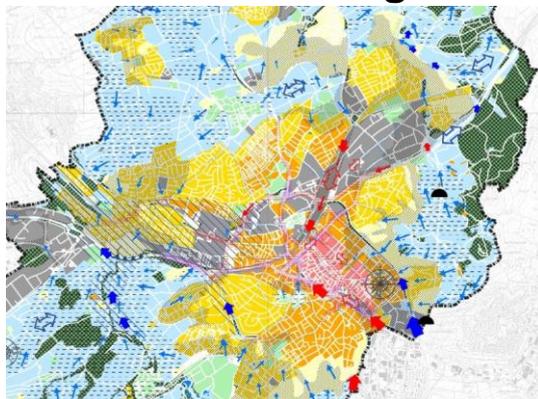




Stadt Reutlingen

Gesamtstädtische Klimaanalyse

unter besonderer
Berücksichtigung der
Luftreinhalteung



gefördert durch das **Ministerium für Verkehr
Baden-Württemberg**



Auftraggeber: Stadtverwaltung Reutlingen
Projektnummer: 1713
Bearbeiter: Dr. rer. nat. Christian Geißler
Dr.-Ing. Frank Dröscher

Dieser Bericht umfasst 137 Textblätter und
63 Karten im Kartenteil

- ◆ Umweltgutachten
- ◆ Genehmigungen
- ◆ Betrieblicher
Umweltschutz

Ingenieurbüro für
Technischen Umweltschutz
Dr.-Ing. Frank Dröscher

Lustnauer Straße 11
72074 Tübingen

Ruf 07071 / 889 - 28 -0
Fax 07071 / 889 - 28 -7
Buero @ Dr-Droescher.de

25. Oktober 2016 / mit Ergänzungen
bis 31. März 2017

Inhaltsverzeichnis

Übersicht über den Kartenanhang	4
Zusammenfassung	6
1 Einleitung	10
1.1 Aufgabenstellung	10
1.2 Untersuchungsgebiet	10
1.3 Vorgehensweise und Inhalt	11
2 Theoretische Grundlagen sowie Datengrundlagen	14
2.1 Rechtliche Regelungen zum Klima auf lokaler Ebene	14
2.2 Stadtklima und Kaltluft	15
2.3 Datengrundlagen	26
3 Meteorologische und lufthygienische Situation im Bereich der Stadt Reutlingen	27
3.1 Klimatische Einordnung des Stadtgebietes von Reutlingen	27
3.2 Windverhältnisse in Reutlingen	28
3.3 Inversionshäufigkeit	30
3.4 Lufthygienische Situation in Reutlingen	32
4 Methodik der Modellierung der lokalklimatischen Verhältnisse	40
4.1 Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21	40
4.2 Das Stadtklimamodell ENVI-Met	43
4.3 Modellvalidierung	45
5 Ergebnisse der lokalklimatischen Modellierungen	50
5.1 Stadtweite Ergebnisse der Kaltluftströmungsberechnungen	50
5.2 Modellierungsergebnisse für einzelne Stadtbereiche	61
6 Klimaanalysekarte	101
6.1 Grundlagen	101
6.2 Legendeneinheiten und Vorkommen	102
6.3 Zusammenfassende Erläuterungen zur Klimaanalysekarte	111

7	Klimatologische Planungshinweiskarte	115
7.1	Grundlagen	115
7.2	Legendeneinheiten	119
7.3	Zusammenfassende Erläuterungen zur Planungshinweiskarte	123
8	Klimaökologische Leitlinien	127
8.1	Erhaltung und Gewinnung von Vegetationsflächen	127
8.2	Sicherung des lokalen Luftaustauschs	128
8.3	Maßnahmen zur Luftreinhaltung	129
8.4	Kleinräumige Maßnahmen auf Quartiersebene	130
9	Quellenverzeichnis	135

Übersicht über den Kartenanhang

Nr.	Inhalt
-	Klimaanalysekarte Stadt Reutlingen
-	Klimatologische Planungshinweiskarte Stadt Reutlingen
-	Übersichtskarte Stadt Reutlingen
1	Temperaturmessfahrten im Vergleich zu den Modellergebnissen KLAM_21
2	- nicht vorhanden -
3	Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe 1h nach Sonnenuntergang (gesamtes Modellgebiet)
4	Volumenstromdichte über gesamte Kaltluflhöhe 4h nach Sonnenuntergang (gesamtes Modellgebiet)
5	Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe 4h nach Sonnenuntergang (gesamtes Modellgebiet)
6	Windgeschwindigkeit in 20 m Höhe 4h nach Sonnenuntergang (gesamtes Modellgebiet)
7	Kaltluftmächtigkeit 1h nach Sonnenuntergang (gesamtes Modellgebiet)
8	Kaltluftmächtigkeit 2h nach Sonnenuntergang (gesamtes Modellgebiet)
9	Kaltluftmächtigkeit 4h nach Sonnenuntergang (gesamtes Modellgebiet)
10	Kaltluftmächtigkeit 8h nach Sonnenuntergang (gesamtes Modellgebiet)
11.1	Teilbereich 1 Innenstadt West – Bodennahe Windgeschwindigkeit 1h nach Sonnenuntergang
11.2	Teilbereich 1 Innenstadt West – Bodennahe Windgeschwindigkeit 2h nach Sonnenuntergang
11.3	Teilbereich 1 Innenstadt West – Bodennahe Windgeschwindigkeit 4h nach Sonnenuntergang
11.4	Teilbereich 1 Innenstadt West – Oberflächentemperatur um 16:00 am 25.06.
11.5	Teilbereich 1 Innenstadt West – Oberflächentemperatur um 22:00 am 25.06.
11.6	Teilbereich 1 Innenstadt West – PMV um 16:00 am 25.06.
11.7	Teilbereich 1 Innenstadt West – PMV um 22:00 am 25.06.
12.1	Teilbereich 2 Innenstadt Ost – Bodennahe Windgeschwindigkeit 1h nach Sonnenuntergang
12.2	Teilbereich 2 Innenstadt Ost – Bodennahe Windgeschwindigkeit 2h nach Sonnenuntergang
12.3	Teilbereich 2 Innenstadt Ost – Bodennahe Windgeschwindigkeit 4h nach Sonnenuntergang
12.4	Teilbereich 2 Innenstadt Ost – Oberflächentemperatur um 16:00 am 25.06.
12.5	Teilbereich 2 Innenstadt Ost – Oberflächentemperatur um 22:00 am 25.06.
12.6	Teilbereich 2 Innenstadt Ost – PMV um 16:00 am 25.06.
12.7	Teilbereich 2 Innenstadt Ost – PMV um 22:00 am 25.06.
13.1	Teilbereich 3 Ringelbach – Bodennahe Windgeschwindigkeit 1h nach Sonnenuntergang
13.2	Teilbereich 3 Ringelbach – Oberflächentemperatur um 16:00 am 25.06.
13.3	Teilbereich 3 Ringelbach – Oberflächentemperatur um 22:00 am 25.06.
13.4	Teilbereich 3 Ringelbach – PMV um 16:00 am 25.06.
13.5	Teilbereich 3 Ringelbach – PMV um 22:00 am 25.06.
14.1	Teilbereich 4 Gönningen – Bodennahe Windgeschwindigkeit 1h nach Sonnenuntergang
14.2	Teilbereich 4 Gönningen – Oberflächentemperatur um 16:00 am 25.06.
14.3	Teilbereich 4 Gönningen – Oberflächentemperatur um 22:00 am 25.06.

14.4	Teilbereich 4 Gönningen – PMV um 16:00 am 25.06.
14.5	Teilbereich 4 Gönningen – PMV um 22:00 am 25.06.
15.1	Teilbereich 5 Oferdingen – Bodennahe Windgeschwindigkeit 1h nach Sonnenuntergang
15.2	Teilbereich 5 Oferdingen – Oberflächentemperatur um 16:00 am 25.06.
15.3	Teilbereich 5 Oferdingen – Oberflächentemperatur um 22:00 am 25.06.
15.4	Teilbereich 5 Oferdingen – PMV um 16:00 am 25.06.
15.5	Teilbereich 5 Oferdingen – PMV um 22:00 am 25.06.
16.1	Teilbereich 6 Betzingen – Bodennahe Windgeschwindigkeit 1h nach Sonnenuntergang
16.2	Teilbereich 6 Betzingen – Oberflächentemperatur um 16:00 am 25.06.
16.3	Teilbereich 6 Betzingen – Oberflächentemperatur um 22:00 am 25.06.
16.4	Teilbereich 6 Betzingen – PMV um 16:00 am 25.06.
16.5	Teilbereich 6 Betzingen – PMV um 22:00 am 25.06.
17.1	Teilbereich 7 Scheibengipfel Nord– Bodennahe Windgeschwindigkeit 1h nach Sonnenuntergang
17.2	Teilbereich 7 Scheibengipfel Nord– Bodennahe Windgeschwindigkeit 2h nach Sonnenuntergang
17.3	Teilbereich 7 Scheibengipfel Nord– Bodennahe Windgeschwindigkeit 4h nach Sonnenuntergang
18.1	Teilbereich 8 Scheibengipfel Süd– Bodennahe Windgeschwindigkeit 1h nach Sonnenuntergang
18.2	Teilbereich 8 Scheibengipfel Süd– Bodennahe Windgeschwindigkeit 2h nach Sonnenuntergang
18.3	Teilbereich 8 Scheibengipfel Süd– Bodennahe Windgeschwindigkeit 4h nach Sonnenuntergang
	- Teilbereich 9 nicht vorhanden -
19.1	Teilbereich 10 Orschel-Hagen – Bodennahe Windgeschwindigkeit 1h nach Sonnenuntergang
19.2	Teilbereich 10 Orschel-Hagen – Oberflächentemperatur um 16:00 am 25.06.
19.3	Teilbereich 10 Orschel-Hagen – Oberflächentemperatur um 22:00 am 25.06.
19.4	Teilbereich 10 Orschel-Hagen – PMV um 16:00 am 25.06.
19.5	Teilbereich 10 Orschel-Hagen – PMV um 22:00 am 25.06.
20.1	Teilbereich 11 Sickenhausen – Bodennahe Windgeschwindigkeit 1h nach Sonnenuntergang
20.2	Teilbereich 11 Sickenhausen – Bodennahe Windgeschwindigkeit 2h nach Sonnenuntergang
20.3	Teilbereich 11 Sickenhausen – Bodennahe Windgeschwindigkeit 4h nach Sonnenuntergang
21.1	Teilbereich 12 Schieferbuckel – Bodennahe Windgeschwindigkeit 1h nach Sonnenuntergang
21.2	Teilbereich 12 Schieferbuckel – Bodennahe Windgeschwindigkeit 2h nach Sonnenuntergang
21.3	Teilbereich 12 Schieferbuckel – Bodennahe Windgeschwindigkeit 4h nach Sonnenuntergang

Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung zeigt wichtige lokalklimatologische Zusammenhänge des Ist-Zustandes im Stadtgebiet von Reutlingen sowie relevanter angrenzender Bereiche mit starkem Bezug zu austauscharmen Hochdruckwetterlagen. Aus Grundlageninformationen zum Stadtgebiet wie Topographie, Bebauung, Landnutzung und Vegetation wurden mittels der meso- bzw. mikroskaligen Modelle KLAM_21 bzw. ENVI-Met Aussagen zu den lokalklimatischen bzw. bioklimatischen sowie lufthygienischen Verhältnissen abgeleitet.

Die Stadt Reutlingen liegt zentral im thermisch belasteten Südwestdeutschland, die Jahresmitteltemperatur liegt für den Zeitraum 1995-2015 mit 10,3 °C deutlich über dem langjährigen Mittel für Deutschland von 8,0 °C. Entsprechend der topographischen Lage von Reutlingen ist die Temperaturamplitude sehr hoch (LUBW-Station RT Pomologie: Tiefsttemperatur -17,6 °C am 02.12.2012; Höchsttemperatur 37,1 °C am 13.08.2003) sowie die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten gering (LUBW-Station RT Pomologie Ø 1,4 m/s; Stuttgart-Echterdingen Ø 2,2 m/s).

Prägend für die lokalklimatischen Verhältnisse in Reutlingen sind die großen Höhenunterschiede und die differenzierten topographischen Situationen, die für Teile Reutlingens außergewöhnliche thermische und lufthygienische Belastungen verursachen, in anderen Teilen Reutlingens jedoch die Bewohner begünstigen.

Als wesentliches Ergebnis der Untersuchungen wurden thematische Karten erstellt, die die Modellergebnisse abstrahiert darstellen (Klimaanalysekarte) sowie darauf aufbauend eine Aufbereitung für die räumliche Planung zeigen (Klimatologische Planungshinweiskarte).

Basierend auf den in diesen Karten dargestellten Prozessen, Wertigkeiten und Empfindlichkeiten kann ein Beitrag zum klima- und immissionsökologischen Ziel der Sicherung, Wiederherstellung und Entwicklung wichtiger Landschafts- und Siedlungsräume zur Verbesserung bzw. Erhaltung thermisch und lufthygienisch günstiger Verhältnisse geleistet werden. Damit kann ein Beitrag zur gesunden Wohn- und Lebensverhältnissen bei zunehmend extremen Wärmebelastungen geleistet werden.

Der bestehende Siedlungsdruck und die vom Gesetzgeber geforderte Stärkung der Innenentwicklung in Städten erfordern innovative Konzepte in der Siedlungsentwicklung. Angesichts der zweifelsfrei vorliegenden klimaökologischen Belastungen kommt es dabei auf eine geringstmögliche Beeinträchtigung klima- und immissionsökologisch bedeutsamer (Teil-)Bereiche des Ausgleichs- und Wirkungsraumes im Stadtgebiet Reutlingen zu achten.

Bei größeren oder mehrstufigen Vorhaben, welche zeitlich gestaffelt umgesetzt werden sollen (z.B. Bau mehrerer Hochhäuser oder Entwicklung ganzer Quartiere), empfiehlt sich eine Betrachtung der Vorhaben als Ganzes, da nur so mögliche klimaökologische Auswirkungen sachgerecht beurteilt und Maßnahmen zur Minderung negativer Auswirkungen sinnvoll entwickelt werden können.

Generell kann bei der Betrachtung der lokalklimatischen Situation in Reutlingen zwischen vier Bereichen differenziert werden, die sich wesentlich bezüglich thermischen und lufthygienischen Belastungssituationen voneinander unterscheiden.

Bereich 1: Gönningen / Bronnweiler

Die im Wiesaztal gelegenen Reutlinger Stadtteile stellen bzgl. thermischer und lufthygienischer Belastung die am meisten begünstigten Bereiche im Stadtgebiet von Reutlingen dar. Durch die Höhenlage und die Art der Bebauung entwickelt sich kein ausgeprägter städtischer Wärmeineffekt. Es besteht auch keine außergewöhnliche Belastung durch Emissionen aus Straßenverkehr, Hausbrand oder Industrie.

Zudem entwickelt sich im oberen Wiesaztal durch die umgebenden Freiflächen und die mäßigen bis starken Hangneigungen ein leistungsstarker Kaltluftstrom, der wegen der durchgehenden Neigung des Wiesaztales und der geringen Oberflächenrauigkeit auch lange anhält. Mit einer mittleren Windgeschwindigkeit von z.T. deutlich > 2 m/s können Gönningen und Bronnweiler trotz Tallage ohnehin als gut durchlüftet gelten. Die thermische Belastung ist vergleichsweise gering.

Bereich 2: Ohmenhausen sowie nördliche Stadtteile

Im Bereich um Ohmenhausen sowie den nördlichen Stadtteilen (z.B. Sickenhausen, Deger-schlacht) herrschen vergleichbare lokalklimatische Bedingungen. Sämtliche dieser Stadtteile haben weitgehend ähnliche Einwohnerzahlen und Flächenausdehnungen. Aufgrund der geringen Größe der Stadtteile und dem generellen Vorhandensein größerer Freiflächen zwischen den bebauten Bereichen sowie deren z.T. hohem Grünanteil bildet sich auch hier kein ausgeprägter Wärmeineffekt aus. Die lufthygienische Belastung konzentriert sich auf größere Verkehrswege wie z.B. die L 378 in Rommelsbach oder die L 384 in Ohmenhausen.

Da die betreffenden Stadtteile sich generell in topographischen Höhenlagen (ca. 350 m bis 400 m ü.NN) und sich in verhältnismäßig flachen Bereichen befinden, liegen sie nicht in den Fließwegen oder sind nicht Ziel relevanter Kaltluftströme, obgleich die sie umgebenden Freiflächen z.T. wesentliche Kaltluftströme speisen. Im Fall Ohmenhausen ist dies z.B. ein Teil des Breitenbachtalsystems, in den nördlichen Stadtteilen speisen die umgebenden Freiflächen untergeordnete, dem Neckartal zufließende Systeme (z.B. Erlenbachtal).

Generell können Ohmenhausen sowie die nördlichen Stadtteile als mäßig bis gut durchlüftet bzw. gering bis mäßig thermisch belastet gelten, die mittleren Windgeschwindigkeiten betragen ca. 2,2 bis 2,5 m/s.

Bereich 3: Randbereiche der Kernstadt

Die Randbereiche der Kernstadt umfassen alle Stadtteile, die sich in direktem Bebauungszusammenhang mit der Kernstadt befinden sowie zur Kernstadt gehörende Teile an den das Echaztal umgebenden Hängen außerhalb der Talverflachungen.

Diese Bereiche, zu denen die Römerschanze, Voller Brunnen, Storlach, Burgholz, Ringelbach, „In Laisen“ oder „Hohbuch“ sowie Stadtbezirke bzw. Stadtteile wie Betzingen oder Sondelfingen gehören, befinden sich bereits im Verbund der Kernstadt und profitieren teilweise von ihrer Siedlungsrandlage (z.B. Teile von Betzingen oder das Ringelbachgebiet). Teilweise sind weiter Richtung Stadtkern gelegene Bereiche belastet und es besteht ein Wärmeineffekt (z.B. Teile von Ringelbach, „Voller Brunnen“, „In Laisen“). Auch sind in diesen Bereichen oft Verkehrswege hoher Belastung (z.B. B 28, B 464) zu finden.

Eine Gunst- oder Ungunstlage in den beschriebenen Bereichen hängt stark mit der topographischen Situation, der Bebauungsdichte, dem Vegetationsanteil im Quartier sowie der Lage relativ zu großen Kaltluftströmen (z.B. Breitenbachtal) oder flachen Hangwindssystemen (z.B. Georgenberg oder Scheibengipfel) sowie deren Eindringtiefe in den Siedlungsraum zusammen.

Generell können die Randbereiche der Kernstadt als mäßig durchlüftet und mäßig bis stark thermisch belastet gelten. Die mittleren Windgeschwindigkeiten betragen ca. 1,8 bis 2,2 m/s.

Bereich 4: Kernstadt am Echazverlauf

Die Kernstadt in der deutlichen Verflachung des Echaztales zwischen der Stadtgrenze zu Eningen u.A./Pfullingen über den Hauptbahnhof und den Bereich südlich der Schieferstraße hin zu den Industrie- bzw. Gewerbebereichen von Betzingen ist der am stärksten thermisch und lufthygienisch belastete Teil des Stadtgebietes von Reutlingen. Hier konzentrieren sich starke Emissionen v.a. aus dem Straßenverkehr, dichte Bebauung, ein hoher Versiegelungsgrad sowie eine lokalklimatisch sehr ungünstige topographische Lage auf engstem Raum. Mit Abstand die höchsten Temperaturen innerhalb des Stadtgebietes sowie die höchsten Schadstoffbelastungen sind daher hier zu verzeichnen.

Generell ist der genannte Bereich der Kernstadt mäßig bis sehr schlecht durchlüftet und stark thermisch belastet. Die mittleren Windgeschwindigkeiten betragen größtenteils < 1,8 m/s (Station LUBW RT-Pomologie 1,4 m/s) im Jahresmittel.

Durch die Pfortenlage zwischen topographischen Erhöhungen, wie dem Lerchesberg sowie dem Georgenberg im Westen und dem Scheibengipfel sowie der Achalm im Osten, ist der niedrig gelegene Kernstadtbereich oftmals von überregionalen Luftbewegungen abgeschnitten. Dadurch ergibt sich eine außergewöhnlich starke Abhängigkeit einerseits von lokalen Windsystemen wie kleineren Hangabwinden sowie andererseits von der Wirksamkeit der großen Bergwindssysteme wie dem Echaztälern und dem Arbachtälern Kaltluftstrom.

Die im Kapitel 8 dargestellten Klimaökologischen Leitlinien beziehen sich daher im Wesentlichen auf mögliche Verbesserungen oder Handlungsoptionen in diesem Teil von Reutlingen. Der stärkste Wärmeinseleffekt ist im Bereich der Altstadt zu erwarten, wo ein hoher Versiegelungsgrad und eine bebauungsbedingt schlechte Durchlüftung zusammenwirken. Östlich davon gelegene Bereiche profitieren teilweise von den Hangabwinden des Scheibengipfels bzw. der Achalm.

Die Kaltluftströme aus dem Arbachtal werden an der Stadtgrenze Eningen u.A./Pfullingen/Reutlingen aufgrund der ansteigenden Rauigkeit in größere Höhen verdrängt und überströmen in der Folge die Bebauung. Auch wenn die Bebauung der Kernstadt im Echaztalgrund im Wesentlichen von dem Kaltluftstrom aus dem Arbach- bzw. Echaztal nur überströmt wird, profitiert sie von dem - bei ausgeprägten Strahlungswetterlagen - ca. 1 - 3 Stunden nach Sonnenuntergang einsetzenden mächtigen Kaltluftstrom, der die städtische Bebauung überstreicht und durch vertikale Durchmischung in der bodennahen Reibungsschicht für Abkühlung sorgt.

Bei winterlichen austauscharmen Wetterlagen bildet sich jedoch im Bereich der Kernstadt eine Inversion aus (Kaltluftsee) so das vertikale Durchmischung und Luftaustausch nur sehr eingeschränkt möglich sind.

Insgesamt ist der Kaltluftstrom aus dem Arbach- bzw. Echaztal für Klima und Lufthygiene in weiten Teilen der Kernstadt von Reutlingen bis nach Betzingen jedoch von überragender Bedeutung und muss unbedingt erhalten bleiben. Beeinträchtigungen im Zu- und Abstrom sind zu vermeiden.

Ingenieurbüro Dr. Dröscher



Dr.-Ing. Frank Dröscher



Dr. rer. nat. Christian Geißler

Öffentlich bestellter und vereidigter
Sachverständiger für Immissionsschutz
- Ermittlung und Bewertung von
Luftschadstoffen, Gerüchen und Geräuschen

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Das Schutzgut Klima/Luft ist ein wichtiger Teilaspekt der räumlichen Planung sowie Bestandteil der Abwägung in den verschiedenen Ebenen der Bauleitplanung und Umweltverträglichkeitsprüfung.

Flächenbezogenen Fachinformationen zum Schutzgut Klima/Luft kommt eine entscheidende Bedeutung bei der Beurteilung des Schutzgutes und der sachgerechten Bewertung von Eingriffen zu, insbesondere wenn – wie im Fall der Stadt Reutlingen – lokale Be- bzw. Überlastungen bezüglich thermischem Komfort (z.B. Innenstadt) oder Lufthygiene (z.B. Lederstraße) bereits bekannt sind.

Ziel dieser Untersuchung ist demzufolge, die lokalklimatischen Verhältnisse sowie deren Bezug zur Lufthygiene in Reutlingen zu ermitteln, zu beschreiben und zu bewerten sowie darüber hinaus Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zu erarbeiten und Handlungsoptionen zur Erhaltung und Verbesserung der thermischen sowie lufthygienischen Verhältnisse abzuleiten.

Im Auftrag der Stadt Reutlingen wurde durch das Ingenieurbüro Dr. Dröscher, Tübingen, die vorliegende gesamtstädtische Klimaanalyse erstellt. Die wesentlichen Ergebnisse konzentrieren sich auf das Stadtgebiet von Reutlingen, während die zugrunde liegenden Modellierungen auch Teile des Umlandes umfassen (siehe Karte(n)).

Im Fokus der Untersuchung stehen austauscharme, sommerliche Hochdruckwetterlagen, in denen generell hohe thermische und lufthygienische Belastungen zu erwarten sind. Während dieser z.T. lang andauernden Wetterlagen tragen im wesentlichen Kalt- und Frischluftströme aus dem Umland zum Abbau thermischer und lufthygienischer Belastungen bei.

Ergebnis der Klimaanalyse sind u.a. eine Klimaanalysekarte sowie eine Planungshinweiskarte nach VDI 3787 Blatt 1, welche einerseits einen Überblick über die im Stadtgebiet ablaufenden klimaökologischen Prozesse sowie zu den Lageverhältnissen von Ausgleichs- und Wirkungsraum bieten und andererseits flächenhafte Hinweise für die räumliche Planung über die Darstellung von Wertigkeiten und Empfindlichkeiten verschiedener Teilräume geben.

1.2 Untersuchungsgebiet

Das Stadtgebiet von Reutlingen sowie die direkte Umgebung sind geprägt von der Lage am Nordrand der schwäbischen Alb mit z.T. großen Höhenunterschieden auf engem Raum sowie ausgedehnten flacheren Bereichen im Übergang zum Neckartal.

Das Stadtgebiet bedeckt eine Fläche von ca. 87 km², wobei die Nord-Süd-Erstreckung (max. ca. 18 km) deutlich größer ist als die West-Ost-Erstreckung (max. ca. 7 km). Die höchste Erhebung bildet der Roßberg (ca. 870 m ü.NN) ganz im Süden, den niedrigsten Bereich das Neckartal bei Reutlingen-Mittelstadt (ca. 290 m ü.NN) im Norden.

Abbildung 1 zeigt das Relief im Bereich Reutlingen /5/. Abbildung 2 zeigt die wesentlichen Landnutzungseinheiten im Stadtgebiet von Reutlingen /5/. Karte 0 im Kartenteil gibt einen Überblick über das Stadtgebiet von Reutlingen auf Basis der TK10 /5/.

1.3 Vorgehensweise und Inhalt

Ziel der vorliegenden Stadtklimaanalyse ist es, die meteorologischen, lokalklimatischen und lufthygienischen Zusammenhänge im Bereich des Stadtgebietes von Reutlingen zu beschreiben, zu bewerten und darzustellen und in Form einer Klimafunktions- sowie einer Planungshinweiskarte der Stadt als Erkenntnisquelle für die räumliche Planung zur Verfügung zu stellen.

Einen kurzen Einblick in (planungsrechtliche) Grundlagen zum Thema Stadtklima gibt Kapitel 2.1. Einen Überblick über klimatologische Grundlagen in Bezug auf Stadtklima sowie Kaltluftentstehung und -abfluss gibt Kap. 2.2. Die verschiedenen Informationsquellen zu den meteorologischen, lokalklimatischen und lufthygienischen Verhältnissen beziehungsweise zu den räumlichen Daten sowie die Vorgehensweisen, wie diese ermittelt wurden, nennt Kap. 2.3.

In Kapitel 3 wird die meteorologische und lufthygienische Situation anhand vorliegender Daten beispielsweise von Messstationen und Veröffentlichungen (z.B. Luftreinhalteplan Reutlingen) beschrieben und bewertet.

Kapitel 4 gibt zunächst einen Einblick in die wesentlichen Grundlagen der verwendeten Modelle KLAM_21 (Kap. 4.1) sowie ENVI-Met (Kap. 4.2) und zeigt die Modellparameter. Im Weiteren stellt Kap. 4.3 die Ergebnisse der Messungen (Messung Marienkirche, Temperaturmessungen) dar.

In Kapitel 5 sind die lokalklimatischen Modellierungen für das gesamte Stadtgebiet (KLAM_21) sowie der mikroklimatischen Modellierungen für ausgesuchte Spezialgebiete (ENVI-Met) beschrieben. Generell richten sich wesentliche Parameter für die mikroklimatischen Modellierungen nach den Ergebnissen der stadtweiten Modellierungen.

Die Klimaanalysekarte sowie die Planungshinweiskarte in Kapitel 6 und Kapitel 7 bilden die Synthese aus den Kapiteln 3 bis 5.

Im Kapitel 8 werden, aufbauend auf den vorangegangenen Kapiteln, klimaökologische Leitlinien vorgestellt, die als Handreichung für die Stadt-, Verkehrs- und Grünplanung dienen können.

Kapitel 0 bildet ein Fazit der Betrachtungen und Analysen.

Hinweis zu den im Gutachten dargestellten sowie beigelegten Karten

Die hier erfolgten Interpretationen sämtlicher Karten in dieser Gesamtstädtischen Klimaanalyse beziehen sich jeweils auf den mesoskaligen Originalmaßstab. Der fachbezogene Inhalt der Karten sowie die Interpretationen daraus beruhen darüber hinaus auf einer genauen Kenntnis

- der verwendeten Grundlagendaten wie z.B. Gelände- oder Gebäudemodell
- der Kenntnis über Möglichkeiten und Grenzen der verwendeten Klimamodelle
- der Kenntnis über grundlegende lokalklimatologische Prozesse und Prozesszusammenhänge

Interpretationen kleinräumiger Details, die über die Interpretationen dieser Klimaanalyse hinausgehen, sind grundsätzlich nicht sachgerecht.

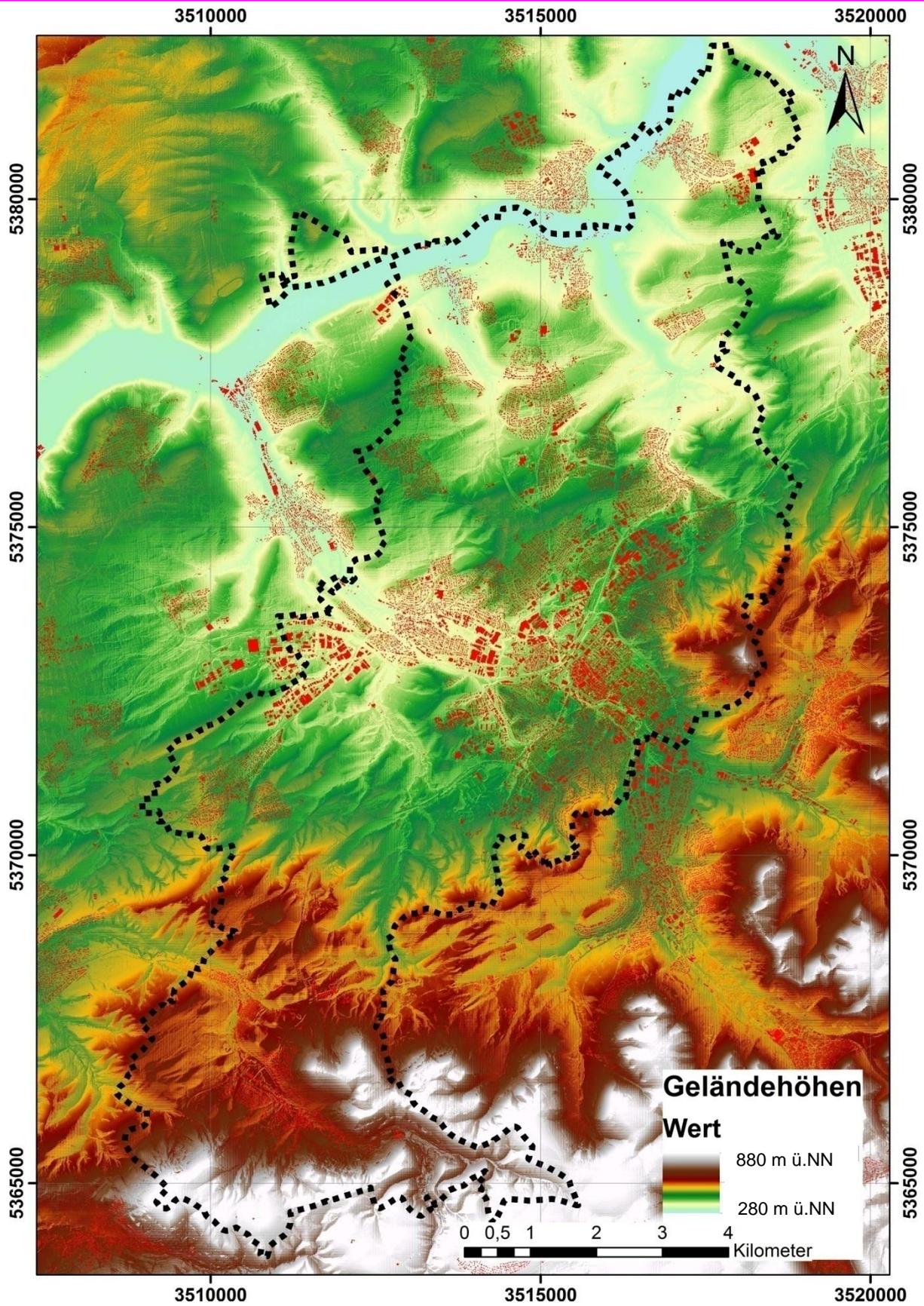


Abbildung 1: Geländehöhen im Untersuchungsgebiet (Stadtgebiet von Reutlingen = gestrichelte Linie) /5/

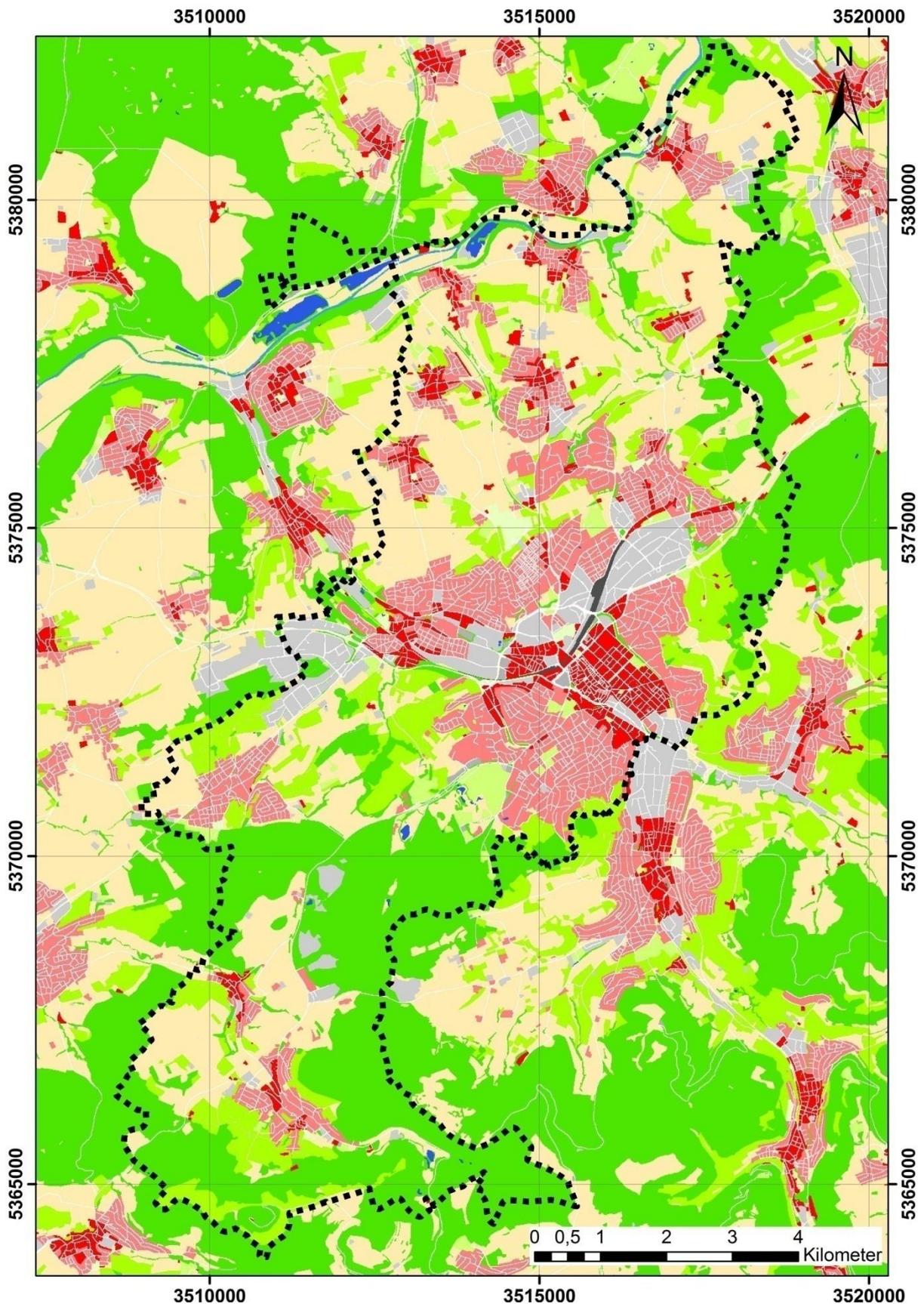


Abbildung 2: Landnutzung im Stadtgebiet von Reutlingen (gestrichelte Linie; grün = Wald hellgrün=Streuobstwiesen, beige = Landwirtschaft, grau = Industrie und Gewerbe, hellrot = Stadt, dunkelrot = Innenstadt) /5/

2 Theoretische Grundlagen sowie Datengrundlagen

2.1 Rechtliche Regelungen zum Klima auf lokaler Ebene

Für die Beurteilung von Eingriffen bzw. Nutzungsänderungen von Flächen auf lokalklimatische Parameter existieren derzeit keine Gesetze oder Verordnungen, die Grenz- oder Schwellenwerte festlegen würden.

Im Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) wird jedoch explizit der Schutz klimawirksamer Bereiche gefordert.

§ 1 (3) Nr. 4 BNatSchG

„Zur dauerhaften Sicherung der Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts sind insbesondere Luft und Klima auch durch Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege zu schützen; dies gilt insbesondere für Flächen mit günstiger lufthygienischer oder klimatischer Wirkung wie Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiete oder Luftaustauschbahnen; dem Aufbau einer nachhaltigen Energieversorgung insbesondere durch zunehmende Nutzung erneuerbarer Energien kommt eine besondere Bedeutung zu“

Die vorbereitende Bauleitplanung bietet darauf aufbauend die Möglichkeit, Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiete sowie Kalt- bzw. Frischluftleitbahnen als Flächen, die der Anpassung an den Klimawandel dienen, auszuweisen.

§ 5 (2) Nr. 2c BauGB

Im Flächennutzungsplan kann „die Ausstattung des Gemeindegebiets mit Anlagen, Einrichtungen und sonstigen Maßnahmen, die der Anpassung an den Klimawandel dienen“, dargestellt werden.

In der verbindlichen Bauleitplanung kann z.B. durch folgenden Grundsatz der Bauleitplanung insbesondere über die Festsetzung der Art und des Maßes der baulichen Nutzung, der Baugrenzen und über örtliche Bauvorschriften Einfluss auf das Lokalklima genommen werden.

§ 1 (5) S. 2 BauGB (Auszug)

Die Bauleitpläne „sollen dazu beitragen, eine menschenwürdige Umwelt zu sichern, die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln sowie den Klimaschutz und die Klimaanpassung, insbesondere auch in der Stadtentwicklung, zu fördern, sowie die städtebauliche Gestalt und das Orts- und Landschaftsbild baukulturell zu erhalten und zu entwickeln.“

Folgender Grundsatz kann – neben der Festsetzung von Grün- und Freiräumen – dazu beitragen, ein gesundes Kleinklima im Baugebiet und darüber hinaus zu fördern:

- Erhalt von Luftaustauschbahnen bzw. Leitbahnen (z.B. durch eine Höhenbegrenzung baulicher Anlagen gemäß § 9 (1) Nr. 3 BauGB oder durch eine zur Leitbahn parallele Bebauung beispielsweise unter Zuhilfenahme von Baulinien und Baugrenzen (§ 23 BauNVO)).

Verschiedene Leitfäden und Richtlinien (siehe Kap. 0) geben darüber hinaus Handlungsempfehlungen, die sich mit dem Prozesssystem **Wirkungsraum** (bebaute bzw. thermisch oder lufthygienisch belastete Bereiche) / **Ausgleichsraum** (Freiräume mit Kalt- bzw. Frischluftproduktion) beschäftigen (siehe Kap. 2.2.1).

2.2 Stadtklima und Kaltluft

2.2.1 Planungsrelevanz von Kaltluftentstehung und -abfluss

Kaltluft besitzt – je nachdem ob sie fließt oder stagniert – unterschiedliche Eigenschaften. Diese Eigenschaften können bewertbare Funktionen erfüllen. Die Eigenschaft „Luftaustausch“, die fließender Kaltluft zukommt, kann für eine wärme- oder lufthygienisch belastete Siedlung die Funktion der Belüftung erfüllen. Ob und in welchem Maße diese Funktion erfüllt wird, hängt von zahlreichen Parametern ab, z.B.:

- Fließgeschwindigkeit der Kaltluft (reguliert z.B. über Gefälle und Rauigkeit der Bodenoberfläche)
- Stabilität der Kaltluft
- mittlere Höhe der Kaltluftschicht

Bei Kaltluftentstehung und -abfluss können Ausgleichs- und Wirkungsraum voneinander unterschieden werden. Der Ausgleichsraum (auch Herkunftsraum) ist das Gebiet, in dem die Kaltluft entsteht. Der Wirkungsraum ist der Bereich, in den aus dem zugehörigen Ausgleichsraum (Kaltlufteinzugsgebiet) Kaltluft transportiert wird (siehe Abbildung 3).

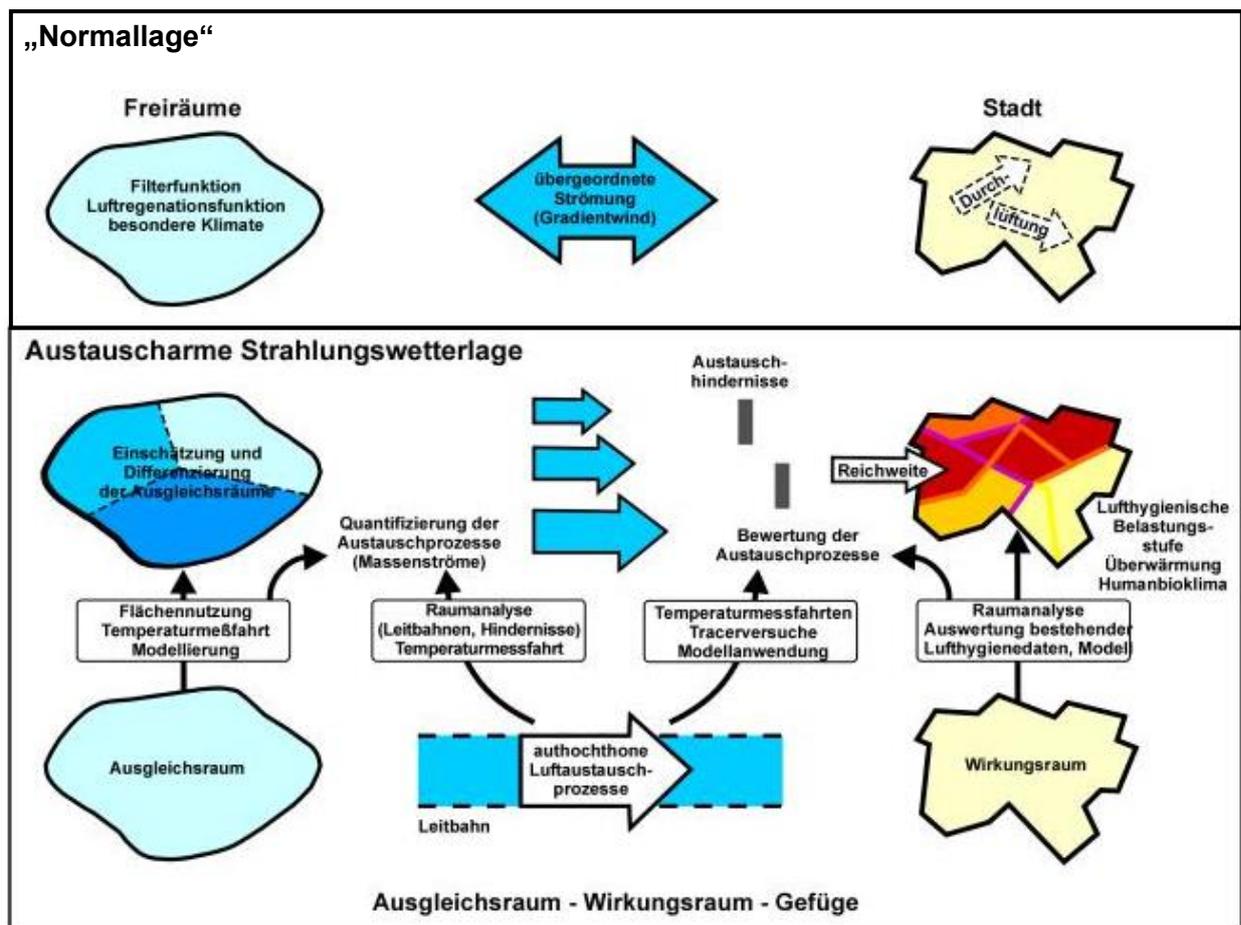


Abbildung 3: Konzeption zur Analyse der klima- und immissionsökologischen Funktionen zum Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüge

In welchem räumlichen Umfang die abfließende Kaltluft einen Wirkungsraum beeinflusst (z.B. durch Eindringtiefe einer spürbaren Luftströmung in den Siedlungsbereich), bestimmen ihre Strömungseigenschaften (z.B. Intensität) und die Struktur (z.B. durch Rauigkeit der Bodenoberfläche) der Kaltluftbahn. Erstere hängt von der Temperaturverteilung, der Kaltluftmächtigkeit, dem daraus resultierenden Volumenstrom und letztere von der Art der Oberflächenstrukturen im Wirkungsraum ab.

Inwieweit die Kaltluft als humanbioklimatisch positiv oder negativ zu bewerten ist, hängt von der Situation innerhalb des Wirkungsraumes und den klimatisch/lufthygienischen Erfordernissen ab /22/:

- Auswirkung der Kaltluft zur Abkühlung (thermischer Ausgleich)
- Auswirkung des Kaltluftflusses zum Abtransport/Durchmischung von Abluft (lufthygienische Entlastung)
- Vermeidung einer stärkeren Abkühlung (thermischer Schutz)

2.2.2 Kaltluftentstehung

Die Entstehung von bodennaher Kaltluft ist insbesondere bei **austauschschwachen Hochdruckwetterlagen** und geringen Luftdruckgegensätzen für das Stadtklima relevant. Infolge einer intensiven Einstrahlung, einer kleinen Albedo (Maß für das Rückstrahlvermögen von diffus reflektierenden, also nicht selbst leuchtenden Oberflächen; Schnee = 0,9; Asphalt = 0,15) und einer guten Wärmespeicherfähigkeit erwärmen sich bei vorwiegend geringer Bewölkung tagsüber die Siedlungsflächen gegenüber dem unbebauten Umland stark und bilden sogenannte **Wärmeinseln**. Bei solchen Strahlungswetterlagen dominieren **niedrige Windgeschwindigkeiten**, die kaum zu einer effektiven horizontalen und vertikalen Durchmischung der bodennahen Luftschichten einer Stadt beitragen können. Eine **erhöhte Konzentration von luftgetragenen Schadstoffen** kann die Folge solcher antizyklonalen bzw. Hochdruck-Wetterlagen sein /22/.

Eine **Ausgleichsfunktion** können in diesem Fall vor allem in reliefiertem Gelände **nächtliche Kaltluftströme** aus dem Umland übernehmen. Sie entstehen am Übergang zur Nacht, wenn die bodennahe Luftschicht im Freiland durch die langwellige Ausstrahlung stärker abkühlt als über den überhitzten Siedlungsflächen. Eine fehlende bzw. geringe Bewölkung verstärkt diesen Effekt, da die Gegenstrahlung entfällt. Bei dieser Konstellation hat die abendliche Abkühlung bodennaher Luft eine Umkehrung der in der freien Atmosphäre vorherrschenden Temperaturschichtung zur Folge: kalte, schwerere Luft liegt unter Warmluft und lässt eine vertikal stabile Schichtung entstehen. Bei einer solchen **Inversionslage** ist der vertikale Temperaturgradient negativ, d.h. die Temperatur nimmt mit der Höhe in der untersten Atmosphärenschicht zu.

