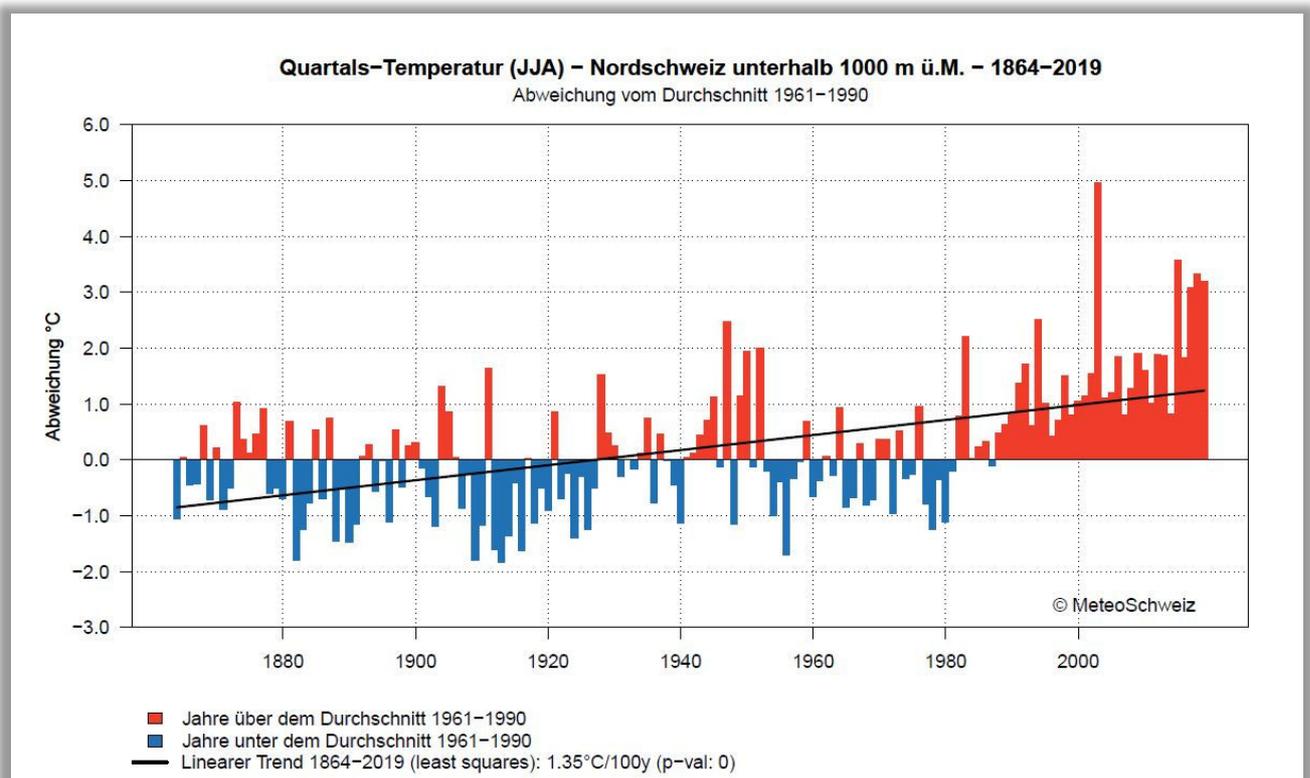


Abb. 3.5: Entwicklung der sommerlichen Temperatur für die Nordschweiz unter 1.000 m ab 1864 bis heute im Vergleich zur Periode 1961 - 1990. (Quelle: Meteoschweiz 2020d)

Die nachfolgende Abbildung 3.6 zu den Sommertagen und Hitzetagen und die Abbildung 3.7 zu den Tropennächten für die Station Zürich Fluntern verdeutlichen die kontinuierliche Zunahme der Kenntage seit 1864 (rote gestrichelte Linie) bzw. 1960.

Sommertage sind Tage, wo die maximale Tagestemperatur $\geq 25^{\circ}\text{C}$ ist. Hitzetage sind Tage, an denen die Maximaltemperatur am Tag 30°C übersteigt und Tropennächte werden an Tagen gezählt, wo die Minimumtemperatur nicht unter 20°C fällt.

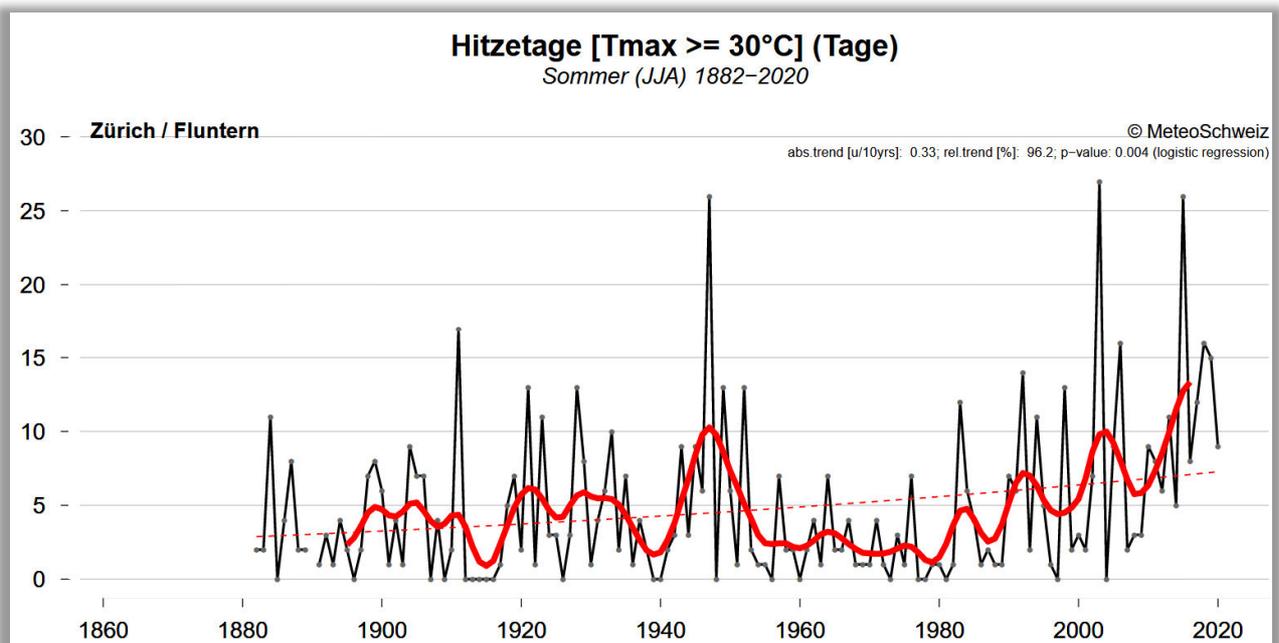
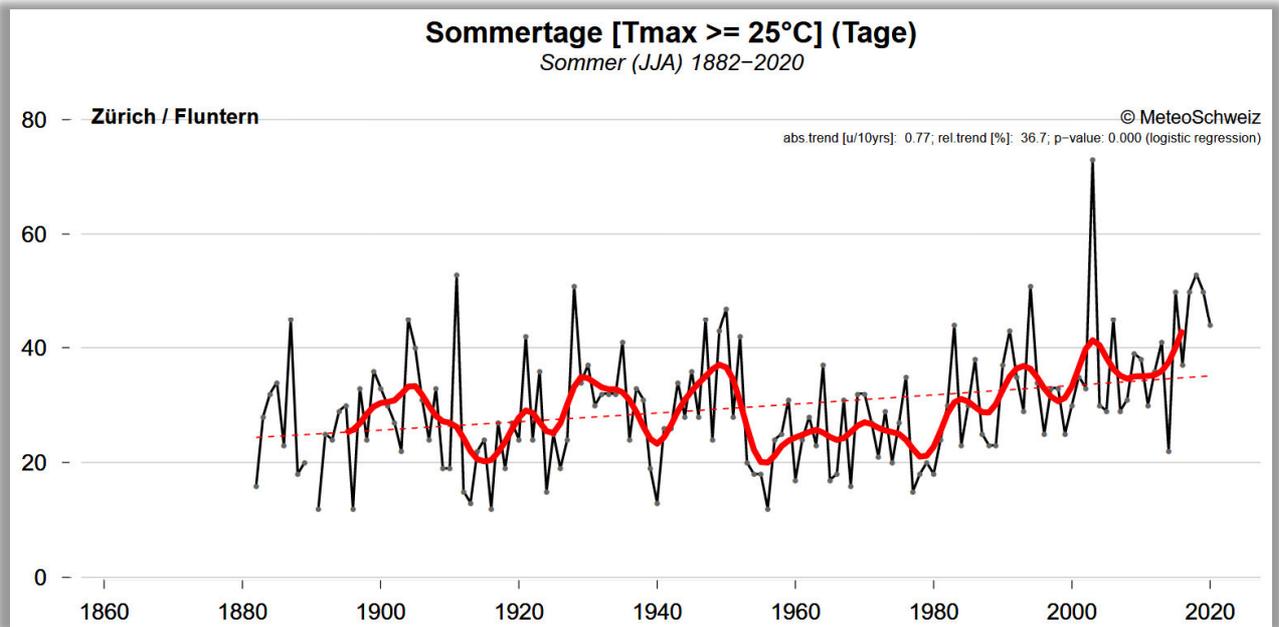


Abb. 3.6: Entwicklung der Sommer- und Hitzetage an der Station Zürich/Fluntern. (Quelle: Meteoschweiz 2020a)

Im Jahr 2003 gab es die höchste Anzahl an Sommertagen an der Station Zürich Fluntern mit über 75. Aber auch das Jahr 1910 und 2016 stechen mit ca. 55 Sommertagen deutlich in der Grafik heraus. Ab den 1990er Jahren sind es pro Jahr in Zürich Fluntern immer über 25 Sommertage gemessen worden. Die Hitzetage sind in ihrer Anzahl nicht so hoch wie die Sommertage, da hier als Schwellwert das Tagesmaximum von 30 °C gilt. Hier stechen die Jahre 1947 und 2016 mit 26 Hitzetagen deutlich hervor. Das Jahr 2003 zeigt die höchste Anzahl an Hitzetagen mit 27 auf.

Die Hitzetage schwanken recht stark und steigen wie die Sommertage in den letzten Jahrzehnten an, was der positive Trend (rot gestrichelte Linie) und auch der gleitende Mittelwert (rot durchgezogene Linie) wiedergeben.



Die Tropennächte sind in der Abbildung 3.7 gezeigt. Vor der Jahrtausendwende gab es 3 Jahre, in denen Tropennächte registriert wurden. Nach dem Jahr 2000 kommt es zu einem häufigeren Auftreten und einem kontinuierlichen Anstieg mit 2 Tropennächten im Jahr 2002 und 2003 und 9 Tropennächten im Jahr 2015. Aus den Grafiken lässt sich herauslesen, dass die Jahre 2003 und 2016 besonders heisse Sommer aufgewiesen haben, was an den hohen Werten sowohl für die Sommer- als auch Hitzetage und die Tropennächte nachgewiesen werden kann.

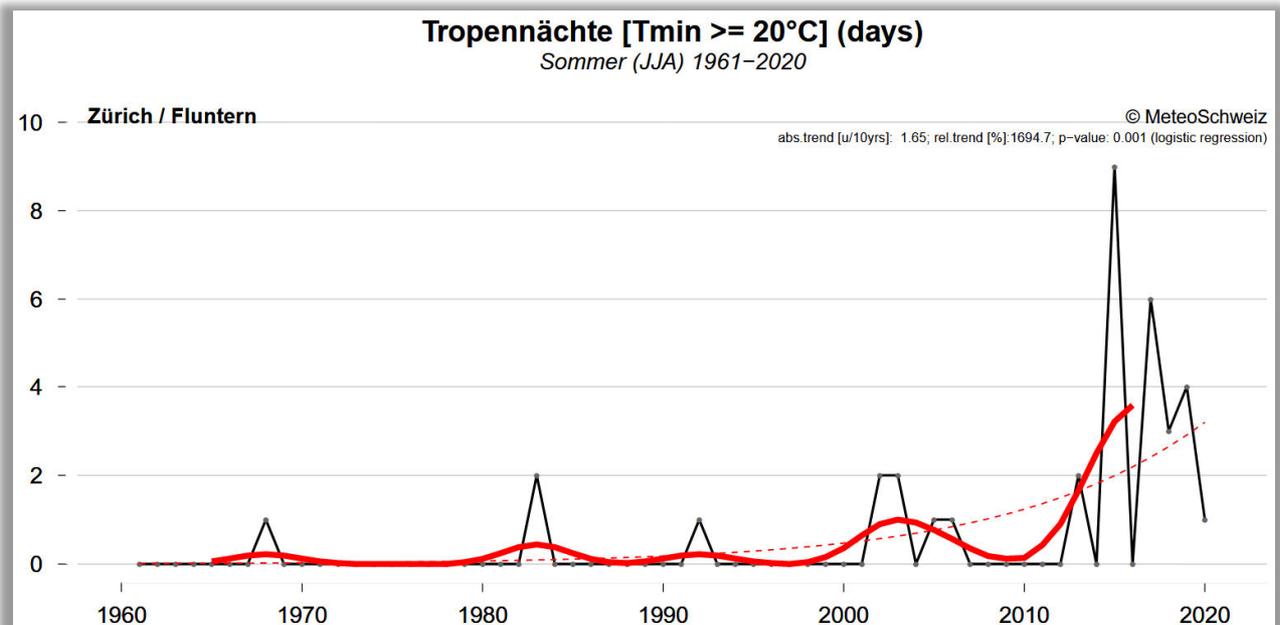


Abb. 3.7: Entwicklung der Tropennächte an der Station Zürich/Fluntern. (Quelle: Meteoschweiz 2020a)

Abbildung 3.8 zeigt die langjährige Entwicklung der Niederschlagssummen im Vergleich zur Klimaperiode 1961 – 1990 für die Nordschweiz für Gebiete unter 1.000m. Hier ist kein signifikanter Trend zu sehen und die Werte schwanken positiv als auch negativ um den Durchschnitt der Klimaperiode 1961 – 1990.

