

DWD

Stadtklimatische Untersuchungen der sommerlichen Wärmebelastung in Stuttgart als Grundlage zur Anpassung an den Klimawandel

Ergebnisbericht der Kooperation zwischen der Landeshauptstadt
Stuttgart und dem Deutschen Wetterdienst

Autoren:

Irmela Schlegel

Dr. Meinolf Koßmann

Projektleitung:

Prof. Dr. Andreas Matzarakis

Deutscher Wetterdienst
Abteilung
Klima- und Umweltberatung
Freiburg

27.03.2017

Impressum

Projektleitung:

Prof. Dr. Andreas Matzarakis (ab 2015), Jochen Bläsing (bis 2015)
Deutscher Wetterdienst
Abt. Klima- und Umweltberatung
Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung (ZMMF)
Stefan-Meier-Str. 4
79104 Freiburg im Breisgau

Profil- und temporäre Stationsmessungen:

Mobile Messeinheit München (MME)
Peter Köhler
Abt. Klima- und Umweltberatung
Regionales Klimabüro München
Helene-Weber-Allee 21
80637 München

Modellrechnung:

Dr. Meinolf Koßmann
Deutscher Wetterdienst
Abt. Klima- und Umweltberatung
Zentrales Klimabüro Offenbach
Stadt- und Regionalklimatologie
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach am Main

INHALT		Seite
Zusammenfassung		5
1	Einleitung	8
2	Problemstellung	9
3	Untersuchungsgebiet	10
3.1	Naturräumliche Gliederung	10
3.2	Stadtstruktur	11
3.3	Stadtklima	12
4	Methodik und Daten	15
4.1	Thermische Indizes	15
4.2	Eingesetzte Modelle	19
4.2.1	Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3	19
4.2.2	Quadermethode	20
4.2.3	Modellgebiet und Auswertegebiet	22
4.3	Langjährige Stationen	25
4.4	Temporäre Stationen	26
4.5	Profilfahrten	31
5	Ergebnisse	38
5.1	Gefühlte Temperatur	38
5.1.1	Langjährige Messreihen	38
5.1.2	Temporäre Messreihen	45
5.2	Vergleich thermischer Indizes	47
5.3	Profilfahrten	50
5.3.1	Jahr 2013	50
5.3.2	Jahr 2014	51
5.4	MUKLIMO_3 Ergebnisse	63
5.4.1	Quadereckpunktsimulationen	63
5.4.2	Analyse und Projektion 30-jähriger Klimatologien	67

6	Diskussion der Modellergebnisse	75
7	Schlussbetrachtung	77
	Literaturverzeichnis	79
	Abbildungsverzeichnis	84
	Tabellenverzeichnis	89
	Danksagung	90

Zusammenfassung

Die klimatischen Verhältnisse in der Landeshauptstadt Stuttgart und die daraus resultierenden thermischen Belastungssituationen wurden im Rahmen einer Kooperation zwischen der Landeshauptstadt Stuttgart und dem Deutschen Wetterdienst (DWD) untersucht. Der Schwerpunkt lag hierbei bei der Ermittlung der räumlichen Verteilung der Wärmebelastung für Menschen bei sommerlichen Strahlungswetterlagen.

Ziel der Kooperation war einerseits die Schaffung einer, auf hoch auflösenden Computersimulationen basierenden, Datengrundlage für eine dem Klimawandel Rechnung tragende Stadtplanung in Stuttgart und andererseits die Klimasimulationen durch detaillierte Klimamessungen bezüglich ihrer Qualität zu untersuchen und zu validieren.

Das Klima der Stuttgarter Region ist durch die topographische Lage geprägt. Der Stuttgarter Kessel ist der wärmste und trockenste Teil des Neckarbeckens, die durchschnittliche Lufttemperatur des Stuttgarter Zentrums zwischen 2000-2010 betrug ca. 11.8 °C, am Flughafen in Stuttgart-Echterdingen oberhalb des Kessels ca. 9.8 °C. Die aufgrund der Kessellage geringe Windgeschwindigkeit fördert die Ausbildung von lokalen, thermisch induzierten Windsystemen, die für die Belüftung der Stadt eine wichtige Rolle spielen. In der Stadt herrscht ein eigenes Stadtklima, die Differenz der Lufttemperatur in der Innenstadt zu der im Umland kann bis zu 7 Kelvin (K) betragen (Ketterer, 2015).

Datengrundlage für die Studie sind die langjährigen Messstationen des DWD im Raum Stuttgart („Schnarrenberg“, „Echterdingen“), die stadteigene Station der Abteilung für Stadtklimatologie von Amt für Umweltschutz der Landeshauptstadt Stuttgart („Schwabenzentrum“) und die durch den DWD durchgeführte Messkampagne. Temporäre Messungen erfolgten in Stuttgart an drei Stationen, die außerhalb des Talkessels („Dornhaldenfriedhof“ oder „Hohenheim“), in einer für Stuttgart typischen Halbhöhenlage („Gänsheide“) und in der Innenstadt („Diakonissenplatz“) im Sommer 2013 (17.07. bis 08.10.) und Sommer 2014 (15.04. bis 16.10.) betrieben wurden und die Daten der dauerhaften Stationen ergänzen. Zusätzlich wurden an mehreren Tagen im August 2013 und Juli 2014 mittags, abends und vor Sonnenaufgang Profilmessfahrten mit einem instrumentierten Kraftfahrzeug durchgeführt, um die thermischen Strukturen in der Stadt und dem nahen Umland zu erfassen. Die Ergebnisse der Profilmessungen zeigen deutlich die sowohl höhenabhängige, als auch flächennutzungsabhängige Lufttemperaturänderung zwischen dem Kesselboden, den Hanglagen und den Hochflächen um Stuttgart. Diese Änderung betrug bei den Messungen zwischen 2.3 K und 5.2 K. Der Effekt der städtischen Wärmeinsel tritt am stärksten nach Sonnenuntergang in der ersten Nachthälfte auf.

In der Analyse der Wärmebelastung wird hauptsächlich die Gefühlte Temperatur als thermischer Index verwendet. Dies gründet darauf, dass alle drei vorgestellten Indizes (Gefühlte Temperatur, Physiologisch Äquivalente Temperatur, Universeller Thermischer Klima Index) keine großen Unterschiede für Stuttgart zeigen und die Gefühlte Temperatur bereits in anderen Untersuchungen mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3 in deutschen Städten verwendet wurde und damit verglichen werden kann.

Die Analyse der langjährigen und temporären Stationsdaten zeigt deutliche Unterschiede des lokalen Klimas, für die die Station repräsentativ ist. Dies ist auch im Auftreten der thermischen Belastungsstufen zu erkennen, an der Umlandstation in Echterdingen treten weniger Tage mit leichter, mäßiger und starker Wärmebelastung auf, dafür vermehrt Tage mit Kältestress, als auf dem Schnarrenberg. An der Station am Schwabenzentrum sind wärmebelastete Tage am häufigsten vorhanden, was an der zentralen Lage in der Innenstadt liegt. Die temporären Stationen spiegeln diese Verteilung wider, so zeigt die Station T1 am Diakonissenplatz die höchste Wärmebelastung im Sommer an, die Station T2 an der Hanglage der Gänsheide bereits etwas weniger. Die dritte temporäre Station lag in den beiden Messkampagnen 2013 und 2014 an verschiedenen Stellen, wies aber jeweils als Station, die das Umland repräsentiert, am wenigsten wärmebelastete Tage auf.

Für die Modelluntersuchungen wurde erstmals die Quadermethode als dynamisch-statistisches Downscaling-Verfahren unter Kopplung des Stadtklimamodells MUKLIMO_3 mit dem Klima-Michel-Modell eingesetzt um die Häufigkeiten von Tagen mit starker Wärmebelastung (Tage mit Gefühlter Temperatur $\geq 32^{\circ}\text{C}$) in Stuttgart mit einer räumlichen Auflösung von 100 m zu bestimmen.

Wie erwartet hängt die mittlere jährliche Anzahl an Wärmebelastungstagen ($N_{\text{GTmax}\geq 32^{\circ}\text{C}}$) im Stadtgebiet stark von der Geländehöhe und der Landnutzung ab. Für den Klimazeitraum 1971-2000 stimmen die simulierten Häufigkeiten der Belastungstage gut mit verfügbaren Stationsauswertungen überein. Nach den Modellrechnungen tritt in den freien Kuppenlagen starke Wärmebelastung an weniger als 20 Tagen und in bewaldeten Kuppenlagen sogar an weniger als 5 Tagen pro Jahr auf. In den bebauten Tallagen wie dem Stuttgarter Kessel, dem Neckartal, dem Feuerbachtal, oder dem Rohrackertal tritt starke Wärmebelastung hingegen an über 30 Tagen pro Jahr auf. Die höchsten Werte von $N_{\text{GTmax}\geq 32^{\circ}\text{C}}$ treten wegen der Schattenwirkung im Straßenraum nicht bei sehr dichter Bebauung, sondern bevorzugt bei mittlerer bis dichter Bebauung und vor allem in Industrie- und Gewerbegebieten auf, in denen aufgrund hoher Flächenanteile an Versiegelung und Bebauung in Kombination mit wenig Schatten spendender Gebäudeform 35 Belastungstage pro Jahr oder mehr auftreten. In einigen Industrie- und Gewerbegebieten in denen das Neckartal eine geringe Talbreite aufweist, wie z. B. in den südöstlichen Stadtteilen Wangen, Untertürkheim und Mettingen werden auch über 40 Wärmebelastungstage pro Jahr erreicht.

Die Zunahme der Tage mit starker Wärmebelastung bis zum Zeitraum 2031-2060 (im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971-2000) wurde mit der Quadermethode auf Basis eines 17 regionale Klimaprojektionen umfassenden Multi-Modell Ensembles für das eher moderate SRES Emissionsszenario A1B berechnet und statistisch ausgewertet. Entsprechend des 25. Perzentils und des 75. Perzentils ergibt sich in Stuttgart für den Projektionszeitraum 2031-2060 eine Spannweite von ca. 50 bis 70 Tagen im Neckartal im Südosten des Stadtgebiets, von ca. 40 bis 60 Tagen in den warmen Bereichen des Stuttgarter Kessels, von ca. 20 bis 40 Tagen auf den freien Hochlagen der Filder, und von ca. 5 bis 20 Tagen in den bewaldeten Kuppenlagen.

Die Ergebnisse belegen, dass die Stadt Stuttgart sich bei Eintreten des Emissionsszenarios A1B auf eine deutlich erhöhte Anzahl an Tagen mit starker Wärmebelastung einstellen muss. Im ungünstigen Fall kann sich die Anzahl an Belastungstagen bis zur Mitte des Jahrhunderts gegen-

über 1971-2000 etwa verdoppeln. Zu beachten ist hierbei, dass in Tallagen insbesondere auch Industrie- und Gewerbegebiete von hoher Wärmebelastung betroffen sind und dass die bewaldeten Kuppenlagen um die Siedlungskerne als kühleres Refugium bei Hitzelagen auch zukünftig von besonderer Bedeutung sind.

1 Einleitung

Nach heutigem Kenntnisstand wird sich die seit Ende des 19ten Jahrhunderts beobachtete Klimaerwärmung in Mitteleuropa bis zum Ende dieses Jahrhunderts fortsetzen (Kuttler, 2009). Seit 1901 ist die durchschnittliche Lufttemperatur in Deutschland um 0.9 Grad Celsius (°C) gestiegen. Vor allem der Südwesten Deutschlands ist davon betroffen. In Baden-Württemberg lag die Lufttemperatur zwischen 2000 und 2008 im Mittel 1.1 °C über dem Mittel der letzten Klimanormalperiode 1961–1990 (LHS, 2010). Urbane Räume sind bei der Betrachtung des Klimawandels besonders zu berücksichtigen. Wegen des hohen Bevölkerungsanteils der in Städten lebt und des hohen lokalen Energieverbrauches, ist die Quantifizierung der Veränderungen und der sich daraus ergebenden Gesundheitsrisiken höchst relevant für unsere Gesellschaft (Kuttler, 2009, Matzarakis, 2013).

Ballungszentren haben eigene klimatische Verhältnisse, die wesentlich durch die Stadtstruktur (Bebauungsdichte und -höhe, Grad der Versiegelung und Materialoberflächeneigenschaften) und die Freisetzung von anthropogener Abwärme (aus z. B. Industrie und Verkehr) verursacht werden. Die städtische Wärmeinsel (Urban Heat Island, UHI) ist ein Effekt, der sich in urbanen Räumen aufgrund dieser lokalen Faktoren bildet und sich als positive Differenz der Lufttemperatur zwischen Stadt und Umland zeigt. Die tagsüber durch die Sonnenstrahlung erwärmten Oberflächen können nachts die gespeicherte Energie abgeben und die nächtliche Luft erwärmen. Wegen der hohen Bebauungsdichte werden oftmals auch lokale Windströmungen beeinträchtigt, was die Durchlüftung der städtischen Gebiete verschlechtert und eine nächtliche Abkühlung, wie sie im Umland stattfindet, verhindert. Die UHI führt zu vermehrt auftretender Wärmebelastung, wodurch Städte bereits jetzt schon ein erhöhtes Gesundheitsrisiko für die Bewohner aufweisen und dieses durch den Klimawandel weiter steigen wird (LHS, 2010; Kuttler, 2009). Analysen über die Veränderung des Klimas in Städten verwenden meist meteorologische Größen wie die Lufttemperatur oder die Intensität der UHI, an deren Klimafolgen für den Menschen nur bedingt quantifiziert werden können. Sinnvoller erscheint eine Analyse über die Auswirkungen der thermischen Bedingungen in der Umgebung des Menschen. Die thermo-physiologische Wirkung kann mittels einer Energiebilanz des Menschen berechnet und mit den thermischen Indizes ausgedrückt werden (Matzarakis, 2013).

Um sich frühzeitig auf den erwarteten Klimawandel einzustellen, hat die Landeshauptstadt Stuttgart mit dem Deutschen Wetterdienst im Juni 2013 eine Kooperationsvereinbarung getroffen. Die Landeshauptstadt Stuttgart soll dabei Informationen über die räumliche Verteilung der physiologisch relevanten Wärmebelastung aufgrund städtischer Nutzungsformen und der topographischen Lage in Stuttgart erhalten. Diese Informationen dienen gleichzeitig dem Deutschen Wetterdienst, ein eigens entwickeltes Verfahren zur Quantifizierung von kleinräumigen Klimaänderungen in stark strukturiertem Gelände anhand der Messungen zu erweitern.

Dieser Bericht fasst die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchung zusammen. Der erste Teil des Berichts (Kapitel 2 bis 4) umfasst die Besonderheiten der topographischen und klimatischen Lage Stuttgarts, die erhobenen Daten und die Methodik der Studie. Der zweite Teil des Berichts (Kapitel 5 und 6) beschreibt die Auswertung der Messungen in Stuttgart sowie die auf den

Messdaten basierende Evaluation der Klimasimulationen. Abschließende Bemerkungen sind in Kapitel 7 zusammengefasst.

2 Problemstellung

In Stuttgart haben Untersuchungen zum Stadtklima eine lange Tradition (LHS, 2010). Das Stuttgarter Amt für Umweltschutz gründete bereits 1938 die Abteilung für Stadtklimatologie, um den Zusammenhang von meteorologischen Bedingungen und der topographischen sowie urbanen Morphologie der Region zu untersuchen. Schon damals wurde das Ziel gefasst, die Luftbelastung und die im Sommer häufig auftretende thermische Belastung zu reduzieren, um die Lebensqualität der Bewohner zu verbessern (LHS 2016b). Weitere Informationen dazu gibt es auf www.stadtklima-stuttgart.de.

Stuttgart besitzt aufgrund der besonderen topographischen Lage spezifische meteorologische und klimatische Verhältnisse. Die Kessellage des Stadtzentrums blockiert die großräumige Strömung der Region und sorgt für windschwache Bedingungen in der Stadt. Dies verhindert einen Abtransport der städtischen Abwärme und begünstigt eine Ansammlung an Luftschadstoffen. Für eine vorausschauende Stadtplanung sind Kenntnisse über die klimatischen Verhältnisse der Stadt und der beeinflussenden Faktoren von großer Bedeutung. Ohne Berücksichtigung dieser Faktoren, kann es bei der Stadtentwicklung zu klimatischen Beeinträchtigungen kommen und das Wohlbefinden und die Gesundheit der Bewohner gefährden (Ketterer, 2015). Für das Projekt "Stuttgart 21" wurden umfangreiche Untersuchungen zum Klima, Topographie und Infrastruktur der Stadt durchgeführt, die den Ist-Zustand darstellen und mögliche Veränderungen durch das Bauvorhaben beleuchten (LHS, 2016f).

Eine erneute Studie über die klimatischen Verhältnisse der Stadt bot sich an, da nicht nur die meteorologischen Größen untersucht wurden, sondern das Hauptziel der Studie die Untersuchung der Wärmebelastung ist, der die Bewohner Stuttgarts ausgesetzt sind. Der DWD profitiert von der Studie in dem Sinne, dass das Modell MUKLIMO_3 in einer Stadt mit dieser besonderen topographischen Lage getestet wird und für die Anwendung zur Wärmebelastung weiterentwickelt werden kann. Das Modell, welches der Quantifizierung von kleinräumigen Klimaverhältnissen dient, wurde bereits in anderen Städten (z. B. in Offenbach/Main, Köln und München) für eine Stadtklimastudie eingesetzt und wird ständig weiterentwickelt.

3 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet der Studie umfasst das Gebiet der Landeshauptstadt Stuttgart in Baden-Württemberg und zusätzlich die außerhalb liegende meteorologische Messstation des DWD Stuttgart-Echterdingen. Für die Studie standen Daten von insgesamt sechs (drei permanenten und drei temporären) Messstationen aus Stuttgart und der Region zur Verfügung.

3.1 Naturräumliche Gliederung

Die Landeshauptstadt Stuttgart liegt in einer topographisch sehr vielfältigen Landschaft. Bestimmt wird sie hauptsächlich durch die abgeschirmte Lage der Stadt im Neckarbecken. Die naturräumliche Einheit wird als Stuttgarter Bucht bezeichnet. Sie ist eine Traufbucht der Keuperstufe, umgeben von einer Randhöhenzone, die von den linken Zuflüssen des Neckars, Feuerbach und Nesenbach zerschnitten wird. Die Region ist im Westen großräumig durch den Schwarzwald begrenzt, im Süden schließt die Schwäbische Alb und im Osten der Schurwald das Gebiet ab. Im Nordwesten ist das Strom- und Heuchelberggebiet vorgelagert. Von Südosten nach Norden verläuft das Neckartal und bildet einen breiten Einschnitt in die abwechslungsreiche Landschaft (Huttenlocher und Dongus, 1967).

Zwischen der Stuttgarter Bucht und der Schwäbischen Alb im Süden liegt das Keuperbergland (420–440 m ü. NN) und die angrenzenden, durchschnittlich 80 m tiefer liegenden Filder, die von der Stadt abschirmt sind. Die Filder, aufgebaut von einer Lias-Kalkplatte, werden z. T. intensiv landwirtschaftlich genutzt und beherbergen den Stuttgarter Flughafen und das Messegelände. Im Südwesten bis Westen begrenzt der Glemswald mit seinen bewaldeten Hochflächen (470–500 m ü. NN) und feuchten Talmulden die Stuttgarter Bucht (LHS, 2016a; Huttenlocher und Dongus, 1967).

Die Stuttgarter Innenstadt (Marktplatz 245 m ü. NN) liegt in der Nesenbachbucht, welche der zentrale Teil der Stuttgarter Bucht ist und auch als Stuttgarter Kessel bezeichnet wird (Abb. 1). Der Nesenbach, der den Kessel gebildet hat, verläuft von Südwesten zunächst nach Norden und dann nach Nordosten direkt durch die Stadt, bis er bei Bad Cannstatt in den Neckar mündet. Er kommt aus dem Kaltental im Südwesten, durchfließt bergab ein enges Tal und tritt im Südwesten bei Heslach in den Kessel ein. Das Nesenbachtal hat großen Einfluss auf die Bildung und Ausprägung von lokalen Windsystemen und damit auf das Klima der Stadt (Huttenlocher und Dongus, 1967).

Innerhalb des Stuttgarter Stadtgebietes ergibt sich aufgrund der topographischen Gliederung ein Höhenunterschied von mehr als 300 m zwischen dem Kesselboden und den Randhöhen (LHS, 2016a).

3.2 Stadtstruktur

Die geographische Lage der Landeshauptstadt Stuttgart ist – bezogen auf den Hauptturm der Stiftskirche - 9°10'43" östlicher Länge und 48°46'39" nördlicher Breite. Die durchschnittliche Höhe beträgt ca. 260 m ü. NN, der tiefste Punkt beim Neckaraustritt liegt auf 207 m, der höchste Punkt auf 549 m im Bernhartswald nördlich des Autobahnkreuzes Stuttgart-Vaihingen. Die Gebietsfläche beträgt 20 735 Hektar, die Einwohnerzahl 602 301, die Einwohnerdichte pro km² im Mittel 2 905 (Stand 31.12.2015) (LHS, 2016d). Die Siedlungsdichte variiert innerhalb des Stadtgebiets erheblich zwischen dem dicht besiedelten Talkessel, der z. T. über 20 000 Einwohner pro km² Siedlungs- und Verkehrsfläche aufweist, und den dünner besiedelten äußeren Bezirken.

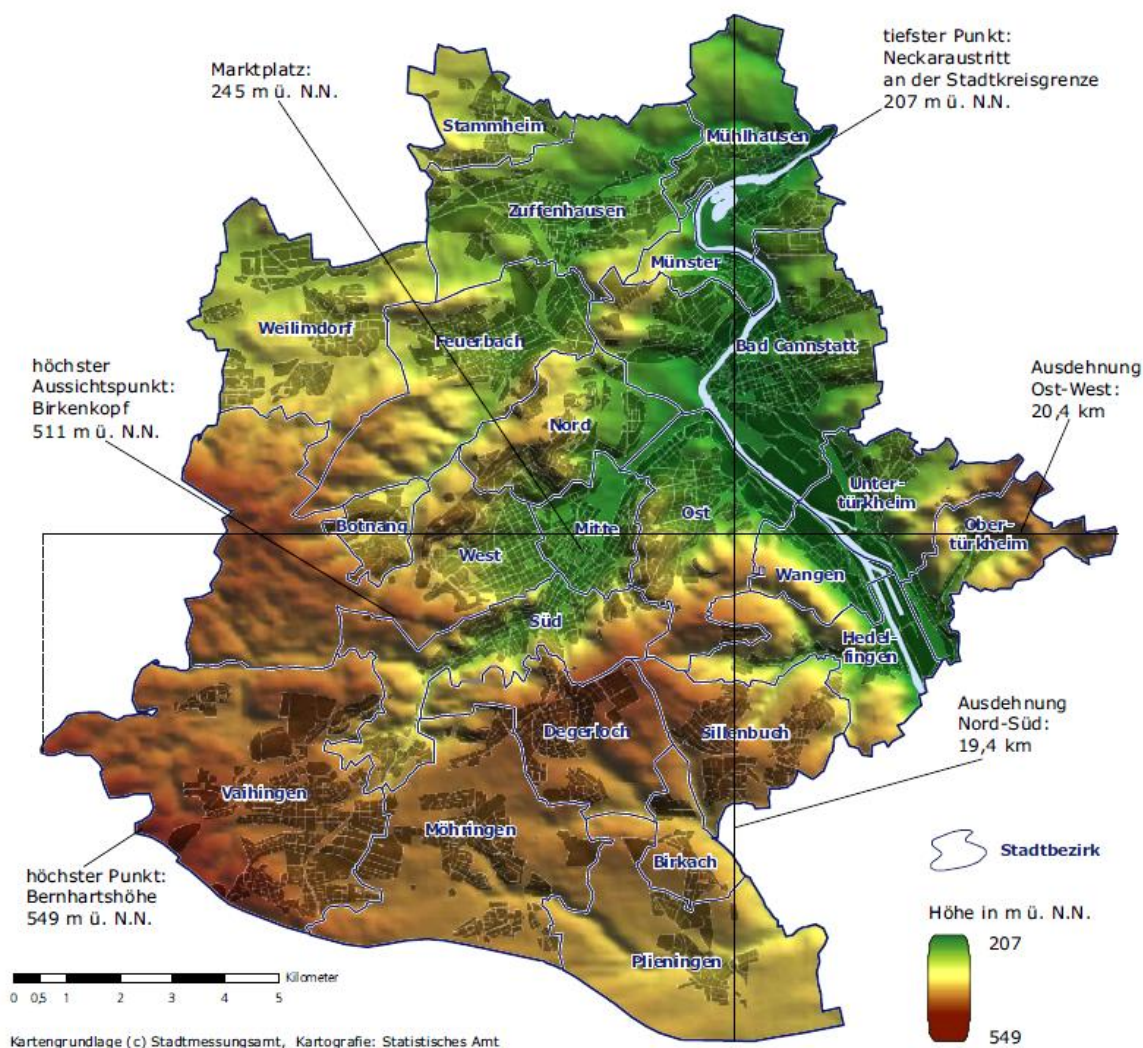


Abbildung 1: Topographische Darstellung der Stuttgarter Region mit eingezeichneten Stadtbezirken (LHS, 2016c).

Die Altersstruktur der Einwohner zeigt eine Verteilung zwischen inneren und äußeren Bezirken. So sind in den Stadtbezirken Birkach, Botnang, Degerloch, Möhringen, Mühlhausen, Münster und Sillenbuch über 20 % (Botnang und Sillenbuch > 26 %) der Einwohner 65 Jahre alt oder älter. In den Bezirken Mitte, Süd und West liegt der Anteil nur bei 12-14,8 % (Zahlen aus dem Jahr

2015) (LHS, 2015). Ältere Menschen sind eine Risikogruppe, die besonders von gesundheitlichen Folgen durch Wärmebelastung betroffen ist (Matzarakis und Koppe, 2016).

Flächenversiegelung stellt ein klimatisches und ökologisches Problem dar. Die Flächen, die kein Versickern von Wasser mehr zulassen (meist Beton- und Asphaltflächen) haben Einfluss auf die lokalen Klimaverhältnisse. Die Flächenversiegelung in Stuttgart folgt z. T. den topographischen Gegebenheiten. So weisen der Talboden im Kessel sowie die Flächen im Neckartal einen höheren Versiegelungsgrad auf als die Hanglagen und Randhöhen (Abb. 2) (Strauß, 2013).

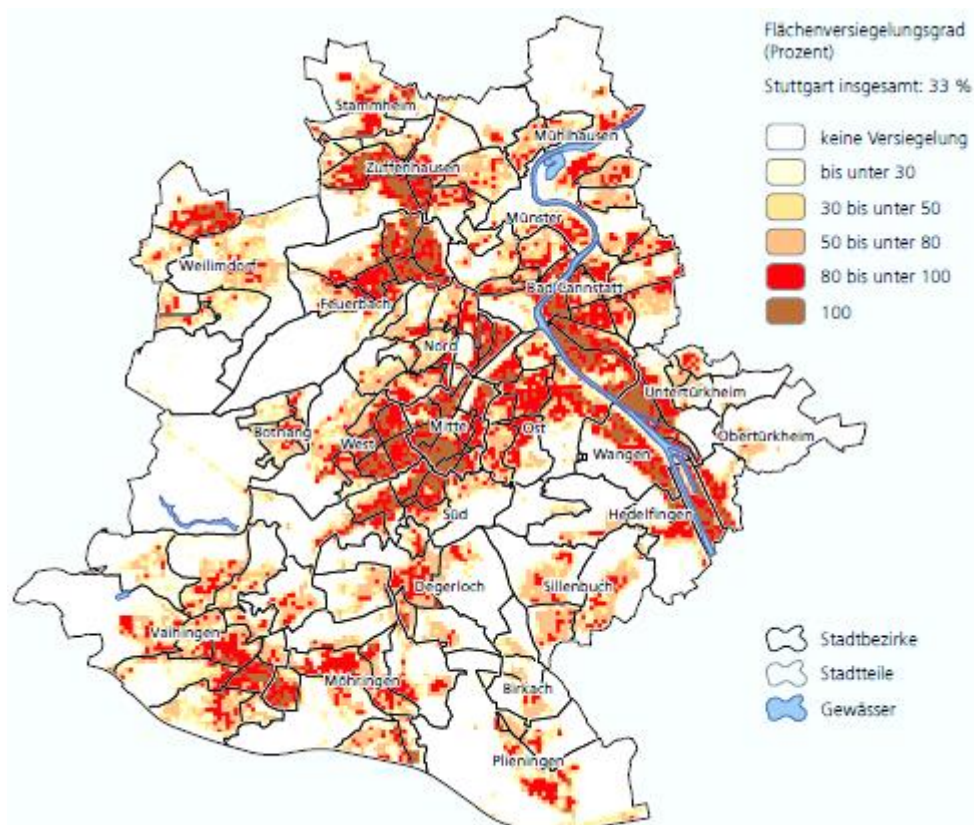


Abbildung 2: Verteilung der Flächenversiegelung in Stuttgart 2006 (Strauß, 2013).

3.3 Stadtklima

Das Klima der Stuttgarter Region ist durch die topographische Lage geprägt. Der Stuttgarter Kessel ist der wärmste und trockenste Teil des Neckarbeckens und neben dem Oberrheintal eines der wärmsten Gebiete der BRD (VR Stuttgart, 2008; Huttenlocher und Dongus, 1967). Die durchschnittliche Lufttemperatur des Stuttgarter Zentrums beträgt ca. 11.8 °C und am Flughafen in Stuttgart-Echterdingen ca. 9.8 °C (Zeitraum 2000-2010). Im Neckartal ist die mittlere Lufttemperatur um ca. 0.3 °C geringer als im Stadtzentrum (Ketterer, 2015).

Durch die topographische Lage im Windschatten des Schwarzwaldes und der Schwäbischen Alb ist der Stuttgarter Raum durch eine relativ geringe Windgeschwindigkeit und geringe Niederschlagsmengen geprägt. Stuttgart ist dadurch trockener als der jährliche Durchschnitt in Baden-Württemberg (VR Stuttgart, 2008). Am Flughafen gibt es einen mittleren Jahresniederschlag von 732 mm, im Stadtzentrum ca. 60 mm weniger (Zeitraum 2000-2010) (Ketterer, 2015).

Die geringe Windgeschwindigkeit fördert die Ausbildung von lokalen, thermisch induzierten Windsystemen, die für die Belüftung der Stadt eine wichtige Rolle spielen. Ein Beispiel dafür ist der „Nesenbachtäler“. Im Tal des Nesenbaches entsteht ein lokales Berg-Tal-Windsystem, welches nachts kühle Luft aus den Randhöhen über die südlichen Stadtteile bis zum Zentrum leitet. Die Zirkulation entsteht durch die sich nachts rascher abkühlenden Höhenlagen. Die kalte Luft ist schwerer und sinkt, dem Tal entlang, in den Kessel hinab. Wichtige Entstehungsgebiete der Kaltluft sind die Hänge des Glemswaldes und der Keuperhöhen. Der „Nesenbachtäler“ kann an der Wettermessstation Schwabenzentrum quantifiziert werden (Feigenwinter, 2013; Ketterer, 2015). Die Windrichtung wird ebenfalls stark von der Kessellage beeinflusst. Im Stadtzentrum (Schwabenzentrum) überwiegt durch das Nesenbachtal eine Windrichtung aus süd-west, im Neckartal dagegen wechselt die Windrichtung zwischen süd-ost und nord-west. Im Norden der Stadt, an der DWD-Messstelle Schnarrenberg, kommt am häufigsten West- bis Südwind vor. Im Windfeld von Echterdingen tritt der für die Region eigentlich typische Südwestwind auf (LUBW, 2016).

Die Sonnenscheindauer und die Jahressumme der Globalstrahlung eines Ortes ergeben sich hauptsächlich aus der geographischen Breite und der Geländehöhe. Stuttgart hat durch die Lage im Lee von Schwarzwald und Schwäbischer Alb eine hohe potenzielle Jahressumme der Globalstrahlung. Die Sonnenscheindauer wird jedoch auch von der Exposition, dem Relief und der aktuellen Wetterlage bestimmt. In Stuttgart werden aufgrund der Bewölkung nur ca. 39 % (entspricht ca. 1600-1700 Stunden) der möglichen jährlichen Sonnenscheindauer erreicht. Diese treten, entsprechend des Sonnenstandes, im Sommer häufiger auf als im Winter. In Stuttgart treten häufig bodennahe Temperaturinversionen auf, die einen Mangel an Luftaustauschprozessen hervorruft. In 70 % aller Nächte ist eine solche Temperaturinversion zu erwarten. Eine Höheninversion (bis 700 m) tritt mit einer Häufigkeit von 83 % auf, diese können sich auch bis auf die erste Taghälfte (40 % bis 12 Uhr mittags) ausdehnen. Bodennahe Inversionen haben lufthygienisch eine große Relevanz, da die Verdünnung und Abtransport von schadstoffbelasteter Luft vermindert ist (VR Stuttgart, 2008).

Das Klima innerhalb des Stadtgebietes wird neben der Topographie auch von der Bebauung, dem Versiegelungsgrad, der verwendeten Baustoffe und der anthropogenen Wärmeentwicklung (z. B. durch Industrie) bestimmt. Es herrscht also ein eigenes Stadtklima. Die Differenz der Lufttemperatur in der Innenstadt zu der im Umland kann bis zu 7 K betragen. Am deutlichsten ist dies in der ersten Nachthälfte zu beobachten, wo die verlangsamte Abkühlung in der Stadt zu höheren Lufttemperaturbereichen führt als im sich rasch abkühlenden Umland. Dies ist der Effekt einer urbanen Wärmeinsel (Urban Heat Island, UHI). Das Fehlen von Luftaustauschprozessen in Kombination mit hoher Versiegelungsrate und hoher Bebauungsdichte fördert die Entwicklung einer UHI (VR Stuttgart, 2008).

Die Quantifizierung der UHI-Intensität in Stuttgart ist kompliziert, da die Höhenunterschiede innerhalb des Stadtgebietes die Verteilung der Lufttemperatur beeinflussen und damit den Effekt der UHI überlagern. Dennoch ist die allgemeine Lufttemperaturerhöhung aufgrund der UHI in Stuttgart messbar. Sie beträgt im Jahresdurchschnitt 0.8–3.1 K (Abb. 3). Lokal kann der Effekt aber bis zu 5.8 K betragen (Ketterer und Matzarakis, 2015). Am Schwabenzentrum war der Effekt der UHI im Median mit 2.5 K am höchsten, während Messungen im Neckartal (2.1 K), an der

Station Schnarrenberg (1.2 K) und Hohenheim (0.7 K) darunter liegen (Zeitraum 2000-2010) (Ketterer, 2015). Sichtbar ist der Effekt auch beim Vergleich der thermischen Belastung. Der Jahresmittelwert der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET, siehe Kapitel 4.1) unterscheidet sich zwischen Schnarrenberg und Echterdingen um 4.1 K, zwischen der Stadtstation Schwabenzentrum und Echterdingen bei 3.2 K. Durch den Effekt der UHI wird die Innenstadt zu einem Gebiet mit hoher Wärmebelastung und nur seltenem Kältestress (Ketterer und Matzarakis, 2014).

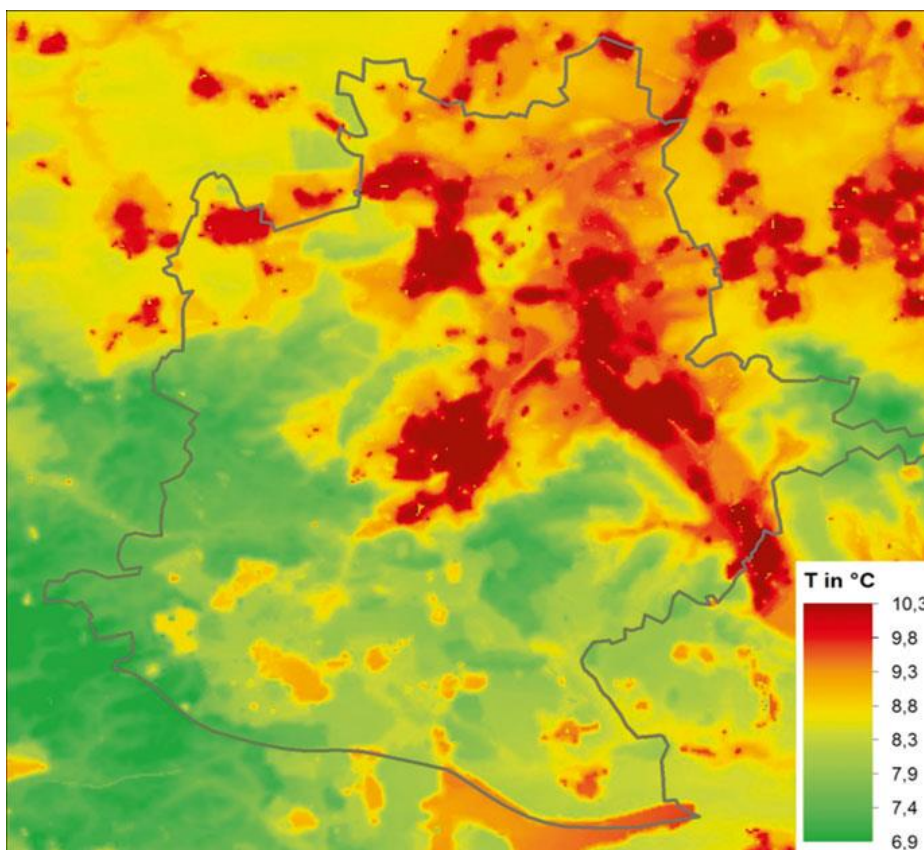


Abbildung 3: Mittlere jährliche Lufttemperaturverteilung im Zeitraum 1971-2000 in Stuttgart. Die graue Linie umfasst das Stadtgebiet (Rinke et al., 2016).

Die Wahrnehmung von Hitze- und Kältestress als Mensch wird nicht allein durch die Lufttemperatur bestimmt, daher wird sie anhand thermischer Indizes quantifiziert (Berechnung siehe Kapitel 4.1). Ein thermischer Index ist die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET). Im Gegensatz zur Differenz der städtischen zur ländlichen Lufttemperatur, die nachts am größten ist, treten die größten Stadt-Umland Unterschiede der Physiologisch Äquivalenten Temperatur spätnachmittags auf. Der Tagesgang der Stadt-Umland PET-Differenz ist stärker ausgeprägt als der Tagesgang der Lufttemperatur, mit einem Maximum zwischen 17:00 und 20:00 Uhr und einem Minimum gegen 8:00 Uhr. Die Verteilung von der PET ist nachts sehr ähnlich zu der der Lufttemperaturunterschiede, da die PET nicht mehr durch die solare Strahlung beeinflusst wird. Über das Jahr verteilt, treten die größten Differenzen zwischen der städtischen und der ländlichen PET zur Zeit der höchsten Einstrahlung, also im späten Frühling und im Sommer auf. Ein weiteres, wenn auch geringeres Maximum erscheint im Januar während der winterlichen Heizsaison (Ketterer, 2015).

Die Luftfeuchtigkeit (quantifiziert mittels des Dampfdruckes) zeigt in Städten in der Regel geringere Jahresmittelwerte auf als im umliegenden Land. Diese Verhältnisse können sich jedoch auch umkehren, insbesondere an austauscharmen Strahlungswetterlagen im Sommer. Dieses Phänomen wird urbane Feuchteinsel oder im englischen auch Urban Moisture Excess (UME) genannt (Kuttler et al, 2007, Mayer, Matzarakis, Iziomon, 2003). Die urbane Feuchteinsel weist einen Jahres- und Tagesgang auf. In den sommerlichen Nächten stellt sich meist eine positive Differenz des Dampfdruckes in der Stadt zu der im Umland ein, die urbane Feuchteinsel ist ausgeprägt (Matzarakis, 2001). Da die Luftfeuchte auch in die Berechnung der thermischen Indizes wie der PET eingeht, hat sie einen Einfluss auf das Wohlbefinden der städtischen Bewohner.