Gerade in winterlichen Witterungslagen ergeben sich derartige stabile Schichtungsverhältnisse, die den Luftaustausch erschweren bzw. nahezu unmöglich machen, so dass sich Luftschadstoffe (Verkehr, Hausbrand) anreichern und zu Grenzwertüberschreitungen führen können.

In den die Kaltluft überlagernden Luftschichten liegt dagegen eine normale Temperaturschichtung vor, die durch eine Abnahme der Temperatur mit der Höhe gekennzeichnet ist. Die obere Inversionsgrenze (vgl. Abbildung 4) unterliegt dabei i.d.R. erheblichen Schwankungen von Zehnern bis Hunderten von Metern. Zwischen der oberen Inversionsgrenze und der oberen Kaltluftgrenze ist dabei ein nicht klar abgrenzbarer Übergangsbereich mit einem gegen Null tendierenden **Temperaturgradienten** zwischengeschaltet (Isothermie, vgl. Abbildung 4).

Bodeninversionen in ebenem Gelände sind weniger geeignet, dynamische Luftaustauschprozesse in Gang zu setzen (= Flurwindssystem, welches lediglich durch den Temperaturunterschied induziert wird). In reliefiertem Gelände kann dagegen der **Kaltluftabfluss** entsprechend dem natürlichen **Gefälle** zu einer lokalen Erhöhung der Windgeschwindigkeit in Bodennähe führen. Das Windgeschwindigkeitsmaximum in der Abflussschicht wird i.d.R. auf der Hälfte der für die obere Kaltluftgrenze anzunehmenden Höhe erreicht (siehe auch Kap. 2.2.3).

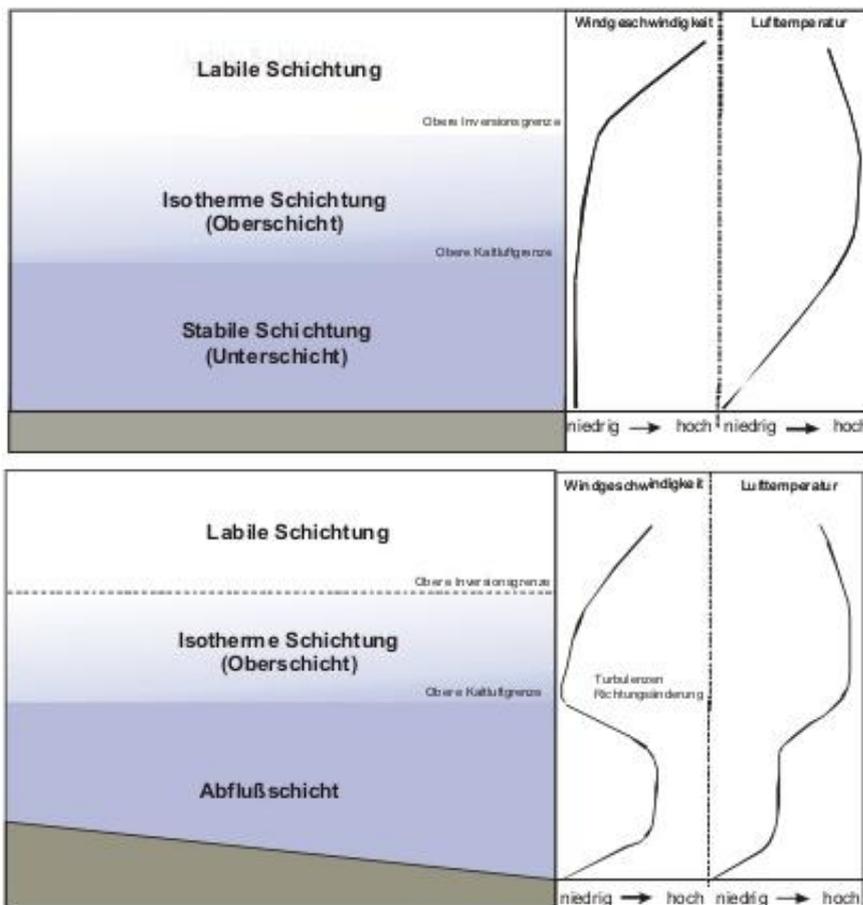


Abbildung 4: Bodeninversion in ebenem und reliefiertem Gelände /22/

2.2.3 Kaltlufthöhe und Strömungsgeschwindigkeit

Die bodennahe Temperaturverteilung bedingt horizontale Luftdruckunterschiede, die Auslöser für **lokale thermisch induzierte Windsysteme** wie Kaltluftabflüsse aber auch Flurwinde, Hangwinde oder Berg-Tal-Winde sind.

Nächtliche Temperaturunterschiede, die sich z.B. zwischen Siedlungsräumen und vegetationsbedeckten Freiflächen bzw. dem Umland einstellen, sind u.a. der Auslöser dieser Ausgleichssysteme.

An den geeigneten Flächen setzt sich außerdem abgekühlte und damit schwerere Luft in Richtung zur tiefsten Stelle des Geländes in Bewegung. So können z.B. an Hängen nächtliche **Kaltluftabflüsse** (Abbildung 5) und in Tälern Kaltluftansammlungen bzw. **Kaltluftseen** (Abbildung 6) entstehen, deren Mächtigkeit mehrere Zehner Meter betragen kann (/22/, /23/, /26/).

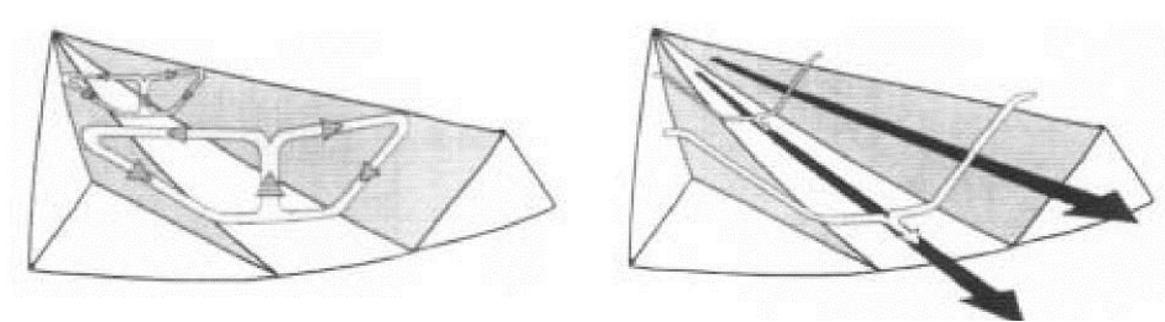


Abbildung 5: Theoretische Luftströmungsverhältnisse zwischen spätem Abend und erster Nachthälfte (Hangabwinde) (linke Abbildung); Theoretische Luftströmungsverhältnisse in der zweiten Nachthälfte (Hangab- und Bergwinde) (rechte Abbildung) /22/

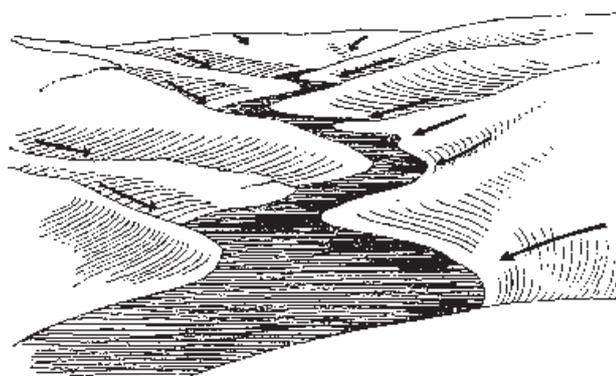


Abbildung 6: Kaltluftabfluss und Bildung einer mächtigen Kaltluftschicht (sog. Kaltluftsee) in reliefiertem Gebiet /22/

Die **Geschwindigkeit der Kaltluftabflüsse** wird im Wesentlichen durch vier Faktoren bestimmt:

- Das größere Temperaturdefizit der sich nächtlich abkühlenden Luft zur umgebenden, relativ wärmeren Luft *erhöht* die Geschwindigkeit.
- Eine Geländeneigung von $> 1^\circ$ *erhöht* die Geschwindigkeit.
- Eine hohe Rauigkeit der überströmten Fläche an der Unterseite der Kaltluftschicht *senkt* die Geschwindigkeit.
- Eine (entgegengesetzte) überörtliche Luftströmung an der Oberseite der Kaltluftschicht *senkt* die Geschwindigkeit.

Dies hat zur Folge, dass die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb der Kaltluftschicht bzw. des Kaltluftpakets in einigen Metern Höhe erreicht werden (Abbildung 7). Die **Strömungsgeschwindigkeiten** nehmen im Laufe einer Strahlungsnacht jedoch kontinuierlich ab. Das Maximum der Windgeschwindigkeit wird in der Abflussschicht nach empirischen Studien durchschnittlich 1 bis 2 Stunden nach Eintreten des Bergwindes erreicht /31/.

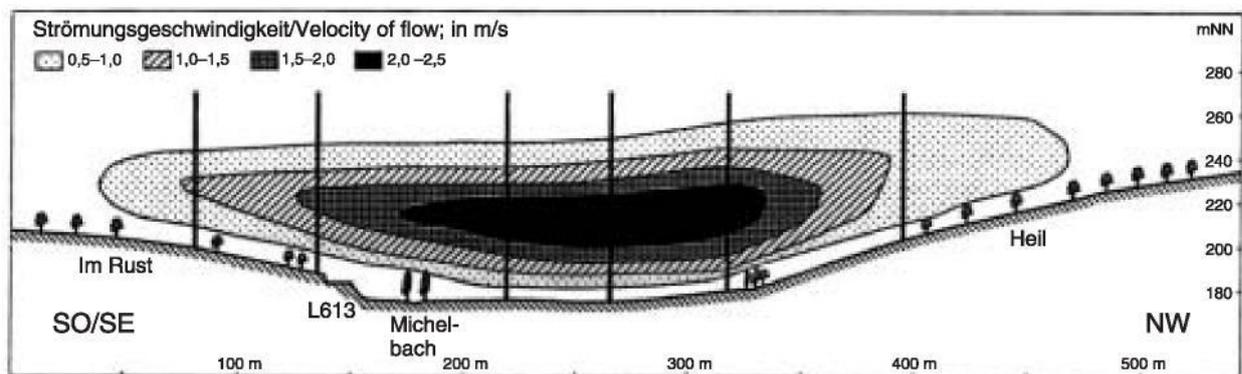


Abbildung 7: Querschnitt durch die talwärtige Geschwindigkeitskomponente eines Kaltluftstromes, dargestellt anhand von Isotachen /22/

In der Umgebung von bebauten Gebieten bilden sich zusätzlich **Flur- / Strukturwinde** aus, die auf Temperatur- und damit Luftdruckgegensätzen beruhen. Da diese Phänomene oft nur schwach ausgeprägt sind, ist hierbei davon auszugehen, dass es gegenüber dem orographisch begründeten Phänomen „Kaltluftabfluss“ deutlich untergeordnet ist.

Die nächtlichen **landnutzungstypischen Temperaturunterschiede** beginnen sich schon kurz nach Sonnenuntergang herauszubilden und können die ganze Nacht über andauern. Da jede Landnutzung unterschiedlich effektiv Kaltluft „produziert“ (siehe Tabelle 1) und jeder Bereich in einem definierten Gebiet unterschiedlich geneigt ist, bildet sich in den ersten Minuten das lokale Windsystem aus, welches sich im Laufe der Nacht immer weiter ausprägt. Je nach topographischen Gegebenheiten kommt das System in Teilbereichen (z.B. durch Auffüllen von Senken) im späteren Verlauf der Nacht zum Stillstand oder wird durch eine überörtliche Strömung überprägt.

Tabelle 1: Landnutzungstypische nächtliche Kaltluftproduktionsraten (u.a. nach /26/)

Landnutzungstyp	Kaltluftproduktionsrate in $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
Grünland, Ackerland	15 - 25
Waldgebiete	12 - 15
Parks, Gärten, gemischte Freiflächen	8 - 15
Siedungsgebiete	0 - 1
Wasserflächen	0

2.2.4 Kaltluft-Volumenstrom

Da die **thermische „Ausgleichsleistung“** eines bestimmten Bereiches nicht allein durch die Geschwindigkeit der Kaltluftströmung, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit (d.h. durch die *Höhe* der Kaltluftschicht) mitbestimmt wird, gibt der sog. Kaltluft-Volumenstrom Auskunft über die Menge der abfließenden Kaltluft.

Unter dem Begriff Kaltluft-Volumenstrom wird vereinfacht das **Produkt** aus der mittleren **Fließgeschwindigkeit** der Kaltluft, ihrer **vertikalen Ausdehnung** (Schichthöhe) und der **horizontalen Ausdehnung** des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite) verstanden.

Somit ist der Kaltluft-Volumenstrom diejenige Menge an Kaltluft, die in jeder Sekunde durch den Strömungsquerschnitt beispielsweise eines flächenhaften Hanganwinds, des Kaltluftstroms in einer **Leitbahn** oder durch eine Rasterzelle in einem Rechenmodell (sog. spezifischer Kaltluft-Volumenstrom bzw. Kaltluft-Volumenstromdichte) fließt und ist folglich ein Maß für den **Zustrom von Kaltluft** in thermisch belastete Bereiche. Er bestimmt somit, neben der Strömungsgeschwindigkeit, die Größenordnung des Durchlüftungspotenzials.

Tabelle 2: Klimaökologische Ausgleichsleistung unterschiedlicher Kaltluft-Volumenströme (nach Werner et al. /37/)

Kaltluftvolumenstromdichte in $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ¹⁾	Klimaökologische Ausgleichleistung der Liefergebiete
0-15	sehr gering
> 15-30	gering
> 30-60	mittel
> 60-120	hoch
> 120	sehr hoch

¹⁾ Einheit $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$: die Kaltluftmenge in m^3 , die pro Sekunde durch einen 1 m breiten Streifen zwischen der Erdoberfläche und der Obergrenze des Kaltluftstroms fließt.

2.2.5 Kaltluftleitbahnen

Kaltluftleitbahnen verbinden **Kaltluftentstehungsgebiete** (Ausgleichs- oder Herkunftsräume) und humanbioklimatisch**belastete Siedungsflächen** (Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des **Luftaustausches** aus thermischer, aber auch lufthygieni-

scher Sicht. Sie sind maßgeblich an der **Frischlufzufuhr** (belasteter) Siedlungsbereiche beteiligt und als „Gebiete, die eines besonderen Schutzes vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen oder Geräusche bedürfen“ nach Baugesetzbuch (BauGB) /16/ sowie nach Bundesimmissionsschutzgesetz BImSchG /17/ **besonders geschützt**.

Kaltluftleitbahnen haben u.a. folgende Eigenschaften (u.a. /28/):

- Verbindung zweier Bereiche mit unterschiedlichem thermischem Niveau
- Geringe Rauigkeit der Oberfläche (geringe Vegetationshöhen, Wiesen, Äcker, aber auch Verkehrswege)
- Lage an Hängen bzw. geneigten Bereichen $> 1^\circ$
- (Längs-)Orientierung der Struktur in Strömungsrichtung

Sie können aus dem Umland an eine Siedlungsfläche heranführen oder in bebaute Bereiche hineinreichen.

Damit eine **Kaltluftleitbahn** zusätzlich die Funktion einer **Frischlufleitbahn** übernimmt, muss die Belastung durch Luftschadstoffe im Entstehungsgebiet sowie im Transportgebiet (nahezu) ausgeschlossen sein.

2.2.6 Strahlungswetterlagen und Luftaustausch in städtischen Gebieten

Bei Strahlungswetterlagen können Bodeninversionen entstehen, die die Bildung von Kaltluftseen begünstigen (siehe Kapitel 2.2.2). Hier ist der vertikale Luftaustausch stark beeinträchtigt (= stabile Schichtung). Bei einer solchen Inversion nimmt die Temperatur in einer Luftschicht mit der Höhe zu statt abzunehmen, so dass sich die schwerere kalte Luft am Boden sammelt und dort verbleibt.

Abbildung 8 zeigt schematisch die Schadstoffausbreitung bei labilen und stabilen Verhältnissen. Die Problematik der fehlenden Durchmischung mit höhergelegenen Luftschichten steigt mit einer geringer werdenden Höhe der betrachteten Quelle, d.h. bei niedrigen Quellen wie z.B. Kfz-Verkehr intensiviert sich die Problematik.

Wetterlagen mit Inversionen, die auch tagsüber andauern, treten bevorzugt im Winter auf, da es durch die geringe Sonnenhöhe und kurze Sonnenscheindauer zu keiner entscheidenden Erwärmung des Bodens sowie der bodennahen Luftschicht kommt /23/.

Bezüglich des Stadt-Umland Luftaustausches bzw. der Be- und Durchlüftung von Siedlungsbereichen kommt neben der Wetterlage der Rauigkeit der Bodenoberfläche, welche durch Bebauung stark erhöht wird, eine große Bedeutung zu. Wesentliche Luftströmungen werden in städtischen Bereichen in größere Höhen verdrängt, so dass die Windgeschwindigkeiten im städtischen Umfeld in Bodennähe stark herabgesetzt sind (siehe Abbildung 9). Dies kann den Luftaustausch in geringen Höhen stark beeinträchtigen.

Abbildung 10 zeigt die Verwirbelung von Luftströmungen im Nahbereich von Gebäuden. Hindernisse wie Gebäude senken die Windgeschwindigkeit am Boden sowie den Luftaustausch erheblich (Teilabbildung a). Die Folge können windschwache Zonen im Lee von Gebäuden, oder aber – je nach Anströmungsrichtung und Gebäudeorientierung – auch Kanalisierungseffekte sein (Teilabbildung b).

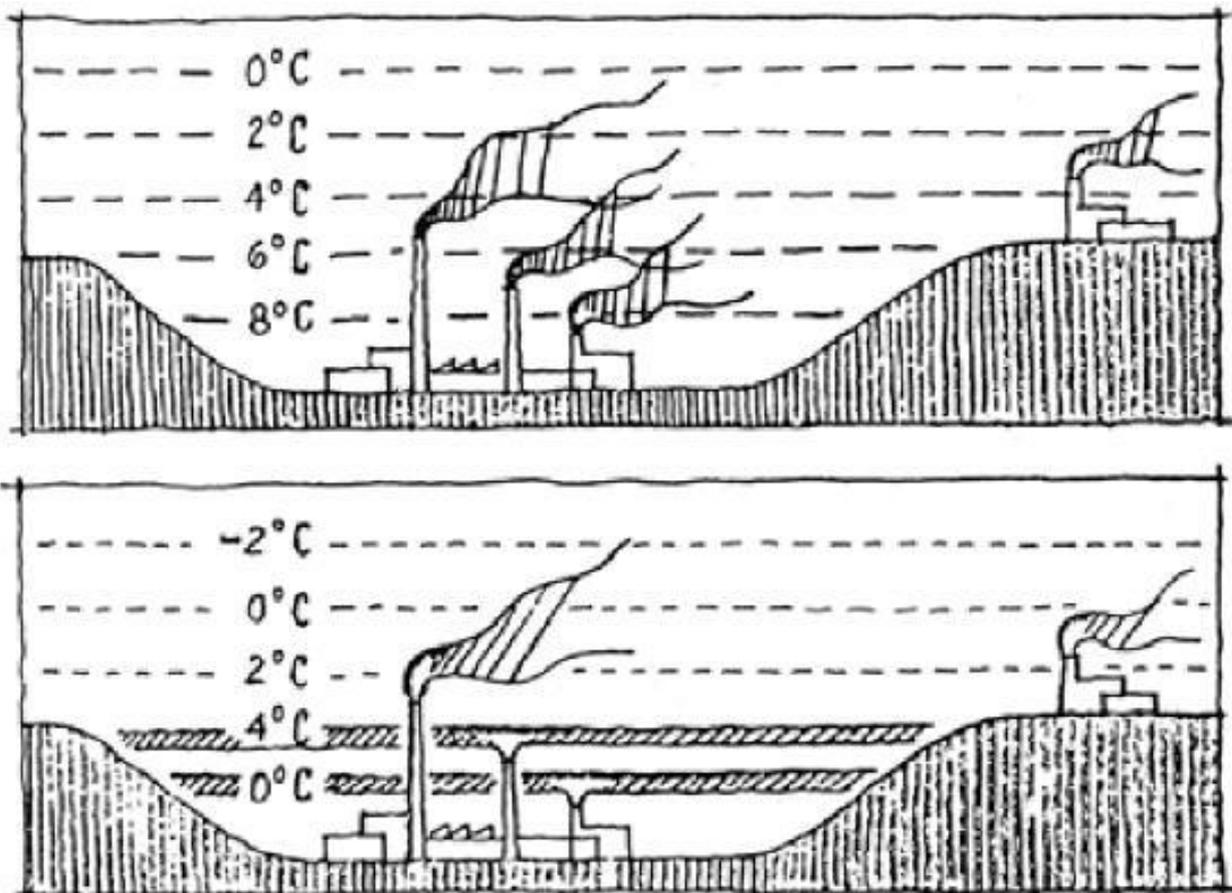


Abbildung 8: Schematische Darstellung von Schadstoffausbreitung bei stabiler Schichtung (oben) und Bodeninversion (unten). /23/

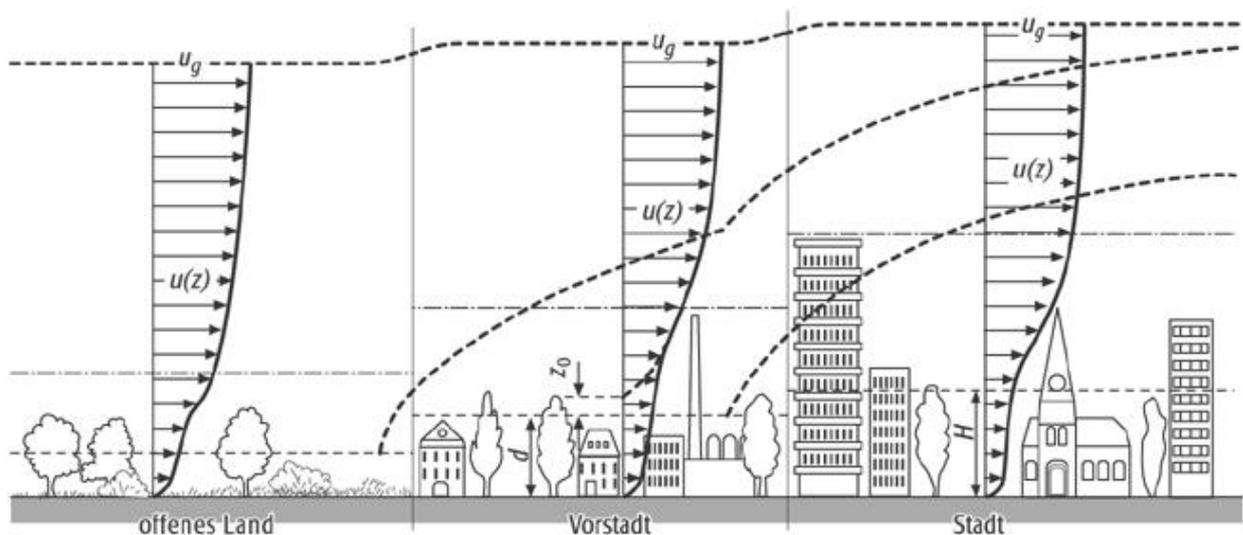


Abbildung 9: Vertikale Windgeschwindigkeitsprofile bei neutraler Schichtung (u_g =Windgeschwindigkeit an der Obergrenze der Grenzschicht, $u(z)$ =Windgeschwindigkeit (als Funktion der Höhe z), d =Verdrängungshöhe, z_0 =Rauigkeitslänge, H =mittlere Hindernishöhe). /25/

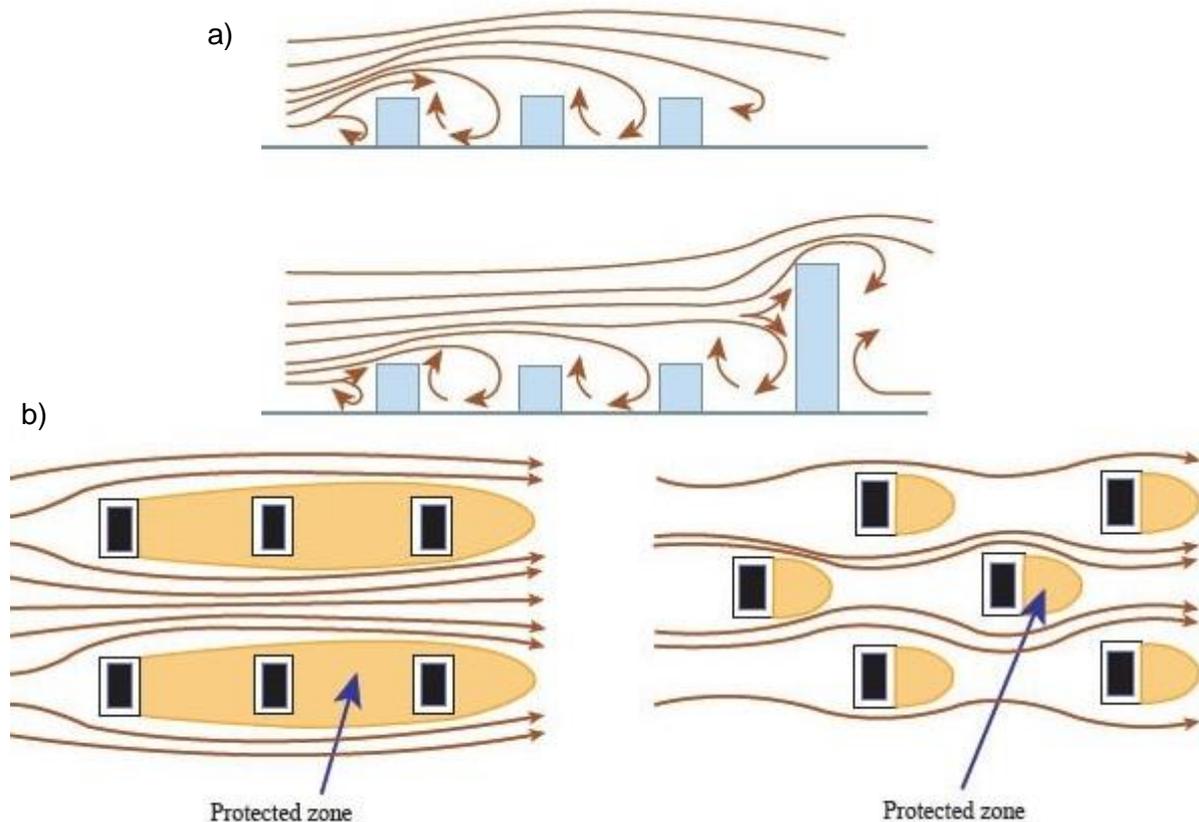


Abbildung 10: Einfluss von Gebäuden auf die Luftströmung im Schnitt (a) sowie in der Draufsicht (b)

2.2.7 Thermisches Bioklima

Der Mensch hat die Fähigkeit, seine Kerntemperatur (Temperatur des Körperinneren) unabhängig von wechselnden thermischen Umgebungsbedingungen und bei unterschiedlicher eigener Wärmeproduktion (Aktivität) innerhalb einer geringen Schwankungsbreite konstant zu halten. Dies wird durch eine Reihe von autonomen, das heißt unwillkürlich ablaufenden, physikalischen und chemischen Regulationsmechanismen erreicht, mit denen Wärmeabgabe und Wärmebildung an die Umweltbedingungen, die sich aus der kombinierten Wirkung von Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwelliger Strahlung ergeben, angeglichen werden. Durch angepasstes Verhalten hat der Mensch zusätzlich die Möglichkeit, bei empfundener Unbehaglichkeit seine Thermoregulation zu unterstützen, z.B. bei

- Wärmebelastung durch Aufsuchen von schattigen, gut belüfteten Bereichen
- Kältestress durch Aufsuchen von windgeschützten und besonnten Bereichen

Das Behaglichkeitsempfinden schwankt von Tag zu Tag; die interindividuelle Streuung ist dabei etwa doppelt so groß wie die intraindividuelle. Dies erschwert zwar die Schaffung optimaler Bedingungen für alle Individuen, lässt jedoch für einen großen Teil der Bevölkerung das Erreichen von thermisch behaglichen Bedingungen zu /21/.

Unter extremen thermischen Umgebungsbedingungen kann die Thermoregulation überfordert werden. Bei ungenügender Entwärmung/Abkühlung des Körpers, z.B. durch

- Behinderung der Verdunstung durch fehlende Ventilation bei hohem Wasserdampfgehalt der Luft
- ungeeignete (zu warme) Bekleidung
- unangepasste (zu hohe) Aktivität
- intensive Sonnenbestrahlung

steigt trotz maximal arbeitender Thermoregulation die Körpertemperatur an. Es kann dann insbesondere bei älteren und kreislaublabilen Menschen zum Hitzekollaps durch Blutdruckabfall kommen.

Dagegen sinkt bei zu starkem Wärmeentzug des Körpers die Kerntemperatur und das Atemminutenvolumen nimmt zu. Es kommt zunehmend zu Bewusstseinsstörungen und Irregularitäten bei der Herzarbeit /21/.

Zur Beschreibung und Objektivierung der thermischen Behaglichkeit und des Hitze- oder Kälteempfindens wird im Allgemeinen der PMV-Wert (Predicted Mean Vote) verwendet. Neben Umgebungsfaktoren (Meteorologie, Oberflächen) hängt der PMV-Wert insbesondere von individuenbezogenen Faktoren wie Bekleidung und Bewegung bzw. Aktivität ab. Der Wert ist auf 0 (behaglich keine Belastung) normiert und grundsätzlich nach oben und nach unten offen.

Die folgende Abbildung 11 bildet einen Zusammenhang zwischen Mortalitätsrate und dem PMV-Wert (Predicted Mean Vote).

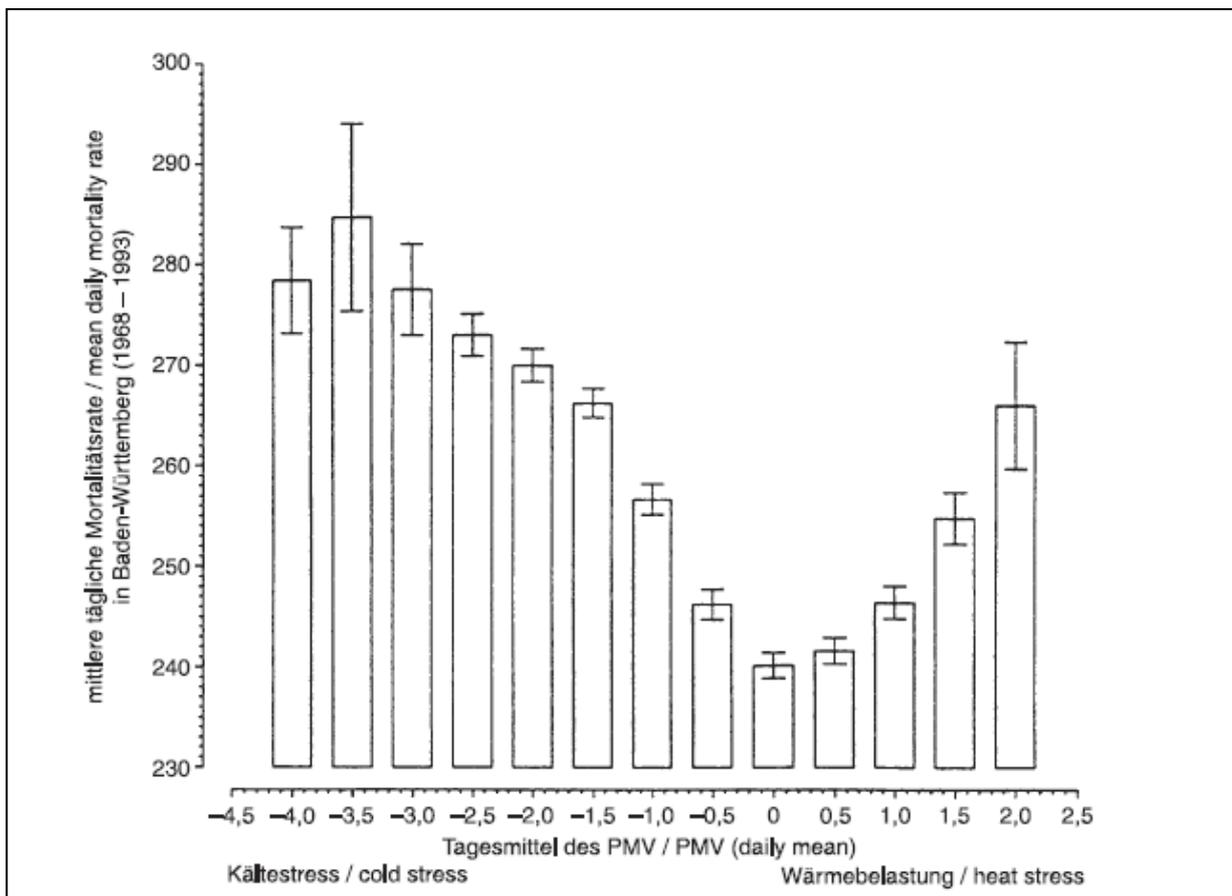


Abbildung 11: Mittlere tägliche Mortalitätsrate (mit 95 % Konfidenzintervall) in Abhängigkeit von der thermischen Belastung (Predicted Mean Vote PMV) in Baden-Württemberg (1968 bis 1993) in /21/ nach /39/

Mit zunehmendem Kältestress bzw. Wärmebelastung steigt die Belastung des Organismus. Einen Überblick über die Belastungsstufen gibt Abbildung 12. Generell kann eine Anpassung an Kältestress (z.B. durch Kleidung) leichter erfolgen als an Wärmebelastung.

PMV	Thermisches Empfinden	Belastungsstufe	Biologische Wirkung
-3,5	sehr kalt	extrem	Kältestress
-2,5	kalt	stark	
-1,5	kühl	mäßig	
-0,5	leicht kühl	schwach	
-0,0	behaglich	keine	keine
0,5	leicht warm	schwach	Wärmebelastung
1,5	warm	mäßig	
2,5	heiß	stark	
3,5	sehr heiß	extrem	

Abbildung 12: PMV, thermisches Empfinden und Belastungsstufen /23/

2.3 Datengrundlagen

2.3.1 Digitale räumliche Daten

Wesentliche digitale räumliche Daten, die in den angewendeten Modellen zum Einsatz (Kapitel 4) kamen wurden durch das Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (LGL) bereitgestellt:

- Digitales Landschaftsmodell 1:25.000 bzw. 1:50.000 (Landnutzung)
- Digitales Geländemodell in 5 m Auflösung (DGM5)
- Digitale Orthophotos (DOP) in 20 cm Auflösung
- Digitale Topographische Karte 1:10.000
- Digitales Gebäudemodell (Level of Detail (LOD) 1 = Klötzchenmodell)

Die Daten wurden für die Anwendung in den Modellen teilweise angepasst.

2.3.2 Klimatologische Messwerte bzw. Daten

Als Datengrundlage wurde zurückgegriffen auf meteorologische und klimatologische Datengrundlagen

- des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für die Stationen Metzingen und Stuttgart/Echterdingen /11/
- der LUBW für die Station Reutlingen-Pomologie /9/
- der Agrarmeteorologie Baden-Württemberg für die Stationen Oberer und Unterer Lindenhof /10/
- der LUBW zu den Windverhältnissen im Stadtgebiet (synthetische Windstatistiken) /8/

2.3.3 Daten zu den lufthygienischen Verhältnissen

Daten zu den lufthygienischen Verhältnissen wurden im Wesentlichen entnommen aus:

- Werte der LUBW Station Reutlingen-Lederstraße /9/
- Luftreinhalteplan bzw. dessen Fortschreibungen des Regierungspräsidiums Tübingen bezüglich der Stadt Reutlingen /36/
- LUBW-Daten zur flächendeckenden lufthygienischen Vorbelastung /9/

3 Meteorologische und lufthygienische Situation im Bereich der Stadt Reutlingen

3.1 Klimatische Einordnung des Stadtgebietes von Reutlingen

Das Klima im Stadtgebiet von Reutlingen wird geprägt durch die Lage der Stadt zwischen Neckartal und Albhochfläche.

Generell wird das Klima eines Ortes durch die Angabe statistischer Kennzahlen der Klimaelemente (z.B. Temperatur, Windgeschwindigkeit) beschrieben. Diese werden durch Beobachtungen und Messungen von Wetterstationen über einen längeren Zeitraum (Zeiträume siehe Aufstellung unten) erfasst.

Tabelle 3: Klimakennwerte der Stationen Reutlingen, Stuttgart/Echterdingen, Metzingen und zum Vergleich dazu mittlere Werte für Deutschland

Station	Höhe über NN	Rechts	Hoch	Wert	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	
Reutlingen (LUBW)	390	3515413	5372355	Temperatur max	15,9	21	23,9	30,5	32,1	36	37,1	36,4	32,4	28,1	26,3	16,7		
				Temperatur min	-14,2	-17,6	-16,9	-2,7	-1,5	3	6,8	7,3	1,9	-3,2	-9,1	-16,4		
				Temperatur Ø	1,6	1,9	5,7	10,6	14,1	17,8	19,7	18,5	14,9	10,6	6,5	2,1	10,3	
				Niederschlag	41,2	37,0	49,8	52,8	98,2	85,1	104,4	87,7	66,4	66,6	60,3	51,9	801,4	
Stuttgart/Echterdingen (DWD)	371	3516030	5393995	Temperatur max	7,5	11,9	14,2	20,3	21,4	28,0	29,0	30,5	23,9	18,8	11,5	7,8		
				Temperatur min	-9,6	-14,8	-3,1	1,4	4,7	9,4	10,9	10,0	6,8	2,7	-2,7	-6,8		
				Temperatur Ø	0,4	1,3	5,2	9	13,6	16,7	18,8	18,3	14,1	9,6	4,4	1,6	9,4	
				Sonnenscheindauer	77,3	93,7	140,4	172,5	212,1	219,6	235,1	222,9	167,4	122,6	75,8	61,6	1801,0	
Metzingen (DWD)	355	3520243	5377792	Temperatur max	8,1	10,7	15	21,3	22,6	28,8	30	31,4	23,9	19,1	12,3	8,5		
				Temperatur min	-6,4	-6,6	-1,4	2,6	5	9,2	11,8	10,5	6,5	2,4	0	-4,5		
				Temperatur Ø	0,7	1,5	5,3	9,2	13,7	16,7	18,8	18,2	14,1	9,7	4,6	1,6	9,5	
				Sonnenscheindauer	57,5	90,3	154,4	181,5	198,2	229,1	235,3	205,9	177,7	128,1	71,7	57,8	1787,3	
Deutschland				Temperatur Ø	-0,5	0,4	3,5	7,3	11,9	15,2	16,6	16,4	13,2	6,9	3,9	0,7	8,0	
				Sonnenscheindauer	48	81	114	159	204	213	213	201	156	111	60	42	1602,0	
				Niederschlag	54,1	44,6	52,1	57,4	69,2	81,3	75,2	74,3	59,8	53	63,2	61,4	745,6	

Die betrachteten Stationen zeichnen sich - im Vergleich zu den Mittelwerten für Deutschland – durch eine deutlich höhere Durchschnittstemperatur sowie Sonnenscheindauer aus. Reutlingen selbst zeigt auch im Vergleich zu den Stationen Stuttgart/Echterdingen und Metzingen eine deutlich höhere Durchschnittstemperatur sowie deutlich höhere Extremwerte der Temperaturen.

Dies ist einerseits auf die o.a. Wirkung als „städtische Wärmeinsel“, andererseits auch auf die spezielle topographische Lage der Stadt Reutlingen bzw. auf die Lage der Station Reutlingen in einer verhältnismäßig windgeschützten Innenstadtlage zurückzuführen:

Durchschnittliche Windgeschwindigkeiten der Messstationen im Vergleich:

- Reutlingen Pomologie (LUBW) (1995-2015): 1,4 m/s
- Stuttgart/Echterdingen (DWD) (1981-2010): 2,0 m/s
- Metzingen (DWD) (2003-2011): 2,2 m/s sowie zusätzlich zum Vergleich
- Stuttgart-Zentrum (2010-2014): 1,8 m/s.

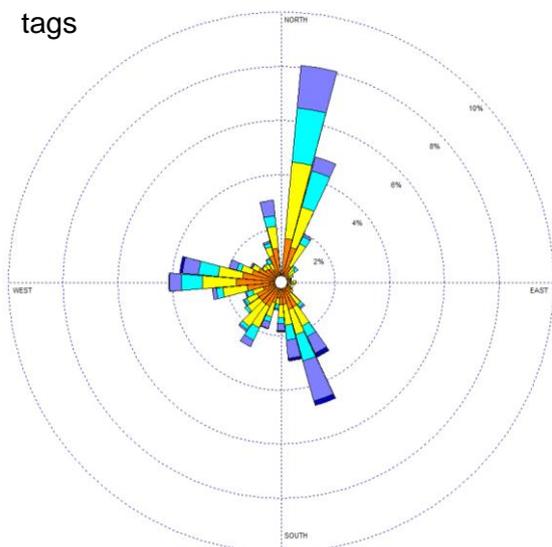
3.2 Windverhältnisse in Reutlingen

Bei vorherrschenden allochthonen, d.h. durch großräumige Luftdruckunterschiede geprägte, Wetterlagen wird die Windrichtung vor allem durch das Relief bestimmt (Umströmung von Bergen, Leitwirkung von Tälern), während die Landnutzung durch Verdrängungswirkungen und Rauigkeit vor allem die Windgeschwindigkeit beeinflusst. Jedoch kann auch – wenn z.B. Taleinschnitte quer zur Hauptwindrichtung liegen – das Relief die Windgeschwindigkeit stark vermindern.

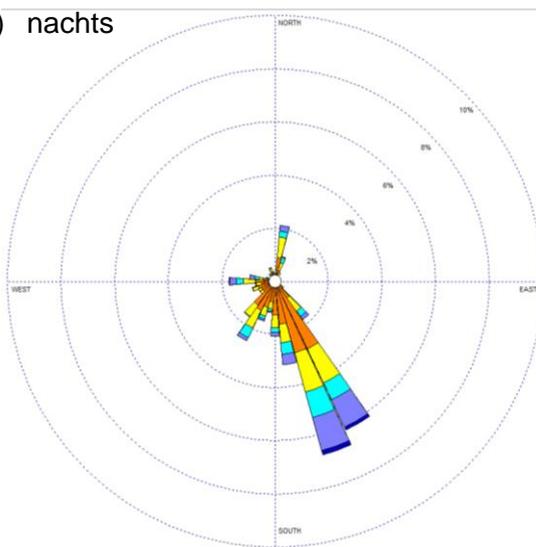
Thermisch induzierte lokale Windsysteme wie Kaltluftabflüsse und Flurwinde, welche vor allem bei autochthonen bzw. durch lokale Einflüsse geprägte Wetterlagen auftreten, werden sowohl vom Relief als auch von der Landnutzung beeinflusst.

Zur Darstellung der Bedeutung dieser Effekte werden im Folgenden die Tag- und Nachtwindrosen der Wetterstation Reutlingen-Pomologie miteinander verglichen (Abbildung 13).

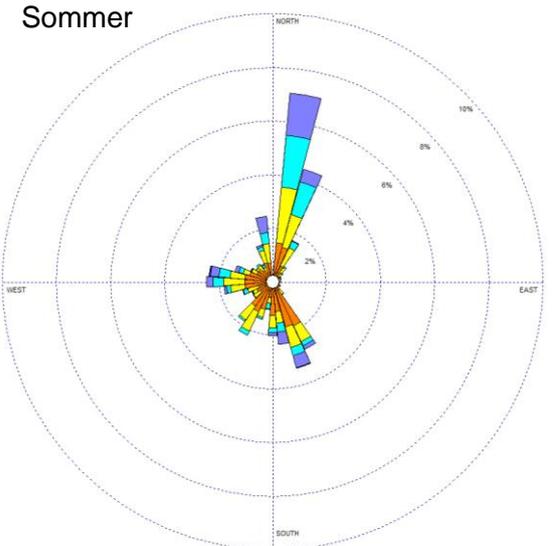
a) tags



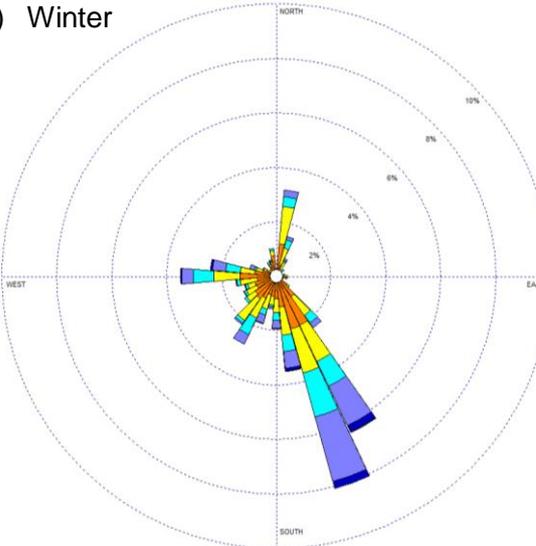
b) nachts



c) Sommer



d) Winter



e) insgesamt

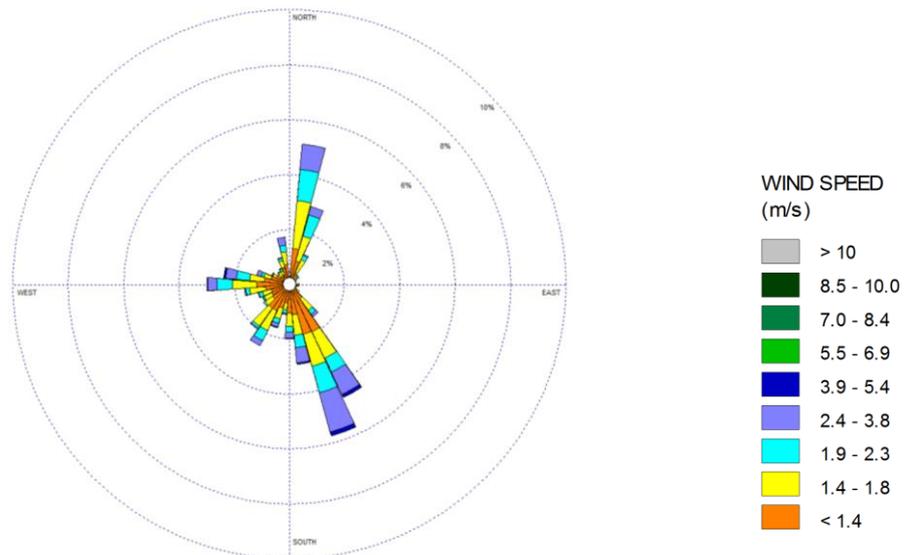


Abbildung 13: Windrichtungsverteilung am Standort RT-Pomologie für das Jahr 2014 tags (a) und nachts (b), im Sommer (c) und im Winter (d) sowie ganzjährig zusammen (e)

Aus Abbildung 13 wird deutlich, dass in den Tagstunden (07:00 Uhr bis 19:00 Uhr) sowie im Sommer nördliche, westliche und südöstliche Anströmungen dominieren, während in der Nachtstunden (19:00 Uhr bis 07:00 Uhr) und in den Wintermonaten lediglich die Südostanströmung stark hervortritt. Der Vergleich zeigt deutlich das Vorherrschen eines tagesperiodischen Windsystems sowie ausgeprägten Unterschieden zwischen den Sommer- und Wintermonaten in Reutlingen. Wesentlicher Grund dafür ist die Lage der Stadt am Fuße der Schwäbischen Alb. Bei häufigen windschwachen Wetterlagen (nachts sowie im Winter) werden bezüglich der Wetterstation in der Pomologie die Bergwindsysteme im Echaz- bzw. Arbachtal aktiv. Als windschwache Wetterlagen gelten Situationen, in denen die Windgeschwindigkeit geringer als 1,4 m/s ist. Diese treten an der Station Reutlingen-Pomologie in ca. 60 % des Auswertungszeitraumes auf.