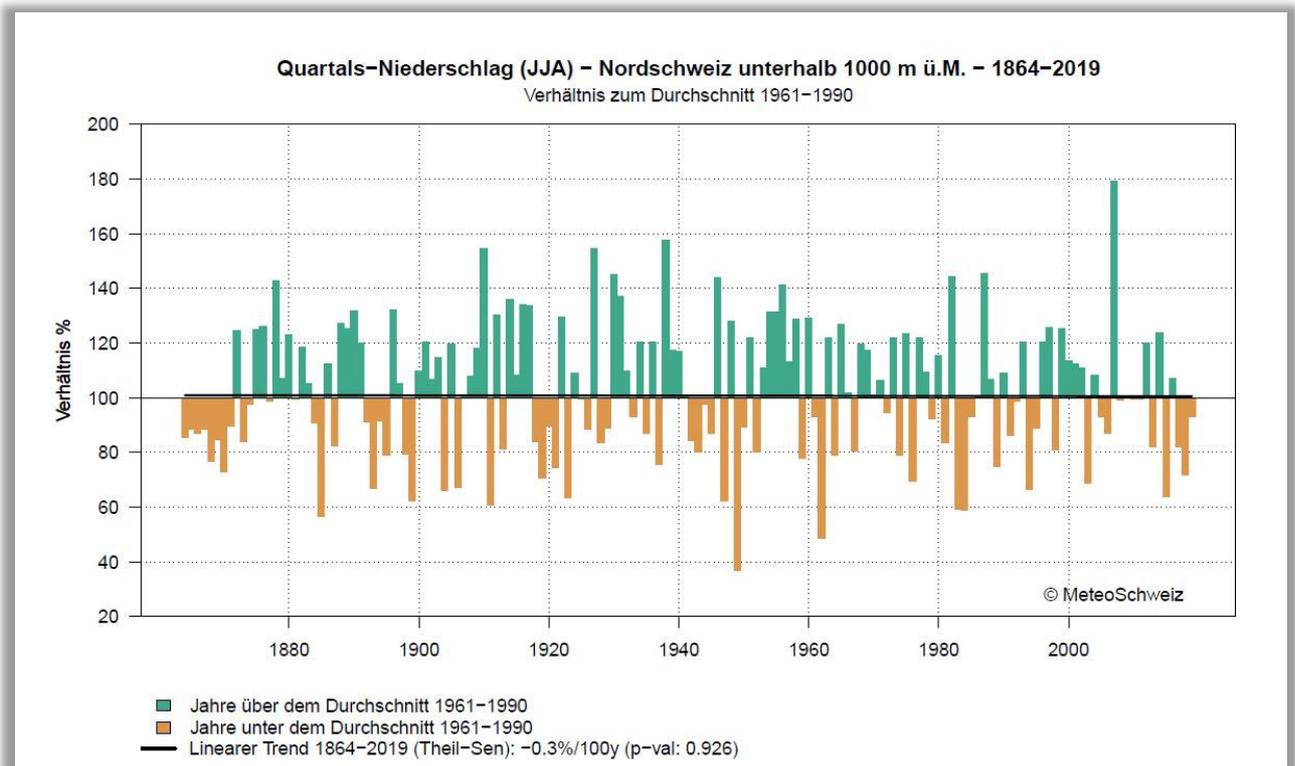


Abb. 3.8: Entwicklung der sommerlichen Niederschlagssummen für die Nordschweiz unter 1.000 m ab 1864 bis heute im Vergleich zur Periode 1961 - 1990. Quelle: (Meteoschweiz 2020d)



4. Ergebnisse der Klimamodellierung

Im Folgenden werden die Modellergebnisse zu den Parametern Lufttemperatur bzw. Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) in 2 m Höhe, Kaltluftströmungsfeld sowie Kaltluftvolumenstrom erläutert. Als meteorologische Rahmenbedingung wurde eine austauscharme Wetterlage zugrunde gelegt, da sich die stadtklimatischen Effekte vor allem während windschwacher Strahlungswetterlagen im Sommer entwickeln. Auslöser dieser Prozesse sind die Temperaturunterschiede zwischen vergleichsweise warmen Siedlungsräumen und kühleren vegetationsgeprägten Freiflächen. Die in Kap. 3.4 beschriebene und im Simulationsgebiet lokalisierte Referenzstation wurde sowohl für den Modellantrieb als auch die Validierung der Ergebnisse herangezogen.

4.1 Nächtliches Temperaturfeld

Der Tagesgang der Lufttemperatur ist direkt an die Strahlungsbilanz eines Standortes gekoppelt und zeigt daher i.d.R. einen ausgeprägten Abfall während der Abend- und Nachtstunden. Dieser erreicht kurz vor Sonnenaufgang des nächsten Tages ein Maximum. Das Ausmass der Abkühlung kann, je nach meteorologischen Verhältnissen, Lage des Standorts und landnutzungsabhängigen physikalischen Boden- bzw. Oberflächeneigenschaften, grosse Unterschiede aufweisen. Besonders auffällig ist das thermische Sonderklima der Siedlungsräume mit seinen gegenüber dem Umland modifizierten klimatischen Verhältnissen.

Das Ausmass der Temperaturabweichung im **Siedlungsbereich** ist vor allem von der Grösse eines Siedlungsbereiches und der Dichte der Überbauung abhängig. Doch auch über **grünbestimmten Flächen** weisen Luftvolumina keinen einheitlichen Wärmezustand auf. Die Abkühlungsrate natürlicher Oberflächen wird insb. von ihren thermischen Bodeneigenschaften (Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) sowie eventuell vorhandenen Oberflächenbedeckungen bestimmt (Bewuchs, Laubstreu, etc.). Dynamische Luftaustauschprozesse zwischen den Flächen, das Relief in Form von Geländehöhe, Exposition sowie Geländeneigung und die Lage im Mosaik der Landnutzungen üben weiteren Einfluss aus (bspw. macht es einen Unterschied, ob sich eine Freifläche neben einem Gewässer, Waldgebiet oder dicht versiegelten Bereich befindet).

Eine Sonderstellung nehmen Wald- und Gewässerflächen ein. Der gedämpfte, insgesamt vermittelnde Tagesgang der Temperatur im **Wald** beruht zu einem grossen Teil auf dem zweischichtigen Strahlungsumsatz zwischen Atmosphäre und Kronendach sowie zwischen Kronendach und Stammraum. Grössere Waldgebiete sind wichtige Frischluftproduktionsgebiete, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht. Während im Stammraum tagsüber durch Verschattung und Verdunstung relativ geringe Temperaturen bei hoher Luftfeuchtigkeit vorherrschen, treten nachts durch die abschirmende Wirkung des Kronendachs vergleichsweise milde Temperaturen auf. Stadtnahe Wälder können demnach auch am Tage Kaltluft zugunsten des Siedlungsraumes erzeugen, nachts fällt deren Kaltluftproduktion dagegen geringer aus als über unversiegelten Freiflächen – ausserdem können sie ein Strömungshindernis darstellen. Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wassern, seine besondere Art der Strahlungsabsorption und die im Wasserkörper stattfindenden turbulenten Durchmischungsvorgänge sorgen für eine (von hohen Absolutwerten ausgehend) deutlich verringerte tägliche Temperaturamplitude über grösseren



Gewässern. Da hier die Lufttemperaturen im Sommer tagsüber niedriger und nachts höher als in der Umgebung sind, wirken grössere **Gewässer** auf bebaute Flächen am Tage klimatisch ausgleichend, während sie in der Nacht deren Abkühlung verringern. Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potenziellen bioklimatischen Belastungen abzugrenzen, Aussagen zum Auftreten thermisch und/oder orographisch induzierter Ausgleichsströmungen zu treffen und die räumliche Ausprägung sowie Wirksamkeit von Kalt- bzw. Frischluftströmungen abzuschätzen.

Das sich um 4 Uhr in der Nacht einstellende Temperaturfeld im Untersuchungsraum umfasst zwischen Minimalwerten von 6.4 °C und Maximalwerten von bis zu 20.5 °C eine Spannweite von etwa 14 °C. Innerhalb der bebauten Gebiete ist die Temperaturverteilung räumlich differenziert, da Areale mit Einzelhausbebauung, Kernbebauung und Verkehrsanlagen unterschiedliche Boden- und Oberflächeneigenschaften aufweisen. Im Rahmen der durchgeführten Klimamodellierung weisen die Zuger Innenstadt, Cham sowie ausgedehnte Gewerbeflächen die höchsten Temperaturen von mehr als 19 °C auf, was mit dem hohen Bauvolumen und der hohen Oberflächenversiegelung einher geht (Abb. 4.1). In Zug treten dahingehend vor allem der Bereich Neugasse – Baarerstrasse hervor. Zur Peripherie hin nehmen Bebauungsdichte und auch die Lufttemperatur tendenziell ab, was sich deutlich im Temperaturfeld beobachten lässt. In der durchgrünte Hangbebauung östlich der Aegeristrasse sind Werte zwischen 16.0 °C und 17.0 °C zu beobachten.

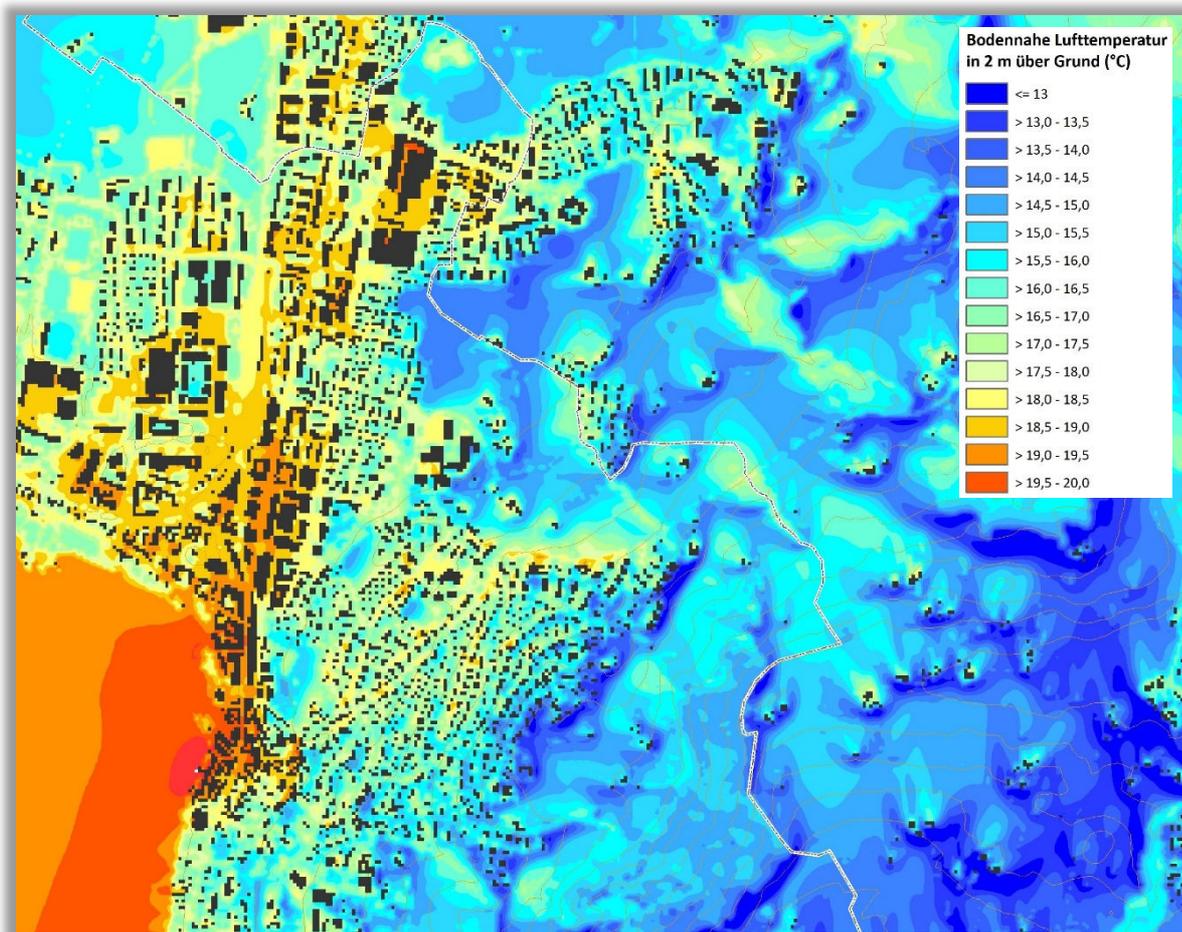


Abb. 4.1: Temperaturfeld in der Stadt Zug zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)



Innerhalb grösserer Hausgärten gehen die Temperaturen lokal auch weiter zurück. Lokale Kaltluftabflüsse führen zu einer zusätzlichen Abkühlung. Die innerstädtischen Grünflächen zeichnen sich, abhängig von ihrer Grösse und Lage, mit eher niedrigeren Werteniveau ab. So weisen das Hirschgehege und die Schützenmatt Wiese Temperaturen zwischen 16.6 °C und 17.5 °C auf. Dies entspricht in etwa dem Werteniveau der durchgrünten Hangbebauung. Ausserhalb der eher städtisch geprägten Bebauung sind in den übrigen Siedlungsflächen ähnlich niedrigere Lufttemperaturen anzutreffen. Die Abkühlung über den landwirtschaftlich genutzten Flächen ist stark ausgeprägt und führt zu Minimumtemperatur von lokal weniger als 14.0 °C. Aufgrund ihres Bestandsklimas weisen Waldbestände höhere Werte von etwa 14.0 °C bis 16.5 °C auf. Die Temperatursituation im Bereich Ober-/Unterägeri zeigt Abb. 4.2.

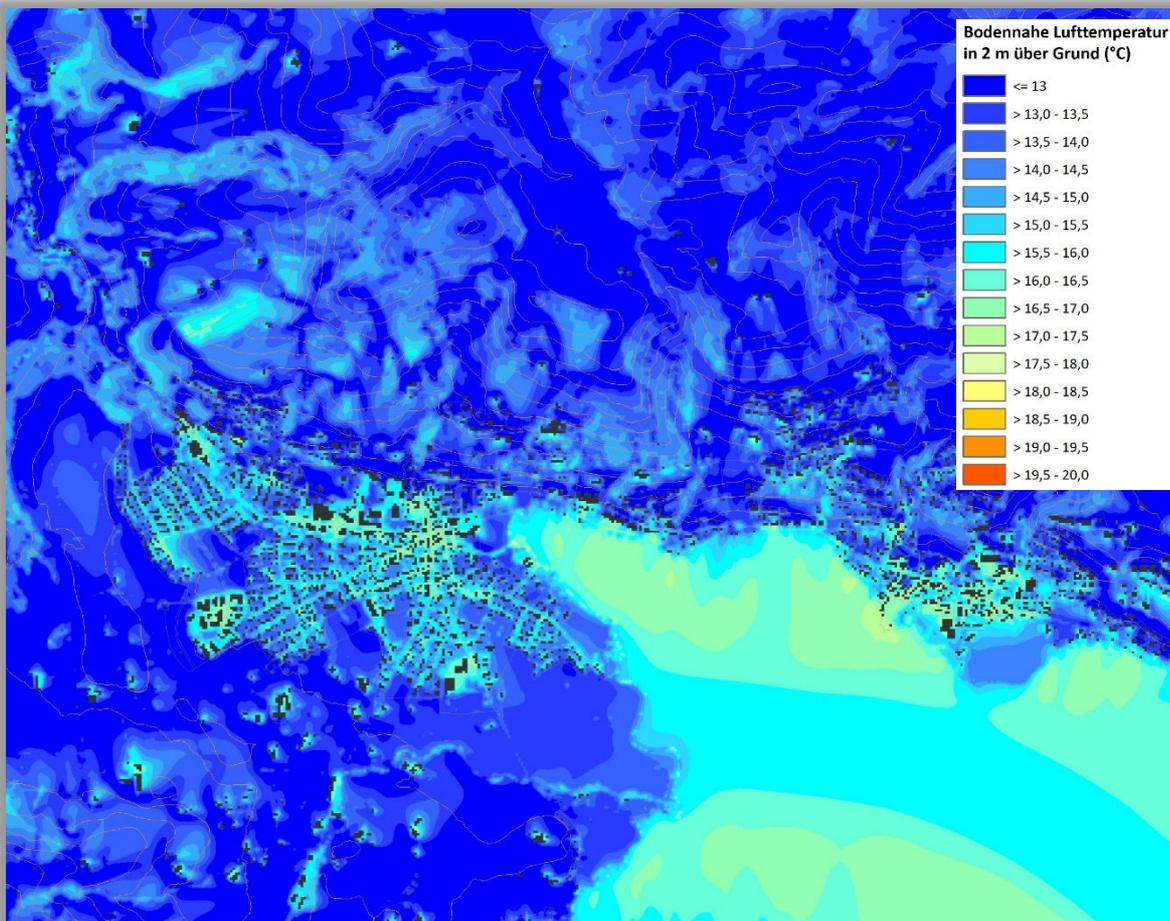


Abb. 4.2: Temperaturfeld im Bereich in Unterägeri und Oberägeri zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

Aufgrund der Höhenlage ist das Werteniveau insgesamt niedriger, die Maxima innerhalb der Siedlungsflächen betragen 16.7 °C. Auch die Freiflächen kühlen sich stärker ab, wobei die Minimalwerte hier etwa 10.0 °C betragen.