4 Methodik und Daten

4.1 Thermische Indizes

Die Lufttemperatur in der direkten Umgebung eines Menschen ist nicht allein entscheidend für das thermische Empfinden. Der Wärmehaushalt reagiert auch auf die vorherrschende Windgeschwindigkeit, die Luftfeuchte und auf die direkte und indirekte Sonneneinstrahlung sowie die Wärmestrahlung. Bei Wind wird die Luft als wesentlich kühler empfunden als bei Windstille, in der Sonne erwärmt sich der Körper schneller als im Schatten eines Baumes. Entscheidend sind auch der Aktivitätsgrad und die Wärmeisolation der Bekleidung. Bei der Bewertung des thermischen Empfindens im Freien müssen daher die physiologischen Bedingungen berücksichtigt werden (DWD, 2016a). Daraus ergeben sich sechs grundlegende Einflussfaktoren, die den Energieaustausch des Organismus mit der Umgebung bestimmen, bestehend aus den vier Umweltfaktoren (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und die mittlere Strahlungstemperatur) sowie den menschlichen Faktoren (Wärmeproduktion und Kleidung) (Matzarakis und Koppe, 2016).

Die folgenden Indizes können zur Charakterisierung des Wärme- und Kälteempfindens und einer daraus ergebenden Belastung des Menschen herangezogen werden.

Gefühlte Temperatur

Die Gefühlte Temperatur (GT) wird traditionell in Deutschland und beim Deutschen Wetterdienst häufig verwendet und zeigt in den mittleren Breiten eine realistische Einschätzung des thermischen Befindens (Tiefgraber, 2013, VDI, 2008). Die Berechnung beruht auf einem Modell des Energieaustausches eines Standard-Menschen, dem sogenannten Klima-Michel, mit seiner Umgebung (Staiger et al, 2012, Matzarakis, Koppe, 2016). Die Gefühlte Temperatur vergleicht die zu analysierenden äußeren Bedingungen mit der Lufttemperatur, die in einer Standardumgebung gegeben sein muss, damit ein identisches thermisches Empfinden auftritt. Die Gefühlte Temperatur entspricht damit der Lufttemperatur der Standardumgebung und wird in Grad Celsius angegeben. Die Standardumgebung wird als Ort im Freien mit tiefem Schatten (z. B. Wald) und einer Windgeschwindigkeit von 0.2 m/s festgelegt, an dem die Oberflächentemperatur der umgebenden Flächen (z. B. Blätter) die gleiche ist wie die Lufttemperatur (es findet kein Austausch statt) (DWD, 2016a).

Das Klima-Michel-Modell ist ein Wärmehaushaltsmodell des Deutschen Wetterdienstes, welches alle relevanten Ströme des Energieaustausches eines Menschen mit seiner Umgebung berücksichtigt. Die Eingangsparameter des Modells sind eine vollständige Wetterbeschreibung aus Beobachtung oder einer numerischen Wettervorhersage, das Datum und die geographischen Koordinaten des zu berechnenden Ortes. Der Standard-Mensch im Modell, der Klima-Michel, wird als 35 jähriger Mann, 1.75 m groß und 75 kg schwer beschrieben. Die Aktivität entspricht einer Leistung von ruhigem Gehen mit 4 km/h. Die Kleidung wird je nach Außenbedingung so angepasst, dass es dem Behaglichkeitsbereich entspricht. Dazu stehen ihm ein Sommer- und ein Winteroutfit zur Verfügung, die jeweils einen anderen Wärmedurchgangswiderstand haben (DWD, 2016a).

Die Gefühlte Temperatur kann stark von der Lufttemperatur abweichen, sie steigt bei warmen, sonnigen und windschwachen Bedingungen deutlich schneller als die Lufttemperatur. Bei stärkerem Wind und/oder niedriger Lufttemperatur kann die Gefühlte Temperatur weit unter dieser liegen. Das thermische Empfinden und die entsprechende physiologische Belastung werden, nach der VDI-Richtlinie 3878 Blatt 2, aus der Gefühlten Temperatur abgeleitet, die dazu in neun Stufen eingeteilt ist. Die thermische Behaglichkeit wurde dabei auf den Bereich 0-20 °C Gefühlte Temperatur gelegt (Tab. 1) DWD, 2016a).

Tabelle 1: Klassen des thermischen Empfindens und der physiologischen Belastung anhand der Gefühlten Temperatur (nach DWD, 2016a; VDI, 2008).

Gefühlte Temperatur in °C	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastung
≤ -39	Sehr kalt	Extremer Kältestress
-39 bis -26	Kalt	Starker Kältestress
-26 bis -13	Kühl	Mäßiger Kältestress
-13 bis 0	Leicht kühl	Leichter Kältestress
0 bis +20	Komfortabel	Thermischer Komfort
+20 bis +26	Leicht warm	Schwache Wärmebelastung
+26 bis +32	Warm	Mäßige Wärmebelastung
+32 bis +38	Heiß	Starke Wärmebelastung
≥ +38	Sehr heiß	Extreme Wärmebelastung

Physiologisch Äquivalente Temperatur

Der thermische Index PET (engl: physiologically equivalent temperature) basiert auf dem Münchner Energie-Bilanz-Modell für Individuen (MEMI), welches, im Vergleich zum Klima-Michel-Modell universeller anwendbar ist und zusätzliche thermo-physiologischen Prozesse des

menschlichen Organismus beinhaltet. Damit ist beispielsweise die physiologische Schweißrate, abhängig sowohl von der körperlichen Aktivität, als auch von den klimatischen Bedingungen, mit inbegriffen. Die PET ist per Definition äquivalent zu der Lufttemperatur in einem standardisierten Innenraum, die herrschen muss, damit die Energiebilanz eines Menschen mit Kern- und Hauttemperatur gleichbleibend ist zu der Energiebilanz unter den zu beurteilenden Bedingungen. Die PET gilt damit in jeder beliebigen Umgebung draußen oder in Innenräumen und hat die Einheit Grad Celsius. Für den Referenz-Innenraum gelten folgende Annahmen: Die mittlere Strahlungstemperatur entspricht der Lufttemperatur, die Windgeschwindigkeit beträgt 0.1 m/s und der Wasserdampfdruck ist festgelegt auf 12 hPa. Es gilt die Energiebilanz des Klima-Michel mit einem Arbeitsmetabolismus von 80 W zusätzlich zum Basismetabolismus und einem Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung von 0.9 clo. Die Referenzwerte des Arbeitsmetabolismus und der Kleidungsisolation bleiben für Berechnungen der PET, ob Sommer oder Winter gleich. Damit ist der Index unabhängig vom persönlichen Verhalten (Mayer und Höpfe, 1987; Höpfe, 1999; Matzarakis et al., 1999).

Zur Abschätzung der physiologischen Belastung des Körpers durch die thermischen Bedingungen kann die PET neun Belastungsstufen zugeordnet werden (Tab. 2).

Tabelle 2: Thermisches Empfinden und zugehörige physiologische Belastungsstufen anhand der physiologisch äquivalenten Temperatur (PET) (nach Matzarakis und Mayer, 1996)

PET in °C	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastung
< 4	Sehr kalt	Extremer Kältestress
4 bis 8	Kalt	Starker Kältestress
8 bis 13	Kühl	Mäßiger Kältestress
13 bis 18	Leicht kühl	Leichter Kältestress
18 bis 23	Komfortabel	Thermischer Komfort
23 bis 29	Leicht warm	Leichte Wärmebelastung
29 bis 35	Warm	Mäßige Wärmebelastung
35 bis 41	Heiß	Starke Wärmebelastung
> 41	Sehr heiß	Extreme Wärmebelastung

Universeller Thermischer Klima Index

Die Forschung im Bereich der Human-Biometeorologie der letzten Jahrzehnte hat es ermöglicht, einen weiteren thermischen Index zu entwickeln, der auf den neuesten Modellen basiert und Thermophysiologie und Energieaustausch mit allen Parametern mit einschließt. Der Universelle Thermische Klima Index (UTCI) wurde interdisziplinär mit Wissenschaftlern aus Meteorologie,

Medizin und mathematischer Modellierung aus vielen Ländern entwickelt (Jendritzky et al., 2012).

Die Bewertung der thermischen Belastung erfolgt über die physiologische Reizantwort, welche im menschlichen Körper von den äußeren Umweltbedingungen hervorgerufen werden. Damit wurde die Bewertung allgemein gültig, in allen Klimazonen und zu jeder Jahreszeit (Tiefgraber, 2013).

Der UTCI ist (wie GT und PET) konzipiert als eine äquivalente Temperatur, die der Lufttemperatur unter Referenzbedingungen entspricht, bei der die dynamische Reizantwort des Organismus (physiologische Belastung), derjenigen gleicht, die unter den betrachteten Bedingungen ausgelöst wird. Die Referenzbedingungen unterscheiden sich zu denjenigen der oben genannten Indizes. Die Luftfeuchte ist auf eine relative Feuchte $RH = 50\%$ bis zu einem maximalen Wasserdampfdruck von 20 hPa festgelegt und es herrscht Windstille, die mittlere Strahlungstemperatur muss der Lufttemperatur entsprechen. Neu bei der Bewertung ist die Kombination mit einem Bekleidungsmodell, welches die Veränderung der Wärmeisolation durch das Verhalten der Menschen berücksichtigt. Der UTCI ähnelt in seinen Werten den anderen vorgestellten Indizes, kann aber in vielen unterschiedlichen Klimazonen eingesetzt (Jendritzky et al., 2009). Die Bewertungstabelle des UTCI ist in 10 Stufen eingeteilt (Tab. 3). Im Vergleich zu den Tabellen der Gefühlten Temperatur und der PET wurde eine zusätzliche Belastungsstufe eingeführt, die einen geringen Kältestress ausdrückt.

Tabelle 3: Thermisches Empfinden und zugehörige physiologische Belastungsstufen anhand des Universal Thermal Climate Index (Blazejczyk et al. 2010).

UTCI in °C	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastung
< -40	Extrem kalt	Extremer Kältestress
-27 bis -40	Sehr kalt	Sehr starke Kältebelastung
-13 bis -27	Kalt	Starke Kältebelastung
0 bis -13	Kühl	Moderate Kältebelastung
0 bis +9	Leicht kühl	Geringe Kältebelastung
+9 bis +26	Komfortabel	Keine Belastung
+26 bis +32	Leicht warm	Moderate Wärmebelastung
+32 bis +38	Warm	Starke Wärmebelastung
+38 bis +46	Heiß	Sehr starke Wärmebelastung
> +46	Sehr heiß	Extreme Wärmebelastung

4.2 Eingesetzte Modelle

Das Klima-Michel-Modell, welches als Wärmehaushaltsmodell zur Berechnung der Gefühlten Temperatur verwendet wird, ist in Kapitel 4.1 näher beschrieben.

4.2.1 Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3

Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 (3-dimensionales mikroskaliges urbanes Klimamodell) des Deutschen Wetterdienstes wurde speziell zur Untersuchung stadtklimatologischer und geländeklimatologischer Fragestellungen entwickelt (Sievers und Zdunkowski, 1986; Sievers, 1990 und 1995). Basierend auf den Prinzipien der Massenerhaltung, Energieerhaltung und Impulserhaltung berechnet MUKLIMO_3 auf einem 3-dimensionalen Rechengitter den Tagesgang des Windes, der Lufttemperatur und -feuchtigkeit, der solaren und thermischen Strahlung, der Temperatur und des Feuchtegehalts im Erdboden sowie vieler weiterer relevanter Parameter.

Die räumliche Auflösung des Modells liegt typischerweise zwischen wenigen Metern und mehreren hundert Metern. Die Rechengitterweiten können im Modellgebiet horizontal und vertikal variiert werden, wobei typischerweise in Bodennähe und in dem im Untersuchungsmittelpunkt stehenden Teil des Modellgebiets die höchste Auflösung gewählt wird. Die für Modellsimulationen benötigten Anfangs- und Randwerte für das Modellgebiet (und somit das Regionalklima) werden durch eine zusätzlich ablaufende 1-dimensionale MUKLIMO_3 Simulation mit ländlicher Landnutzung bestimmt. Simulationen mit MUKLIMO_3 werden meist für Zeiträume zwischen mehreren Stunden und einigen Tagen durchgeführt. Da die Modellphysik von MUKLIMO_3 keine Niederschlagsbildung enthält, kann das Modell nur für niederschlagsfreie Situationen eingesetzt werden. Neben den meteorologischen Eingangsgrößen benötigt das Modell für jede Gitterzelle die Geländehöhe und Informationen zur Art der Landnutzung.

Vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) wurden dem Deutschen Wetterdienst für diese Modellstudie Geländehöhendaten des DGM50 (Digitales Geländemodell mit 50 m Auflösung) zur Verfügung gestellt. Die zur Nutzung der Modellergebnisse erforderliche Lizenz für die DGM50 Daten erwarb die LH Stuttgart vom Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg.

Als Landnutzungsdaten wurden Daten des Copernicus Urban Atlas 2006 (<http://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2006/>) für die Stadt Stuttgart verwendet. In Absprache mit der LH Stuttgart wurden die Urban Atlas Klassen in klimarelevante MUKLIMO_3 Klassen umklassifiziert. In Analogie zum Ansatz von Gross (1989) erfolgt die Beschreibung der Klassen mit Bebauung anhand folgender Parameter: mittlerer Gebäudegrundflächenanteil γ_b , mittlere Gebäudehöhe h_b , mittlerer Wandflächenindex w_b und mittlerer Versiegelungsanteil der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden ν . Die in Tabelle 4 angegebenen Werte dieser Parameter repräsentieren eine in Rücksprache mit der LH Stuttgart erfolgte Expertenschätzung in Anlehnung an BMBau (1980).

Die Berechnung der Lufttemperatur in bebauten Gebieten berücksichtigt die Reflexion und Absorption von Strahlung (Sievers und Früh, 2012) sowie die Speicherung von Wärme in den Gebäuden. Die Beschreibung des Wärme- und Feuchtehaushalts des Bodens erfolgt nach der Methode von Sievers et al. (1983). Das Vegetationsmodell mit drei Schichten basiert auf einem erweiterten Ansatz nach Siebert et al. (1992). Eine vollständige Modellbeschreibung von MUKLIMO_3 gibt Sievers (2012, 2016)

Tabelle 4: Parameter zur Beschreibung der Bebauung für die MUKLIMO_3 Landnutzungsklassen: mittlerer Gebäudegrundflächenanteil γ_b , mittlere Gebäudehöhe h_b in m, mittlerer Wandflächenindex w_b und mittlerer Versiegelungsanteil der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden ν . Die bei der Beschreibung angegebenen Klammerwerte listen die zugeordneten Urban Atlas Landnutzungsklassen.

Klasse	Beschreibung	γ_b	h_b	w_b	ν
2	lockere Bebauung (11300, 14200)	0,12	8	2,70	0,25
6	Industrie, Gewerbe (12100)	0,60	20	1,50	0,50
53	Freiland mit wenigen Gebäuden (11240)	0,04	8	2,70	0,06
61	sehr dichte Bebauung, Ortskern (11100)	0,60	20	3,08	0,70
62	dichte Bebauung (11210)	0,40	15	2,88	0,50
63	Bebauung mittlerer Dichte (11220)	0,30	12	2,88	0,25
64	Bebauung mäßiger Dichte (11230)	0,20	9	2,88	0,10

4.2.2 Quadermethode

Sehr hoch auflösende Simulationen mit dynamischen Klimamodellen wie MUKLIMO_3 sind für klimatologische Zeiträume von 30 Jahren extrem aufwendig und mit heutigen Computern noch nicht leistbar. Zur Reduzierung des Rechenaufwands wurde daher die *Quadermethode* als dynamisch-statistisches Downscaling-Verfahren entwickelt (Früh et al., 2011a, b).

Die Quadermethode basiert auf der Annahme, dass das lokale Auftreten wärmebelastender Wetterlagen im Wesentlichen von den regional repräsentativen Werten der drei Klimaparameter Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit abhängt. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass man für jeden der drei Größen einen Wertebereich definieren kann, auf den man sich bei seinen Betrachtungen beschränken kann. Die Minima und Maxima dieser Wertebereiche beschreiben einen dreidimensionalen Ereignisraum, der als Quader visualisiert werden kann (Abb. 4). Da aus Klimamodellen und zum Teil auch aus Beobachtungen zwar Tagesmaximum und -minimumtemperatur, für die Feuchte und den Wind in der Regel aber nur Tagesmittel vorliegen, wird im Folgenden für die regionalen Klimaparameter der Wertebereich ihrer Tagesmittelwerte betrachtet.

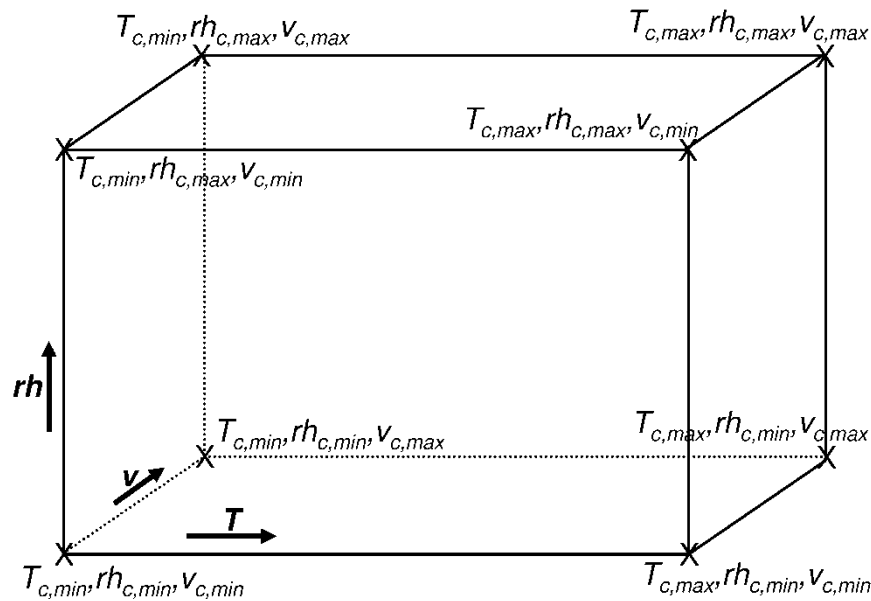


Abbildung 4: Skizze des Quaders zur Illustration der Eckpunktsimulationen und der multiplen linearen Interpolation. Die Quadereckpunkte werden durch Tagesmittelwerte der Lufttemperatur T , der relativen Luftfeuchtigkeit rh und der Windgeschwindigkeit v bestimmt und sind für die im Gebiet von Stuttgart durchgeführten MUKLIMO_3 Simulationen in Tabelle 5 aufgelistet. Hierbei sind z. B. $T_{c,min}$, $rh_{c,min}$ und $v_{c,min}$ die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Windgeschwindigkeit für die in der Tabelle 5 mit „000“ gekennzeichnete, kühle, trockene und windschwache Quadereckpunktsimulation (Index c steht für engl. Corner).

Es werden für jede Hauptwindrichtung acht, als Eckpunktsimulationen bezeichnete Berechnungen von räumlich hoch aufgelösten Tagesgängen des Lokalklimas mit dem Modell MUKLIMO_3 durchgeführt, die den in Abbildung 4 skizzierten Quader aufspannen. Den Tagesgang oder die Tagesmaxima und -minima der Klimaparameter an allen Gitterpunkten von MUKLIMO_3 für einen *beliebigen* Tag X erhält man dann aus den Ergebnissen der acht Eckpunktsimulationen für die entsprechende Windrichtung mittels dreifacher linearer (tri-linearer) Interpolation auf die regionalen Mittelwerte des Tages X (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit). Zur Bestimmung von klimatologischen Kenntagen werden die bodennahen Felder (Gitterpunktwerte) der Lufttemperatur beziehungsweise der Gefühlten Temperatur des Tages ausgewertet.

Tabelle 5: Tagesmittelwerte bodennaher Klimaparameter für die in Abbildung 4 illustrierten acht Eckpunktsimulationen der Quadermethode.

Simulation	Lufttemperatur [°C]	Rel. Luftfeuchtigkeit [%]	Windgeschwindigkeit (m/s)
000	15,0 ($T_{c,min}$)	42 ($rh_{c,min}$)	0,7 ($v_{c,min}$)
100	25,0 ($T_{c,max}$)	42 ($rh_{c,min}$)	0,7 ($v_{c,min}$)
010	15,0 ($T_{c,min}$)	80 ($rh_{c,max}$)	0,7 ($v_{c,min}$)
001	15,0 ($T_{c,min}$)	42 ($rh_{c,min}$)	3,0 ($v_{c,max}$)
110	25,0 ($T_{c,max}$)	80 ($rh_{c,max}$)	0,7 ($v_{c,min}$)
101	25,0 ($T_{c,max}$)	42 ($rh_{c,min}$)	3,0 ($v_{c,max}$)
011	15,0 ($T_{c,min}$)	80 ($rh_{c,max}$)	3,0 ($v_{c,max}$)
111	25,0 ($T_{c,max}$)	80 ($rh_{c,max}$)	3,0 ($v_{c,max}$)

4.2.3 Modellgebiet und Auswertegebiet

Das Gesamtgebiet für das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 wurde so gewählt, dass alle wesentlichen Einzugsgebiete für nächtliche Kaltluftabflüsse abgedeckt sind. Das Modellgitter besteht in horizontaler Richtung aus 262 x 234 Gitterpunkten und hat eine Ausdehnung von 37 km in West-Ost-Richtung und 27 km in Süd-Nord-Richtung. Die Gauß-Krüger Koordinaten der Südwest-Ecke des Gesamtgebiets sind 3499000 / 5391000 (RW / HW).

Das Auswertegebiet ist ein Teilgebiet des Gesamtgebiets. Seine Südwest-Ecke hat die Gauß-Krüger Koordinaten 3502000 / 5394000. Mit einer Ausdehnung von 22 km x 21 km umfasst es das administrative Stadtgebiet der LH Stuttgart (Abb. 5). Im Auswertegebiet ist das Modellgitter mit einer konstanten horizontalen Gitterweite von 100 m konfiguriert. Außerhalb des Auswertegebiets wächst die Gitterweite in mehreren Schritten von 100 m auf 500 m an. Die Geländehöhe und die Landnutzungsklassifizierung im Auswertegebiet sind in Abbildung 6 und Abbildung 7 dargestellt. Vertikal hat das Modellgitter eine Ausdehnung von 550 m. Die vertikale Gitterweite ist in den untersten 25 Schichten 10 m und nimmt darüber allmählich bis auf 50 m zu. Die Bodenfelder der MUKLIMO_3 Ergebnisse werden in 5 m über Grund ausgegeben. Die Antriebsdaten des 3-dimensionalen Modells werden bis zu einer Höhe von 1300 m mit einem vorgeschalteten 1-dimensionalen Modell berechnet.

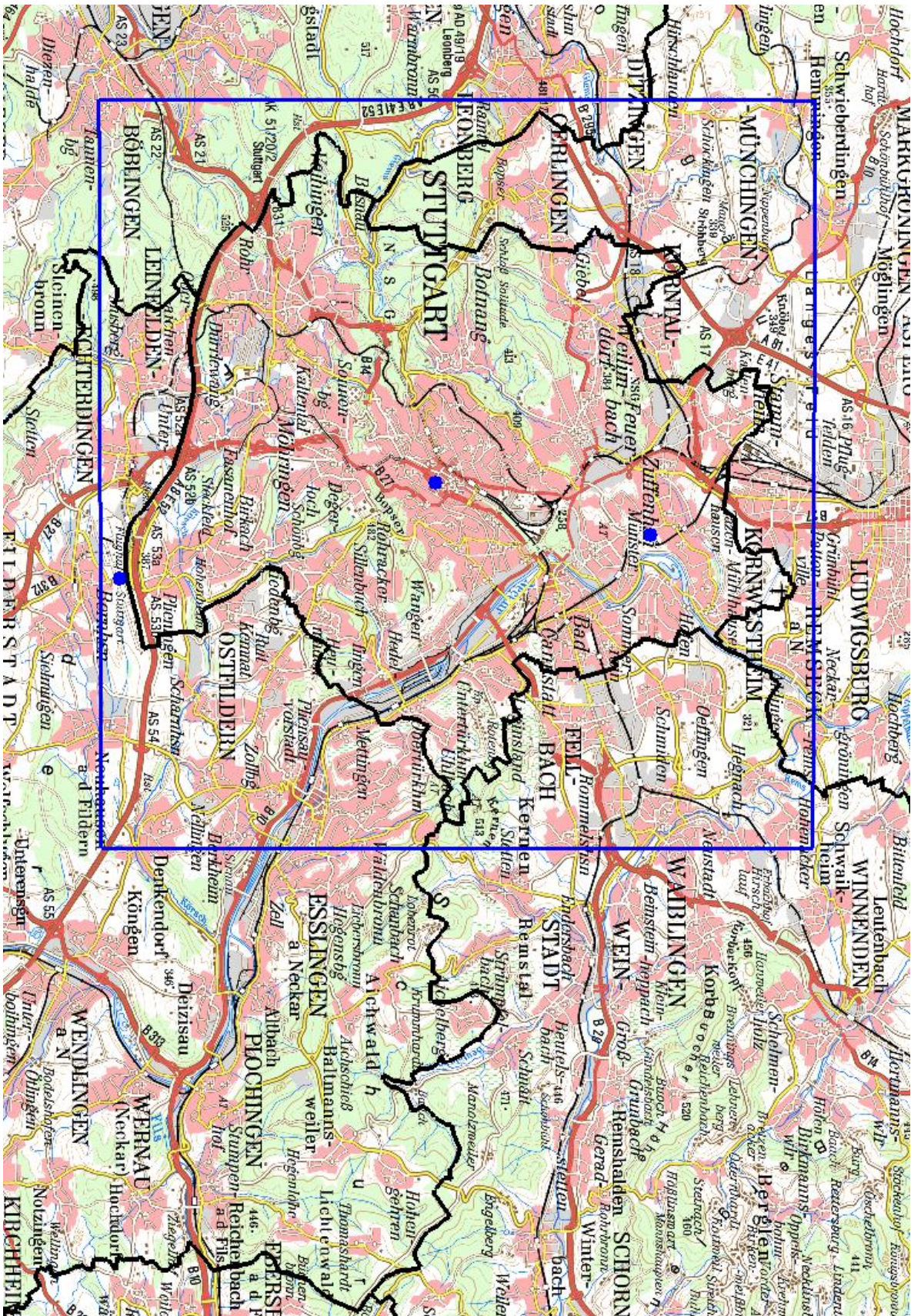


Abbildung 5: Auswertebereich für die Modellrechnungen (22 km x 21 km), in schwarz ist die Stadtgrenze, mit blauen Symbolen die langjährigen Stationen Scharrenberg, Schwabenzentrum und Echterdingen (von oben/Nord nach unten/Süd) eingezeichnet © BKG 2017.

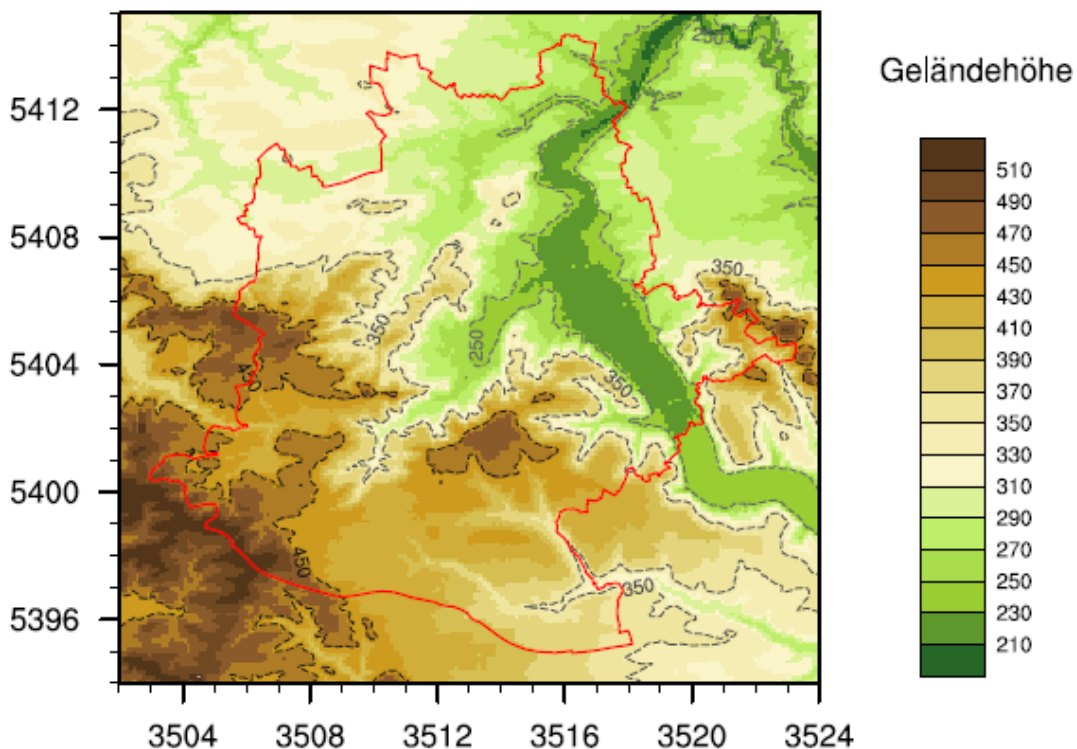


Abbildung 6: Geländehöhe (m ü. NN) im MUKLIMO_3 Auswertebiet (22 km x 21 km). Die Achsenwerte markieren die Entfernung in Hektometern bzw. die Gitterindizes im Auswertebiet. Zusätzlich eingezeichnet sind die Konturlinien für die Höhen 250, 350 und 450 m ü. NN und die Stadtgrenze in rot. Die Achsenwerte markieren die Gauß-Krüger Koordinaten des Auswertebiets. ©GeoBasis-DE / BKG 2016.

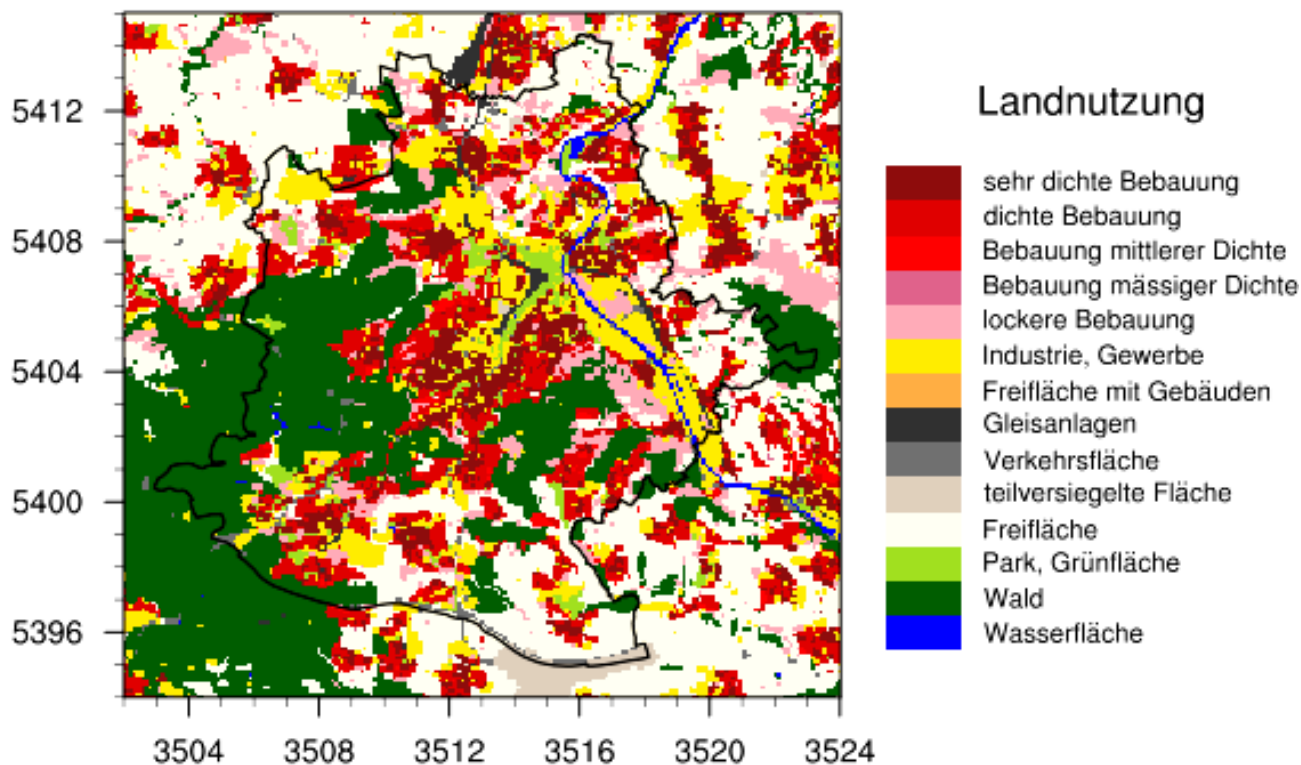


Abbildung 7: Landnutzungsklassifizierung im MUKLIMO_3 Auswertebiet (22 km x 21 km). Zusätzlich eingezeichnet ist die Stadtgrenze in schwarz. Die Achsenwerte markieren die Gauß-Krüger Koordinaten des Auswertebiets.

4.3 Langjährige Stationen

In der Region Stuttgart gibt es aktuell zwei Messstationen („Schnarrenberg“ und „Echterdingen“) des Deutschen Wetterdienstes. Die Station der DWD Niederlassung Stuttgart liegt im Bezirk Münster, ca. 6 km nord-nord-östlich des Stadtkerns auf dem Schnarrenberg in 314 m ü. NN. (Geographische Daten: 48.8282° N, 9.2000° E). Das Gelände ist von Weinbergen und Obstgärten umgeben und fällt nach Osten und Südosten steil ins Neckartal ab. Durch die erhöhte Lage, repräsentiert die Station großräumig das Stuttgarter Stadtgebiet ohne von der häufig auftretenden Bodeninversion im Ballungsraum Stuttgart-Ludwigsburg betroffen zu sein (siehe auch Kapitel 3.3). Die Messstation begann in den späten 1950er Jahren, Daten über das lokale Wetter aufzunehmen. Seit 1984 liefert die Station Messungen und Beobachtungen, seit 1999 ist sie in einem automatischen Betrieb (Abb. 8) (Nöth, 2015). Es werden folgende meteorologische Größen erfasst: Lufttemperatur, Erdbodentemperatur, relative Feuchte, Winddaten, Niederschlagsdaten, Globalstrahlung, Sonnenscheindauer und Bedeckungsgrad (DWD, 2016b).



Abbildung 8: Messfeld der DWD Niederlassung Stuttgart auf dem Schnarrenberg (Nöth, 2015).

Die zweite Messstation des DWD ist die Flugwetterwarte am Flughafen in Stuttgart-Echterdingen (Geographische Daten: 48.6883° N, 9.2235° E). Sie liefert seit 1961 durchgehend Wetterdaten und dient der Flugwetterüberwachung. Die automatischen Messungen finden auf einem Messfeld unweit des Flugsicherheitsgebäudes auf 371 m Höhe statt. Im Tower der Flugsicherung werden rund um die Uhr durch Personal Wetterbeobachtung (Bedeckungsgrad) und Kontrollmessungen durchgeführt. Erfasst werden die folgenden meteorologischen Größen: Lufttemperatur, Erdbodentemperatur, relative Feuchte, Winddaten, Niederschlagsdaten, Sonnenscheindauer und Bedeckungsgrad (DWD, 2016b). Diese Station kann als ländliche Referenzstation angesehen werden, da sie etwa 10 km südlich vom Stadtzentrum entfernt auf der Filderhochebene liegt, die durch einige Keuperhöhen von der Stadt abgeschirmt ist (Feigenwinter, 2013).

In der Stadtmitte wird von der Abteilung Stadtklimatologie des Stuttgarter Amts für Umweltschutz die Messstation Schwabenzentrum betrieben (Geographische Daten: 48.77249° N, 9,177677° E). Sie ist seit 1986 in Betrieb und befindet sich auf 250 m Höhe in einer dicht bebauten Zone mit hohen Gebäuden. Sie repräsentiert damit die stark urbanen Verhältnisse des Stadtkerns. Die Messungen finden auf dem Dach eines Gebäudes in 25 m Höhe statt (Abb. 9) (Ketterer, 2015, LHS, 2016e). Gemessen werden neben den meteorologischen Größen Lufttemperatur, relative Feuchte, Luftdruck, Niederschlagsdaten, Winddaten, UV-A und UV-B Strahlung und der Strahlungsbilanz auch Stickoxide, Ozon, und Feinstaub.



Abbildung 9: Teleskopmast der Messstation Schwabenzentrum Stuttgart (LHS, 2016e).

4.4 Temporäre Stationen

Im Rahmen dieser Studie wurden im Stadtgebiet drei temporäre Messstationen aufgebaut, um die meteorologischen Bedingungen verschiedener urbaner Bereiche mit unterschiedlicher Höhe und Bebauung zu quantifizieren. Sie waren jeweils in den Sommermonaten der Jahre 2013 (17. Juli – 08. Oktober) und 2014 (15. April – 16. Oktober) aufgebaut, um die Verteilung der Lufttemperatur über die Stadtgebiete in den für Wärmebelastung relevanten Monaten genauer zu bestimmen. Erfasst wurden Lufttemperatur und relative Feuchte mittels Sensoren innerhalb eines Strahlungsschutzes, Windgeschwindigkeit und Windrichtung mit einem Schalenkreuzanemometer. Die Messwerte liegen als 10-Minuten-Mittelwerte vor (Feigenwinter, 2013; Stachniuk, 2014).

Die Messstation T1 wurde auf dem Diakonissenplatz im Stadtbezirk West (Rosenberg) eingerichtet (270 m Höhe) (Abb. 10). Sie befand sich damit im Talkessel Stuttgarts. Die direkte Umgebung bestand aus einem niedrigen Gebäude, einigen Bäumen, Rasenflächen und asphaltierten Wegen. Der Diakonissenplatz jedoch ist von Verkehrsstraßen und dichter Randbebauung umgeben. Die Station repräsentierte stark urbanisierte Verhältnisse (Stachniuk, 2014).



Abbildung 10: Messstation T1 auf dem Diakonissenplatz in Rosenberg, Stuttgart (DWD).

Messstation T2 befand sich im Stadtbezirk Ost (Gänsheide) vor dem Haus des Oberkirchenrates (Abb. 11) auf 345 m Höhe. Die Station lag topographisch gesehen am Hang des Talkessels, der noch verengt ist und sich östlich zum Neckarbecken weitet. Umgeben von Rasenflächen und Bäumen und einem Haus in unmittelbarer Nähe, sollte diese Station ein äußeres Wohngebiet auf Halbhöhenlage mit geringerer Bebauungsdichte repräsentieren.



Abbildung 11: Messstation T2 im Garten der Gänsheidestr. 4, Stuttgart (DWD).

Die dritte temporäre Messstation hatte in den beiden Messjahren verschiedene Standorte. 2013 stand die Station in der Nähe der Universität Hohenheim beim Stadtbezirk Birkach auf 405 m Höhe. Sie ist von Wiesenflächen und Feldern umgeben und kann frei angeströmt werden (Abb. 12).



Abbildung 12: Temporäre Station 2013 bei der Universität Hohenheim im Stadtteil Birkach (DWD).

Im Jahr 2014 stand die dritte temporäre Messstation T3 in flachem parkähnlichem Gelände auf dem Dornhaldenfriedhof rund 50 Meter südlich der Hangkante zum Stuttgarter Talkessel zwischen den Gebieten Heslach und Sonnenberg auf 400 m ü. NN Die Station war ausschließlich von Grünflächen und einigen Baumreihen umgeben und repräsentierte damit das unmittelbare Umland mit geringem städtischen Einfluss (Abb. 13) (Stachniuk, 2014).

Zusätzlich zu den meteorologischen Messwertgebern wurde an den temporären Stationen jeweils ein Globe Thermometer installiert. Über die Temperaturmessung innerhalb einer schwarzen Messingkugel (Globe Temperatur T_g), kann der Strahlungseffekt indirekt gemessen und zur Abschätzung der mittleren Strahlungstemperatur T_{mrt} verwendet werden. Die Konstruktion des Globe Thermometers hat Einfluss auf die Messergebnisse. Eine Abschattung durch Gebäude, Bäume oder andere Geräte an der Station verändern die Messbedingungen, wodurch diese nicht mehr repräsentativ für die Umgebung sind. Da die Berechnung der Parameter auf der Basis der gemessenen Größen beruht, können sich Messfehler weiter auf die berechneten Parameter verlagern. Bei den Messungen der temporären Stationen im Sommer 2013 wurde ein Globe Thermometer mit einem Kugeldurchmesser von 75 mm verwendet. Dies stellte sich im Nachhinein als ungünstig heraus. Im Sommer 2014 verwendete der DWD Globe Thermometer mit einem Kugeldurchmesser von 150 mm.