Grundsätzlich ist dieses thermisch induzierte Windsystem als positiv zu bewerten, da nachts kühle, frische Luft aus den südöstlich der Kernstadt von Reutlingen gelegenen Bereichen in die Stadt strömt und für einen Luftaustausch sorgt.

Bedingt durch die große Nord-Süd-Erstreckung des Stadtgebietes über viele verschiedenartige topographische Situationen ist die Windrichtungsverteilung der Station Reutlingen-Pomologie jedoch lediglich für die Kernstadt als repräsentativ anzusehen.

Abbildung 14 zeigt eine – durch mesoskalige Strömungsfeldberechnungen ermittelte – Windrichtungsverteilung, welche für die nördlichen Stadtteile sowie den südwestlichen Teil des Stadtgebietes als repräsentativ gelten kann.

Es wird ersichtlich, dass in den topographisch exponierteren, frei anströmbaren Bereichen die überörtliche Südwest- bzw. Nordostanströmung dominiert. Auch sind in diesen Bereichen die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten mit Werten > 2 m/s – ähnlich denen der Stationen Stuttgart/Echterdingen und Metzingen – deutlich höher als in der Kernstadt von Reutlingen.

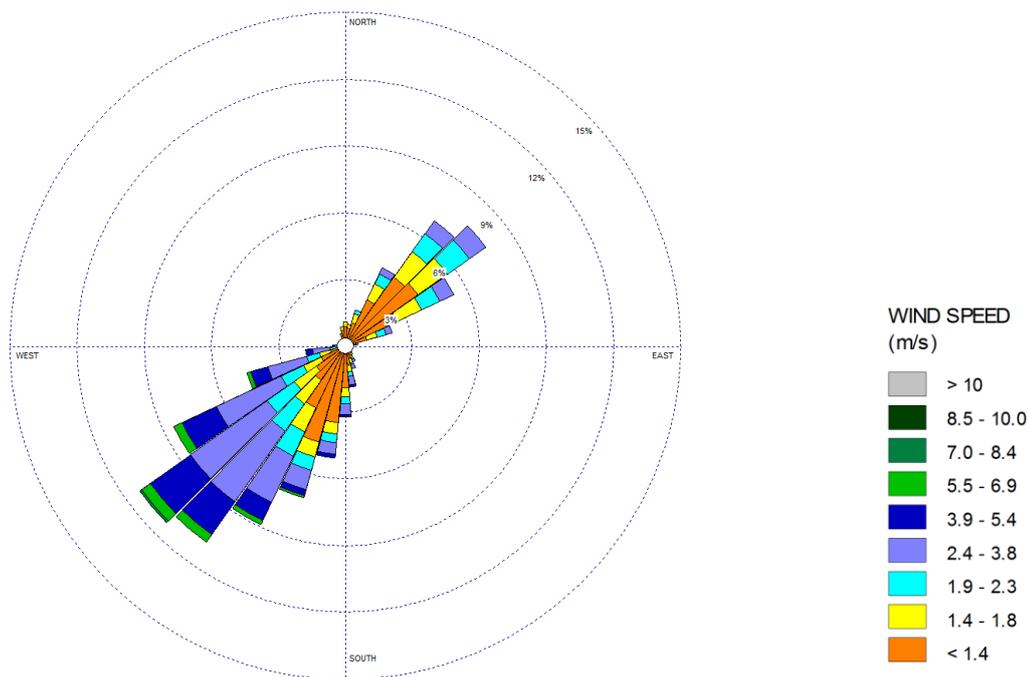


Abbildung 14: Windrichtungsverteilung im Bereich der nördlichen Stadtteile (bei Rommelsbach) /8/

Das Phänomen der extremen Schwachwindhäufigkeit ist im Wesentlichen auf die Kernstadt beschränkt.

3.3 Inversionshäufigkeit

Die Schichtung der Temperatur der Atmosphäre bestimmt zu großen Teilen den Luftaustausch zwischen den Höhenschichten und beeinflusst die Schadstoffkonzentrationen in der bodennahen Luftschicht maßgeblich. Normalerweise nimmt die Lufttemperatur mit der Höhe kontinuierlich ab. Liegt jedoch der umgekehrte Fall vor, also eine Temperaturzunahme mit der Höhe, spricht man von einer Inversion (= Umkehrung) oder inversen bzw. stabilen Schichtung.

Sogenannte Strahlungsinversionen entstehen in den meisten Fällen am Erdboden (Bodeninversionen) durch die nächtliche Auskühlung des Erdbodens infolge langwelliger Ausstrahlung.

Die topographische Lage der Stadt Reutlingen (Pfortenlage am Fuß der Schwäbischen Alb) begünstigt die Bildung von Bodeninversionen. Einerseits ist aufgrund der Topographie sowie der Bebauung die Windgeschwindigkeit geringer, zum anderen kann die von den umliegenden Hängen und Talsystemen zufließende Kaltluft die Bildung von Inversionen begünstigen.

Auskunft über die Häufigkeit von Inversionswetterlagen im landesweiten Maßstab gibt der Klimaatlas Baden-Württemberg /1/. Abbildung 15 zeigt die Inversionshäufigkeit im Mittel der Jahre 1981 - 2000.

Aus Abbildung 15 wird ersichtlich, dass das Stadtgebiet von Reutlingen in einem der inversionsgefährdetsten Bereiche von Baden-Württemberg liegt. Neben dem Rheintal, dem Bodenseeraum sowie dem Taubertal sind stark inversionsgefährdete Bereiche insbesondere das Neckartal und seine Zuflüsse ab etwa Rottenburg, wobei größere Beckenlagen stark negativ hervortreten.

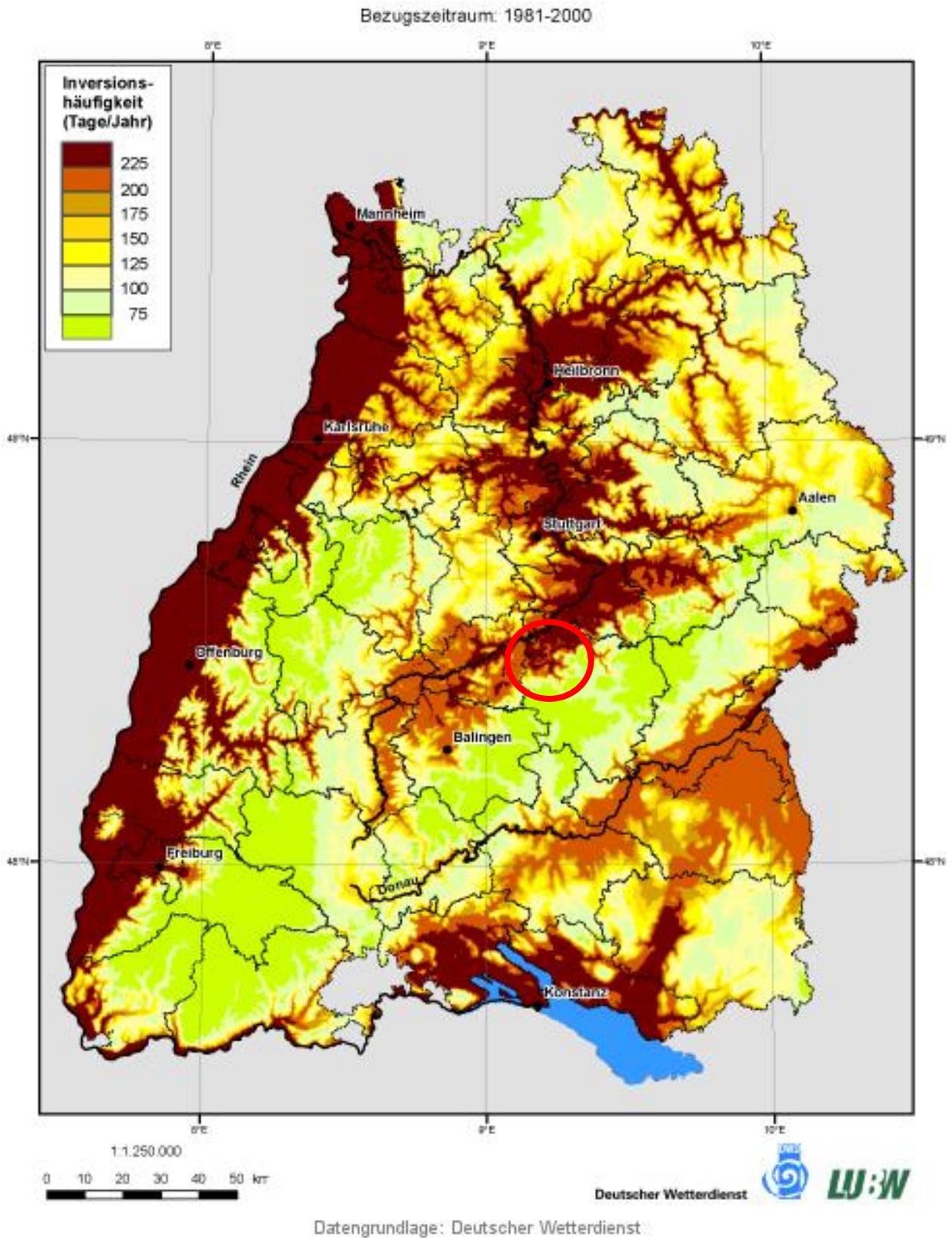


Abbildung 15: Inversionshäufigkeit in Baden-Württemberg im Mittel der Jahre 1981 – 2000 (roter Kreis: Stadtgebiet von Reutlingen) /1/

Vergleich der Messstationen Oberer und Unterer Lindenhof

Zur Bewertung der thermischen Stabilität kann die Temperaturdifferenz zwischen zwei benachbarten Wetter-Stationen in unterschiedlicher Höhenlage genutzt werden. Ist die Temperatur der Höhenstation höher, kann von einem Inversionsereignis gesprochen werden. Die Höhendifferenz zwischen den Stationen Unterer Lindenhof (473 m ü. NN) und Oberer Lindenhof (720 m ü. NN) (Gemarkung Eningen unter Achalm) beträgt ca. 250 m. Die horizontale Entfernung der beiden Stationen beträgt ca. 2 Kilometer. Leider liegt noch keine mehrjährige Messreihe vor, so dass das bisher einzige vorliegende vollständige Kalenderjahr (2015) nur eine Tendenz der Inversionshäufigkeit anzeigen kann.

Der Monat mit den größten Inversionshäufigkeiten war im Jahr 2015 mit 25 % Anteil der November, danach folgen Oktober (23 %), April (22 %) und Dezember (21 %). Im Gesamtjahr 2015 traten in 17 % der Jahresstunden stabile Schichtungen (Station Unterer Lindenhof - Station Oberer Lindenhof ≤ 1 °C) auf, welche die Anreicherung von Luftschadstoffen begünstigen. Besonders hohe NO₂-Werte wurden in Reutlingen im Jahr 2015 in den Monaten Oktober, November und insbesondere Dezember gemessen, während die Sommermonate dahinter zurücktreten. Dies weist auf die ungünstigen Ausbreitungsbedingungen für bodennahe Luftschadstoffemissionen bei stabilen Wetterlagen in der Kernstadt von Reutlingen hin.

3.4 Lufthygienische Situation in Reutlingen

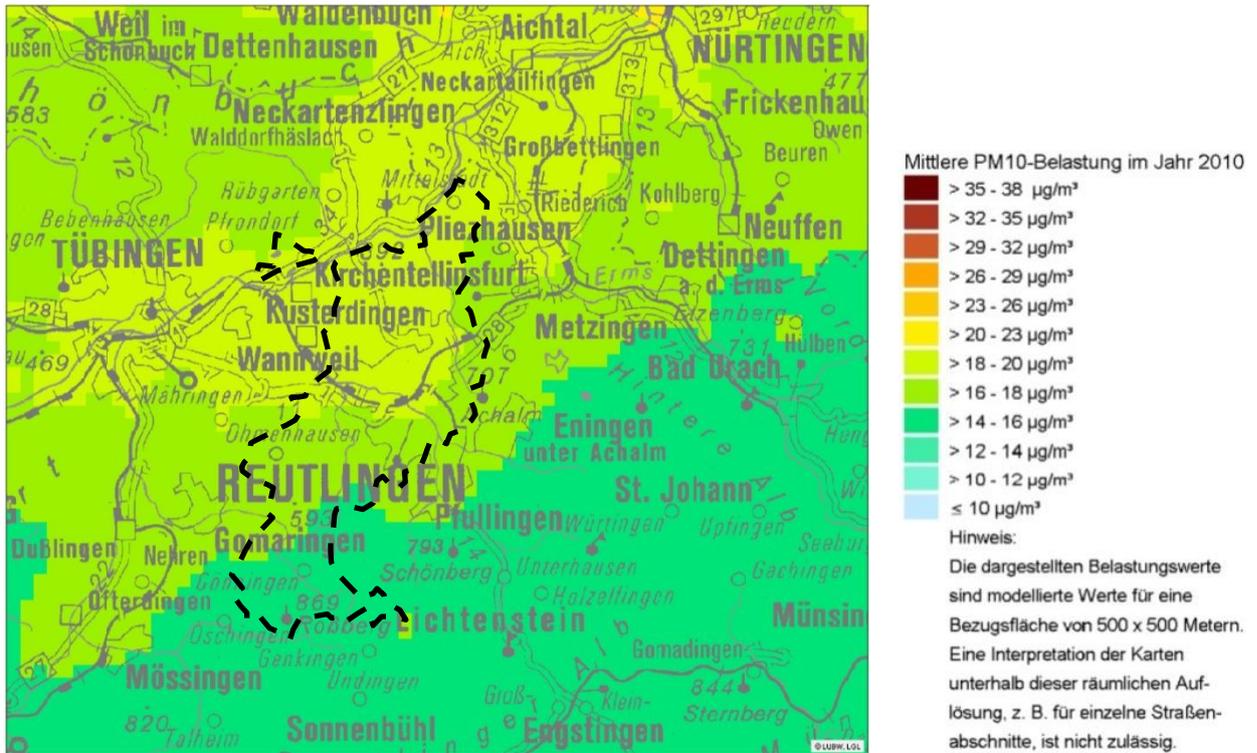
Vorbelastungskataster der Landesanstalt für Umwelt, Naturschutz und Messungen (LUBW)

Um die lufthygienische Situation in einem Bereich flächenhaft zu beurteilen, geben die Daten zur Immissionsvorbelastung der LUBW einen ersten Überblick. Die folgende Abbildung 16 zeigt für das Referenzjahr 2010 sowie Abbildung 17 für das Prognosejahr 2020 flächendeckende Modellierungsergebnisse zu NO₂ und PM10 /12/.

Zur Kennzeichnung der bestehenden Immissionsbelastung, der sogenannten Immissionsvorbelastung, greift diese Studie auf eine flächenhafte Ermittlung der Immissionsbelastung für die Luftschadstoffe Stickstoffdioxid und Partikel PM10 der LUBW für das Jahr 2010 zurück. Diese beruht auf einer landesweiten Immissionssimulation für die Emissionen von bestehenden Anlagen (Anlagen nach 4. BImSchV mit Emissionserklärungsverpflichtung nach 11. BImSchV), dem Kfz-Verkehr sowie von kleinen und mittleren Feuerungsanlagen (1. BImSchV) unter Berücksichtigung der allgemeinen Hintergrundbelastung. Dabei wurden auch die Emissionen im benachbarten Ausland in die Modellierung einbezogen, wobei auf Daten aus bestehenden z. T. europaweiten Projekten, z.B. unter Beteiligung des Umweltbundesamtes, zurückgegriffen wurde.

Die Berechnungen wurden aufgrund der starken orographischen Gliederung Baden-Württembergs mit einer Auflösung von 500 x 500 Meter durchgeführt. Dies bedeutet jedoch auch, dass die Ergebnisse nicht auf einzelne Punkte oder Straßenzüge (wie z.B. die Lederstraße) anwendbar sind.

a)



b)

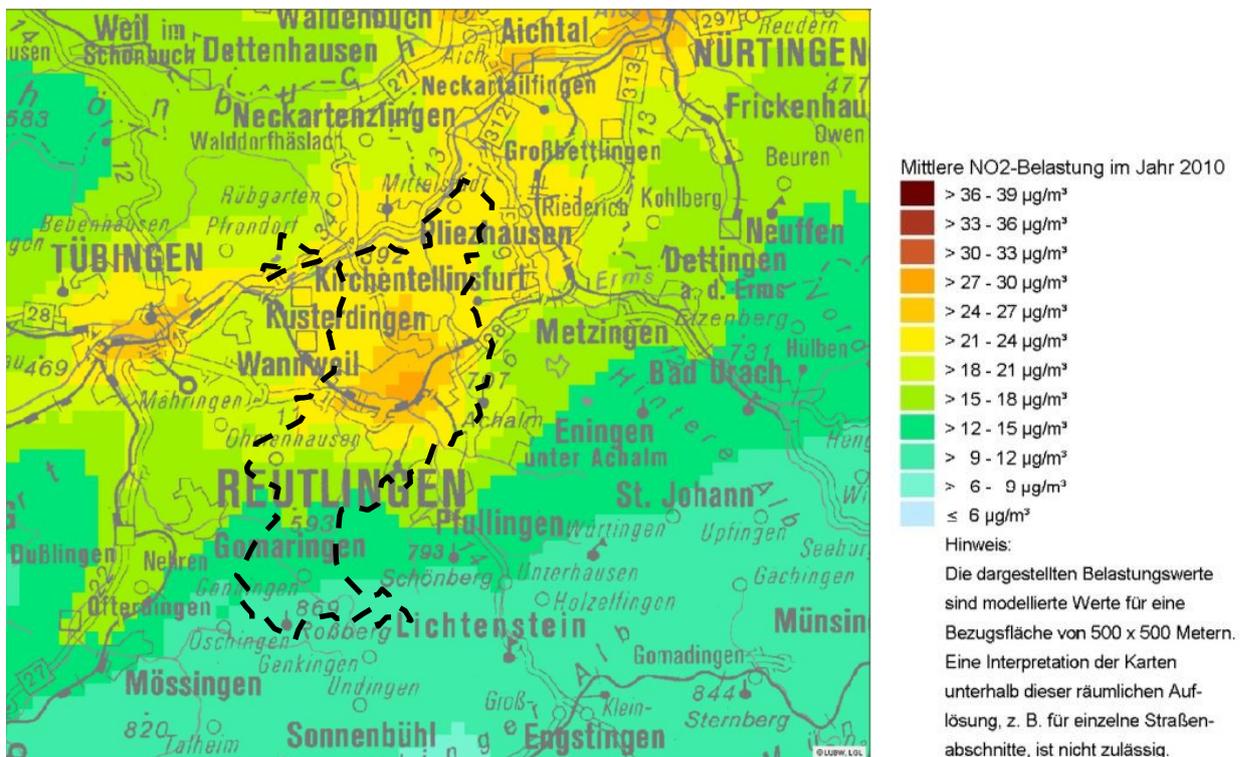
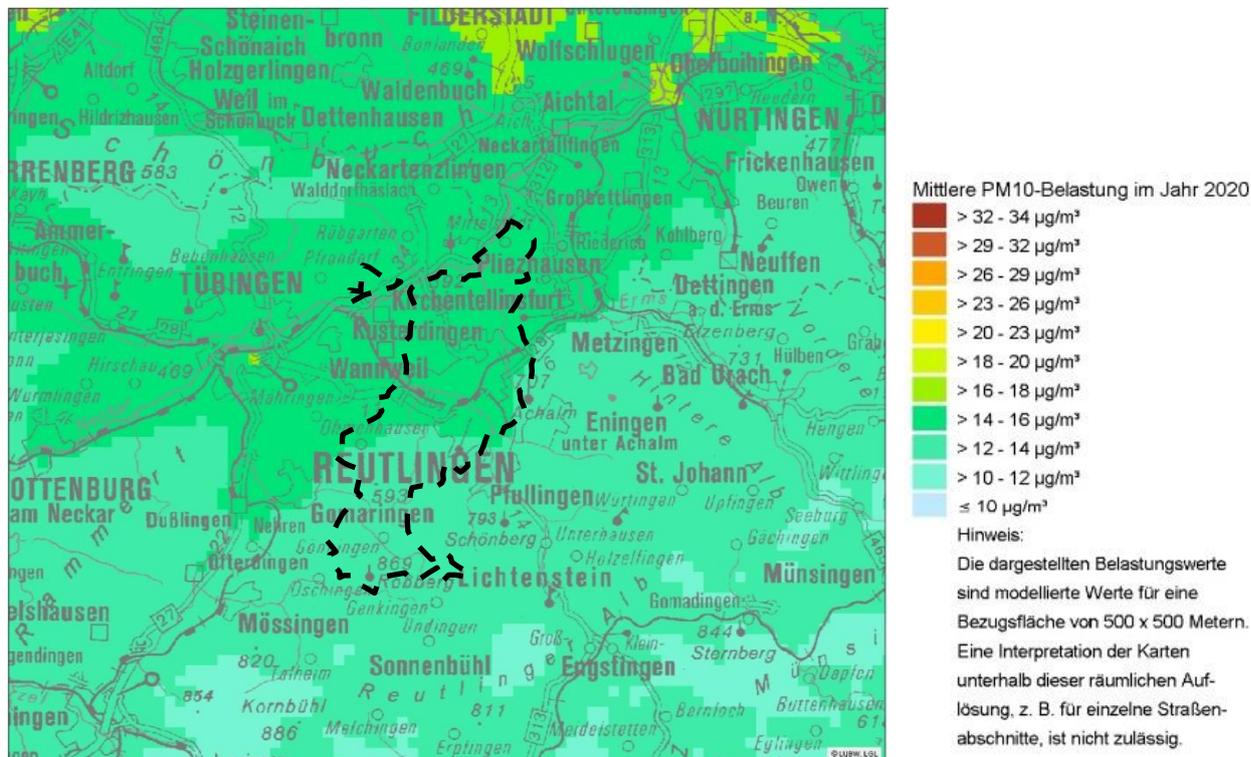


Abbildung 16: LUBW-Daten zur Immissionsvorbelastung im Raum Reutlingen für das Referenzjahr 2010 für (a) PM10 und (b) NO₂

a)



b)

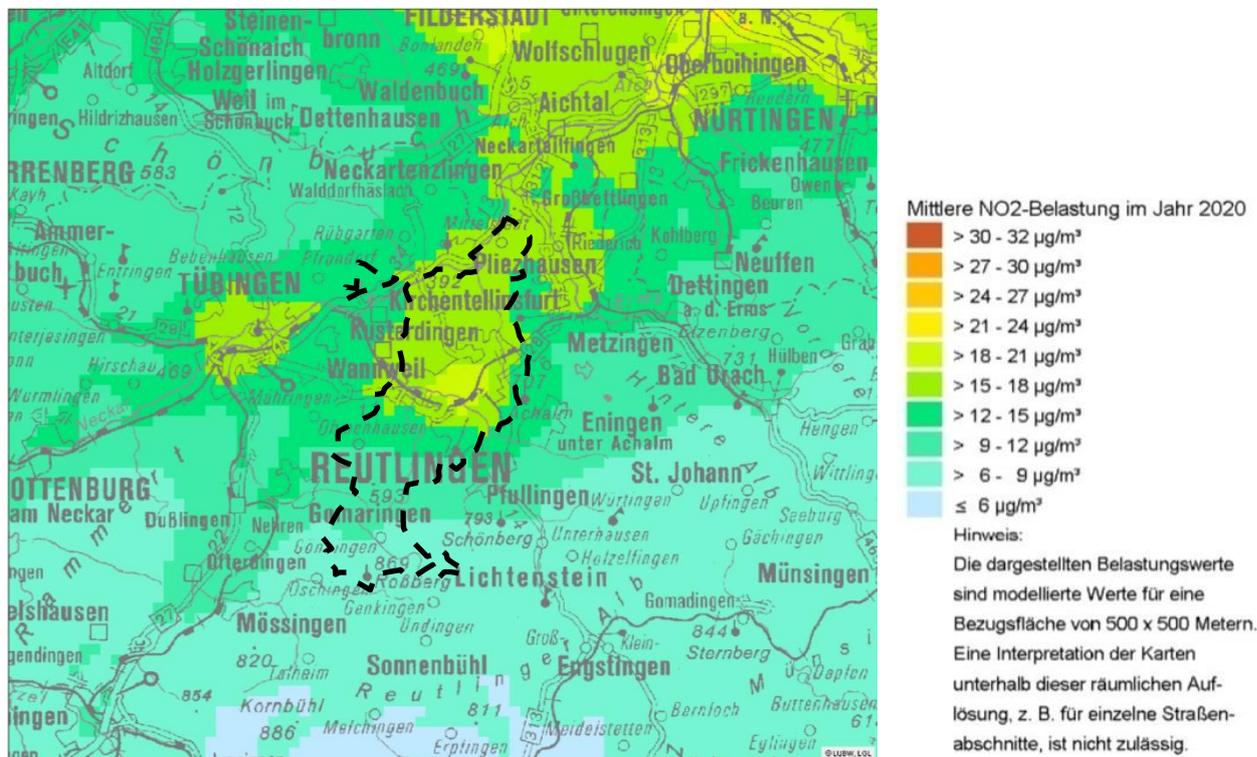


Abbildung 17: LUBW-Daten zur Immissionsvorbelastung im Raum Reutlingen für das Prognosejahr 2020 für (a) PM10 und (b) NO₂

Abbildung 16a weist für den Schadstoff PM10 errechnete Werte von 14-16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Bereich von Gönningen bzw. des Roßbergs bis hin zu 18-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Norden von Reutlingen aus.

Abbildung 16b zeigt für den Schadstoff NO₂ ein differenzierteres Bild. Hier sind die höchsten Werte mit bis zu 29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in der Kernstadt dargestellt, während im Bereich des Roßbergs deutlich geringere Werte (bis 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) sowie in den nördlichen Stadtteilen etwas geringere Werte (um 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) zu verzeichnen sind. Schwerpunkt der Immissionsvorbelastung bildet der Bereich um den Hauptbahnhof in Reutlingen. Höhere Werte werden in Baden-Württemberg insbesondere an Industrieschwerpunkten in Tallagen (z.B. Stuttgart-Untertürkheim: 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) und an Verkehrsachsen mit hoher Verkehrsdichte sowie dichter Bebauung berechnet.

Die Prognose für 2020 beruht auf einer ganz Europa umfassenden, unterstellten Emissionsentwicklung (z.B. Veränderung der Kfz-Flotte). In Baden-Württemberg zeigt die Prognose 2020 flächendeckend Rückgänge der Belastungen gegenüber dem Basisfall 2010 bis zu circa 40 % bei NO₂ und bis zu circa 20 % bei PM10. Auch für Reutlingen ist nach Abbildung 17 eine erhebliche Abnahme der Werte für die Luftschadstoffe PM10 und NO₂ errechnet worden.

Flechtenkartierungen der Stadt Reutlingen

Eine weitere Möglichkeit zur Einschätzung der lufthygienischen Situation in Reutlingen bildet die seit 1979 regelmäßig stattfindende Flechtenkartierung der Stadt Reutlingen /13/. Die Flechten werden dabei als Bioindikatoren für schädliche Luftbeimengungen anhand ihres Entwicklungsgrades bzw. Zustandes kategorisiert und kartiert.

Das generelle Muster dieser Untersuchungen zeigt relativ gesehen in Reutlingen höhere Belastungen in Tallagen an Verkehrswegen (B27 Neckartal / B 28 Richtung Metzingen / B 312 Richtung Lichtenstein) sowie in starken Siedlungs- bzw. Gewerbeverdichtungen (Kernstadt Reutlingen, Industrie- bzw. Gewerbegebiet „In Laisen“ / Industrie- bzw. Gewerbegebiet Pfullingen).

Die Darstellungen zur Immissionsvorbelastung der LUBW sowie die Flechtenkartierung sind wegen des stark differierenden Ansatzes sowie des unterschiedlichen Betrachtungsmaßstabes nicht direkt miteinander vergleichbar, als Belastungsschwerpunkt kann jedoch übereinstimmend der Bereich um den Hauptbahnhof bzw. entlang der B 28 / B 312 nahe des Kreuzungsbereichs (AOK-Knoten/ Stadthalle) gelten.

Messwerte der LUBW Stationen Lederstraße und Pomologie

In Ergänzung zur Station Pomologie (Messziel: städtische Hintergrundbelastung; Betreiber: Stadt Reutlingen) wurde in der Lederstraße/B 312 (Messziel: städtische Verkehrsbelastung; Betreiber: Land Baden-Württemberg) durch die LUBW eine Messstation zur Erfassung verschiedener Luftschadstoffe (u.a. PM10 und NO₂) an einer der Hauptverkehrsadern Reutlingens eingerichtet (siehe Abbildung 17).

Während die Station Pomologie generell unauffällig ist und die Grenzwerte zur Luftqualität eingehalten werden, zeichnet sich die Station Lederstraße durch sehr hohe Werte der Langzeitbelastung (Jahresmittel) aus. Als kritisch erweist sich derzeit die Einhaltung des Jahresmittelwertes bei Stickstoffdioxid (NO₂) mit 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Bei Feinstaub gab es früher erhebliche

Überschreitungen des Tagesmittelwertes. Seit 2014 wurden keine Überschreitungen des Grenzwertes für Feinstaub PM 10 (50 µg/m³ bei 35 zugelassenen Überschreitungstagen) festgestellt.

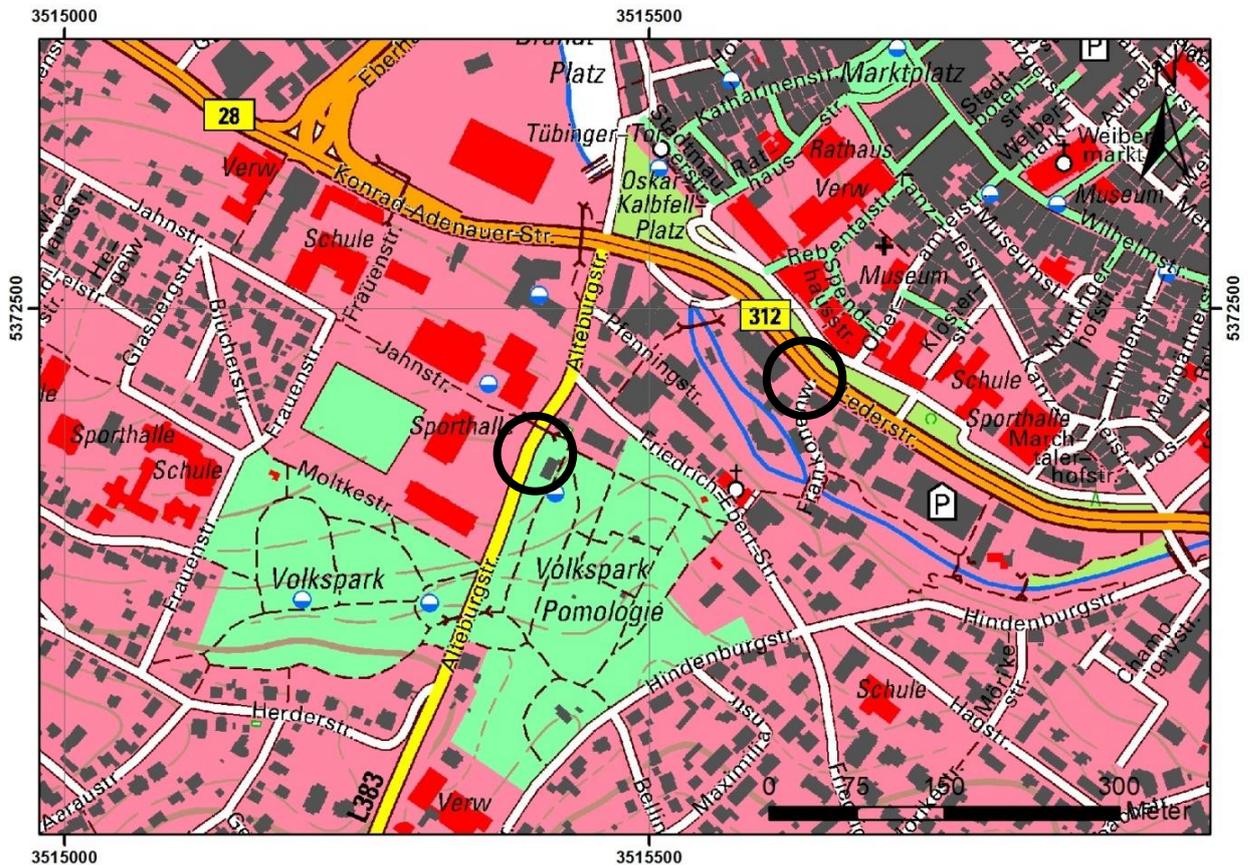
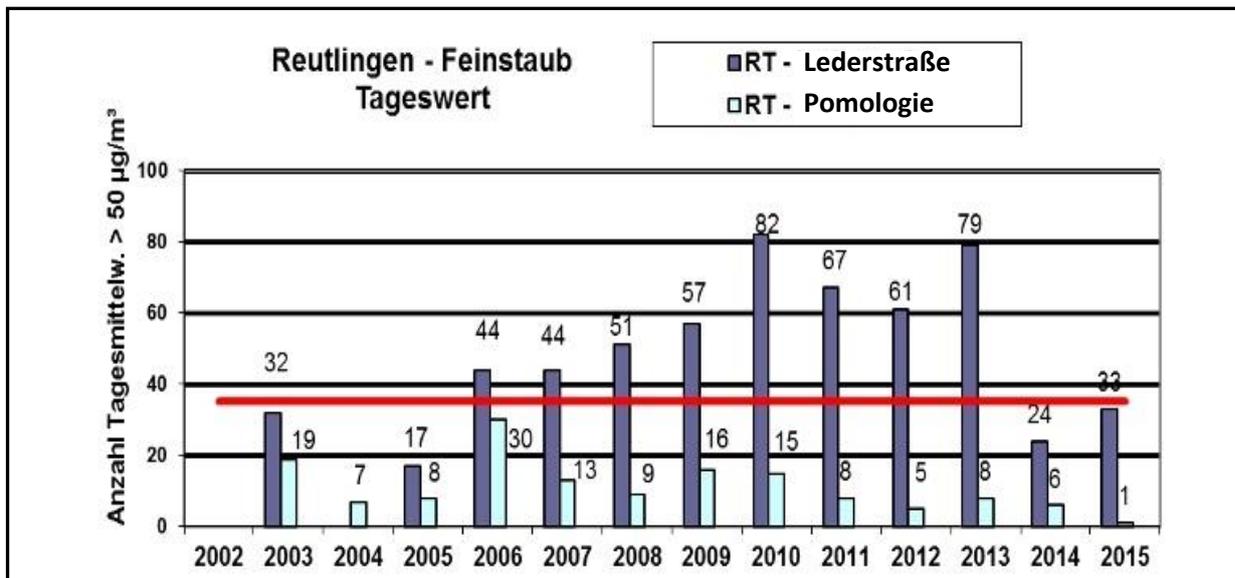


Abbildung 18: Lage der LUBW-Stationen Pomologie (links) und Lederstraße (rechts)

Aus Abbildung 19 wird ersichtlich, dass die einschlägigen Grenzwerte der 39. BImSchV /18/ z.T. sehr deutlich (teilweise um mehr als das Doppelte) überschritten werden bzw. wurden. Während sich für PM10 die Situation in Bezug auf die Anzahl der Überschreitungstage für PM10 in den letzten beiden Jahren entspannt hat (Grenzwerteinhaltung), ist der Grenzwert (Jahresmittel) für NO₂ mit leicht abnehmender Tendenz dennoch weiterhin sehr deutlich überschritten.

Als ein wesentlicher Einflussfaktor für die Immissionsbelastung bei PM10 gelten die (lokal-)klimatischen Verhältnisse. So sind landesweit insbesondere im Winterhalbjahr signifikant höhere Überschreitungshäufigkeiten für PM10 zu verzeichnen als im Sommerhalbjahr. Die Zahl der Überschreitungstage schwankt zudem stark von Jahr zu Jahr (siehe Abbildung 20). Insbesondere an Stationen in Tallagen ist ein deutlicher Einfluss von stabilen, d.h. austauschschwachen Wetterlagen, erkennbar /15/. Der Hausbrand spielt bei der PM10-Belastung eine wesentliche Rolle. So war dieser im Rahmen der Tage mit Grenzwertüberschreitungen bei PM 10 mit ca. 50 % (7 Tage) bei 14 Tagen im ersten Halbjahr 2016 wesentlich beteiligt /43/. Wesentlicher Einflussfaktor für die Überschreitung der Jahresmittelwerte für NO₂ ist generell die hohe Verkehrsbelastung.

a)



b)

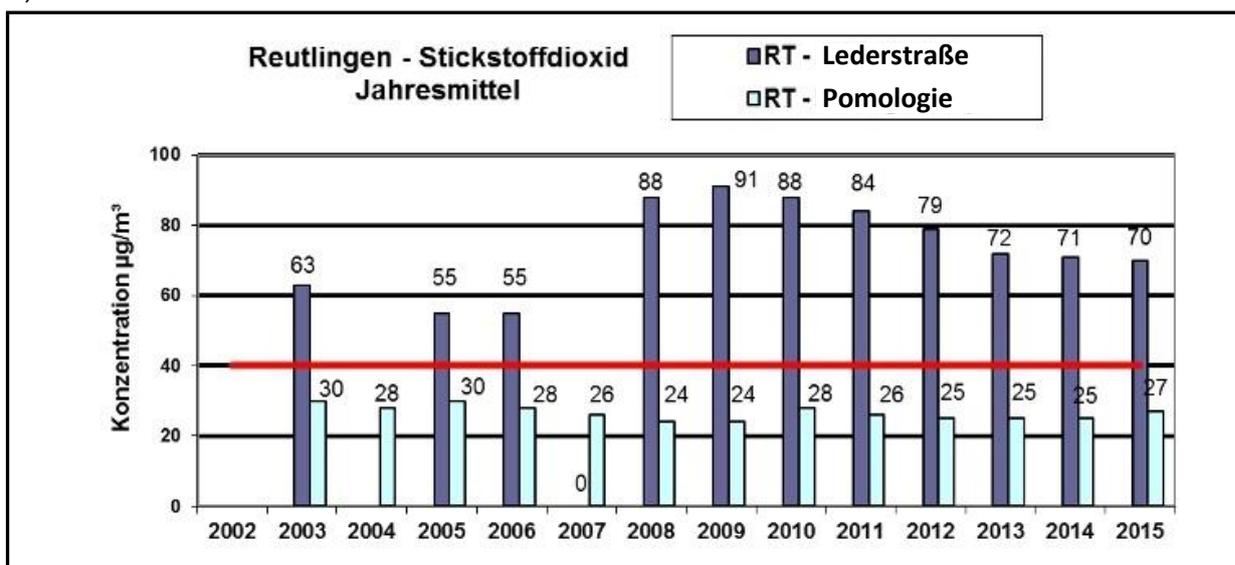


Abbildung 19: (a) Feinstaub (PM10) / Anzahl der Überschreitungstage an den verschiedenen Messstationen in Reutlingen - maximal erlaubt: 35

(b) Stickstoffdioxid (NO₂) / Jahresmittelwerte an den verschiedenen Messstationen in Reutlingen - maximal erlaubt: 40 µg/m³

*) durch die Stadt Reutlingen betriebene Messstelle /41/

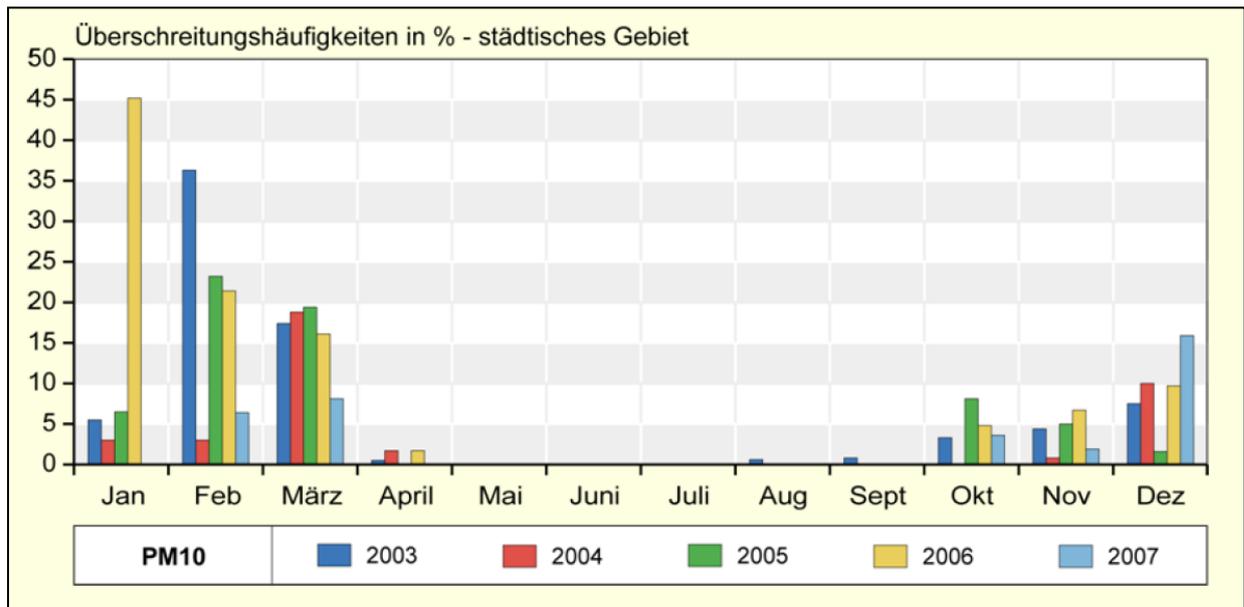


Abbildung 20: Monatliche Überschreitungshäufigkeiten des PM10-Tageswertes von 50 µg/m³ in den städtischen Hintergrundmessstationen der LUBW 2003-2007 /15/

Luftreinhalteplan Reutlingen

Als Reaktion auf die z.T. erheblichen Überschreitungen der Immissionswerte für Luftschadstoffe in Reutlingen wurde u.a. gemäß § 27 der 39. BImSchV die inzwischen 3. Fortschreibung des Luftreinhalteplans Reutlingen (2014) erstellt. Diese stellt fest:

„Die Luftqualität in Reutlingen konnte durch den im Jahr 2005 in Kraft getretenen Luftreinhalteplan und dessen Fortschreibungen in den Jahren 2007, 2012 und 2014 verbessert werden. So wurde der gesetzlich vorgeschriebene Grenzwert für Feinstaub im Jahr 2015 das zweite Mal in Folge eingehalten. Allerdings reichen die bisher umgesetzten Maßnahmen nicht aus, um den Stickstoffdioxid-Immissionsgrenzwert von 40 µg/m³ in der Lederstraße einzuhalten.“ /41/

Das Wirkgutachten zur 3. Fortschreibung des Luftreinhalteplans Reutlingen /36/ fasst hierzu zusammen:

„Insgesamt ist aus den Ergebnissen der Berechnungen zu schließen, dass mit der durch die ausgedehnte Umweltzone vorgezogenen Erneuerungen der Kfz-Fahrzeugflotte deutliche Verringerungen der motorbedingten Schadstofffreisetzungen verbunden sind, die auch zu Verringerungen der NO₂-Belastungen an den betrachteten Standorten führen. Mit einer Ausweitung der Umweltzone Stufe 3 sind auch an den außerhalb der bestehenden Umweltzonenabgrenzung gelegenen Straßenabschnitten Verringerungen der Schadstoffbelastungen zu erwarten, die jedoch nicht an allen Straßenabschnitten zu einer Einhaltung der Grenzwerte führen. Eine Geschwindigkeitsbegrenzung auf 30 km/h entlang der Ortsdurchfahrt von Ohmenhausen führt ebenfalls zu einer Senkung der Schadstoffbelastungen, wobei diese unter Berücksichtigung der Ausweitung der Umweltzone Stufe 3 auf Gemarkungsgröße nicht ganz zu einer Einhaltung der Grenzwerte führt. Die Prognosen zeigen weiterhin, dass Maßnahmen ohne Verringerung des Verkehrsaufkommens in den Abschnitten mit hohen Immissionen in den nächsten Jahren keine Einhaltung der Grenzwerte erwarten lassen.“

Eine 4. Fortschreibung erfolgt derzeit durch das dafür zuständige Regierungspräsidium Tübingen unter Beteiligung der Stadt Reutlingen („Modellstadt Luftreinhaltung Reutlingen“).

Die folgenden Darstellungen zeigen NO₂ sowie PM10-Immissionen für den Referenzfall 2013 /36/.

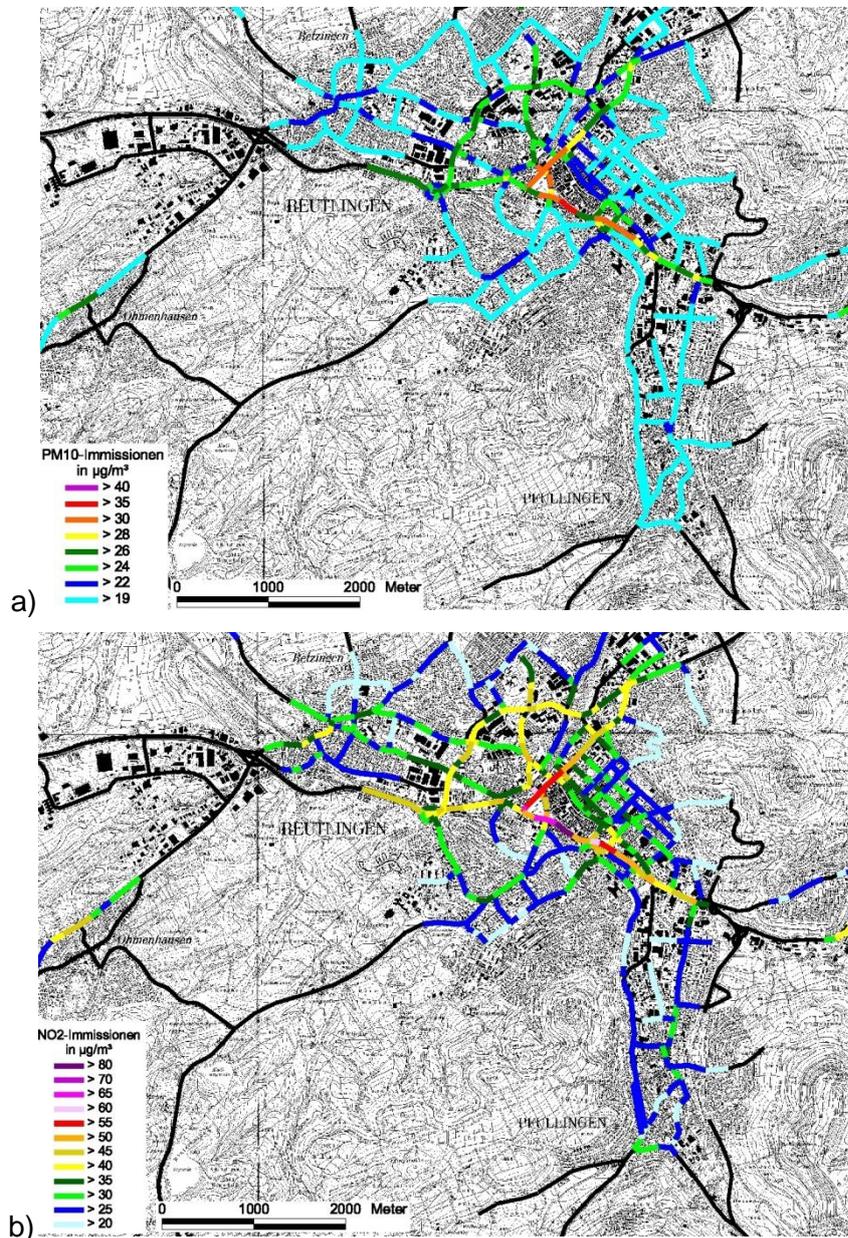


Abbildung 21: PM10- sowie NO₂-Immissionen im Straßennetz von Reutlingen (Ausschnitte aus /36/)

Aus Abbildung 21 wird deutlich, dass insbesondere die Straßen zwischen Hauptbahnhof-AOK Knoten-Lederstraße lufthygienisch hochbelastete Bereiche darstellen.