4.2 Physiologisch Äquivalente Temperatur

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung werden Indizes verwendet (Kenngrössen), die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung und können so die Wärmebelastung eines



Menschen abschätzen¹. Beispiele für solche Kenngrößen sind die PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur), der PMV-Wert (Predicted Mean Vote) und der UTCI (Universal Thermal Climate Index).

In der vorliegenden Arbeit wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (vgl. Höppe und Mayer 1987). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat dieser den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit auch von Nichtfachleuten besser nachvollzogen werden zu können. Darüber hinaus handelt es sich bei der PET um eine Grösse, die sich in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt hat, sodass sich die Ergebnisse aus dem Kanton Zug mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen humanbiometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf aussenklimate Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (Kuttler 1999). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien am Tage sinnvoll einsetzbar.

Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologischen Belastungsstufen quantifizieren (z.B. Starke Wärmebelastung ab PET 35 °C; Tab. 4.1; VDI 2004).

Eine mässige Wärmebelastung mit einer PET von 29°C bis 32°C ist insbesondere unter den grösseren Waldbeständen zu beobachten (grüne Farben; Abb. 4.3). Aber auch im Bereich grösser Baumgruppen von innerstädtischen Grünflächen sind günstige Aufenthaltsbedingungen anzutreffen. Dahingehend kann der Rathausgarten als innenstadtnahe Grünfläche mit hoher Aufenthaltsqualität angesehen werden. Je nach Baumbestand weisen auch grössere Hausgärten eine schwache bis mässige Wärmebelastung auf.

PET	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastungsstufe
4 °C	Sehr kalt	Extreme Kältebelastung
8 °C	Kalt	Starke Kältebelastung
13 °C	Kühl	Mässige Kältebelastung
18 °C	Leicht kühl	Schwäche Kältebelastung
20 °C	Behaglich	Keine Wärmebelastung
23 °C	Leicht warm	Schwache Wärmebelastung
29 °C	Warm	Mässige Wärmebelastung
35 °C	Heiss	Starke Wärmebelastung
41 °C	Sehr heiss	Extreme Wärmebelastung

Tab. 4.1: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden (nach VDI 2004)

Zum Zeitpunkt 14 Uhr zeigt sich, dass die auftretende Wärmebelastung am Tage vor allem über die Verschattung beeinflusst wird.

¹ Energiebilanzmodelle für den menschlichen Wärmehaushalt bezogen auf das Temperaturempfinden einer Durchschnittsperson („Klima-Michel“ mit folgenden Annahmen: 1,75 m, 75 kg, 1,9 m² Körperoberfläche, etwa 35 Jahre; vgl. Jendritzky 1990).

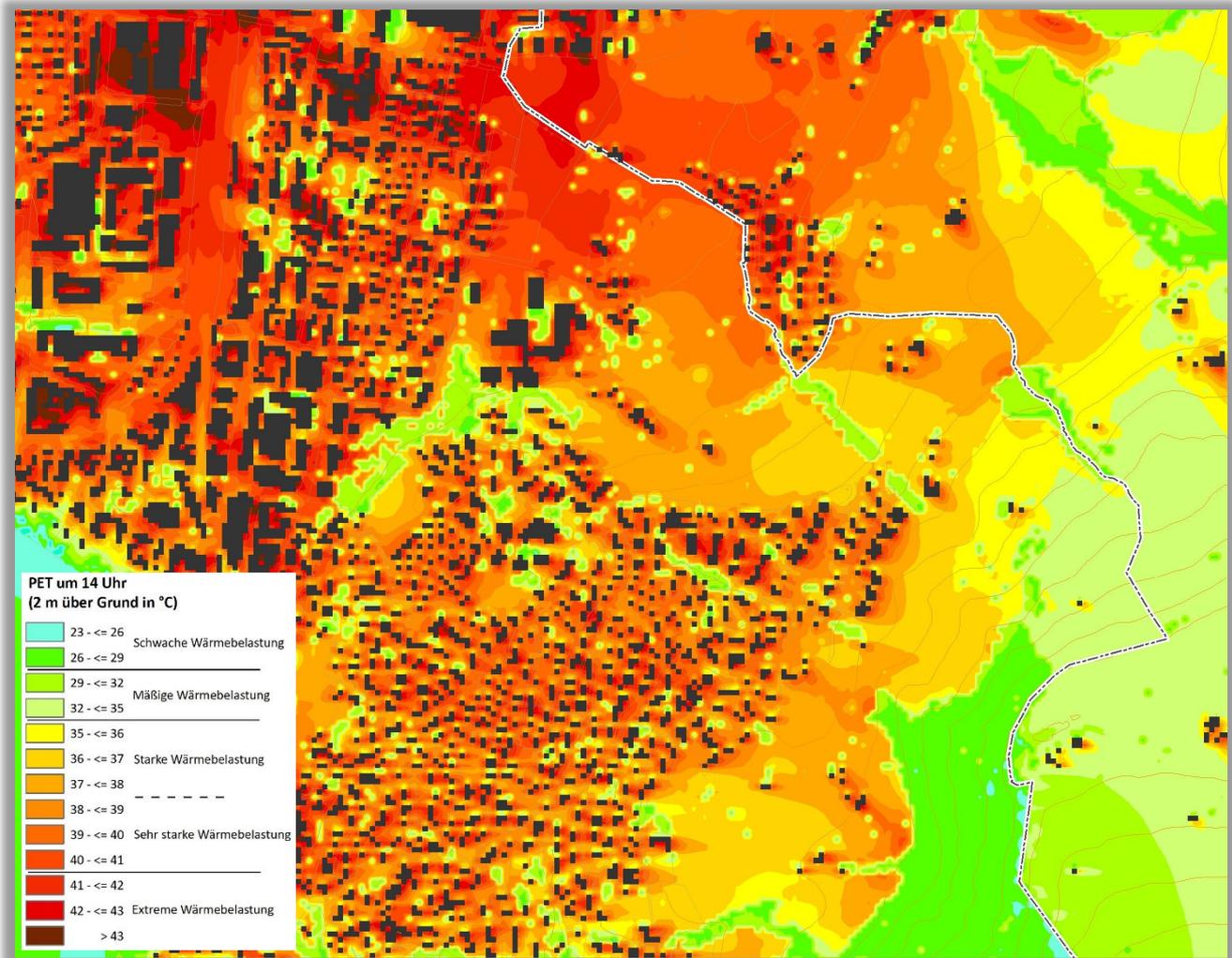


Abb. 4.3: PET in der Stadt Zug zum Zeitpunkt 14 Uhr mittags (2m ü. Grund)

Dem stehen die stark besonnten Areale gegenüber, wo die Wärmebelastung mit einer PET von deutlich mehr als 35°C meist als stark einzustufen ist (Gelb/Orange/Rot). Die höchste Belastung im dargestellten Ausschnitt tritt im Bereich der Theilerstrasse über den vollversiegelten Parkplätzen auf. Allerdings können auch die rasengeprägten Grünräume aufgrund der intensiven solaren Einstrahlung eine erhebliche Wärmebelastung aufweisen. Im Gegensatz zur Nachtsituation ist die Wärmebelastung am Tage in den Siedlungsflächen auch in den höher gelegenen Gemeinden ähnlich ausgeprägt. Allerdings geht mit zunehmender Höhe auch die Lufttemperatur zurück, was in einer vergleichsweise geringeren PET resultiert. Die Ausprägung der PET in Unterägeri und Oberägeri zeigt Abb. 4.4. Während in den Siedlungsbereichen Maximalwerte von mehr als 40 °C auftreten, nimmt zum Freiland hin die Belastung rasch ab (grüne Farben). Dabei treten vor allem die Waldflächen mit einer schwachen Wärmebelastung hervor. Aber auch über Freiland ist flächenhaft eine noch mässige Wärmebelastung zu beobachten.

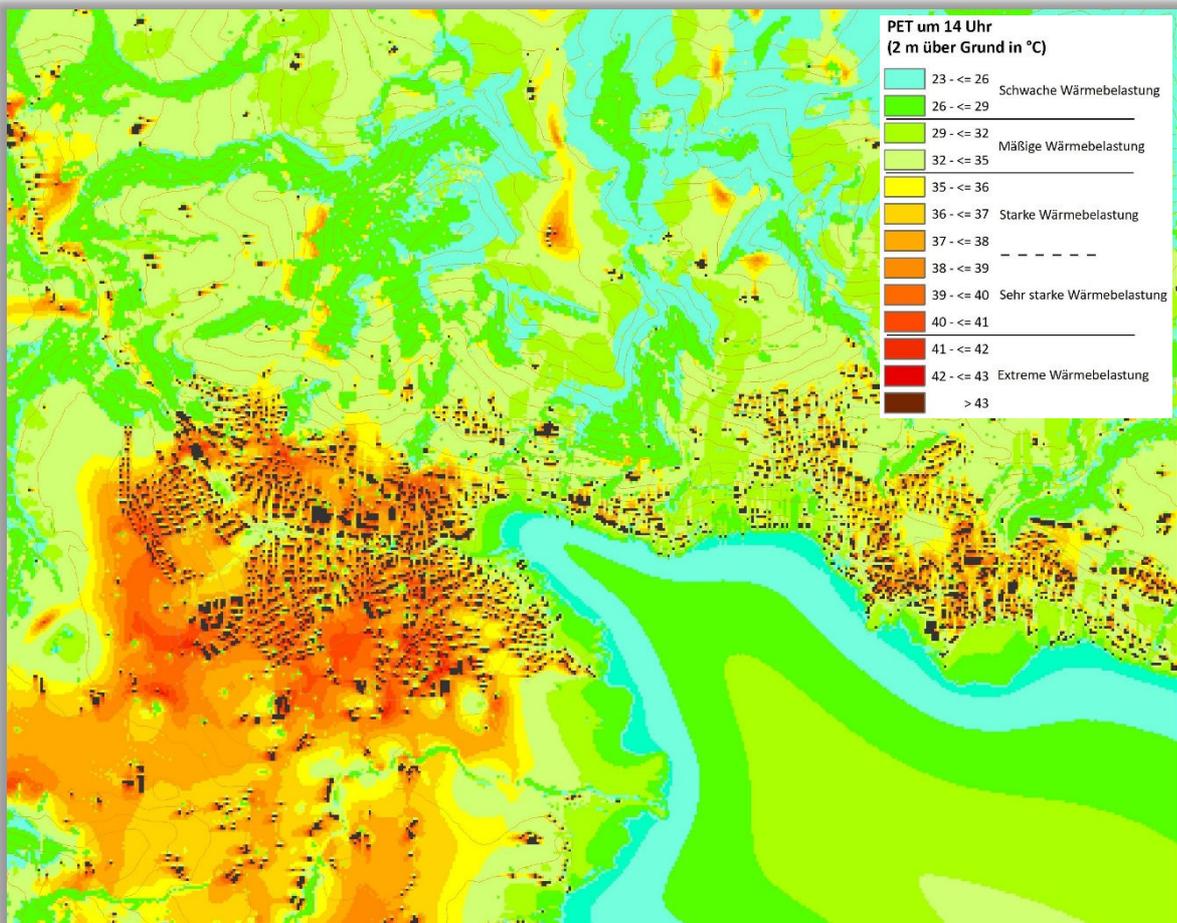


Abb. 4.4: PET im Bereich in Unterägeri und Oberägeri zum Zeitpunkt 14 Uhr mittags (2m ü. Grund)

4.3 Autochthones Windfeld

Die bodennahe Temperaturverteilung bedingt horizontale Luftdruckunterschiede, die wiederum Auslöser für lokale thermische Windsysteme sind. Ausgangspunkt dieses Prozesses sind die nächtlichen Temperaturunterschiede, die sich zwischen Siedlungsräumen und vegetationsgeprägten Freiflächen einstellen. An den geneigten Flächen setzt sich abgekühlte und damit schwerere Luft in Richtung zur tiefsten Stelle des Geländes in Bewegung.

So entstehen an den Hängen die nächtlichen Kaltluftabflüsse (u.a. Mosimann et al. 1999). Die Windgeschwindigkeit dieses kleinräumigen Phänomens wird in erster Linie durch das Temperaturdefizit zur umgebenden Luft und durch die Neigung des Geländes bestimmt.

Neben den durch die Geländeform bedingten Strömungen mit Kaltluftabflüssen bilden sich auch so genannte Flur-/Strukturwinde, d.h. eine direkte Ausgleichsströmung vom hohen zum tiefen Luftdruck aus. Sie entstehen, wenn sich stark überbaute oder versiegelte Gebiete stärker erwärmen als umliegende Freiflächen, und dadurch ein thermisches Tief über den urbanen Gebieten entsteht (vgl. Abb. 4.5).

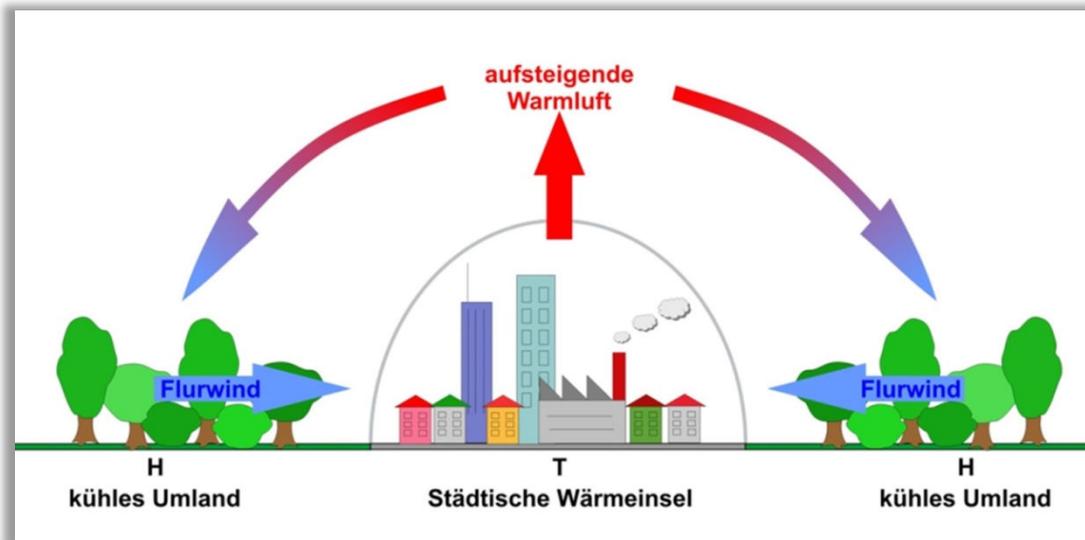


Abb. 4.5: Prinzipskizze Flurwind

Der resultierende Druckgradient kann daraufhin durch einströmende kühlere Luftmassen aus dem Umland ausgeglichen werden (u.a. Kiese et al. 1992). Für die Ausprägung dieser Strömungen ist es wichtig, dass die Luft über eine gewisse Strecke beschleunigt werden kann und nicht durch vorhandene Hindernisse wie Bebauung abgebremst wird. Die Flur-/ Strukturwinde sind eng begrenzte, oftmals nur schwach ausgeprägte Strömungsphänomene, die bereits durch einen schwachen überlagernden Wind überdeckt werden können. Ihre Geschwindigkeit liegt meist unterhalb von 2 m/s (Mosimann et al. 1999). Im Bereich stärkerer Hangneigungen treten im Untersuchungsraum Kaltluftabflüsse mit Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als 3 m/s auf. Die landnutzungstypischen Temperaturunterschiede beginnen sich schon kurz nach Sonnenuntergang herauszubilden und können die ganze Nacht über andauern. Dabei erweisen sich insbesondere Wiesen- und Ackerflächen als kaltluftproduktiv. Abhängig von den Oberflächeneigenschaften und Abkühlungsraten geht damit die rasche Entwicklung von Kaltluftströmungen einher, die zunächst vertikal nur von geringer Mächtigkeit (5-10 m Schichthöhe) sind und sich zwischen der Vielzahl der unterschiedlich temperierten Flächen ausbilden.