Abbildung 13: Messstation T3 2014 am Dornhaldenfriedhof im offenen Gelände außerhalb des Stadtkerns. Rot umrandet ist das installierte Globe Thermometer (DWD).

In der folgenden Karte sind zur Übersicht alle langjährigen und temporären Stationen, deren Daten für die Studie herangezogen wurden, eingezeichnet (Abb. 14).

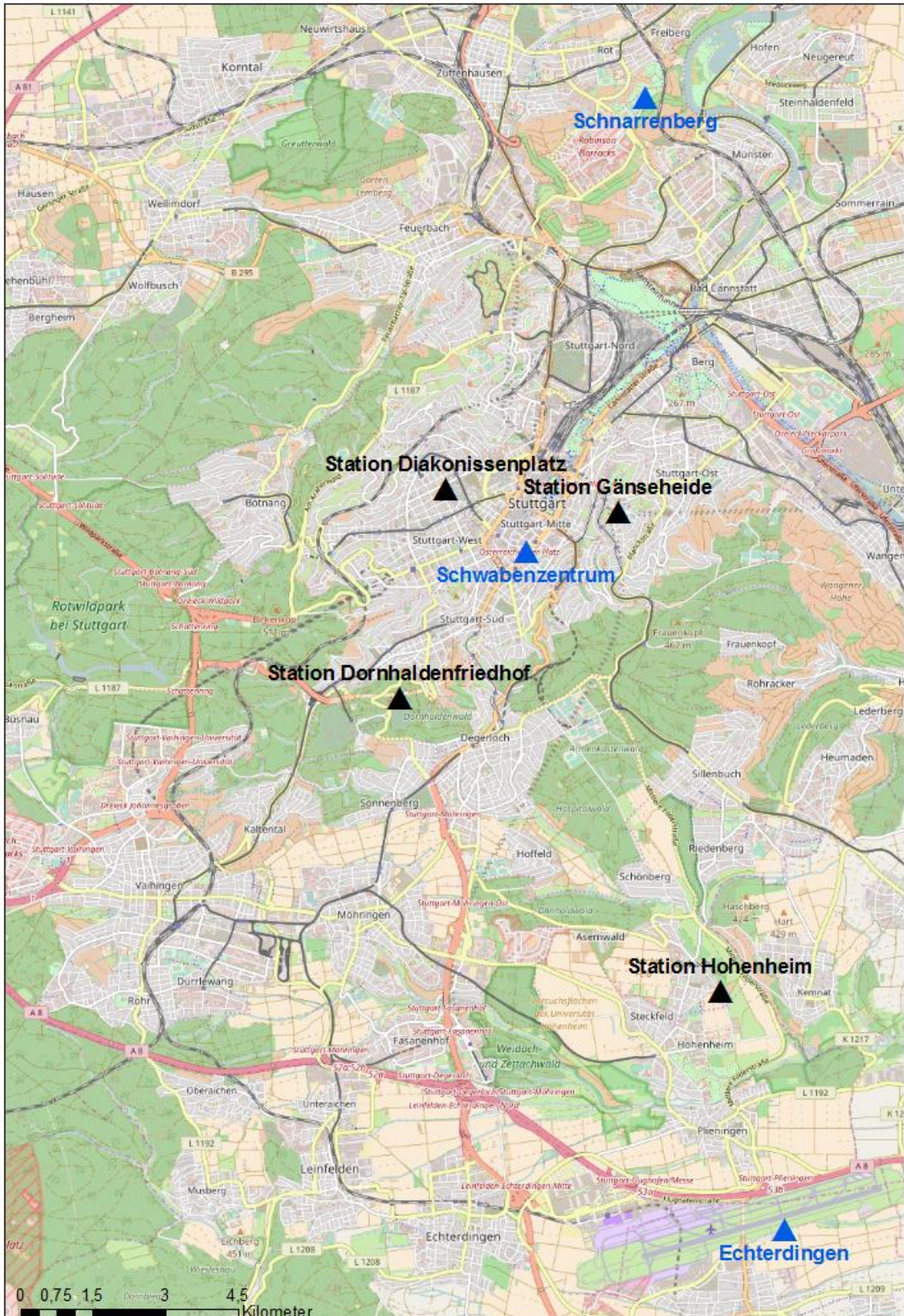


Abbildung 14: Überblick über die langjährigen Messstationen (blau) im Raum Stuttgart und die temporären Stationen (schwarz) der Messkampagne (OpenStreetMap, erstellt mit ArcGIS).

4.5 Profilfahrten

Meteorologische Daten von Messstationen sind Punktmessungen. Sie spiegeln nur die Verhältnisse wider, die in der unmittelbaren Umgebung des Standortes herrschen. Vor allem in urbanen Gebieten gibt es viele verschiedene Mikrokimate, welche von der Bebauung und den unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften beeinflusst werden. Die räumliche Variabilität der meteorologischen Größen ist daher sehr hoch. Um die thermische Belastung im gesamten Stadtgebiet Stuttgarts besser zu erfassen, wurden Profilfahrten durchgeführt. Die Messungen der Lufttemperatur und -feuchte am Fahrzeug dienen als Ergänzung der stationären Messungen. Die Profilstrecken wurden ausgewählt unter dem Aspekt, möglichst große Klimavariationen innerhalb der Stadt zu erfassen, um Bereiche mit hoher und geringerer Wärmebelastung unterscheiden zu können (Stachniuk, 2014, Ketterer und Matzarakis, 2016).

Profilmessungen finden idealerweise an Tagen statt, die durch eine hohe Einstrahlung und austauscharme (windschwache) Bedingungen eine hohe Intensität der städtischen Wärmeinsel begünstigen. Eine solche Strahlungswetterlage (Schönwetterperiode) kann nach den folgenden Kriterien ausgewählt werden (Feigenwinter, 2013):

- Tagesamplitude der Lufttemperatur $T_{\max} - T_{\min} > 12-15 \text{ K}$
- Sonnenscheindauer > 8 Stunden (kann je nach Tageslänge variiert werden)
- Windgeschwindigkeit Tagesmittelwert $< 2.5 \text{ m/s}$
- Niederschlag 0 mm

Gemessen wurden die Lufttemperatur und Luftfeuchte auf den Strecken je morgens vor Sonnenaufgang, mittags bei Sonnenhöchststand und abends nach Sonnenuntergang. Die morgendliche Messung sollte idealerweise auf die Mittag- und Abend-Messungen folgen, damit der Zusammenhang zwischen der Erwärmung des vergangenen Tages und dem Abkühlungsprozess in der Nacht untersucht werden kann.

Profilfahrten Sommer 2013

Im Zeitraum vom 21.08. bis 23.08.2013 fanden insgesamt 9 Profilfahrten statt (Tab. 6). Durchgeführt wurden sie von der Mobilen Messeinheit (MME) aus München. Diese besteht aus einem Auto, vor dem, an einem Ausleger befestigt, in ca. 2 m Höhe die Messgeräte für Lufttemperatur und Feuchte montiert sind. Es wurden zwei verschiedene Strecken für die Messungen ausgewählt. Während der Fahrt, wurden auf der Strecke mehrere Marker gesetzt, die das Zuordnen der meteorologischen Messungen zu ihrem jeweiligen Messpunkt ermöglichen. Die Messungen erfolgten alle 5-6 Sekunden (Feigenwinter, 2013). Die Profilfahrten 2013 dienten vor allem zur Auswahl der Strecken und als Test des Verfahrens.

Tabelle 6: Profildfahrten der Messkampagne Sommer 2013 (Feigenwinter, 2013).

Nr.	Datum	Fahrzeit (MEZ)	Strecke	Anmerkungen
1	21.08.2013	15:18:11 - 15:45:24	Nord(kurz)	
2	21.08.2013	21:25:11 - 21:53:15	Nord(kurz)	
3	22.08.2013	04:27:15 - 04:54:18	Nord(kurz)	
4	22.08.2013	05:09:29 - 05:34:15	Nord(kurz)	Ohne Schlossgarten
5	22.08.2013	14:17:28 - 14:42:17	Nord(kurz)	Ohne Schlossgarten
6	22.08.2013	15:11:28 - 15:34:33	Nord(kurz)	Ohne Schlossgarten
7	22.08.2013	21:29:58 - 21:58:21	Nord(kurz)	Ohne Schlossgarten
8	23.08.2013	05:27:00 - 05:53:50	Nord(kurz)	
9	23.08.2013	05:36:39 – 05:51:41	Bopser	

Die kurze Nord-Strecke durchquert das Stadtgebiet von nord-west nach süd-ost (Abb. 15). Sie führt von der Lenzhalde im Stuttgarter Norden den Hang hinunter ins Tal und erreicht in der Stadtmitte beim Schlossgarten den tiefsten Punkt der Strecke, steigt danach wieder leicht an und endet in der Gänsheidestraße am Haus des Oberkirchenamtes bei der temporären Messstation T2 (Gänsheide). Damit repräsentiert die Strecke sowohl Gebiete am Stadtrand (Lenzhalde), bebaute Hanglagen und die Stadtmitte im Kessel. Die Strecke ist 6.15 km lang, beinhaltet ein Gefälle von 140 m, eine Steigung von 94 m und variiert zwischen 240 m und 379 m Höhe.

Es wurden insgesamt 7 Marker im Verlauf der Strecke gesetzt. Die Strecke musste bei einigen Fahrten leicht verändert werden, da eine Durchfahrt durch den Schlossgarten nicht möglich war. Diese Veränderung soll bei der Analyse beachtet werden. Die Strecke Nord(kurz) wurde an den Tagen 21. und 22. August 2013 mit dem Messfahrzeug abgefahren.

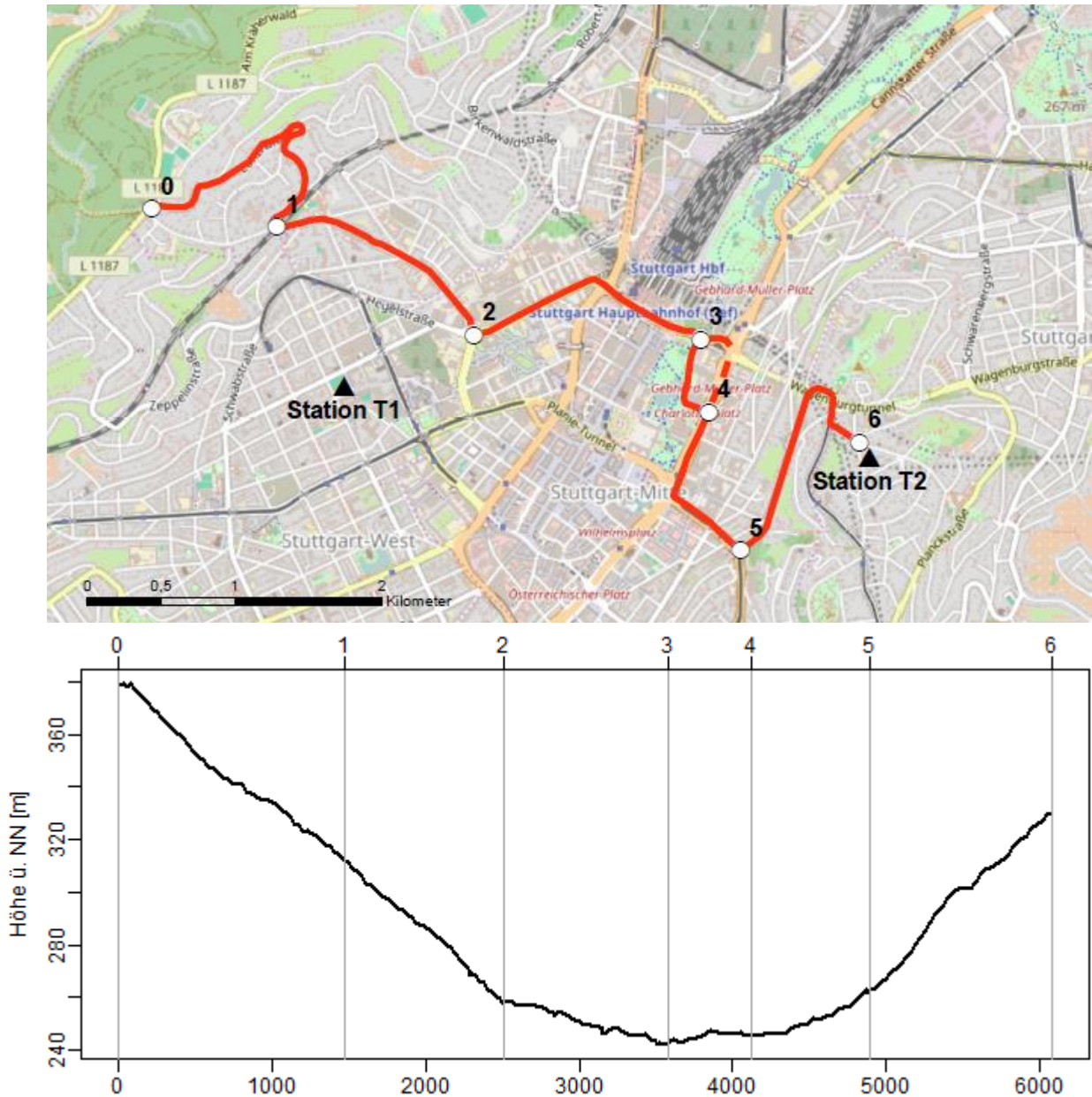


Abbildung 15: Karte und Höhenprofil der kurzen Nord-Strecke. Die Marker der Strecke sind in der Karte weiß eingezeichnet und in schwarz beschriftet, die temporären Messstationen mit schwarzen Dreiecken (OpenStreetMap, erstellt mit ArcGIS). Im Höhenprofil sind die Streckenmarker als graue Linien eingezeichnet.

Die zweite Profilstrecke 2013 (Bopser) wurde einmal gemessen (Tab. 7) und diente als Versuch, die maximal mögliche Hanglage des Kessels meteorologisch darzustellen. Sie beginnt am Haus des Oberkirchenamtes in der Gänsheide bereits leicht auf einer Anhöhe und führt am Gablenberg und Frauenkopf vorbei bis zum Fernsehturm (Abb. 16). Der Anstieg erfolgt nicht kontinuierlich, er wird von mehreren flachen Abschnitten unterbrochen. Das Ende der Strecke befindet sich auf dem Bopser, dem höchsten Berg der Filderebene (Feigenwinter, 2013). Die Strecke ist 3,9 km lang, beinhaltet eine Steigung von 149 m mit einer minimalen Geländehöhe von 336 m und maximalen Höhe von 483 m.

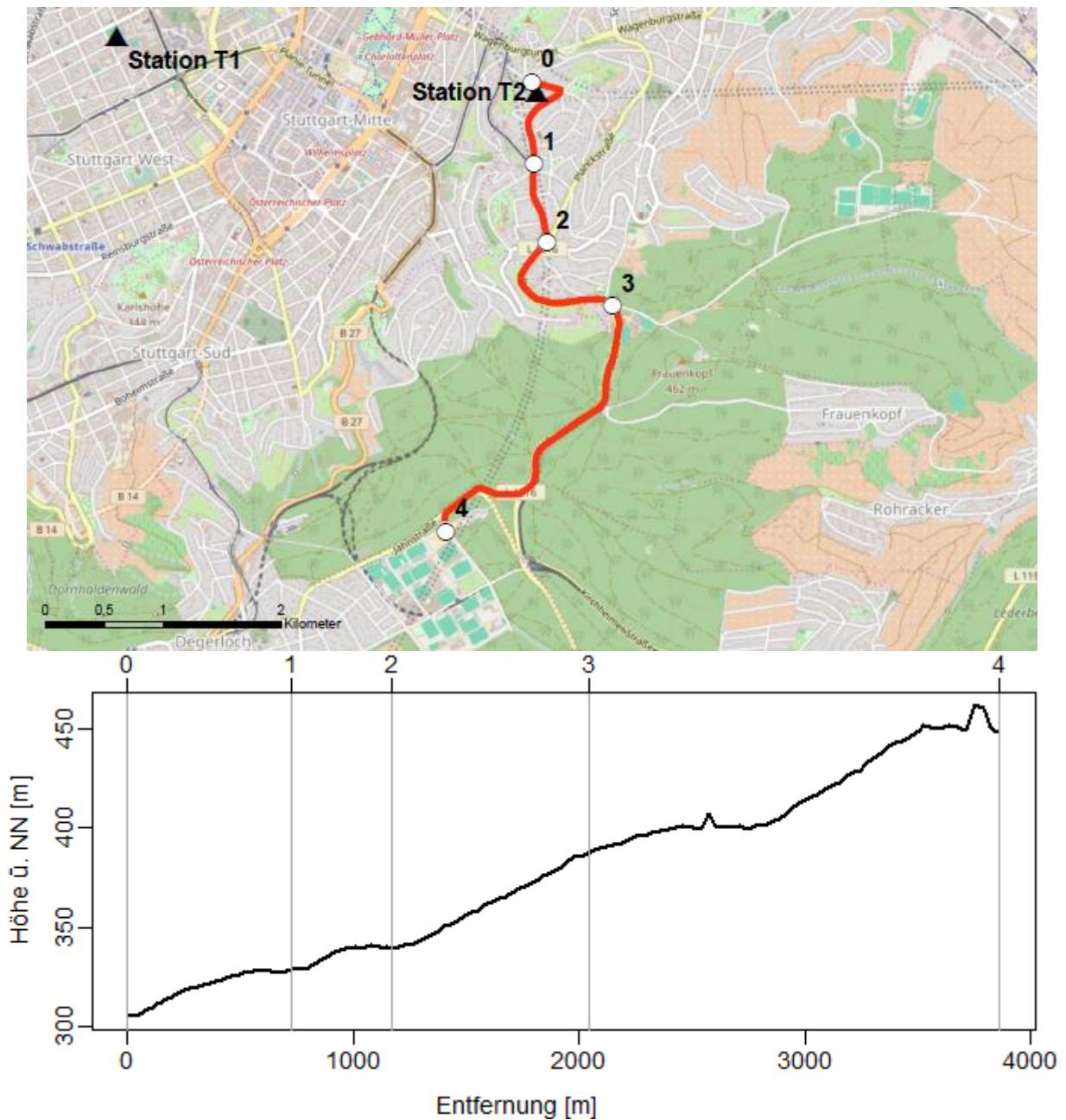


Abbildung 16: Karte und Höhenprofil der Strecke Bopser. Die Marker der Strecke sind in der Karte weiß eingezeichnet und in schwarz beschriftet, die temporären Messstationen mit schwarzen Dreiecken (OpenStreetMap, erstellt mit ArcGIS). Im Höhenprofil sind die Streckenmarker als graue Linien eingezeichnet.

Profilfahrten Sommer 2014

Für die Profilfahrten an den heißen Tagen im Sommer 2014 wurden die Profilstrecken etwas verändert. Die lange Nord-Strecke wurde in Anlehnung an die kurze Nord-Strecke gewählt. Diese wurde durch eine Fahrt um den Diakonissenplatz ergänzt, damit die Bedingungen an der temporären Messstation T1 (Diakonissenplatz) während der Profilfahrt ebenfalls erfasst werden (Abb. 17). Die Änderung beginnt an der Kreuzung Herdweg/Hegelstraße, wo rechts in die Hegelstraße abgebogen und über die Rosenbergstraße bis zum Diakonissenplatz gefahren wurde. Dieser wurde einmal umfahren, um dann auf demselben Weg auf die Strecke zurückzukehren.

Es wurden bei der Strecke Nord(lang) im Vergleich zur Strecke Nord(kurz) mehr Marker gesetzt. Die Streckenlänge beträgt 8.31 km, das Gefälle 171 m, die Steigung 131 m und weist ähnliche Höhenunterscheide auf wie die Strecke Nord(kurz) (241–387 m ü. NN).

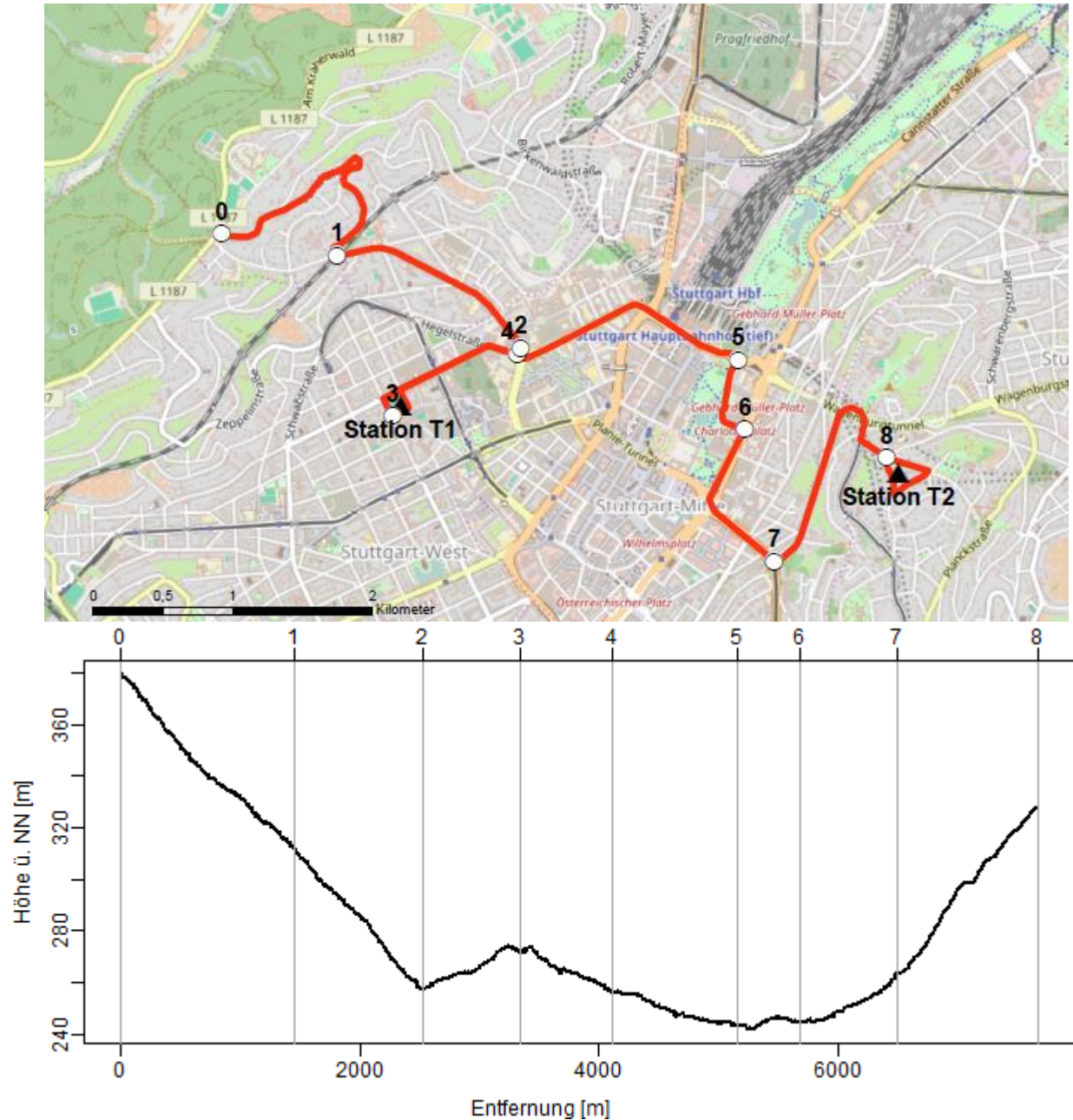


Abbildung 17: Karte und Höhenprofil der Strecke Nord(lang). Die Marker der Strecke sind in der Karte weiß eingezeichnet und in schwarz beschriftet, die temporären Messstationen mit schwarzen Dreiecken (OpenStreetMap, erstellt mit ArcGIS). Im Höhenprofil sind die Streckenmarker als graue Linien eingezeichnet.

Die zweite Strecke (Strecke Süd) wurde neu gewählt, um das südliche Stadtgebiet und die Freiflächen um die dritte temporäre Messstation am Dornhaldenfriedhof zu erfassen. Diese Strecke ist ein Rundweg, sie beginnt und endet jeweils am Dornhaldenfriedhof. Von dort aus führt die Strecke über Heslach Süd in die Stuttgarter Mitte. Über die Weinsteige und Haigst verläuft die Strecke wieder Richtung Süden zurück zum Ausgangspunkt (Abb. 18). Die Streckenlänge be-

trägt 11.42 km, damit ist es die längste Profilstrecke. Steigung und Gefälle betragen 234 m, die Höhe variiert zwischen 243 und 470 m ü. NN.

Beide Profilstrecken wurden innerhalb von zwei Messzeiträumen gemessen. Erster Zeitraum war 02. – 03. Juli (Tab. 7), zweiter Zeitraum 15. – 17. Juli 2014 (Tab. 8). Nicht an allen Tagen waren Messfahrten zu drei Zeitpunkten (morgens, mittags, abends) möglich.

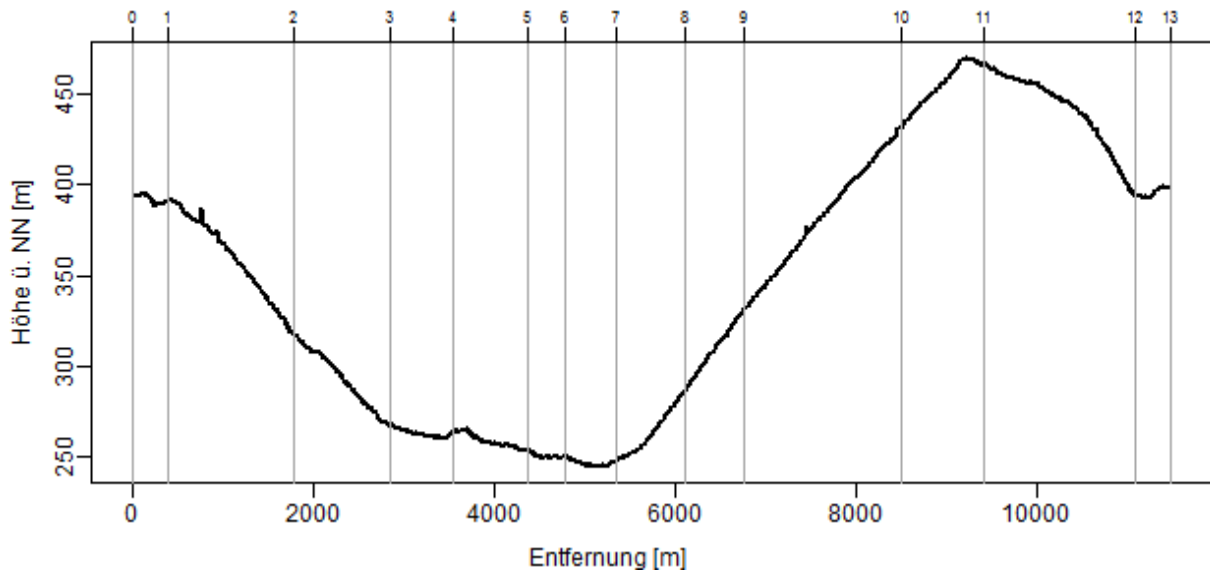
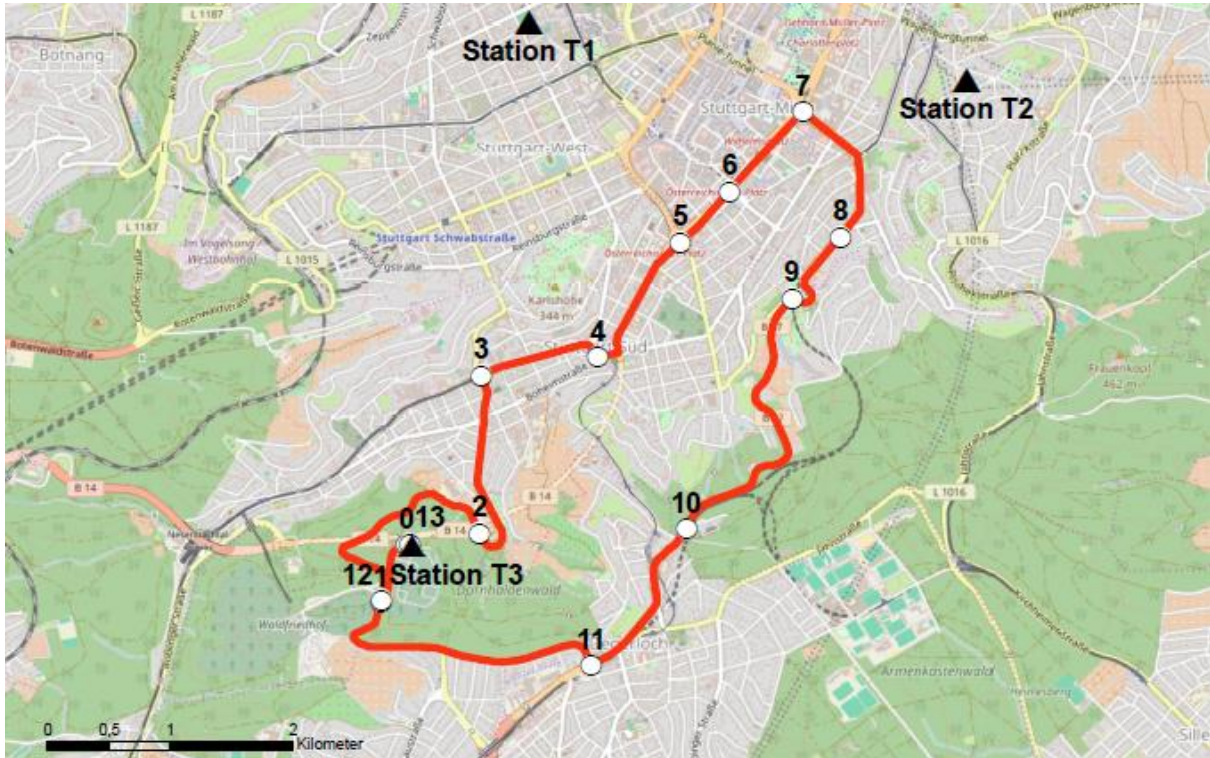


Abbildung 18: Karte und Höhenprofil der Strecke Süd. Die Marker der Strecke sind in der Karte weiß eingezeichnet und in schwarz beschriftet, die temporären Messstationen mit schwarzen Dreiecken (OpenStreetMap, erstellt mit ArcGIS). Im Höhenprofil sind die Streckenmarker als graue Linien eingezeichnet.

Tabelle 7: Profildfahrten der ersten Messkampagne 02. – 03. Juli 2014 (Stachniuk, 2014).

Nr.	Datum	Fahrzeit (MEZ)	Strecke	Anmerkungen
1	02.07.2014	22:54 - 23:24	Nord(lang)	
2	03.07.2014	04:20 - 04:48	Nord(lang)	
3	03.07.2014	16:00 - 16:35	Nord(lang)	
4	03.07.2014	21:06 - 21:39	Nord(lang)	
5	02.07.2014	21:16 - 22:07	Süd	
6	03.07.2014	05:03 - 05:44	Süd	
7	03.07.2014	14:52 - 15:34	Süd	
8	03.07.2014	21:58 - 22:49	Süd	

Tabelle 8: Profildfahrten der zweiten Messkampagne 15. – 17. Juli 2014 (Stachniuk, 2014).

Nr.	Datum	Fahrzeit (MEZ)	Strecke	Anmerkungen
9	15.07.2014	22:22 - 23:06	Nord(lang)	Ohne Schlossgarten
10	16.07.2014	05:32 - 06:18	Nord(lang)	Ohne Schlossgarten, unterbrochen an T1
11	16.07.2014	16:01 - 16:40	Nord(lang)	Ohne Schlossgarten
12	16.07.2014	21:20 - 21:59	Nord(lang)	Ohne Schlossgarten, Umleitung, Marker 5 – 6 entfallen
13	17.07.2014	04:13 - 04:46	Nord(lang)	
14	17.07.2014	16:20 - 16:54	Nord(lang)	Ohne Schlossgarten
15	17.07.2014	22:24 - 23:03	Nord(lang)	Ohne Schlossgarten, Umleitung
16	15.07.2014	21:14 - 22:02	Süd	
17	16.07.2014	04:30 - 05:13	Süd	
18	16.07.2014	14:47 - 15:37	Süd	
19	16.07.2014	22:19 - 23:09	Süd	
20	17.07.2014	05:02 - 05:45	Süd	
21	17.07.2014	15:08 - 15:54	Süd	
22	17.07.2014	21:14 - 22:04	Süd	

5 Ergebnisse

5.1 Gefühlte Temperatur

5.1.1 Langjährige Messreihen

Die thermischen Bedingungen, denen der Mensch an einem Ort ausgesetzt ist, hängen natürlicherweise von der Tages- und Jahreszeit ab. Die Zeitreihen der langjährigen Messstationen zeigen aber auch einen zeitlichen Trend über mehrere Jahre hinweg. Der Tagesgang der thermischen Bedingungen ist im Folgenden mittels Häufigkeitsdiagrammen für die beiden DWD-Messstationen Echterdingen und Schnarrenberg erläutert. Der Durchschnitt gilt für die jeweils vorhandenen Datenreihen (Echterdingen 1961-2010, Schnarrenberg 1984-2010).

An der Station Echterdingen treten hauptsächlich die Klassen der Gefühlten Temperatur auf, die thermischen Komfort (hellgrün) oder leichten Kältereiz (dunkelgrün) ausdrücken (Abb. 19). Nachts tritt durchschnittlich zu fast 50 % leichter Kältereiz auf, der auch tagsüber mit mindestens 16 % verbleibt. Auch moderater Kältestress (hellblau) ist, außer in den Mittagsstunden zwischen 12-16 Uhr mit einer geringen Prozentzahl vorhanden (maximal 4.2 %). Der Bereich des thermischen Komforts (0 °C – 20 °C GT) tritt am häufigsten in Echterdingen auf, nachts wie tagsüber, und liegt zwischen 46-52 %. In den Mittags- und Nachmittagsstunden tritt auch Wärmebelastung auf. Leichte Wärmebelastung (20 °C – 26 °C GT, hellgelb) tritt mit einer Häufigkeit von 12-17 % (10-18 Uhr) auf. Moderate Wärmebelastung (26 °C – 32 °C GT, dunkelgelb) kann ab 9 Uhr früh auftreten (Häufigkeit 2 %). Mittags liegt die Häufigkeit bei 12 % (14 Uhr). Mit maximal 4.4 % (14 Uhr) ist auch starke Wärmebelastung (orange) vorhanden.

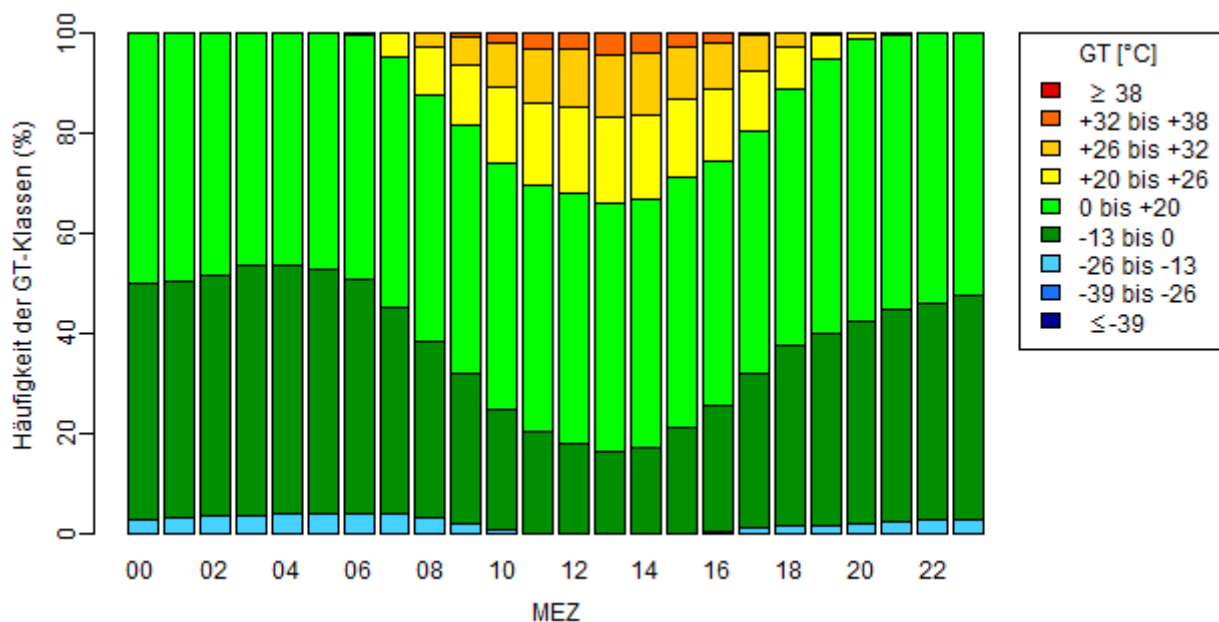


Abbildung 19: Häufigkeitsverteilung der Belastungsklassen der Gefühlten Temperatur über einen Tag an der Station Echterdingen durchschnittlich für die Zeitreihe 1961-2010.

Die Wärmebelastung kann durch die Anzahl der Tage ausgedrückt werden, an denen die Gefühlte Temperatur einen gewissen Schwellenwert überschreitet. Schwellenwerte können zum Beispiel die Belastungsstufen „starke Wärmebelastung“ mit $GT \geq 32^\circ\text{C}$ oder „extreme Wärmebelastung“ mit $GT \geq 38^\circ\text{C}$ sein. Diese werden in den folgenden Abbildungen für die drei langjährigen Stationen im Raum Stuttgart dargestellt.

Die Station Stuttgart-Echterdingen weist eine seit 1961 Messdaten auf. Allerdings wurde in den Jahren 1961-1980 die Messungen nur 3-stündlich erhoben. Dadurch werden vor allem in den Mittagsstunden (13-14 Uhr) keine meteorologischen Größen erfasst, die die Wärmebelastung aufzeigen. Ab 1981 liegen stündliche Messwerte vor. Aufgrund dieses Umstandes kann bei folgender Abbildung die Zeitreihe 1961-1981 nicht mit der Zeitreihe 1981-2010 verglichen werden.

Im Jahr 1981 beträgt die Anzahl der Tage mit starker Wärmebelastung 15, im Jahr 1982 19 Tage und 1983 23 Tage. Danach brach die Anzahl der wärmebelasteten Tage ein auf 6 Tage im Jahr 1984. Es zeigen sich oft mehrere Jahre hintereinander mit einer solchen Entwicklung (1984-1986, 1988-1992, 1999-2003, 2004-2006). Auffallend sind die Jahre 1994, 2003 und 2006, die mit 30 Tagen (1994, 2003) oder 29 Tagen (2006) eine sehr hohe Wärmebelastung nachweisen. Die Regression zeigt einen leicht ansteigenden Trend der wärmebelasteten Tage in Echterdingen (0.14 Tage pro Jahr).

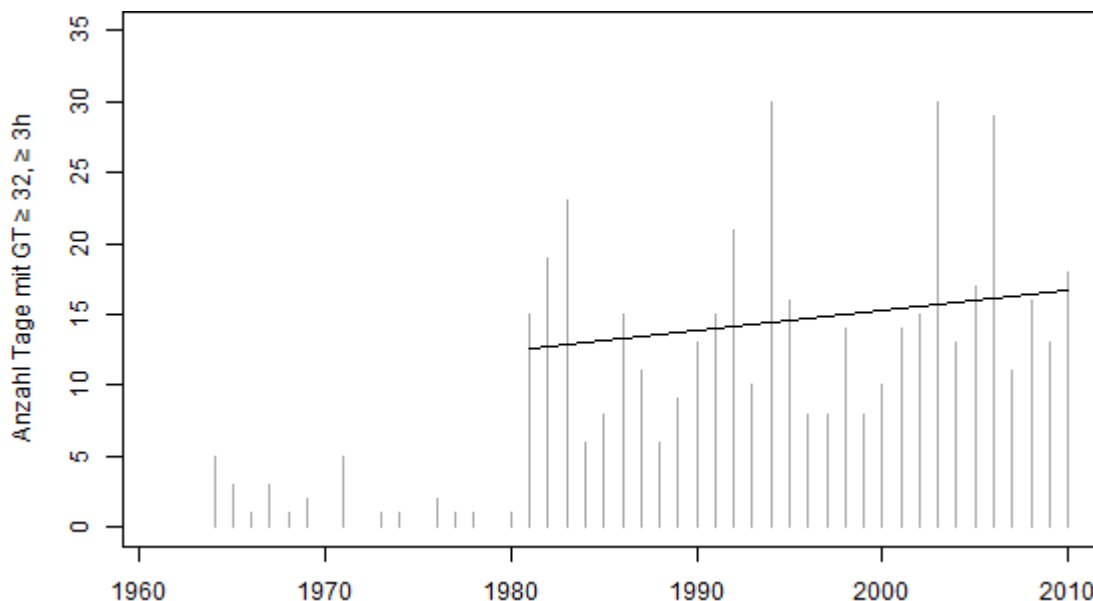


Abbildung 20: Anzahl der Tage pro Jahr mit einer Gefühlten Temperatur $\geq 32^\circ\text{C}$ (starke Wärmebelastung) durchgehend innerhalb von 3 Stunden oder länger ($GT \geq 32^\circ\text{C} \geq 3\text{h}$) berechnet für die Station Echterdingen. In schwarz ist die Regressionsgerade eingezeichnet, die den Trend über den Zeitraum anzeigt.