4 Methodik der Modellierung der lokalklimatischen Verhältnisse

4.1 Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21

KLAM_21 ist ein zweidimensionales, mathematisch-physikalisches Simulationsmodell zur Berechnung von Kaltluftabflüssen in orographisch gegliedertem Gelände. Die theoretischen Grundlagen werden in /2/ und in /38/ im Einzelnen beschrieben.

Das Modell geht davon aus, dass die Atmosphäre in ihrem unteren Bereich in zwei Schichten untergliedert werden kann (siehe Abbildung 4 auf Blatt 17). In einer Oberschicht wird ein adiabatisches und hydrostatisches Gleichgewicht angenommen. In der als Kaltluftschicht bezeichneten Unterschicht hingegen können vertikale Temperaturverteilungen auftreten, die vom adiabatischen Gleichgewicht abweichen. In ihr ist die Schwerkraft deshalb nicht völlig ausbalanciert, sodass sich durch Dichteunterschiede Horizontalbewegungen ergeben. Folglich hat die Unterschicht eine veränderliche Mächtigkeit.

Der Grund für die unterschiedlichen vertikalen Temperaturverteilungen ist der nächtliche Wärmeverlust der bodennahen Grenzschicht der Atmosphäre. Dieser Wärmeverlust wird im Modell durch eine in Abhängigkeit von der Flächennutzung abhängige Kälteproduktion abgebildet. Sie besitzt die Dimension einer Energiestromdichte (J/m^2) und wirkt auf die Unterschicht, deren vertikale Mächtigkeit infolgedessen mit der Zeit kontinuierlich zunimmt, sofern die Kaltluft nicht abgeführt wird.

Die Abkühlung von unten her führt in der Realität zu typischen nächtlichen Vertikalprofilen der Lufttemperatur. Da KLAM_21 als zweidimensionales Modell nur eine einzige Kaltluftschicht kennt, wird die Temperaturänderung mit der Höhe innerhalb dieser Schicht durch ein universelles Temperaturprofil beschrieben, das auf Kenntnissen aus empirischen Studien beruht und auf die jeweilige Situation (Kälteinhalt und Dicke der Kaltluft) an den Punkten im Rechengitter angewandt wird.

Vergleichbar wird bei der Berechnung der Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft verfahren. Ein durch empirische Studien ermitteltes universelles Geschwindigkeitsprofil ermöglicht Aussagen zu Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Vertikalschichten.

Die Strömung erfasst jedoch nicht die gesamte Unterschicht über ihre zum jeweiligen Zeitpunkt erreichte Mächtigkeit, sondern nur eine sogenannte Strömungsschicht, deren Mächtigkeit in KLAM_21 als effektive Kaltluflhöhe bezeichnet wird. Diese effektive Kaltluflhöhe beträgt bei KLAM_21 immer 5/12 der Höhe der gesamten Abkühlungsschicht. Im universellen Geschwindigkeitsprofil ist die Höhe des Geschwindigkeitsmaximums auf ein Viertel der Höhe der Strömungsschicht festgelegt. Dies entspricht ebenfalls den Ergebnissen aus zahlreichen Feldstudien.

Die Luftbewegungen in der Kaltluftschicht werden berechnet, indem in jeder Rasterzelle (im vorliegenden Fall: 10 m x 10 m) eine vereinfachte Bewegungsgleichung gelöst wird. Diese Bewegungsgleichung enthält alle Teilkräfte, die am Prozess beteiligt sind. Dies sind die Schwerkraft als beschleunigende Kraft, sowie als Bremskräfte die durch die Landnutzung parametrisierte Bodenreibung, der u.U. angenommene Regionalwind (welcher je nach Richtung auch beschleunigend wirken kann) an der Oberseite der Kaltluftschicht und der horizontale Impulsaustausch durch Druckveränderungen. Die verwendeten Datengrundlagen sind in Kapitel 2.3.1 dargestellt.

Die Art der Behandlung der Bodenreibung hängt auch davon ab, ob im Rechengebiet explizite Hindernisse modelliert werden oder nicht und wie sich die Höhe dieser Hindernisse zur Kaltlufthöhe verhält. Falls die Höhe der Einzelhindernisse über der Höhe des Geschwindigkeitsmaximums liegt, wird eine zusätzliche Volumenreibung modelliert. Liegt das Geschwindigkeitsmaximum oberhalb der Hindernishöhe, so wird der Hinderniseinfluss über einen pauschalen Zuschlag zur Bodenrauigkeit berücksichtigt.

Mit einer zweiten zentralen Gleichung wird der sogenannte „Kälteinhalt“ bzw. die Energiebilanz der Kaltluftschicht berechnet. Dieser Kälteinhalt geht zum einen auf die Kälteproduktion am Standort selber sowie auf advektiven Kältetransport durch die Kaltluftbewegungen zurück.

Jeder Landnutzungsclassen entsprechen eine fest vorgegebene „Kaltluftproduktionsrate“ und eine „Rauigkeit“ als Maß für den aerodynamischen Widerstand beim Überströmen der Fläche sowie ggf. eine „Porosität“ als Maß für die Durchlässigkeit von bebauten Flächen. Für die jeweiligen Landnutzungsclassen können – je nach Vorkommen – Werte, wie mittlere Gebäudehöhe, Grundflächenzahl, mittlere Bedeckung des Bodens mit Bäumen sowie deren Höhe, definiert werden. Modellsimulatorisch startet jede Fläche mit einer Kaltlufthöhe von 0 m.

Definierte Strömungshindernisse, wie Gebäude und Dämme, werden erst überströmt, wenn die Kaltluft eine gewisse Mächtigkeit erreicht hat.

Der für den Kaltluft-Volumenstrom maßgebliche Querschnitt ist im Modell nicht der jeweilige, durch Hänge oder Häuserschluchten begrenzte, Querschnitt. Vielmehr ist der durchflossene Querschnitt der Rasterweite (im vorliegenden Fall 10 m) gleichzusetzen, und bleibt in den jeweiligen Teilbereichen des Modells – im Gegensatz zu den natürlichen Querschnitten – konstant.

Simuliert wird im vorliegenden Fall eine 8 Stunden andauernde klare (Strahlungs-)Nacht während einer windstillen bzw. windarmen und trockenen Hochdruckwetterlage. Der Start der Simulation liegt kurz vor Sonnenuntergang. Mit diesen idealen Randbedingungen ist es möglich die Prozesse der Kaltluftentstehung und des Kaltlufttransports besonders deutlich herauszuarbeiten.

4.1.1 Eingangsdaten und Modellparameter

Die Grundlegendaten für das Simulationsmodell bestehen im Wesentlichen aus

- hochaufgelösten **Geländedaten**,
- Daten zur **Landnutzung** sowie
- Daten zu **Gebäudegrundrissen** und **-höhen**

(Quellen und genaue Art der Daten siehe jeweils Kapitel 2.3)

Das **Modellgebiet** umrahmt das Stadtgebiet von Reutlingen rechteckig. Da das gesamte Kaltluftzugsgebiet der Kernstadt von Reutlingen im Modellgebiet erfasst ist, sind auch die Gemarkungen von Eningen u.A., Pfullingen und Lichtenstein ganz oder teilweise enthalten. Einen Überblick über die Modellparameter gibt Tabelle 4.

Tabelle 4: Modellparameter KLAM_21

Parameter	Wert
Modell	DWD KLAM_21 V2.012
Modellgebiet	Linke untere Ecke: RW: 3505400, HW: 5361300 Ausdehnung: 18,1 km * 23,6 km Zellengröße: 10 m
Bezugshöhe für das Strömungsfeld	2 m über Gelände sowie weitere Bezugshöhen je nach Auswertung
Regionalwind	Geschwindigkeit: - Richtung: -
Geländedaten	Ausschnitt aus DGM5 für das Modellgebiet (Kapitel 2.3.1)
Landnutzungsklassen	Anpassung auf KLAM_21 Landnutzungsklassen nach Landnutzungsdaten des LGL sowie Orthophotos (Kapitel 2.3.1) Klasse 2: Siedlung (locker) Klasse 3: Wald Klasse 5: Industrie-/Gewerbegebiet Klasse 6: Park Klasse 7: unversiegelte Freiflächen (Äcker, Wiesen) Klasse 8: versiegelte Flächen Klasse 9: Wasser Klasse 11: Obstbau Klasse 14: Friedhof Klasse 15: Straßen Klasse 17: Bahnlinien Klasse 20: Kernstadt Klasse 21: Wasserflächen nicht genannte Klassen sind nicht belegt
Gebäude	nach LOD1 Daten des LGL (Kapitel 2.3.1)

4.1.2 Auswerteintervalle

Für die Auswertung wurden **drei wesentliche Analysezeitpunkte** (1, 2 und 4 Stunden nach Sonnenuntergang) gewählt, um die natürliche räumlich-zeitliche Dynamik des Kaltluftgeschehens im Untersuchungsgebiet über den Verlauf einer Nacht darzustellen. Generell ist nach etwa 1 Stunde das **Hangwindssystem** (siehe Kapitel 2.2) voll ausgebildet. Im weiteren Verlauf der Nacht tritt das **Bergwindssystem** immer mehr hervor und kann in bestimmten topographischen Situationen das Hangwindssystem überprägen. In der zweiten Nachthälfte kommt das System dann wegen der Auffüllung von Senken teilweise zum Erliegen.

4.2 Das Stadtklimamodell ENVI-Met

ENVI-Met ist ein dreidimensionales mikroklimatisches Modell, mit welchem die strömungstechnische und thermodynamische Interaktion zwischen Gebäudeoberflächen, Vegetation und Luft in der urbanen Umwelt modellhaft abgebildet werden kann. Es basiert auf den Grundgesetzen der Strömungs- und Thermodynamik /3/.

ENVI-Met beinhaltet die Simulation von:

- Gebäudeumströmungen
- Wärme- und Feuchteaustausch
- Atmosphärische Turbulenz
- Austausch von Wärme und Feuchte in Verbindung mit Vegetation
- Ausbreitung von Partikeln in Strömungsfeldern
- Bioklimatische Bewertung

Die Interaktion zwischen Oberflächen und Atmosphäre wird über die vier Teilmodelle Atmosphäre (3D, nicht-hydrostatisch), Boden/Grenzfläche (1D/3D), Vegetation (1D) sowie ein Randmodell für den externen atmosphärischen Antrieb beschrieben.

Bei dem Simulationsverfahren wird die Realität in einem numerischen **dreidimensionalen Raumgitter** abgebildet, welches sowohl die Erdoberfläche mit Boden, Bebauung und Vegetation als auch die Atmosphäre einschließt. Für die atmosphärischen Gitterzellen werden die atmosphärischen Zustände des Impulses (Wind, Transport), der Wärme und der Feuchte berechnet. Durch die Berücksichtigung der physikalisch-mathematischen Interaktion benachbarter Atmosphäregitterzellen sowohl untereinander als auch mit der digitalisierten Erdoberfläche sowie durch die Berechnung der zeitlichen Änderung der atmosphärischen Zustandsgrößen in diskreten Zeitschritten kann der atmosphärische Zustand abgebildet werden.

Ausgehend von den topografischen und klimatischen Eingangsparametern werden die zeitlichen Änderungen verschiedener **Zustandsgrößen der Atmosphäre und des Boden bzw. der Bodenbedeckung** in diskreten Zeitschritten berechnet, welche separat ausgewertet werden können. Zu den atmosphärischen Größen zählen u. a. Windgeschwindigkeit und -richtung, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Wärmeflüsse, Strahlungskomponenten sowie insbesondere die humanbioklimatische **thermische Behaglichkeit** (Wohlbefinden in Abhängigkeit von z.B. Temperatur, Feuchte und Luftbewegungen). Bei den Böden und Oberflächen können u. a. die Boden- und Oberflächentemperaturen, Bodenwärmeströme sowie die Bodenfeuchtigkeit untersucht werden. Aussagen zu Klimabedingungen **in Gebäuden** können allerdings nicht getroffen werden; alle Ergebnisse werden ausschließlich für den **Außenbereich im Freien** berechnet /4/.

4.2.1 Eingangsdaten und Modellparameter

Die Datengrundlage für die verschiedenen Simulationsmodelle besteht im Wesentlichen aus:

- hochaufgelösten **Luftbildern**, aus welchen insbesondere Oberflächentypen und Vegetation digitalisiert wurden
- Daten zu **Gebäudegrundrissen** und **-höhen** (Quellen siehe jeweils Kapitel 2.3)

Externe Parameter - wie Anströmungsrichtung - wurden für die Tagsituation (repräsentativer Zeitpunkt 16:00 Uhr) aus Windrichtungsverteilungen der LUBW, für die Nachtsituation (repräsentativer Zeitpunkt 22:00 Uhr) aus Ergebnissen der Berechnungen mit KLAM_21 entnommen. Einen Überblick über die gebietsübergreifenden Modellparameter gibt Tabelle 5.

Tabelle 5: Gebietsübergreifende Modellparameter ENVI-Met

Parameter	Wert
Modell	ENVI-Met V3.1 Beta 5
Modellgebiete	nach Kapitel 5.2
räumliche Auflösung	Zellengrößen: 5 m bis 10 m
Simulationszeitraum	23.06. 06:00 Uhr bis 25.06. 22:00 Uhr
Atmosphäre	
Windgeschwindigkeit in 10 m über G.	1,5 m/s (tags/nachts)
Windrichtung	tags: Hauptwindrichtung nach Windrose LUBW nachts: nach Strömungsfeld KLAM_21
Starttemperatur Atmosphäre	292 K / 18,85 °C
Spezifische Feuchte in 2.500 m	7g Wasser / kg Luft
Relative Feuchte in 2 m	60 %
Wolkenbedeckung	0
Oberflächen	
Temperatur und relative Feuchte obere Bodenschicht	296 K / 35 %
Temperatur und relative Feuchte mittlere Bodenschicht	297 K / 45 %
Temperatur und relative Feuchte untere Bodenschicht	296 K / 55 %
Thermische Behaglichkeit	
Fortbewegungsgeschwindigkeit	0,3 m/s
Energieumsatz	166 W/m ²
Mechanischer Wirkungsgrad	0,1
Wärmedurchgangswiderstand Bekleidung	tags: 0,5 (kurze Hose; T-Shirt) nachts: 1,0 (lange Hose; Langarm-Shirt)

4.2.2 Auswerteintervalle

Für die vorliegende Untersuchung werden die Parameter Lufttemperatur und Predicted Mean Vote (PMV) ausgewertet, da insbesondere diese Werte thermische Belastungssituationen beschreiben und diese räumlich differenziert darstellen können.

Für jedes Modellgebiet werden die beiden Parameter für den Zeitpunkt 16:00 Uhr (Bereich höchster Tagestemperaturen und intensiver Solarstrahlung) und 22:00 Uhr (Bedarf nach Nachtruhe, keine Solarstrahlung) dargestellt und bewertet (siehe Kapitel 5.2).

4.3 Modellvalidierung

4.3.1 Messungen Windgeschwindigkeit und Temperatur Marienkirche

Seit Mai 2016 laufen am Turm der Marienkirche in Reutlingen in verschiedenen Höhen Dauer-messungen zu Windgeschwindigkeit und Temperatur. Die Windgeschwindigkeit wird in ca. 45 m Höhe mit einem Schalenanemometer (Thies Anemometer first class advanced; siehe Abbildung 22) erfasst. Messungen zur Lufttemperatur erfolgen in ca. 60 m, ca. 45 m, ca. 30 m sowie ca. 10 m Höhe (je HOBO Pro v2) (Messpositionen siehe Abbildung 23). Als solitärer Hochpunkt in der Kernstadt von Reutlingen ist die Marienkirche in besonderem Maße geeignet, die Dynamik der Kaltluftströmungen der Echaztäler bzw. Arbachtäler Kaltluftsysteme abzubilden.

Die folgende Abbildung 24 sowie Abbildung 25 zeigen den Zeitraum zwischen 19:00 Uhr und 06:00 Uhr. Die beiden Nächte sind exemplarisch für windschwache sommerliche Strahlungsnächte mit geringen Windgeschwindigkeiten und geringem Wolkenbedeckungsgrad, wie sie auch dem Modell KLAM_21 als Randbedingungen zugrunde gelegt sind. Startzeit des Modells ist kurz vor Sonnenuntergang, da bereits vor Sonnenuntergang die langwellige Ausstrahlung der Bodenoberflächen höher ist als die kurzwellige Einstrahlung durch die untergehende Sonne. Dies bedeutet, dass die Luft sich nun abkühlt und sich (da schwerer) hang- bzw. talabwärts bewegt.

Der Verlauf der Windgeschwindigkeit und der Temperaturen ist in beiden Nächten sehr ähnlich. Die Temperaturen in den verschiedenen Höhen unterscheiden sich um 19:00 Uhr nur geringfügig voneinander (Temperatur in 10 m Höhe ca. 1 °C bis 4 °C niedriger als in 30 bis 60 m Höhe), wobei der Messpunkt in 10 m Höhe jeweils die geringsten Werte aufweist. Die Windgeschwindigkeiten liegen zu Beginn der Messkurven in Abbildung 24 und Abbildung 25, d.h. kurz vor Sonnenuntergang im Bereich zwischen 0,5 m/s und 1 m/s.

Kurz vor Sonnenuntergang kommt es zu einem Auffrischen des Windes, was den Beginn der Kaltluftabflüsse andeutet. Die in die bebauten Bereiche von Reutlingen einströmende Kaltluft verdrängt wärmere Stadtluft. Diese wird durch von Südost nach Nordwest fließender Kaltluft aus den unbebauten Tälern und Umgebungshöhen ersetzt. Kurz nach Sonnenuntergang wird ein erstes Maximum der Windgeschwindigkeit erreicht (etwa 3 m/s bis 3,5 m/s in 45 m Höhe). Gleichzeitig wird durch die beginnende Luftbewegung der nächtliche Temperaturrückgang insbesondere an den Messpunkten oberhalb des mittleren Bebauungsniveaus von 12 m bis 15 m (d.h. Messpunkte 30 m, 45 m und 60 m) kurzzeitig verstärkt. Dies bedeutet, dass die Abkühlung des Stadtzentrums zunächst vorwiegend „von oben“ durch den die Stadt überstreichenden Kaltluftstrom erfolgt.

Der Beginn beider Kaltluftnächte ist durch eine frühe Temperaturumkehr gekennzeichnet. Der unterhalb des mittleren Bebauungsniveaus liegende Temperaturmesspunkt (10 m) weist – anders als vor Beginn der Nacht – bis zum Sonnenaufgang die höchsten Temperaturen der 4 Messpunkte auf (Temperatur in 10 m Höhe ca. 2°C höher als in 60 m Höhe). Ab etwa 2 Stunden nach Sonnenuntergang finden die wesentlichen und länger andauernden Luftbewegungen statt. Dies korrespondiert in etwa mit dem von KLAM_21 prognostizierten Zeitpunkt des Eintreffens der Hauptströmungen aus dem Echaz- bzw. Arbachtal.

Die Grundstruktur des Kaltluftgeschehens ist jeweils gleich. Änderungen der übergeordneten Strömungen können jedoch die Intensität der Kaltluftabflüsse modifizieren. So wird in der Nacht vom 23.08.2016 auf den 24.08.2016 ein Abflauen beobachtet, das vermutlich darauf zurückzuführen ist, dass die übergeordnete Strömung von Nordosten auf West gedreht und zugenommen hat, wie aus Messungen in derselben Nacht an den Stationen oberer Lindenhof (Agrarmeteorologie Baden-Württemberg) bzw. Stuttgart/Echterdingen (DWD) hervorgeht.

Generell kann daher von einer guten Abbildung der realen Verhältnisse durch das Modell KLAM_21 gesprochen werden. Einerseits bildet das Modell z.B. das Eintreffen des Kaltluftstromes zeitlich passend ab, andererseits wird durch die Messungen eine Kaltfluthöhe von deutlich größer 45 m (im Modell bis zu 70 m) bestätigt.

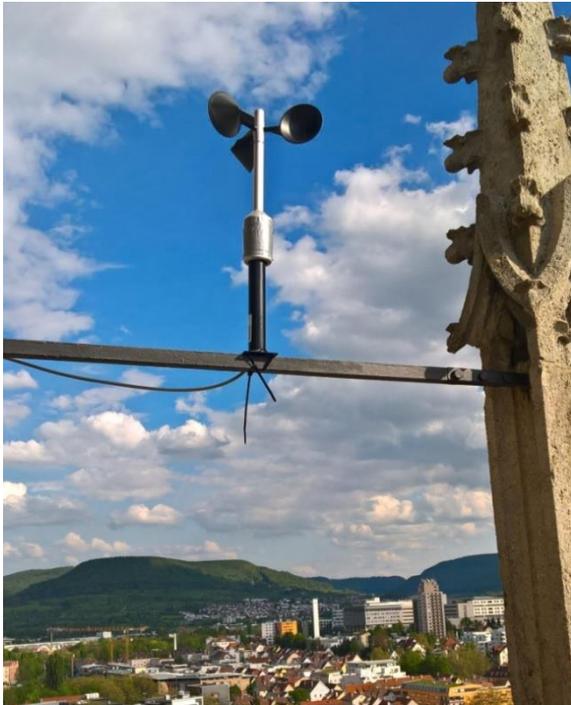


Abbildung 22:
Anemometer auf der Marienkirche in ca. 45 m Höhe (im Hintergrund: Urselberg Pfullingen)

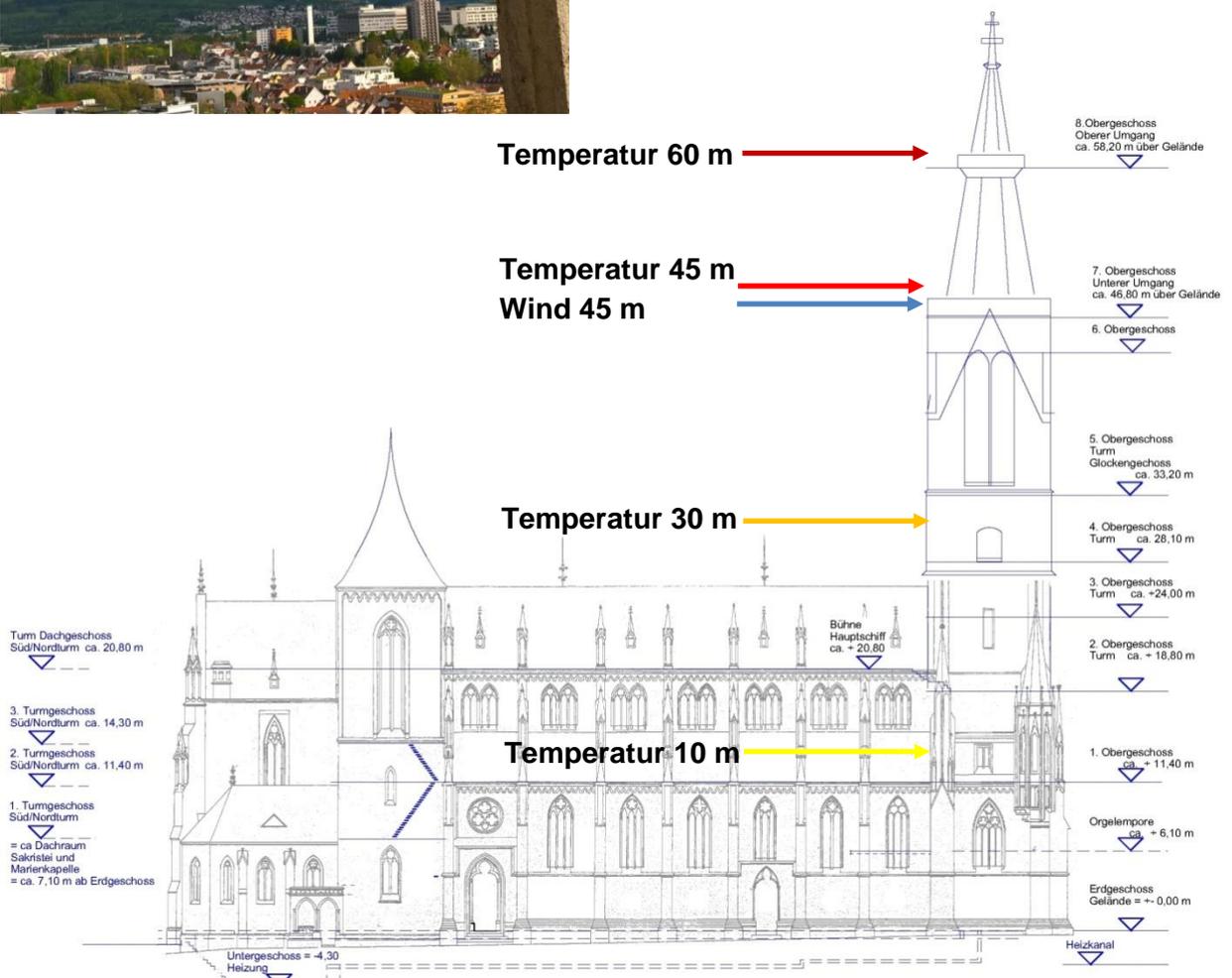


Abbildung 23: Messpositionen am Turm der Marienkirche

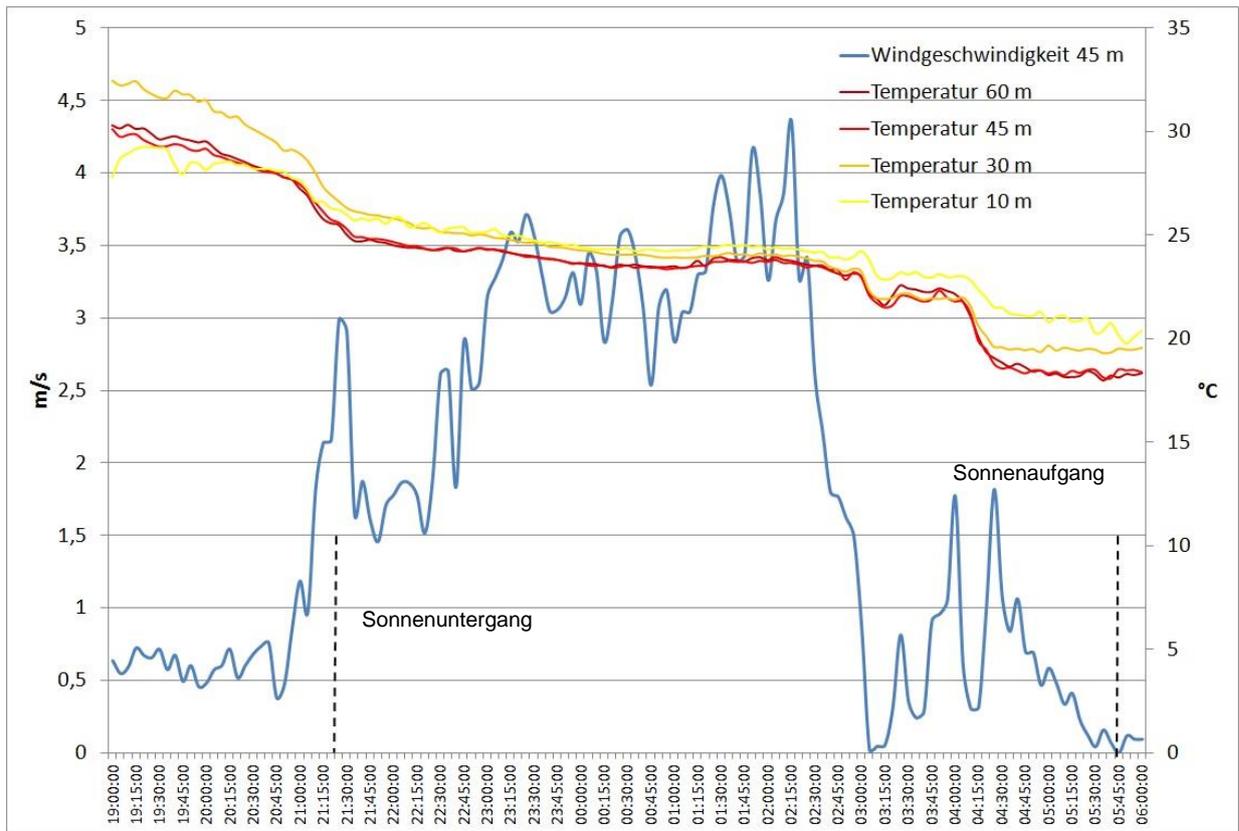


Abbildung 24: Windgeschwindigkeit und Temperaturverteilung an der Marienkirche in der Nacht vom 19.07.2016 zum 20.07.2016

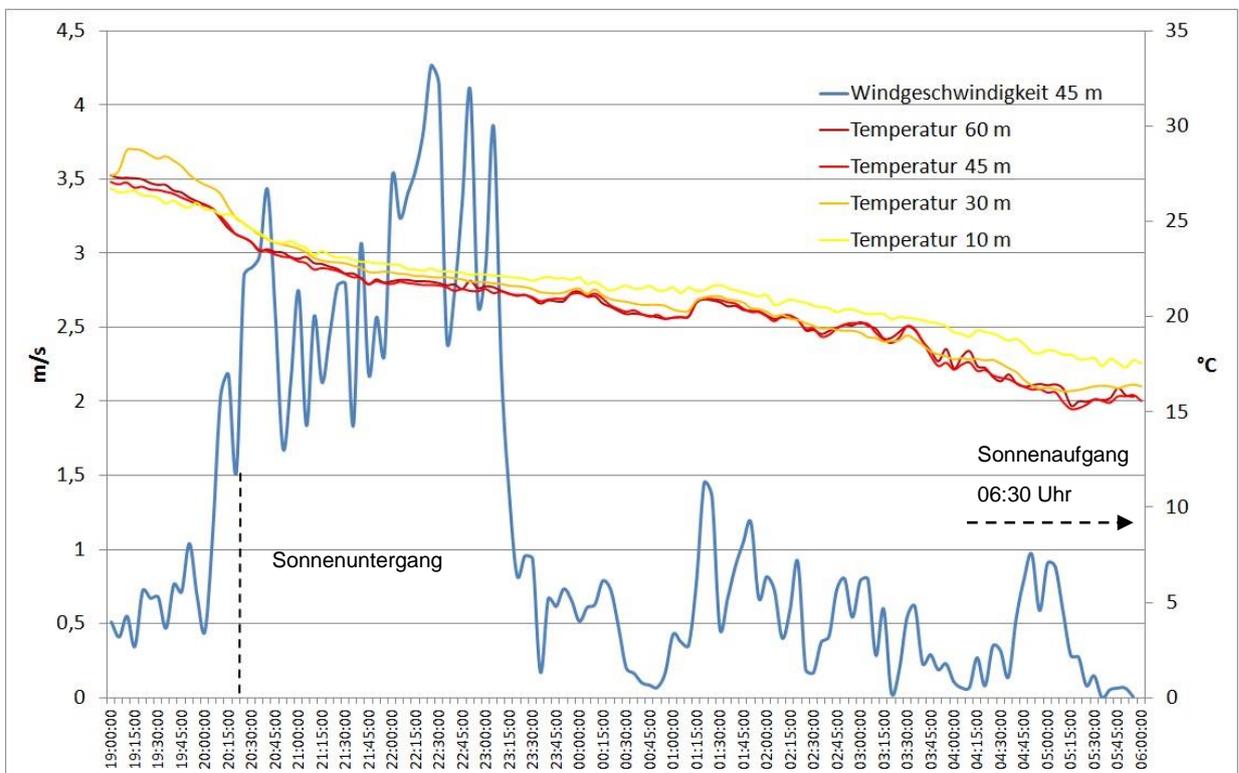


Abbildung 25: Windgeschwindigkeit und Temperaturverteilung an der Marienkirche in der Nacht vom 23.08.2016 zum 24.08.2016

4.3.2 Temperaturmessfahrten

Am 06.05.2016 wurde eine Temperaturmessfahrt im Modellgebiet durchgeführt. Dabei wurden zwei festgelegte Routen bei einer windschwachen Strahlungswetterlage ab Beginn der Abenddämmerung abwechselnd mehrfach abgefahren. Start- und Endpunkt war jeweils die Hindenburgstraße im Bereich der Pomologie.

Route 1: Pomologie – Klinikum Steinenberg – Industrie- bzw. Gewerbegebiet Pfullingen – unterer Lindenhof – Lederstraße – Tübinger Straße/Fa. Bosch – Betzingen – Breitenbachtal/B 28 – Kreuzzeiche – Ringelbachstraße – Pomologie

Route 2: Pomologie – Lederstraße – unterer Lindenhof – Betzenried – Burgstraße – Panoramastraße – Hauptbahnhof – In Laisen – Storlach – Schieferstraße – Karlstraße – Kaiserstraße – Lederstraße - Pomologie

Karte 1 im Kartenteil zeigt die Temperaturmessfahrten vom 06.05.2016.

Da vom Modell KLAM_21 keine Temperaturwerte ausgegeben werden, ist ein Vergleich zwischen den Messwerten und den Modellierungsergebnissen nur nährungsweise möglich. Darüber hinaus zeigt die Auswertung des Modells ein statisches Ergebnis, während die Messfahrten jeweils über den Zeitraum einer Stunde andauerten. Um die Messfahrten und die Modellierungsergebnisse zu vergleichen, wurde der Parameter Kälteinhalt in J/m^2 (als Maß für negative Temperaturabweichung von den Modellstartbedingungen) gewählt. Zusätzlich werden in KLAM_21 bzgl. des Wärmehaushaltes lediglich Werte über die gesamte Kaltlufthöhe ausgegeben, während sich die Werte der Messfahrten generell auf eine Höhe von ca. 1,75 m beziehen.

Insbesondere in Bereichen, in denen flache Kaltluftabflüsse die Temperaturen in Bodennähe spürbar senken, sind daher gute Übereinstimmungen des Modells mit den Messwerten zu erwarten. Findet der Kaltluftabfluss dagegen in größeren Höhen statt, sind generell geringere Übereinstimmungen zu erwarten, da der dargestellte Kälteinhalt in größeren Höhen vorliegt.

Zur besseren Vergleichbarkeit werden an den jeweiligen Punkten die Abweichungen von der niedrigsten gemessenen Temperatur dargestellt. An den Punkten Pomologie und unterer Lindenhof können die erfassten Werte mit denen der Wetterstationen der LUBW bzw. des agrarmeteorologischen Netzes Baden-Württemberg verglichen werden.

Generell zeigen die mit KLAM_21 modellierten Ergebnisse eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der vier Messfahrten vom 06.05.2016. (siehe Karte 1 im Kartenteil)

Die höchsten Temperaturen wurden erwartungsgemäß in den aufgeheizten Innenstadtbereichen bzw. den Gewerbe- bzw. Industriegebieten gemessen, während die niedrigsten Temperaturen im Bereich des unbebauten Breitenbachtals bzw. der Kreuzzeiche am Stadtrand gemessen wurden. Die größte gemessene Temperaturdifferenz zwischen Stadt und Umland betrug $8,3\text{ °C}$ (siehe Tabelle 6), was die Intensität der städtischen Wärmebelastung sehr verdeutlicht.

Insbesondere im Bereich des südlichen Bebauungsrandes von Betzingen wirkte sich hierbei die Ausbildung des Bergwindsystems des Breitenbachtals stark temperatursenkend aus. Hier wurden auch die absolut niedrigsten Temperaturen während der Messfahrten erfasst. Auch im Bereich der Burgstraße bzw. des Panoramaweges wurden verhältnismäßig niedrige Werte

gemessen. Hier wirkt sich das Hangwindssystem der Achalm bzw. des Scheibengipfels stark temperatursenkend aus, jedoch scheint dieser Effekt sehr kleinräumig zu variieren.

Größere Abweichungen von den Modellergebnissen ergaben sich vor allem im Bereich des Industriegebietes von Pfullingen am Stadtrand von Reutlingen. Hier ist der Kaltluftstrom des Echaztales bereits über der Bebauung angehoben und überströmt diese. Die Bebauung besitzt eine hohe Wärmekapazität und kühlt sich insbesondere durch nächtliche Ausstrahlung und die vertikale turbulente Durchmischung in der Rauigkeitsschicht erst zeitverzögert ab. Dies gilt auch für die bodennahe Luftschicht. Hangwinde, die flach in die Bebauung eindringen und die Gebäude umströmen, sind hier – im Gegensatz etwa zur Reutlinger Oststadt (s.o.) – nicht vorhanden. Bei diesen flachen Kaltluftströmungen herrscht ein erhöhter Wärmeübergang. Sie werden deshalb von der im Siedlungsbereich vorhandenen Überwärmung rasch aufgezehrt und können somit nicht tief in die Bebauung eindringen.

Die festgestellten Abweichungen erklären sich somit dadurch, dass das Kaltluftmodell KLAM_21 die Temperaturschichtung nicht abbildet, sondern sich auf mittlere Wärmeinhalte in der Kaltluftschicht bezieht.

Tabelle 6: Wesentliche Daten der Temperaturmessfahrten vom 06.05.2016

Fahrt / Route	Fahrtbeginn / -ende	höchste absolute Temperatur / Ort [Stadt]	niedrigste absolute Temperatur / Ort [Umland]
1 / 1	20:25 – 21:22	20,7 °C / Hindenburgstraße	12,4 °C / Kreuzzeiche (Stadion)
2 / 2	21:28 – 22:27	17,7 °C / Karlstraße Ecke Unter den Linden	11,2 °C / Arbachtalstraße (Enningen)
3 / 1	22:46 – 23:42	15,7 °C / Alte Feuerwache	7,9 °C / Parkplatz Haldenäckergeweg (Betzingen)
4 / 2	23:46 – 00:43	16,8 °C / Bismarckstraße	11,9 °C / Panoramaweg

5 Ergebnisse der lokalklimatischen Modellierungen

Die Ergebnisse der stadtweiten Modellierungen zeigen wesentliche lokalklimatische Zusammenhänge durch die Darstellung von:

- Hangabwindssystemen
- Bergwindssystemen
- Kaltfluthöhen zu verschiedenen Zeitpunkten

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse im gesamtstädtischen Maßstab dargestellt (Kapitel 5.1), bevor einzelne Teilbereiche bzgl. Strömungsdynamik und thermischer Behaglichkeit (siehe Kapitel 5.2) näher beschrieben werden.

5.1 Stadtweite Ergebnisse der Kaltluftströmungsberechnungen

5.1.1 Bodennahe Windgeschwindigkeiten in Strahlungsnächten (Karten 3, 5 und 6)

Die bodennahen (Bezugshöhe: 2 m) Windgeschwindigkeiten in Strahlungsnächten geben insbesondere für die frühen Zeitpunkte der Nacht (1 h nach Sonnenuntergang) Aufschluss über wichtige Kaltluftentstehungsgebiete. Generell deuten dabei hohe Windgeschwindigkeiten auf eine hohe Kaltluftproduktion einerseits und auf eine relevante Hangneigung (mindestens ca. 2°) zum zügigen Abtransport der Kaltluft andererseits hin. Je nach topographischer Lage können diese Bereiche die ganze Nacht über zur Kaltluftentstehung und -abfuhr beitragen. Insbesondere in der Nähe von Siedlungsrändern können sie lokalklimatisch für diese Areale von sehr hoher Bedeutung sein. Karte 3 im Kartenteil zeigt die Windgeschwindigkeit in m/s für den Zeitpunkt 1 h nach Sonnenuntergang, klassifiziert nach Tabelle 7.

Tabelle 7: Windgeschwindigkeiten in m/s und damit verbundene grundsätzliche klimaökologische Wertigkeit des Kaltluftproduktionsbereichs (in Anlehnung an /37/)

Windgeschwindigkeit in m/s	Wertigkeit des Kaltluftproduktionsbereichs	Legendenfarbe
0 - 0,3	-	
> 0,3 - 0,5	sehr gering	
> 0,5 - 1	gering	
> 1,0 - 2	mittel	
> 2,0 - 3	hoch	
> 3	sehr hoch	

Bereiche mit höheren Windgeschwindigkeiten (teilweise > 2 m/s) mit Relevanz für das Stadtgebiet von Reutlingen sind insbesondere (zur Verortung siehe Karte 0 und Karte 3):

- Nordhänge im Bereich Schönberg/Pfullinger Berg (Gemarkung Pfullingen)
- Unterhänge des Urselberges, insbes. Osthänge (Gemarkung Pfullingen)
- Unterhänge des Drackenberges und Mädlesfels (Gemarkung Eningen u.A.)
- Hänge um Gönningen und Bronnweiler (Gemarkung Reutlingen)

In diesen Bereichen kommt es bereits bald nach Sonnenuntergang zu einer teilweisen Kanalisierung der Hangwinde in flachen Hangeinschnitten oder Klingen. Die Bereiche sind stark geneigte Freiflächen von ausreichender zusammenhängender Größe.

Größere zusammenhängende Flächen mit jedoch niedrigeren Windgeschwindigkeiten (> 0,5 - 1 m/s) sind insbesondere:

- weite Teile der Freiflächen zwischen den nördlichen Stadtteilen (Gemarkung Reutlingen)
- Bereiche im Breitenbachtal und östlich von Ohmenhausen (Gemarkung Reutlingen)
- teilw. Hänge von Achalm und Scheibengipfel (Gemarkung Reutlingen)
- teilw. nordwestliche Hänge des Urselberges (Gemarkung Pfullingen)
- Hänge im Stadtgebiet von Eningen u.A. (Gemarkung Eningen u.A.)

Sämtliche dieser Bereiche liefern einen Beitrag zu Hangab- und Bergwindssystemen. Einige der Bereiche haben durch starke räumliche Nähe zum Stadtrand direkten Siedungsbezug und sind daher stadtklimatisch besonders wertvoll. Eine Einordnung der Wertigkeit von Freiflächen erfolgt im Rahmen der Erstellung der Klimaanalysekarte (Kapitel 6) bzw. der Planungshinweiskarte (Kapitel 7)

5.1.2 Kaltluftvolumenstromdichte (Karte 4)

Im weiteren Verlauf der Nacht bilden sich in den Tälern aufgrund konstanten Zuflusses von den Hängen Bergwindssysteme aus, welche große Mengen Kaltluft über weitere Strecken und in größeren Höhen transportieren können. Diese Kaltluftleitbahnen haben für überwärmte und lufthygienisch belastete Bereiche eine wesentliche klimaökologische Ausgleichsfunktion. Im Fokus liegen hier insbesondere Bereiche hoher Volumenströme außerhalb oder zwischen Siedlungen. Karte 4 im Kartenteil zeigt die Kaltluftvolumenstromdichte in $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ für den Zeitpunkt 4 h nach Sonnenuntergang, klassifiziert nach Tabelle 8.

Tabelle 8: Kaltluftvolumenstromdichten ($\text{m}^3/\text{m}^*\text{s}$) und damit verbundene grundsätzliche klimaökologische Wertigkeit der Kaltluftleitbahn

Kaltluftvolumenstromdichte ($\text{m}^3/\text{m}^*\text{s}$)	Klimaökologische Ausgleichsleistung der Kaltluftleitbahn	Legendenfarbe
0-15	sehr gering	
>15-30	gering	
>30-60	mittel	
>60-120	hoch	
> 120	sehr hoch	

Zum Zeitpunkt 4 h nach Sonnenuntergang ist das Bergwindssystem voll ausgebildet. Bereiche mit höheren Kaltluft-Volumenstromdichten (teilweise $> 60 \text{ m}^3/\text{m}^*\text{s}$, z.T. $> 120 \text{ m}^3/\text{m}^*\text{s}$) mit Relevanz für das Stadtgebiet von Reutlingen sind insbesondere:

- Wiesaztal (Gemarkung Reutlingen)
- Arbachtal (Gemarkung Eningen u.A.)
- teilw. Echaztal (Gemarkung Pfullingen/ Lichtenstein)
- Breitenbachtal (Gemarkung Reutlingen)

Dieser Bereiche umfassen leistungsstarke Bergwindssysteme und sind generell für die Belüftung der Stadt Reutlingen, insbesondere der Kernstadt und des Stadtbezirks Betzingen wertvoll.

Die folgenden Abbildungen zeigen Schnitte durch diese Bergwindssysteme, jeweils zum Zeitpunkt 4 h nach Sonnenuntergang (Schematische Darstellung in Abbildung 26). Dargestellt ist in den Schnitten die mittlere Strömungsgeschwindigkeit über die gesamte Kaltluftmächtigkeit als Normalkomponente des Geschwindigkeitsvektors, d.h. die Luftbewegung erfolgt entweder in die Schnittebene hinein (positive Werte) oder aus der Schnittebene heraus (negative Werte). Die Schnitte wurden möglichst im rechten Winkel zu Kaltluftströmungen gesetzt.

Mit knapp $42.500 \text{ m}^3/\text{s}$ ist der Kaltluftstrom aus dem Echaztal bei Pfullingen (siehe Abbildung 27) aufgrund seines großen Einzugsgebietes mit Abstand der stärkste im Modellgebiet. KLAM_21 teilt die Kaltluftströmung aufgrund der Bebauung im Tal, aber z.T. auch am Hang, in viele einzelne „Kanäle“ auf. Tatsächlich wird die Kaltluft weit weniger stark in Leitbahnen kanalisiert. Vielmehr ist größerer Höhe von einer flächenhaften Überströmung der Hindernisse auszugehen. Eine kleinräumige Interpretation der Berechnungsergebnisse in Bezug auf die Gebäudeumströmung ist unzulässig.

Die zweitstärkste Kaltluftströmung im Stadtgebiet von Reutlingen stellt der Arbachtäler Kaltluftstrom mit knapp $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$ dar (siehe Abbildung 28). Gemessen an dem deutlich kleineren Einzugsgebiet des Arbachtals gegenüber dem Echaztal stellt der „Arbachtäler“ mit einem nur etwa 30 % kleineren Volumenstrom, der Nähe zum Stadtgebiet von Reutlingen sowie der verhältnismäßig wenigen Emittenten für Luftschadstoffe in dessen Einzugsgebiet den wirkungsvolleren der beiden sehr bedeutenden Kaltluftströme dar.