Diese kleinskaligen Windsysteme werden im Laufe der Nacht von horizontal und vertikal etwas mächtigeren Flur- und Hangwinden (mehrere Dekameter Mächtigkeit) überdeckt, die zwischen den grossen Freiflächen und überbauten Arealen entstehen. Den hier beschriebenen Phänomenen kommt eine besondere landschaftsplanerische Bedeutung zu: Grössere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernis.

Aus diesem Grund sind die Durchlüftung der Siedlungskörper und ihr Luftaustausch mit dem Umland generell herabgesetzt. Die Abfuhr von schadstoffbelasteten und überwärmten Luftmassen entlang eng bebauter Strassenzüge kann in Abhängigkeit von der Bebauungsart und -dichte deutlich eingeschränkt sein. Speziell bei austauschschwachen Wetterlagen und für Städte in Muldenlage wirken sich diese Faktoren bioklimatisch ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr frischer und kühlerer Luft eine bedeutende klimaökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

Die Kaltluftströmung ist in der vorliegenden Untersuchung ein wichtiger Parameter zur Beurteilung des Kaltlufthaushaltes, wobei sich vor allem die Luftaustauschprozesse am Siedlungsrand erst in der zweiten



Nachthälfte vollständig ausgebildet haben. Daher wird im Folgenden auf die Ergebnisse zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens eingegangen. Die im Bericht beschriebenen Beispiele stehen stellvertretend für zahlreiche ähnliche Situationen im Kanton Zug.

Das sich zum nächtlichen Analysezeitpunkt ausgeprägte Kaltluftströmungsfeld stellt Abb. 4.6 in zwei Ebenen dar. Die Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeillänge in Form von Vektoren abgebildet, wobei die Pfeile der Karte für eine übersichtlichere Darstellung auf 50 m x 50 m Kantenlänge (entspricht 25 Rasterzellen) aggregiert worden sind. Die unterlegten Rasterzellen stellen zudem die Windgeschwindigkeit flächenhaft in Farbstufung dar. Die Werte beziehen sich auf eine Analysehöhe von 2 m über Grund. Abgebildet sind alle Zellen des ursprünglichen 10 m Rasters, für die aufgrund einer modellierten Mindestwindgeschwindigkeit von $> 0,1$ m/s und unter Berücksichtigung der gebietstypischen Ausprägung eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit angenommen werden kann.

Die für das 2 m-Niveau im Bereich Aegeristrasse beispielhaft wiedergegebenen Strömungsgeschwindigkeiten reichen von vollkommener Windstille bis zu Maximalwerten von 3.1 m/s östlich der Waldheimstrasse sowie im Bereich Blasenbergstrasse (Dunkelblau). Während innerhalb des östlich vorgelagerten Waldbestands der Stammraum die Ausbildung höherer Strömungsgeschwindigkeiten in Bodennähe unterbindet, zeigt sich am durch Rasen geprägten Randbereich ein flächenhaftes Ausströmen von Kaltluft in die Bebauung, wobei niedrige Bebauung und breite Strassenräume/Abstandsflächen ein Eindringen in die Siedlungsfläche begünstigen.

Klimatisch wirksame Kaltluftabflüsse treten nahezu flächendeckend auf der Nordwestabdachung des Zugerbergs anzutreffen. Der Siedlungsraum weist eine insgesamt gute Durchlüftungssituation auf. Lediglich im Bereich der Innenstadt werden einzelne Bereiche nicht mehr nennenswert von bodennaher Kaltluft durchströmt, da die zunehmende Bebauungsdichte und das im Vergleich zum Freiland höhere Temperaturniveau die Kaltluftströmung abschwächen. Es zeigt sich die wichtige Rolle grösserer Grünräume, da sie die Kaltluft als Leitbahnen tief in die Bebauung heranzuführen können (z.B. die landwirtschaftlich genutzten Flächen nördlich der Aegeristrasse).

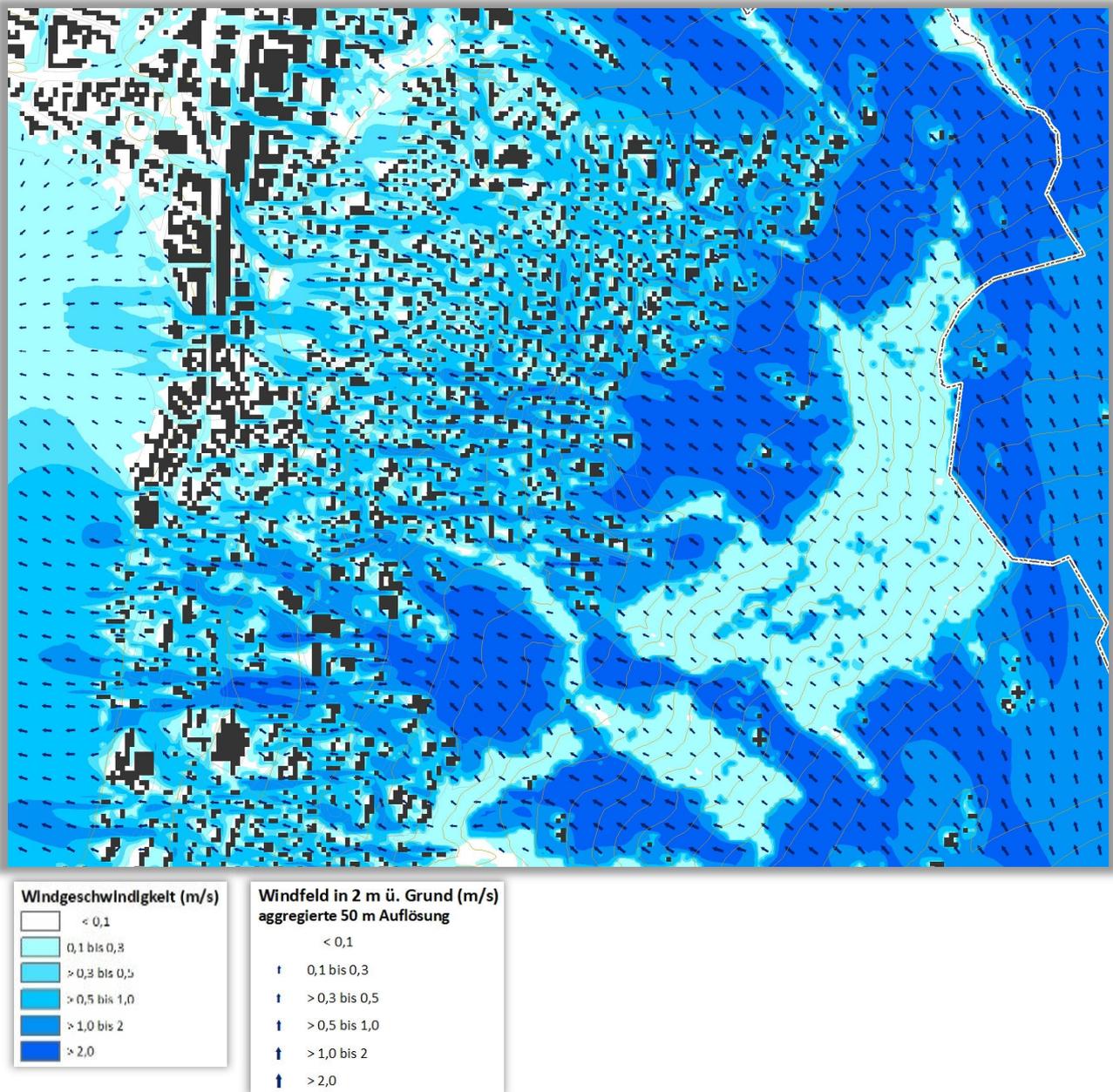
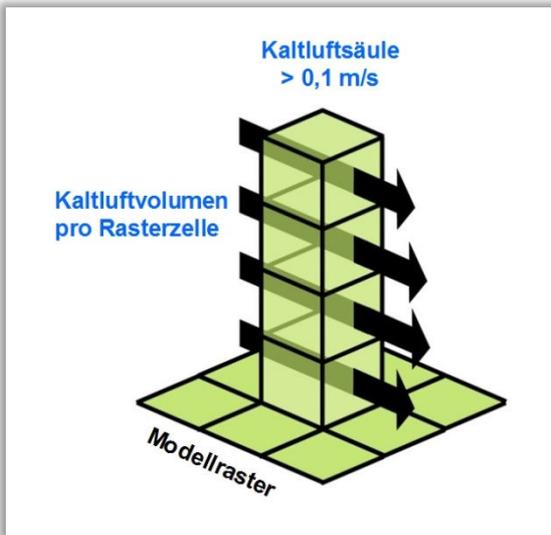


Abb. 4.6: Bodennahes Windfeld zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens in der Stadt Zug (2m ü. Grund)

4.4 Kaltluftvolumenstrom

Wie bereits im Vorkapitel zum autochthonen Windfeld erläutert, kommt den lokalen thermischen Windsystemen eine besondere Bedeutung beim Abbau von Wärme- und Schadstoffbelastungen grösserer Siedlungsräume zu. Weil die potenzielle Ausgleichsleistung einer grünbestimmten Fläche nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit (d.h. durch die Höhe der Kaltluftschicht) mitbestimmt wird, wird zur Bewertung der Grünflächen ein weiterer Klimaparameter herangezogen: der sogenannte Kaltluftvolumenstrom. Für die Auswertung wurde der Zeitpunkt 04 Uhr morgens gewählt, da zu diesem Zeitpunkt die Intensität der Kaltluftströme voll ausgeprägt ist.



Unter dem Begriff Kaltluftvolumenstrom versteht man, vereinfacht ausgedrückt, das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite). Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt. Für die dargestellten Werte bedeutet dies folgendes: Da die Modellergebnisse nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzellenbreite, ist der resultierende Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom,

Abb. 4.7: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

sondern als rasterbasierte Volumenstromdichte aufzufassen. Diesen Wert kann man sich leicht veranschaulichen, indem man sich ein 25 m breites, quer zur Luftströmung hängendes Netz vorstellt, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht² bis hinab auf die Erdoberfläche reicht (Abb. 4.7). Bestimmt man nun die Menge der pro Sekunde durch das Netz strömenden Luft, erhält man die rasterbasierte Volumenstromdichte. Der Volumenstrom ist damit ein Mass für den Zustrom von Kaltluft und bestimmt somit, neben der Strömungsgeschwindigkeit, die Grössenordnung des Durchlüftungspotenzials.

STANDARDISIERUNG DES KALTLUFTVOLUMENSTROMS (Z-TRANSFORMATION)

Für die qualitative Bewertung von Klimafaktoren bedarf es eines begründeten, nachvollziehbaren Massstabes. Nicht immer ist ersichtlich, aufgrund welcher Kriterien eine Klassifizierung in Kategorien wie „Hoch“ und „Niedrig“ oder „Günstig“ und „Ungünstig“ erfolgt ist. In der VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1 (VDI 2008) wird daher vorgeschlagen, für eine Beurteilung das lokale oder regionale Wertenniveau einer Klimaanalyse zugrunde zu legen und die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmassstab heranzuziehen. Wünschenswert wäre zudem, die Beurteilungskriterien sowohl mit der Ausprägung zusätzlich modellierter Variablen als auch mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen vergleichen zu können. Um eine solche Vergleichbarkeit herzustellen, wurde der Parameter Kaltluftvolumenstrom über das Verfahren der z-Transformation standardisiert³. Bei einer z-Transformation wird das arithmetische Gebietsmittel des Parameters zunächst gleich Null gesetzt, anschliessend werden die Originalmasseinheiten der um dieses Gebietsmittel streuenden Werte in Vielfache der Standardabweichung umgerechnet. Hieraus ergeben sich vier Bewertungskategorien, deren Abgrenzung durch den Mittelwert Null sowie die einfache positive und

² Die Schichtgrenze wird dort angesetzt, wo die horizontale Fließgeschwindigkeit nicht höher als 0,1 m/s wird

³ Rechnerisch wird dabei von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt



negative Standardabweichung von diesem Mittelwert festgelegt ist (standardmässig vier Bewertungskategorien durch Mittelwert, obere und untere S_1 -Schranke; s. Abb. 4.8).

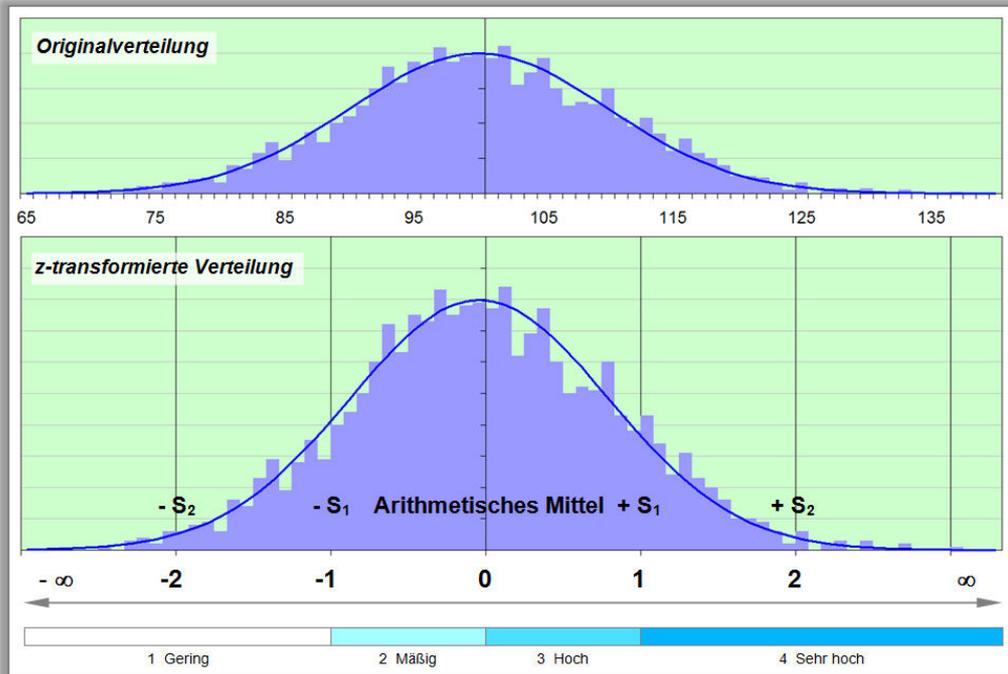


Abb. 4.8: Veranschaulichung der Standardisierung zur vergleichenden Bewertung von Parametern

Die Klassifizierung des flächendeckenden Volumenstroms orientiert sich somit am auftretenden Wertespektrum innerhalb des Kantonsgebietes. Die daraus abgeleitete qualitative Bewertung dieser meteorologischen Grösse zeigt Tab. 4.2.