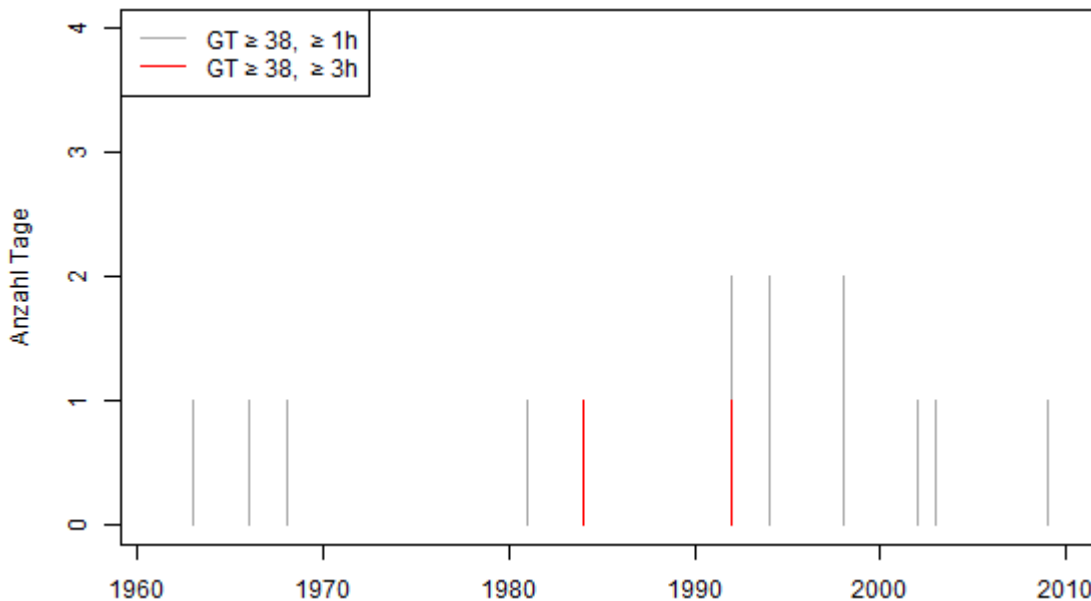


Abbildung 21: Anzahl der Tage pro Jahr mit einer Gefühlten Temperatur ≥ 38 °C (extreme Wärmebelastung) durchgehend innerhalb 1 Stunde oder länger (grau) und innerhalb 3 Stunden oder länger (rot) berechnet für die Station Stuttgart-Echterdingen.

In Echterdingen traten auch immer wieder Tage auf mit extremer Wärmebelastung, die durch eine Gefühlte Temperatur ≥ 38 °C ausgedrückt wird (Abb. 21). Das Auftreten dieser Belastungsstufe dauerte aber meist nur etwa eine Stunde an und die Anzahl der Tage pro Jahr war maximal 2 (1992, 1994, 1998). Die Jahre 1984 und 1992 fallen durch einen Tag mit einer extremen Wärmebelastung durchgehend über 3 Stunden auf. In den beiden Jahren der Messkampagne 2012 und 2014 gab es keinen Tag mit einer solchen Wärmebelastungsstufe.

An der Messstation auf dem Schnarrenberg sieht die durchschnittliche Verteilung der thermischen Belastungsstufen ähnlich aus wie in Echterdingen (Abb. 22). Leichter Kältereiz tritt nachts mit maximal 47.5 % auf (5 Uhr), tagsüber mit mindestens 16.6 % (13 Uhr MEZ). Moderater Kältestress tritt in einem etwas geringeren Maße auf als in Echterdingen. Nachts wird maximal 3.4 % erreicht. Thermischer Komfort tritt mit der höchsten Häufigkeit auf, sie schwankt zwischen 44-58 %. Die Wärmebelastung am Schnarrenberg zeigt sich deutlich häufiger als in Echterdingen. Leichte Wärmebelastung ist tagsüber mit 9.6 % (9 Uhr) bis zu 19.2 % (14 Uhr) vertreten. Nachts bleibt fast durchgehend ein geringes Auftreten bestehen (0.5-0.05 % zwischen 0 und 4 Uhr). Moderate Wärmebelastung tritt ebenfalls häufiger auf, mit 2.8 % (9 Uhr MEZ) bis 11.6 % (13-15 Uhr MEZ). Tagsüber ist starke Wärmebelastung mit einer Häufigkeit von bis zu 5.8 % (14 Uhr) vorhanden. Bereits um 9 Uhr früh beginnt mit 0.2 % diese Belastungsstufe aufzutreten und hält sich bis 22 Uhr mit 0.01 %.

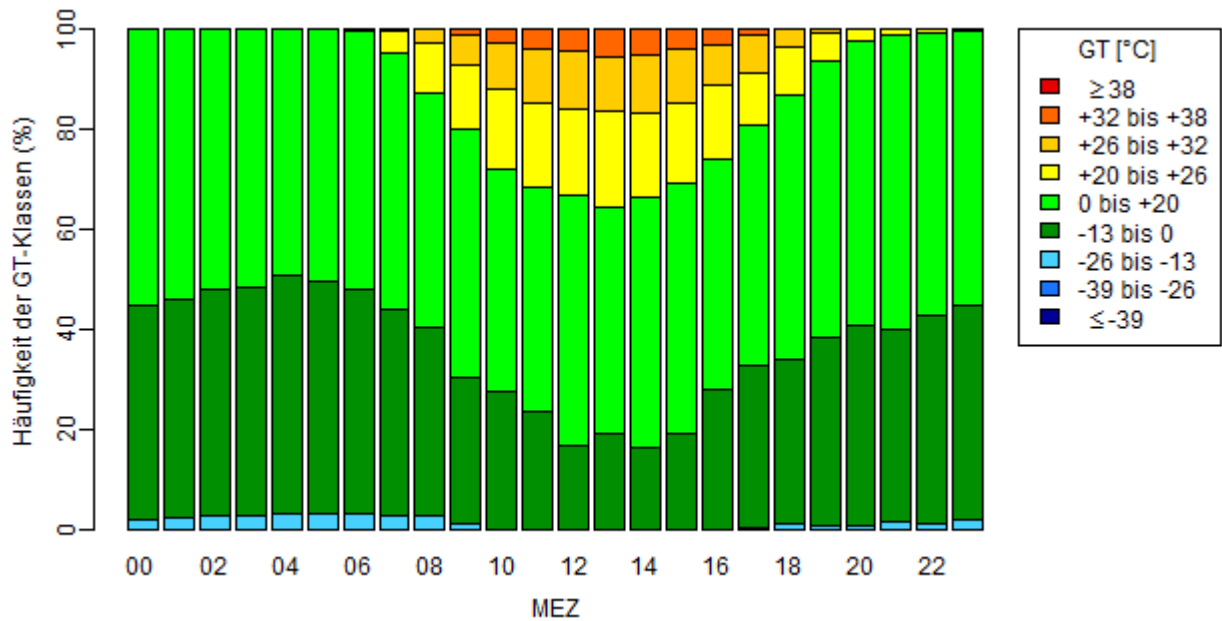


Abbildung 22: Häufigkeitsverteilung der Belastungsklassen der Gefühlten Temperatur über einen Tag an der Station Schnarrenberg durchschnittlich für die Zeitreihe 1984-2010 (2000-2008 keine Daten vorhanden).

Die DWD-Messstation Schnarrenberg besteht erst seit 1984. Aufgrund von Umbaumaßnahmen sind von 2000 bis einschließlich 2008 nicht alle notwendigen meteorologischen Größen für die Berechnung der thermischen Indizes vorhanden (Abb. 23). Die Anzahl der Tage mit einer Wärmebelastung mit $GT \geq 32 \geq 3h$ im verfügbaren Zeitraum zeigt wie die Station Echterdingen ebenfalls einen ansteigenden Trend. Von 1988 bis 1992 steigt die Anzahl von 6 auf 19 Tage an. Auffallend sind hier die Jahre 1994, 2009 und 2010. 1994 traten 28 Tage mit „starker Wärmebelastung“ auf, 2009 22 Tage, 2010 24 Tage. Auch wenn von Schnarrenberg das Maximum 1994 mit 28 Tagen niedriger ist, als das Maximum in Echterdingen im selben Jahr mit 30 Tagen, liegt die durchschnittliche Anzahl der wärmebelasteten Tage ($GT \geq 32 \geq 3h$) mit 13.1 Tagen höher als an der Station Echterdingen mit 10.8 Tagen.

Tage mit „extremer Wärmebelastung“ traten auch in Schnarrenberg auf (Abb. 24). Im Jahr 1987 wurde an 3 Tagen Bedingungen mit solcher Wärmebelastung gemessen, 1994 sogar an 4 Tagen. Sowohl 1994, als auch 1995 dauerte die extreme Hitzebelastung sogar 3 Stunden oder länger an.

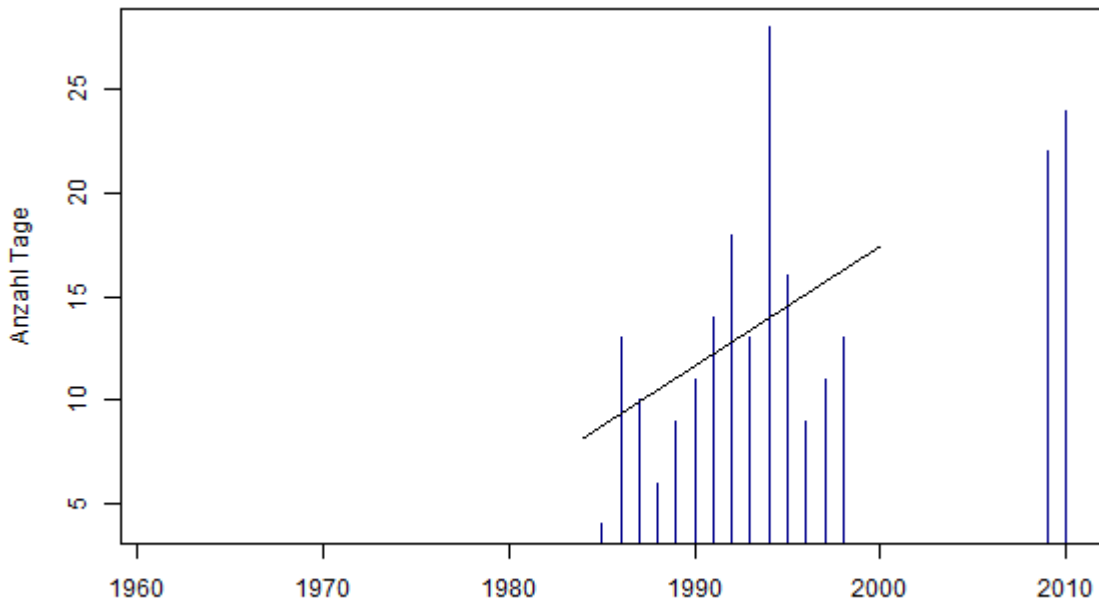


Abbildung 23: Anzahl der Tage pro Jahr mit einer Gefühlte Temperatur $\geq 32^{\circ}\text{C}$ (starke Wärmebelastung) durchgehend innerhalb von 3 Stunden oder länger ($\text{GT} \geq 32^{\circ}\text{C} \geq 3\text{h}$), berechnet für die Station Stuttgart-Schnarrenberg. In schwarz ist die Regressionsgerade eingezeichnet, die den Trend über den Zeitraum mit verfügbaren Daten anzeigt (1989-2008 keine Daten vorhanden).

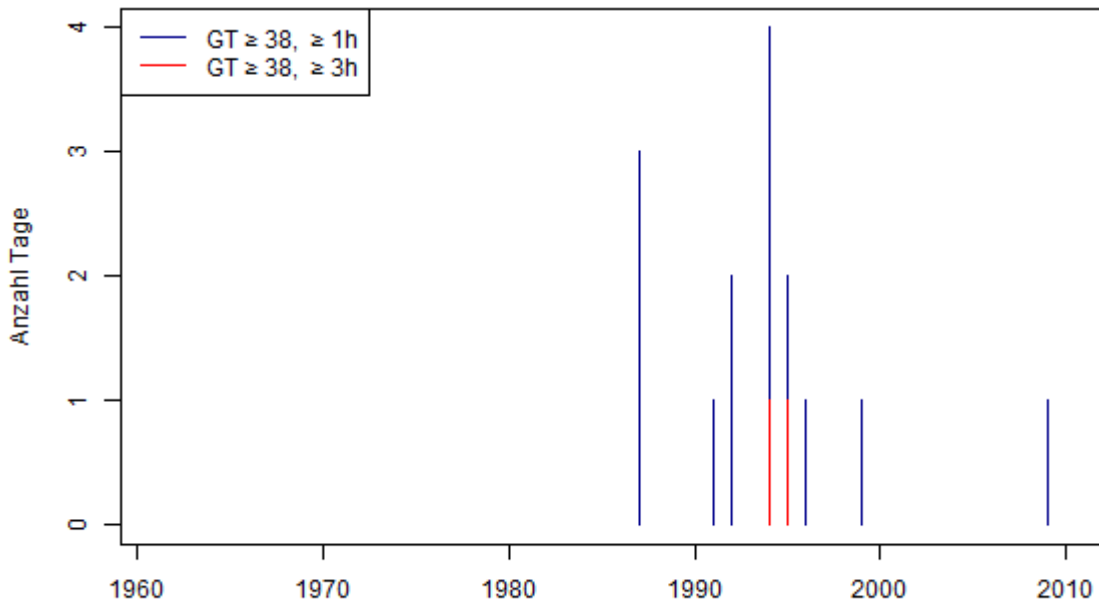


Abbildung 24: Anzahl der Tage mit einer Gefühlten Temperatur $\geq 38^{\circ}\text{C}$ (extreme Wärmebelastung) durchgehend innerhalb 1 Stunde oder länger (grau) und innerhalb 3 Stunden oder länger (rot) berechnet für die Station Stuttgart-Schnarrenberg (1998-2008 keine Daten vorhanden).

Die Messstation des Stuttgarter Amtes für Umweltschutz am Schwabenzentrum weist seit 1987 durchgehend Daten auf. Die Häufigkeitsverteilung zeigt deutlich, dass in der Stuttgarter Mitte vermehrt Wärmebelastung auftritt, Kältestress dagegen seltener (Abb. 25). Moderater Kältestress tritt in den Nachtstunden nur noch mit einer maximalen Häufigkeit von 0.93 % auf. Leichter Kältestress tritt in den frühen Morgenstunden mit maximal 43.5 % auf, tagsüber mit mindestens 11.6 %. Der Bereich des thermischen Komforts bleibt mit einer hohen Häufigkeit bestehen, das Minimum beträgt um 17 Uhr 43.7 %, das Maximum um 23 Uhr liegt bei 61.1 %. Die Wärmebelastung breitet sich in den Nachmittag und Abend aus, was für eine bessere Wärmespeicherung in der Stadt spricht. Leichte Wärmebelastung tritt durchgehend auf, nachts mit 1.1 % bis 0.1 % (0-6 Uhr), tagsüber erreicht die Häufigkeit bis zu 16.6 %, was gegenüber der Station Schnarrenberg zwar geringer ist, die moderate und starke Wärmebelastung nimmt aber dafür deutlich zu. Die Häufigkeit der moderaten Wärmebelastung beträgt 5-6 % bis 15 % (9-14 Uhr), die Häufigkeit der starken Wärmebelastung beträgt 0.7 % um 9 Uhr, 9.4 % um 14 Uhr, was mehr als das Doppelte ist als in Echterdingen.

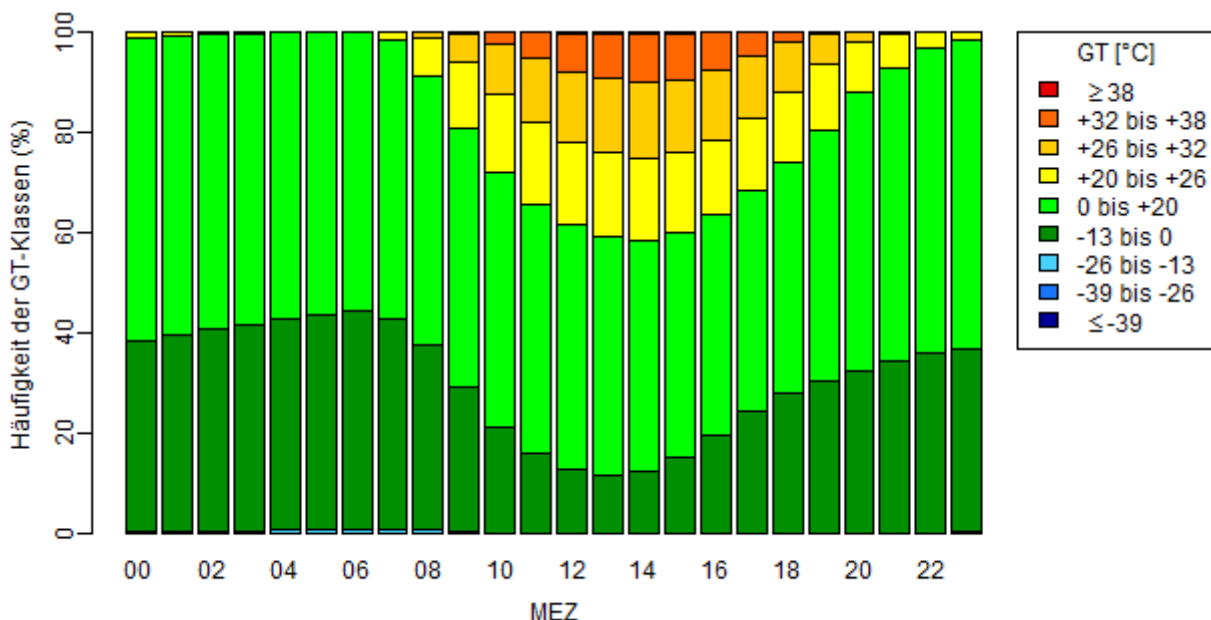


Abbildung 25: Häufigkeitsverteilung der Belastungsklassen der Gefühlten Temperatur über einen Tag an der Station Schwabenzentrum durchschnittlich für die Zeitreihe 1987-2010.

Die Wärmebelastung, betrachtet über die verfügbare Zeitreihe, zeigt auch am Schwabenzentrum deutlich einen ansteigenden Trend der Tage mit starker Wärmebelastung ($GT \geq 32 \geq 3h$) (Abb. 26). Der Trend ist kontinuierlicher als in Echterdingen, unterbrochen nur von wenigen Jahren mit geringerer Wärmebelastung, wie das Jahr 1996 mit 7 Tagen starker Wärmebelastung. Auffallend ist, wie auch an der Station Stuttgart-Echterdingen, das Jahr 2003, welches mit 74 Tagen das Maximum der Zeitreihe aufweist. Die durchschnittliche Anzahl liegt mit 31.1 Tagen am Schwabenzentrum dreifach so hoch wie in Echterdingen und mehr als doppelt so hoch wie auf dem Schnarrenberg, was durch die Lage der Station in der Stadtmitte bedingt ist. Der Anstieg der Tage mit $GT \geq 32 \text{ °C} \geq 3h$ am Schwabenzentrum erfolgte über die Jahre im Durchschnitt mit 0.94 zusätzlichen Tagen pro Jahr, was deutlich schneller ist als der durchschnittliche Anstieg in Echterdingen mit 0.39 Tagen pro Jahr oder der in Schnarrenberg mit 0.49 Tagen.

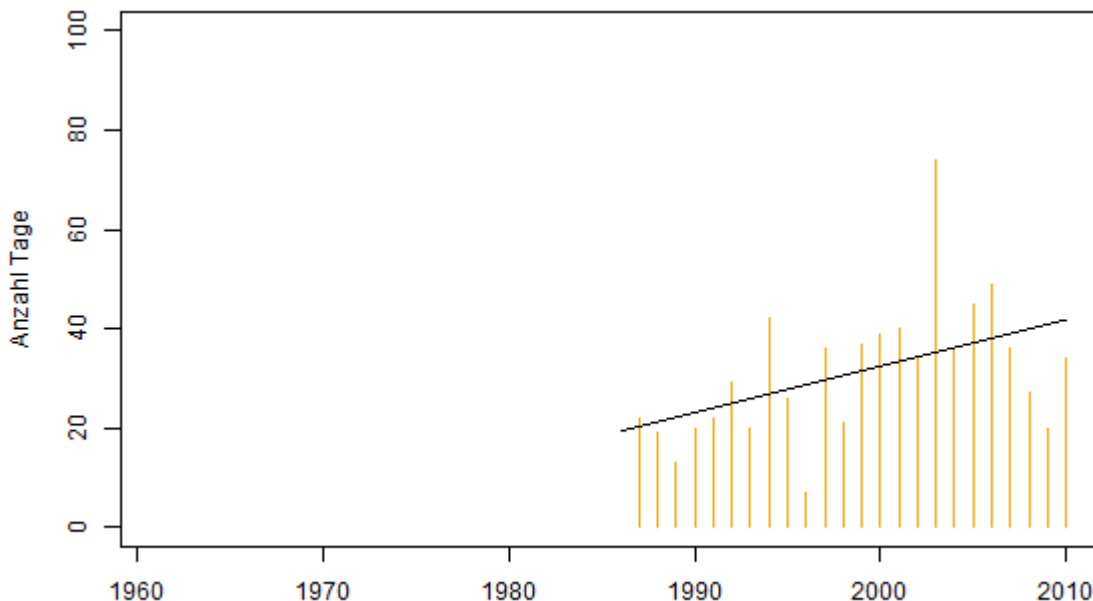


Abbildung 26: Anzahl der Tage pro Jahr mit einer Gefühlte Temperatur $\geq 32^{\circ}\text{C}$ (starke Wärmebelastung) durchgehend innerhalb von 3 Stunden oder länger ($\text{GT}\geq 32^{\circ}\text{C}\geq 3\text{h}$), berechnet für die Station Schwabenzentrum. In schwarz ist die Regressionsgerade eingezeichnet, die den Trend über den Zeitraum anzeigt.

Am Schwabenzentrum traten in dem verfügbaren Zeitraum auch vermehrt Tage mit extremer Wärmebelastung ($\text{GT}\geq 38^{\circ}\text{C}$) auf (Abb. 27). Seit 1987 waren nur wenige Jahre ohne eine Messung dieser Belastungsstufe. Daher kann auch ein Trend ermittelt werden, der einen deutlichen Anstieg der Tage mit extremer Wärmebelastung innerhalb einer Stunde um durchschnittlich 0.23 Tagen pro Jahr (schwarze Regressionsgerade) anzeigt. An 46 % der Tage mit extremer Wärmebelastung dauerte dieser sogar drei Stunden oder länger an. Das Jahr 2003 weist mit 19 Tagen (davon 9 Tage mit $\text{GT}\geq 38^{\circ}\text{C}\geq 3\text{h}$) auch in dieser Belastungsstufe die höchste Anzahl auf.

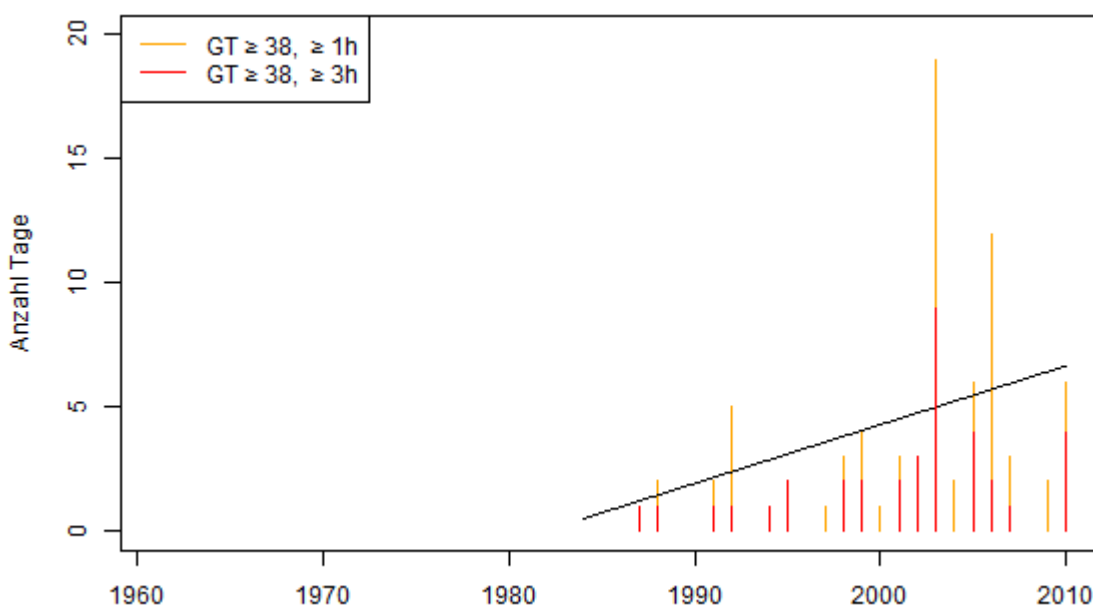


Abbildung 27: Anzahl der Tage mit einer Gefühlten Temperatur $\geq 38^{\circ}\text{C}$ (extreme Wärmebelastung) durchgehend innerhalb 1 Stunde oder länger (gelb) und innerhalb 3 Stunden oder länger (rot) berechnet für die Station Stuttgart-Schwabenzentrum. Die Regressionsgerade (schwarz) zeigt den ansteigenden Trend der Tage mit $\text{GT}\geq 32^{\circ}\text{C}\geq 1\text{h}$.

5.1.2 Temporäre Messreihen

Der Messzeitraum der temporären Stationen erstreckte sich über die Sommermonate der Jahre 2013 und 2014. An den drei temporären Stationen wurde die Lufttemperatur, Luftfeuchte und die Windgeschwindigkeit gemessen, die, zusammen mit dem Bedeckungsgrad der Station Echterdingen, eine Berechnung der Gefühlten Temperatur möglich machen. Die Bedeckung wurde dabei für ganz Stuttgart als einheitlich angenommen. In den beiden Jahren stehen somit von allen temporären Stationen und der beiden DWD-Stationen Schnarrenberg und Echterdingen die Anzahl der Tage mit Wärmebelastung zur Verfügung (Abb. 28). Im Jahr 2013 begannen die Messungen an den temporären Stationen jedoch erst am 17. Juli, ein vollwertiger Vergleich zum Jahr 2014 ist somit nicht gegeben. 2013 wurden in Echterdingen 16 Tage mit $GT \geq 32^\circ\text{C} \geq 3\text{h}$ gemessen, auf dem Schnarrenberg 15 Tage. Die Messungen der Stationen T1 am Diakonissenplatz und T2 in der Gänsheide liegen beide mit 23 Tagen über denen der langjährigen DWD-Stationen. Station T3, die oberhalb des Stuttgarter Kessels bei Hohenheim lag, weist die wenigsten Tage mit einer solchen Belastungsstufe auf, es waren nur 3 Tage. Im Jahr 2014 traten an der dritten temporären Station südlich der Stadt am Dornhaldenfriedhof 29 Tage auf, ebenso an der Station T2 in der Gänsheide. Am Diakonissenplatz wurde mit 32 Tagen die höchste Wärmebelastung der 5 verglichenen Stationen gemessen. Echterdingen und Schnarrenberg liegen mit 7 Tagen deutlich geringer.

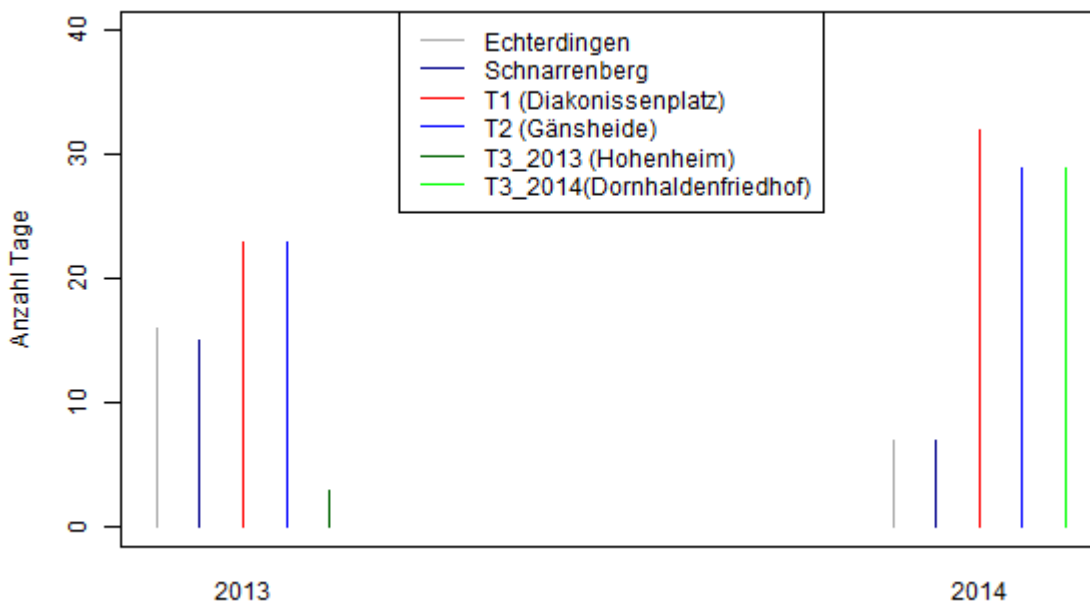


Abbildung 28: Anzahl der Tage mit einer Gefühlten Temperatur $\geq 32^\circ\text{C}$ innerhalb von 3 Stunden oder länger in den Jahren der Messkampagne 2013 und 2014 von allen verfügbaren Stationen.

Globe Thermometer

Die an den temporären Messstationen erhobene Schwarzkugeltemperatur mittels des Globe Thermometers kann zur Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur (T_{mrt}) verwendet werden. Die mittlere Strahlungstemperatur wiederum wird für die Berechnung der Gefühlten Temperatur benötigt.

Im Jahr 2013 wurde der Globe Thermometer mit einem Kugeldurchmesser von 75 mm verwendet, bei dem sich im Nachhinein feststellte, dass er für die Fragestellung ungeeignet ist. Auch die Formel zur Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur basiert auf einem Globe Thermometer mit 150 mm Durchmesser. Somit sind die Messergebnisse der Globe Thermometer von 2013 aufgrund eines zu großen Strahlungsfehlers wenig verwendbar (Feigenwinter, 2013). Im Sommer 2014 konnte das geeignete Gerät verwendet und zur Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur herangezogen werden.

Ein Vergleich der T_{mrt} von Station T1 (Diakonissenplatz) und der T_{mrt} von Schnarrenberg, berechnet auf der Basis des Bedeckungsgrades, soll das Potenzial und die möglichen Messfehler des Globe Thermometers aufzeigen (Abb. 29). Der Zeitraum entspricht der Schönwetterperiode im Sommer 2014 (siehe Kapitel 5.2.2). Deutlich ist, dass die T_{mrt} der Station T1 nachts und in den Mittagsstunden über der Kurve von Schnarrenberg liegt. Vormittags und nachmittags jedoch liegt der Wert von T1 meist unter dem von Schnarrenberg. Fluktuationen werden von der T_{mrt} auf Basis der Schwarzkugeltemperatur stärker angezeigt, was vor allem am 2. Juli und 4. Juli mittags gut zu erkennen ist. Die T_{mrt} -Kurve vom Schnarrenberg zeigt einen glatteren Verlauf, nachts sinkt sie deutlich mehr ab, als die Vergleichskurve von T1, steigt aber in den frühen Morgenstunden rascher an. Die geringeren Werte von Station T1 vormittags und nachmittags könnten durch Abschattungseffekte des Messgerätes bedingt sein. An der Station Schnarrenberg kann dieser Fehler ausgeschlossen werden. Die Messung des Bedeckungsgrades verläuft automatisch, was zu Über- und Unterschätzung führt, da das Messgerät nur vertikal nach oben schaut und die Bedingungen am Horizont nicht erfasst.

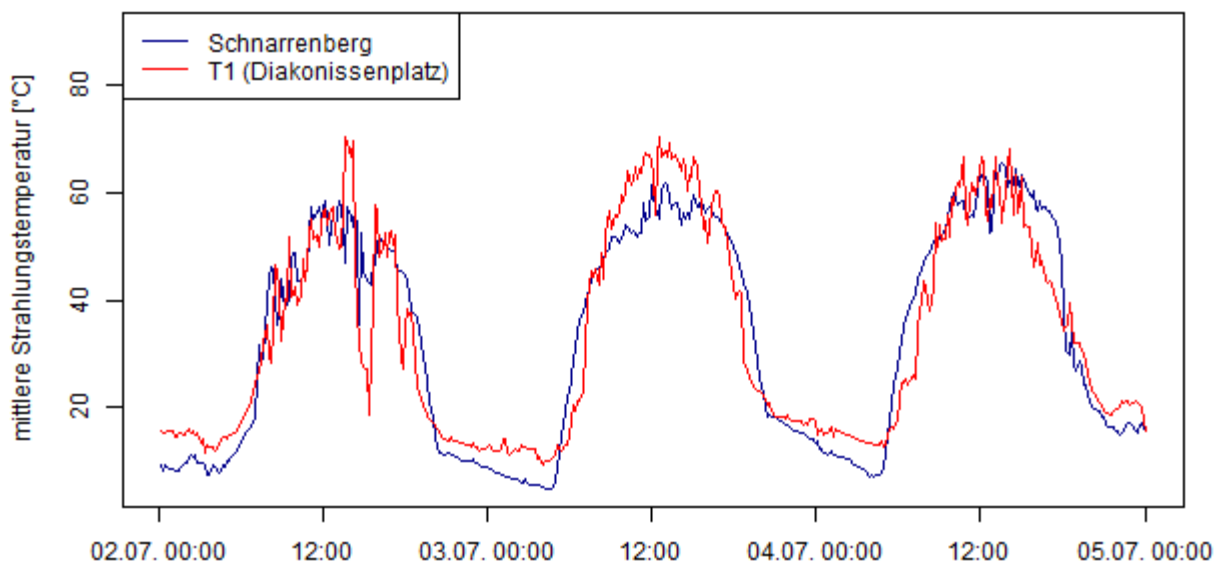


Abbildung 29: Vergleich der mittleren Strahlungstemperatur (T_{mrt}) der Station T1 (Diakonissenplatz), berechnet auf Basis der Schwarzkugeltemperatur (T_g) und der Station Schnarrenberg, berechnet auf der Basis des Bedeckungsgrades.

5.2 Vergleich thermischer Indizes

Die in Kapitel 4.1 beschriebenen thermischen Indizes beruhen auf verschiedenen Annahmen und Berechnungen. Für die langjährigen Stationen im Raum Stuttgart können die thermischen Indizes Gefühlte Temperatur (GT), Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) und der Universeller thermischer Klima Index (UTCI) verglichen werden. Die Häufigkeit der Werte über ihren Wertebereich wird in den folgenden Abbildungen gezeigt. Da die drei Indizes jeweils in °C angegeben werden, ist ein direkter Vergleich möglich.

An der Station Echterdingen zeigt die Gefühlte Temperatur einen Wertebereich von -35 °C bis +40 °C (Abb. 30). Am häufigsten treten Werte um 5 °C auf (Mittelwert liegt bei 6.86 °C), dort zeigt die Figur durch ihre Breite eine hohe Häufigkeit an. Nach oben hin nimmt die Häufigkeit der aufgetretenen Werte ab ca. 10 °C bis knapp 20 °C rascher ab, danach verläuft die Abnahme der Häufigkeit linear. Gefühlte Temperaturwerte ab 35 °C treten nur noch sehr selten auf. Der höchste gemessene Wert in Echterdingen trat mit 40.7 °C am 23.07.1963 auf. Unterhalb von 5 °C sinkt die Häufigkeit der Werte rasch ab bis 2 °C. Ab dort verläuft die Häufigkeit zunächst gleich bleibend über die 0 °C-Schwelle ins Negative. Ab -4 °C nimmt das Auftreten deutlich ab.

Die Häufigkeit der UTCI-Werte bildet eine etwas andere Form. Der Mittelwert liegt bei 3.3 °C. Von -4 °C und 5 °C nimmt die Häufigkeit annähernd linear zu, nach oben hin sinkt sie danach durchgehend ab bis 35 °C, höhere Werte bis zum Maximum von 44 °C treten nur noch selten auf. Im negativen Bereich sinkt das Auftreten der Werte unter -4 °C bis ca. -35 °C kontinuierlich, wenige Werte treten noch bis zu -53 °C auf. Die untere Grenze der UTCI-Werte unterscheidet sich deutlich von dem Wertebereich der GT, die obere Grenze beider Indizes verläuft dagegen ähnlich. Zusammen mit dem geringeren Mittelwert, zeigt der UTCI ein häufigeres Auftreten niedriger und negativer Werte.

Die Häufigkeitsverteilung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) zeigt mit 51 °C eine deutlich höhere obere Grenze des Wertebereiches. Der Mittelwert liegt mit 8.2 °C höher als bei den anderen Indizes. Der Wertebereich liegt zwischen -32 °C und 51 °C und zeigt damit die geringste negative und die höchste positive Grenze. Die PET-Werte zwischen -4 °C bis knapp 10 °C treten am häufigsten auf, unterhalb dieses Bereiches sinkt die Häufigkeit rasch ab. Oberhalb nimmt das Auftreten zunächst rasch ab, ab ca. 20 °C bis 25 °C bleibt die Häufigkeit auf demselben Niveau, oberhalb sinkt das Auftreten linear ab bis knapp 40 °C, höhere Werte treten nur noch in geringem Maße auf.

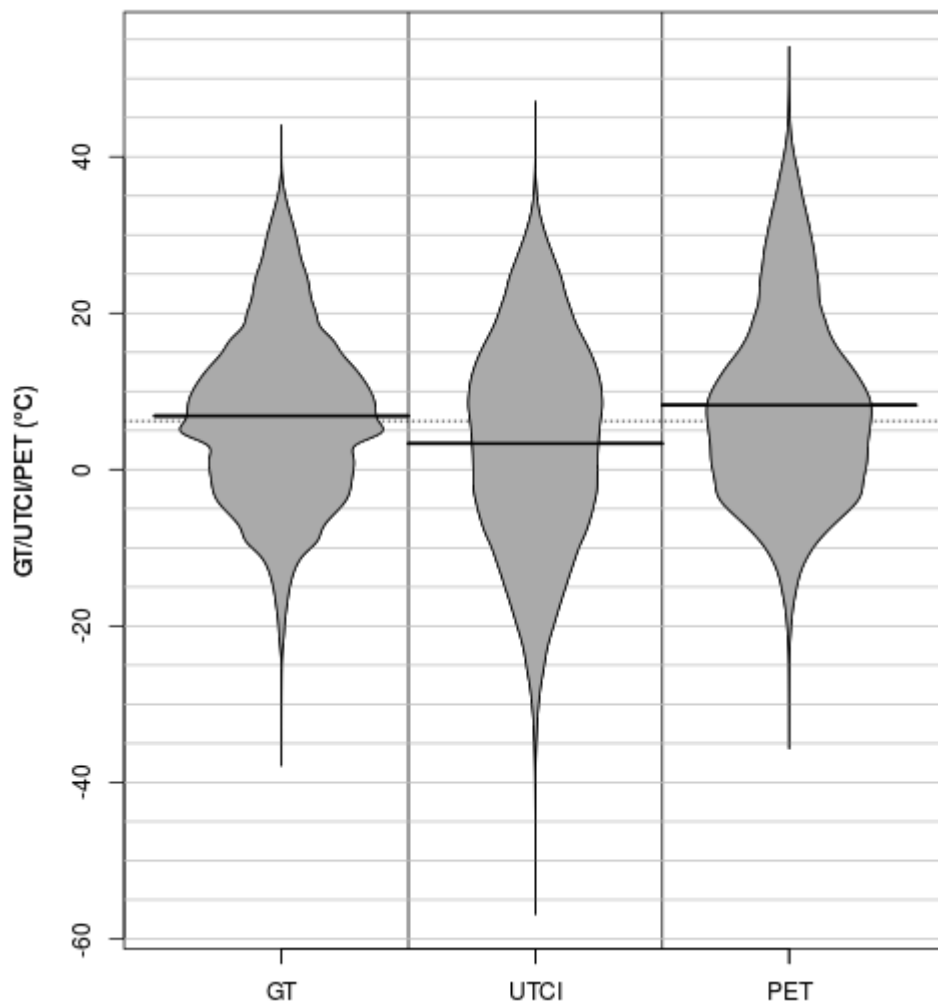


Abbildung 30: Häufigkeitsdiagramme der thermischen Indizes an der Station Stuttgart-Echterdingen für die Zeitreihe 1961-2010. Die gestrichelte Linie markiert den Mittelwert aller Daten übergreifend über die Indizes, die schwarzen Linien die jeweiligen Mittelwerte der einzelnen Indizes.