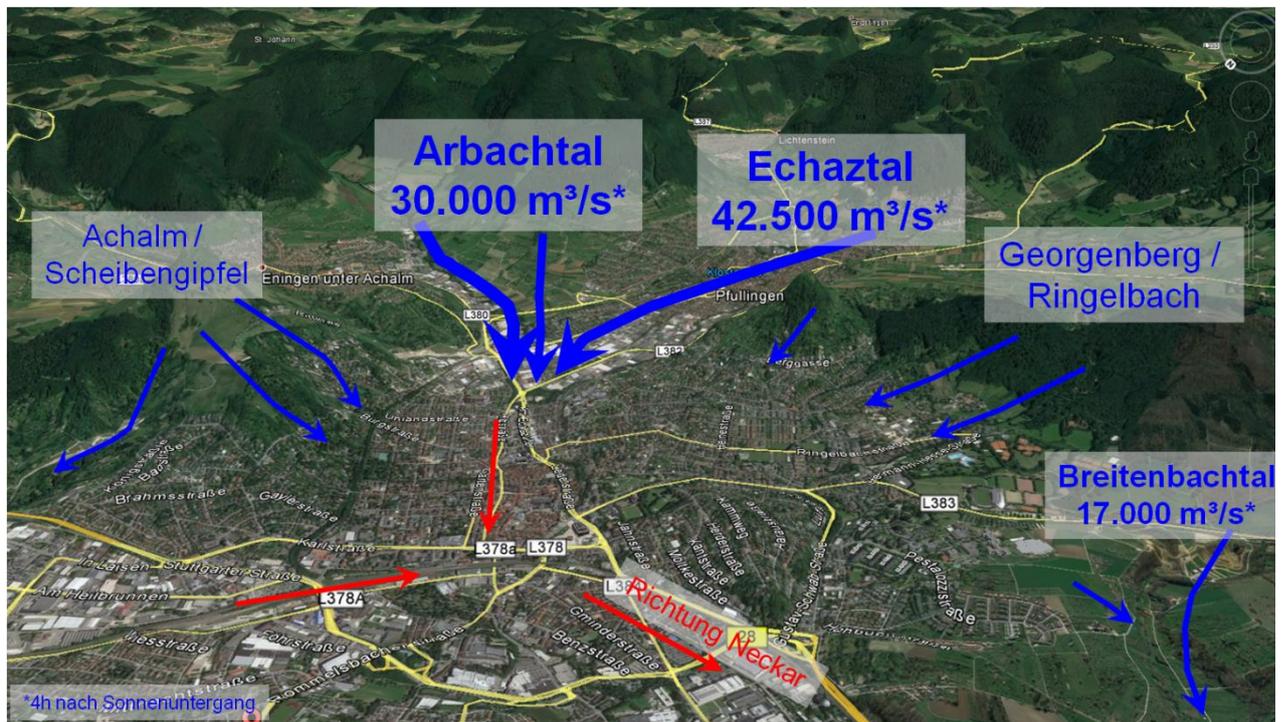


Abbildung 26: Schematische Darstellung der wesentlichen Kaltluftströme für die Kernstadt von Reutlingen (Quelle: Google Earth)

Der Hauptteil der Strömung fließt an den Talflanken, insbesondere an der südlichen, dem Urselberg zugewandten Seite.

Der drittstärkste Kaltluftvolumenstrom wurde für das Wiesaztal modelliert (siehe Abbildung 29). Mit knapp $25.500 \text{ m}^3/\text{s}$ ist er nur wenig schwächer als der des Arbachtals. Die Verbindung von großflächigen (Streuobst-)Wiesenbereichen mit mäßigen bis starken Hangneigungen ist hier wesentlich ausschlaggebend. Im Bereich von Gönningen selbst wird die Strömung in größere Höhen bzw. um den Ort herumgelenkt.

Der Kaltluftstrom des Breitenbachtals (siehe Abbildung 29), der in Teilen von Betzingen wirksam wird, ist mit ca. $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$ der viertstärkste im Stadtgebiet von Reutlingen. Der Kaltluftstrom kann nach Schließung der Haumülldeponie Schinderteich als nahezu unbelastet gelten. Wegen der geringen Rauigkeit im Einzugsgebiet bis kurz vor dem Eintritt in das Stadtgebiet von Betzingen befindet sich das Maximum des Volumenstromes in nicht allzu großer Höhe. Der wesentliche Teil der Strömung verläuft demnach auch nahe des Talgrundes (dunkelblauer Bereich in Abbildung 30).

Eine Einordnung der Wertigkeit der Freiflächen im Bereich dieser Kaltluftsysteme erfolgt für das Stadtgebiet von Reutlingen im Rahmen der Erstellung der Klimaanalysekarte (Kapitel 6) bzw. der Planungshinweiskarte (Kapitel 7).

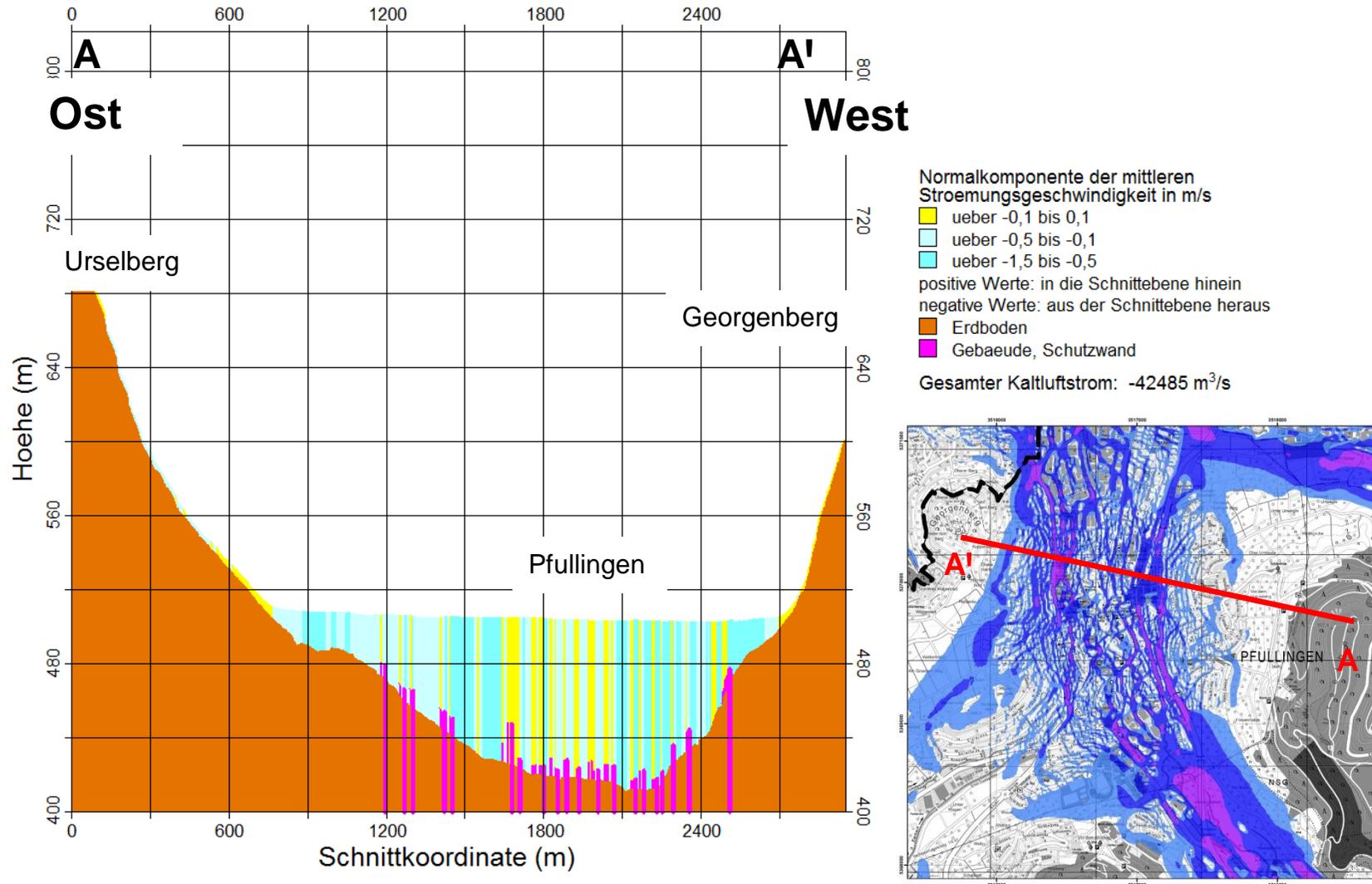
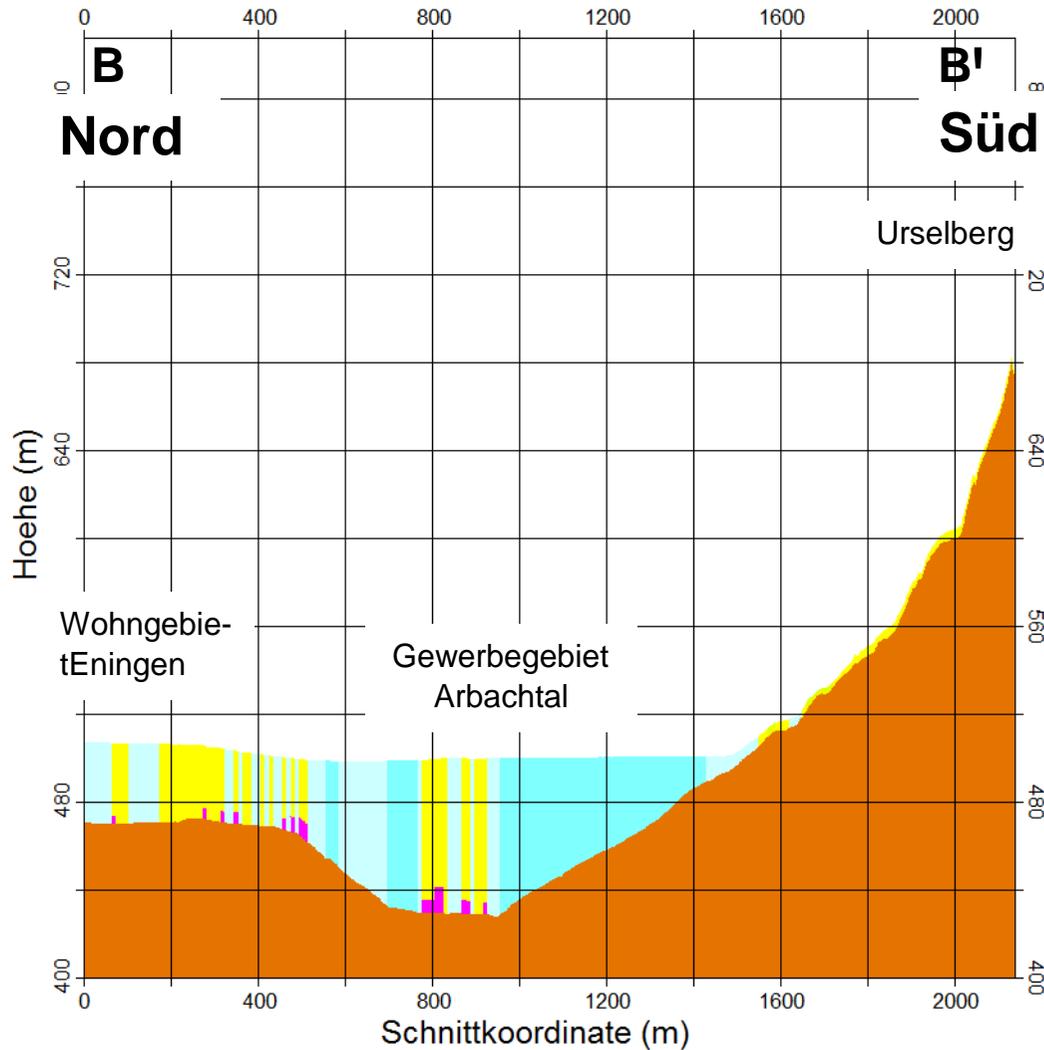


Abbildung 27: Schnitt (A – A') durch das Echaztal bei Pfullingen ca. 4 h nach Sonnenuntergang



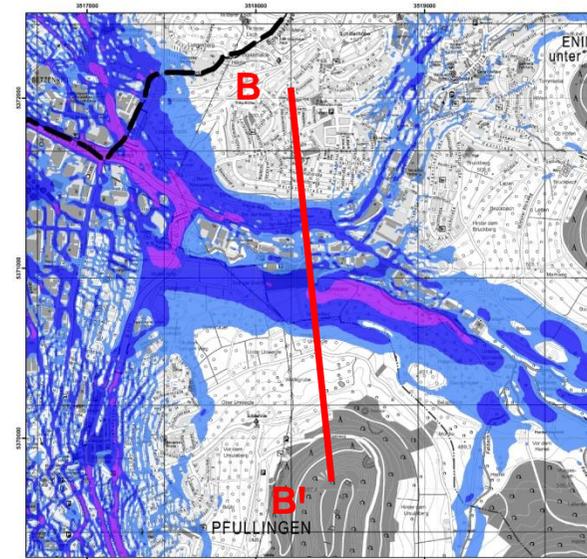
Normalkomponente der mittleren
Stromungsgeschwindigkeit in m/s

- ueber 0,1 bis 0,5
- ueber -0,1 bis 0,1
- ueber -0,5 bis -0,1
- ueber -1,5 bis -0,5

positive Werte: in die Schnittebene hinein
negative Werte: aus der Schnittebene heraus

- Erdboden
- Gebaue, Schutzwand

Gesamter Kaltluftstrom: -29905 m³/s



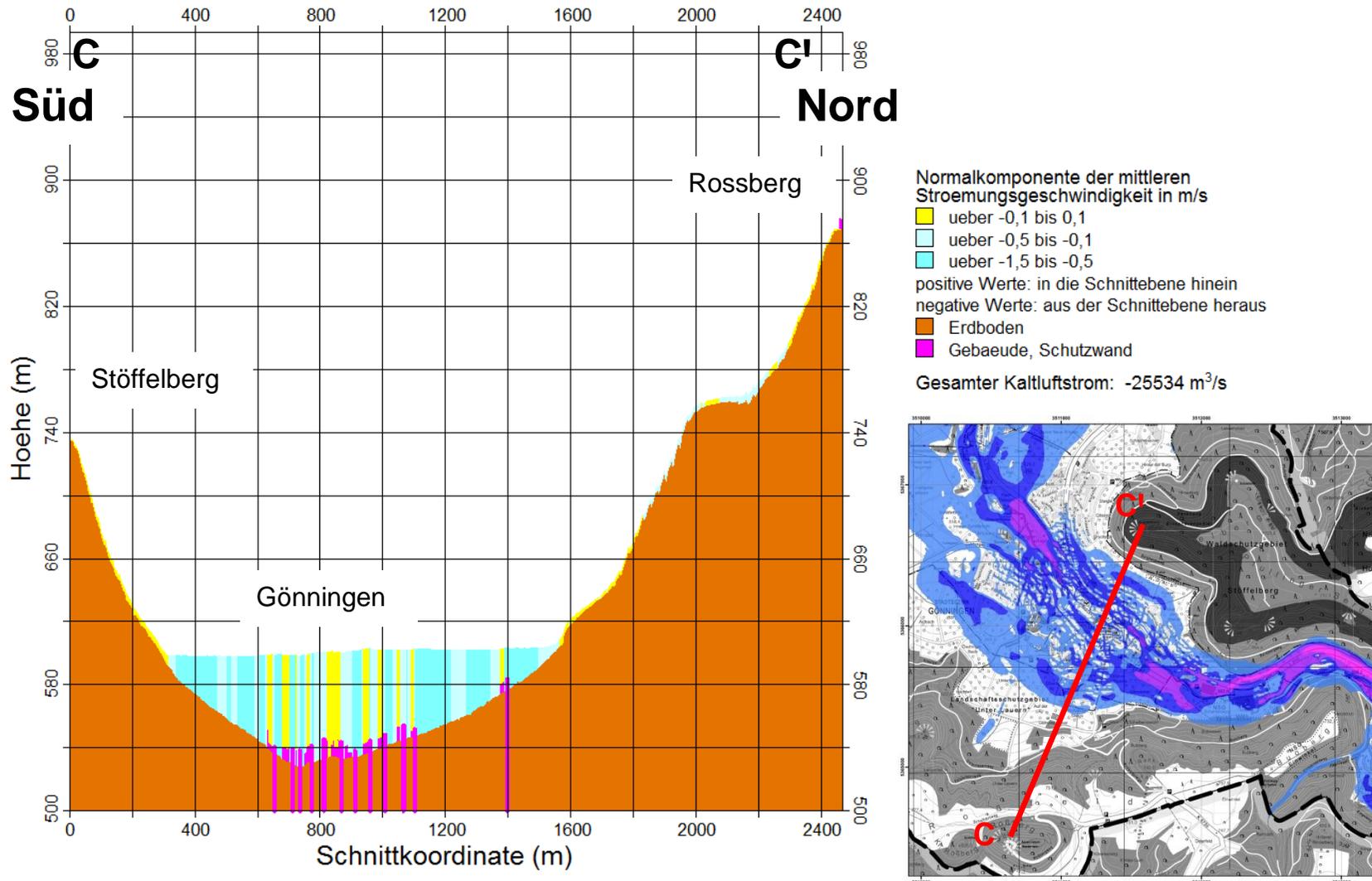


Abbildung 29: Schnitt (C – C') durch das obere Wiesaztal bei Gönningen ca. 4 h nach Sonnenuntergang

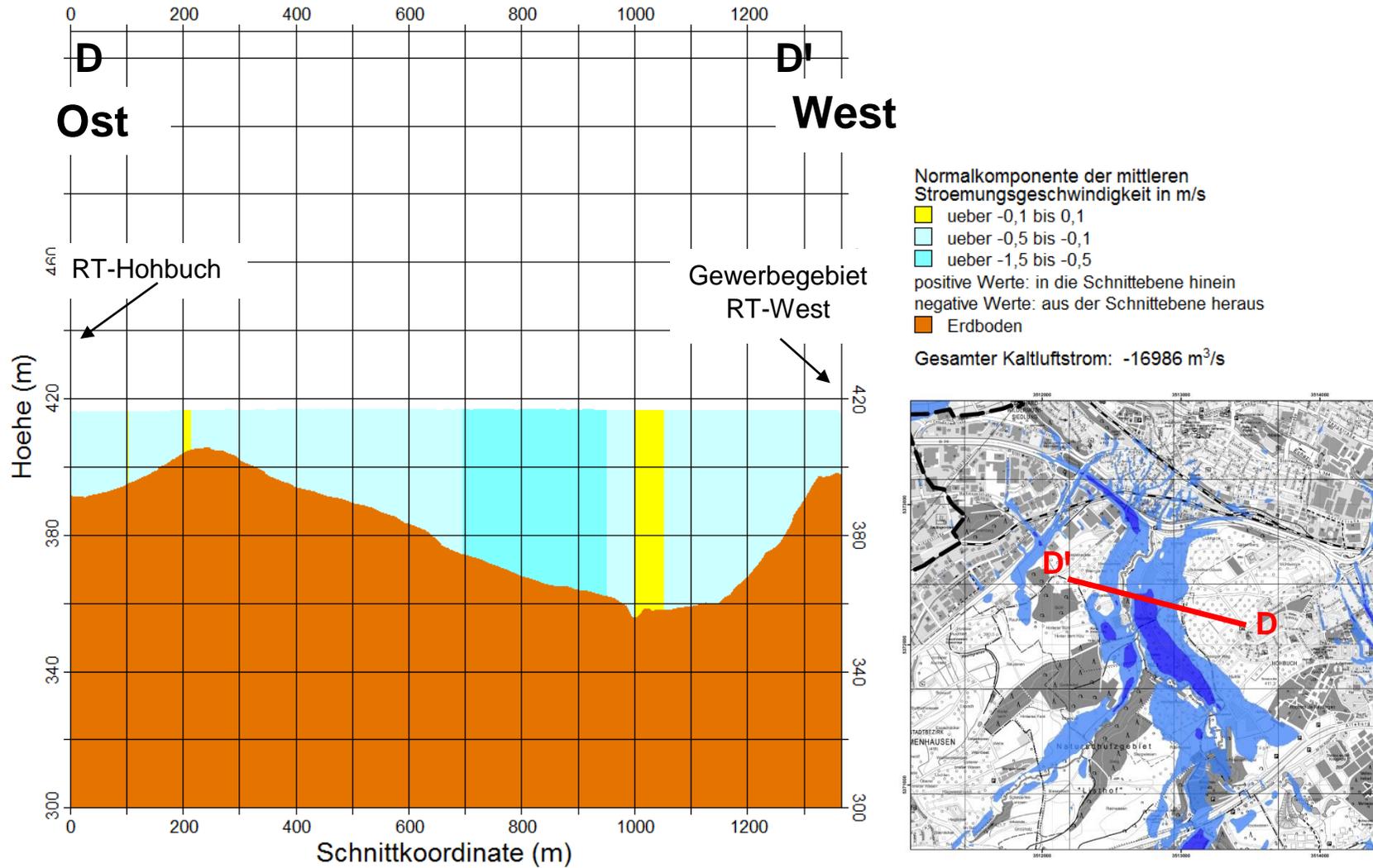


Abbildung 30: Schnitt (D – D') durch das Breitenbachtal ca. 4 h nach Sonnenuntergang

5.1.3 Windfeld in verschiedenen Höhen über Grund

Wesentlich für die Qualität der Be- bzw. Durchlüftung von Siedlungsbereichen ist die Höhenlage der wesentlichen Luftströmungen. Generell werden höhere Windgeschwindigkeiten in städtischen Bereichen z.T. deutlich oberhalb der durchschnittlichen Gebäudehöhe erreicht (siehe Kapitel 2.2.6).

Karte 5 und Karte 6 im Kartenteil zeigen die Windgeschwindigkeit für den Zeitpunkt 4 h nach Sonnenuntergang in 2 m bzw. in 20 m Höhe, klassifiziert nach Tabelle 7 (Blatt 39).

Während in 2 m Höhe höhere Windgeschwindigkeiten insbesondere an Oberhängen in Freilandbereichen und vereinzelt an Stadträndern (z.B. Wohngebiete unter dem Scheibengipfel und unter dem Georgenberg) zu verzeichnen sind, zeigt die Betrachtung der Windgeschwindigkeiten in 20 m Höhe, dass erwartungsgemäß die wesentlichen Luftströmungen in größeren Höhen stattfinden. So treten bei der Betrachtung der Windgeschwindigkeiten in 20 m Höhe deutlich die großen Bergwindssysteme von Arbach, Echaz, Breitenbach und Wiesaz hervor.

Diese mächtigen Kaltluftabflüsse erreichen im Lauf einer Strahlungsnacht Luftschichten von ca. 70 m Höhe über Grund und darüber (Marienkirche Reutlingen Höhe ca. 71 m).

In den ersten 1 -2 Stunden nach Sonnenuntergang sind in der Kernstadt allenfalls sehr schwache bodennahe Luftbewegungen zu verzeichnen. Modelltechnisch gehen diese auf Zuströmungen aus dem Bereich Scheibengipfel bzw. Achalm zurück. Diese flachen Luftbewegungen werden mit dem Eintritt der wesentlich stärkeren Kaltluftströme aus dem Echaz- bzw. Arbachtal ca. 2 h nach Sonnenuntergang überlagert.

Nach den Modellrechnungen erreicht der Echaz- und Arbachtäler Kaltluftstrom ca. 1,5 h nach Sonnenuntergang die Reutlinger Innenstadt am Leonhardsplatz und entwickelt sich innerhalb von ca. 2 Stunden zu einem Kaltluftstrom, der das Kernstadt im Wesentlichen überströmt und auf eine Höhe von bis zu 70 m über Grund reicht. Die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten sind nach in Höhen von ca. 35 bis 50 m festzustellen. Darüber sinken die Windgeschwindigkeiten wieder, da die überlagernden ruhenden Luftschichten den Kaltluftstrom an seiner Obergrenze bremsen. Innerhalb der städtischen Bebauung verzögert die Hinderniswirkung der Bebauung („Rauigkeit“) die Strömung. Vor allem in der bodennahen Reibungsschicht, abgeschwächt aber auch in der Reibungsschicht über dem Kaltluftstrom sorgt vertikale Turbulenz für einen Wärmeübergang. Der Wärmeübergang zehrt den Kaltluftstrom auf. Gleichzeitig kühlt auch der die Bebauung überströmende Kaltluftstrom die bodennahe Luftschicht ab und senkt die innerstädtische Überwärmung.

Der Wärmeübergang hängt von der vertikalen Durchmischung der Grenzschicht ab. Stark variierende Bauhöhen der städtischen Bebauung erhöhen die turbulente Durchmischung, einheitliche Bauhöhen, führen zu einer einheitlichen Verdrängungshöhe und geringer Turbulenz.

5.1.4 Kaltluftmächtigkeit im Stadtgebiet von Reutlingen

Die Karten 7 bis 10 im Kartenteil zeigen die Entwicklung der Kaltfluthöhe zu verschiedenen Zeitpunkten im Laufe einer Strahlungsnacht in den Klassen nach Tabelle 9.

Tabelle 9: Kaltluftmächtigkeiten in m über Grund (Karten 7 - 10 im Kartenteil)

Kaltluftmächtigkeit in m über Grund	Legendenfarbe
0-3	
>3-6	
>6-10	
>10-15	
> 15-20	
> 20-25	
> 25-30	
> 30-35	
> 35-45	
> 45-70	
> 70	

Die Abbildungen zeigen deutlich die bereits frühen Auffüllungen verschiedener Täler mit Kaltluft, wie Echaz-, Arbach- und Wiesaztal (bereits nach 1 h > 25 m Kaltluftmächtigkeit). Städtische Bereiche treten dagegen, je nach topographischer Lage, bis weit in die Nacht als stark überwärmte Bereiche hervor, da dort zunächst Wärme abgebaut wird und das Strömungshindernis überwunden werden muss (z.B. Gewerbegebiet „In Laisen“). Aufgrund mangelnden Abtransports von Kaltluft in flacheren Talbereichen kommt es in den späteren Phasen der Nacht vielerorts zum Kaltluftstau, indem weiterhin Kaltluft produziert, jedoch nicht mehr vollumfänglich abgeführt werden kann. Das System stagniert mit einer sehr stabilen Schichtung, was wegen mangelnden vertikalen Austauschs aus Sicht der Luftreinhaltung ein eher ungünstiger Zustand ist.

Generell ist die lufthygienische Qualität der Kaltluft sowie die erzielte Temperaturabsenkung am Boden größer, je weiter man sich vom Stadtkern (z.B. Marktplatz) Richtung Umland (z.B. Richtung Arbachtal) bewegt. In Bereichen wie der Innenstadt von Reutlingen durchströmt die Kaltluft die städtische Bebauung der Kernstadt praktisch nicht, sondern überströmt diese im Wesentlichen. Eine Temperatursenkung kann dann lediglich durch vertikale Abkühlung von oben stattfinden, welche weniger effektiv als Abkühlung durch horizontale Durchströmung der Bebauung ist (s.o.).

Den Modellrechnungen zufolge bleibt der mächtige Echaz- und Arbachtäler Kaltluftstrom die ganze Nacht über erhalten. Auch ohne übergeordnete Windströmung kommt in sommerlichen Strahlungs Nächten durch die kräftigen Kaltluftströme aus dem Echaz- und Arbachtal ein stetiger – lufthygienisch äußerst bedeutsamer - Luftaustausch in der Innenstadt von Reutlingen zustande, der bei windschwachen Lagen bis nach Betzingen reicht.

Die Kaltluftsysteme in den tiefer gelegenen Talbereichen (insbesondere z.B. Arbachtal/Echaztal zwischen Stadtgrenze Reutlingen Pfullingen und Mündung in den Neckar) kommen jedoch in der zweiten Nachthälfte zum Erliegen. Es bildet sich eine Temperaturinversion aus. In diesen Bereichen herrscht ein nur sehr geringer horizontaler und vertikaler Luftaustausch, der mit ungünstigen Schadstoffausbreitungsbedingungen und ggf. Nebelbildung verbunden ist (z.B. im Bereich Betzingen). In der Regel löst sich die durch intensive Sonneneinstrahlung, einer damit verbundenen Erwärmung der bodennahen Luftschichten und vertikalen Luftbewegungen die Inversionsschicht wieder vollständig auf. Das Kaltluftsystem beginnt im nächsten Tag/Nacht-Rhythmus wieder von neuem.

Im Winterhalbjahr treten bei mehrtägigen stabilen Hochdruckwetterlagen immer wieder großräumige Inversionswetterlagen mit Hochnebel oder Dunst auf. Bei diesen Wetterlagen können sich die Kaltluftsysteme nicht oder nur stark vermindert ausbilden. Zwar wird in den umliegenden Tälern und an Hängen weiter Kaltluft produziert, jedoch kann diese – aufgrund des zu geringen Dichteunterschiedes – nicht mehr in die noch immer mit Kaltluft gefüllten Talbereiche (wie z.B. der Kernstadt von Reutlingen) einfließen. Teilweise können solche Kaltluftseen sogar von weiterer Kaltluft „umflossen“ werden. In der gesamten Inversionsschicht bzw. bei abgehobenen Inversionen in der Mischungsschicht unter der Inversionsschicht herrschen ungünstige Ausbreitungsbedingungen für Luftschadstoffe. Bei derartigen Wetterlagen sind die Kaltluftmächtigkeiten höher als in Karte 10 im Kartenteil dargestellt.

Da solche Wetterlagen mit sehr geringen Windgeschwindigkeiten einhergehen sind generell topographisch niedrig gelegene Bereiche mit einer Vielzahl an Emittenten (stark befahrene Straßen, Hausbrand) wie der Talverlauf der Echaz besonders stark belastet.

Generell sprechen die dann allgemein niedrigen Windgeschwindigkeiten eher für lokale Ursachen hoher Luftbelastung, während bei einem Kaltluft-System mit ausgeprägten Tag/Nacht-Rhythmus (siehe oben) auch der Antransport aus „stromaufwärts“ gelegenen Bereichen eine gewisse Rolle spielen kann.

5.2 Modellierungsergebnisse für einzelne Stadtbereiche

Die stadtweit durch das Modell KLAM_21 berechneten Modellierungsergebnisse sowie die für einzelne Stadtbereiche ermittelten Ergebnisse durch das Modell ENVI-Met sollen nun nach Stadtbereichen gegliedert detaillierter dargestellt werden. Folgende Bereiche unterschiedlicher Größe innerhalb der Stadt Reutlingen wurden abgegrenzt (siehe Abbildung 31):

- **Innenstadt West (ca. 1 km²) – Teilbereich 1**
Schwerpunkte: Hochverdichtete Innenstadt, Wärmeinseleffekt, Bioklima
- **Innenstadt Ost (ca. 2 km²) – Teilbereich 2**
Schwerpunkte: Verdichtete Innenstadt, Grünflächen, Bioklima, Übergang zum Scheibengipfel/Achalm
- **Ringelbach (ca. 2 km²) – Teilbereich 3**
Schwerpunkte: Kaltluftstrom vom Georgenberg, Bioklima, Pflegeeinrichtungen
- **Gönningen (ca. 1 km²) – Teilbereich 4**
Schwerpunkte: Kaltluftstrom vom Albtrauf, Bioklima in Höhenlage
- **Oferdingen (ca. 2 km²) – Teilbereich 5**
Schwerpunkte: Bioklima in tiefer Albvorlandlage, dörfliche Ortsstruktur
- **Betzingen (ca. 2 km²) – Teilbereich 6**
Schwerpunkte: Übergang Freifläche (Breitenbachtal) / Stadt, Bioklima
- **Scheibengipfel Nord (ca. 3 km²) – Teilbereich 7**
Schwerpunkte: Kalt- und Frischluftbahnen im Bereich des Nordportals des Scheibengipfeltunnels
- **Scheibengipfel Süd (ca. 3 km²) – Teilbereich 8/9**
Schwerpunkte: Kalt- und Frischluftbahnen im Bereich des Südportals des Scheibengipfeltunnels
- **Orschel-Hagen (ca. 2 km²) – Teilbereich 10**
Schwerpunkte: Bioklima in der Gartenstadt Orschel-Hagen, umgebende Freiflächen
- **Sickenhausen (ca. 3 km²) – Teilbereich 11**
Schwerpunkte: Erlenbachtalströmung, Kaltluftentstehung im Umland
- **Schieferbuckel (ca. 1 km²) – Teilbereich 12**
Schwerpunkte: Dynamik innerstädtischer Freifläche in gewerblichem Umfeld

Die Tiefe der Darstellung unterscheidet sich dabei je nach Stadtbereich und hat einen Schwerpunkt bei der Durchströmung/Durchlüftung (wie z.B. Scheibengipfel) des Teilbereichs und/oder bei Ergebnissen zur thermischen Behaglichkeit (wie z.B. Ringelbach oder Innenstadt).

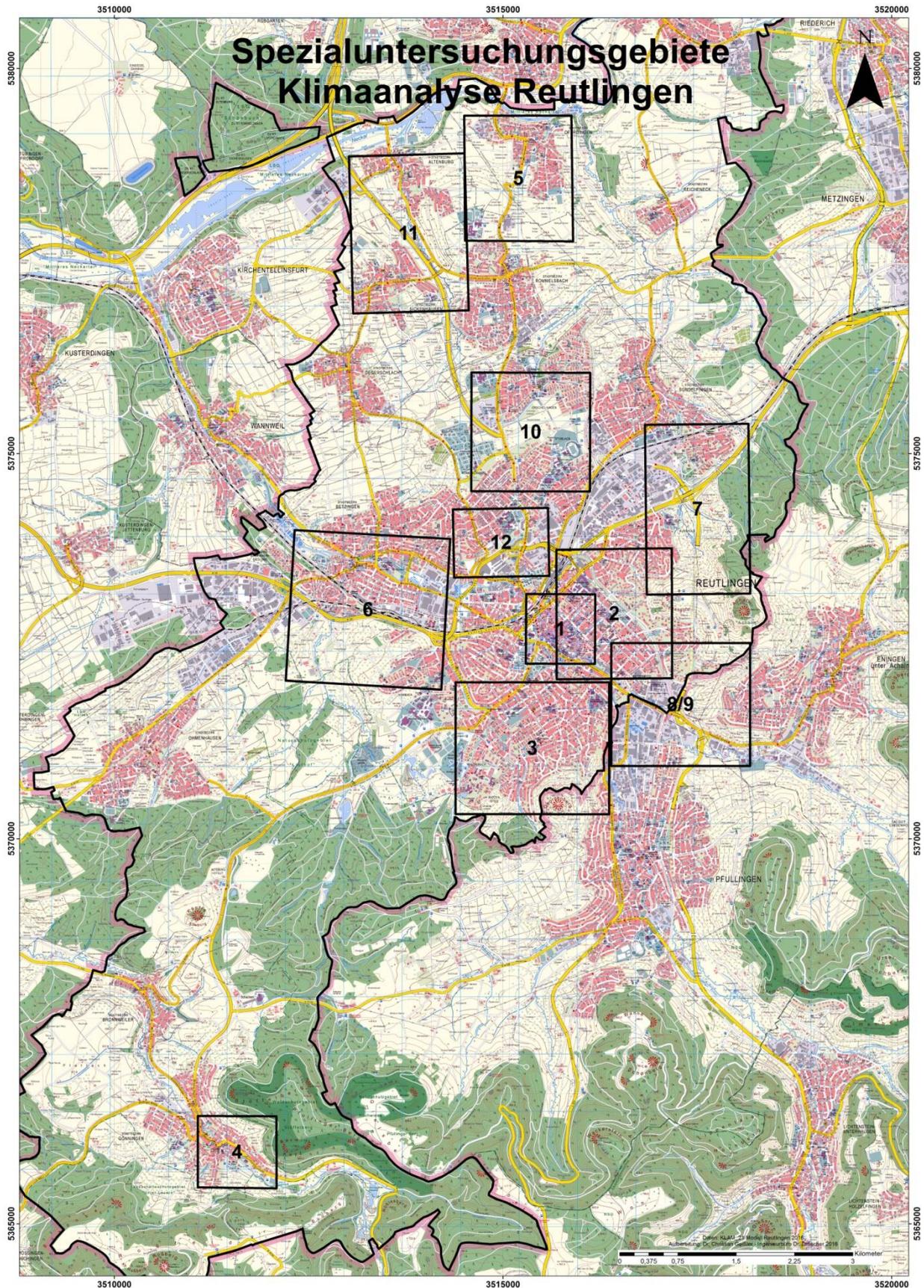


Abbildung 31: Abgrenzung der Teilbereiche

5.2.1 Innenstadt West (Teilbereich 1)

Der Bereich Innenstadt West umfasst Teile der Altstadt und reicht über die Lederstraße, die den Teilbereich von West nach Ost durchläuft, bis in den Bereich Ringelbach und beinhaltet zentral insbesondere den Volkspark sowie die Pomologie als wesentliche Grünflächen in der Kernstadt von Reutlingen (siehe Abbildung 32).

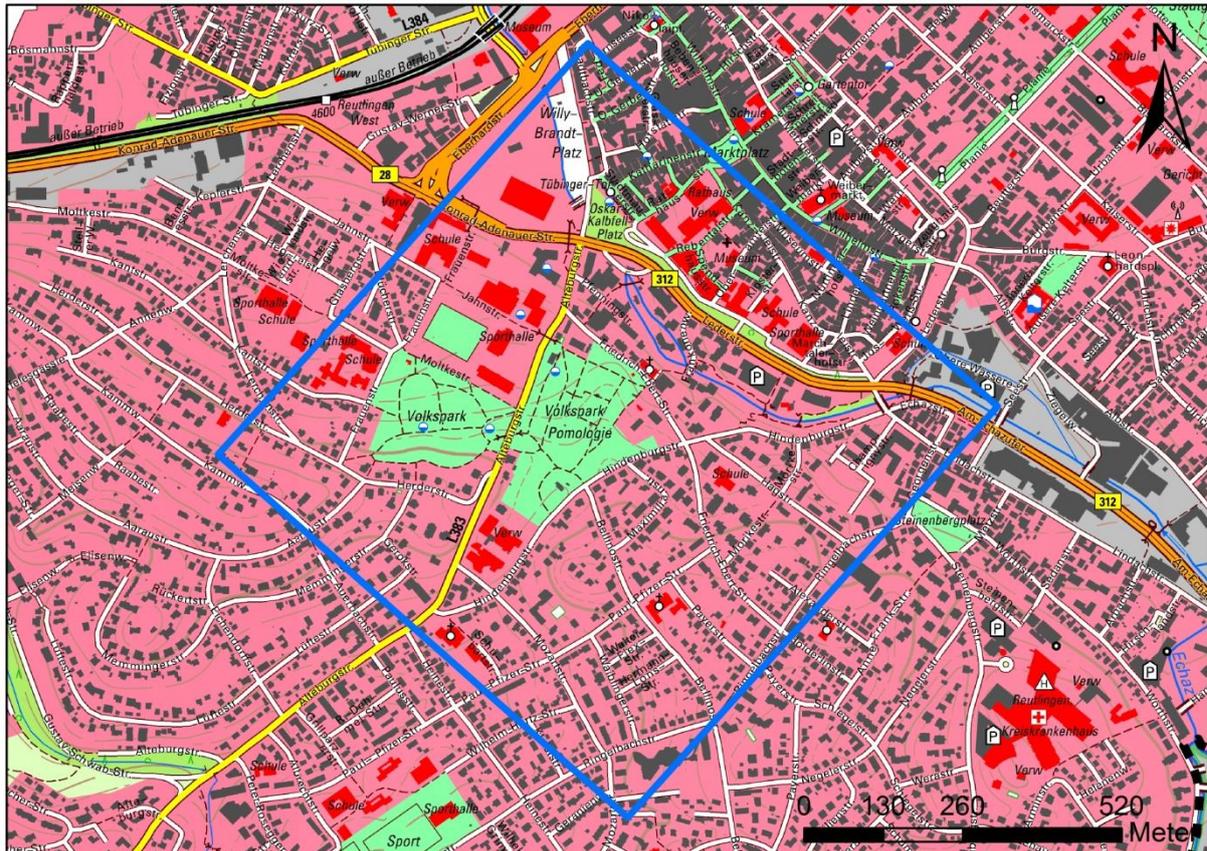


Abbildung 32: Abgrenzung des Teilbereichs 1, Innenstadt West

Durch die Lage innerhalb der städtischen Bebauung ist der Bereich Innenstadt West generell thermisch und strömungsdynamisch benachteiligt. Innerhalb dieses Bereichs sind auch die höchsten Verkehrs- sowie Luftschadstoffbelastungen (Lederstraße, B 312) zu verzeichnen. Von besonderem Interesse sind daher die Durchlüftungsdynamik und thermische Parameter, welche das Teiluntersuchungsgebiet weiter differenzieren sollen.

Die Karten 11.1 bis 11.3 im Kartenteil zeigen die Windgeschwindigkeiten für 1 h, 2 h und 4 h nach Sonnenuntergang. Es zeigt sich, dass trotz der Innenstadtlage in Teilbereich 1 bereits früh in der Nacht bodennahe Windbewegungen einsetzen. Diese sind nahezu ausschließlich auf die kaltluftproduzierenden Grünflächen Volkspark und Pomologie zurückzuführen. Durch die schwache Neigung der Flächen in Richtung der Stadthalle fließt die Luft in diese Richtung ab, so dass die nördlich der Grünanlagen gelegenen Bereiche in der direkten Umgebung der Grünflächen stärker profitieren als die südlich gelegenen wie bspw. an der Hindenburgstraße.

Später erreichen diesem Bereich die Kaltluftströmungen des Echaz- bzw. des Arbachtals, welche insbesondere über die Lederstraße in bzw. durch den Teilbereich 1 fließen (2 h nach Son-

nenuntergang, Karte 11.2). Im Bereich der Stadthalle vermischt sich diese Luft mit weiterhin aus Richtung Pomologie und Volkspark zufließender Luft. Im weiteren Verlauf der Nacht kommt in diesem Teilbereich die bodennahe Strömung zum Erliegen (Karte 11.3, 4 h nach Sonnenuntergang). Zu diesem Zeitpunkt hat das Strömungsgeschehen seinen Schwerpunkt oberhalb der mittleren Bebauungshöhe (siehe auch Kapitel MERGEFORMAT 5.1.3 und Karten 5 und 6). Eine Abkühlung erfolgt im Wesentlichen durch vertikalen Luftaustausch mit dem Kaltluftstrom in der bodennahen Reibungsschicht und durch nächtliche Ausstrahlung der Oberflächen. Durch die geringen Windgeschwindigkeiten am Boden bleibt die Durchlüftung in diesem Bereich eingeschränkt.

An den schlechten lufthygienischen Verhältnisse im Bereich der Lederstraße sind mehrere Faktoren beteiligt, z.B. hohe Verkehrsbelastung, ungünstige Orientierung der Straße und der angrenzenden Gebäude zur Hauptwindrichtung sowie topographische Tiefenlage mit generell niedrigen Windgeschwindigkeiten und häufiger Kaltluftsee- bzw. Kaltluftstauung (gilt für einen Großteil der Kernstadt).

Wesentliche Einflussgrößen für die thermische Behaglichkeit in einem Bereich werden neben der Durchströmung u.a. von dem Sonnenstand sowie von der Wärmespeicherkapazität unterschiedlicher Oberflächen und der Vegetation, welche durch Verdunstung zur Abkühlung beiträgt, hervorgerufen. Um diese für den Teilbereich abzubilden wurden die Oberflächentemperatur sowie der PMV-Wert (siehe Kapitel 2.2.7 und 4.2) zu den Zeitpunkten 16:00 Uhr und 22:00 Uhr modelliert.

Karten 11.4 und 11.5 im Kartenteil zeigen die Oberflächentemperatur in Teilbereich 1 um 16:00 Uhr sowie um 22:00 Uhr, Karten 11.6 und 11.7 zeigen den PMV-Wert in Teilbereich 1 um 16:00 Uhr sowie um 22:00 Uhr. Die Modellierungen wurden jeweils für einen Sommertag (25.06.) durchgeführt.

Die Modellrechnungen weisen bei starker Sonneneinstrahlung am Nachmittag (16:00 Uhr) insbesondere Straßen-, Beton- und Pflasterflächen in unbeschatteten Lagen einzelner Straßenzüge, des Oskar-Kalbfell-Platzes oder im Bereich um die Stadthalle Oberflächentemperaturen von über 50 °C aus. Mit PMV-Werten z.T. deutlich > 4 ergeben sich dort auch die Orte mit der höchsten Wärmebelastung. Ebenfalls hohe Temperaturen werden in den unbeschatteten Bereichen von Pomologie und Volkspark erreicht. Hier werden jedoch gleichzeitig mit vergleichsweise geringen 30 bis 35°C die niedrigsten Oberflächentemperaturen sowie die thermisch angenehmsten Umgebungsbedingungen (PMV < 2) ausgewiesen. Wo hohe Bäume Schatten bieten wie etwa im Nordteil des Volksparks, sind die Temperaturen deutlich geringer. Ebenfalls als ein Bereich mit relativ geringen Temperaturen und mäßigen PMV-Werten zeigt sich das von hohen Bäumen gesäumte Ufer der Echaz, wo das Gewässer zusätzlich mildernd

auf die Umgebungsbedingungen wirkt. In der Altstadt werden wegen der starken Verschattung durch Gebäude ebenfalls verhältnismäßig geringe Temperaturen und PMV-Werte ausgewiesen. Zu diesem Tageszeitpunkt wirkt Verschattung deutlich positiver als es die geringe Wärmespeicherkapazität von Oberflächen, wie etwa Gras, tut.

Am Abend (22:00 Uhr) sind die überhitzten Straßenzüge und Oberflächen hoher Wärmespeicherkapazität sowohl in der Darstellung der PMV-Werte als auch der Oberflächentemperaturen deutlich erkennbar. So treten die Lederstraße, der Oskar-Kalbfell-Platz sowie der Bereich um die Stadthalle mit ausgewiesenen Oberflächentemperaturen von z.T. $> 32^{\circ}\text{C}$ und PMV-Werten von bis zu 1,6 deutlich überwärmt hervor. Durch die fehlende Sonneneinstrahlung wird die Wärme lediglich über aufgeheizte Oberflächen generiert. Dies zeigt sich auch im Bereich der Grünflächen von Volkspark und Pomologie. Die dortigen Flächen sind bereits abgekühlt und weisen Temperaturen z.T. deutlich $< 25^{\circ}\text{C}$ und angenehme thermische Umgebungsbedingungen auf. Lediglich mit Gras bedeckte Bodenoberflächen – welche im Tagesverlauf zusätzlich günstig beschattet waren (z.B. Nordseiten von Gebäuden und Baumgruppen) – bieten noch kühlere Orte.

In Teilbereich 1 liegen Belastungsspitzen bzgl. Temperatur und Lufthygiene (Lederstraße, Bereich um die Stadthalle) und Bereiche mit deutlich verträglicheren Umgebungsbedingungen (z.B. Pomologie oder Echazufer) sehr nahe beieinander. Der Bereich Innenstadt West wird von den Kaltluftabflüssen aus dem Echaz- und Arbachtal lediglich überstrichen, so dass ein wirkungsvoller Austausch von Luftmassen nicht stattfinden kann. Weitere Kalt- oder Frischluftsysteme sind in dem topographisch ungünstig gelegenen Bereich nicht ausreichend wirksam, so dass einer Verringerung der Verkehrsbelastung auf den Hauptverkehrsachsen sowie der Hitzebelastung (siehe Kapitel 8) eine große Bedeutung zukommt.

5.2.2 Innenstadt Ost (Teilbereich 2)

Der Bereich Innenstadt Ost beschreibt den Übergang zwischen der Kernstadt von Reutlingen und offen- bis un bebauten Hängen der Achalm bzw. des Scheibengipfels (siehe Abbildung 33). Den Übergang von den dünn bebauten Hangbereichen in die dicht bebaute Ebene der Kernstadt von Reutlingen markiert die stillgelegte Bahntrasse zum ehemaligen Südbahnhof. Wie in Kapitel 5.1.1 dargestellt, handelt es sich bei den Hängen des Scheibengipfel bzw. der Achalm um wichtige stadtnahe Kaltluftentstehungsgebiete.

Durch die Lage innerhalb der städtischen Bebauung ist zumindest der in der Ebene befindliche Teil des Bereichs Innenstadt Ost generell thermisch und strömungsdynamisch benachteiligt. Von besonderem Interesse sind daher hier die Durchlüftungsdynamik, thermische Parameter sowie der Einfluss und die Wertigkeit des stadtnahen Kaltluftentstehungsgebietes Scheibengipfel/Achalm.