Mittlerer z-Wert	Bewertung	Kaltluftvolumenstrom in m^3/s um 04:00 Uhr
> 1	Sehr hoch	> 50
> 0 bis 1	Hoch	50 bis ≥ 30
> -1 bis 0	Mässig	30 bis ≥ 5
bis -1	Gering	< 5

Tab. 4.2: Qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms

Ausgehend vom der gebietstypischen Ausprägung im Untersuchungsraum wird als Schwellenwert für einen klimaökologisch wirksamen Kaltluftstrom ein Wert von mindestens $5 m^3/s/m$ angenommen, wobei die innenstadtnahen Siedlungsflächen meist einen mässigen bis geringen Volumenstrom aufweisen. Wie auch die anderen Klimaparameter ist der Kaltluftvolumenstrom eine Grösse, die während der Nachtstunden in ihrer Stärke und Richtung veränderlich ist. Der jeweilige Beitrag beschleunigender und bremsender Faktoren zur Dynamik der Strömung wird unter anderem stark von der bisherigen zeitlichen Entwicklung des Abflusses beeinflusst. So können sich beispielsweise die Kaltluftströmungen über einer Fläche im Laufe der Nacht dadurch ändern, dass die Fläche zunächst in einem Kaltluftabflussgebiet und später in einem Kaltluftsammelgebiet liegt. Letzteres kann zunächst als Hindernis auf nachfolgende Luftmassen wirken und später in der Nacht von diesen über- oder umströmt werden.



Die sich im Verlauf der Nacht einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten hängen im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz der Kaltluft gegenüber der Umgebungsluft, der Hangneigung und der Oberflächenrauigkeit ab – wobei die Kaltluft selber auf alle diese Parameter modifizierend einwirken kann. Gebäude, Mauern oder Strassendämme können als Strömungshindernisse wirken und luvseitig markante Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von grösseren Luftvolumina über- oder umströmt, kommt es im Lee zu bodennahen Geschwindigkeitsreduktionen, die in Verbindung mit vertikalen oder horizontalen Verlagerungen der Strömungmaxima stehen kann. Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebautes Gebiet hängt wesentlich von der Siedlungsgrösse, Bebauungsdichte, anthropogenen Wärmefreisetzung und der Menge einströmender Kaltluft ab. Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Untersuchungsraum geht im Wesentlichen mit der des bodennahen Strömungsfeldes einher. Abbildung 4.9 zeigt den Kaltluftvolumenstrom für das nordöstliche Stadtgebiet Zug in einer qualitativen und quantitativen Abstufung. Ausgehend vom Zugerberg sind intensive Kaltluftabflüsse zu beobachten, welche sich hangabwärts an die sich anschliessenden Falllinien orientieren und über Grünflächen weit in die Bebauung einwirken. So ist ein mässiger Volumenstrom bis in Höhe der Gleisanlagen anzutreffen.

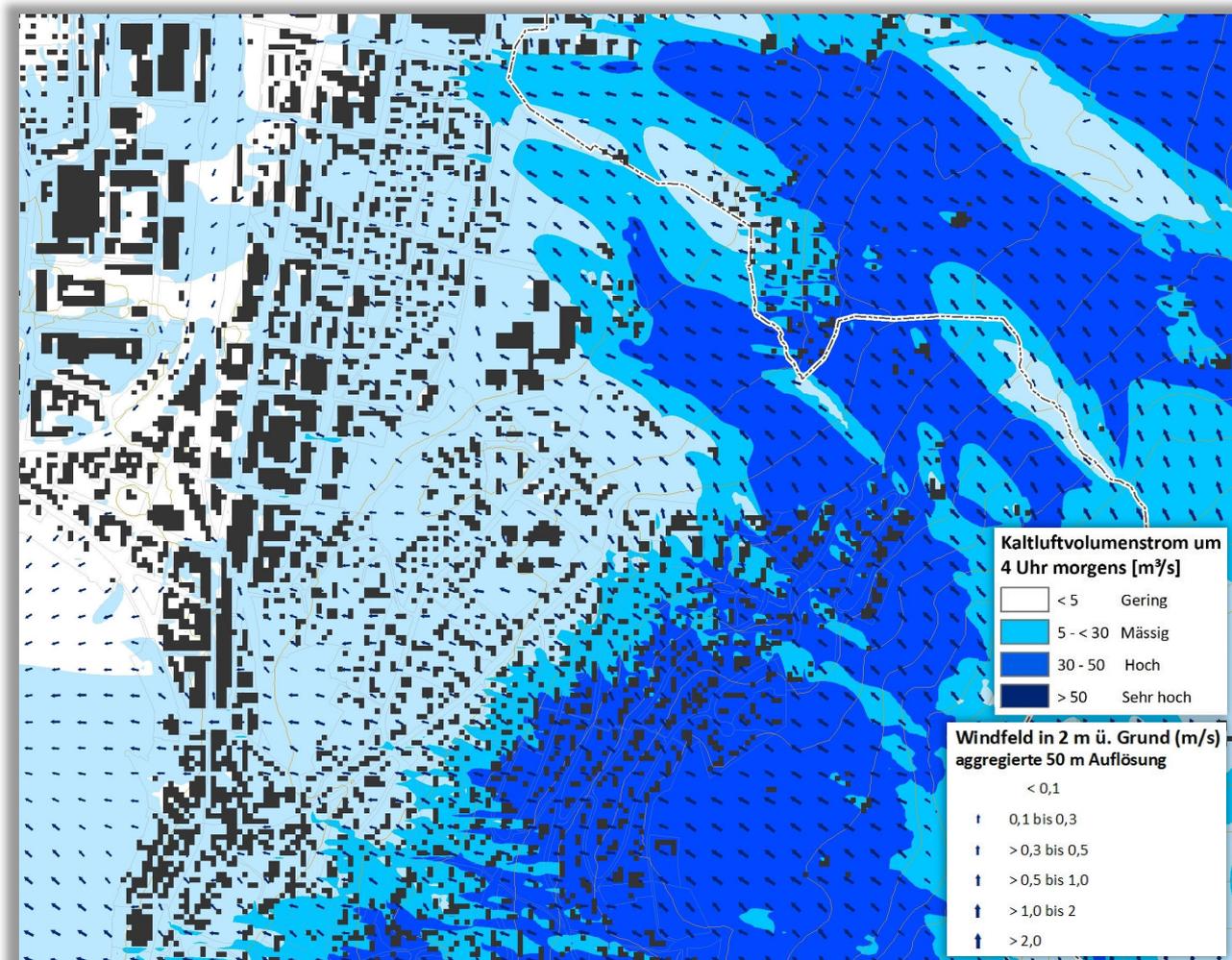


Abb. 4.9: Kaltluftvolumenstrom und bodennahes Windfeld zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens in der Stadt Zug (2m ü. Grund)

Dieser Prozesstyp des Talabwindes ist vorwiegend im nordöstlichen Stadtgebiet anzutreffen, worauf in den Kapiteln 5 und 6 näher eingegangen wird. Analog zur Strömungsgeschwindigkeit treten sehr hohe Werte meist über den mit Rasen bewachsenen und gut überströmbaren Hangbereichen auf.



Dieser als Hangabwind bezeichnete Prozesstyp ist durch einen flächenhaften Kaltluftabfluss gekennzeichnet und weist mit dem Bereich Kirchmattstrasse und dem Grünzug Friedbach zwei lokale Durchlüftungsbereiche auf. Diese Strukturen werden in der Planungshinweiskarte Nacht auch als „Sonderleitbahnen Hangabwind“ ausgewiesen. Die Kaltluftströme im Umfeld der Lorze beruhen weniger auf einem reliefbedingten Luftaustausch (Kaltluftabflüsse) als vielmehr auf dem Temperaturgradienten zwischen Grün- und Siedlungsflächen („Flurwinde“). Im Laufe einer (autochthonen) Sommernacht steigt die Kaltluftmächtigkeit i.d.R. an, sodass geringe Hindernisse überwunden werden können. Beispielsweise können einzelne Grünflächen, die zwar nicht zusammenhängen, aber räumlich nahe liegen und durch nur wenige Hindernisse getrennt sind, als „Trittsteine“ für Kaltluft dienen.



5 Klimaanalysekarte

Der Ausarbeitung der klimaökologisch relevanten Strukturen liegt die vorangegangene Klimamodellierung für das Kantonsgebiet Zug zugrunde. Darin wurden die relevanten meteorologischen Parameter wie Temperaturfeld, Kaltluftvolumenstrom und autochthones Strömungsfeld modelliert und in ihrer flächenhaften Ausprägung dargelegt. Ausgangspunkt der vorliegenden Analyse ist nun die Gliederung des Untersuchungsraumes in bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastete Siedlungsräume (**Wirkungsraum**) einerseits und Kaltluft produzierende, unbebaute und vegetationsgeprägte Flächen andererseits (Ausgleichsräume). Sofern diese Räume nicht unmittelbar aneinander grenzen und die Luftaustauschprozesse stark genug ausgeprägt sind, können linear ausgerichtete, gering überbaute Freiflächen (**Luftleitbahnen**) beide miteinander verbinden. Aus der Abgrenzung von Gunst- und Ungunsträumen sowie der verbindenden Strukturen ergibt sich somit ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen des **Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges** innerhalb des Kantonsgebietes. Im Gegensatz zur Planungshinweiskarte werden in der Klimaanalysekarte nicht die Gevierte als Bezugsgeometrien sondern die rasterhaft vorliegenden Ergebnisse dargestellt. Damit zeigt sich deutlich die flächeninterne Heterogenität in den Gevierten. Zur besseren Lesbarkeit wird die Klimaanalysekarte in die Teilpläne „Überwärmung“ und „Kaltlufthaushalt“ untergliedert.

5.1 Teilkarte 1: Überwärmung Nachtsituation

WÄRMEINSELEFFEKT IM SIEDLUNGSGEBIET

Basierend auf den modellierten bodennahen Lufttemperaturen wird der Wärmeinseleffekt über die Abweichung vom Temperaturmittel der Grün- und Freiflächen berechnet. Aufgrund der ausgeprägten Geländesituation im Kantonsgebiet erfolgte eine Berechnung für die Höhenstufen 500 m, 900 m und > 900 m. Dargestellt wird dies für alle Rasterzellen (exklusive der Gebäude), welche sich innerhalb einer Siedlungsfläche entsprechend der Basisgeometrien befinden. Der Wärmeinseleffekt stellt die Grundlage für die sich anschliessende Bewertung in der Planungshinweiskarte dar. Einen Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte zeigt Abb. 5.1. Die in Kap. 4.1 beschriebene nächtliche Temperatursituation zeichnet sich auch im städtischen Wärmeinseleffekt ab. Während die gering bis moderat verdichteten Siedlungsflächen eine eher niedrige Überwärmung bis 2 K gegenüber den Grün- und Freiflächen aufweisen, steigt sie mit zunehmender städtebaulicher Dichte an und beträgt mehr als 4 K im Innenstadtbereich von Zug sowie grösseren Gewerbeflächen. In den Ortskernen kleinerer und mittlerer Siedlungen treten lokal Werte von bis zu 2 K auf. Diese Werte werden für die Planungshinweiskarte Nacht zu einem Flächenmittelwert für jede Block- bzw. Geviertefläche berechnet.

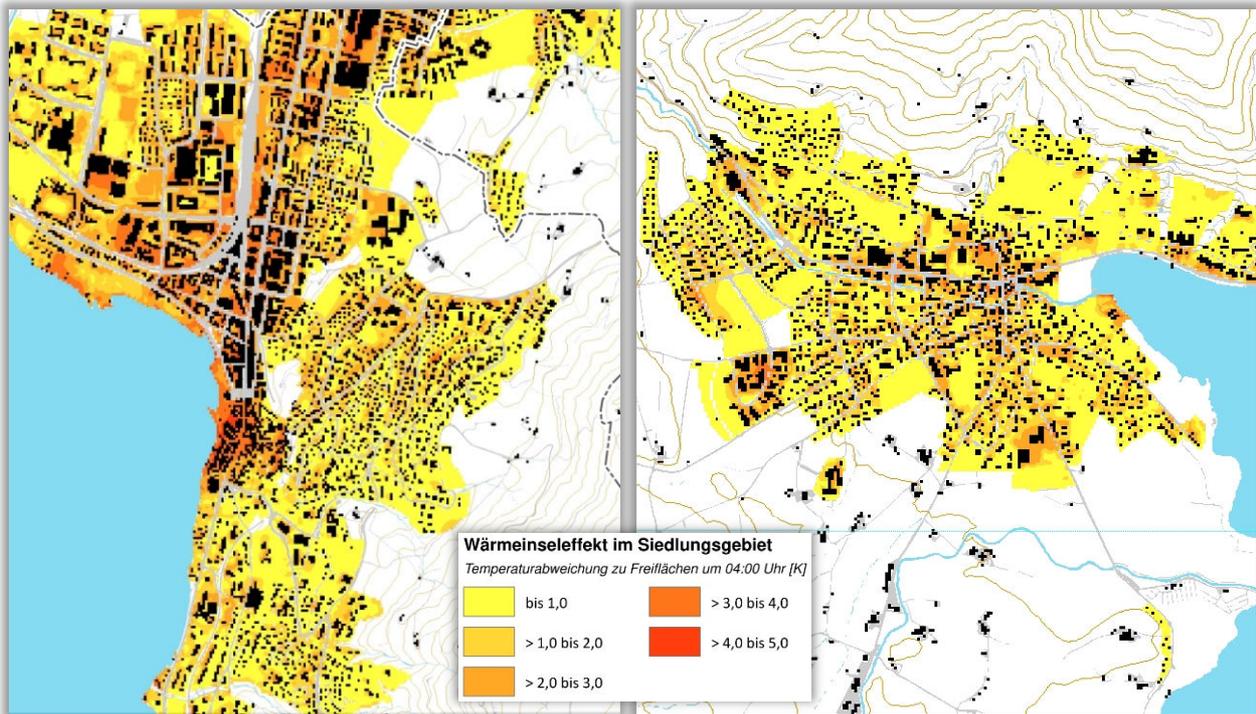


Abb. 5.1: Nächtlicher Wärmeineleffekt im Siedlungsgebiet (Kernstadt Zug links, Unterägeri rechts)

5.1 Teilkarte 2: Kaltlufthaushalt

Die Teilkarte 2 fokussiert sich auf das Kaltluftsystem, wobei die vegetationsbestandenen Freiflächen mit einer nennenswerten Kaltluftproduktion klimaökologische Ausgleichsräume darstellen und über Kaltluftabflüsse die Wärmebelastung in den Siedlungsflächen verringern können. Eine hohe langwellige nächtliche Ausstrahlung während austauscharmer Hochdruckwetterlagen führt zu einer starken Abkühlung der bodennahen Luftschicht. Dabei werden vor allem die ausgedehnten Hangbereiche als Zonen einer sehr hohen Kaltluftlieferung sichtbar. Dies ist auf die intensive Abkühlung zurück zu führen, die mit entsprechenden Kaltluftvolumina einhergehen.

Somit führen unterschiedliche Struktureigenschaften der Grünflächen zu einem Mosaik aus Flächen unterschiedlicher Kaltluftdynamik. Die einzelnen (Teil-) Elemente innerhalb des Kaltluftsystems mit Bezug zu Siedlungsflächen im Kanton werden in der Planungshinweiskarte detaillierter betrachtet.

Strukturen, die den Luftaustausch ermöglichen und Kaltluft an die Siedlungsbereiche heranführen, sind das zentrale Bindeglied zwischen Ausgleichsräumen und bioklimatisch belasteten Wirkungsräumen. Kaltluftleitbahnen sollten daher einen generell geringen Überbauungsgrad und einen hohen Grünflächenanteil aufweisen sowie linear auf Wirkungsräume ausgerichtet sein. Grundsätzlich kommen Tal- und Niederungsbereiche, größere Freiräume aber auch ausgedehnte Gleisareale als geeignete Strukturen in Frage.