Die thermischen Indizes, die für die Station auf dem Schnarrenberg berechnet wurden, zeigen eine sehr ähnliche Verteilung (Abb. 31). Der Wertebereich der Gefühlten Temperatur liegt zwischen -31 °C und 41 °C , der Mittelwert liegt mit 7.8 °C ein Grad höher als in Echterdingen. Die negativen GT-Werte treten mit einer etwas geringeren Häufigkeit auf, die positiven Werte mit einer größeren Häufigkeit. Die Werte des UTCI in Schnarrenberg zeigen eine kompaktere Verteilung sowohl im positiven, wie auch im negativen Bereich. Das Minimum liegt bei -42 °C , das Maximum bei 38.8 °C . Oberhalb und unterhalb des Mittelwertes von 3.2 °C verläuft die Häufigkeitsverteilung ähnlich. Der Wertebereich der PET zeigt eine Verschiebung ins Positive. Der Mittelwert liegt bei 9.3 °C , die untere Grenze bei -29.2 °C , die obere Grenze bei 50.9 °C .

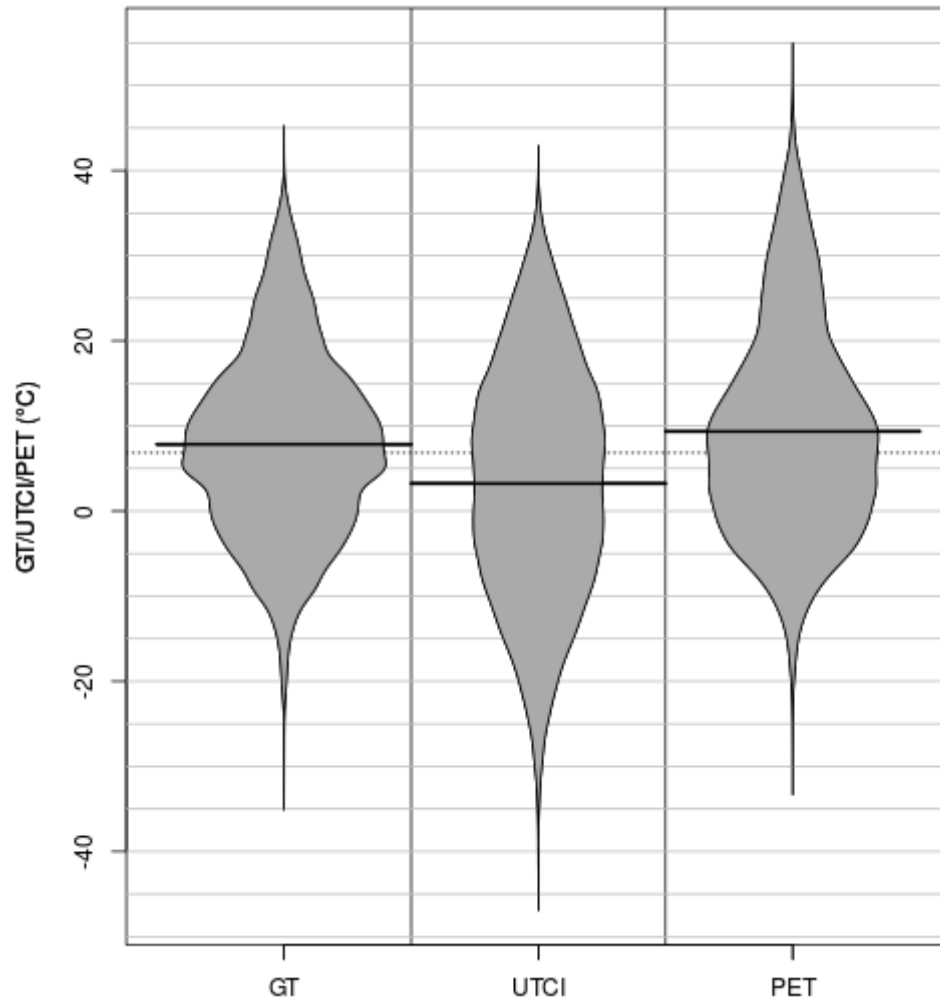


Abbildung 31: Häufigkeitsdiagramme der thermischen Indizes an der Station auf dem Schnarrenberg für die Zeitreihe 1984-2010. Die gestrichelte Linie markiert den Mittelwert aller Daten übergreifend über die Indizes, die schwarzen Linien die jeweiligen Mittelwerte der einzelnen Indizes.

5.3 Profilfahrten

5.3.1 Jahr 2013

Die im Sommer 2013 durchgeführten Profilfahrten dienten vorrangig der Auswahl geeigneter Strecken für die Studie und als Übersicht für den eigentlichen Projektstart im Sommer 2014. Die Strecke Nord(kurz) wurde innerhalb der Schönwetterperiode vom 21–23.08.2013 mit der Mobilien Messeinheit befahren. Die großräumige Wetterlage vom 20–24.08. wurde vom Hoch „Eliza“ bestimmt, welches sich von Westen her Deutschland näherte (20.08.). Wolken lösten sich auf, die Werte der Lufttemperatur stiegen. „Eliza“ zog weiter nach Osten Richtung Polen. Am 23.08. näherte sich von Westen das Tief „Joseph“, welches zu einer Abkühlung beitrug. Innerhalb dieses Zeitraumes erreichte die gemessene Lufttemperatur maximal Werte um die 24 °C an den drei temporären Stationen (Feigenwinter, 2013).

Die Profilmessungen innerhalb dieses Zeitraumes zeigen ebenfalls Werte, die tagsüber 26 °C nicht überschritten. Die größten Temperaturdifferenzen während einer Profilfahrt wurden bei den Abendmessterminen nach Sonnenuntergang gemessen. Am 22.08. und 23.08. betrug die Differenz bis zu 4 K (Tab. 9). Die höchste Lufttemperatur trat in der Innenstadt auf, die niedrigsten am Stadtrand.

Für die Analyse in der vorliegenden Studie wurden nur Schönwetterperioden ausgewählt, während derer die gemessene Lufttemperatur an den temporären Stationen 30 °C überschritt. Daher wurden für eine genauere Analyse nur die Profilfahrten während der beiden Schönwetterperioden im Sommer 2014 ausgewählt.

Tabelle 9: Übersicht der Lufttemperaturwerte aus den Profilmessungen im Sommer 2013.

Strecke	Datum	Messzeit	T _{a max} [°C]	T _{a min} [°C]	Differenz [K]
Nord(kurz)	21.08.2013	15:18:11 - 15:45:24	24.4	22.0	2.4
Nord(kurz)	21.08.2013	21:25:11 - 21:53:15	19.6	15.6	4.0
Nord(kurz)	22.08.2013	04:27:15 - 04:54:18	14.3	11.4	2.9
Nord(kurz)	22.08.2013	05:09:29 - 05:34:15	14.3	11.5	2.8
Nord(kurz)	22.08.2013	14:17:28 - 14:42:17	25.3	23.1	2.2
Nord(kurz)	22.08.2013	15:11:28 - 15:34:33	26.2	22.7	3.5
Nord(kurz)	22.08.2013	21:29:58 - 21:58:21	20.2	16.4	3.8
Nord(kurz)	23.08.2013	05:27:00 - 05:53:50	16.3	13.8	2.5

5.3.2 Jahr 2014

Im Sommer 2014 traten zwei Zeiträume mit idealen Wetterbedingungen auf, im Juni (06.06–11.06.2014) und im Juli (02.07–03.07.2014, erste Messkampagne). Profilmessungen konnten in der ersten Schönwetterperiode noch nicht stattfinden. Während der zweiten Messkampagne (15.07–17.08.2014) blieben die gemessenen Lufttemperaturwerte knapp unter 30 °C, daher werden in der nachfolgenden Analyse nur die Ergebnisse der ersten Messkampagne vorgestellt.

Schönwetterperiode 02–04. Juli 2014

Am 02. Juli 2014 traten in Süddeutschland noch einige Schauer und Gewitter auf, welche im Laufe des Tages nachließen. Das Niederschlagsgebiet sorgte für Lufttemperaturwerte zwischen 15° C und 20 °C. Über der Mitte Deutschlands nahm das Hoch „Yoshiki“ mit warmer trockener Luft Einfluss auf die Wetterlage. Die Anströmung aus Südwest verstärkte die Zufuhr von warmer Luft, was die Lufttemperatur in Stuttgart über 30 °C steigen ließ. Die Strahlungswetterlage wurde am 4. Juli beendet, als aus Richtung Frankreich dichtere Bewölkung aufzog und sich gegen Nachmittag kräftige Schauer und Gewitter bildeten (DWD, 2014).

An der meteorologischen Messstation des DWD in Stuttgart auf dem Schnarrenberg ist der Verlauf der kurzen Wetterperiode gut zu erkennen (Abb. 32). Am 2. Juli ziehen noch einige Wolken durch, die die Globalstrahlung kurzfristig immer wieder reduzieren. Am 3. Juli erreicht die Globalstrahlung ihr Maximum mit 162 W/m² und es tritt nur sehr wenig Bewölkung auf (Maximum 4/8). Erst ab Mittag des 4. Juli treten vermehrt Wolken auf und reduzieren am Nachmittag deutlich die Globalstrahlung.

Die Lufttemperatur steigt von 22.3 °C am 2. Juli (13 Uhr) auf ein Maximum von 27.6 °C am 3. Juli (15 Uhr) und am 04. Juli auf 31.1 °C (15 Uhr). Auch die Nacht vom 3. auf den 4. Juli ist wärmer als die vorangegangenen, obwohl der zum Teil wolkenlose Himmel (0/8, Bedeckungsgrad angegeben in Achtel) eine Abkühlung eher ermöglicht als ein bedeckter Himmel. Die Lufttemperaturkurve der DWD-Station am Flughafen in Stuttgart-Echterdingen zeigt ein ähnliches Bild. Dabei liegt sie immer ein paar Grad Celsius unter den Werten vom Schnarrenberg. Das liegt an der höheren Lage der Station und an der freien Lage auf der Filderhochebene ohne Einfluss der Stadt. Vor allem die Werte in den Nachtstunden sind geringer an der Station Echterdingen. Die Abkühlung ist am freien Flughafengelände besser möglich. Das kurzzeitige Absinken der Lufttemperatur am Nachmittag des 2. Juli tritt zusammen mit einer temporären Reduktion der Globalstrahlung und einem Anstieg der Windgeschwindigkeit an beiden Stationen auf (Abb. 34). Auch die Gefühlte Temperatur in Echterdingen sinkt kurzfristig ab (Abb. 33).

Die Dampfdruckkurven der beiden Messreihen zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf (Abb. 32). Über den 2. Juli bis zum Mittag des 3. Juli nimmt die Luftfeuchte im Stuttgarter Raum zu, vor allem in der Nacht wurden hohe Werte von bis zu 14.8 hPa (Echterdingen) gemessen. Am späten Vormittag bricht die Kurve ab und sinkt auf ca. 9 hPa ab. Erst in der darauf folgenden Nacht beginnt der Dampfdruck wieder zu steigen. Am 5. Juli um 0 Uhr erreicht er sein Maximum, was mit der hohen Bewölkung (7 Achtel), die seit dem Vormittag des 4. Juli herrscht, zusammenliegen kann. Die Wolkenbedeckung war in den Abend- und Nachtstunden generell geringer als tagsüber.

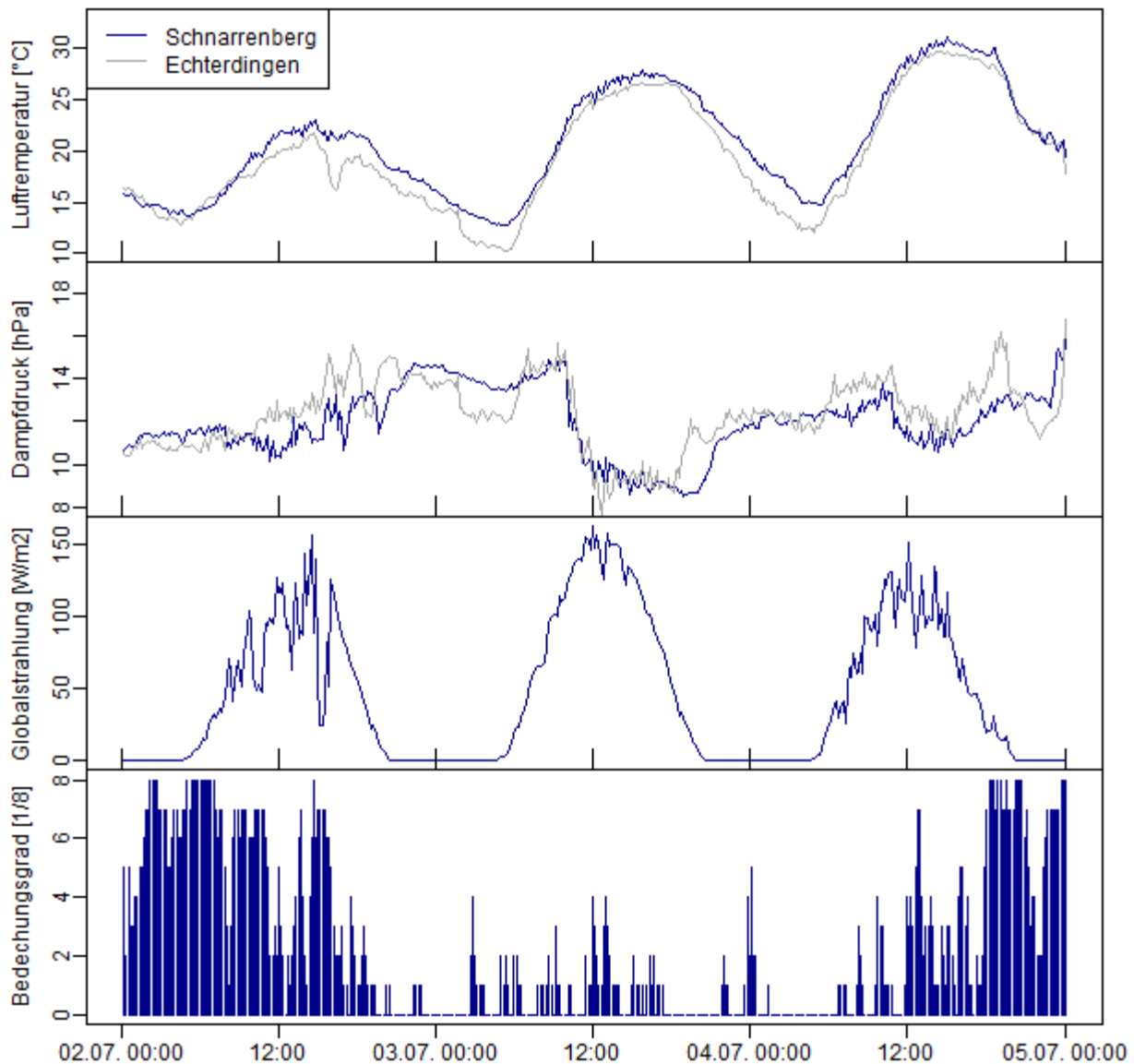


Abbildung 32: Lufttemperatur, Dampfdruck, Globalstrahlung und Bedeckungsgrad der DWD Messstationen während der Schönwetterperiode von 02.07. bis 04.07.2014 (10min-Mittelwerte, MEZ). Globalstrahlung und Bedeckungsgrad als 10min-Mittelwerte nur von Schnarrenberg vorhanden.

Der Verlauf der Gefühlten Temperatur (GT) über die vier Tage der Schönwetterperiode zeigt einen ähnlichen Anstieg wie die Lufttemperaturkurve (Abb. 33). Die Tagesamplituden der Gefühlten Temperatur sind jedoch höher, die Tag-Nacht-Differenzen damit größer. Am 2. Juli wurde in Echterdingen ein Tagesmaximum von 24.8 °C, am 3. Juli 28.2 °C und am 4. Juli 31.2 °C erreicht. Die Werte auf dem Schnarrenberg liegen tagsüber nur knapp über denen von Echterdingen. In der Nacht ist der Unterschied jedoch deutlicher. Am Flughafen in Echterdingen kann sich die Umgebung der Station stärker abkühlen und erreicht dadurch geringere Werte mit einem Minimum von 5.8 °C in der Nacht vom 2. auf den 3. Juli. Am 2. Juli um 20 Uhr bilden beide Kurven einen Knick und trennen sich, in Echterdingen kühlt es noch stärker ab, am Schnarrenberg verlangsamt sich die Abkühlung stark und verläuft auch über Nacht deutlich geringer. Die maximale Differenz der beiden Kurven in der Nacht beträgt 2.3 K (Minimum in Echterdingen 5.8 °C, auf dem Schnarrenberg 8.1 °C). Erst ab 7 Uhr am Morgen des 3. Juli verlaufen die Kurven wieder nah beieinander.

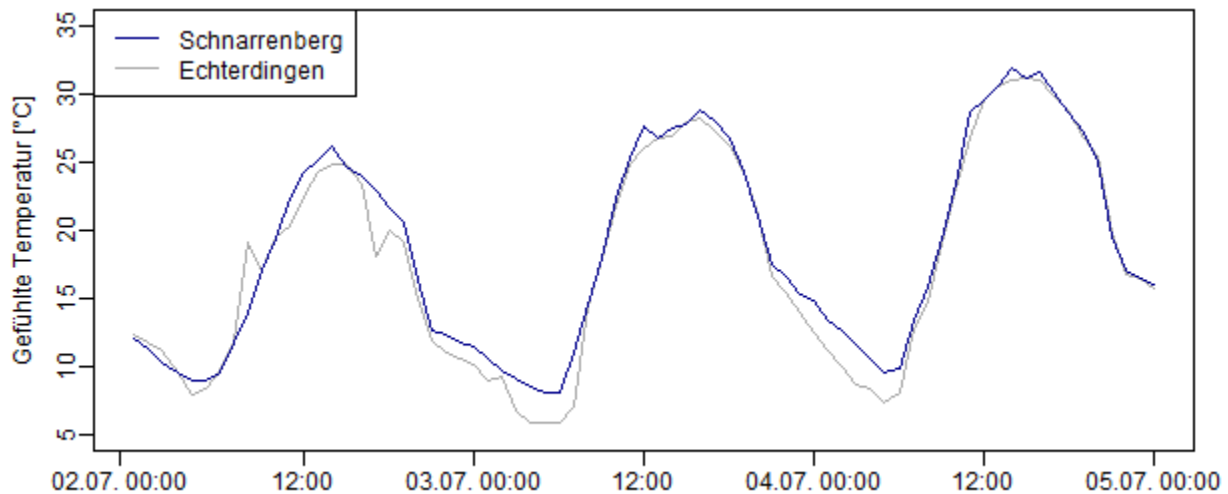


Abbildung 33: Gefühlte Temperatur während der Schönwetterperiode 02.07–04.07.2014, berechnet für die DWD-Stationen Stuttgart-Schnarrenberg und Stuttgart-Echterdingen.

Dasselbe Phänomen ist am Abend des 3. Juli zu beobachten. Die am Nachmittag fast identisch laufenden Kurven trennen sich ca. um 22 Uhr, während in Echterdingen die Gefühlte Temperatur weiter auf 7.3 °C sinkt, ist die Abkühlung am Schnarrenberg geringer und erreicht als Minimum 9.8 °C. Ab 8 Uhr morgens laufen die Kurven wieder näher beieinander.

Die Windverhältnisse in Stuttgart waren während der Schönwetterperiode recht gleichmäßig verteilt (Abb. 34). An der Station Schnarrenberg wurden fast durchgehend höhere Windgeschwindigkeiten gemessen als am Flughafen in Echterdingen. Die mittlere Windgeschwindigkeit liegt bei knapp 2 m/s auf dem Schnarrenberg und bei ca. 1.2 m/s in Echterdingen. Die Windrichtung dreht an beiden Stationen von nord-west (02.07.) über Nord und Ost kurzfristig nach süd-west, pendelt sich dann aber bei süd-ost ein. Diese Richtung bleibt auf dem Schnarrenberg vom Mittag des 2. Juli bis zum Nachmittag des 4. Juli nahezu konstant (ca. 150°, süd-süd-ost). In Echterdingen ist die Windrichtung etwas differenzierter während der Tage, die Hauptströmung kommt aber ebenfalls aus süd-ost. Ausnahme ist die zweite Nachthälfte des 4. Juli, wo eine Nord-West-Strömung gemessen wurde. Ab Mittag dieses Tages dreht die Windrichtung nach Osten und springt abends sowohl in Echterdingen als auch auf dem Schnarrenberg nach nord-west.

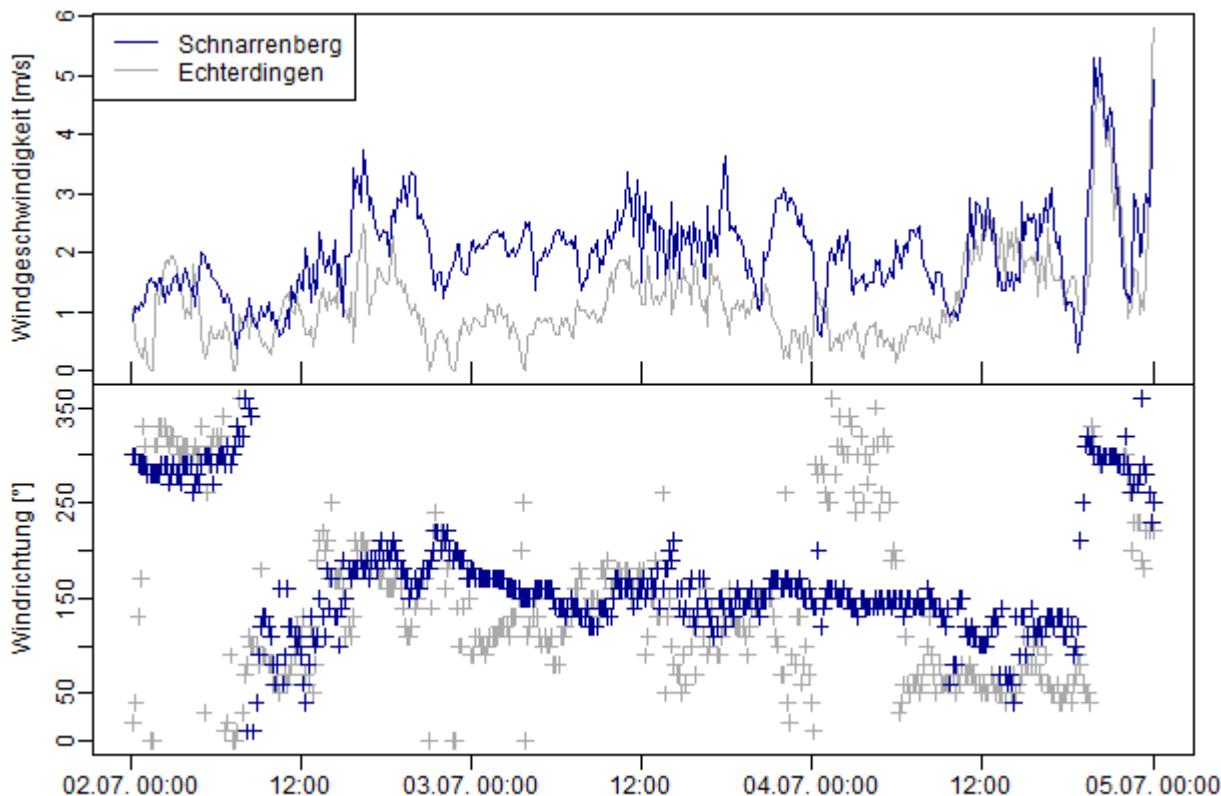


Abbildung 34: Windgeschwindigkeit in 1.1 m über dem Boden und Windrichtung (gemessen in 12 m auf dem Schnarrenberg und 10 m in Echterdingen).

Die drei temporären Messstationen, die vom DWD aufgestellt und betrieben wurden, zeigen ebenfalls gut die Entwicklung des Wetters innerhalb der 3 Tage (Abb. 35). Die Lufttemperaturkurven ähneln denen der langjährigen Stationen sehr. Die höchsten Werte weist dabei fast durchgehend die Station T1 am Diakonissenplatz auf. Die Kurve der Station T2 in der Gänsheide verläuft vormittags fast analog zur Kurve von T1, nachmittags weist sie zum Teil etwas geringere Werte auf. In den ersten beiden Nächten liegt die Lufttemperatur von T2 erkennbar unter der von T1. Die Lufttemperaturwerte der Station T3 am Dornhaldenfriedhof sind durchweg niedriger als die der beiden anderen temporären Stationen. Diese Station liegt 130 m höher als T1 und 55 m höher als T2 in einem teils bewaldeten, teils offenen Gelände ohne Bebauung (siehe Kapitel 4.4). Am Nachmittag des 2. Juli kann ein kurzfristiger Einbruch der Lufttemperaturwerte beobachtet werden, welcher gleichzeitig mit einem Anstieg des Dampfdruckes und der Windgeschwindigkeit einhergeht. Die Dampfdruckkurven der drei Stationen verlaufen annähernd gleich. Die Windgeschwindigkeitskurven zeigen ein etwas differenzierteres Bild. Innerhalb dieser drei Tage weist die Station T3 meistens die höchsten Werte an. Vor allem am 3. Juli ist dies deutlicher erkennbar. Die Station wird nicht von Gebäuden abgeschirmt und kann frei angeströmt werden. Am Abend des 4. Juli steigt die Windgeschwindigkeit der Station T1 und Station T2 kurzfristig deutlich an. In der folgenden Nacht zeigen dann alle drei Stationen ein Maximum mit ca. 2 m/s.

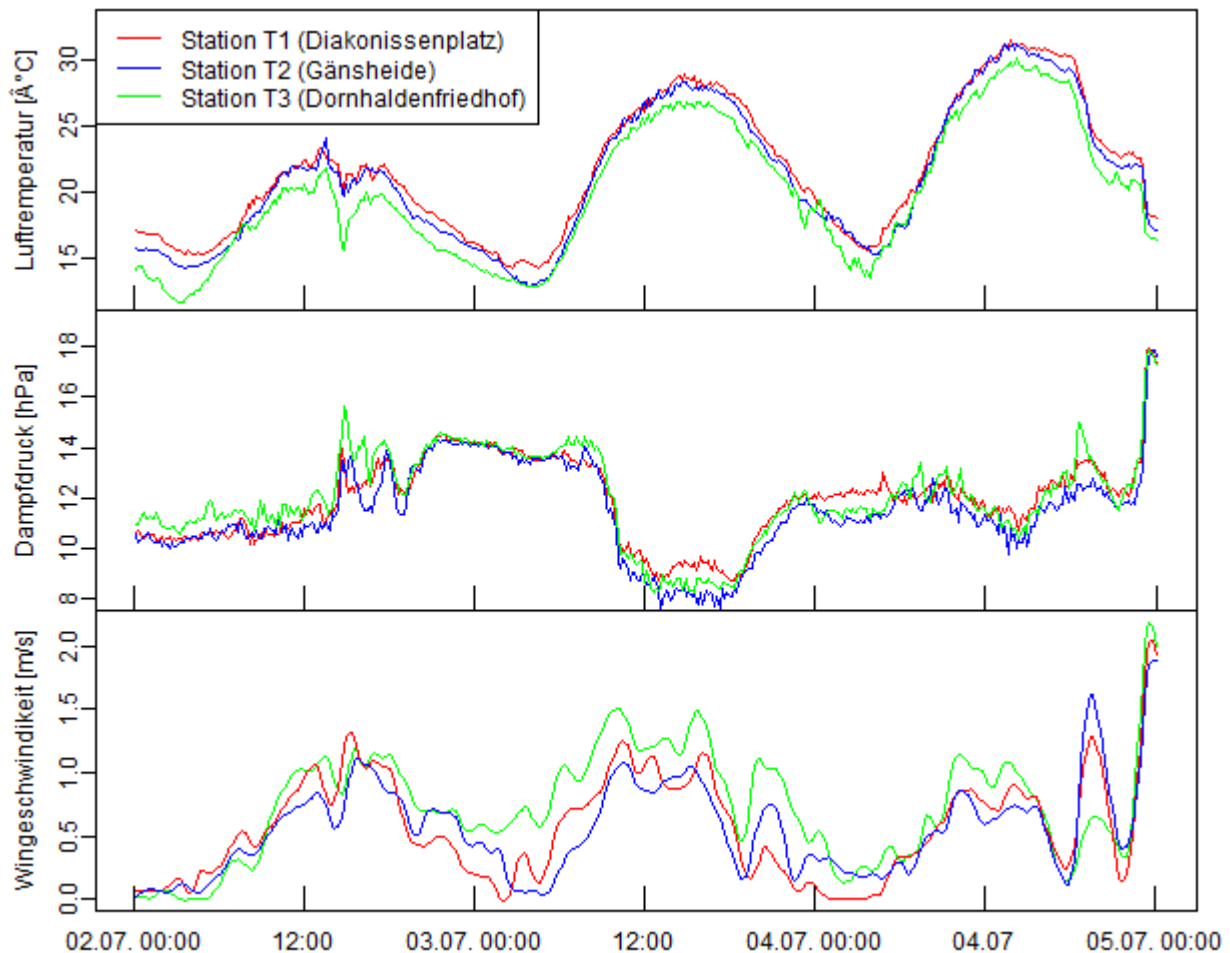


Abbildung 35: Lufttemperatur, Dampfdruck und Windgeschwindigkeit der drei temporären Messstationen während der Schönwetterperiode von 02.07. bis 04.07.2014 (MEZ).

Strecke Nord(lang)

Die Strecke Nord(lang) wurde am 03. Juli 2014 morgens vor Sonnenaufgang, mittags und abends nach Sonnenuntergang mit der Mobilien Messeinheit abgefahren. Die gemessenen Werte der Lufttemperatur und der Luftfeuchte zeigen einen Unterschied zwischen den Randgebieten und der Innenstadt. Der Höhenunterschied innerhalb der Strecke zwischen dem Beginn an der Lenzhalde und dem Schlossgarten in der Innenstadt trägt einen Teil zum Lufttemperaturunterschied bei. Doch vor allem in nächtlichen Stunden zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang ist die Differenz der Lufttemperaturwerte höher als durch den Höhenunterschied zu erklären ist. Hier tritt der Effekt der städtischen Wärmeinsel auf.

Die morgendliche Profildfahrt zeigt am Streckenanfang eine relativ konstante Lufttemperatur bei ca. 13.5 °C (Abb. 36). Nach dem zweiten Streckenpunkt (Marker 1) steigt die Kurve rasch auf ca. 15 °C an, verläuft dann wieder konstant bis zum Hauptbahnhof. Dort steigt die Lufttemperatur nochmals um knapp 0.8 °C, womit das Maximum dieser Messung erreicht ist. Die Abnahme danach zwischen Marker 5 und Marker 6 ist durch die Abkühlung im Schlossgarten bedingt. Bei Marker 7 an der Kreuzung Charlottenstraße und Alexanderstraße bricht die Kurve ein und sinkt auf ca. 14 °C. Nach einem leichten Anstieg sinkt die Kurve im letzten Streckenabschnitt weiter auf das absolute Minimum dieser Messung (13.3 °C). Grund dafür ist die adiabatische Lufttem-

peraturabnahme mit der Höhe und die aufgelockerte Bebauung. Die maximale Differenz dieser Profilmessung beträgt 2.5 K, welche zum Teil durch den Höhenunterschied innerhalb der Strecke und durch die unterschiedlich starke Abkühlung zwischen Innenstadt und Randgebiet bedingt ist (Stachniuk, 2014). Bei einem trockenadiabatischen Lufttemperaturgradient von 1 K/100 m und einem Höhenunterschied von maximal 140 m lässt sich also eine höhenabhängige Temperaturdifferenz von 1.4 K erklären. Die verbleibenden 1.1 K treten durch andere Effekte wie die städtische Wärmeinsel auf.

Das relative Minimum an der Kreuzung Charlottenstraße und Alexanderstraße kann durch mehrere Faktoren bedingt sein. Es besteht ein Wechsel der Umgebungsbedingungen, da dort das Messfahrzeug aus der Innenstadt mit einem hohen Versiegelungsgrad in ein weniger besiedeltes Randgebiet gelangt. Die Luft kann freier strömen, die Vegetation des Parks in der Nähe kühlt die Umgebungsluft zusätzlich ab. Ein kleines Tal mündet von SSO in das Gebiet, durch welches eine kältere Luftmasse einströmen kann und das Absinken der Lufttemperaturkurve erklärt (Feigenwinter, 2013).

Die Kurve der relativen Feuchte ist invers zur Lufttemperatur. Dies kommt aus der Temperaturabhängigkeit der relativen Feuchte, die sich aus dem Verhältnis des aktuellen Dampfdruckes e zum Sättigungsdampfdruck E zusammensetzt (Feigenwinter, 2013):

$$RF[\%] = \frac{e}{E} \cdot 100$$

Der Sättigungsdampfdruck exponentiell mit der Lufttemperatur an, da wärmere Luft mehr Wasserdampf aufnehmen kann, bevor er kondensiert. Dies bedeutet, dass bei dem gleichen Dampfdruck der Wert der relativen Feuchte in kalter Luft höher ist als in warmer Luft. Daher eignet sich der Dampfdruck, der aus dem gemessenen Wert der relativen Feuchte berechnet werden kann, besser zur Betrachtung der Luftfeuchte (Feigenwinter, 2013).

Der Dampfdruck (Abb. 36 in dunkelblau) steigt auf der Fahrstrecke zunächst leicht an und erreicht in der Stadtmitte sein Maximum. Eine urbane Feuchteinsel hat sich ausgebildet. Da die Luftfeuchte auch Auswirkungen auf das thermische Empfinden der Bewohner hat und in die Berechnung der thermischen Indizes eingeht, erhöht sie die Gefahr der Wärmebelastung in den innerstädtischen Bereichen. Bei der Weiterfahrt in die Gänsheide nimmt der Dampfdruck mit zunehmender Geländehöhe wieder ab.

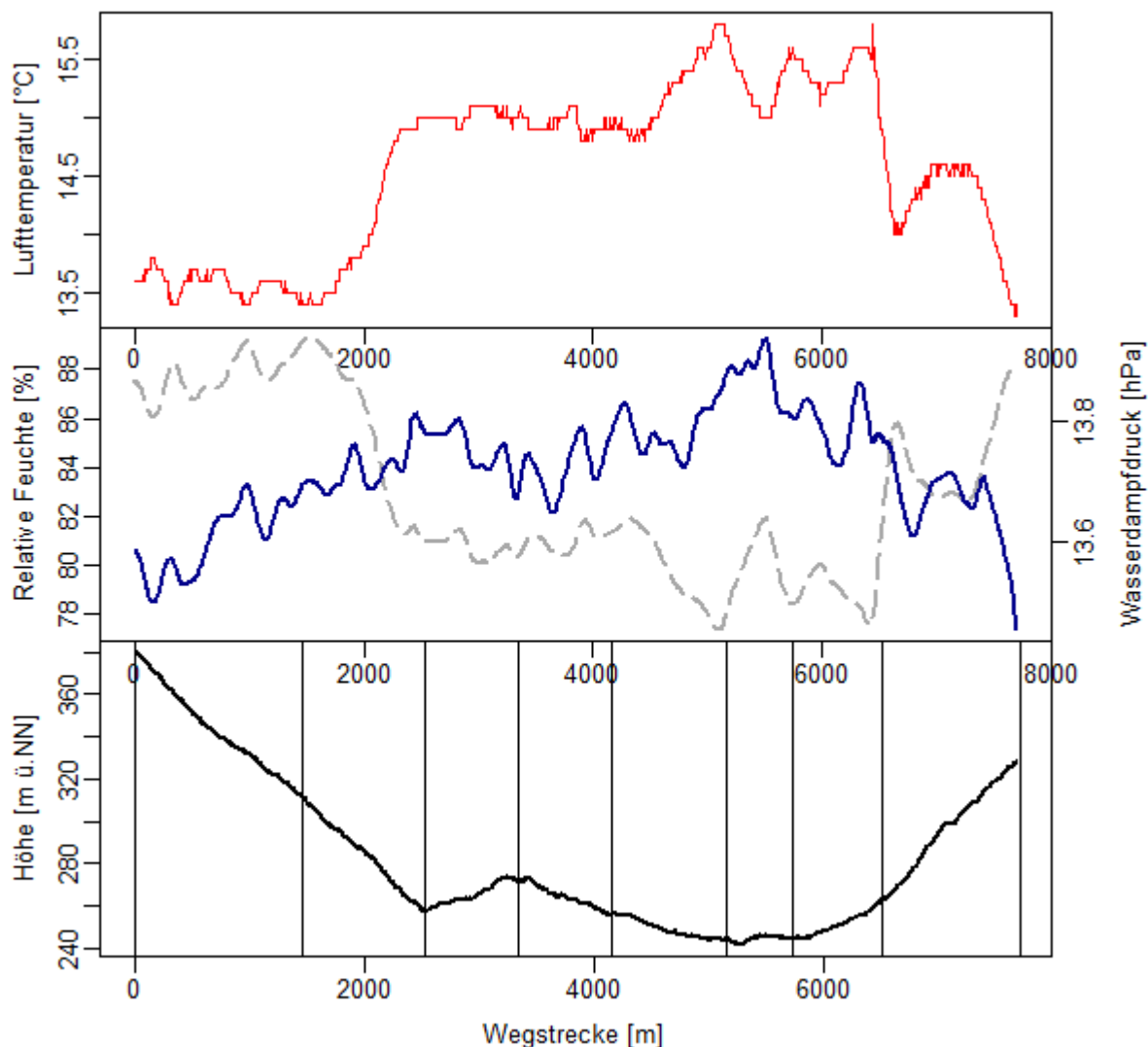


Abbildung 36: Profilfahrt der Strecke Nord(lang) am 03.07.2014 morgens um 04:20-04:48 Uhr (MEZ), relative Feuchte in grau-gestrichelt, Wasserdampfpartialdruck in dunkelblau. Im Höhenprofil sind die gesetzten Marker als vertikale Linie eingezeichnet.

Die Messfahrt zur Mittagszeit (Abb. 37) zeigt ebenfalls einen ausgeprägten Verlauf der Lufttemperatur, die maximale Differenz beträgt 2.6 K (27.2 °C–29.8 °C). Vom Beginn der Strecke bis zur Charlottenstraße beobachtet man einen steigenden Trend mit kleinräumigen Fluktuationen. Auch hier wird das Maximum mit 29.8 °C bei Marker 5 in der Nähe des Hauptbahnhofs erreicht. Danach ist zunächst die Abkühlung im Schlossgarten zu erkennen und nach Marker 7 die Abkühlung an der Straßenecke Charlottenstraße und Alexanderstraße. Der Dampfdruck zeigt einige Fluktuationen ohne einen klaren räumlichen Trend zu entwickeln (Stachniuk, 2014).