Die Karten 12.1 bis 12.3 im Kartenteil zeigen die Windgeschwindigkeiten für 1 h, 2 h und 4 h nach Sonnenuntergang. Es zeigt sich, dass die Wohnlagen am Hang sowie im unmittelbaren Übergang dazu in den frühen Abendstunden durch Luftbewegungen begünstigt sind. Diese dringen bevorzugt entlang von Straßenzügen wie z.B. der Burgstraße oder der Planie in die Innenstadtbebauung ein, nachdem sie die lockere Hangbebauung durch- bzw. überströmt haben. Hier zeigt sich dann ein räumlich sehr differenziertes Bild, in dem durch Kaltluftzuflüsse von Achalm und Scheibengipfel begünstigte Bereiche und Bereiche, in denen keine spürbare Luftbewegung zu verzeichnen ist, abwechseln.

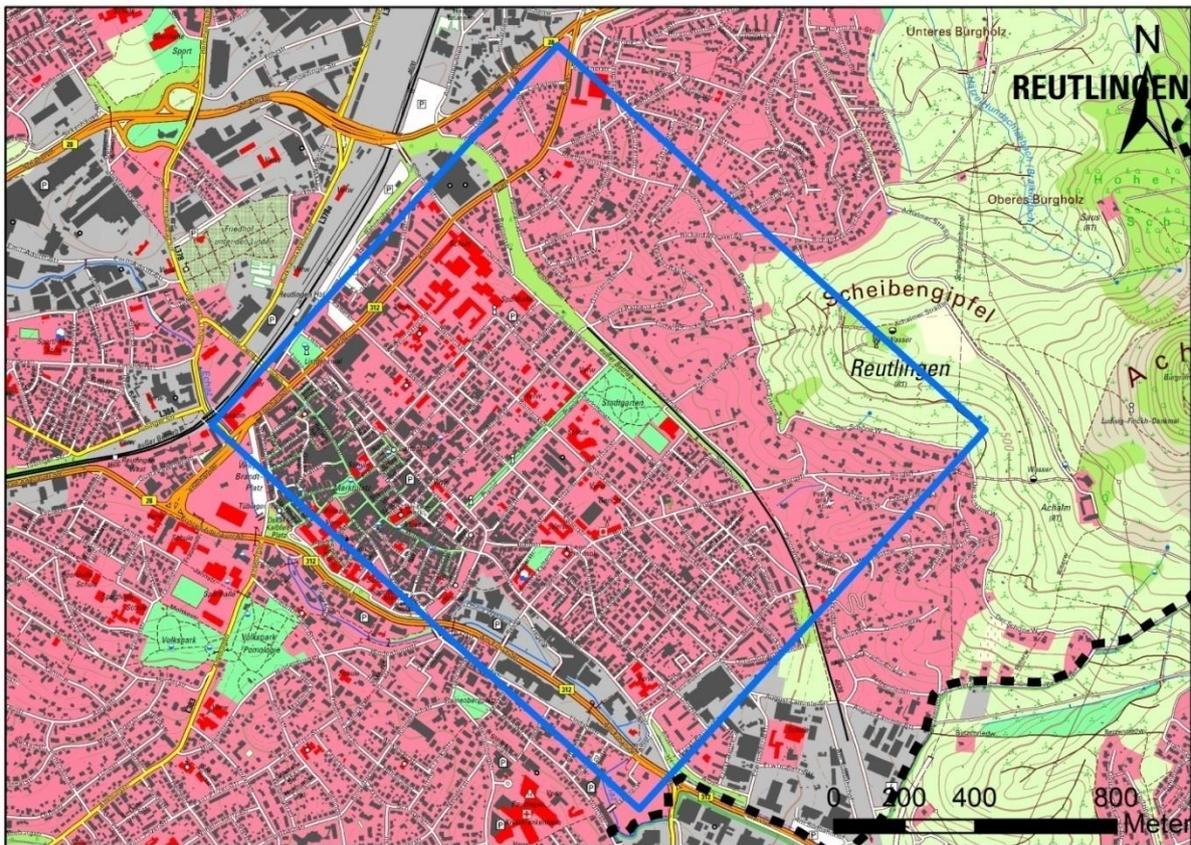


Abbildung 33: Abgrenzung des Teilbereichs 2, Innenstadt Ost

Im weiteren Verlauf der Nacht kommt in diesem Teilbereich die bodennahe Strömung zum Erliegen (siehe Karte 12.3 im Kartenteil), da zu diesem Zeitpunkt das Strömungsgeschehen seinen Schwerpunkt oberhalb der mittleren Bebauungshöhe hat (siehe auch Kapitel 5.1.3 und Karten 5 und 6). So gehen folglich auch die Windgeschwindigkeiten bis in die mittleren Hanglagen der Achalm und des Scheibengipfel zurück.

Wesentliche Einflussgrößen für die thermische Behaglichkeit in einem Bereich werden neben der Durchströmung u.a. von dem Sonnenstand sowie von der Wärmespeicherkapazität unterschiedlicher Oberflächen und der Vegetation hervorgerufen. Um diese für den Teilbereich abzubilden, wurden die Oberflächentemperatur sowie der PMV-Wert (siehe Kapitel 2.2.7 und 4.2) zu den Zeitpunkten 16:00 Uhr und 22:00 Uhr modelliert.

Die Karten 12.4 und 12.5 im Kartenteil zeigen die Oberflächentemperaturen in Teilbereich 2 um 16:00 Uhr sowie um 22:00 Uhr, Karte 12.6 und 12.7 zeigen den PMV-Wert in Teilbereich 2 um 16:00 Uhr sowie um 22:00 Uhr. Die Modellierungen wurden jeweils für einen Sommertag (25.06.) durchgeführt.

Die Modellrechnungen weisen bei starker Sonneneinstrahlung am Nachmittag (16:00 Uhr) insbesondere Straßen-, Beton- und Pflasterflächen in unbeschatteten Lagen einzelner Straßenzüge, des Leonhardsplatzes oder im Bereich um den Hauptbahnhof Oberflächentemperaturen von über 58 °C aus. Mit PMV-Werten z.T. deutlich > 4 ergeben sich dort auch die Orte mit der höchsten Wärmebelastung. Die vergleichsweise niedrigsten Temperaturen sowie die

thermisch angenehmsten Umgebungsbedingungen (PMV um 2) finden sich an den bewaldeten Hängen der Achalm sowie im Stadtgarten, wo hohe Bäume Schatten bieten.

Am Abend (22:00 Uhr, Karten 12.5 und 12.7) sind die überhitzten Straßenzüge und Oberflächen hoher Wärmespeicherkapazität sowohl in der Darstellung der PMV-Werte als auch der Oberflächentemperaturen deutlich erkennbar. Zusätzlich bildet sich aufgrund der hohen Bebauungsdichte und des geringen Grünanteils die Altstadt sehr deutlich heraus. Hier konnten am Nachmittag aufgrund der Verschattungswirkung noch deutlich niedrigere PMV-Werte sowie Oberflächentemperaturen ermittelt werden. Weiterhin überwärmt sind auch Bereiche wie der Leonhardsplatz oder die untere Burgstraße. Hier wird die Wärme erst im späteren Verlauf der Nacht abgebaut. Die angenehmsten thermischen Umgebungsbedingungen sowie die niedrigsten Temperaturen finden sich in den Wohnbereichen an den Hängen von Achalm und Scheibengipfel sowie in den stärker durchgrünter Gärten zwischen Gartenstraße und Silberburgstraße.

Die vergleichsweise günstigen thermischen Umgebungsbedingungen sind zumindest im östlichen Teil des Teilbereichs 2 auf den hohen Grünanteil sowie die offene Bebauung an den Hängen zurückzuführen. Insbesondere die hohen Kaltluftproduktionsraten der Streuobstwiesen und Waldanteile (siehe Tabelle 10) können hier positiv auf den überwärmten Stadtbereich wirken.

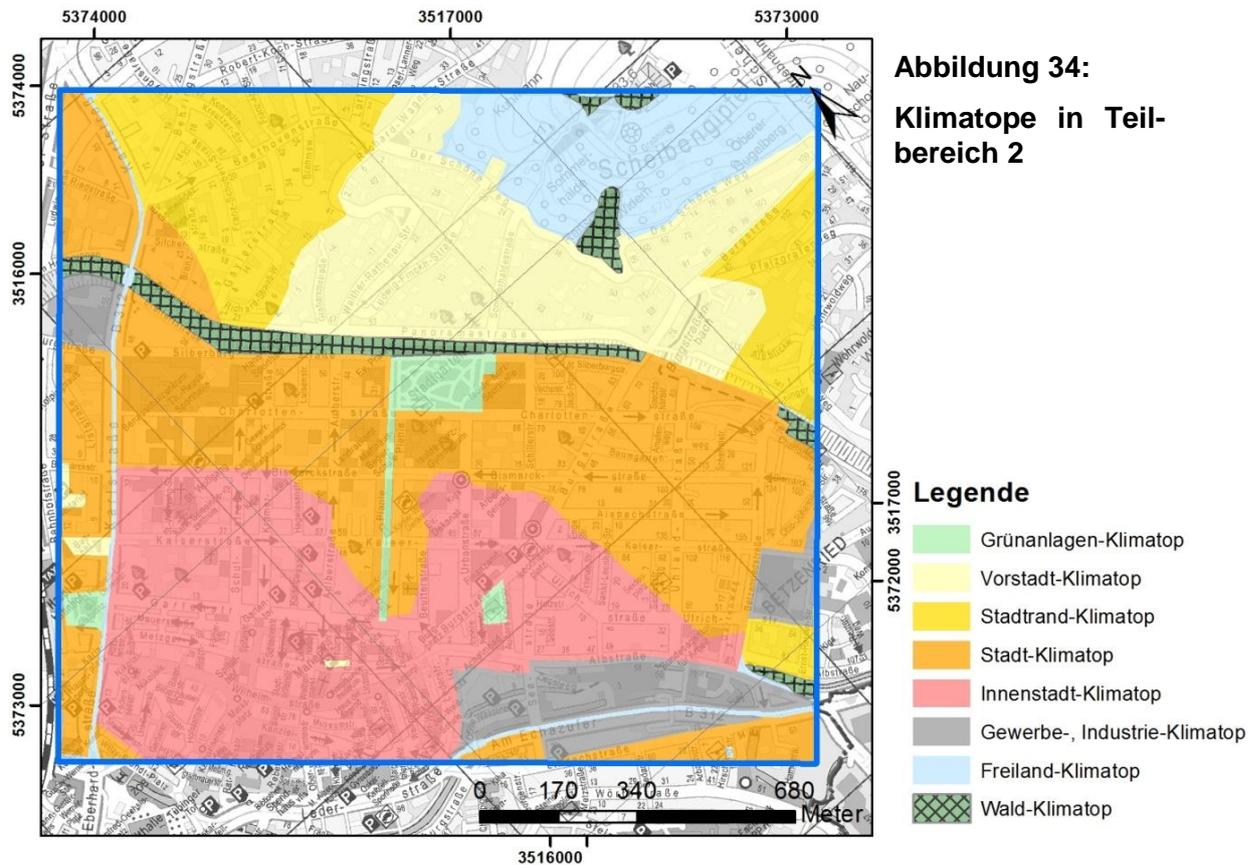
Bezüglich der Klimatope dominieren in Teilbereich 2 sehr deutlich die verschiedenen Klimatope städtischer Prägung (vollständige Liste der Klimatope und Beschreibung siehe Blatt 102 ff). Ausgleichende Freiland- bzw. Waldklimatope treten deutlich zurück. Jedoch zeigen die hohen Anteile des Vorstadt- bzw. auch des Stadtrandklimatops, dass hohe Flächenanteile geringerer thermischer Belastung in Teilbereich 2 wesentlich sind (siehe Tabelle 11 und Abbildung 34).

Tabelle 10: Landnutzungen und Kaltluftproduktionsraten in Teilbereich 2

Landnutzung	km ²	Kaltluftproduktionsrate (Mio m ³ /h)
Streuobstwiesen / Gärten	0,15	5.940
Wald	0,06	2.916
Siedlung locker	0,55	1.980
Acker / Grünland / Freiflächen	0,02	1.440
Parks	0,03	1.188

Tabelle 11: Klimatopanteile im betrachteten Teilbereich 2 nach Klimatopkarte (Legende siehe Kapitel 6)

Klimatope	km ²
Stadt-Klimatop	0,73
Innenstadt- Klimatop	0,56
Vorstadt-Klimatop	0,35
Stadtrand- Klimatop	0,28
Freilandklima	0,20
Freiland- Klimatop	0,15
Wald- Klimatop	0,08
Grünanlagen-Klimatop	0,04



Insgesamt zeigt Teilbereich 2 bzgl. Landnutzung und Topographie eine starke Differenzierung zwischen den locker bebauten Hängen des Scheibengipfels und der dicht bebauten Kern- bzw. Altstadt im Talgrund der Echaz. Dies wirkt sich auch auf die Belastung bzgl. Luftschadstoffen und Hitze aus, welche in der tiefgelegenen Innenstadt u.a. aufgrund generell niedrigerer Windgeschwindigkeiten stärker ist.

Wesentlich ist in diesen Teilbereich der Erhalt der Kalt- und Frischluftzufuhr von den Hängen des Scheibengipfels und der weitestmögliche Transport in die Innenstadt hinein (wie z.B. über Stadtgarten und Planie oder die Burgstraße)

5.2.3 Ringelbach (Teilbereich 3)

Der Bereich Ringelbach beschreibt einen mitteldicht bebauten Bereich mit Wohnnutzungen und verschiedenen Kranken- und Pflegeeinrichtungen im Südwesten der Kernstadt von Reutlingen etwa von der Pomologie bis zum Sportpark Markwasen bzw. dem Bereich Gaisbühl und den Nordhängen des Georgenberges (siehe Abbildung 35). Der Bereich Ringelbach ist topographisch eine flache zur Kernstadt hin geneigte Senke zwischen Lerchesberg im Norden und Georgenberg im Süden.

Wie in Kapitel 5.1.1 dargestellt, handelt es sich bei den Hängen des Georgenberges um wichtige stadtnahe Kaltluftentstehungsgebiete, die hier detaillierter betrachtet werden sollen. Es soll der Abkühleffekt des Stadtrandes früh am Abend (1 h nach Sonnenuntergang) erfasst und Flächenanteile dargestellt werden.

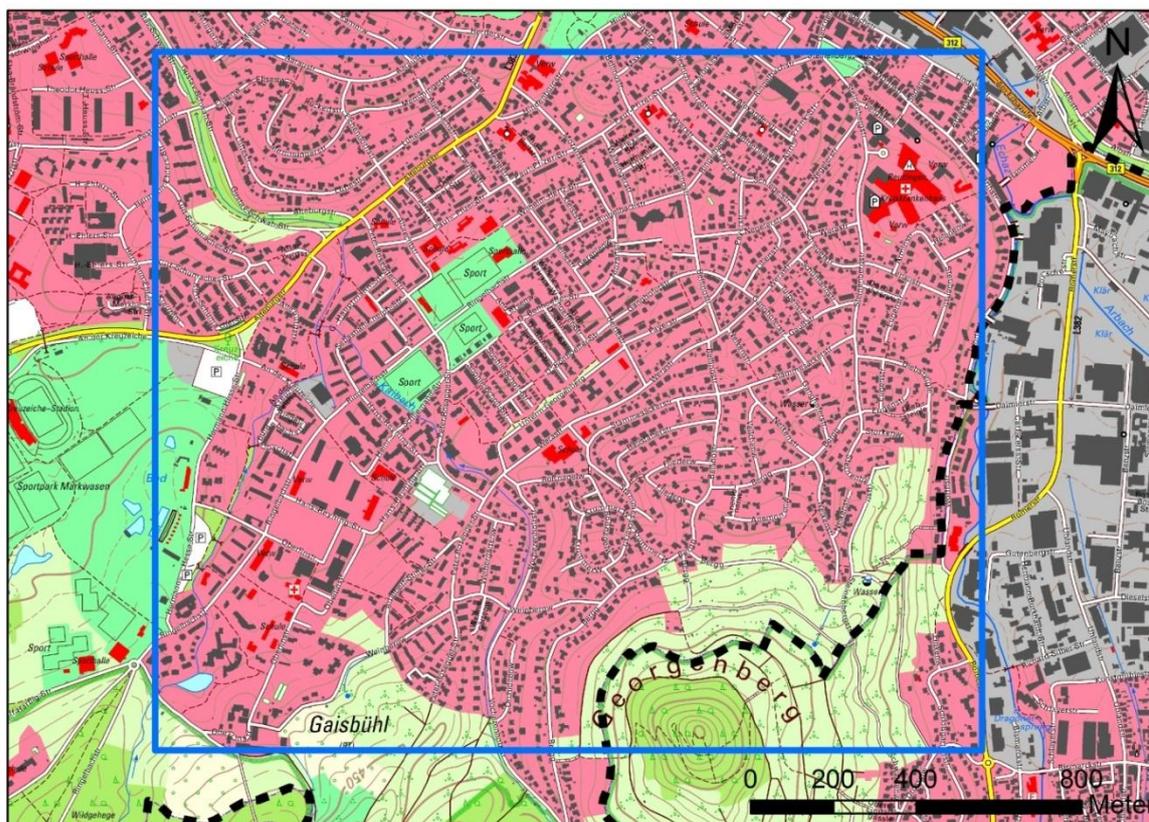


Abbildung 35: Abgrenzung des Teilbereichs 3, Ringelbach

Durch die Lage am Stadtrand und die Hanglage sind zumindest weite Teile der Wohnnutzungen am Georgenberg sowie im Bereich Gaisbühl thermisch und strömungsdynamisch begünstigt. Die dichter bebauten und nur mäßig geneigten Bereiche zum Beispiel entlang der Ringelbachstraße profitieren jedoch nur eingeschränkt von dieser Stadtrandlage. Von besonderer Bedeutung sind hier die Luftströmungen zwischen den unbebauten Randbereichen Markwasen, Gaisbühl sowie Georgenberg und den zur Kernstadt hin gelegenen Bereichen. Weiterhin stehen thermische Parameter insbesondere im Bezug zu den Kranken- und Pflegeeinrichtungen im Fokus. Karte 13.1 im Kartenteil zeigt die bodennahen Windgeschwindigkeiten für 1 h nach Sonnenuntergang, wenn die Hangwindssysteme ein Maximum erreichen.

Es zeigt sich, dass insbesondere in den Wohnlagen am Hang des Georgenberges sowie im Kranken- und Pflegebereich (Ringelbach) zwischen Freibad und Georgenberg Kaltluft bereits in den frühen Nachtstunden verhältnismäßig weit in die Bebauung hineinreicht, wobei die flach einströmende Kaltluft bevorzugt entlang von Straßenzügen hangabwärts fließt (z.B. Alteburgstraße, Peter-Roßegger-Straße).

Wesentliche Einflussgrößen für die thermische Behaglichkeit in einem Bereich werden neben der Durchströmung u.a. von dem Sonnenstand sowie von der Wärmespeicherkapazität unterschiedlicher Oberflächen und der Vegetation, aber auch der Entfernung zu Kaltluftentstehungsgebieten und dem Siedlungsrand, hervorgerufen.

Die Karten 13.2 und 13.3 im Kartenteil zeigen die Oberflächentemperatur in Teilbereich 3 um 16:00 Uhr sowie um 22:00 Uhr, Karten 13.4 und 13.5 zeigen den PMV-Wert in Teilbereich 3 um 16:00 Uhr sowie um 22:00 Uhr. Die Modellierungen wurden jeweils für einen Sommertag (25.06.) durchgeführt.

Wieder zeigt sich, dass bei starker Sonneneinstrahlung am Nachmittag (16:00 Uhr) insbesondere Straßen-, Beton- und Pflasterflächen in unbeschatteten Lagen stark überhitzen (z.B. Parkplatz Freibad Markwasen oder unbebaute Fläche zwischen Ringelbachstraße und Hans-Reyhing-Straße). Mit PMV-Werten z.T. deutlich > 4 ergeben sich dort auch die Orte mit der höchsten Wärmebelastung. Vergleichsweise niedrige Temperaturen sowie die thermisch angenehmsten Umgebungsbedingungen (PMV um 2) finden sich an den bewaldeten Hangbereichen des Georgenberges sowie an der Gustav-Schwab-Straße, wo hohe Bäume Schatten bieten, was sich naturgemäß deutlich mildernd auf die absoluten Temperaturen sowie die thermischen Umgebungsbedingungen auswirkt.

Am Abend (22:00 Uhr) sind die überhitzen Straßenzüge und Oberflächen hoher Wärmespeicherkapazität sowohl in der Darstellung der PMV-Werte als auch der Oberflächentemperaturen deutlich erkennbar. Ansonsten ergibt sich aufgrund der gleichmäßigen Topographie und Bebauungsdichte ein recht homogenes Bild bezüglich der Oberflächentemperaturen (ca. 24 – 27 °C). Lediglich am Nordhang des Georgenberges wurden geringere Temperaturen errechnet.

Bei den PMV-Werten am Abend ergibt sich ein etwas differenzierteres Bild. Hier bilden sich die unbebauten Hänge des Georgenberges als deutlich angenehmer bzgl. der thermischen Umgebungsbedingungen heraus als z.B. die Straßenzüge oder die befestigten Flächen weiter im Norden des Teilbereiches. Mildernd auf die thermischen Umgebungsbedingungen im Bereich der Kranken- und Pflegeeinrichtungen zwischen Freibad und Georgenberg wirken sich die Luftströmungen aus Richtung Georgenberg aus.

Die vergleichsweise günstigen thermischen Umgebungsbedingungen in Teilen des Teilbereichs 3 sind größtenteils auf die thermische Gunstlage am Stadtrand mit schwach bis mäßig geneigten Freiflächen zurückzuführen. Insbesondere die hohen Kaltluftproduktionsraten der Hänge des Georgenberges (siehe Tabelle 12, Streuobstwiesen/Gärten) können hier zumindest randlich positiv auf den überwärmten Stadtbereich wirken.

Bezüglich der Klimatope dominieren in Teilbereich 3 die verschiedenen Klimatope städtischer Prägung (siehe Tabelle 13 und Abbildung 36). Ausgleichende Freiland- bzw. Waldklimatope treten deutlich zurück, jedoch wirken sich auch Freiland- bzw. Waldklimatope außerhalb des

detaillierter betrachteten Bereichs wie z.B. Frei- bzw. Waldflächen südwestlich des Stadions bzw. der Tennisplätze.

Tabelle 12: Landnutzungen und Kaltluftproduktionsraten in Teilbereich 3

Landnutzung	km ²	Kaltluftproduktionsrate (Mio m ³ /h)
Streuobstwiesen / Gärten	0,39	15.444
Siedlung locker	1,97	7.092
Parks	0,11	4.356
Wald	0,07	3.402

Tabelle 13: Klimatopanteile im betrachteten Teilbereich 3 nach Klimatopkarte (Legende siehe Kapitel 6)

Klimatope	km ²
Stadt-Klimatop	0,91
Vorstadt-Klimatop	0,84
Stadtrand- Klimatop	0,83
Freiland- Klimatop	0,28
Grünanlagen-Klimatop	0,12
Wald-Klimatop	0,04
Gewerbe-, Industrie-Klimatop	0,04

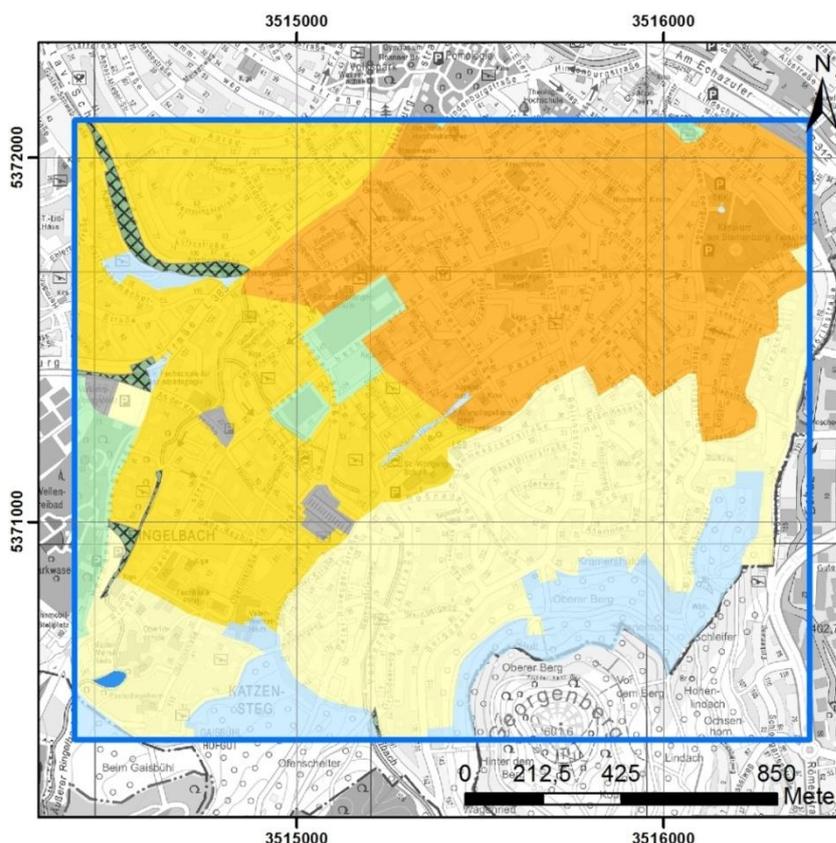


Abbildung 36:
Klimatope in Teilbereich 3)

Legende

- Grünanlagen-Klimatop
- Vorstadt-Klimatop
- Stadtrand-Klimatop
- Stadt-Klimatop
- Gewerbe-, Industrie-Klimatop
- Gewässer-, Seen-Klimatop
- Freiland-Klimatop
- Wald-Klimatop

Insgesamt bildet der Teilbereich 3 Ringelbach ein gutes Beispiel für ein verbindendes Element zwischen lufthygienisch und klimatisch hochbelasteter Kernstadt und Freilandbereichen geringerer Belastung.

In diesem Bereich sollte daher die durchtransportierte Luft möglichst wenig durch Luftschadstoffe belastet werden oder durch größere Bauten oder Versiegelungen aufgeheizt werden.

5.2.4 Gönningen (Teilbereich 4)

Der Bereich Gönningen beschreibt einen locker bebauten Bereich weit außerhalb der Kernstadt von Reutlingen. Gönningen liegt z.T. > 200 m höher über NN als die Kernstadt. Innerhalb des betrachteten Bereichs (siehe Abbildung 37) dominieren Wohnnutzungen mit hohen Grünanteilen sowie ein etwas dichter bebauter Dorfkern. Topographisch zieht sich die Tiefenlinie der Wiesaz etwa von Südost nach Nordwest durch den Teilbereich.

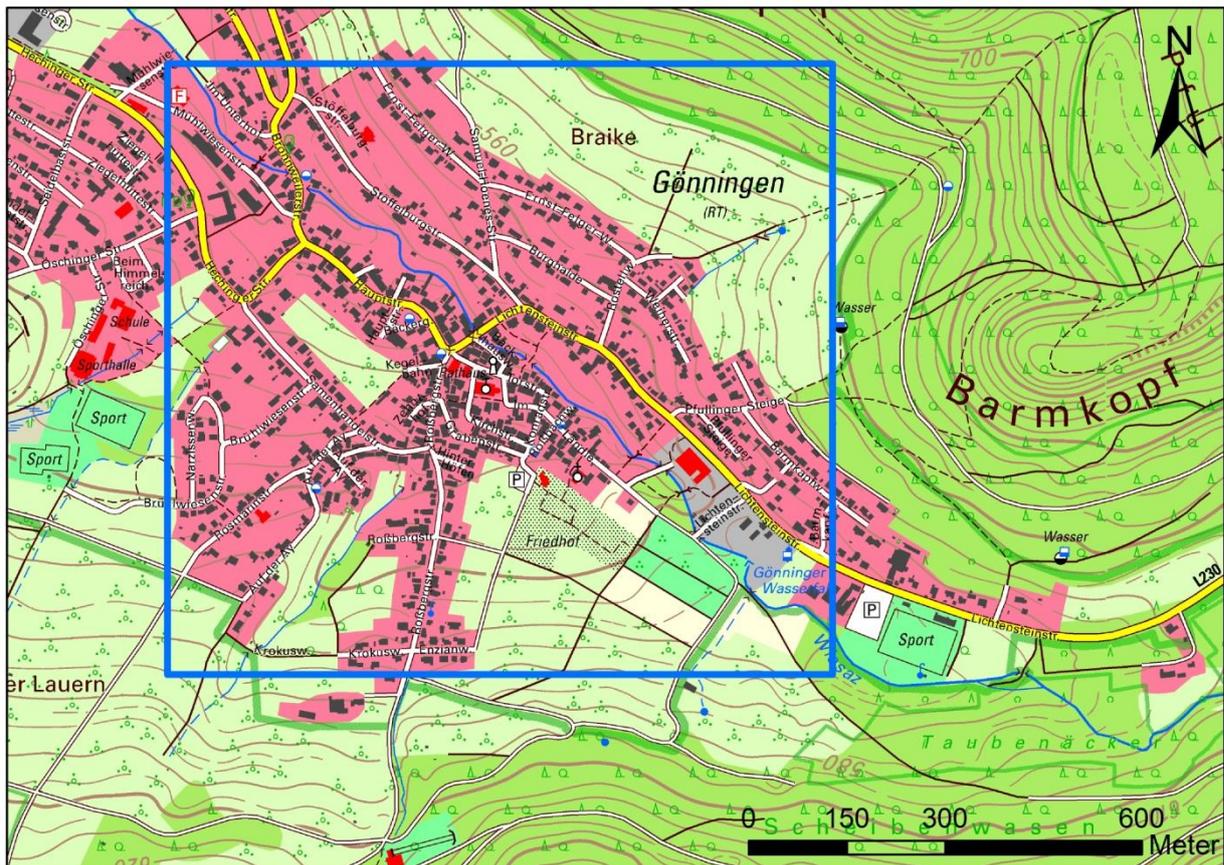


Abbildung 37: Abgrenzung des Teilbereichs 4, Gönningen

Durch die Lage weitab der Kernstadt in erhöhter topographischer Lage ist Gönningen einer der thermisch und strömungsdynamisch begünstigtesten Stadtteile von Reutlingen. Im Gegensatz zur Kernstadt sind hier keine übermäßigen thermischen und lufthygienischen Belastungen zu erwarten.

Wie in Kapitel 5.1.1 dargestellt, handelt es sich bei den Hängen um Gönningen um sehr produktive Kaltluftentstehungsgebiete und dementsprechend beim Wiesaztal um ein sehr leis-

tungsstarkes Bergwindssystem (siehe auch Kapitel 5.1.2). Hier sollen vor allem thermische Parameter, Flächenanteile und der frühnächtliche Abkühleffekt der Randlage erfasst werden.

Karte 14.1 im Kartenteil zeigt die bodennahen Windgeschwindigkeiten für 1 h nach Sonnenuntergang, wenn die Hangwindssysteme ein Maximum erreichen.

Es zeigt sich, dass insbesondere außerhalb des bebauten Bereichs z.T. hohe Kaltluftgeschwindigkeiten (> 2 m/s) erreicht werden. Aufgrund der hohen aus den Hangbereichen angelieferten Kaltluftmengen bildet sich in dem relativ schmalen Talquerschnitts rasch ein sehr mächtiger Kaltluftstrom, der die Bebauung überströmt.

Wesentliche Einflussgrößen für die thermische Behaglichkeit in einem Bereich werden neben der Durchströmung u.a. von dem Sonnenstand der Wärmespeicherkapazität unterschiedlicher Oberflächen und der Vegetation, aber auch der Entfernung zu Kaltluftentstehungsgebieten und dem Siedlungsrand hervorgerufen.

Die Karten 14.2 und 14.3 im Kartenteil zeigen die Oberflächentemperatur in Teilbereich 4 um 16:00 Uhr sowie um 22:00 Uhr, Karten 14.4 und 14.5 zeigen den PMV-Wert in Teilbereich 4 um 16:00 Uhr sowie um 22:00 Uhr. Die Modellierungen wurden jeweils für einen Sommertag (25.06.) durchgeführt.

Wiederum zeigt sich, dass bei starker Sonneneinstrahlung am Nachmittag (16:00 Uhr) insbesondere Straßen-, Beton- und Pflasterflächen in unbeschatteten Lagen überhitzen (z.B. Pfullinger Steige, Hechinger Straße/Samenhandelstraße, Bronnweiler Straße/Matheus-Wagner-Straße). Größere zusammenhängende versiegelte Flächen sind jedoch nicht vorhanden. Oberflächentemperaturen von z.T. über 50 °C, wie z.B. in der Kernstadt, werden hier nicht ausgewiesen. Auch im Ortskern bleiben die Temperaturen aufgrund der Siedlungsgröße und der Verschattung merklich geringer.

Die Orte mit der höchsten Wärmebelastung (PMV-Wert ca. 3) sind am Nachmittag naturgemäß unbeschattete Bereiche auf versiegelten Oberflächen aber auch Wiesen. Angenehmere Umgebungsbedingungen (PMV-Werte teilweise < 1) finden sich an Baumgruppen sowie in Waldbereichen wie beispielsweise im Nordosten des Untersuchungsbereichs.

Am Abend (22:00 Uhr) sind die überhitzen Straßenzüge und die Oberflächen hoher Wärmespeicherkapazität insbesondere in der Darstellung der Oberflächentemperaturen deutlich erkennbar. Oberflächen wie Wiesen kühlen früher und stärker aus als z.B. Waldbereiche.

Die höchsten PMV-Werte wurden im Ortskern errechnet, wo sich eine hohe Wärmespeicherkapazität durch Gebäude und versiegelte Oberflächen und eine strömungsbehindernde dichte Bebauung negativ auf eine zügige Abkühlung auswirken. Die kühlest bzw. bzgl. des thermischen Empfindens angenehmsten Bereiche finden sich an den Ortsrändern sowie auf den nordexponierten Wiesen südlich von Gönningen.

Die vergleichsweise günstigen thermischen Umgebungsbedingungen im gesamten Teilbereich 4 sind größtenteils auf die thermische Gunstlage in der Höhenlage mit z.T. stark geneigten umgebenden Freiflächen zurückzuführen. Insbesondere die hohen Kaltluftproduktionsraten der umliegenden Hänge (siehe Tabelle 14, Streuobstwiesen/Gärten) können hier positiv auf den überwärmten Ortskern wirken.

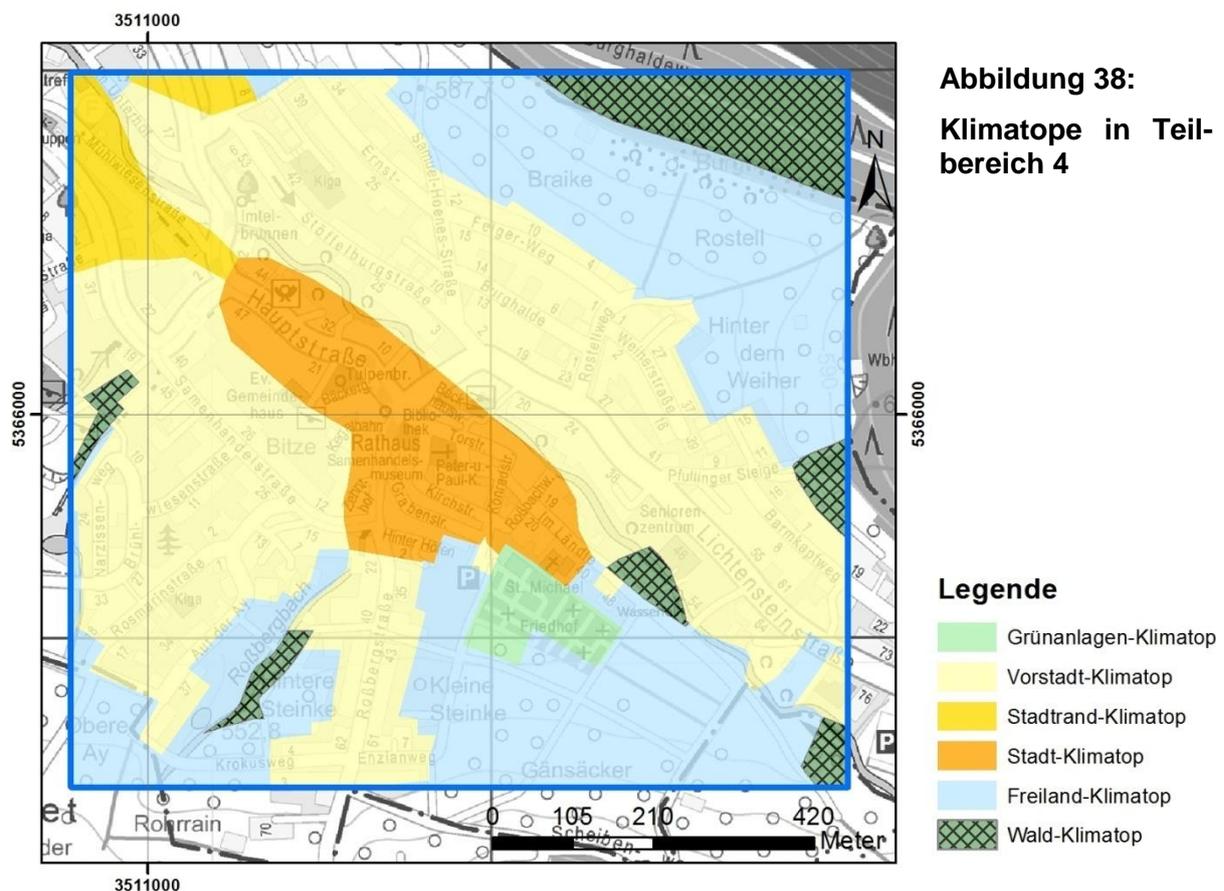
Bezüglich der Klimatope dominieren in Teilbereich 4 die verschiedenen Freilandklimatope und Klimatope vorstädtischer Prägung (siehe Tabelle 15 und Abbildung 38). Wesentlich für den thermischen Ausgleich in Gönningen sind die Kaltluftströmungen des Wiesaztals.

Tabelle 14: Landnutzungen und Kaltluftproduktionsraten in Teilbereich 4

Landnutzung	km ²	Kaltluftproduktionsrate (Mio m ³ /h)
Streuobstwiesen / Gärten	0,25	9.900
Acker / Grünland / Freiflächen	0,07	5.040
Wald	0,06	2.916
Siedlung locker	0,35	1.260
Friedhof	0,017	673

Tabelle 15: Klimatopanteile im betrachteten Teilbereich 4 nach Klimatopkarte (Legende siehe Kapitel 6)

Klimatop	km ²
Vorstadt-Klimatop	0,45
Freiland-Klimatop	0,30
Stadt-Klimatop	0,09
Wald-Klimatop	0,06
Stadtrand-Klimatop	0,03
Grünanlagen-Klimatop	0,02



Teilbereich 4, welcher einen Großteil der Ortslage von Gönningen umfasst ist im Rahmen dieser Untersuchung beispielhaft für eine außergewöhnlich geringe lufthygienische und thermische Belastung.

Gönningen ist durch die topographische Höhenlage generell thermisch gegenüber tiefer gelegenen Stadtbereichen begünstigt. Zusätzlich wirken sich die lockere Bebauung, die umgebenden geneigten Freiflächen sowie die Lage im Verlauf einer die ganz Nacht anhaltenden Kaltluftströmung entlang des Wiesaztales positiv aus.

5.2.5 Oferdingen (Teilbereich 5)

Mit dem Untersuchungsareal im Bereich der Bezirksgemeinde Oferdingen ist einer der topographisch am niedrigsten gelegenen Stadtteile (ca. 330 m ü.NN) von Reutlingen nahe dem Neckar (ca. 300 m ü.NN) verortet. Oferdingen ist geprägt von Wohnnutzungen in Ein- und Mehrfamilienhäusern und wenig gewerblicher bzw. industrieller Nutzung. Der betrachtete Ausschnitt reicht vom Neckar im Norden bis an den südlichen Ortsrand von Rommelsbach (siehe Abbildung 39). Weite Teile des Teilbereichs 5 sind landwirtschaftlich genutzt. Das Gelände fällt flach in Richtung Neckar ab. Den Übergang zum Neckar bildet eine markante Geländestufe.

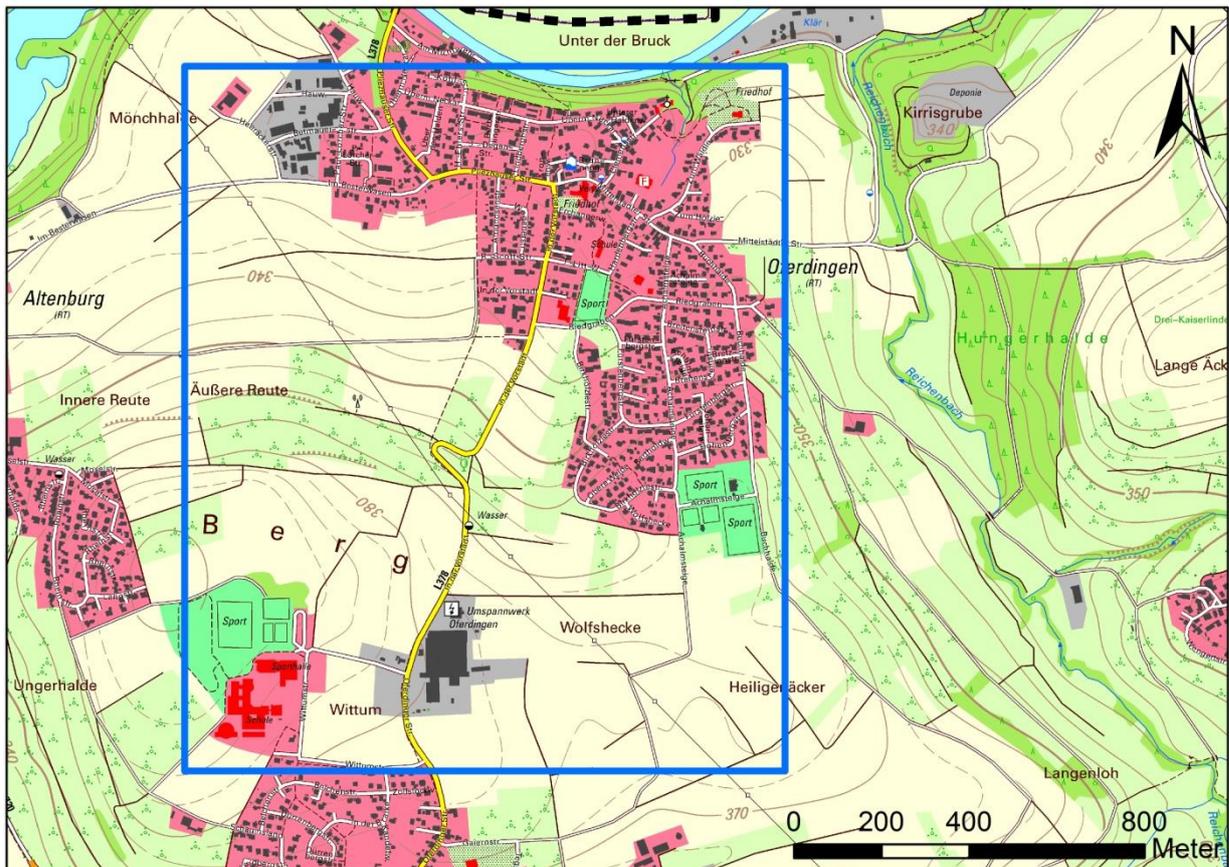


Abbildung 39: Abgrenzung des Teilbereichs 5, Oferdingen

Durch die Lage weitab der Kernstadt in frei anströmbarer topographischer Lage ist Oferdingen einer der strömungsdynamisch begünstigsten Stadtbezirke von Reutlingen. Zu einer thermischen (Grund-)Belastung trägt die niedrige topographische Lage am Neckar bei. Im Gegensatz zur Kernstadt sind jedoch hier keine übermäßigen thermischen und lufthygienischen Belastungen zu erwarten. Hier sollen vor allem thermische Parameter, Flächenanteile und der frühnächtliche Abkühleffekt der Randlage erfasst werden.

Karte 15.1 im Kartenteil zeigt die bodennahen Windgeschwindigkeiten für 1 h nach Sonnenuntergang, wenn die Hangwindssysteme ein Maximum erreichen.

Danach bilden sich insbesondere im Bereich südlich von Oferdingen verhältnismäßig starke Hangwinde heraus, welche Richtung Neckar gerichtet sind. Insbesondere über strömungsparallele Straßenzüge (z.B. In der Vorstadt) dringen diese auch in die Bebauung ein. Ein großer Teil der Strömung wird jedoch von der Bebauung seitlich und nach oben verdrängt, so dass an den Ortsrändern höhere Windgeschwindigkeiten zu verzeichnen sind als im Ortsinneren.

Die Karten 15.2 und 15.3 im Kartenteil zeigen die Oberflächentemperatur in Teilbereich 5 um 16:00 Uhr sowie um 22:00 Uhr, Karten 15.4 und 15.5 zeigen den PMV-Wert in Teilbereich 5 um 16:00 Uhr sowie um 22:00 Uhr. Die Modellierungen wurden jeweils für einen Sommertag (25.06.) durchgeführt.

Wiederum zeigt sich sehr deutlich, dass bei starker Sonneneinstrahlung am Nachmittag (16:00 Uhr) insbesondere Straßen-, Beton- und Pflasterflächen in unbeschatteten Lagen stark überhitzen (z.B. Gewerbegebiet am östlichen Ortsrand von Oferdingen und Parkplätze Bildungszentrum Nord und Bosch GmbH). Für weite Teile des Teilbereiches 5 werden mittlere Oberflächentemperaturen berechnet, was jedoch aufgrund der landwirtschaftlichen Nutzung u.U. abrupten Änderungen (Bewuchs/ Brache) unterworfen sein kann. In verschatteten Bereichen am nordexponierten Neckarhang sind die geringsten Temperaturen zu erwarten.

Bezüglich der thermischen Belastung zeigt Teilbereich 5 wegen der geringen topographischen Differenzierung und den wenigen verschatteten Bereiche durch höhere Gebäude und höhere Vegetation ein einheitliches Bild. Der PMV-Wert liegt flächendeckend bei > 4 , so dass im gesamten Teilbereich 5 mit einer sehr starken Wärmebelastung gerechnet werden muss. Deutlich geringere PMV-Werte sind in verschatteten Bereichen am Neckarhang zu erwarten.

Am Abend (22:00 Uhr, Karten 15.3 und 15.5) sind die überhitzen Straßenzüge und Oberflächen hoher Wärmespeicherkapazität, wie Parkplätze und das Gewerbegebiet, deutlich sichtbar, die landwirtschaftlichen Flächen kühlen recht homogen aus und liegen etwa 10 K unter den versiegelten Flächen.

Die höchsten PMV-Werte wurden im Ortskern sowie im Gewerbegebiet errechnet, wo sich eine hohe Wärmespeicherkapazität und eine strömungsbehindernde dichte Bebauung negativ auf eine zügige Abkühlung auswirken. Die kühlestes bzw. bzgl. des thermischen Empfindens angenehmsten Bereiche finden sich am Abend auf den landwirtschaftlichen Flächen.

Die vergleichsweise günstigen thermischen Umgebungsbedingungen bzgl. Durchströmung und Belüftung der bebauten Bereiche in Teilbereich 5 sind auf die ausgedehnten Freiflächen südlich von Oferdingen zurückzuführen auf denen große Mengen Kaltluft produziert wird (siehe Tabelle 16). Diese Flächen liegen zusätzlich topographisch höher und sind schwach ge-

neigt, so dass die Kaltluft in Richtung Oferdingen bzw. Neckartal abfließen kann. Zusätzlich ist Oferdingen auch bei weniger stabilen Wetterlagen aufgrund seiner Exposition gut anströmbar.