KALTLUFT

Windvektoren in 2 m über Grund

Die bodennahe Temperaturverteilung bedingt horizontale Luftdruckunterschiede, die wiederum Auslöser für lokale thermische Windsysteme sind. Ausgangspunkt dieses Prozesses sind die nächtlichen



Temperaturunterschiede, die sich zwischen Siedlungsräumen und vegetationsgeprägten Freiflächen einstellen. An den geneigten Flächen setzt sich abgekühlte und damit schwerere Luft in Richtung zur tiefsten Stelle des Geländes als Kaltluftabfluss in Bewegung. Das sich zum nächtlichen Analysezeitpunkt 04 Uhr ausgeprägte Kaltluftströmungsfeld wird über eine Pfeilsignatur dargestellt. Die Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeillänge in Form von Vektoren abgebildet, wobei die Pfeile der Karte für eine übersichtlichere Darstellung auf 200 m x 200 m Kantenlänge (entspricht 400 Rasterzellen) aggregiert worden sind.

Prozessräume

Die Prozessräume kennzeichnen die Bereiche mit einheitlichem Abflussgeschehen nach dem Wasserscheidenprinzip als Kaltlufteinzugsgebiete. Sie sind das Ergebnis einer GIS-basierten Reliefanalyse nach KING (1973).

Kaltlufteinwirkungsbereich innerhalb der Bebauung

Diese Schraffur kennzeichnet alle Siedlungsflächen, welche sich im „Einwirkungsbereich“ eines klimatisch wirksamen Kaltluftstroms befinden. Zur Abgrenzung wird ein klimatisch wirksamer Kaltluftvolumenstrom $> 5 \text{ m}^3/\text{s}$ pro Rasterzelle herangezogen. Am Ende einer warmen Sommernacht werden bis 04 Uhr ca. 62 % des Siedlungsraums mit Kalt-/Frischlufte versorgt und befinden sich damit im Einwirkungsbereich von Flurwinden und lokalen Kaltluftabflüssen.

Kaltluftentstehungsflächen mit hoher und sehr hoher Kaltluftproduktion

Innerhalb der Grün- und Freiflächen werden die Teilareale mit hoher/sehr hoher Kaltluftproduktion hervorgehoben. Dabei handelt es sich um die rasterhaft modellierten Werte mit einer stündlichen Kaltluftproduktion von mehr 10 m^3 pro m^2 . Dabei erweisen sich vor allem die Waldflächen mit stärkeren Hangneigungen als besonders kaltluftproduktiv, da die im Kronendach gebildete Kaltluft hangabwärts strömt anstatt im Bestand „einzusinken“.

KALTLUFTLIEFERUNG DER GRÜN- UND FREIFLÄCHEN

Für die Kaltluftentstehungsflächen wird der rasterhaft berechnete Kaltluftvolumenstrom (vgl. Kap. 4.4) in einer quantitativen Abstufung dargestellt. Somit wird die räumliche Ausprägung und die Identifikation von Teilflächen mit besonders hohen Werten gut sichtbar.

KALTLUFTSYSTEM

Über den ausgedehnten Hangbereichen des Zugerbergs bilden sich flächenhafte Kaltluftabflüsse aus, welche hangabwärts strömen und dabei in die Siedlungsräume einwirken. Innerhalb des Kaltluftsystems lassen sich drei Prozessstypen untergliedern. Die Kaltluftabflüsse, welche sich hangabwärts an den sich anschliessenden Tiefenlinien orientieren und über Grünflächen weit in die Bebauung einwirken, werden als Talabwinde bezeichnet. Während die Bereiche mit hohem und sehr hohem Kaltluftvolumenstrom als primäre Leitbahnen abgegrenzt werden, weist der sekundäre Leitbahnbereich noch einen mittleren Volumenstrom auf.



Die übrigen flächenhaften Kaltluftabflüsse werden als Hangabwinde bezeichnete, welche mit den Bereichen Kirchmattstrasse und dem Grünzug Friedbach zwei lokale Durchlüftungsbereiche aufweisen. Diese Strukturen werden in der Planungshinweiskarte Nacht auch als „Sonderleitbahnen Hangabwind“ ausgewiesen. Auch östlich des Zuger Bergs treten umfangreiche Hangabwinde auf. Der Übergangsbereich zwischen Siedlungsfläche und Umland wird als Kontaktsaum Hangabwind dargestellt. Die Kaltluftströme im Umfeld der Lorze beruhen als Flurwinde auf dem Temperaturgradienten zwischen Grün- und Siedlungsflächen und sind von den Kaltluftabflüssen nur wenig beeinflusst.

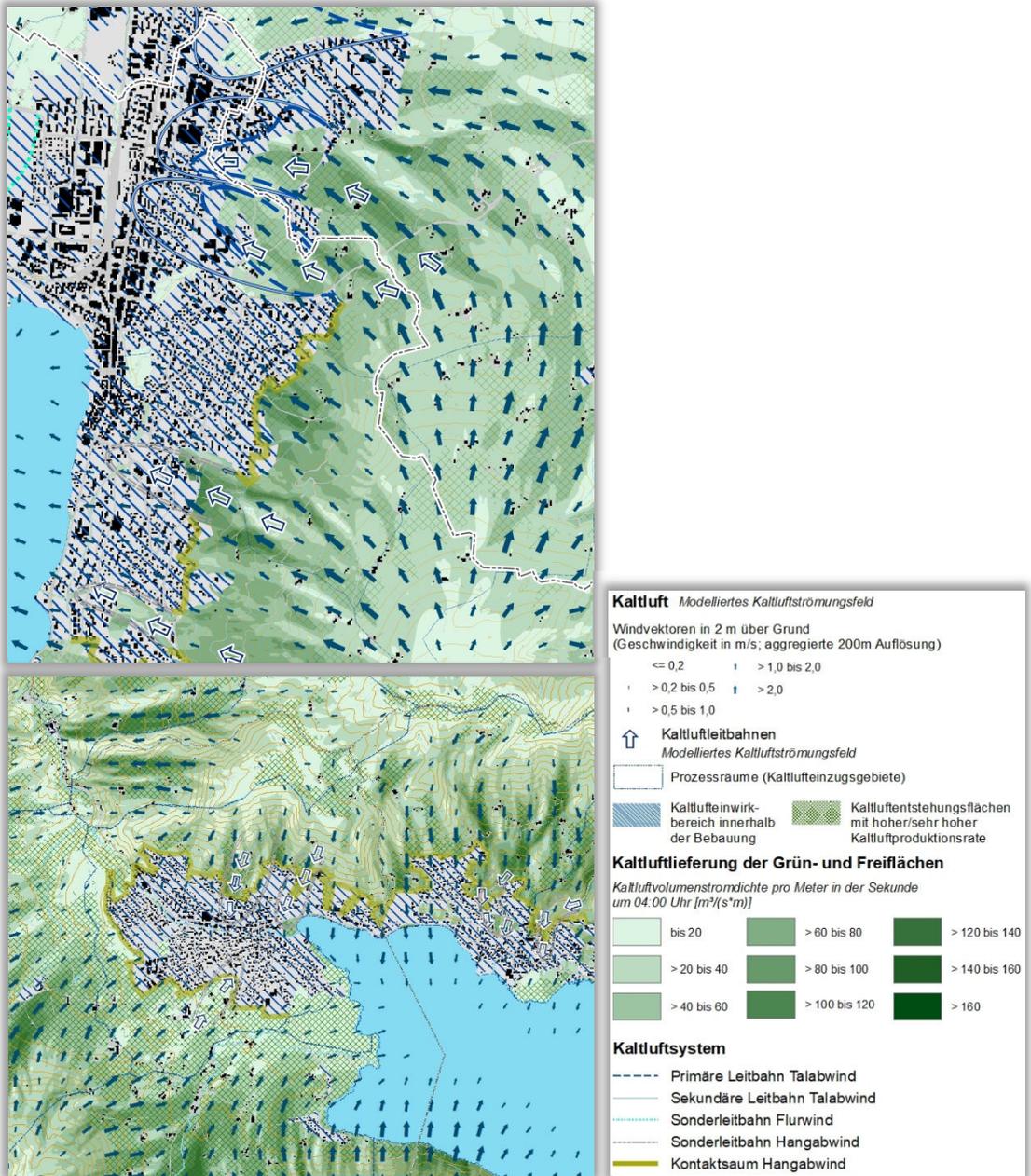


Abb. 5.2: Kaltlufthaushalt in der Nacht in der Stadt Zug (oben) und im Raum Unter-/Oberägeri (unten)



6 Planungshinweiskarten Siedlungsklima

Innerstädtische und siedlungsnaher Grünflächen haben eine wesentliche Wirkung auf das Stadtklima und beeinflussen die direkte Umgebung in mikroklimatischer Sicht positiv. Die Planungshinweiskarten stellen eine integrierende Bewertung der modellierten Klimaparameter im Hinblick auf planungsrelevante Belange dar. Aus ihnen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung von Klima und - über die Effekte der Verdünnung und des Abtransportes - auch der Luft ableiten. Dem Leitgedanken dieser Bemühungen entsprechen die Ziele zur

- Sicherung,
- Entwicklung und
- Wiederherstellung

klimaökologisch wichtiger Oberflächenstrukturen. Die zugeordneten Planungshinweise geben Auskunft über die Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen, aus denen sich klimatisch begründete Anforderungen und Massnahmen im Rahmen der räumlichen Planung ableiten lassen.

Es wurde jeweils eine separate Planungshinweiskarte (PHK) für die Nacht- und Tagsituation erstellt, die sich jeweils auf das Kantonsgebiet Zug beziehen. In Anlehnung an die VDI-Richtlinien 3785, Blatt 1 bzw. 3787, Blatt 1 erfolgte eine Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungsflächen als **Wirkungsraum** bzw. der Bedeutung von Grünflächen als **Ausgleichsraum** (VDI 2008a, VDI 2014). Ausgehend von ihren Bewertungen werden den Flächen allgemeine Planungshinweise zugeschrieben.

6.1 Vorgehensweise

6.1.1 Bewertung der Nachtsituation

KALTLUFT

Die bereits in der Klimaanalysekarte dargestellten Elemente Windvektoren, Prozessräume, Kaltlufteinwirkbereiche sowie -Leitbahnen werden in die Planungshinweiskarte übernommen.

KALTLUFTSYSTEM

Innerstädtische und siedlungsnaher Grünflächen haben eine wesentliche Wirkung auf das Stadtklima und beeinflussen die direkte Umgebung in mikroklimatischer Sicht positiv. Auf Grundlage des modellierten Kaltluftvolumenstroms und der bodennahen Windgeschwindigkeit lassen sich alle für die Luftaustauschprozesse bedeutsamen Strukturen ableiten. Neben den Siedlungsflächen sind dies vor allem die Kaltluftentstehungsgebiete (Grün- und Freiräume sowie Waldflächen), welche sich ausgehend von der Siedlungsgrenze hangaufwärts bis zum Kuppenbereich der angrenzenden Hänge identifizieren lassen. Als weitere Elemente sind die Leitbahnen sowie die Übergangsbereiche zwischen Bebauung und Grünflächen zu nennen. Etwa 66 % des Siedlungsraums werden in den Nachtstunden mit Kaltluft versorgt, wobei sich insgesamt drei Kaltluftsysteme unterscheiden lassen:



Die **Talabwinde** sind im nordöstlichen Stadtgebiet im Umfeld der Kantonsschule Zug lokalisiert, wobei sich der nächtliche Kaltluftabfluss hauptsächlich an den vorhandenen Grünräumen orientiert. Dieses Kaltluftsystem wird durch primäre Leitbahnen mit höheren Windgeschwindigkeiten im bodennahen Bereich charakterisiert. Allerdings werden diese durch die Hinderniswirkung der Bebauung allmählich abgeschwächt. Gleichzeitig können jedoch im Überdachniveau noch hohe bzw. sehr hohe Kaltluftvolumina vorhanden sein, die in Bereichen mit geringer Bebauung durchaus wieder in den bodennahen Bereich einwirken können. Diese Zonen mit hohem Volumenstrom werden als sekundäre Leitbahnen definiert. Darüber hinaus tritt im sogenannten Einwirkbereich verbreitet noch ein Einwirken mit mittlerem Volumenstrom auf.

Im Zusammenhang mit dem Zugerberg treten im östlichen Stadtgebiet **Hangabwinde** auf. Diese sind – im Gegensatz zu den Talabwinden – flächenhaft ausgeprägt und weniger an Leitbahnstrukturen orientiert. Allerdings werden mit dem Fridbach und den Grünstrukturen im Umfeld der Pädagogischen Hochschule lokal hervortretende Durchlüftungsbereiche als Sonderleitbahnen ausgewiesen. Da der Kaltluftvolumenstrom recht homogen ausgeprägt ist, lässt sich hier kein sekundärer Leitbahnbereich ausweisen. Die in den Siedlungsraum eindringende Kaltluft wird unabhängig von ihrer Intensität als Einwirkbereich dargestellt. Analog zu den Talabwinden wird ein Kontaktsaum ausgewiesen. Dabei handelt es sich um den Übergangsbereich zwischen Bebauung und jeweiliger Struktur. Da das Einwirken von bodennaher Kaltluft über die durchströmbaren Strukturen erfolgt, sind diese Bereiche von besonderer Empfindlich gegenüber einer weiteren Bebauung.

Als drittes Kaltluftsystem treten **Flurwinde** ohne besonderen Einfluss des Reliefs westlich der Innen-stadt bzw. beidseits der Lorze auf. Da sie sich aufgrund des horizontalen Temperaturunterschieds zwischen Grün- und Siedlungsräumen ausbilden, sind sie als rein thermisch bedingte und damit eher schwach ausgeprägte Strömungssysteme anzusehen. Die sich entlang Allmendstrasse und westlich des Stierenmarktareals fortsetzende Grünstruktur begünstigt das Eindringen bodennaher Kaltluft in den Siedlungsraum, so dass dieser Bereich als Sonderleitbahn angesprochen wird. Der Einwirkbereich kennzeichnet die Flächenanteile mit klimatisch wirksamer Kaltluftströmung.

Die außerhalb dieser Systeme lokalisierten **übrigen Grün- und Freiflächen**⁴ lassen bei Bezug zu thermisch belasteter Bebauung eine hohe stadtklimatische Bedeutung erkennen. Befinden sie sich im Umfeld von mässig überwärmter Bebauung ergibt sich eine mittlere Bedeutung. Eine geringe Bedeutung haben die Areale ohne Bezug zu Siedlungsflächen im Stadtgebiet Zug, so z.B. die bewaldeten Hänge auf der östlichen Abdachung des Zugerbergs. Zudem werden die gemeindeübergreifenden Kaltluftentstehungsflächen mit einer flächenhaften Schraffur gekennzeichnet.

Diese Flächen weisen eine **hohe stadtklimatische Bedeutung** auf. Die Empfindlichkeiten der jeweiligen Strukturen und die abzuleitenden Hinweise orientieren sich an ihrer Funktion. So sollten im Talabwindensystem Strömungshindernisse in den Leitbahnen möglichst vermieden werden, da sich durch die

⁴ Als „Grünfläche“ werden hier unabhängig von ihrer jeweiligen Nutzung all jene Flächen bezeichnet, die sich durch einen geringen Versiegelungsgrad von maximal etwa 25 % auszeichnen. Neben Parkanlagen, Kleingärten, Friedhöfen und Sportanlagen umfasst dieser Begriff damit auch landwirtschaftliche Nutzflächen sowie Wälder.



Hinderniswirkung eine Einschränkung des Systems mit einhergehender Reduktion des Einwirkbereiches ergeben könnte. Der Kontaktsaum (in etwa die ersten zwei bis drei Parzellen) ist sowohl bei den Leitbahnen als beim Hangabwindssystem generell von hoher Empfindlichkeit. Denn hier wird massgeblich beeinflusst, ob und wieviel Kaltluft in Richtung Siedlungsraum strömt. Bei konkreten Nutzungsänderungen ist eine individuelle Einzelfallbetrachtung und Bewertung sinnvoll.