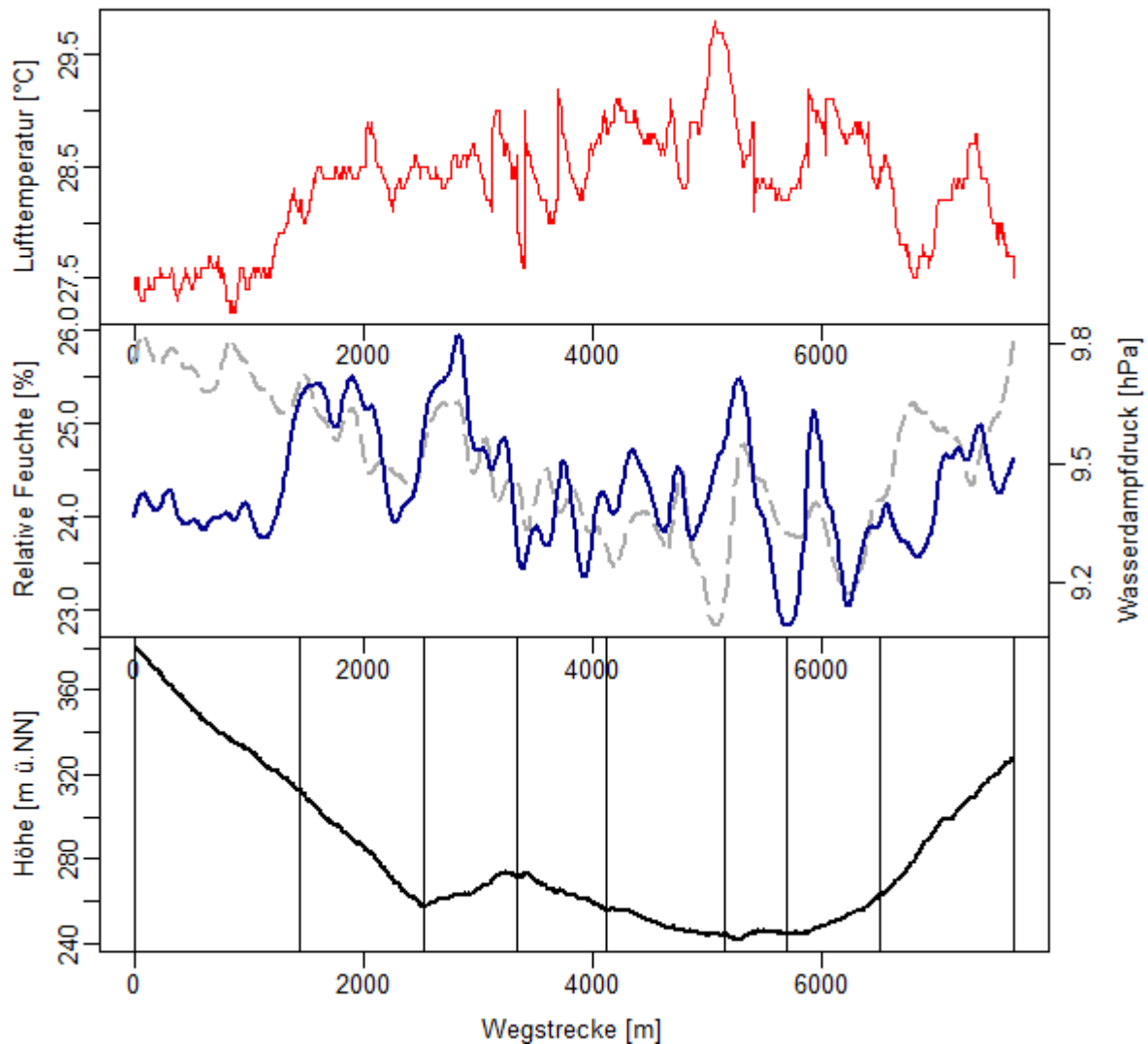


Abbildung 37: Profildaten der Strecke Nord(lang) am 03.07.2014 mittags um 16:00-16:35 Uhr (MEZ), relative Feuchte in grau-gestrichelt, Wasserdampfdruck in dunkelblau. Im Höhenprofil sind die gesetzten Marker als vertikale Linie eingezeichnet.

Die Messung in der ersten Nachthälfte zeigt einen etwas schwächer ausgeprägten Verlauf der Lufttemperatur (Abb. 38). Die maximale Differenz beträgt 2,3 K. Es treten zwei lokale Minima auf, die stark von den restlichen Werten abweichen. Zu Beginn verweilt die Kurve bei ungefähr 23,5 °C. Bei Marker 1 (zweiter Streckenpunkt) sinkt die Lufttemperatur kurzfristig auf 22,6 °C ab. Die Strecke führt dort unter einer Eisenbahnbrücke hindurch, die als Damm aufgebaut ist. Die geringe Lufttemperatur weist auf einen Kältestau am Bahndamm hin. Das Maximum wird wiederum am Hauptbahnhof kurz vor Marker 5 erreicht. Bei Marker 7 an der Ecke Charlotten- und Alexanderstraße wird mit ebenfalls 22,6 °C das zweite Minimum erreicht. Der Dampfdruck zeigt einen konstanten bis leicht steigenden Trend, der bis zu Marker 5 anhält. Danach sinkt die Kurve wieder. Der Dampfdruck (dunkelblau) zeigt einen durchgehend steigenden Trend an, der sein Maximum kurz nach Marker 5 bei der Ecke Charlotten- und Alexanderstraße erreicht. Das könnte bedeuten, dass die Kaltluft, die dort die Stadt erreicht auch feuchter ist als die vorherrschenden Luftmassen.

Da der Effekt der städtischen Wärmeinsel normalerweise in der ersten Nachthälfte am stärksten auftritt, erwartet man dort auch die größten Lufttemperaturdifferenzen. Die, im Vergleich zur Morgens- und Mittagsmessung, schwache Ausprägung des Lufttemperaturverlaufes könnte daran liegen, dass der Sonnenuntergang erst um 20:30 MEZ war.

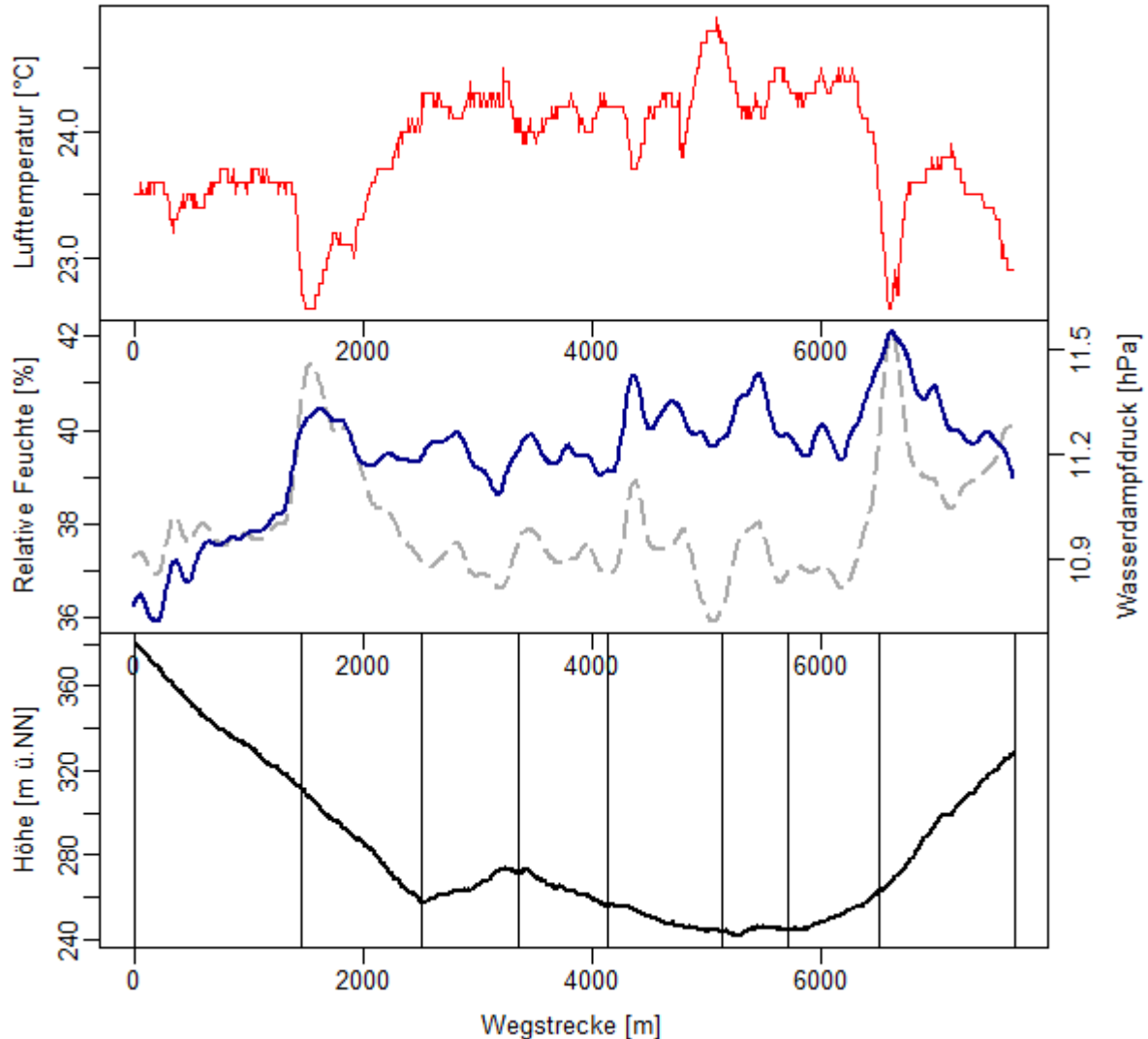


Abbildung 38: Profildaten der Strecke Nord(lang) am 03.07.2014 abends um 21:06-21:39 Uhr (MEZ), relative Feuchte in grau-gestrichelt, Wasserdampfdruck in dunkelblau. Im Höhenprofil sind die gesetzten Marker als vertikale Linie eingezeichnet.

Strecke Süd

Die Strecke Süd ist ein Rundweg und länger als Strecke Nord(lang). Außerdem weist sie einen größeren Höhenunterscheid auf. Sie wurde ebenfalls am 03.07.2014 dreimal gemessen. Die Fahrt vor Sonnenaufgang erfolgte anschließend an die Messung der Strecke Nord(lang).

Die morgendliche Profildaten zeigt einen sehr ausgeprägten Lufttemperaturverlauf, die maximale Differenz beträgt 3.3 K (Abb. 39). Das Minimum wird mit 12.3 °C zwischen Marker 1 und 2 erreicht. Dort führt die Karl-Kloß-Straße durch ein Waldstück hinunter nach Heslach. Die Vegetation an beiden Straßenrändern ist sehr hoch und dicht, dadurch heizt sich die Luft dort tagsüber weniger stark auf als in offenem Gelände. Danach steigt die Kurve stark an und erreicht kurz

nach Marker 7 am Charlottenplatz das Maximum mit 15.6 °C. Wie auch bei Strecke Nord(lang) liegt hier das Maximum in der Stadtmitte. Ein lokales Minimum wird am Marker 8 (Dobelstraße) erreicht. Die Kurve sinkt weiter während die Höhe zunimmt. Kurz vor Marker 11 (Ortsschild Degerloch) gelangt man an den höchsten Punkt der Strecke (470 m). Ab dort steigt die Lufttemperatur wieder leicht an bis zum Endpunkt der Strecke. Der Dampfdruck zeigt in der Innenstadt ebenfalls hohe Werte an, eine urbane Feuchteinsel hat sich ausgebildet. Das Maximum tritt schon kurz nach Marker 2 auf, wo der Weg in die Siedlung hineinführt. Die geringsten Dampfdruckwerte treten zwischen Marker 3 und Marker 4 auf. Gegen Ende der Strecke verläuft die Kurve ähnlich wie die der Lufttemperatur. Am höchsten Punkt des Weges weist die Dampfdruckkurve ihr Minimum auf.

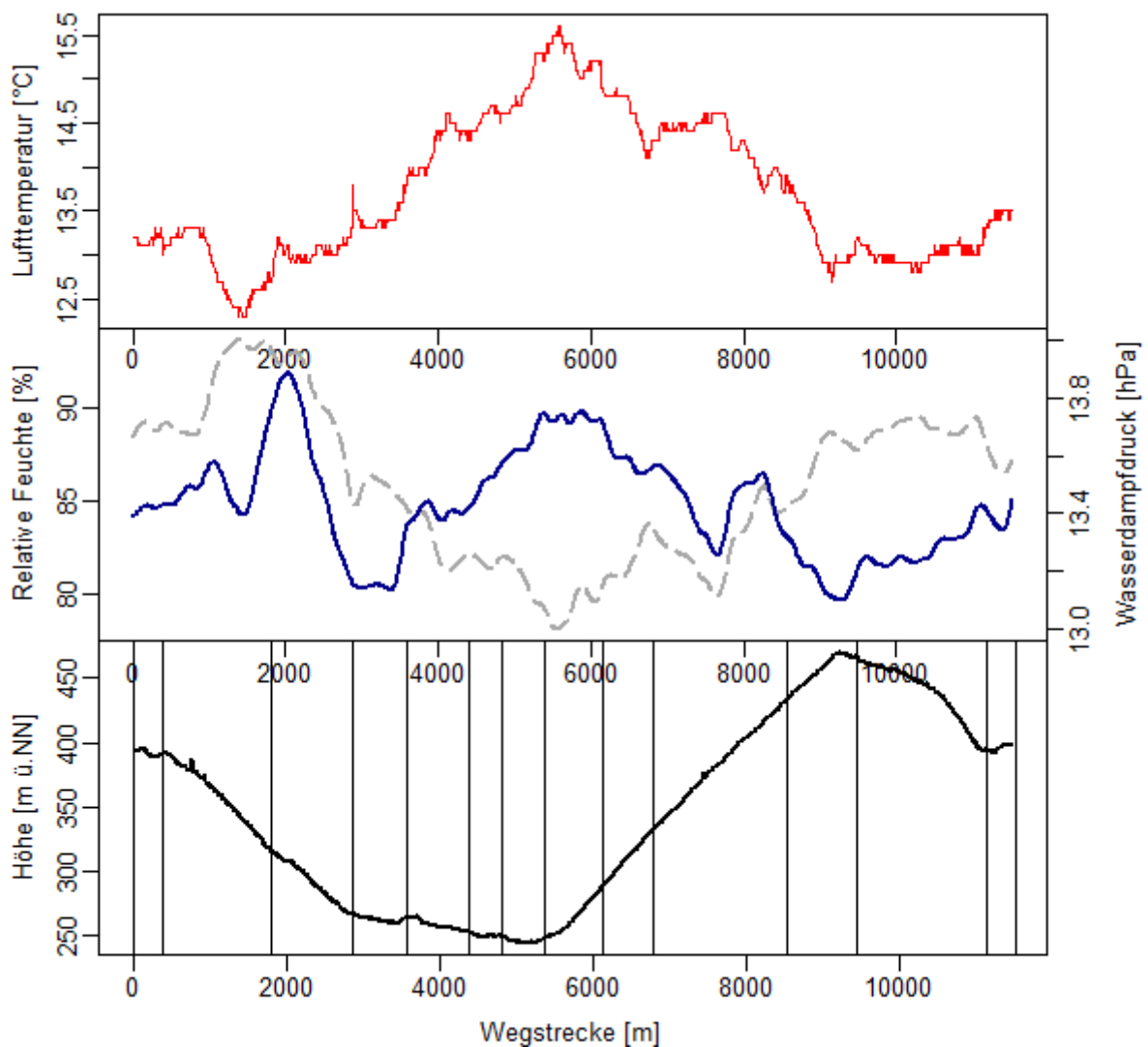


Abbildung 39: Profilfahrt der Strecke Süd am 03.07.2014 morgens um 05:03-05:44 Uhr (MEZ), relative Feuchte in grau-gestrichelt, Wasserdampfpartialdruck in dunkelblau. Im Höhenprofil sind die gesetzten Marker als vertikale Linie eingezeichnet.

Die Profilmessung am Mittag des 03.07.2014 zeigt die größte Differenz der Lufttemperaturwerte während der Strecke auf (Abb. 40). Die Werte reichen von 24.6 °C bis 29.7 °C, die Differenz beträgt 5.1 K. Die niedrigsten Lufttemperaturwerte herrschten von Beginn der Messung bis zu einem deutlichen Minimum bei Marker 2. Danach steigt die Kurve rasch an und hält im gesamten Innenstadtbereich (Böblingerstraße bis Ortsschild Degerloch) ein hohes Niveau. Invers zur Höhe der Strecke sinkt die Lufttemperatur im zweiten Teil der Strecke. Der Dampfdruck zeigt zwei markante Maxima, während die durchschnittlichen Werte in etwa konstant bleiben. Das Maximum bei Marker 2 tritt in einem kurzen Tunnel auf, der die hohe Feuchtigkeit und geringe Lufttemperatur erklärt. Das Maximum am Ende der Strecke tritt dort auf, wo der Weg in den Wald Richtung Dornhaldenfriedhof abbiegt.

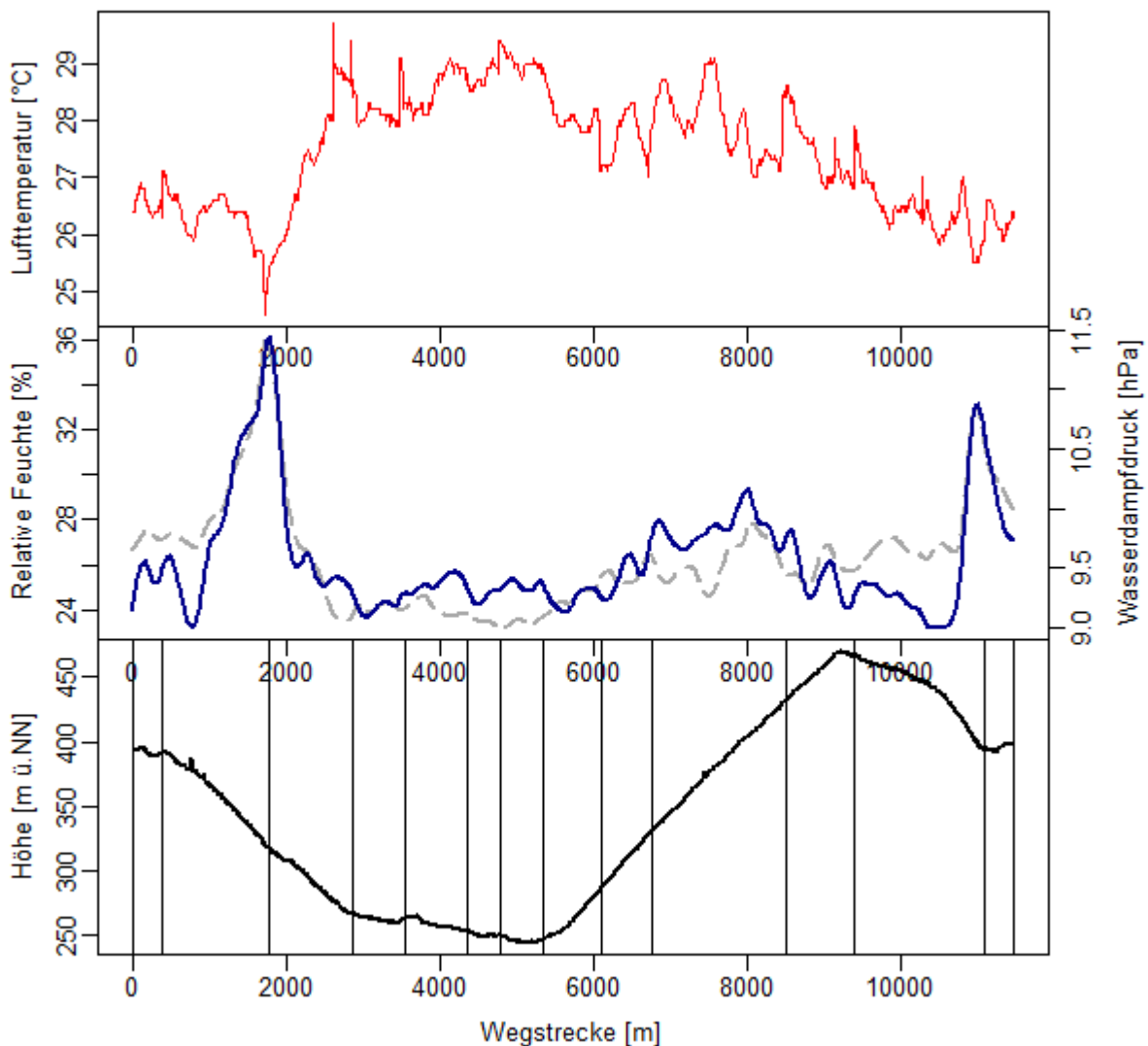


Abbildung 40: Profilmessung der Strecke Süd am 03.07.2014 mittags um 14:52-15:34 Uhr (MEZ), relative Feuchte in gestrichelt, Wasserdampfdruck in dunkelblau. Im Höhenprofil sind die gesetzten Marker als vertikale Linie eingezeichnet.

Die Profilmessung nach Sonnenuntergang zeigt mit einem Lufttemperaturunterschied zwischen Randgebiet und Innenstadt von 5.2 K am deutlichsten den Effekt der städtischen Wärmeinsel (Abb. 41). Bei den Markern 1, 2 und 12 (1 und 12 sind deckungsgleich) zeigen sich die Minima der Profilmessung, die bei 18.8 °C, 18.6 °C und 18.2 °C liegen. Dass Marker 1 und 12 eine un-

terschiedliche Lufttemperatur aufweisen, kann an dem Zeitunterschied liegen, der zwischen den beiden Messungen vergangen ist (ca. 45 min). Das Minimum bei Marker 2 liegt an dem Tunnel dort und fällt wieder mit einem Maximum der Luftfeuchte zusammen. Die Lufttemperatur steigt zur Stadt hin an und erreicht wie üblich in der Innenstadt (Marker 7) das Maximum mit 23.3 °C. Danach sinkt die Kurve mit einigen Fluktuationen wieder. Das lokale Minimum vor Marker 10 lässt sich durch den bebauungsfreien Streckenabschnitt dort erklären, wo nachts eine raschere Abkühlung erfolgt als zwischen Gebäuden. Dort wiederum zeigt der Dampfdruck ein lokales Maximum auf. Eine urbane Feuchteinsel hat sich zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausgebildet.

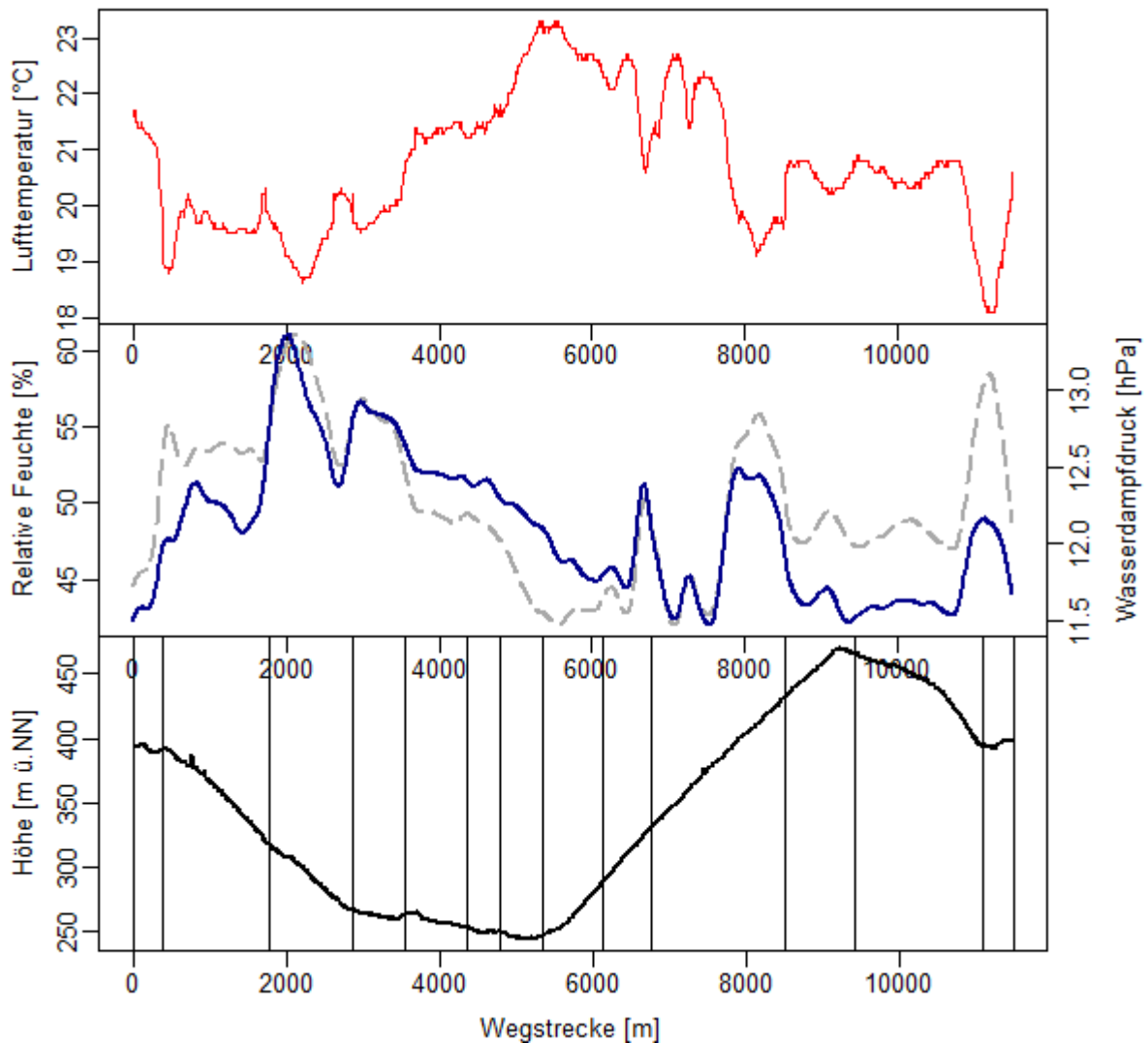


Abbildung 41: Profilfahrt der Strecke Süd am 03.07.2014 abends um 21:58-22:49 Uhr (MEZ), relative Feuchte in graugestrichelt, Wasserdampfpartialdruck in dunkelblau. Im Höhenprofil sind die gesetzten Marker als vertikale Linie eingezeichnet.

5.4 MUKLIMO_3 Ergebnisse

5.4.1 Quadereckpunktsimulationen

Die in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Quadereckpunktsimulationen wurden für die beiden Hauptwindrichtungen WSW und ONO und einem dem 16. Juli entsprechenden Sonnenstand durchgeführt (vgl. Früh et al., 2011a, b). Simuliert wurde jeweils ein kompletter Tagesgang mit Archivierung stündlicher Ergebnisse. Zur Bestimmung der human-biometeorologischen Wärmebelastung wurde aus den MUKLIMO_3 Ergebnissen anschließend mit dem Klima-Michel-Modell die Gefühlte Temperatur nach Staiger et al. (2012) berechnet.

Die Abbildungen 42 und 43 zeigen beispielhaft die bodennahen Felder der Lufttemperatur und des horizontalen Windes um 12 und 22 Uhr MEZ für die Quadereckpunktsimulation eines heißen, trockenen und windschwachen Tages bei ost-nordöstlicher Anströmungsrichtung (Simulation 100, ONO). Zur besseren Erkennbarkeit der Windvektoren beschränken sich die Abbildungen auf ein 10 km x 10 km großes Ausschnittgebiet um den Stuttgarter Kessel. Um 12 Uhr MEZ, das entspricht etwa dem Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes sind die Tageshöchsttemperaturen noch nicht erreicht. Der Wind ist allgemein sehr schwach und weht auf den Kuppen und auf größeren Freiflächen aus dem nordöstlichen Richtungsquadrant. Im Stuttgarter Talkessel und anderen niedrigen Lagen mit dichter Bebauung wie dem Neckartal oder dem Stadtteil Feuerbach ist eine deutliche Überwärmung zu erkennen. Aufgrund der sehr geringen Windgeschwindigkeitsbereiche ist die Windrichtung hier sehr variabel. Die bewaldeten Bergkuppen um den Stuttgarter Kessel sind aufgrund der Schattenwirkung der Bäume und wegen der Höhenlage mehr als 5 K kühler als die heißesten Stadtquartiere.

Um 22 Uhr MEZ haben die durch Orographie und Landnutzung bedingten räumlichen Unterschiede in der abendlichen Abkühlung der bodennahen Luft zu einer Verstärkung der urbanen Wärmeinselintensität geführt. Gleichzeitig setzten bereits Hangabwinde und Talabwinde ein, die örtlich durch urbane Wärmeinselzirkulationen verstärkt sind (Abb. 43). Im zentralen Bereich des Stuttgarter Talkessels ist hierbei die kühlende Wirkung des südwestlichen Kaltluftabflusses aus dem Nesenbachtal und dem Tal der Heidenklinge sehr gut zu erkennen. Im nordöstlichen Bereich des Stuttgarter Kessels wehen zu dieser Zeit hingegen noch nordöstliche Winde, die durch die regionale Anströmrichtung und die Ausgleichsströmung des überwärmten Stuttgarter Kessels sowie durch das Ausfächern der aus Nordwesten einströmenden Kaltluft im Bereich des Pragsattels zu erklären sind. Nach Mitternacht setzen sich auch im nordöstlichen Teil des Stuttgarter Talkessels die südwestlichen Kaltluftabflüsse durch und erreichen das Neckartal. Oberhalb der in den Stuttgarter Kessel eingeströmten Kaltluft bildet sich bei Höhenlagen um 280-310 m eine warme Hangzone. Besonders bemerkenswert sind auch die sehr komplexen und sich im Verlauf der Nacht verändernden Strömungsregime im Neckartal bzw. im Neckarbecken, die durch das Zusammenwirken von Kaltluftabflüssen der umgebenden Hänge und Seitentäler entstehen. Die nur gering geneigte Talsohle und die sich talabwärts verengende und Richtung wechselnde Form des Neckartals, führen hier sogar zeitweise zu talaufwärts gerichteter Strömung und somit ungünstigen Entlüftungsverhältnissen im Neckarbecken.

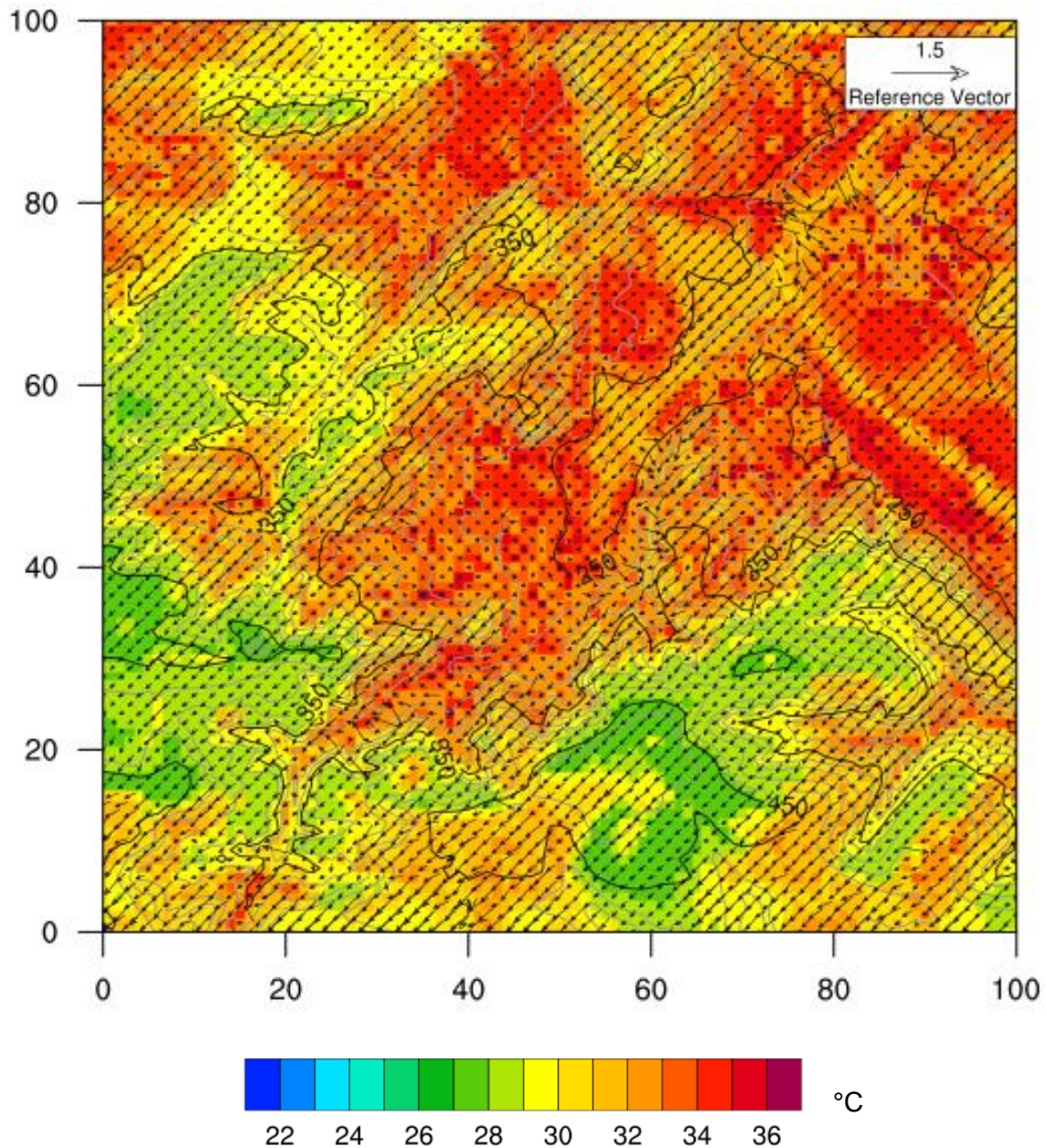


Abbildung 42: Bodennahe Lufttemperatur (°C) und Horizontalwindvektoren (m/s) um 12 Uhr MEZ (ca. Sonnenhöchststand) für ein 10 km x 10 km großes Ausschnittgebiet um den Stuttgarter Kessel bei Anströmung aus ONO für den Quadereckpunkt 100 (s. Tab. 5, S. 23). Die Windvektoren wurden zur besseren Lesbarkeit ausgedünnt. Zusätzlich eingezeichnet sind Isolinien der Geländehöhe im 20 m Abstand unter Hervorhebung der Höhen 250, 350 und 450 m ü. NN. Die Achsenwerte markieren die Entfernung in Hektometern bzw. die Gitterindizes im Ausschnittgebiet. Die Südwest-Ecke des Ausschnittgebiets hat die Gauß-Krüger Koordinaten 3508000 / 5400000 (RW / HW).

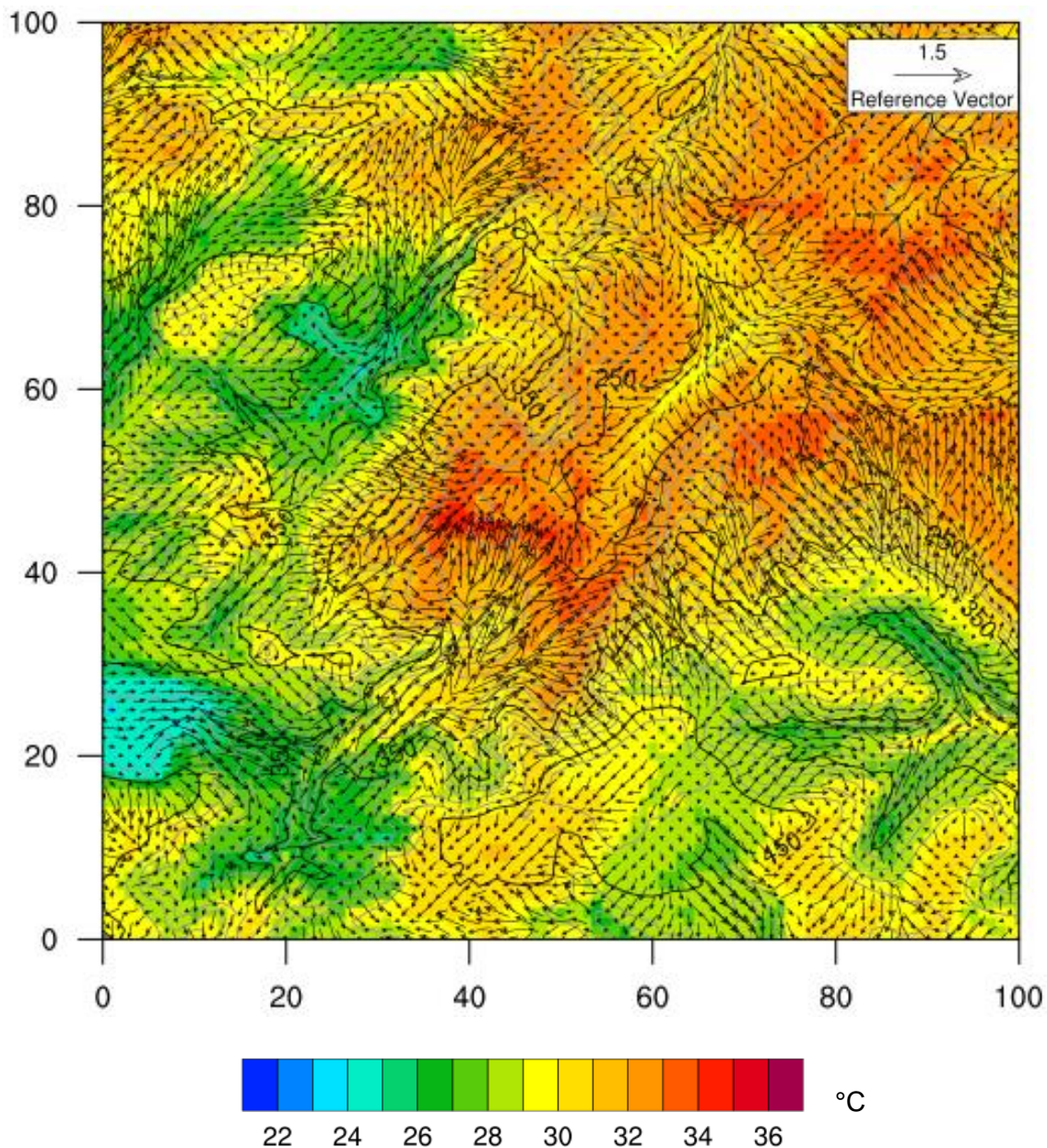
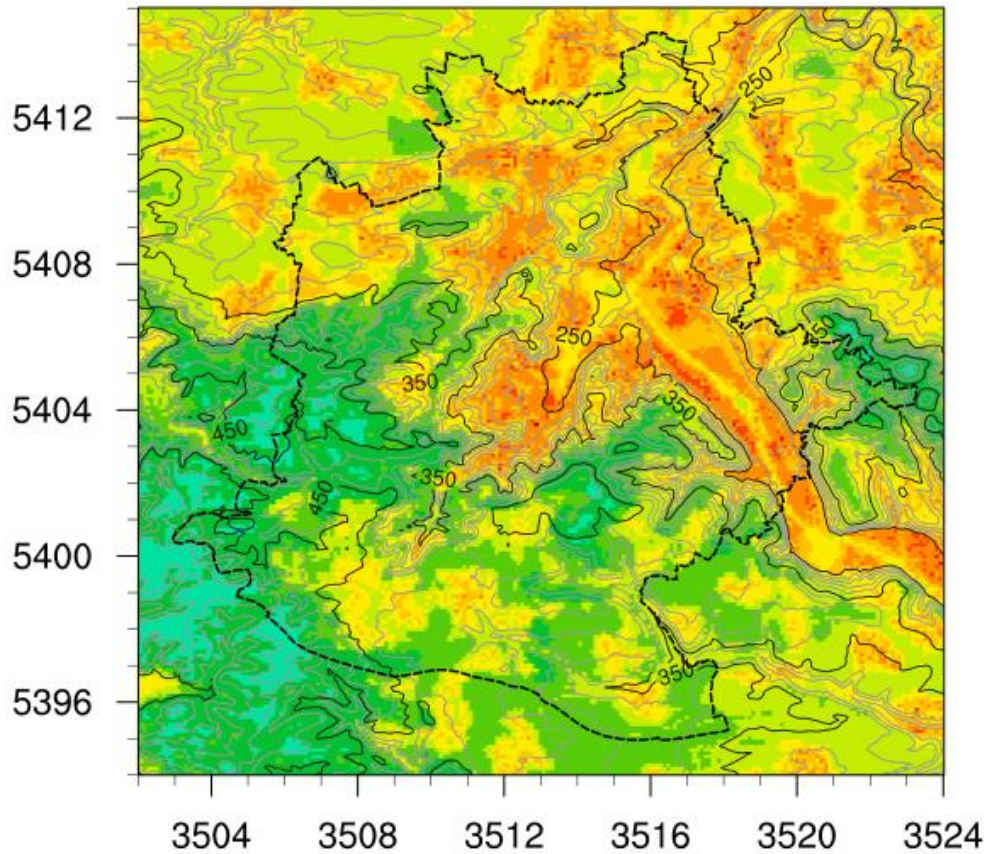
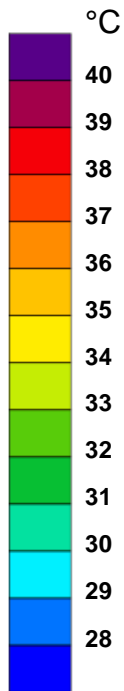


Abbildung 43: Wie Abbildung 42, aber für 22 Uhr MEZ (nach Sonnenuntergang).