Bezüglich der Klimatope dominieren in Teilbereich 5 wegen der ausgedehnten landwirtschaftlichen Flächen das Freiland Klimatop (siehe Tabelle 17 und Abbildung 40), welches am Tag wegen fehlender Verschattung sehr hohe PMV-Werte erreichen kann, nachts jedoch wegen der geringen Wärmespeicherkapazität der Oberflächen deutlich besser auskühlt. Die wenig dichte Bebauung Oferdingens sorgt für eine nicht zu starke nächtliche Überhitzung, so dass auch aufgrund der geringen Ausdehnung des Ortes kein ausgeprägter Wärmeinseleffekt mit großen Stadt / Land Unterschieden entsteht.

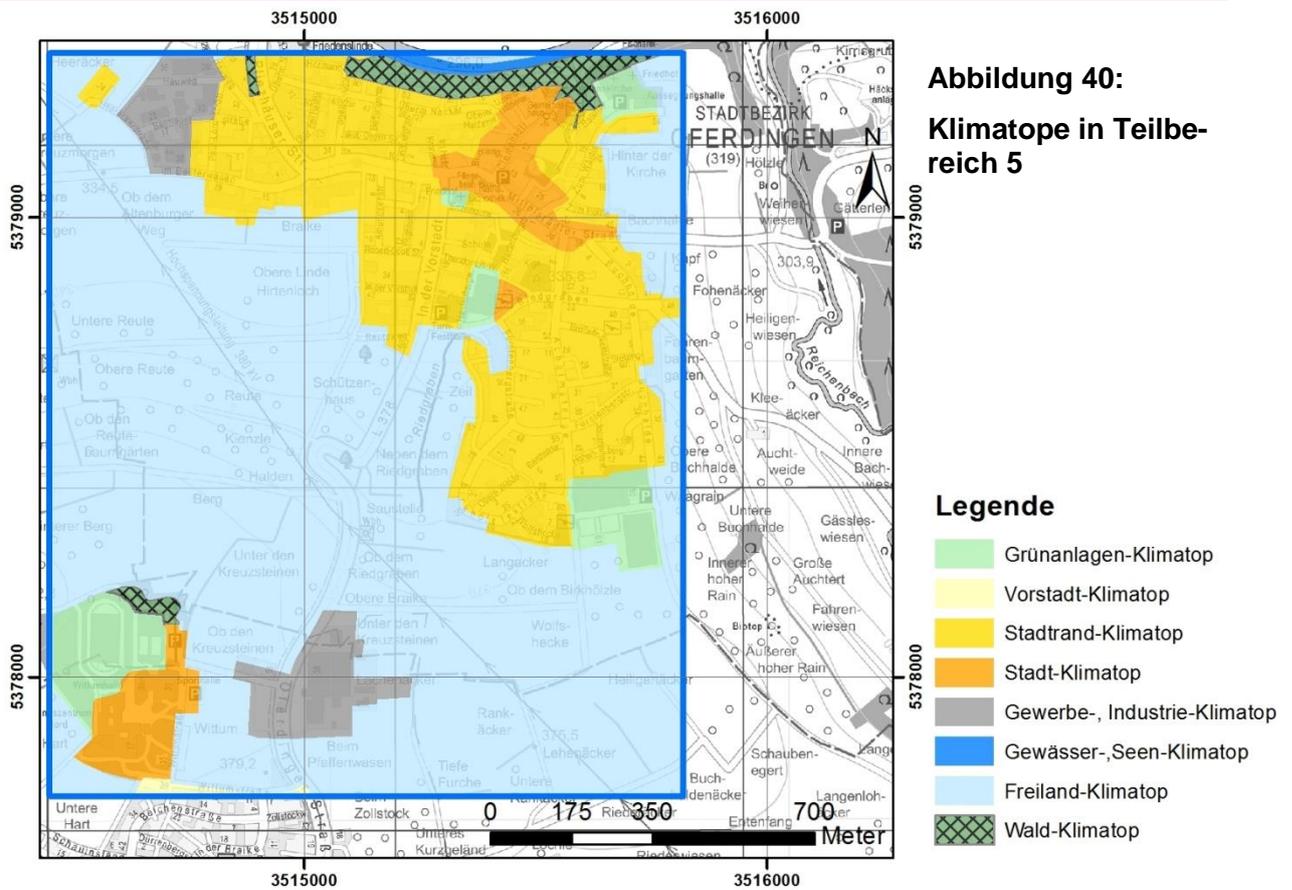
Tabelle 16: Landnutzungen und Kaltluftproduktionsraten in Teilbereich 5

Landnutzung	km ²	Kaltluftproduktionsrate (Mio m ³ /h)
Acker / Grünland / Freiflächen	1,08	77.760
Streuobstwiesen / Gärten	0,23	9.108
Park	0,08	3.168
Wald	0,04	1.944
Siedlung locker	0,3	1.080
Friedhof	0,01	396

Tabelle 17: Klimatopanteile im betrachteten Teilbereich 5 nach Klimatopkarte (Legende siehe Kapitel 6)

Klimatop	km ²
Freiland-Klimatop	1,35
Stadtrand-Klimatop	0,50
Stadt-Klimatop	0,10
Grünanlagen-Klimatop	0,10
Gewerbe-, Industrie-Klimatop	0,09
Wald-Klimatop	0,05
Vorstadt-Klimatop	0,01

Generell ist Teilbereich 5 Oferdingen wegen der Tiefenlage am Neckar thermisch benachteiligt bzw. im Jahresverlauf durch verhältnismäßig hohe Temperaturen gekennzeichnet. Demgegenüber steht eine freie Anströmbarkeit aus der Hauptwindrichtung Südwest, so dass thermisch und/oder lufthygienisch belastete Luft bei entsprechenden Wetterlagen zügig abgeführt werden kann. Weiterhin profitiert der Teilbereich Oferdingen in Strahlungsnächten von den umgebenden landwirtschaftlichen Flächen, auf denen eine intensive Kaltluftproduktion stattfindet. In Hitzeperioden macht sich in diesem Teilbereich jedoch das nahezu völlige Fehlen verschatteter Bereiche negativ bemerkbar.



5.2.6 Betzungen (Teilbereich 6)

Der Untersuchungsbereich im Stadtbezirk Betzingen befindet sich im Westen der Kernstadt von Reutlingen beiderseits der Bundesstraße B 28 und schließt auch Teile des Hohbuchs im Südosten mit ein (siehe Abbildung 41). Der betrachtete Ausschnitt ist geprägt von unterschiedlichen Nutzungen (Streuobst/Freiland, Wohnen, Gewerbe/Industrie) und bildet den Übergang des Breitenbachs vom Offenland in den Siedlungsbereich von Betzingen und seiner Mündung in die Echaz. Das Gelände fällt generell von Süden nach Nordwesten ab.

Wie in Kapitel 5.1.1 dargestellt, handelt es sich bei dem Breitenbachtal um ein sehr wichtiges stadtnahes Kaltluftentstehungsgebiet bzw. um einen bedeutenden Kaltluftstrom. Hier sollen vor allem thermische Parameter, Flächenanteile und der frühnächtliche Abkühlereffekt der Randlage erfasst werden.

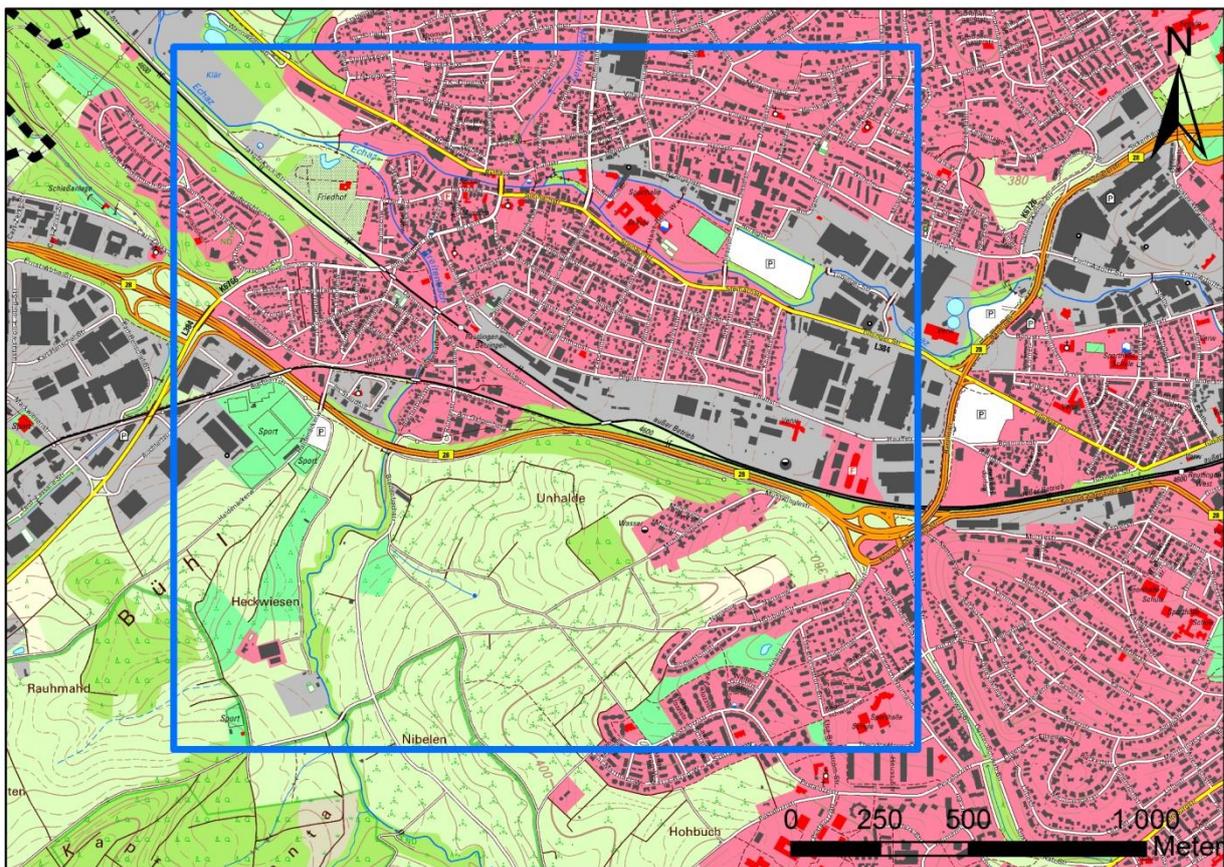


Abbildung 41: Abgrenzung des Teilbereichs 6, Betzingen

Durch die Lage am Übergang zum Offenland sind zumindest die zwischen B 28 und Steinachstraße gelegenen Teile des betrachteten Ausschnitts von Betzingen thermisch und strömungsdynamisch begünstigt. Generell nimmt diese durch das Breitenbachtal verursachte Gunstlage zunehmend Richtung Osten, mit dessen schwindendem Einfluss, ab.

Karte 16.1 im Kartenteil zeigt die bodennahen Windgeschwindigkeiten für 1 h nach Sonnenuntergang, wenn die Hangwindssysteme ein Maximum erreichen.

Danach entwickeln sich insbesondere an den unbebauten Hangbereichen des Breitenbachtals im Süden zum Teil kräftige flache Hangabwinde, die z.T. im Bereich der Talverbreiterung tief in

die Bebauung eindringen. Im nördlichen Teil des betrachteten Ausschnitts dringen aus der Gegenrichtung die Hangabwinde aus dem Bereich nördlich von Betzingen bzw. westlich der K 6725 aus Richtung Degerschlacht (siehe Karte 0 im Kartenteil) weit in die Bebauung ein. Strömungsdynamisch entwickelt sich der Bereich des Breitenbachtals im weiteren Verlauf der Nacht zu einem der wichtigsten Eintrittsbereiche von nahezu unbelasteter flach fließender Kaltluft in den bebauten Bereich der Stadt Reutlingen (siehe auch Karten 4 - 6 im Kartenteil).

Wesentliche Einflussgrößen für die thermische Behaglichkeit in einem Bereich werden neben der Durchströmung u.a. von dem Sonnenstand der Wärmespeicherkapazität unterschiedlicher Oberflächen und der Vegetation, aber auch der Entfernung zu Kaltluftentstehungsgebieten und dem Siedlungsrand hervorgerufen.

Die Karten 16.2 und 16.3 im Kartenteil zeigen die Oberflächentemperatur in Teilbereich 6 um 16:00 Uhr sowie um 22:00 Uhr, Karten 16.4 und 16.5 zeigen den PMV-Wert in Teilbereich 6 um 16:00 Uhr sowie um 22:00 Uhr. Die Modellierungen wurden jeweils für einen Sommertag (25.06.) durchgeführt.

Es zeigt sich sehr deutlich, dass bei starker Sonneneinstrahlung am Nachmittag (16:00 Uhr) insbesondere Straßen-, Beton- und Pflasterflächen in unbeschatteten Lagen stark überhitzen (z.B. Parkplätze und Logistikflächen im Gewerbegebiet in Betzingen). Weiterhin tritt das Gleisfeld des Bahnhofs Betzingen deutlich hervor. Bewaldete nordexponierte Hänge wie an der Bundesstraße B 28 oder sonstige bewaldete Bereiche wie an der Echaz sind dagegen deutlich kühler im Modell berechnet.

Bezüglich der thermischen Belastung (PMV) zeigt Teilbereich 6 hohe Werte (größtenteils > 4), wobei sich aufgrund der einheitlichen Sonneneinstrahlung die thermische Belastung von unbeschatteten Freiflächen und asphaltierten Bereichen kaum unterscheiden.

Am Abend (22:00 Uhr) sind die überhitzen Straßenzüge und Oberflächen hoher Wärmespeicherkapazität wie Parkplätze und Logistikflächen in Gewerbe- bzw. Industriegebieten deutlich sichtbar, während die Offenlandbereiche (z.B. Wiesen) stärker auskühlen als z.B. Waldgebiete.

Die höchsten PMV-Werte wurden innerhalb der Bebauung, insbesondere in Bereichen mit hohem Versiegelungsgrad, mit gewisser Entfernung zum Bebauungsrand errechnet, wo sich eine hohe Wärmespeicherkapazität und eine strömungsbehindernde Bebauung negativ auf die Abkühlung auswirken. Die Randbereiche zum Breitenbachtal hin erfahren strömungsbedingt bereits recht früh eine spürbare Abkühlung.

Die insbesondere nachts vergleichsweise günstigen thermischen Umgebungsbedingungen in Teilbereich 6 sind größtenteils auf die lokalklimatische Gunstlage am Übergang des nahezu un bebauten Breitenbachtals in das Echaztal zurückzuführen. Die Flächen des Breitenbachtals zählen zu den produktivsten bzgl. Kaltluft im gesamten Stadtgebiet (siehe

Tabelle 18). Wesentlich für die Belüftung von Betzingen sind jedoch auch die Flächen, die südlich weit über das hier detailliert betrachtete Gebiet hinausgehen.

Jedoch kommt es im Teilbereich Betzingen im Verlauf der Nacht zu einem Kaltluft(rück)stau, infolgedessen die weiterhin aus dem Breitenbachtal angelieferte Kaltluft nicht mehr Richtung Echaz- bzw. danach ins Neckartal weitergeleitet werden kann. Die bodennahen Windgeschwindigkeiten sinken und die Strömung kommt zum Erliegen (siehe Karten 7 bis 10 im Kartenteil). In

der Folge bilden sich stabile Schichtungsverhältnisse in der Atmosphäre aus, die mit ungünstigen Ausbreitungsbedingungen für bodennahe Luftschadstoffemissionen verbunden sind und – bei geeigneten meteorologischen Bedingungen – das Auftreten von Nebel begünstigen.

Bezüglich der Klimatope dominieren in Teilbereich 6 dementsprechend das Freilandklimatop sowie für den bebauten Teil das Stadtrandklimatop (siehe Tabelle 19 sowie Abbildung 42).

Generell zeigt Teilbereich 6 Betzungen ein unmittelbares Nebeneinander stark differierender Nutzungen und klimatischer Funktionen. Während der Gewerbebereich an der Tübinger Straße durch einen hohen Versiegelungsgrad und eine Verkehrs- bzw. Luftschadstoffbelastung gekennzeichnet ist, stellt das Breitenbachtal das entlastende Moment in diesem Teilbereich dar.

Da sich der Bereich im Verlauf des Echaztales befindet, ist hier auch mit einem häufigen Rückstau des Kaltluftstromes in Richtung Neckar zu rechnen, so dass Nebelbindung und Luftschadstoffanreicherungen die Folge sein können.

Ziel muss daher eine weitere Entlastung des belasteten Bereichs (z.B. durch Verbrennungsverbote) und möglichst geringe zusätzliche Belastungen im Entlastungsbereich sein.

Tabelle 18: Landnutzungen und Kaltluftproduktionsraten in Teilbereich 6

Landnutzung	km ²	Kaltluftproduktionsrate (Mio m ³ /h)
Streuobstwiesen / Gärten	0,75	29.700
Acker / Grünland / Freiflächen	0,41	29.520
Wald	0,27	13.122
Siedlung locker	1,03	3.708
Park	0,08	3.168
Friedhof	0,03	1.188

Tabelle 19: Klimatopanteile im betrachteten Teilbereich 6 nach Klimatopkarte (Legende siehe Kapitel 6)

Klimatop	km ²
Freiland-Klimatop	1,25
Stadtrand-Klimatop	1,60
Stadt-Klimatop	0,14
Grünanlagen-Klimatop	0,12
Gewerbe-, Industrie-Klimatop	0,54
Wald-Klimatop	0,31
Vorstadt-Klimatop	0,29

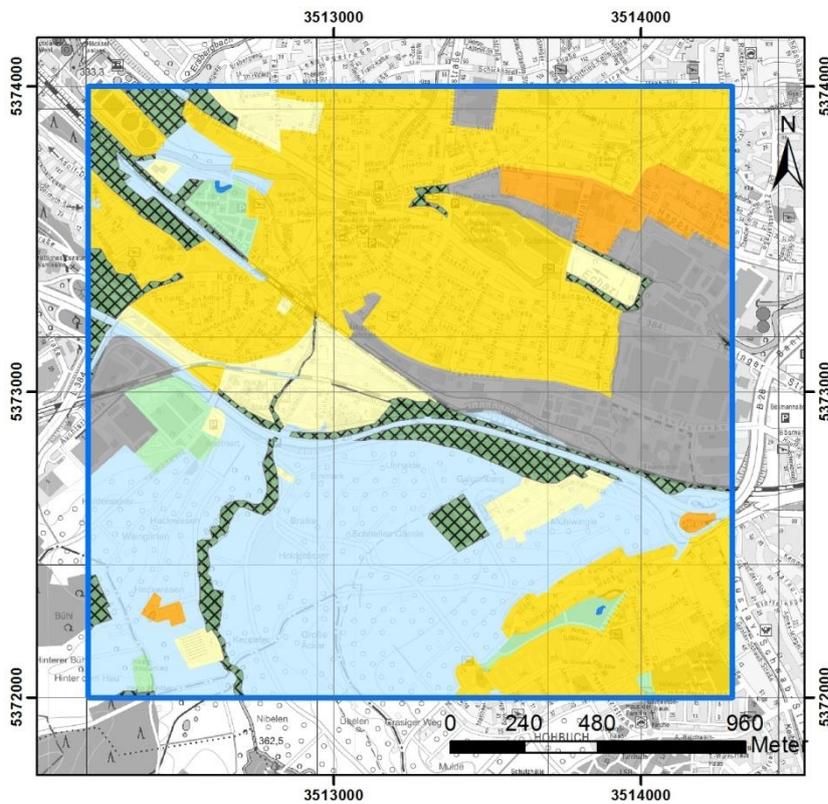


Abbildung 42:
Klimatope in Teilbe-
reich 6

Legende

- Grünanlagen-Klimatop
- Vorstadt-Klimatop
- Stadtrand-Klimatop
- Stadt-Klimatop
- Gewerbe-, Industrie-Klimatop
- Gewässer-, Seen-Klimatop
- Freiland-Klimatop
- Wald-Klimatop

5.2.7 Scheibengipfel Nord (Teilbereich 7)

Der Bereich Scheibengipfel Nord befindet sich im Osten der Kernstadt von Reutlingen zwischen dem Scheibengipfel im Süden und dem Industrie- bzw. Gewerbegebiet „In Laisen“ und dem Wohngebiet zwischen B 28 und der Bahnlinie Reutlingen-Metzingen. Zentral im betrachteten Ausschnitt befindet sich das Nordportal des neuen Scheibengipfeltunnels (schwarzer Kreis in Abbildung 43). Von besonderem Interesse sind daher die Strömungsverhältnisse bei stabilen Wetterlagen und Kaltluftsituationen im Verlauf der Nacht. Thermische Parameter werden hier nicht betrachtet.

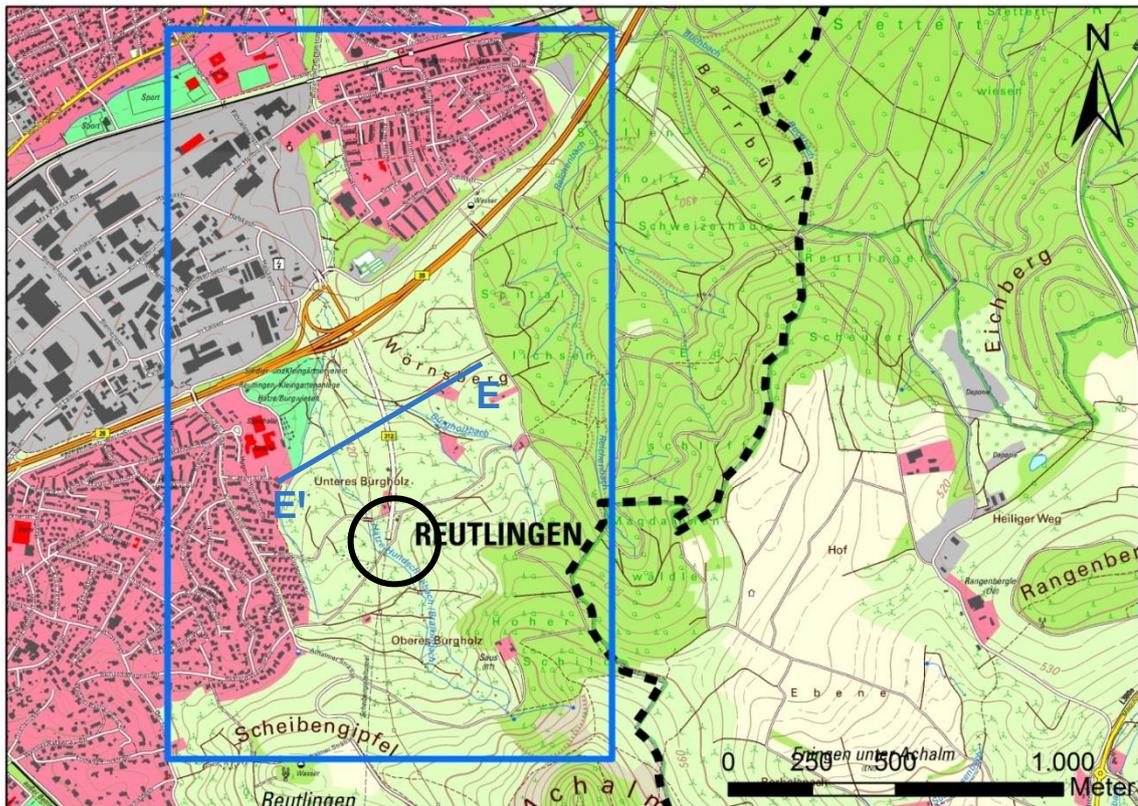


Abbildung 43: Abgrenzung des Teilbereichs 7, Scheibengipfel Nord

Die Karten 17.1 bis 17.3 im Kartenteil zeigen die bodennahen Windgeschwindigkeiten für 1 h, 2 h und 4 h nach Sonnenuntergang.

Es zeigt sich zu allen betrachteten Zeitpunkten ein sehr deutlicher Kaltluftstrom vom Scheibengipfel entlang des Burgholzbachs Richtung Bundesstraße B 28 über das Nordportal des Scheibengipfeltunnels hinweg in Richtung des östlichen Teils des Gewerbegebietes „In Laisen“. Dabei werden bis spät in die Nacht Kaltluftgeschwindigkeiten > 2 m/s erreicht. Im Bereich der Bundesstraße B 28 verflacht der Hang und das Tal weitet sich auf, so dass sich die Windgeschwindigkeiten deutlich verringern und der Hauptfluss sich aufgliedert.

Abbildung 44 zeigt einen Schnitt durch das Untere Burgholz mit dem Blick aus Richtung Bundesstraße B 28 Richtung Scheibengipfeltunnel (Schnittlage siehe Abbildung 43). Der Kaltluftvolumenstrom zu diesem Zeitpunkt (2 h nach Sonnenuntergang) beträgt ca. 4.600 m³/s. Die neue Bundesstraße B 312 befindet sich westlich des Roten Wörnsberg Richtung Burgholzbach.

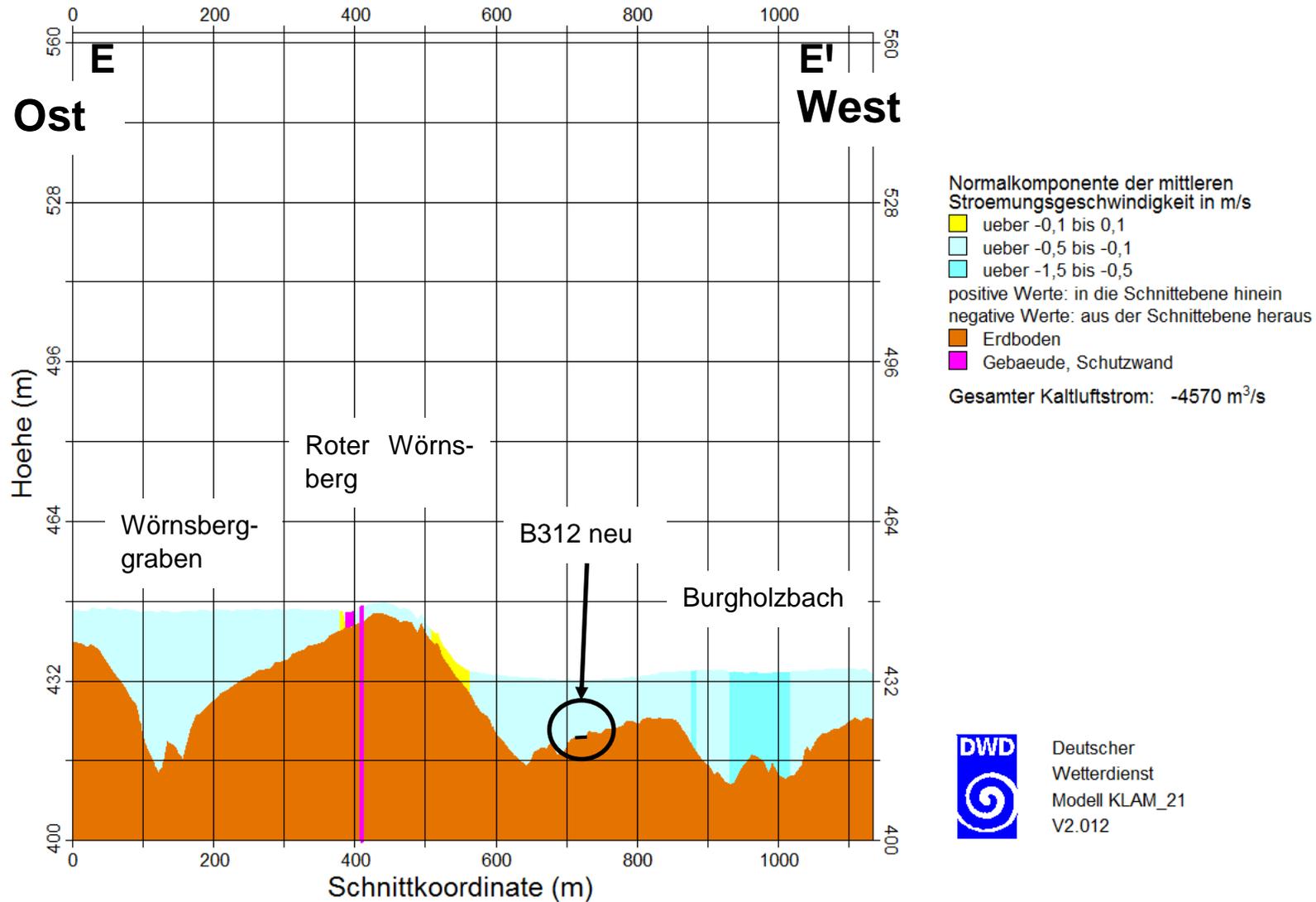


Abbildung 44: Schnitt (E – E') durch das untere Burgholz in Richtung Nordportal des Scheibengipfeltunnels (2 h nach Sonnenuntergang)

Der Kaltluftstrom verläuft im Wesentlichen etwas weiter westlich, hat aber etwas weiter talaufwärts den Bereich des Nordportals bereits überstrichen (siehe Karten 17.1 und 17.2 im Kartenteil).

Dies bedeutet, dass im Bereich des Nordportals sowie nördlich davon verursachte Emissionen in Kaltluftsituationen in Richtung Bundesstraße B 28 und das nördlich davon befindliche ca. 1 km entfernte Gewerbe- und Industrie- bzw. Gewerbegebiet „In Laisen“ verfrachtet werden. Stärkere Strömungen treten insbesondere in den Abend- und frühen Nachtstunden (siehe Kapitel 15) auf, während sie im Laufe der Nacht deutlich abflauen (siehe Karte 17.3 im Kartenteil).

Da das Auftreten von Schwachwindsituationen im Bereich Scheibengipfel Nord wegen der topographischen Lage als deutlich geringer gegenüber der Kernstadt anzusehen ist (Schwachwindhäufigkeit: Kernstadt ca. 60 %, Scheibengipfel Nord ca. 25 %), sind relativ häufig die in weiten Teilen des Stadtgebietes bzgl. der Windanströmung üblichen Südwest bzw. Nordost-Lagen zu erwarten.

Durch die topographische Lage können Luftschadstoffe im Bereich des Burgholz deutlich besser abtransportiert werden als in der beengten Innenstadtlage (siehe Kapitel 5.2.1). Dies trifft sowohl für meteorologische Situationen, bei denen Kaltluftabflüsse eine Rolle spielen zu, als auch die generelle Anströmung im Jahresmittel.

5.2.8 Scheibengipfel Süd (Teilbereich 8/9)

Der Bereich Scheibengipfel Süd befindet sich im Südosten der Kernstadt von Reutlingen an der Gemarkungsgrenze von Reutlingen und Eningen u.A. östlich des Gewerbegebietes „Betzenried“. Zentral im betrachteten Ausschnitt befindet sich das Südportal des neuen Scheibengipfeltunnels (schwarzer Kreis Abbildung 45). Von besonderem Interesse sind daher wie bei Teilbereich 7 die Strömungsverhältnisse bei stabilen Wetterlagen und Kaltluftsituationen.

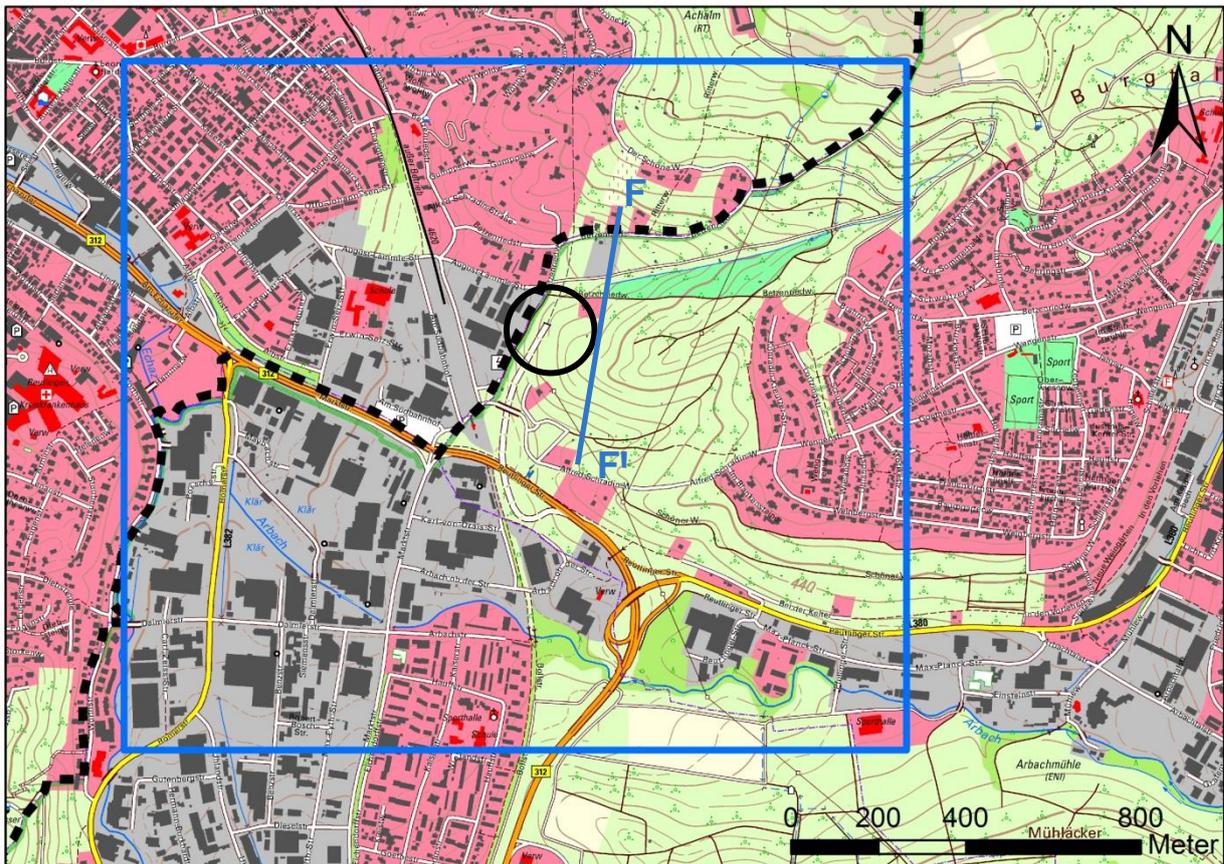


Abbildung 45: Abgrenzung des Teilbereichs 8/9, Scheibengipfel Süd

Die Karten 18.1 bis 18.3 im Kartenteil zeigen die bodennahen Windgeschwindigkeiten für 1 h, 2 h und 4 h nach Sonnenuntergang. Abbildung 46 zeigt einen Schnitt durch den Teilbereich.

Demnach bildet sich insbesondere zu Beginn der Nacht (1 h nach Sonnenuntergang) ein sehr deutlicher Hangabwind aus Richtung Betzenriedgraben aus, der nördlich des Tunnelportals auf das Gewerbegebiet Betzenried trifft und dort wegen der sprunghaft ansteigenden Oberflächenrauigkeit zum Teil Richtung Süden zum Tunnelportal hin, zum Teil aber auch in die August-Lämmle-Straße bzw. den Eninger Weg abgelenkt wird. Wegen der Hangverflachung nehmen die Windgeschwindigkeiten im Bereich des Südportals jedoch stark ab. Im weiteren Verlauf der Nacht, ab ca. 2 h nach Sonnenuntergang, nehmen die Windgeschwindigkeiten am unteren Betzenriedgraben wegen der beginnenden Talauffüllung und einer einsetzenden Gegenströmung aus Richtung Arbachtal stark ab, so dass die Windrichtung von vorher südlich gerichteten Winden auf Nord drehen kann (siehe Karte 18.1 und 18.2 im Kartenanhang). Wegen des konstant hohen Zustroms an Kaltluft aus dem Arbachtal und der Zunahme der Höhe der Bodeninversion kommen die bodennahen Kaltluftströmungen im Bereich des Südportals im weiteren Verlauf der Nacht zum Erliegen (Karte 18.3)

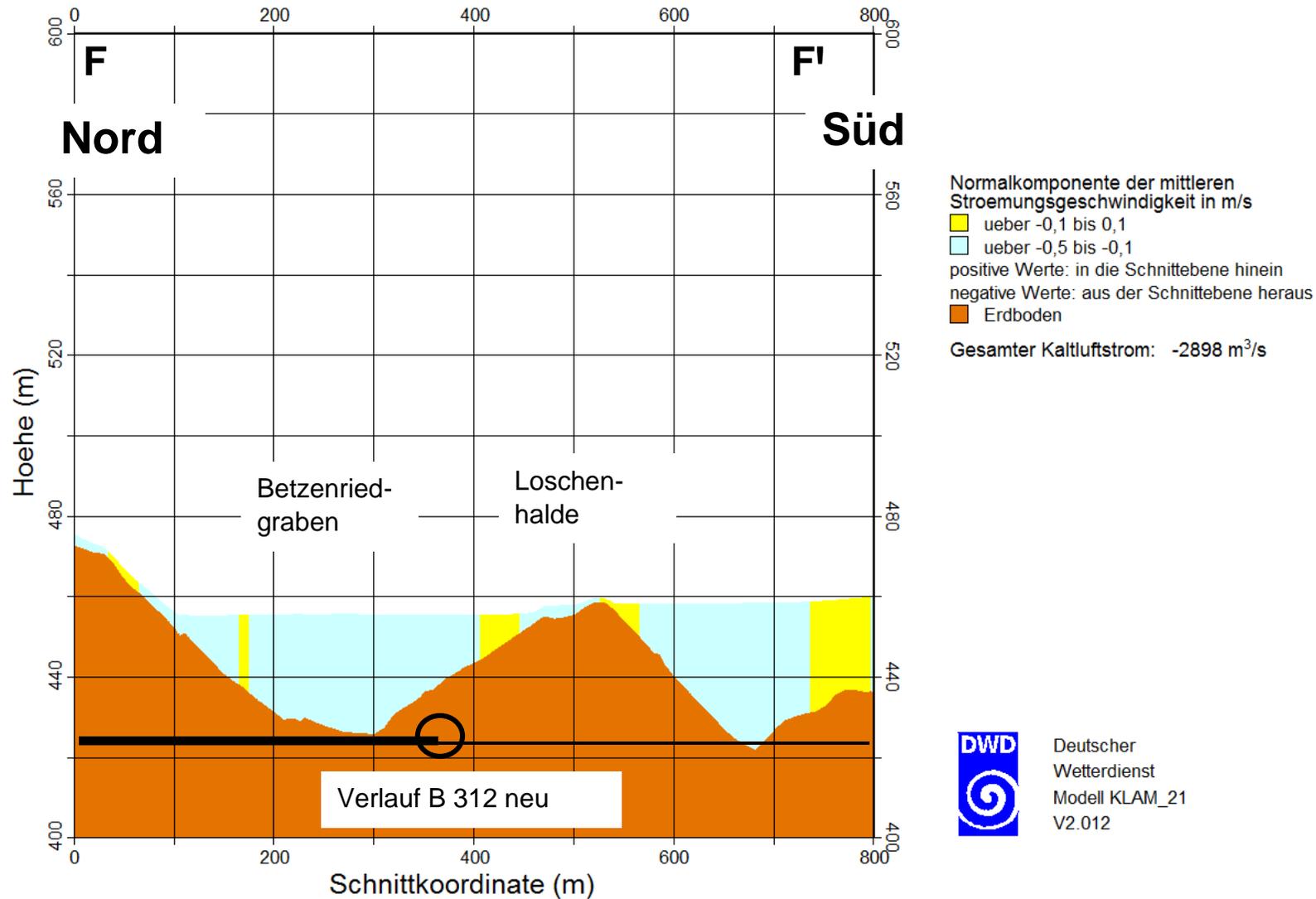


Abbildung 46: Schnitt (F – F') durch den Betzenriedgraben. Lage des Südportals (schwarzer Kreis) des Scheibengipfeltunnels ca. 150 m vor der Schnittebene (2 h nach Sonnenuntergang)

Abbildung 46 zeigt einen Schnitt durch den Betzenriedgraben mit dem Blick aus Richtung Bundesstraße B 312 neu in Richtung Eningen u.A. (Schnittlage siehe Abbildung 45). Der Kaltluftvolumenstrom zu diesem Zeitpunkt (2 h nach Sonnenuntergang) beträgt ca. 2.900 m³/s. Das Südportal des Scheibengipfeltunnels befindet sich vor der Schnittebene am Unterhang der Loschenhalde zwischen den Kaltluftströmen des Betzenriedgrabens und eines weiteren kleineren Grabens.

Dies bedeutet, dass im Bereich des Südportals des Scheibengipfeltunnels verursachte Emissionen in Kaltluftsituationen nicht direkt von einem der beiden Kaltluftströme der beiden Geländeeinschnitte erfasst werden, sondern durch einen nach Süden abzweigenden Teilstrom des Kaltluftstromes des Geländeeinschnittes Betzenriedgraben. Im weiteren Verlauf der Nacht stellt sich eine schwache Gegenströmung durch den hinzutretenden Arbachtäler Kaltluftstrom ein, bevor das Kaltluftsystem in der späteren Nacht zum Erliegen kommt und stabile Verhältnisse eintreten.

Insgesamt bildet dieser Bereich an der Gemarkungsgrenze Reutlingen, Pfullingen sowie Eningen den zentralen Bereich für den Durchtransport von Luftströmungen aus dem Echaz- sowie Arbachtal in Richtung Kernstadt von Reutlingen. Das Portal des Scheibengipfeltunnels liegt etwas Abseits dieser Strömungen am Unterhang der Loschenhalde.

Insbesondere die Luftströmungen aus dem Echaztal fließen jedoch oberhalb des Bebauungsniveaus von Pfullingen, so dass aus dieser Richtung – im Gegensatz zum Arbachtal – keine bodennahen Strömungen in Richtung Reutlingen zu verzeichnen sind. Aus dem Arbachtal strömen auch zu fortgeschrittener Nachtstunde bodennah Luft nach Reutlingen.

5.2.9 Orschel-Hagen (Teilbereich 10)

Der Untersuchungsbereich Orschel-Hagen befindet sich im Norden der Kernstadt von Reutlingen und südlich des Stadtbezirks Rommelsbach. Der betrachtete Ausschnitt zeigt zentral die etwas erhöht liegenden Orscheläcker, im Süden schließen sich die Bereiche Storlach und Voller Brunnen an, in dem sich auch das Carl-Diem-Stadion befindet. Nördlich der Orscheläcker beginnt die Wohnbebauung von Orschel-Hagen (siehe Abbildung 47). Das Gelände fällt generell von den zentral gelegenen Orscheläckern Richtung Orschel-Hagen sowie der Kernstadt

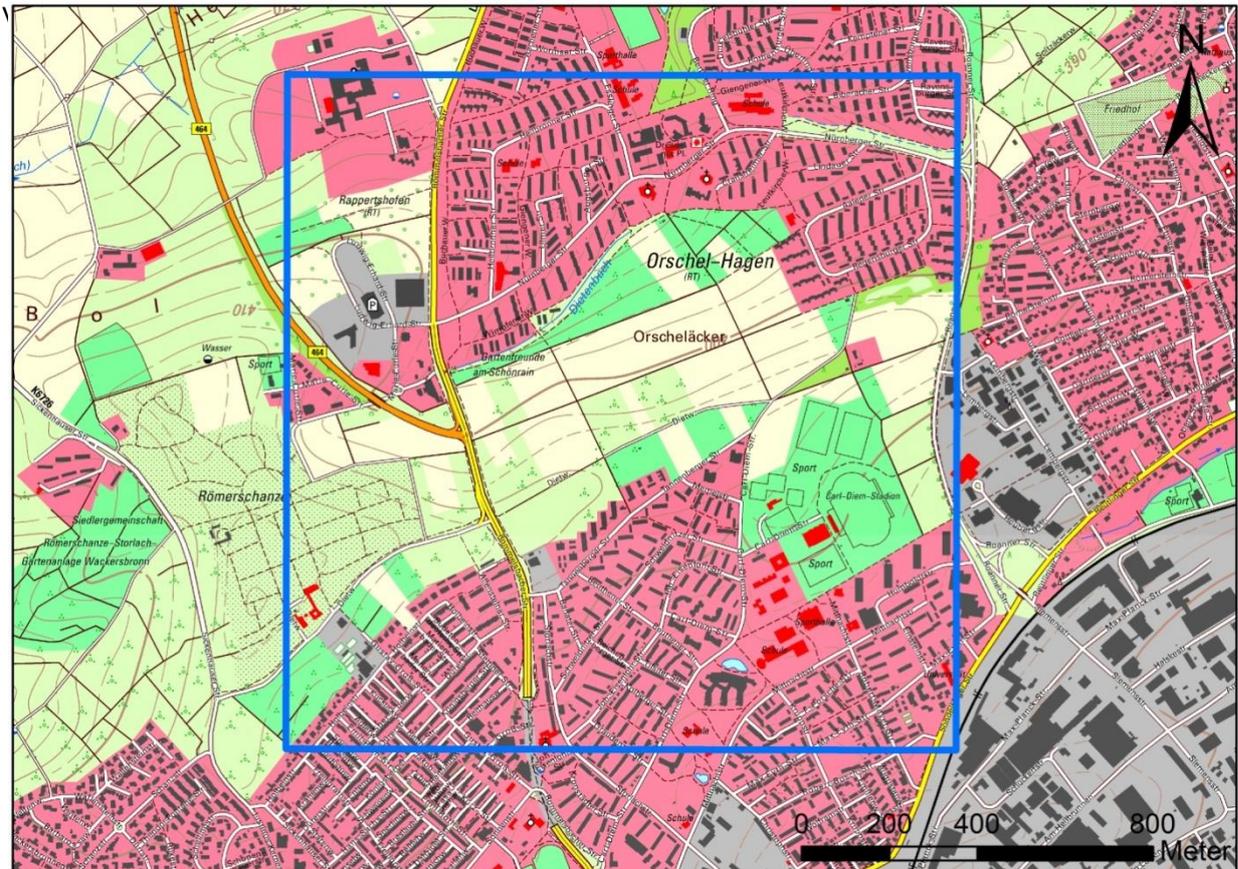


Abbildung 47: Abgrenzung des Teilbereichs 10, Orschel-Hagen

Durch die frei anströmbare Lage, topographisch etwas gegenüber der Kernstadt erhöht, ist Orschel-Hagen generell strömungsdynamisch begünstigt. Von besonderem Interesse sind hier die Ausgleichs-/Wirkraumbeziehung bzw. der Abkühleffekt des Stadtrandes sowie der Einfluss und die Wertigkeit des nahen Kaltluftentstehungsgebietes Orscheläcker in der frühen Nacht.

Karte 19.1 im Kartenteil zeigt die bodennahen Windgeschwindigkeiten für 1 h nach Sonnenuntergang, wenn die Hangwindssysteme ein Maximum erreichen.

Insbesondere im Bereich der Orscheläcker und östlich des Friedhofs Römerschanze entwickeln sich demnach schwache bis mäßige Hangabwinde, die in Richtung des Bebauungsrandes von Orschel-Hagen strömen und zum Teil einsickern, so dass diese – nachdem der Dienstleistungspark sowie die erste Bebauungsreihe durchströmt wurden – auch bis nördlich der Nürnberger Straße wirksam werden. Im östlichen Teil des betrachteten Ausschnitts fließt

auf den Orscheläckern gebildete Kaltluft östlich des Carl-Diem-Stadions über die Roanner Straße Richtung Sondelfinger Straße.

Wesentliche Einflussgrößen für die thermische Behaglichkeit in einem Bereich werden neben der Durchströmung mit Kaltluft u.a. von dem Sonnenstand der Wärmespeicherkapazität unterschiedlicher Oberflächen und der Vegetation, aber auch der Entfernung zu Kaltluftentstehungsgebieten und dem Siedlungsrand hervorgerufen.