SIEDLUNGSRAUM

Zur Bewertung der bioklimatischen Situation wird die nächtliche Überwärmung in den Nachtstunden (04 Uhr morgens) herangezogen. Da die Planungshinweiskarte die Funktionen und Prozesse des nächtlichen Luftaustausches abbilden soll, wird hier der nächtliche Wärmeinseleffekt betrachtet. In der Nacht ist weniger der Aufenthalt im Freien Bewertungsgegenstand, sondern vielmehr die Möglichkeit eines erholsamen Schlafes im Innenraum. Die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 weist darauf hin, dass die „Lufttemperatur der Aussenluft die entscheidende Grösse“ für die Bewertung der Nachtsituation darstellt und näherungsweise ein direkter Zusammenhang zwischen Aussen- und Innenraumluft unterstellt werden kann (VDI 2008b, 25). Als optimale Schlafertemperaturen werden gemeinhin 16 - 18 °C angegeben (UBA 2016), während Tropennächte mit einer Minimumtemperatur ≥ 20 °C als besonders belastend gelten. Eine mit der PET vergleichbare Bewertungsskala existiert für die nächtliche Situation im Innenraum (noch) nicht.

Für die Planungshinweiskarte erfolgte die räumlich differenzierte Bewertung der Nachtsituation daher über den nächtlichen Wärmeinseleffekt. Dafür wurde die mittlere Überwärmung pro Block- bzw. Geviertefläche in vier Klassen untergliedert (Tab. 6.1).

Abweichung der Temperatur gegenüber den Grün- und Freiflächen um 04:00 (K)	Beurteilung der nächtlichen Überwärmung	Bioklimatische Bewertung
≤ 1 °C	Keine	Sehr günstig
> 1 °C bis 2 °C	Gering	Günstig
> 2 °C bis 3 °C	Mässig	Weniger günstig
> 3 °C	Hoch	Ungünstig

Tab. 6.1: Bewertung des nächtlichen Wärmeinseleffekts im bebauten Siedlungsraum

6.1.2 Bewertung der Tagsituation

Zur Bewertung der Tagsituation wird der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (vgl. Kap. 4.2). Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (vgl. Tab. 6.2). Die Bewertung der thermischen Belastung im Kanton Zug orientiert sich daran. Da die Kategorien jeweils eine Wertespanne von mehreren °C abdecken, ist zur besseren Darstellung der Belastungssituation im bebauten Siedlungsraum eine weitere Kategorie hinzugefügt worden. Diese umfasst den Temperaturbereich 38 °C bis 41 °C (als „sehr starke Wärmebelastung“) und führt zu einer besseren Differenzierung der Belastungssituation vor allem im urbanen Gebiet. Die Werteausprägung in den Grün- und Freiflächen machte diese zusätzliche Kategorie hingegen nicht notwendig.



PET	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastungsstufe
4 °C	Sehr kalt	Extreme Kältebelastung
8 °C	Kalt	Starke Kältebelastung
13 °C	Kühl	Mässige Kältebelastung
18 °C	Leicht kühl	Schwäche Kältebelastung
20 °C	Behaglich	Keine Wärmebelastung
23 °C	Leicht warm	Schwache Wärmebelastung
29 °C	Warm	Mässige Wärmebelastung
35 °C	Heiss	Starke Wärmebelastung
38 °C	<i>Heiss</i>	<i>Sehr starke Wärmebelastung</i>
41 °C	Sehr heiss	Extreme Wärmebelastung

Tab. 6.2: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden

Die Zuweisung der Aufenthaltsqualität von Grün- und Freiflächen in der Planungshinweiskarte beruht auf der jeweiligen physiologischen Belastungsstufe. So liegt eine hohe Aufenthaltsqualität bei einer schwachen oder nicht vorhandenen Wärmebelastung vor, während eine starke oder extreme Wärmebelastung zu einer geringen bzw. sehr geringen Aufenthaltsqualität führt. Die bioklimatische Bewertung am Tage ist ein Mass für die Aufenthaltsqualität in den Siedlungsflächen ausserhalb von Gebäuden sowie in Grün- und Freiflächen. Diese beeinflusst auch die Situation innerhalb der Gebäude, doch hängt das Innenraumklima von vielen weiteren (z.B. gebäudebezogenen) Faktoren ab. Diese Zusammenhänge können im Rahmen der vorliegenden Arbeit allerdings nicht weiter vertieft werden. Die Wärmebelastung im Rad- und Fusswegenetz wird in einer eigenständigen Karte dargestellt.

6.2 Ergebnisse

6.2.1 Nachtsituation

Ein erholsamer Schlaf ist nur bei günstigen thermischen Bedingungen möglich, weshalb der Belastungssituation in den Nachtstunden eine besondere Bedeutung zukommt. Da die klimatischen Verhältnisse der Wohnungen in der Nacht im Wesentlichen nur durch den Luftwechsel modifiziert werden können, ist die Temperatur der Aussenluft der entscheidende Faktor bei der Bewertung der thermophysiologicalen Belastung. Entsprechend spiegelt die Beurteilung des Bioklimas weniger die thermische Beanspruchung des Menschen im Freien wider, als vielmehr die positive Beeinflussbarkeit des nächtlichen Innenraumklimas.

Wie in Kap. 3.3 beschrieben, ist die bioklimatische Belastungssituation der Baublöcke auf Basis der nächtlichen Überwärmung ausgewiesen worden. Damit ergibt sich eine räumliche Untergliederung des Siedlungsraumes in bioklimatisch belastete Bereiche einerseits sowie unbelastete bzw. lediglich gering belastete andererseits. Letztere sind, durch von Kaltluft produzierenden Grünflächen ausgehende Kaltlufteinwirkbereiche, nur gering überwärmt und durch eine ausreichende Durchlüftung gekennzeichnet. Die Einwirkbereiche innerhalb der Bebauung sind durch die Schraffur gekennzeichnet. Am Ende einer warmen Sommernacht werden im Stadtgebiet Zug bis 04 Uhr ca. 68.4 % des Siedlungsraums mit Kalt-



/Frischluff versorgt und befinden sich damit im Einwirkungsbereich von Flurwinden und lokalen Kaltluftabflüssen.

Diesen Gunsträumen stehen Belastungsbereiche mit einer überdurchschnittlichen Wärmebelastung und einem Durchlüftungsdefizit gegenüber. Dies betrifft vor allem den Stadtkern von Zug sowie kleinräumiger auch Gewerbeflächen, in denen bioklimatisch weniger günstige bzw. ungünstige Bedingungen vorliegen. Diese resultieren aus dem hohen Überbauungs- und Versiegelungsgrad sowie einer in Teilen unzureichenden Durchlüftung.

Abbildung 6.1 zeigt in einem Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte Nacht, wobei die thermische Situation der Siedlungsräume mit einer Farbabstufung dargestellt ist. Die stärkste Überwärmung ist im Umfeld von Baarerstrasse und Gubelstrasse anzutreffen (Dunkelbraun). Die übrige Bebauung weist vorwiegend eine schwache bis mässige Überwärmung auf. Der Einwirkungsbereich der Kaltluft ist mit einer Schraffur dargestellt. In der Planungshinweiskarte zeichnen sich die in Kap. 6.1.1 beschriebenen Kaltluftsysteme und die damit im Zusammenhang stehenden Grünflächen ab. Die insgesamt vier Leitbahnbereiche werden über eine Pfeilsignatur sowie einen Umgriff abgegrenzt.

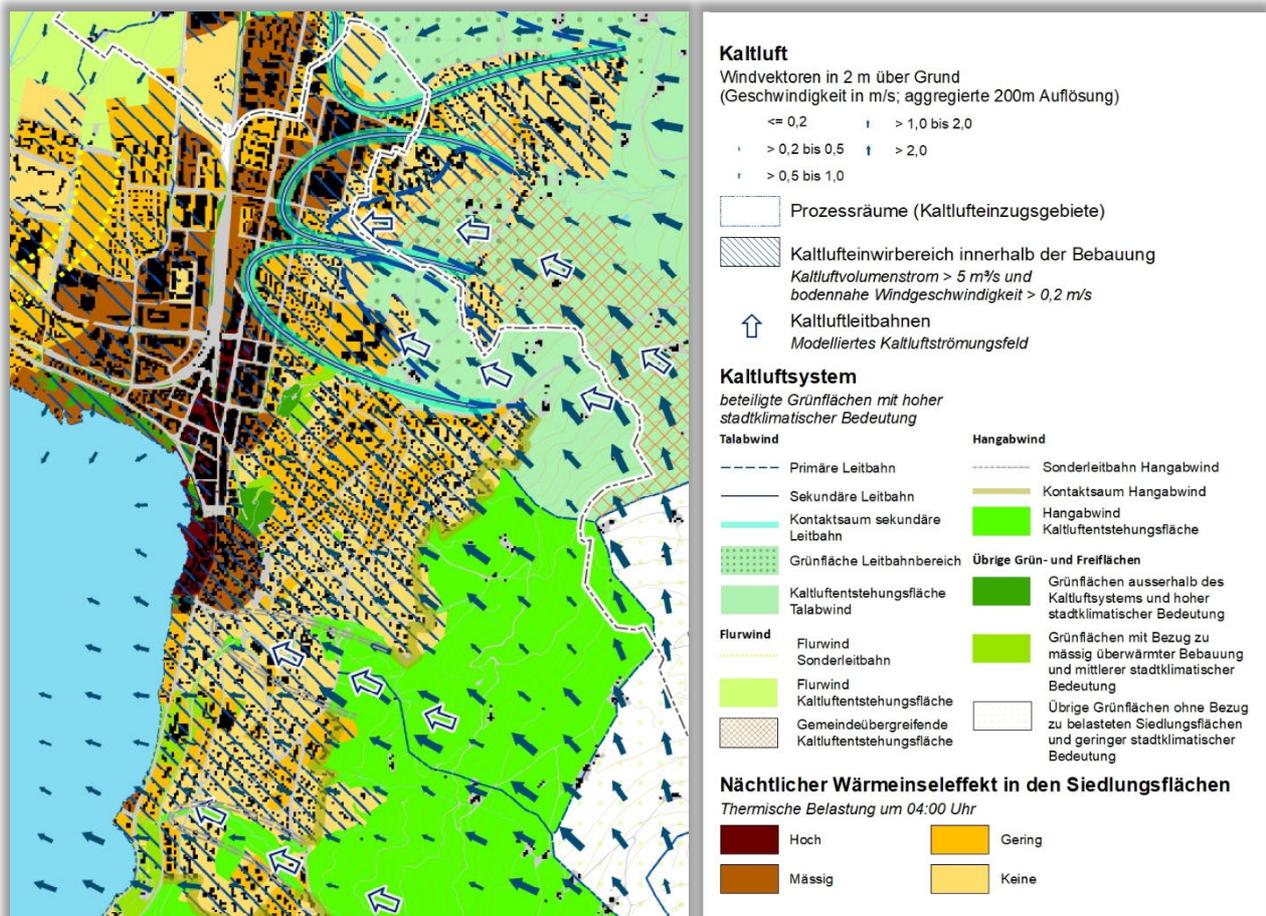


Abb. 6.1: Planungshinweiskarte Nachtsituation in der Stadt Zug

Flächen mit einer hohen Überwärmung machen unter den **Siedlungsflächen** im Kanton Zug nur einen geringen Anteil von 0.6 % aus. Sie sind vorwiegend in den urbaner geprägten Räumen sowie innerhalb von Gewerbeflächen anzutreffen. Der Anteil von Flächen mit weniger günstigen Bedingungen bzw. mässiger thermischer Belastung beträgt 12.2 %. Darüber hinaus ist in 38.1 % der Siedlungsräume eine geringe



Überwärmung anzutreffen. Innerhalb der eher dörflich strukturierten Siedlungsflächen ist keine nennenswerte nächtliche Überwärmung anzutreffen. Mit einem Anteil von ca. 49.1 % ist diese Kategorie am stärksten ausgeprägt.

Bewertung	Flächenanteil am Siedlungsraum (%)	Allgemeine Planungshinweise
Sehr günstig - keine thermische Belastung	49.1	Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das sehr günstige Bioklima ist zu sichern. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich. Der Vegetationsanteil sollte möglichst erhalten bleiben.
Günstig - geringe thermische Belastung	38.1	Geringe bis mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das günstige Bioklima ist zu sichern. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht notwendig. Freiflächen und der Vegetationsanteil sollten möglichst erhalten bleiben.
Weniger günstig - Mässige thermische Belastung	12.2	Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Die Baukörperstellung sollte beachtet, Freiflächen erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
Ungünstig - hohe thermische Belastung	0.6	Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entsiegelungsmassnahmen durchgeführt werden (z.B. Pocket-Parks, Begrünung von Blockinnenhöfen).

Tab. 6.3: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise

6.2.2 Tagsituation

BIOKLIMA IN DEN SIEDLUNGSFLÄCHEN

Am Tage sind deutliche Unterschiede in der Aufenthaltsqualität sowohl in den bebauten bzw. versiegelten Bereichen als auch den Grünflächen zu erkennen (Abb. 6.4). **Urbane Siedlungsflächen** lassen mehrheitlich eine starke und sehr starke bioklimatische Belastung erkennen, wobei die PET in ihrer rasterhaften Ausprägung dargestellt wird. Dahingehend treten vor allem die Gewerbeflächen im Innenstadtbereich hervor, welche stark versiegelt sind und in der Regel wenige Grünflächen, sodass die solare Einstrahlung und entsprechend auch die thermische Belastung am Tage höher ausfällt. Strassen, Wege und Plätze weisen aufgrund ihrer nahezu vollständigen Versiegelung insgesamt die höchsten thermischen Belastungen auf (Abb. 6.2).

Bei diesem Flächentyp liegt generell eine grosse Bandbreite struktureller Ausprägungen vor - von offenen, vollversiegelten Plätzen bis hin zu durch Bäume (oder Gebäude) stark verschatteten Strassenabschnitten. Eine mässige Belastung ist in den eher peripheren Siedlungsflächen mit höherem Anteil mit Schatten spendenden Grünstrukturen zu beobachten.



Vor allem im Nahbereich zu grösseren Waldflächen zeigt sich die positive Wirkung grösserer Baumbestände für die angrenzende Bebauung (Abb. 6.2). Innerhalb von wärmebelasteten Siedlungsräumen kommt Grünflächen mit hoher Aufenthaltsqualität eine wichtige Rolle zu (z.B. in der Stadt Zug der mit A gekennzeichnete Grünzug am Bergliweg;). Areale mit schwacher bzw. nicht vorhandener Belastung spielen eine eher untergeordnete Rolle. In den höher gelegenen Siedlungsbereichen wie Unterägeri treten zwar ähnlich hohe Maximalwerte wie beispielsweise in der Stadt Zug auf, allerdings ist deren Flächenanteil deutlich geringer. Zudem ist das Belastungsniveau aufgrund der mit der Höhenlage zurückgehenden Lufttemperatur insgesamt etwas niedriger ausgeprägt.