Für das gesamte 22 km x 21 km große Auswertebereich zeigt Abbildung 44 die Tagesmaxima der bodennahen Lufttemperatur und der Gefühlten Temperatur aus der Simulation 100 mit ost-nordöstlicher Anströmung. Insbesondere aufgrund des Strahlungseinflusses, in Waldgebieten aber auch durch den Feuchteinfluss, zeigt die Gefühlte Temperatur tagsüber generell höhere Werte als die Lufttemperatur. Hohe Werte treten bei beiden Temperaturgrößen in Tallagen und in bebauten Gebieten auf. Die niedrigsten Werte treten jeweils im Wald in Kuppenlagen auf. Während jedoch bei der Lufttemperatur die höchsten Werte in den Tallagen mit höchster Bebauungsdichte (Landnutzungsklassen 61 „sehr dichte Bebauung, Ortskern“ und 6 „Industrie/ Gewerbe“) auftreten, werden bei der Gefühlten Temperatur die höchsten Werte für Tallagen mit mäßiger bis dichter Bebauung (Klassen 62 bis 64) sowie in Industrie- und Gewerbegebieten simuliert. Grund dafür ist, dass in sehr dichter Bebauung, der Schattenwurf der Gebäude die Gefühlte Temperatur reduziert (s. Tab. 4, S. 21).

a) Maximale Lufttemperatur



b) Maximale Gefühlte Temperatur

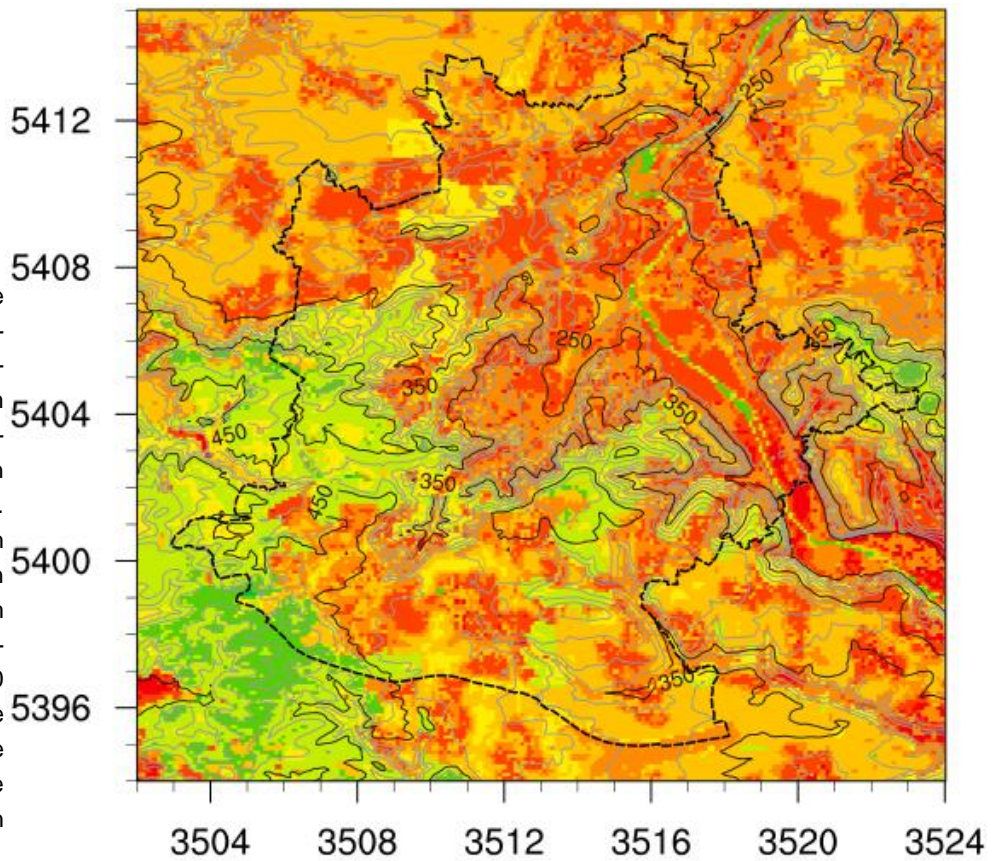


Abbildung 44: Bodennahe Tagesmaxima der Lufttemperatur (a) und der Gefühlten Temperatur (b) im Auswertebiet bei Anströmung aus ONO für den Quadereckpunkt 100 (s. Tab. 5, S. 23). Zusätzlich eingezeichnet sind Isolinien der Geländehöhe im 20 m Abstand unter Hervorhebung der Höhen 250, 350 und 450 m ü. NN und die Stadtgrenze in schwarz. Die Achsenwerte markieren die Gauß-Krüger Koordinaten des Auswertebiets.

5.4.2 Analyse und Projektion 30-jähriger Klimatologien

Unter Anwendung der in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Quadermethode als dynamisch-statistisches Downscaling Verfahren wurde die mittlere jährliche Anzahl an Tagen mit starker Wärmebelastung ($N_{GT_{max} \geq 32^{\circ}C}$) für die 30-jährigen Zeiträume 1971-2000 und 2031-2060 berechnet. Für die Auswertung und Nutzung dieser Stadtklimaprojektionen gelten prinzipiell die gleichen Regeln wie für regionale Klimaprojektionen (Linke et al., 2015). Insbesondere sollten aufgrund der Verfahrensgenauigkeit keine einzelnen Gitterpunktwerte interpretiert werden, sondern immer Mittelwerte oder andere statistische Maße über mehrere Gitterpunkte betrachtet werden.

Für den Zeitraum 1971-2000 wurden dazu die an der DWD Station Stuttgart-Echterdingen (373 m ü. NN) gemessenen Tageswerte der Lufttemperatur, der relativen Feuchte und des Windes als regionale Klimadaten verwendet. Die Güte der auf dem MUKLIMO_3 Modellgitter berechneten Anzahl an Wärmebelastungstagen kann durch Vergleich von Stationsauswertungen mit den Ergebnissen der nächstgelegenen simulierten Gitterpunktweiten (Mittelwert über 3 x 3 Gitterpunkte) abgeschätzt werden (Tab. 10). Da im Zeitraum 1971-2000 nur an der Station Echterdingen Auswertungen der Gefühlten Temperatur für alle Jahre vorliegen, wurden für die Jahre mit verfügbaren Daten an den Stationen Schnarrenberg (1986–1999) und Schwabenzentrum (1987-2000) die Anzahl Wärmebelastungstage relativ zur Station Echterdingen bestimmt und als Übertragungsfaktor zur Datenlückenschließung verwendet. Während an der Station Echterdingen (373 m ü. NN) die jährliche Anzahl an Tagen mit starker Wärmebelastung im Zeitraum 1971-2000 im Mittel bei 16,5 Tagen liegt, traten an der Station Schwabenzentrum (250 m ü. NN) aufgrund der geringeren Höhenlage und der dichten Bebauung in diesem Zeitraum mit 31,8 Tagen fast doppelt so viele Tage mit starker Wärmebelastung auf.

Die mit der Quadermethode unter Verwendung der Stationsdaten von Echterdingen flächenhaft für das Auswertgebiet berechnete Anzahl an Wärmebelastungstagen für 1971-2000 wies in einem ersten Ansatz deutlich zu niedrige Werte auf. In einem korrigierten Ansatz ergaben sich unter Anwendung einer linearen Skalierung (Bias-Korrektur, Kim et al., 2013) von +3,3 K für die Gefühlte Temperatur der Quadereckpunktsimulationen gut mit den Stationsdaten übereinstimmende Werte von $N_{GT_{max} \geq 32^{\circ}C}$ (siehe Tab. 10 und Abb. 45). Während die Modellabweichung für die Stationen Echterdingen (-2 %) und Schwabenzentrum (+4 %) sehr geringe Werte aufweist, ist sie für die Station Schnarrenberg (+27 %) deutlich höher, weil in der Umgebung dieser Station durch die Topographie bedingt eine deutlich stärkere Variabilität der Wärmebelastungstage auftritt.

Die Hauptursache für die Notwendigkeit der Bias-Korrektur besteht in der Höhenlage der Station Echterdingen und somit des nicht für das Stadtgebiet Stuttgarts repräsentativen Temperaturniveaus an der Station (vgl. Rinke et al., 2016). Darüber hinaus ergeben sich sowohl bei der Messdaten- als auch bei der Modellauswertung Unsicherheiten durch die nur näherungsweise mögliche Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur T_{mrt} (vgl. VDI, 2008). Weitere Ursachen für die Unterschiede zwischen Messung und Modellrechnung sind u.a. durch die bei der trilinearen Interpolation der Quadermethode auftretenden Abweichungen (siehe Früh et al., 2016b) und eventuell auch durch die etwas unterschiedliche Bezugshöhe der Gefühlten Temperatur ge-

geben, die bei den Messungen 1,1 m, bei den MUKLIMO_3 Simulationen jedoch 5 m über Grund (Mittelpunkt der untersten Gitterzelle) beträgt.

Tabelle 10: Gemessene und berechnete (Mittelwert über 3 x 3 Gitterpunkte) mittlere jährliche Anzahl an Tagen mit starker Wärmebelastung ($N_{GT_{max} \geq 32}$) für 3 Standorte in Stuttgart für den Zeitraum 1971-2000 sowie ihre berechnete Änderung bis 2031–2060. Die 25. und 75. Perzentil-Werte für die Änderung und die Zukunft basieren auf den 17 Projektionen in Tabelle 11.

Standort (m ü. NN) GK Koordinaten	Modell / Messung 1971-2000	Änderung 2031-2060 zu 1971-2000 25. bis 75. Perzentil	Zukunft 2031-2060 25. bis 75. Perzentil
Echterdingen (373) RW 3516280 HW 5394500	16,2 / 16,5	10,2 – 22,6	26,4 – 38,8
Schnarrenberg (314) RW 3514770 HW 5410110	26,5 / 20,9*	12,9 – 23,5	39,4 – 50,4
Schwabenzentrum (250) RW 3513136 HW 5403903	33,1 / 31,8*	15,2 – 23,8	48,3 – 56,9

* Messdatenlückenschließung durch Übertragung von Daten benachbarter Station.

Die in Abbildung 45 dargestellte räumliche Verteilung der Tage mit starker Wärmebelastung im Auswertebereich für den Zeitraum 1971-2000 zeigt, dass $N_{GT_{max} \geq 32^{\circ}C}$ stark von der Geländehöhe (Abb. 5) und der Landnutzung (Abb. 6) abhängt. In freien Kuppenlagen tritt starke Wärmebelastung an weniger als 20 Tagen und in bewaldeten Kuppenlagen sogar nur an weniger als 5 Tagen pro Jahr auf. In den bebauten Tallagen wie dem Stuttgarter Kessel, dem Neckartal, dem Feuerbachtal, oder dem Rohrackertal tritt starke Wärmebelastung hingegen an über 30 Tagen pro Jahr auf. Wie bereits bei der Beschreibung der räumlichen Variation der maximalen Gefühlten Temperatur in Abschnitt 5.3.1 diskutiert, bewirkt die Schattenwirkung der Gebäude, dass Stadtgebiete der Nutzungsklasse „sehr dichte Bebauung“ nicht die höchste Anzahl an Wärmebelastungstagen aufweisen.

In Übereinstimmung mit einer früheren Studie (Rinke et al., 2016) weisen die Modellergebnisse insbesondere das stark industrialisierte Neckartal als Gebiet mit sehr hoher Wärmebelastung aus. Hier ergeben sich wegen der hohen Flächenanteile von Versiegelung und Bebauung sowie durch die wenig Schatten spendende Form der Industrie- bzw. Gewerbegebäude (s. Sievers und Früh, 2012) verbreitet über 35 starke Wärmebelastungstage pro Jahr. Insbesondere in den Industrie- und Gewerbegebieten in denen das Neckartal eine geringe Breite aufweist, wie z. B. in den südöstlichen Stadtteilen Wangen, Untertürkheim und Mettingen, werden auch über 40 Wärmebelastungstage pro Jahr erreicht. Im Stuttgarter Talkessel werden ähnlich hohe Werte für Teile des Europaviertels simuliert. Hier ist jedoch zu beachten, dass dieser Bereich von den Urban Atlas Daten zu dieser Zeit als Baustellengebiet klassifiziert, und von MUKLIMO_3 als teilversiegelte Fläche simuliert wurde, was durch die Stadterneuerung jedoch nur einen

vorübergehenden Zustand beschreibt. Die Ergebnisse für das Europaviertel zeigen allerdings exemplarisch die hohe Wärmebelastung, die sich bei uneingeschränkter Einstrahlung auf südlich exponierte, teilversiegelte Flächen ergibt. Die Auswirkung von starker Sonnenexposition in Kombination mit gering durchlüfteten Lagen zeigt sich auch in den Modellergebnissen im engen Remstal (außerhalb des Stuttgarter Stadtgebiets), wo örtlich mehr als 40 Tage mit starker Wärmebelastung im Jahr auftreten.

Die in Abbildung 45 dargestellten Ergebnisse für 1971-2000 bestätigen, dass die Waldgebiete und Kuppenlagen um die dichtbesiedelten Stadt- und Ortskerne Stuttgarts bei Hitzelagen für die Erholung von großer Bedeutung sind. Sie zeigen aber auch, dass die Hitzebelastung nicht nur im Stuttgarter Talkessel problematisch ist, sondern, dass auch in anderen dichtbesiedelten Stadt- und Ortskernen und insbesondere im stark industrialisierten Neckartal im Südosten Stuttgarts sehr viele Tage mit starker Wärmebelastung auftreten und diese ebenfalls bei der Klima-anpassung zu berücksichtigen sind.

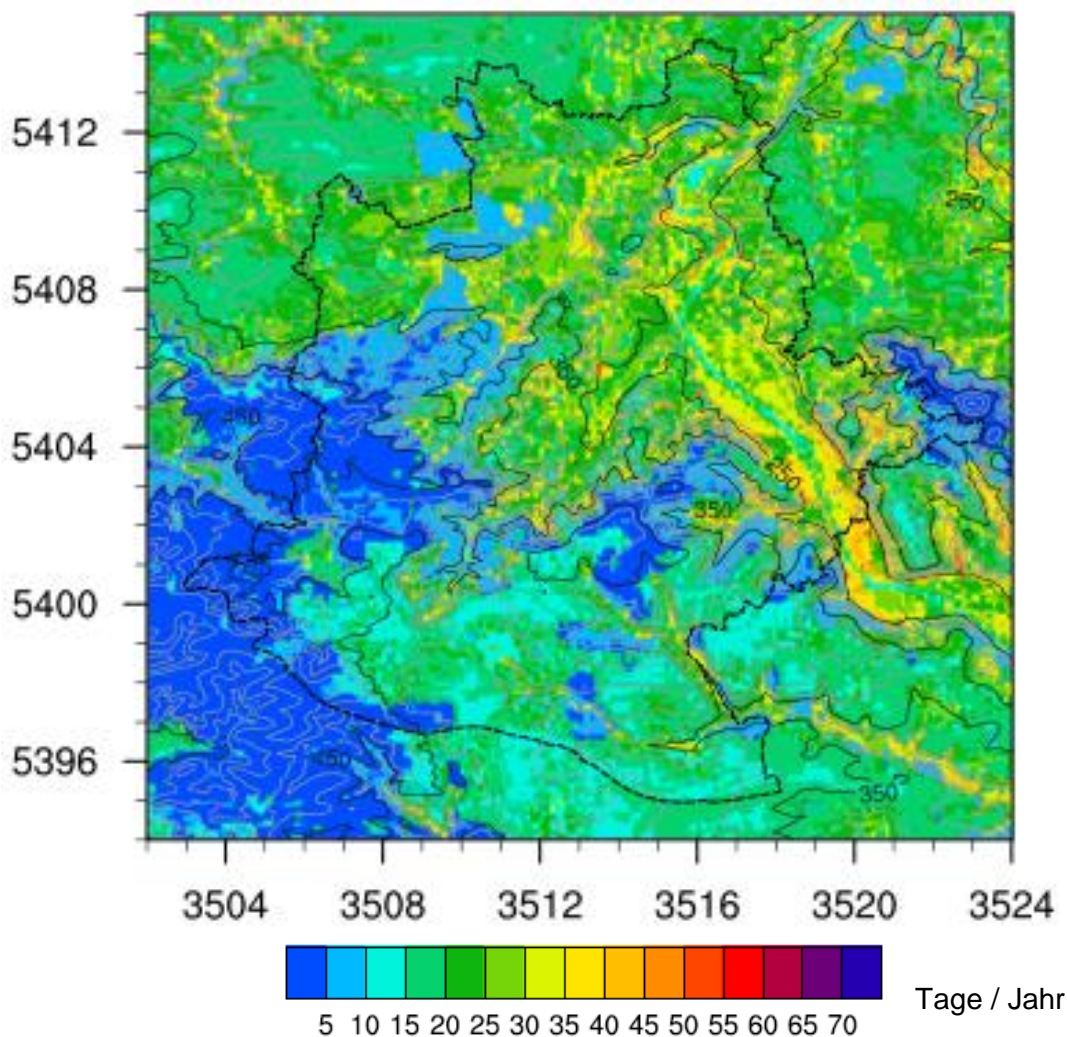


Abbildung 45: Mittlere jährliche Anzahl an Tagen mit starker Wärmebelastung ($N_{GT_{max} \geq 32^\circ C}$) für den Zeitraum 1971–2000 im Auswertebiet. Zusätzlich eingezeichnet sind Isolinien der Geländehöhe im 20 m Abstand unter Hervorhebung der Höhen 250, 350 und 450 m ü. NN und die Stadtgrenze in schwarz. Die Achsenwerte markieren die Gauß-Krüger Koordinaten des Auswertebiets.

Für die Berechnung der Zunahme der starken Wärmebelastungstage bis 2031-2060 wurden aus dem für den Deutschen Klimaatlas (www.dwd.de/klimaatlas) genutzten Ensemble regionaler Klimaprojektionen für das SRES Szenario A1B (Nakicenovic und Swart, 2000) 17 Projektionen herangezogen, für die alle benötigten Tagesmittelwerte vorliegen (siehe Tabelle 11). Das Szenario A1B geht von einem fortschreitenden Wirtschaftswachstum und der ausgewogenen Nutzung fossiler und nicht-fossiler Energiequellen aus. Die Weltbevölkerung kulminiert in diesem Szenario Mitte des 21. Jahrhunderts und nimmt danach ab.

Tabelle 11: Regionale Klimaprojektionen für das Emissionsszenario A1B mit Angabe der horizontalen Auflösung und der verwendeten Global- und Regionalmodelle. Zusätzlich angegeben ist die regional simulierte Zunahme der mittleren Anzahl an Sommertagen ($\Delta N_{T_{\max} \geq 25}$) im Zeitraum von 1971-2000 bis 2031-2060 für den nord-nordwestlich von Stuttgart gelegenen Gebietsausschnitt 48,8°N-49,3°N und 8,7°E-9,4°E (siehe Text).

Nr.	Globales Klimamodell	Regionales Klimamodell	Auflösung	$\Delta N_{T_{\max} \geq 25}$
1	BCM 2	HIRHAM5	25 km	2,9
2	BCM 2	RCA 3.0	25 km	5,3
3	ECHAM5-r3	HIRHAM5	25 km	7,5
4	ECHAM5-r3	RACMO2.1	25 km	7,6
5	ECHAM5-r3	RCA3.0	25 km	7,8
6	ECHAM5-r3	RegCM3	25 km	8,0
7	ECHAM5-r3	REMO5.7	25 km	10,7
8	ECHAM5-r1	CLM2.4.11	19 km	10,7
9	ECHAM5-r2	CLM2.4.11	19 km	11,6
10	ECHAM5-r1	REMO 2005	10 km	12,4
11	HadCM3Q3	RCA3.0	25 km	15,1
12	HadCM3Q3	HadRM3Q3	25 km	16,5
13	HadCM3Q0	CLM 2.4.6	25 km	16,6
14	HadCM3Q16	RCA3.0	25 km	22,2
15	ARPEGE	ALADIN RM5.1	25 km	24,4
16	HadCM3Q16	HadRM3Q16	25 km	26,3
17	HadCM3Q0	HadRM3Q0	25 km	27,6

Die Projektionen wurden mit unterschiedlichen globalen und regionalen Klimamodellen berechnet und stellen somit ein umfangreiches Multi-Modell-Ensemble dar. Aus den meist ganz Europa abdeckenden regionalen Klimaprojektionen wurde für die Quadermethode der nord-nordwestlich von Stuttgart gelegene Gebietsausschnitt 48,8°N-49,3°N und 8,7°E-9,4°E (Kraichgau Region) ausgewählt, da diese Region eine vergleichbare mittlere Geländehöhe wie die stark urbanisierten Bereiche von Stuttgart sowie einen relativ hohen Flächenanteil mit Freiland aufweist (vgl. Deutschländer et al., 2008).

Tabelle 11 zeigt die Reihenfolge der verwendeten regionalen Klimaprojektionen – sortiert nach der von den Regionalmodellen simulierten Zunahme an Sommertagen (Tage mit Maximumtemperatur $\geq 25^{\circ}\text{C}$) im verwendeten Gebietsausschnitt von 1971–2000 bis 2031–2060. Es ist gut zu erkennen, dass die Reihenfolge der Zunahme sehr stark durch die globale Klimaprojektion bestimmt ist, die als Randwerte für die regionale Klimaprojektion verwendet wurden. Des Weiteren bestätigt die Auswertung die im Deutschen Klimaatlas dokumentierte große Spannweite der zu erwartenden regionalen Klimaerwärmung bis Mitte des Jahrhunderts.

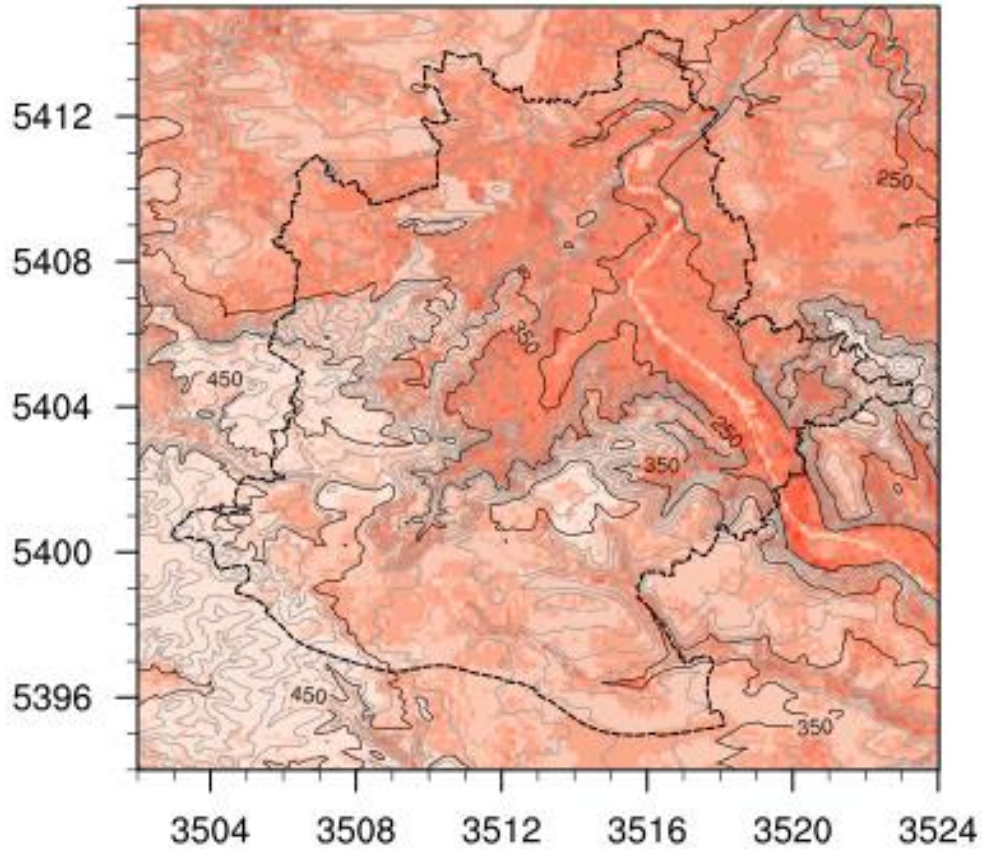
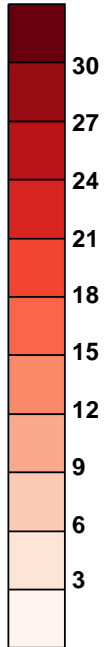
Da die Genauigkeit von Klimaprojektionen systematischen Modellfehlern unterliegt, wurde eine implizite Bias-Korrektur (Kim et al., 2015, Imbery et al., 2013) der Ergebnisse durchgeführt, indem auf Basis der Klimaprojektionen mit der Quadermethode die Anzahl der Wärmebelastungstage sowohl für den zukünftigen Zeitraum 2031-2060, als auch für den Referenzzeitraum 1971-2000 berechnet wurde und anschließend durch Differenzenbildung die Änderung der Anzahl der Wärmebelastungstage zwischen den beiden Zeiträumen ermittelt wurde (vgl. Früh et al., 2011a, b).

Um die Spannbreite der zukünftig zu erwartenden Änderung der Anzahl an Wärmebelastungstagen in Stuttgart zu bestimmen, wurde zunächst mit der Quadermethode für alle 17 Klimaprojektionen die Änderung der Wärmebelastungstage auf dem MUKLIMO_3 Modellgitter berechnet. Anschließend wurden für jede Modellgitterzelle die Änderungswerte der 17 Projektionen entsprechend ihrer Stärke sortiert, mit dem Ziel, Perzentil-Karten der Änderung zwischen 1971-2000 und 2031-2060 zu erstellen (Abb. 46). Um bias-korrigierte Perzentil-Karten für die Anzahl an Wärmebelastungstagen im zukünftigen Zeitraum 2031-2060 zu erhalten (Abb. 47), wurden in einem nachfolgenden Schritt die Perzentil-Karten der Änderung der Wärmebelastungstage zwischen 1971-2000 und 2031-2060 (Abb. 46) mit der auf Basis der Stationsmessungen erstellten Karte der Anzahl Wärmebelastungstage für 1971-2000 (Abb. 45) addiert.

Die 25. Perzentil-Karte der Zunahme an starken Wärmebelastungstagen (obere Grafik in Abbildung 46) zeigt eine Abhängigkeit von der Geländehöhe und von der Landnutzung. In den Tallagen beträgt die Zunahme verbreitet zwischen 9 und 15 Tage, über Freiflächen mit Versiegelung und in den Industrie- und Gewerbegebieten erreicht die Zunahme ca. 20 Belastungstage. Auf den Fildern beträgt die Zunahme verbreitet zwischen 6 und 12 Tage, in den bewaldeten Kuppenlagen sogar nur 3 bis 6 Belastungstage. Eine mit zunehmender Geländehöhe schwächer werdende Zunahme an Wärmebelastungstagen bis zur Mitte des Jahrhunderts ergab auch eine Studie von Endler et al. (2010) im Südschwarzwald, die jedoch nur auf einer Projektion (ECHAM5-r1 – REMO 2005, siehe Tabelle 11) beruht.

a) 25. Perzentil

$$\Delta N_{GTmax \geq 32^\circ C}$$



b) 75. Perzentil

$$\Delta N_{GTmax \geq 32^\circ C}$$

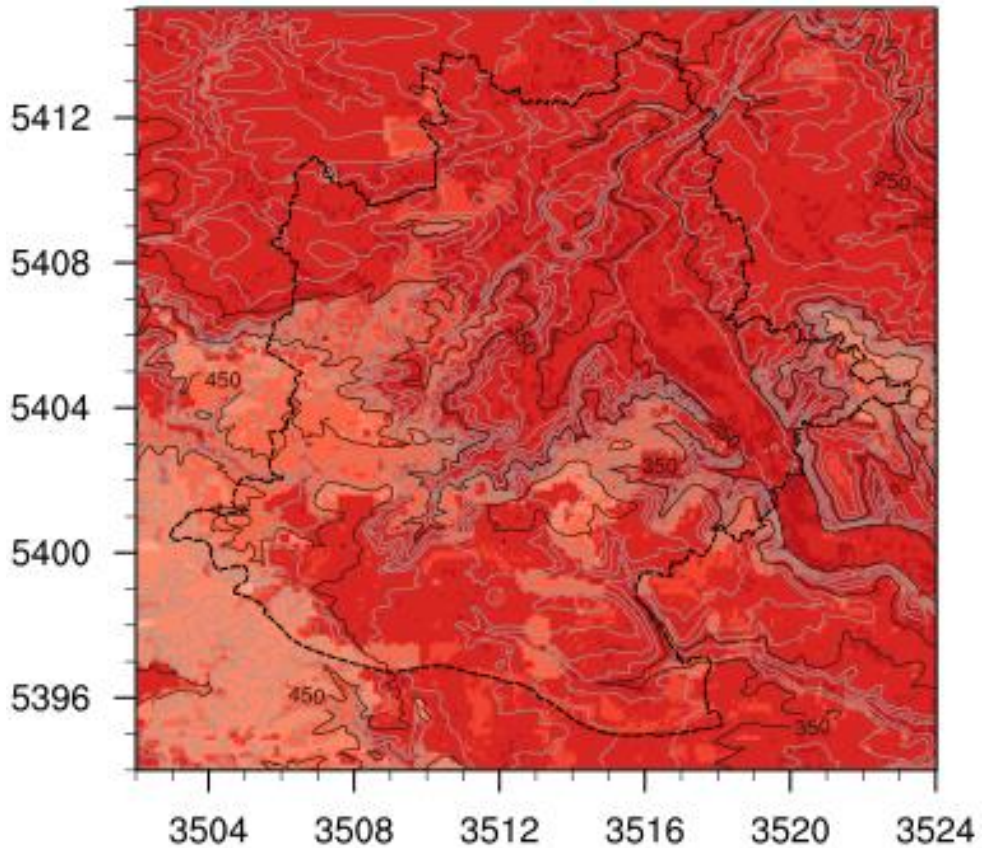


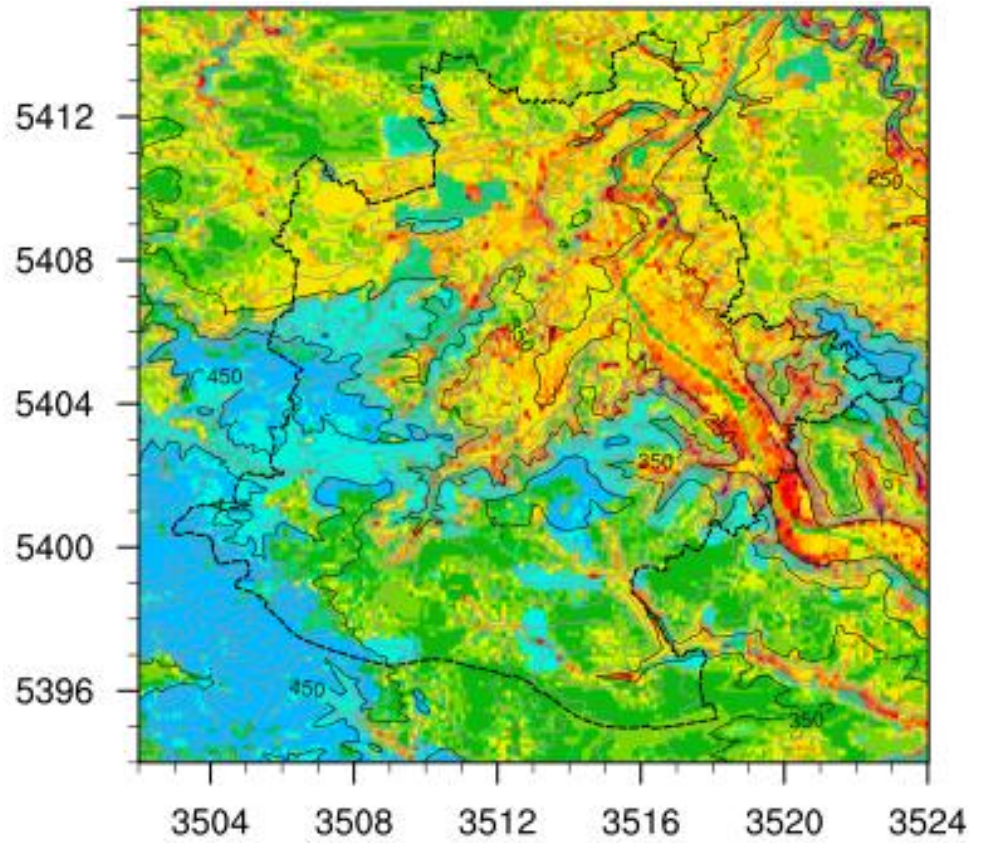
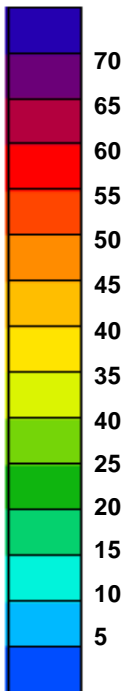
Abbildung 46: Projektion der Zunahme der mittleren Anzahl an Tagen mit starker Wärmebelastung im Auswertebiet im Zeitraum von 1971-2000 bis 2031-2060 für das Emissionsszenario A1B. a) 25. Perzentil, b) 75. Perzentil. Zusätzlich eingezeichnet sind Isolinien der Geländehöhe im 20 m Abstand unter Hervorhebung der Höhen 250, 350 und 450 m ü. NN und die Stadtgrenze in schwarz. Die Achsenwerte markieren die Gauß-Krüger Koordinaten des Auswertebiets.

Die 75. Perzentil-Karte der Zunahme an starken Wärmebelastungstagen (untere Grafik in Abbildung 46) zeigt im Vergleich zur 25. Perzentil-Karte weitaus höhere Werte. Die Höhenabhängigkeit in der Zunahme an Wärmebelastungstagen ist in der 75. Perzentil-Karte nur sehr schwach ausgeprägt (vgl. 75. Perzentil Änderungswerte in Tabelle 10). Die berechnete Zunahme auf der Filder beträgt zwischen 18 und 24 Tagen, im tiefer gelegenen Stadtgebiet zeigt die Karte verbreitet eine Zunahme zwischen 21 und 27 Belastungstagen. Prozentual betrachtet bedeuten diese Ergebnisse für die Hochlagen der Filder etwa eine Verdopplung der bisherigen Belastungstage, während in den Tallagen die Zunahme eine Verdopplung noch nicht erreicht. In den bewaldeten Kuppenlagen ergibt sich eine Zunahme von 12 bis 18 Belastungstagen und somit nahezu eine Verdreifachung der Wärmebelastungstage.

Aus den in Abbildung 47 dargestellten Perzentil-Karten der Wärmebelastungstage im Projektionszeitraum 2031-2060 ist zu erkennen, dass sich die Stadt Stuttgart bei Eintreten des Emissionsszenarios A1B auf eine, gegenüber 1971-2000, deutlich erhöhte Anzahl an Wärmebelastungstagen einstellen muss. Auf Basis der 25. Perzentil-Karte und der 75. Perzentil-Karte der Wärmebelastung ergibt sich in Stuttgart für den Projektionszeitraum 2031-2060 eine Spannweite von ca. 50 bis 70 Tagen im Neckartal im Südosten des Stadtgebiets, von ca. 40 bis 60 Tagen in den warmen Bereichen des Stuttgarter Kessels, von 20 bis 40 Tagen auf den freien Hochlagen der Filder, und von ca. 5 bis 20 Tagen in den bewaldeten Kuppenlagen. Trotz der starken relativen Zunahme an Belastungstagen in den bewaldeten Kuppenlagen, bleibt auch zukünftig die Funktion von Waldgebieten als kühleres Refugium bei Hitzelagen von Bedeutung.

a) 25. Perzentil

$N_{GTmax \geq 32^\circ C}$



b) 75. Perzentil

$N_{GTmax \geq 32^\circ C}$

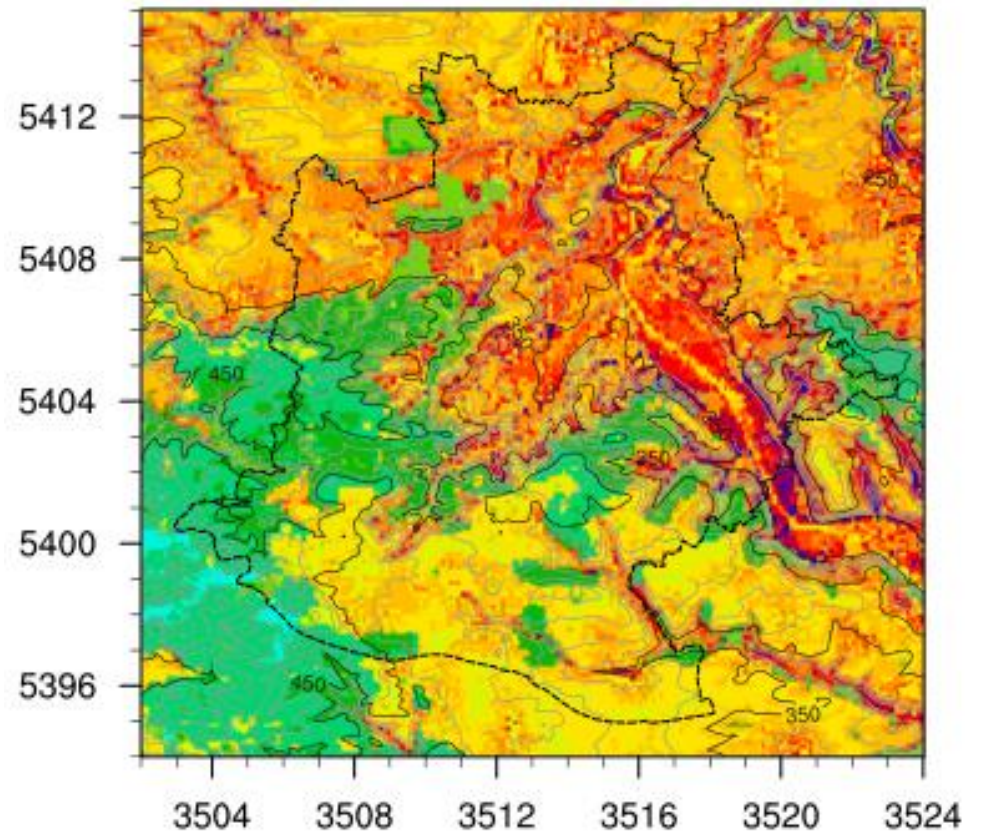


Abbildung 47: Projektion der mittleren Anzahl an Tagen mit starker Wärmebelastung im Auswertebereich im Zeitraum 2031-2060 für das Emissionsszenario A1B. a) 25. Perzentil, b) 75. Perzentil. Zusätzlich eingezeichnet sind Isolinien der Geländehöhe im 20 m Abstand unter Hervorhebung der Höhen 250, 350 und 450 m ü. NN und die Stadtgrenze in schwarz. Die Achsenwerte markieren die Gauß-Krüger Koordinaten des Auswertebereichs.