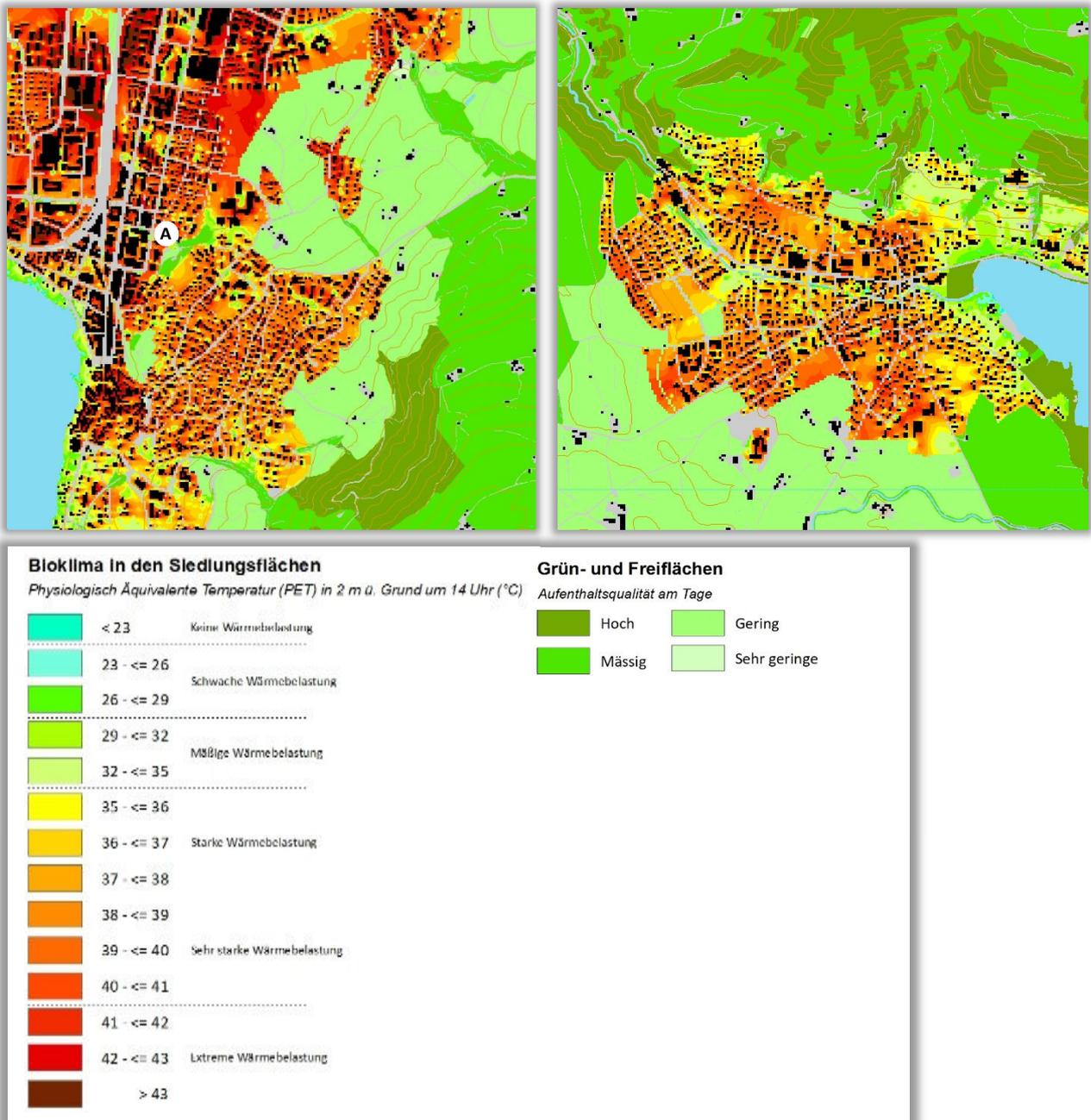


Abb. 6.2: Planungshinweiskarte Tagsituation in der Stadt Zug (links) und Unterägeri (rechts)

Es werden zudem die befestigten sowie die unversiegelten Flächenanteile innerhalb des Siedlungsraums ausgewiesen. Auf Grundlage der dargestellten PET lässt sich die jeweilige Belastungssituation auf der



jeweiligen Fläche ablesen. Allgemeine Planungshinweise für den Siedlungsraum sowie das Strassen- und Fusswegenetz sind in Tabelle 4.3 zusammengestellt.

Belastungssituation am Tage	
Siedlungsraum & Strassen/Fusswegenetz	Allgemeine Planungshinweise
Schwach	Es liegen überwiegend bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein ausreichender Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fuss- bzw. Radwegen und Plätzen jedoch geprüft werden.
Mässig	Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen, z.B. in Form von Verschattungselementen bzw. zusätzlicher Begrünung. Dies gilt auch für Flächen des fliessenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuss- und Radwege sowie Plätze). Ausgleichsräume sollten fussläufig erreichbar und zugänglich sein.
Stark	Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Hoher Bedarf an Anpassungsmassnahmen wie zusätzlicher Begrünung und Verschattung sowie ggf. Entsiegelung. Dies gilt auch für Flächen des fliessenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuss- und Radwege sowie Plätze).
Sehr stark	Ausreichend Ausgleichsräume sollten fussläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
Extrem	Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmassnahmen wie zusätzlicher Begrünung (z.B. Pocket-Parks), Verschattung und Entsiegelung. Dies gilt auch für Flächen des fliessenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuss- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten fussläufig gut erreichbar und zugänglich sein.

Tab. 6.4: Bioklimatische Belastungssituation am Tage und abgeleitete Planungshinweise

GRÜN- UND FREIFLÄCHEN

Grünflächen mit hoher Aufenthaltsqualität und mit geringer PET bieten an Sommertagen eine relativ hohe Aufenthaltsqualität und eignen sich je nach Lage als (potenzielle) Rückzugsorte und Aufenthaltsbereiche für die Bevölkerung. Dabei handelt es sich vor allem um Waldflächen sowie Parkanlagen mit ausgeprägtem Baumbestand. Die weitläufigen landwirtschaftlichen genutzten Flächen erlauben aufgrund der meist ungehinderten Einstrahlung (unabhängig von der ohnehin fehlenden Zugänglichkeit) keinen Rückzugsort und tragen zu einem hohen Anteil an Grünflächen geringer bzw. sehr geringer Bedeutung bei. Allgemeine Planungshinweise für Grünflächen sind in Tabelle 6.5 zusammengefasst.



Aufenthaltsqualität der Grünflächen am Tage	Allgemeine Planungshinweise
Hoch	Grünflächen mit einem hohen Mass an Verschattung und damit einhergehender hoher Aufenthaltsqualität, die fussläufig aus den belasteten Siedlungsgebieten erreicht werden können. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung), eine gute Erreichbarkeit sollte dahingehend gewährleistet sein.
Mässig	Grünflächen mit einem durchschnittlichen Mass an Verschattung, bei denen der bioklimatisch positive Einfluss durch Vegetationselemente überwiegt. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und schützen (ggf. Bewässerung) sowie ggf. auszubauen. Zudem kann es sich um siedlungsferne Grünflächen mit hoher Verschattung handeln, die nicht in fussläufiger Erreichbarkeit liegen, aber als Aufenthaltsbereiche am Tage dienen können.
Gering	Frei- und Grünflächen mit einem Defizit an Verschattung (geringe Ausgleichsfunktion). Eher schlechte Eignung als Aufenthaltsbereich. Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
Sehr gering	Freiflächen bzw. siedlungsferne Grünflächen mit wenig Schatten und intensiver solarer Einstrahlung (vorwiegend Rasen- bzw. landwirtschaftliche Nutzflächen). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).

Tab. 6.5: Aufenthaltsqualität von Grünareale am Tage und abgeleitete Planungshinweise

In zahlreichen Grünflächen können Bäume durch ihren Schattenwurf für ein angenehmeres Aufenthaltsklima sorgen, da dieser den Strahlungseinfluss deutlich vermindert. Dahingehend tritt in der Stadt Zug der Grünzug am Bergliweg mit hoher Aufenthaltsqualität hervor. Zudem ist im Uferbereich des Zugersees eine hohe Aufenthaltsqualität anzutreffen, welche auf die thermisch ausgleichende Wirkung der Wasserfläche zurückzuführen ist.

Eine umfassende Übersicht zu den möglichen Massnahmen zur Hitzeminderung wird in der Veröffentlichung „Hitze in Städten“ des BAFU (2018) gegeben.



7 Literatur

- Begert, M.; Frei, C.; Abbt, M. (2013): Einführung der Normperiode 1981-2010 - MeteoSchweiz. Hg. v. Meteoschweiz (245). Online verfügbar unter <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klima-der-schweiz/klima-normwerte.subpage.html/de/data/publications/2013/9/einfuehrung-der-normperiode-1981-2010.html>, zuletzt geprüft am 22.10.2020.
- Begert, M.; Stöckli, R.; Croci-Maspoli, M. (2019): Klimaentwicklung in der Schweiz - Vorindustrielle Referenzperiode und Veränderung seit 1864 auf Basis der Temperaturmessung. Fachbericht. Hg. v. Meteoschweiz (274). Online verfügbar unter https://www.meteoschweiz.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/service-und-publikationen/Publikationen/doc/AB_Vorind_Refp_v1.1_de.pdf, zuletzt geprüft am 22.10.2020.
- BUNDESAMT FÜR UMWELT BAFU (2018): Hitze in Städten. Grundlagen für eine klimagerechte Stadtentwicklung.
- DFG (1988) – Deutsche Forschungsgemeinschaft: Physikalische Grundlagen des Klimas und Klimamodelle. Abschlussbericht. Bonn.
- DWD (2017) – Deutscher Wetterdienst: Klimawandelgerechte Metropole Köln. Abruf: 28.03.2018. http://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimawirk/stadtpl/projekt_koeln/stadtpl_koeln_node.html
- DWD (2016) – Deutscher Wetterdienst: Nationaler Klimareport 2016. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland, 40 Seiten.
- GROSS, G. (1989): Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. Beitr. Phys. Atmosph. , H 62 , S. 57-72.
- GROSS, G. (1993): Numerical Simulation of canopy flows. Springer Verlag Heidelberg.
- GROSS, G. (2002): The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model. Meteor. Z.schr. Vol. 11 Nr. 5., S. 701-710.
- JENDRITZKY, G., et al. 1990. Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). Beitr. Akad. Raumforsch. Landesplan. Nr. 114.
- KIESE, O. et al. (1992): Stadtklima Münster. Entwicklung und Begründung eines klimarelevanten Planungskonzeptes für das Stadtgebiet von Münster. Stadt Münster - Werkstattberichte zum Umweltschutz 1/1992
- KUTTLER, W. (1999): Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. In: Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e. V. Leipzig. Band 13.
- KUTTLER, W. (2013): Klimatologie. Kapitel: Lokale Massnahmen gegen den globalen Klimawandel. Paderborn: Schöningh (2. Auflage).
- Meteoschweiz (Hg.) (2020a): Klima-Indikatoren. Online verfügbar unter https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-indikatoren.html?station=bas&filters=WetBulbT_1981-today_JJA, zuletzt aktualisiert am 22.10.2020.



- Meteoschweiz (2020b): Klimanormwerte Wädenswil. Normperiode 1981 - 2010. Online verfügbar unter https://www.meteoschweiz.admin.ch/product/output/climate-data/climate-diagrams-normal-values-station-processing/WAE/climsheet_WAE_np8110_d.pdf, zuletzt geprüft am 04.12.2020.
- Meteoschweiz (2020d): Zeitliche Entwicklung von Temperatur und Niederschlag. Online verfügbar unter https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klimawandel-schweiz/temperatur-und-niederschlagsentwicklung.html?filters=ths200m0_northlow_jja_1864-trend, zuletzt geprüft am 22.10.2020.
- MOSIMANN, Th., P. TRUTE & Th. FREY (1999): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen, Heft 4/99, S. 202-275.
- UBA (2019): HBEFA Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Version 4.1/November 2019. INF-RAS AG, Bern, Schweiz, Hrsg.: UBA (Umweltbundesamt) Berlin
- VDI (2004): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 9. Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene.
- VDI (2008a): VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.
- VDI (2008b): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima.
- VDI (2014): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Entwurf.



Anhang

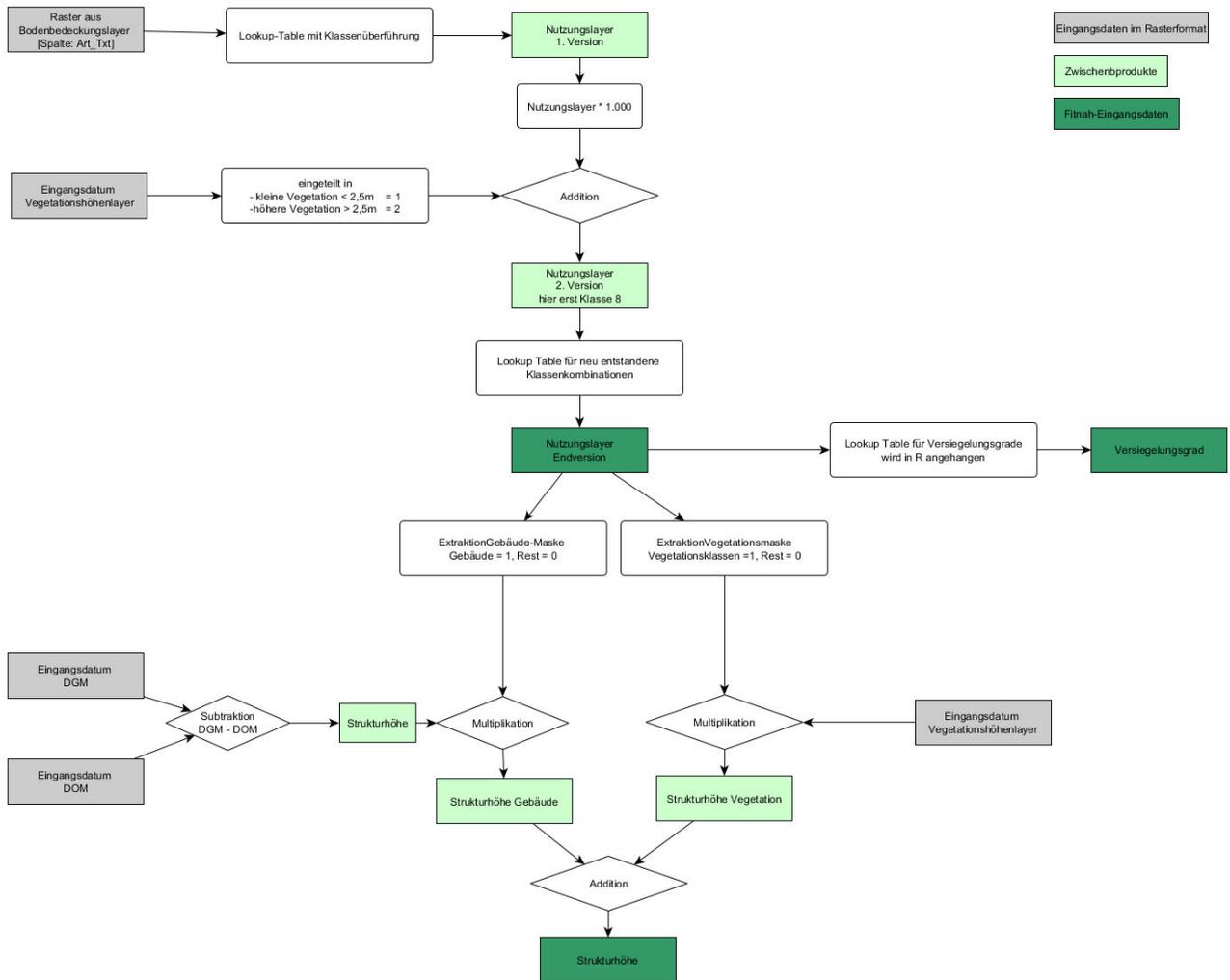


Abb. A.1: Workflow der Eingangsdatenaufbereitung für den Kanton Zug