6 Diskussion der Modellergebnisse

Die für Klimaprojektionen auf urbaner Skala erweiterte Quadermethode nutzt die Gefühlte Temperatur (GT) als human-biometeorologische Belastungsgröße und ein 17 regionale Klimaprojektionen umfassendes Multi-Modell-Ensemble für das SRES Szenario A1B. Die Nutzung der Copernicus (GMES) Urban Atlas Daten als Landnutzungsinformation erlaubte die Unterscheidung der Bebauung in 6 verschiedene Klassen. Für den Zeitraum 1971-2000 ergab das Verfahren unter Anwendung einer einfachen Bias-Korrektur eine gute Übereinstimmung mit verfügbaren Auswertungen von Stationsmessungen (vgl. Imbery et al., 2013, Kim et al., 2015). Ein Vergleich mit zuvor existierenden Studien zur Wärmebelastung in Stuttgart zeigt, dass hiermit eine neue, umfassendere Datenbasis für die Klimaanpassung entwickelt wurde (Ketterer, 2015, Rinke et al., 2016).

So zeigen für den Referenzzeitraum 1971-2000 zwar auch frühere, auf der GT (LUBW, 2006) oder der PET (VR Stuttgart, 2008; Rinke et al., 2016) basierende, Studien eine vergleichbare Anzahl an Tagen mit starker Wärmebelastung, und belegen beispielsweise bereits auch die sehr hohe Wärmebelastung im industrialisierten Neckartal. Diese Untersuchungen weisen aber aufgrund deutlich gröberer Landnutzungsklassifizierung und/oder größerer Gitterweite eine deutlich geringere klimatische und räumliche Auflösung auf.

Bisherige Untersuchungen zur Änderung der Anzahl an Wärmebelastungstagen basieren nur auf wenigen Klimaprojektionen. Die Zunahme an Wärmebelastungstagen wurde hierbei nicht flächenhaft, sondern nur für Stationsstandorte und ohne Downscaling Verfahren ermittelt (Ketterer und Matzarakis, 2014, Fallmann et al., 2016). Die in diesen Studien beschriebene Zunahme liegt für das Szenario A1B bis zur Mitte des Jahrhunderts im unteren Bereich der Spannweite, die sich in der vorliegenden Kooperationsstudie aus dem deutlich größeren Ensemble ergibt. Während der Klimaatlas des Verbands Region Stuttgart (VR Stuttgart, 2008) davon ausgeht, dass sich die Anzahl an Tagen mit starker Wärmebelastung bis zum Zeitraum 2071-2100 schätzungsweise etwa verdoppeln wird, belegen die Ergebnisse der vorliegenden Studie, dass bei Eintreten des Szenarios A1B die Verdopplung schon zur Mitte des Jahrhunderts eintreten könnte (siehe 75. Perzentil der Wärmebelastungstage). Vereinfacht ausgedrückt bedeutet die Verdopplung, dass in den bebauten Bereichen des Stuttgarter Kessels und des Neckartals starke Wärmebelastung im Mittel an etwa 60 Tagen (entspricht 2 Monaten) pro Jahr auftreten kann.

Die Urban Atlas 2006 Landnutzungsdaten besitzen eine für die Kooperationsstudie passende räumliche Auflösung und sie ermöglichen verschiedene Bebauungsdichten zu unterscheiden. Jedoch enthält der Urban Atlas leider keine Informationen über die Gebäudeform, die Gebäudehöhe oder über die Anteile der Gebäude und anderer Flächen (Straßen, Plätze, Parkflächen) am Versiegelungsgrad, so dass diese Werte abgeschätzt werden mussten. Vergleiche mit Luftbildern zeigen zudem, dass die Klassenzuweisungen einiger Nutzungen für Klimauntersuchungen nicht sinnvoll sind (z. B. Kennzeichnung von Verwaltungsgebäuden als Industrie- und Gewerbebauung). Auch werden einigen Flächen Nutzungsbeschreibungen zugewiesen, die nur vorübergehender Natur und somit für die Simulation längerer Klimazeiträume nicht repräsentativ sind (z. B. Klassifizierung des Europaviertels als Baustelle).

Trotz der genannten Diskussionspunkte belegen die neuen, auf einer umfassenden Datenbasis basierenden, Ergebnisse der Kooperationsstudie, dass sich die Stadt Stuttgart bereits zur Mitte des Jahrhunderts auf eine deutlich erhöhte Anzahl an Tagen mit starker Wärmebelastung einstellen muss. Hierbei sind insbesondere die bebauten Tallagen von sehr hoher Wärmebelastung betroffen, wobei die höchste Anzahl an Wärmebelastungstagen in Industrie- und Gewerbegebieten zu erwarten ist. Die bewaldeten Kuppenlagen um die Siedlungskerne sind auch zukünftig bei Hitzelagen als kühleres Refugium von besonderer Bedeutung. Bis zum Ende dieses Jahrhunderts wird sich die Zunahme an Wärmebelastungstagen fortsetzen (Ketterer und Matzarakis, 2014, Fallmann et al., 2016). Eine Abschätzung dieser Zunahme sollte möglichst nicht nur auf einem Multi-Modell-Ensemble beruhen, sondern auch verschiedene Zukunftsszenarien berücksichtigen (Zhao et al., 2013).

7 Schlussbetrachtung

Die Kooperation zwischen der Landeshauptstadt Stuttgart und dem Deutschen Wetterdienst dient dem gemeinsamen Ziel, die Folgen des Klimawandels abzuschätzen und daraus Erkenntnisse für Prävention und Anpassungsmaßnahmen zu erlangen. Während der Deutsche Wetterdienst das Verfahren der stadtklimatischen Modellierung weiterentwickeln konnte, kann die LH Stuttgart die Erkenntnisse für die klimaangepasste Stadtplanung verwenden.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die Wärmebelastung in Zukunft verstärkt in Stuttgart auftreten wird, sowohl in der Stadtmitte und den Hanglagen des Talkessels, als auch in Industrie- und Gewerbegebieten im Neckartal, wo täglich viele Menschen ihren Arbeitstag ableisten. Durch diese Entwicklung entsteht ein Handlungsdruck, die Stadtplanung auf zukünftige klimatische Bedingungen auszulegen. Die Ergebnisse zeigen ebenfalls, dass Waldgebiete vergleichsweise immer kühler sind als bebautes Gebiet. Dieser Fakt kann für Anpassungsmaßnahmen verwendet werden. Auch Grünflächen und Bäume können in kleinräumigen Bereich Verbesserungen der thermischen Belastung erzielen.

Viele Möglichkeiten zur Anpassung an Klimaveränderungen sind bereits bekannt (Ketterer, 2015): Die Abschattung von Flächen und Straßen verringert die Gefahr vor hoher Wärmebelastung, die mittlere Strahlungstemperatur gleicht sich der Lufttemperatur an, was einen deutlich höheren thermischen Komfort bedeutet. Neben der Abschattung ist die Windgeschwindigkeit eine relevante Größe. Eine reduzierte Windgeschwindigkeit (um 1 m/s), die durch bauliche Verdichtung entstehen kann, erhöht die Häufigkeit der wärmebelasteten Tage ($PET \geq 35^\circ\text{C}$) im Jahr (um 7 % in der Periode 2021-2050) (Ketterer, 2015).

Im Zuge der Untersuchung wurde durch den Deutschen Wetterdienst die Quadermethode (Früh et al., 2011a, b) als Verfahren für das dynamisch-statistische Downscaling von regionalen Klimadaten mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3 weiterentwickelt. Das Downscaling Verfahren ermöglicht nun durch Kopplung mit dem Klima-Michel-Modell zur Berechnung der Gefühlten Temperatur (VDI, 2008, Staiger et al., 2012) auch die hochaufgelöste, flächenhafte Bestimmung der menschlichen Wärmebelastung für vergangene oder zukünftige Klimazeiträume. Fachlich bedeutet dies gegenüber der Häufigkeitsuntersuchung von hohen Lufttemperaturen (z. B. Anzahl heißer Tage mit maximaler Lufttemperatur $\geq 30^\circ\text{C}$) einen wichtigen Fortschritt. Darüber hinaus erlaubt die Nutzung eines umfänglichen Multi-Modell-Ensembles regionaler Klimaprojektionen für die Kooperationsstudie, eine quantitative Abschätzung der Spannweite der durch globalen und regionalen Klimawandel zu erwartenden Änderung der Wärmebelastung in Stuttgart.

Die mit dem Verfahren berechnete mittlere jährliche Anzahl an Tagen mit starker Wärmebelastung in Stuttgart für die 30-jährigen Zeiträume 1971-2000 und 2031-2060 zeigt auf wo rezent und zukünftig die Gesundheit durch starke Hitze besonders gefährdet (Matzarakis, 2013) und Klimaanpassung somit besonders wichtig ist. Die Durchführung von Messungen in besonders belasteten Gebieten wie dem industrialisierten Neckartal kann zum weiteren Verständnis der Ursachen der Wärmebelastung und zur höheren Akzeptanz von Anpassungsmaßnahmen beitragen.

gen. Darüber hinaus zeigen die Modellergebnisse auch, wo Wärmebelastung seltener und in geringerem Maß auftritt und somit bei Hitzesituationen eine Erholungsfunktion gegeben ist, die durch geeignete Stadtplanung geschützt und (z. B. durch Baumpflanzungen) erweitert werden kann.

Durch die Kooperation der LH Stuttgart und des Deutschen Wetterdienstes stehen für Stuttgart nun neue, wertvolle Daten für die klimaresiliente Stadtplanung zur Verfügung. Das durch die Kooperation erweiterte Verfahren ermöglicht dem Deutschen Wetterdienst eine verbesserte Stadtklimaberatung und den angestrebten weiteren Ausbau von Stadtklima-Services.

Literaturverzeichnis

BKG: Bundesanstalt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, Karte TOP200.

Błażejczyk, K., Broede, P., Fiala, D., Havenith, H., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Kunert, A., 2010: Principles of the new universal thermal climate index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale. *Miscellanea Geographica* 14, 91–102.

BMBau (Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau) 1980: Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen. Schriftenreihe Raumordnung 06.044, Forschungsprojekt BMBau RS II 4-70 41 02-77.10.

Deuschländer, T., Koßmann, M., Steigerwald, T., Namyslo, J., 2008: Verwendung von Klimaprojektionsdaten für die Stadtklimasimulation. Klimastatusbericht 2008, Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), Offenbach, 13-17.

DWD: Deutscher Wetterdienst

2014: WitterungsReport Express Juli 2014. Deutscher Wetterdienst 2014 (2012, 2006, 2011).

2016a: Gefühlte Temperatur, Schwüle und Wind Chill. Abruf 21.11.2016, 16:02
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=100932&lv3=100988>

2016b: Stationslexikon. Abruf 21.11.2016, 16:03
<https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/stationsliste.html>

Endler, C., Oehler, K., Matzarakis, A., 2010: Vertical gradient of climate change and climate tourism conditions in the Black Forest. *Int J Biometeorolog* 54, 45-61. DOI 10.1007/s00484-009-0251-2

Fallmann, J., Emeis, S., Wagner, S., Ketterer, C., Matzarakis, A., Krüzselyi, I., Zsebeházi, G., Kovács, M., Halenka, T., Huszár, P., Belda, M., Tomozeiu, R., Botarelli, L., Musco, F (Hrsg.), 2016: Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario, Kapitel 1: Forecasting Models for Urban Warming in Climate Change – Stuttgart. Springer International Publishing, S. 3-40.

Feigenwinter, I., 2013: Stadtklimastudie Stuttgart – Übersicht der ersten Messdaten vom Sommer 2013. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), Freiburg.

Früh, B., Koßmann, M., Roos, M., 2011a: Frankfurt am Main im Klimawandel – Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 237, 68 S.

Früh, B., Becker, P., Deuschländer, T., Hessel, J.-D., Koßmann, M., Mieskes, I., Namyslo, J., Roos, M., Sievers, U., Steigerwald, T., Turau, H., Wienert, U., 2011b: Estimation of climate change impacts on the urban heat load using an urban climate model and regional climate projections. *Journal Applied Meteorology and Climatology* 50, 1, 167-184.

Gross, G., 1989: Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. *Beitr. Phys. Atmosph.* 62, 57-72.

Höppe, P., 1999: The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int. J. Biometeorol.* 43, 71-75.

Huttenlocher, F., Dongos, H., 1967: *Naturräumliche Gliederung Deutschlands: Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 170 Stuttgart*. Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung. Selbstverlag, Bad Godesberg.

Imbery, F., Plagemann, S., Namyslo, J., 2013: Processing and analysing an ensemble of climate projections for the joint research project KLIWAS. *Advances in Science and Research – Open Access Proceedings* www.adv-sci-res.net/10/91/2013

Jendritzky, G., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Weihs, P., Batchvarova, E., DeDear, R., 2009: Klimastatusbericht 2009. *Deutscher Wetterdienst* (Hrsg.), 96-101.

Jendritzky, G., DeDear, R., Havenith, G., 2012: UTCI- Why another thermal index? *Int. J. Biometeorol* 56, 421-428.

Ketterer, C., 2015: *Human-biometeorologische Quantifizierung der thermischen Komponente des Stadtklimas von Stuttgart*. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau.

Ketterer, C., Matzarakis, A., 2014: Human-biometeorological assessment of the urban heat island in a city with complex topography - The case of Stuttgart, Germany. *Landscape and Urban Planning* 122, 78-88. <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2014.01.003>

Ketterer, C., Matzarakis, A., 2015: Comparison of different methods for the assessment of the urban heat island in Stuttgart, Germany. *Int. J. Biometeorol* 59, 1299-1309.

Ketterer, C., Matzarakis, A., 2016: Mapping the Physiologically Equivalent Temperature in urban areas using artificial neural network. *Landscape and Urban Planning* 150, 1-9.

Kim, K.B., Kwon, H., Han, D., 2015: Bias correction methods for regional climate model simulations considering the distributional parametric uncertainty underlying the observations. *Journal of Hydrology* 530, 568-579.

Kuttler, W., 2009: Zum Klima im urbanen Raum. *Klimastatusbericht 2008*. *Deutscher Wetterdienst* (Hrsg.), Offenbach, 6 -12.

Linke, C. et al., 2015: Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“. Hannover Oktober 2015.

LUBW, 2006: *Klimaatlas Baden-Württemberg*, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hrsg.). <http://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/244295/>

LUBW, 2016: Synthetische Wind- und Ausbreitungsklassenstatistik. <http://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/pages/map/default/index.xhtml>

LHS: Landeshauptstadt Stuttgart

2010: *Der Klimawandel – Herausforderungen für die Stadtklimatologie*. Schriftreihe des Amtes für Umweltschutz, Heft 3/2010. Landeshauptstadt Stuttgart.

2015: Stuttgarter Einwohnerdaten, Ausgabe 2015. Statistisches Amt der Landeshauptstadt Stuttgart, Abruft, 10.11.2016, 09:20. <https://www.stuttgart.de/statistik-gesamtstadt>

2016a: Stadtklima Stuttgart 21. Amt für Umweltschutz, Abteilung Stadtklimatologie. Abruf 24.10.2016, 13:15.
https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?klima_s21_grundlagen_kap2

2016b: Historie der Stadtklimatologie. Amt für Umweltschutz, Abteilung Stadtklimatologie.
https://www.stadtklima-stuttgart.de/stadtklima_filestorage/download/Historie%20der%20Stadtklimatologie.pdf

2016c: Stuttgart Topographische Karten. Statistisches Amt Abruf 03.11.2016, 11:39.
http://service.stuttgart.de/LHS-services/komunis/documents/7703_1.PDF

2016d: Lage und Größe der Landeshauptstadt Stuttgart. Statistisches Amt, Landeshauptstadt Stuttgart. Abruf: 27.10.2016, 09:18.
<http://statistik.stuttgart.de/statistiken/tabellen/7552/jb7552.php>

2016e: Messstation Schwabenzentrum. Amt für Umweltschutz – Abteilung Stadtklimatologie.
https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?klima_messdaten_station_sz

2016f: Stadtklima Stuttgart 21. Amt für Umweltschutz – Abteilung Stadtklimatologie.
https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?klima_s21_vorwort

Matzarakis, A., 2001: Die thermische Komponente des Stadtklimas. Berichte des Meteorologischen Instituts der Universität Freiburg, Nr. 6, 267 S.

Matzarakis, A., 2013: Stadtklima vor dem Hintergrund des Klimawandels. Gefahrenstoffe – Reinhaltung der Luft 73, 115-118.

Matzarakis, A., Koppe, C., 2016: Hitzewellen – eine zunehmende Gesundheitsgefahr. Internistische Praxis 56, 585-592.

Matzarakis, A., Mayer, H., 1996: Another Kind of Environmental Stress: Thermal Stress. WHO Collaborating Centre for Air Quality Management and Air Pollution Control, Newsletter No. 18, 7-10.

Matzarakis, A.; Mayer, H.; Iziomon, M.G., 1999: Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. Int. J. Biometeorol 43, 76-84.

Mayer, H.; Höpfe, P., 1987: Thermal Comfort of Man in Different Urban Environments. Theor. Appl. Climatol. 38, 43-49.

Mayer, H., Matzarakis, A., Iziomon, M. G., 2003: Spatio-temporal variability of moisture conditions within the Urban Canopy Layer. Theor. Appl. Climatol. 76, 165-179.

Nakicenovic, N., R. Swart, (Hrsg.), 2000: Emissions scenarios - Summary for policymakers. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 20 S.

Nöth, G., 2015: Vor Ort – Niederlassung Stuttgart. DWD 1. Auflage 1000 / 04.15. Deutscher Wetterdienst.

PCE Deutschland GmbH (2013): Bedienungsanleitung Hitzestressmessgerät PCE-WB 20 SD. Version 1.2, Stand 20.11.2013. Abruf: 08.11.2016, 08:29

<http://www.warensortiment.de/bedienung/ba-hitzestressmessgeraet-pce-wb-20sd.pdf>

Rinke, R.; Kapp, R.; Reuter, U.; Ketterer, C.; Fallmann, J.; Matzarakis, A.; Emeis, S., Musco, F. (Hrsg.) 2016: Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario, Kapitel 10: Pilot Actions in European Cities – Stuttgart. Springer International Publishing, 281-303.

Siebert, J.; Sievers, U.; Zdunkowski, W., 1992: A one-dimensional simulation of the interaction between land surface processes and the atmosphere. *Boundary-Layer Meteorology* 59, 1-34.

Sievers, U., R. Forkel und W. Zdunkowski, 1983: Transport equations for heat and moisture in the soil and their application to boundary layer problems. *Beitr. Phys. Atmosph.* 56, 58-83.

Sievers, U., Zdunkowski, W., 1986: A microscale urban climate model. *Beitrag Phys. Atmosph.* 59, 13-40.

Sievers, U., 1990: Dreidimensionale Simulationen in Stadtgebieten. *Umweltmeteorologie, Schriftenreihe Band 15: Sitzung des Hauptausschusses II am 7. und 8. Juni in Lahnstein. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Düsseldorf, 92-105.*

Sievers, U., 1995: Verallgemeinerung der Stromfunktionsmethode auf drei Dimensionen. *Meteorol. Zeitschrift, N. F.* 4, 3-15.

Sievers U., 2012: Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3 Teil 1: Theoretische Grundlagen, PC-Basisversion und Validierung. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes Band 240, 142 S.*

Sievers, U., Früh, B., 2012: A practical approach to compute short-wave irradiance at the surface of sub-grid scale buildings. *Meteorol. Zeitschrift.* 21, 349-364.

Sievers U., 2016: Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3 Teil 2: Thermodynamische Erweiterungen. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes Band 248, 151 S.* <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201606173510>

Stachniuk, E., 2014: Stadtklimamessungen Stuttgart – Auswertungen der Messdaten aus dem Sommer 2014. *Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), Freiburg.*

Staiger, H., Laschewski, G., Grätz, A., 2012: The perceived temperature – a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: scientific basics. *Int J Biometeorol* 56, 165-176.

Strauß, M., 2013: Flächenversiegelung in Stuttgart. *Kurzbericht, Statistik und Informationsmanagement, Monatsheft 1/2013. Statistisches Amt, Landeshauptstadt Stuttgart.*

Tiefgraber, 2013: UTCI – Universal Thermal Climate Index (Universeller thermischer Klimaindex). Abruf: 21.10.2016, 15:13 http://www.wetterdienst.de/Deutschlandwetter/Thema_des_Tages/878/utci-universal-thermal-climate-index-universeller-thermischer-klimaindex

VDI, 2008: VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2, *Umweltmeteorologie, Methoden zur humanbiometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung, Teil 1.* Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2008, Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin

VR Stuttgart, 2008: Klimaatlas der Verband Region Stuttgart. Verband Region Stuttgart (Hrsg.), 168 S., http://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?klima_klimaatlas_region

Zhao, Z.-C., Luo Y., Huang J.-B., 2013: A Review on Evaluation Methods of Climate Modeling, *Advances in Climate Change Research* 4, 137–144.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Topographische Darstellung der Stuttgarter Region mit eingezeichneten Stadtbezirken (LHS, 2016c).....	11
Abbildung 2: Verteilung der Flächenversiegelung in Stuttgart 2006 (Strauß, 2013).....	12
Abbildung 3: Mittlere jährliche Lufttemperaturverteilung im Zeitraum 1971-2000 in Stuttgart. Die graue Linie umfasst das Stadtgebiet (Rinke et al., 2016).....	14
Abbildung 4: Skizze des Quaders zur Illustration der Eckpunktsimulationen und der multiplen linearen Interpolation. Die Quadereckpunkte werden durch Tagesmittelwerte der Lufttemperatur T , der relativen Luftfeuchtigkeit rh und der Windgeschwindigkeit v bestimmt und sind für die im Gebiet von Stuttgart durchgeführten MUKLIMO_3 Simulationen in Tabelle 5 aufgelistet. Hierbei sind z. B. $T_{c,min}$, $rh_{c,min}$ und $v_{c,min}$ die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Windgeschwindigkeit für die in der Tabelle 5 mit „000“ gekennzeichnete, kühle, trockene und windschwache Quadereckpunktsimulation (Index c steht für engl. Corner).....	21
Abbildung 5: Auswertebereich für die Modellrechnungen (22 km x 21 km), in schwarz ist die Stadtgrenze, mit blauen Symbolen die langjährigen Stationen Schnarrenberg, Schwabenzentrum und Echterdingen (von oben/Nord nach unten/Süd) eingezeichnet © BKG 2017.	23
Abbildung 6: Geländehöhe (m ü. NN) im MUKLIMO_3 Auswertebereich (22 km x 21 km). Die Achsenwerte markieren die Entfernung in Hektometern bzw. die Gitterindizes im Auswertebereich. Zusätzlich eingezeichnet sind die Konturlinien für die Höhen 250, 350 und 450 m ü. NN und die Stadtgrenze in rot. Die Achsenwerte markieren die Gauß-Krüger Koordinaten des Auswertebereichs. ©GeoBasis-DE / BKG 2016.	24
Abbildung 7: Landnutzungsklassifizierung im MUKLIMO_3 Auswertebereich (22 km x 21 km). Zusätzlich eingezeichnet ist die Stadtgrenze in schwarz. Die Achsenwerte markieren die Gauß-Krüger Koordinaten des Auswertebereichs.....	24
Abbildung 8: Messfeld der DWD Niederlassung Stuttgart auf dem Schnarrenberg (Nöth, 2015).	25
Abbildung 9: Teleskopmast der Messstation Schwabenzentrum Stuttgart (LHS, 2016e).....	26
Abbildung 10: Messstation T1 auf dem Diakonissenplatz in Rosenberg, Stuttgart (DWD).....	27
Abbildung 11: Messstation T2 im Garten der Gänsheidestr. 4, Stuttgart (DWD).	27
Abbildung 12: Temporäre Station 2013 bei der Universität Hohenheim im Stadtteil Birkach (DWD).	28

Abbildung 13: Messstation T3 2014 am Dornhaldenfriedhof im offenen Gelände außerhalb des Stadtkerns. Rot umrandet ist das installierte Globe Thermometer (DWD). 29

Abbildung 14: Überblick über die langjährigen Messstationen (blau) im Raum Stuttgart und die temporären Stationen (schwarz) der Messkampagne (OpenStreetMap, erstellt mit ArcGIS)... 30

Abbildung 15: Karte und Höhenprofil der kurzen Nord-Strecke. Die Marker der Strecke sind in der Karte weiß eingezeichnet und in schwarz beschriftet, die temporären Messstationen mit schwarzen Dreiecken (OpenStreetMap, erstellt mit ArcGIS). Im Höhenprofil sind die Streckenmarker als graue Linien eingezeichnet. 33

Abbildung 16: Karte und Höhenprofil der Strecke Bopser. Die Marker der Strecke sind in der Karte weiß eingezeichnet und in schwarz beschriftet, die temporären Messstationen mit schwarzen Dreiecken (OpenStreetMap, erstellt mit ArcGIS). Im Höhenprofil sind die Streckenmarker als graue Linien eingezeichnet. 34

Abbildung 17: Karte und Höhenprofil der Strecke Nord(lang). Die Marker der Strecke sind in der Karte weiß eingezeichnet und in schwarz beschriftet, die temporären Messstationen mit schwarzen Dreiecken (OpenStreetMap, erstellt mit ArcGIS). Im Höhenprofil sind die Streckenmarker als graue Linien eingezeichnet. 35

Abbildung 18: Karte und Höhenprofil der Strecke Süd. Die Marker der Strecke sind in der Karte weiß eingezeichnet und in schwarz beschriftet, die temporären Messstationen mit schwarzen Dreiecken (OpenStreetMap, erstellt mit ArcGIS). Im Höhenprofil sind die Streckenmarker als graue Linien eingezeichnet. 36

Abbildung 19: Häufigkeitsverteilung der Belastungsklassen der Gefühlten Temperatur über einen Tag an der Station Echterdingen durchschnittlich für die Zeitreihe 1961-2010..... 38

Abbildung 20: Anzahl der Tage pro Jahr mit einer Gefühlten Temperatur $\geq 32^{\circ}\text{C}$ (starke Wärmebelastung) durchgehend innerhalb von 3 Stunden oder länger ($\text{GT} \geq 32^{\circ}\text{C} \geq 3\text{h}$) berechnet für die Station Echterdingen. In schwarz ist die Regressionsgerade eingezeichnet, die den Trend über den Zeitraum anzeigt..... 39

Abbildung 21: Anzahl der Tage pro Jahr mit einer Gefühlten Temperatur $\geq 38^{\circ}\text{C}$ (extreme Wärmebelastung) durchgehend innerhalb 1 Stunde oder länger (grau) und innerhalb 3 Stunden oder länger (rot) berechnet für die Station Stuttgart-Echterdingen. 40

Abbildung 22: Häufigkeitsverteilung der Belastungsklassen der Gefühlten Temperatur über einen Tag an der Station Schnarrenberg durchschnittlich für die Zeitreihe 1984-2010 (2000-2008 keine Daten vorhanden)..... 41

Abbildung 23: Anzahl der Tage pro Jahr mit einer Gefühlte Temperatur $\geq 32^{\circ}\text{C}$ (starke Wärmebelastung) durchgehend innerhalb von 3 Stunden oder länger ($\text{GT} \geq 32^{\circ}\text{C} \geq 3\text{h}$), berechnet für die Station Stuttgart-Schnarrenberg. In schwarz ist die Regressionsgerade eingezeichnet, die den Trend über den Zeitraum mit verfügbaren Daten anzeigt (1989-2008 keine Daten vorhanden). 42

Abbildung 24: Anzahl der Tage mit einer Gefühlten Temperatur $\geq 38\text{ °C}$ (extreme Wärmebelastung) durchgehend innerhalb 1 Stunde oder länger (grau) und innerhalb 3 Stunden oder länger (rot) berechnet für die Station Stuttgart-Schnarrenberg (1998-2008 keine Daten vorhanden)..... 42

Abbildung 25: Häufigkeitsverteilung der Belastungsklassen der Gefühlten Temperatur über einen Tag an der Station Schwabenzentrum durchschnittlich für die Zeitreihe 1987-2010. 43

Abbildung 26: Anzahl der Tage pro Jahr mit einer Gefühlte Temperatur $\geq 32\text{ °C}$ (starke Wärmebelastung) durchgehend innerhalb von 3 Stunden oder länger ($GT\geq 32\text{ °C}\geq 3h$), berechnet für die Station Schwabenzentrum. In schwarz ist die Regressionsgerade eingezeichnet, die den Trend über den Zeitraum anzeigt. 44

Abbildung 27: Anzahl der Tage mit einer Gefühlten Temperatur $\geq 38\text{ °C}$ (extreme Wärmebelastung) durchgehend innerhalb 1 Stunde oder länger (grau) und innerhalb 3 Stunden oder länger (rot) berechnet für die Station Stuttgart-Schwabenzentrum. Die Regressionsgerade (schwarz) zeigt den ansteigenden Trend der Tage mit $GT\geq 32\text{ °C}\geq 1h$ 44

Abbildung 28: Anzahl der Tage mit einer Gefühlten Temperatur $\geq 32\text{ °C}$ innerhalb von 3 Stunden oder länger in den Jahren der Messkampagne 2013 und 2014 von allen verfügbaren Stationen. 45

Abbildung 29: Vergleich der mittleren Strahlungstemperatur (T_{mrt}) der Station T1 (Diakonissenplatz), berechnet auf Basis der Schwarzkugeltemperatur (T_g) und der Station Schnarrenberg, berechnet auf der Basis des Bedeckungsgrades. 46

Abbildung 30: Häufigkeitsdiagramme der thermischen Indizes an der Station Stuttgart-Echterdingen für die Zeitreihe 1961-2010. Die gestrichelte Linie markiert den Mittelwert aller Daten übergreifend über die Indizes, die schwarzen Linien die jeweiligen Mittelwerte der einzelnen Indizes. 48

Abbildung 31: Häufigkeitsdiagramme der thermischen Indizes an der Station auf dem Schnarrenberg für die Zeitreihe 1984-2010. Die gestrichelte Linie markiert den Mittelwert aller Daten übergreifend über die Indizes, die schwarzen Linien die jeweiligen Mittelwerte der einzelnen Indizes. 49

Abbildung 32: Lufttemperatur, Dampfdruck, Globalstrahlung und Bedeckungsgrad der DWD Messstationen während der Schönwetterperiode von 02.07. bis 04.07.2014 (10min-Mittelwerte, MEZ). Globalstrahlung und Bedeckungsgrad als 10min-Mittelwerte nur von Schnarrenberg vorhanden. 52

Abbildung 33: Gefühlte Temperatur während der Schönwetterperiode 02.07–04.07.2014, berechnet für die DWD-Stationen Stuttgart-Schnarrenberg und Stuttgart-Echterdingen. 53

Abbildung 34: Windgeschwindigkeit in 1.1 m über dem Boden und Windrichtung (gemessen in 12 m auf dem Schnarrenberg und 10 m in Echterdingen). 54

Abbildung 35: Lufttemperatur, Dampfdruck und Windgeschwindigkeit der drei temporären Messstationen während der Schönwetterperiode von 02.07. bis 04.07.2014 (MEZ)..... 55

Abbildung 36: Profilfahrt der Strecke Nord(lang) am 03.07.2014 morgens um 04:20-04:48 Uhr (MEZ), relative Feuchte in grau-gestrichelt, Wasserdampfpartialdruck in dunkelblau. Im Höhenprofil sind die gesetzten Marker als vertikale Linie eingezeichnet..... 57

Abbildung 37: Profilfahrt der Strecke Nord(lang) am 03.07.2014 mittags um 16:00-16:35 Uhr (MEZ), relative Feuchte in grau-gestrichelt, Wasserdampfpartialdruck in dunkelblau. Im Höhenprofil sind die gesetzten Marker als vertikale Linie eingezeichnet..... 58

Abbildung 38: Profilfahrt der Strecke Nord(lang) am 03.07.2014 abends um 21:06-21:39 Uhr (MEZ), relative Feuchte in grau-gestrichelt, Wasserdampfpartialdruck in dunkelblau. Im Höhenprofil sind die gesetzten Marker als vertikale Linie eingezeichnet..... 59

Abbildung 39: Profilfahrt der Strecke Süd am 03.07.2014 morgens um 05:03-05:44 Uhr (MEZ), relative Feuchte in grau-gestrichelt, Wasserdampfpartialdruck in dunkelblau. Im Höhenprofil sind die gesetzten Marker als vertikale Linie eingezeichnet..... 60

Abbildung 40: Profilfahrt der Strecke Süd am 03.07.2014 mittags um 14:52-15:34 Uhr (MEZ), relative Feuchte in grau-gestrichelt, Wasserdampfpartialdruck in dunkelblau. Im Höhenprofil sind die gesetzten Marker als vertikale Linie eingezeichnet..... 61

Abbildung 41: Profilfahrt der Strecke Süd am 03.07.2014 abends um 21:58-22:49 Uhr (MEZ), relative Feuchte in grau-gestrichelt, Wasserdampfpartialdruck in dunkelblau. Im Höhenprofil sind die gesetzten Marker als vertikale Linie eingezeichnet..... 62

Abbildung 42: Bodennahe Lufttemperatur (°C) und Horizontalwindvektoren (m/s) um 12 Uhr MEZ (ca. Sonnenhöchststand) für ein 10 km x 10 km großes Ausschnittgebiet um den Stuttgarter Kessel bei Anströmung aus ONO für den Quadereckpunkt 100 (s. Tab. 5, S. 23). Die Windvektoren wurden zur besseren Lesbarkeit ausgedünnt. Zusätzlich eingezeichnet sind Isolinien der Geländehöhe im 20 m Abstand unter Hervorhebung der Höhen 250, 350 und 450 m ü. NN. Die Achsenwerte markieren die Entfernung in Hektometern bzw. die Gitterindizes im Ausschnittgebiet. Die Südwest-Ecke des Ausschnittgebiets hat die Gauß-Krüger Koordinaten 3508000 / 5400000 (RW / HW). 64

Abbildung 43: Wie Abbildung 42, aber für 22 Uhr MEZ (nach Sonnenuntergang). 65

Abbildung 44: Bodennahe Tagesmaxima der Lufttemperatur (a) und der Gefühlten Temperatur (b) im Auswertebereich bei Anströmung aus ONO für den Quadereckpunkt 100 (s. Tab. 5, S. 23). Zusätzlich eingezeichnet sind Isolinien der Geländehöhe im 20 m Abstand unter Hervorhebung der Höhen 250, 350 und 450 m ü. NN und die Stadtgrenze in schwarz. Die Achsenwerte markieren die Gauß-Krüger Koordinaten des Auswertebereichs..... 66

Abbildung 45: Mittlere jährliche Anzahl an Tagen mit starker Wärmebelastung ($N_{GT_{max} \geq 32^{\circ}C}$) für den Zeitraum 1971–2000 im Auswertebereich. Zusätzlich eingezeichnet sind Isolinien der Geländehöhe im 20 m Abstand unter Hervorhebung der Höhen 250, 350 und 450 m ü. NN und

die Stadtgrenze in schwarz. Die Achsenwerte markieren die Gauß-Krüger Koordinaten des Auswertebiets. 69

Abbildung 46: Projektion der Zunahme der mittleren Anzahl an Tagen mit starker Wärmebelastung im Auswertebiet im Zeitraum von 1971-2000 bis 2031-2060 für das Emissionsszenario A1B. a) 25. Perzentil, b) 75. Perzentil. Zusätzlich eingezeichnet sind Isolinien der Geländehöhe im 20 m Abstand unter Hervorhebung der Höhen 250, 350 und 450 m ü. NN und die Stadtgrenze in schwarz. Die Achsenwerte markieren die Gauß-Krüger Koordinaten des Auswertebiets. 72

Abbildung 47: Projektion der mittleren Anzahl an Tagen mit starker Wärmebelastung im Auswertebiet im Zeitraum 2031-2060 für das Emissionsszenario A1B. a) 25. Perzentil, b) 75. Perzentil. Zusätzlich eingezeichnet sind Isolinien der Geländehöhe im 20 m Abstand unter Hervorhebung der Höhen 250, 350 und 450 m ü. NN und die Stadtgrenze in schwarz. Die Achsenwerte markieren die Gauß-Krüger Koordinaten des Auswertebiets. 74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassen des thermischen Empfindens und der physiologischen Belastung anhand der Gefühlten Temperatur (nach DWD, 2016a; VDI, 2008).	16
Tabelle 2: Thermisches Empfinden und zugehörige physiologische Belastungsstufen anhand der physiologisch äquivalenten Temperatur (PET) (nach Matzarakis und Mayer, 1996).....	17
Tabelle 3: Thermisches Empfinden und zugehörige physiologische Belastungsstufen anhand des Universal Thermal Climate Index (Blazejczyk et al. 2010).....	18
Tabelle 4: Parameter zur Beschreibung der Bebauung für die MUKLIMO_3 Landnutzungsklassen: mittlerer Gebäudegrundflächenanteil γ_b , mittlere Gebäudehöhe h_b in m, mittlerer Wandflächenindex w_b und mittlerer Versiegelungsanteil der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden ν . Die bei der Beschreibung angegebenen Klammerwerte listen die zugeordneten Urban Atlas Landnutzungsklassen.	20
Tabelle 5: Tagesmittelwerte bodennaher Klimaparameter für die in Abbildung 4 illustrierten acht Eckpunktsimulationen der Quadermethode.	22
Tabelle 6: Profildfahrten der Messkampagne Sommer 2013 (Feigenwinter, 2013).....	32
Tabelle 7: Profildfahrten der ersten Messkampagne 02. – 03. Juli 2014 (Stachniuk, 2014).....	37
Tabelle 8: Profildfahrten der zweiten Messkampagne 15. – 17. Juli 2014 (Stachniuk, 2014).	37
Tabelle 9: Übersicht der Lufttemperaturwerte aus den Profilmessungen im Sommer 2013.	50
Tabelle 10: Gemessene und berechnete (Mittelwert über 3 x 3 Gitterpunkte) mittlere jährliche Anzahl an Tagen mit starker Wärmebelastung ($N_{GT_{max} \geq 32}$) für 3 Standorte in Stuttgart für den Zeitraum 1971-2000 sowie ihre berechnete Änderung bis 2031–2060. Die 25. und 75. Perzentil-Werte für die Änderung und die Zukunft basieren auf den 17 Projektionen in Tabelle 11.	68
Tabelle 11: Regionale Klimaprojektionen für das Emissionsszenario A1B mit Angabe der horizontalen Auflösung und der verwendeten Global- und Regionalmodelle. Zusätzlich angegeben ist die regional simulierte Zunahme der mittleren Anzahl an Sommertagen ($\Delta N_{T_{max} \geq 25}$) im Zeitraum von 1971-2000 bis 2031-2060 für den nord-nordwestlich von Stuttgart gelegenen Gebietsausschnitt 48,8°N-49,3°N und 8,7°E-9,4°E (siehe Text).	70

Danksagung

Wir möchten uns bei allen, die zur gelungenen Zusammenarbeit dieser Kooperation beigetragen haben, bedanken.

In erster Linie danken wir der Landeshauptstadt Stuttgart, vertreten durch Dr. Ulrich Reuter, Dr. Rayk Rinke und Rainer Kapp vom Amt für Umweltschutz für die Möglichkeit der Kooperation, die Bereitstellung der Daten und Unterstützung bei den Messkampagnen. So konnte die Kooperation zu beidseitigem Nutzen verwirklicht werden.

Weiterhin möchten wir Dr. Hans-Stefan Bauer von der Universität Hohenheim danken, dass im Sommer 2013 eine Messstation auf dem Gelände der Universität aufgestellt werden konnte. Ebenfalls für die Bereitstellung eines geeigneten Messplatzes, bedanken wir uns beim evangelischen Oberkirchenrat Württemberg, auf dessen Gelände in den Sommermonaten 2013 und 2014 eine Messstation des DWD stehen konnte.

Der Mobilen Messeinheit München (MME) des DWD in München danken wir für die Planung und Durchführung der Profilmfahrten und der temporären Stationsmessungen, der MME Potsdam für die Bereitstellung von Messgeräten.

Daneben gilt unser Dank Hanns Ulrich Kümmerle, der mit einem unübertrefflichen Überblick über das gesamte Projekt, bei der Datenauswertung und Betreuung der Praktikantinnen eine unerlässliche Hilfe war. Bei Iris Feigenwinter und Elwira Stachniuk bedanken wir uns für die jeweiligen Zwischenberichte der Kooperation aus den Jahren 2013 und 2014.

Irmela Schlegel, Dr. Meinolf Koßmann, Prof. Dr. Andreas Matzarakis