Die Karten 18.2 und 18.3 im Kartenteil zeigen die Oberflächentemperatur in Teilbereich 10 um 16:00 Uhr sowie um 22:00 Uhr, Karten 18.4 und 18.5 zeigen den PMV-Wert in Teilbereich 10 um 16:00 Uhr sowie um 22:00 Uhr. Die Modellierungen wurden jeweils für einen Sommertag (25.06.) durchgeführt.

Es zeigt sich sehr deutlich, dass bei starker Sonneneinstrahlung am Nachmittag (16:00 Uhr) insbesondere Straßen-, Beton- und Pflasterflächen in unbeschatteten Lagen stark überhitzen (z.B. asphaltierte Bereiche im Ortskern von Orschel-Hagen, Parkplätze im Dienstleistungspark sowie Straßenzüge in nördlichen Bereich der Kernstadt). Bewaldete oder mit Büschen und Hecken bestandene Bereiche wie die Orschelwiesen oder das Waldstück im Norden des betrachteten Ausschnitts setzen sich mit niedrigeren Temperaturen deutlich ab.

Bezüglich der thermischen Belastung (PMV) zeigt Teilbereich 10 am Nachmittag in den zahlreichen unbeschatteten Lagen hohe Werte (größtenteils > 4), wobei sich aufgrund der einheitlichen Sonneneinstrahlung die thermische Belastung von unbeschatteten Freiflächen und asphaltierten Bereichen kaum unterscheiden.

Am Abend (22:00 Uhr, Karten 18.3 und 18.5) sind die überhitzen Straßenzüge und Oberflächen hoher Wärmespeicherkapazität, wie Parkplätze – insbesondere im Süden des betrachteten Ausschnitts, deutlich sichtbar. Die zur Kernstadt von Reutlingen gehörenden Teile des Teiluntersuchungsgebietes haben – trotz ähnlicher Oberflächentemperaturen – schlechtere thermische Umgebungsbedingungen, so dass dort der Eindruck von Wärme am Abend stärker ist als in den betrachteten Teilen von Orschel-Hagen.

Die höchsten PMV-Werte wurden innerhalb der Bebauung, insbesondere in Bereichen mit hohem Versiegelungsgrad, mit gewisser Entfernung zum Bebauungsrand errechnet, wo sich eine hohe Wärmespeicherkapazität und eine strömungsbehindernde Bebauung negativ auf die Abkühlung auswirken. Die südlichen Randbereiche von Orschel-Hagen zu den Orscheläckern hin erfahren strömungsbedingt bereits recht früh eine spürbare Abkühlung.

Die tags aber auch nachts vergleichsweise günstigen thermischen Umgebungsbedingungen in Teilbereich 10 sind größtenteils auf die lokalklimatische Gunstlage mit umgebenden Freiflächen mit hoher Kaltluftproduktion und guter Durchgrünung der Ortslage zurückzuführen (siehe Tabelle 20).

Bezüglich der Klimatope dominieren in Teilbereich 10 dementsprechend das Freilandklimatop sowie für den bebauten Teil das Vorstadt- sowie Stadtrandklimatop (siehe Tabelle 21 sowie Abbildung 48).

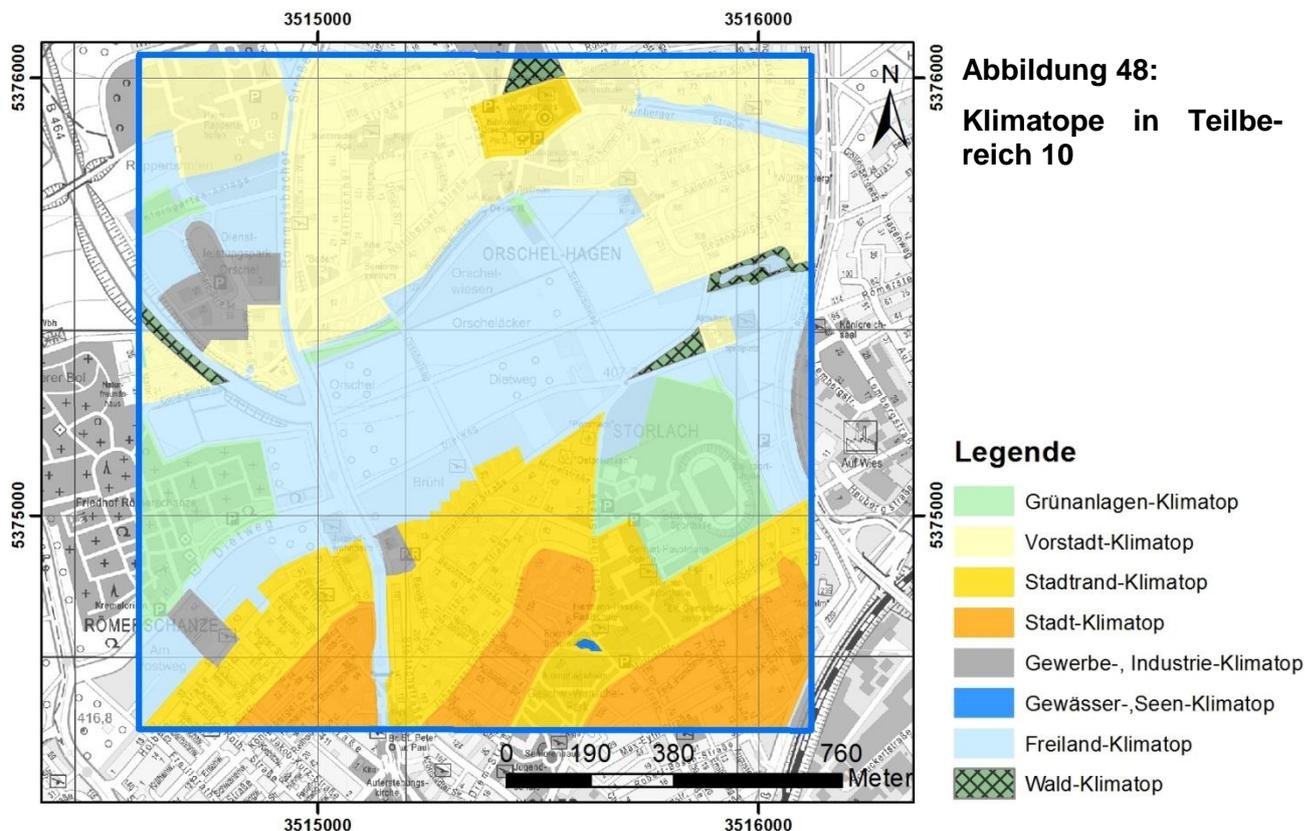
In diesem Teilbereich wird die Wertigkeit stadtnaher Freiflächen (hier: Orscheläcker) und innerörtlicher Strukturierung (Gartenstadt) mit hohem Grünanteil deutlich. Dies ist insbesondere von Bedeutung, da Orschel-Hagen, wie auch weitere der nördlichen Stadtteile nicht an größere Kaltluftsysteme (wie Echaz- und Arbachtal) angeschlossen sind. Hier wirkt sich jedoch die frei anströmbare, erhöhte topographische Lage positiv aus.

Tabelle 20: Landnutzungen und Kaltluftproduktionsraten in Teilbereich 10

Landnutzung	km ²	Kaltluftproduktionsrate (Mio m ³ /h)
Acker / Grünland / Freiflächen	0,41	29.520
Streuobstwiesen / Gärten	0,26	10.296
Park	0,13	5.148
Siedlung locker	0,96	3.456
Friedhof	0,08	3.168
Wald	0,03	1.458

Tabelle 21: Klimatopanteile im betrachteten Teilbereich 10 nach Klimatopkarte (Legende siehe Kapitel 6)

Klimatop	km ²
Freiland-Klimatop	0,76
Vorstadt-Klimatop	0,61
Stadttrand-Klimatop	0,41
Stadt-Klimatop	0,23
Grünanlagen-Klimatop	0,22
Gewerbe-, Industrie-Klimatop	0,08
Wald-Klimatop	0,03



5.2.10 Sickenhausen (Teilbereich 11)

Der Untersuchungsbereich Sickenhausen befindet sich im Norden des Stadtgebietes von Reutlingen unweit des Neckars und umfasst weite Teile des bebauten Bereichs des Stadtbezirks Sickenhausen im Süden und Altenburg in Norden. Zentral befindet sich das Erlenbachtal mit der etwa Südost-Nordwest verlaufenden B 464 (siehe Abbildung 49). Von besonderem Interesse sind die Strömungsverhältnisse bei stabilen Wetterlagen und Kaltluftsituationen.

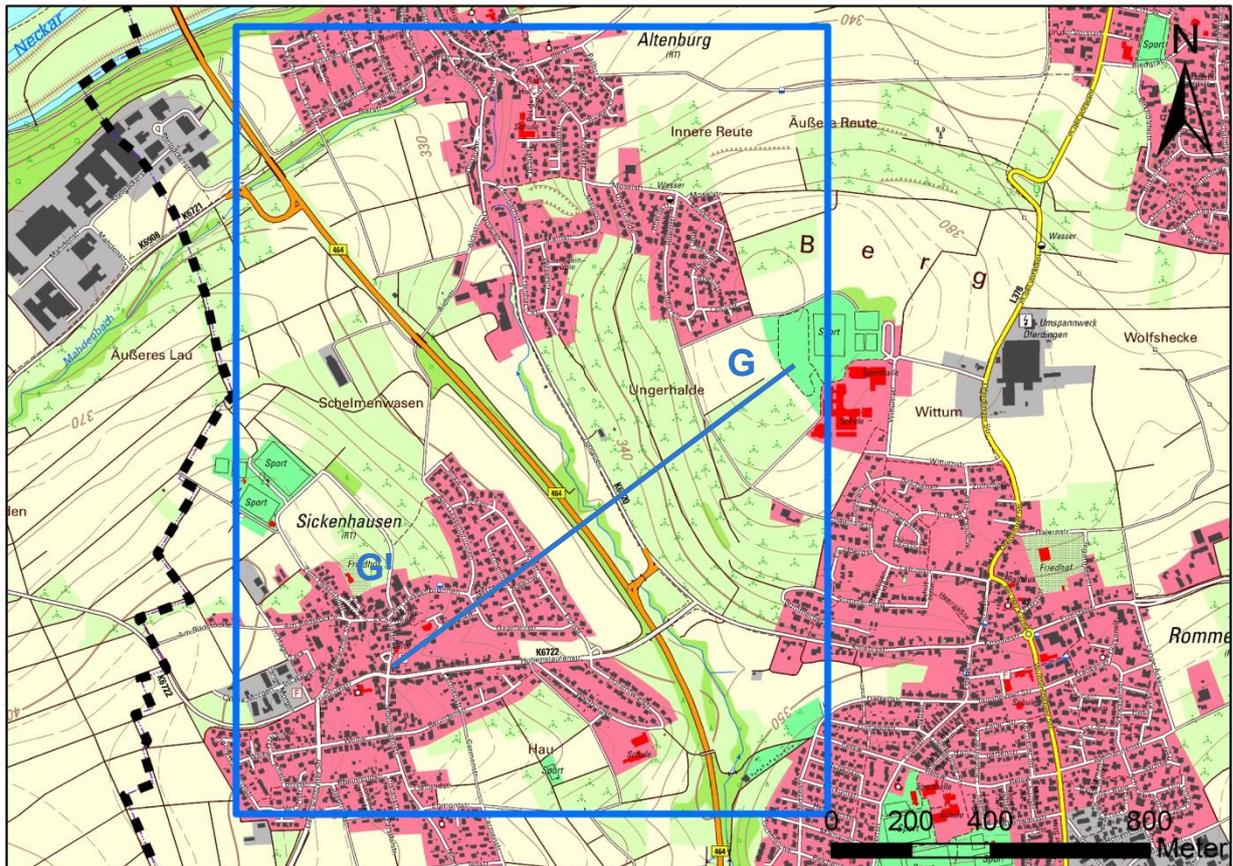


Abbildung 49: Abgrenzung des Teilbereichs 11, Sickenhausen

Die Karten 20.1 bis 20.3 im Kartenteil zeigen die bodennahen Windgeschwindigkeiten für 1 h, 2 h und 4 h nach Sonnenuntergang. Abbildung 46 zeigt einen Schnitt durch den Teilbereich.

Im betrachteten Ausschnitt bilden sich demnach bereits früh in der Nacht auf den Freiflächen, wie Schelmenwasen oder Ungerhalde, z.T. kräftige Hangabwinde (z.B. Karte 20.1 nördlich oder südlich Sickenhausen sowie auf der gegenüberliegenden Talseite) aus, die dem Erlenbachtal zufließen. Dort bildet sich ein neckarwärts gerichteter Kaltluftstrom aus, der sich im weiteren Verlauf der Nacht bodennah abschwächt (siehe Karte 20.2), da der Hauptteil des Kaltluftstromes in größeren Höhen Richtung Neckartal fließt. Später in der Nacht kommt der Kaltluftstrom insbesondere im unteren Erlenbachtal wegen der Auffüllung des nur schwach geneigten Neckartales und des dadurch verursachten Kaltluftstaus vollständig zum Erliegen, so dass bodennah nur noch an den Oberhängen Luftbewegungen errechnet wurden. Diese typische Auffüllung des Erlenbachtals und des Neckartals kann – je nach großräumiger Wetterlage – zu häufigem Nebel und Spätfrostgefährdung führen, wie es übereinstimmend bereits in der Landschaftsökologischen Bestandsaufnahme von Baden-Württemberg /40/ dargestellt ist.

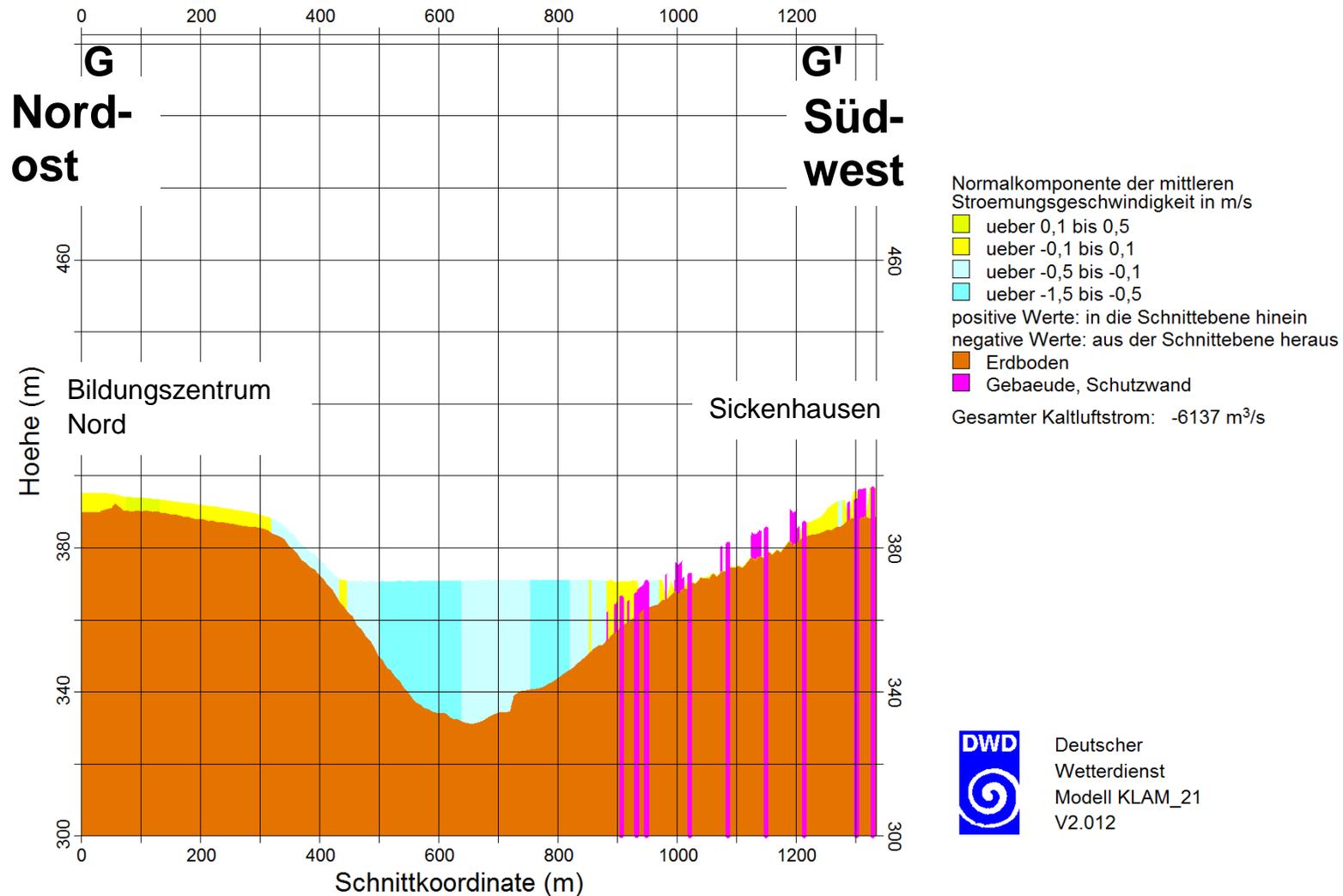


Abbildung 50: Schnitt (G – G') durch das Erlenbachtal (2 h nach Sonnenuntergang)

In Bezug auf die Durchlüftung profitieren in Wetterlagen mit Kaltlufteinfluss insbesondere die Wohnlagen in den Hangbereichen von Altenburg und Sickenhausen vom Kaltluftstrom des Erlenbachtals, während z.B. im auf der Hochfläche gelegenen Sickenhausen aufgrund seiner Lage mit geringeren Kaltluftströmen zu rechnen ist. Jedoch ist durch diese topographische Lage eine gute Anströmbbarkeit gegeben, so dass eine gute Durchlüftung des Ortes gewährleistet ist (durchschnittliche Windgeschwindigkeit RT-Stadtmitte ca. 1,4 m/s; Sickenhausen ca. 2,4 m/s). Die Bebauung von Altenburg wird in der ersten Nachthälfte im Wesentlichen von dem Kaltluftabfluss überströmt und nur untergeordnet direkt durchströmt. In der zweiten Nachthälfte kann die Kaltluft nicht mehr in das bereits weitgehend von Kaltluft erfüllte Neckartal abfließen. Das Kaltluftsystem kommt dann zum Erliegen. Bei niedrigen Temperaturen ist mit Nebelbildung und Schadstoffanreicherung in den Tallagen zu rechnen.

Abbildung 50 zeigt einen Schnitt durch das Erlenbachtal zwischen dem Bildungszentrum Nord in Rommelsbach und dem Ortskern von Sickenhausen (Schnittlage siehe Abbildung 49). Der Kaltluftvolumenstrom zu diesem Zeitpunkt (2 h nach Sonnenuntergang) beträgt ca. 6.100 m³/s. Der Schwerpunkt der Kaltluftströmung ist nicht in der Tiefenlinie sondern an den Talflanken zu erwarten.

Die Flächen des Erlenbachtals – insbesondere die Hänge – zählen zu den produktivsten bzgl. Kaltluft im gesamten Stadtgebiet (siehe Tabelle 22). Die dort produzierte Kaltluft fließt aber generell ohne größeren Siedlungsbezug dem Erlenbachtal bzw. dem Neckartal zu. Generell begründen die weitreichenden Freiflächen um Sickenhausen und Altenburg eine lokalklimatische Gunstlage.

Bezüglich der Klimatope dominieren in Teilbereich 11 dementsprechend das Freilandklimatop sowie für den bebauten Teil das Stadtrandklimatop (siehe Tabelle 23 sowie Abbildung 51).

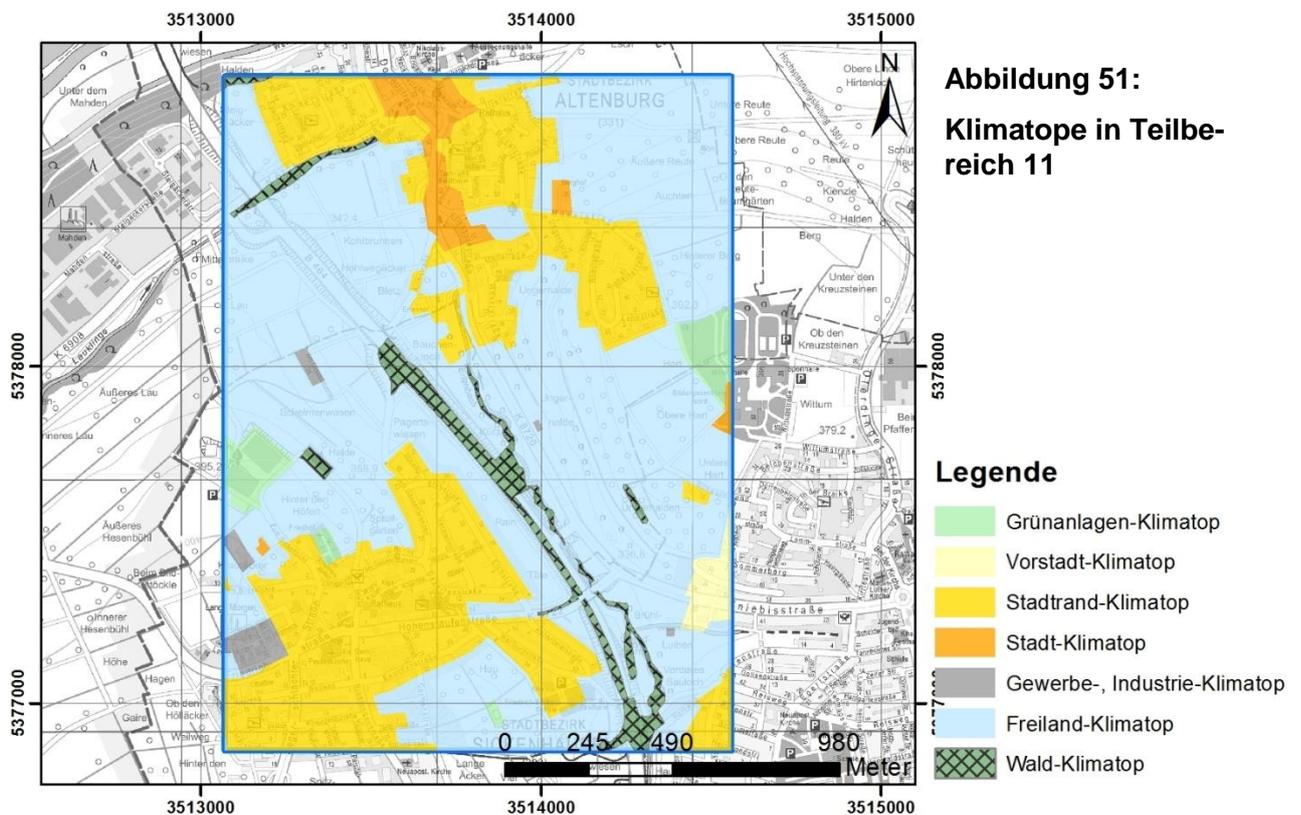
Tabelle 22: Landnutzungen und Kaltluftproduktionsraten in Teilbereich 11

Landnutzung	km ²	Kaltluftproduktionsrate (Mio m ³ /h)
Acker / Grünland / Freiflächen	1,22	87.840
Streuobstwiesen / Gärten	0,51	20.196
Wald	0,09	4.374
Park	0,06	2.376
Siedlung locker	0,48	1.728
Friedhof	0,005	198

Insgesamt zeigt der untersuchte Bereich deutlich, wie in Strahlungs Nächten die Kaltluftabflüsse in Talbereichen (hier: Erlenbachtal), in den späteren Nachtstunden deutlich abnehmen, da sich durch den Rückstau aus dem Neckartal ein Kaltluftsee bildet. Bei mehreren Tagen andauernden stabilen Wetterlagen in Winter ist hier mit einer starken Nebel- bzw. Frostgefährdung, aber auch mit Schadstoffanreicherung zu rechnen. Letzteres erscheint jedoch aufgrund fehlender, wesentlicher Emittenten wenig problematisch.

Tabelle 23: Klimatopanteile im betrachteten Teilbereich 11 nach Klimatopkarte (Legende siehe Kapitel 6)

Klimatop	km ²
Freiland-Klimatop	1,80
Stadttrand-Klimatop	0,85
Wald-Klimatop	0,11
Stadt-Klimatop	0,08
Grünanlagen-Klimatop	0,07
Vorstadt-Klimatop	0,03
Gewerbe-, Industrie-Klimatop	0,03



5.2.11 Schieferbuckel (Teilbereich 12)

Der Bereich Schieferbuckel befindet sich in der Kernstadt von Reutlingen an der Schieferstraße südlich der Römerschanze. Der Bereich ist geprägt von Wohnbebauung, gewerblichen Nutzungen, Schul- und Sportbereichen sowie derzeit z.T. unbebauten Freiflächen (siehe Abbildung 52). Von besonderem Interesse sind die Strömungsverhältnisse bei stabilen Wetterlagen und Kaltluftsituationen.

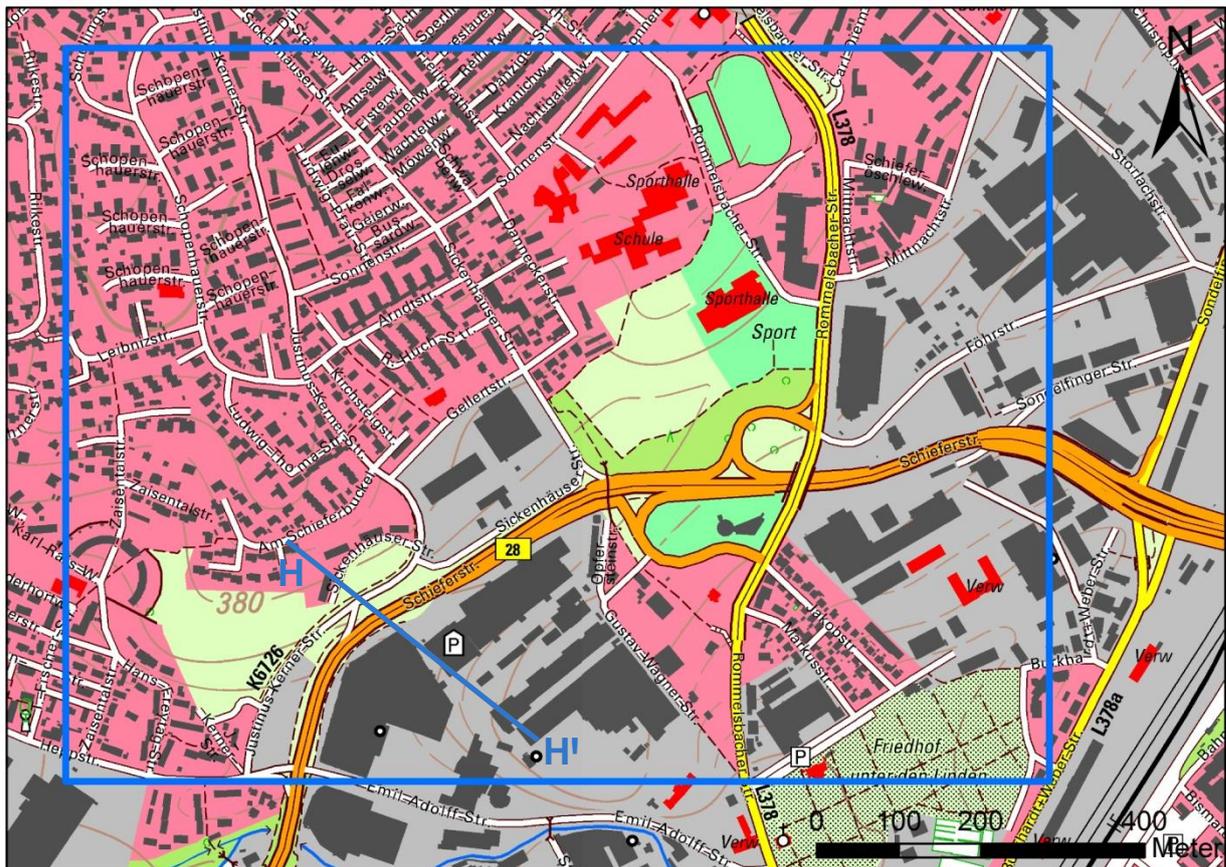


Abbildung 52: Abgrenzung des Teilbereichs Schieferbuckel

Die Karten 21.1 bis 21.3 im Kartenteil zeigen die bodennahen Windgeschwindigkeiten für 1 h, 2 h und 4 h nach Sonnenuntergang. Abbildung 53 zeigt einen Schnitt durch den Teilbereich.

Zu Beginn der Kaltluftbildung speisen demnach die an der Schieferstraße befindlichen Freiflächen (bspw. der Bereich südlich des Albert-Einstein-Gymnasiums) die Schieferstraße als Tiefenlinie und diese fungiert dann als Kaltluftleitbahn. Von der Rommelsbacher Straße in Richtung Emil-Adolf-Straße/Heppstraße liefern die unterschiedlichen Freiflächen einen Beitrag zum Kaltluftstrom, der jedoch im Vergleich zu denen, welche in den vorangegangenen Kapiteln genannt wurden, um mehrere Größenordnungen geringer ist (siehe Karte 21.1) und zudem durch den Straßenverkehr auf der Schieferstraße als lufthygienisch belastet gelten kann. Der Kaltluftstrom der Schieferstraße fächert sich im Bereich der Kreuzung Emil-Adolf-Straße/Heppstraße auf und flaut dann im dortigen Bereich wegen der geringen Hangneigung ab. Im weiteren Verlauf der Nacht schwächt sich der Kaltluftstrom stark ab, da aufgrund der Talauffüllungen durch die großen Kaltluftströme aus dem Echaz-/Arbachtal bzw. dem Breitenbachtal das System zum Erliegen kommt (Karte 21.1 sowie Karten 7 bis 10).

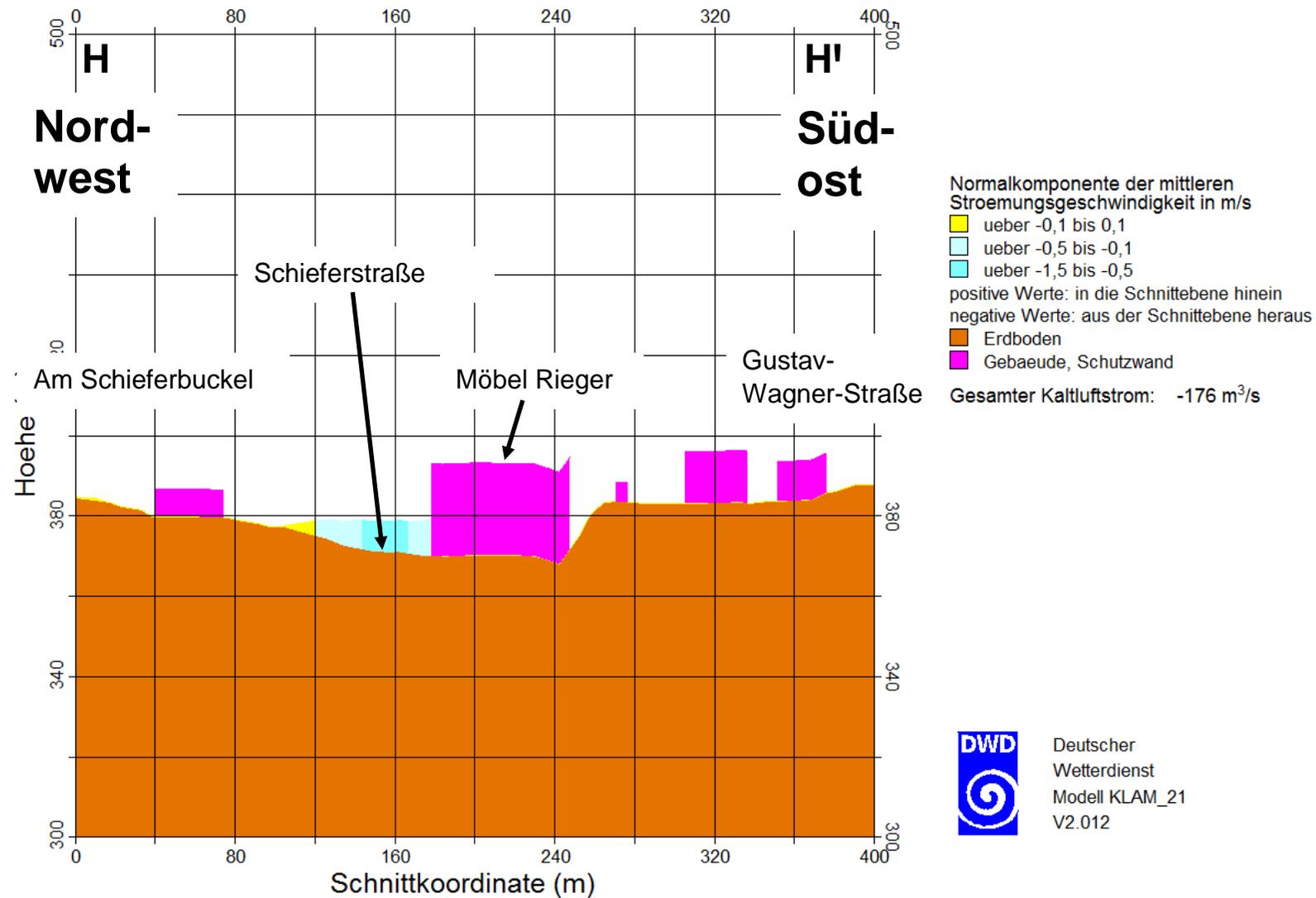


Abbildung 53: Schnitt (H – H') durch die Schieferstraße (2 h nach Sonnenuntergang)

Abbildung 53 zeigt einen Schnitt durch bzw. über die Schieferstraße (Schnittlage siehe Abbildung 52). Der Kaltluftvolumenstrom zu diesem Zeitpunkt (2 h nach Sonnenuntergang) beträgt ca. 180 m³/s. Der Schwerpunkt der Kaltluftströmung befindet sich auf der Schieferstraße selbst.

Bei dem Bereich des Schieferbuckels handelt es sich um einen typischen innerstädtischen Bereich abseits großer bodennaher Kaltluftzuflüsse in die Bebauung. Das Gebiet profitiert jedoch von dem bei ausgeprägten Strahlungswetterlagen ca. 2 - 3 Stunden nach Sonnenuntergang einsetzenden mächtigen Kaltluftstrom aus dem Arbach-/Echaztal sowie eingeschränkt dem Kaltluftstrom aus dem Breitenbachtal, die beide die städtische Bebauung überstreichen. Insbesondere der Kaltluftstrom aus dem Arbach-/Echaztal sorgt dann durch vertikale Durchmischung in der bodennahen Reibungsschicht für Abkühlung.

Die geringen Mengen lokal produzierter Kaltluft fließen über die stark verkehrsbelastete Schieferstraße ab und werden in einem relativ eng umgrenzten Bereich der Justinus-Kerner-Straße/Hans-Freytag-Straße lediglich in den frühen Nachtstunden wirksam.

Die Flächen im Bereich der Schieferstraße sind geprägt von Wohn- bzw. gewerblichen Nutzungen und Straßenflächen, kaltluftproduzierende Flächen (siehe Tabelle 24) treten dahinter deutlich zurück.

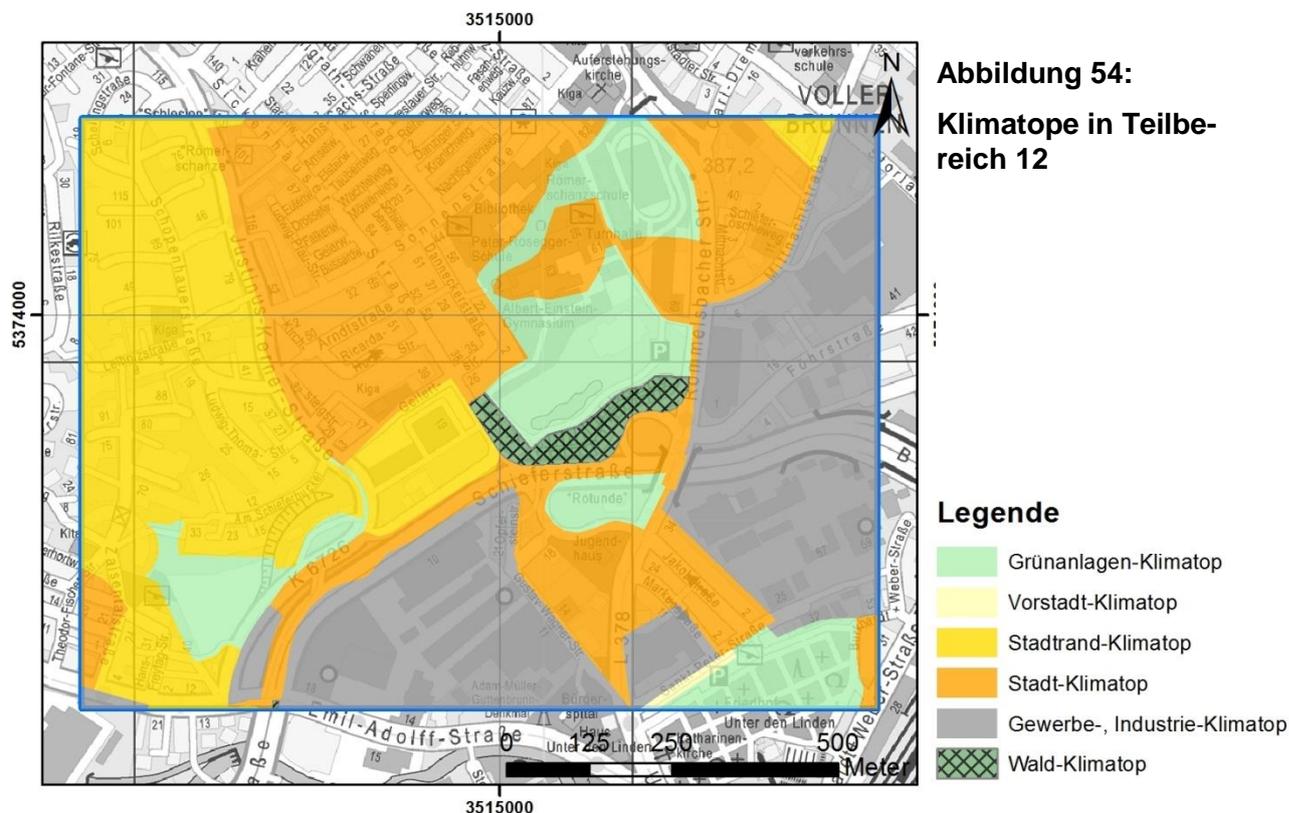
Dementsprechend dominieren bezüglich der Klimatope in Teilbereich 12 die verschiedenen Stadtklimatope mit teilweise hohen Versiegelungsgraden, während die Freilandklimatope nur äußerst geringe Flächenanteile aufweisen (siehe Tabelle 25 sowie Abbildung 54).

Tabelle 24: Landnutzungen und Kaltluftproduktionsraten in Teilbereich 12

Landnutzung	km ²	Kaltluftproduktionsrate (Mio m ³ /h)
Acker / Grünland / Freiflächen	0,05	3.600
Siedlung locker	0,43	1.548
Parks	0,03	1.108
Friedhof	0,03	1.029
Wald	0,02	972

Tabelle 25: Klimatopanteile im betrachteten Teilbereich 12 nach Klimatopkarte (Legende siehe Kapitel 6)

Klimatope	km ²
Stadt-Klimatop	0,32
Gewerbe-, Industrie-Klimatop	0,28
Stadtrand-Klimatop	0,26
Grünanlagen-Klimatop	0,15
Freiland-Klimatop	0,05
Wald-Klimatop	0,02



Der untersuchte Teilbereich zeigt deutlich die Kaltluftdynamik reliefierter innerstädtischer Bereiche mit stark differierenden Nutzungen. Zusätzlich zeigt er die Wertigkeit innerstädtischer Grün- bzw. Freiflächen an. Da die Kaltluft, die über den Freiflächen entsteht jedoch über die Schieferstraße abfließt, ist deren Wert eingeschränkt.

Von den Kaltluftabflüssen aus dem Echaz- bzw. Arbachtäler Kaltluftsystem kann der Bereich nicht profitieren, da diese erst spät in der Nacht sowie in Höhen deutlich über dem Bebauungsniveau den Bereich erreichen.

6 Klimaanalysekarte

6.1 Grundlagen

Die Klimaanalysekarte stellt die lokalklimatischen Gegebenheiten und ablaufenden Prozesse in Reutlingen als flächenhafte Übersicht dar. Die in Kapitel 5 dargestellten Ergebnisse sind dazu wesentliche Grundlage. Als weitere Arbeits- und Informationsgrundlagen wurden genutzt:

- Ergebnisse der Kaltluftsimulation mit KLAM_21 zu verschiedenen Zeitpunkten, insbesondere
 - Strömungsfeld Kaltluft in 2 m Höhe 1 h nach Sonnenuntergang
 - Volumenstromdichte (über Kaltfluthöhe integriert) 2 - 4 h nach Sonnenuntergang
- Ergebnisse der mikroskaligen Modellierungen mit ENVI-Met, insbesondere
 - PMV-Wert sowie
 - Oberflächen- und Lufttemperatur zu verschiedenen Zeitpunkten
- Synthetische Windstatistiken der LUBW in 500 x 500 m Auflösung
- Vorbelastungsdaten zur Lufthygiene der LUBW
- Ergebnisse aus dem Wirkgutachten zum Luftreinhalteplan Reutlingen /36/
- Ergebnisse der Temperatur- und Windgeschwindigkeitsmessungen auf der Marienkirche sowie der Messfahrten vom 06.05.2016
- Planungsbezogene bioklimatische Gegebenheiten aus der Landschaftsökologischen Bestandsaufnahme von Baden-Württemberg /40/
- Flechten und Luftqualität in Reutlingen /13/
- Auswertungen des DWD u.a. zur durchschnittlichen Windgeschwindigkeit oder der Anzahl heißer Tage /11/
- Ortsbesichtigungen im Untersuchungsgebiet

Zentraler Gedanke der vorliegenden Analyse ist die Gliederung des Untersuchungsraumes in humanbioklimatisch und/oder lufthygienisch belastete Siedlungsräume (Wirkraum) einerseits und Kaltluft produzierende, unbebaute und vegetationsgeprägte Flächen andererseits (Ausgleichsraum). Wenn diese Bereiche nicht unmittelbar aneinander grenzen, können linear ausgerichtete Freiflächen geringer Rauigkeit beide Bereiche über weitere Strecken miteinander verbinden (Luftleitbahnen).

Aus der Differenzierung von klimatischen und/oder lufthygienischen Gunst- und Ungunsträumen sowie der sie verbindenden Strukturen ergibt sich somit ein kompliziertes Muster des Prozesssystems der Luftaustauschströmungen im Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüge im Stadtgebiet von Reutlingen.

Wesentlich für das Verständnis der Klimaanalysekarte ist der Maßstab der Betrachtung. Die Ausweisung der Klimatope orientiert sich an dem Maßstab z.B. des Flächennutzungsplanes

und ist nicht als meteregenau aufzufassen. Es ergeben sich Toleranzen von 50 m bis wenigen 100 m. Angrenzende Klimatope sind demnach generell durch einen mehr oder weniger großen Übergangsbereich gekennzeichnet, der so kartographisch nicht darstellbar ist.

Die in den Karten verwendeten Signaturen und Symbole entsprechend generell den Vorgaben der Richtlinie VDI 3787 Blatt 1 (2015) /20/. Dargestellt sind

- Bereiche ähnlicher klimatischer Verhältnisse (Klimatope),
- lineare Signaturen, die das Strömungsverhalten charakterisieren, wie Kaltluftströme und Luftleitbahnen, sowie
- flächenhafte Darstellungen klimatischer Phänomene wie Kaltlufteinzugsgebiete, Eindringtiefe der Kaltluft in die Bebauung sowie Bereiche, die die Bildung von Kaltluftseen begünstigen.

Als Mindestgröße für klimatisch wirksame Freiflächen im innerstädtischen Bereich kann ca. 100 m * 100 m (1 ha) gelten /26/. Unterhalb von 1 ha Größe sind klimatische Wirkungen in die nähere Umgebung im Allgemeinen untergeordnet. Diese minimale Flächengröße zur Ausbildung typischer klimatischer Eigenschaften sowie über die Flächen hinausgehender Wirkungen ist auch auf andere Klimatope übertragbar. Betrachtet wurde der Stand vom Sommer 2016 (Stand der einzelnen Grundlagendatenlayer siehe Kapitel 2).

6.2 Legendeneinheiten und Vorkommen

Klimatope beschreiben Gebiete mit vergleichbaren mikroklimatischen Ausprägungen. Diese differenzieren sich vornehmlich nach dem thermischen Tagesgang, der vertikalen Rauigkeit (Windfeldstörung), der topographischen Lage (Höhe und Exposition) und vor allem nach der Flächennutzung (z.B. Anteil versiegelter Fläche, Bebauungsdichte). Weiterhin fließen in die Klimatopausweisung Informationen zu den lufthygienischen Verhältnissen ein. Im Folgenden werden die ausgewiesenen Klimatope in Anlehnung an 3787 Blatt 1 (2015) /20/ beschrieben.

Gewässer-, Seen-Klimatop

Aufgrund der hohen Wärmekapazität von Wasser kommt es an den Oberflächen von Gewässern zu nur schwachen tagesperiodischen Temperaturschwankungen – Wasserflächen werden am Tag als relativ kühl und nachts als vergleichsweise warm empfunden. Sie können daher das lokale Klima stark beeinflussen. Jedoch bleibt ihr klimatischer Einfluss in der Regel lediglich auf das Gewässer selbst und die unmittelbaren Randbereiche beschränkt, mit Ausnahme des Auftretens von Land-/Seewindsystemen infolge des eingebundenen Luftmassentransports. Abgeschwächt zeigt sich dieses Verhalten auch im jahreszeitlichen Rhythmus, wodurch z.B. Städte im Einflussbereich großer Gewässer eine geringere Anzahl von Frosttagen aufweisen können.

Ein zusätzlich positiver Effekt für die klimatische Situation wird durch die geringe Rauigkeit von Gewässerflächen bewirkt, wodurch Austausch- und Ventilationsverhältnisse begünstigt werden. Dadurch ist unter Umständen eine Wirkung als Luftleitbahn möglich /20/.

Im Stadtgebiet von Reutlingen sind insbesondere der Altenburger Baggersee sowie die Neckaranteile mit dieser Signatur belegt. Weitere Wasserflächen befinden sich meist abseits der Wirkräume, wie etwa östlich von Gönningen oder westlich des Sportbereichs Markwasen, oder haben eine zu geringe räumliche Ausdehnung um dargestellt zu werden.

Freiland-Klimatop

Freiland-Klimatope stellen sich überwiegend über unbewaldeten, vegetationsbestandenen Außenbereichen ein. Sie zeichnen sich durch ungestörte Tagesgänge von Lufttemperatur und -feuchte und weitgehend unbeeinträchtigte Windströmungsbedingungen aus und wirken als Kaltluftentstehungsgebiete. Da in den Freilandbereichen selten Emittenten vorkommen und bei geeigneten Wetterlagen in den Nachtstunden Kaltluftmassen gebildet werden, können diese Bereiche eine hohe Ausgleichsfunktion für die humanbiometeorologisch und lufthygienisch belasteten bebauten Bereiche besitzen /20/ sowie generell als unbelastet gelten. Tags sind hier im Sommer aufgrund einer ungehinderten Sonneneinstrahlung sehr hohe PMV-Werte zu erwarten (> 4), während nachts die thermisch angenehmsten Bedingungen (PMV 0 bis 1) herrschen.

Im Stadtgebiet von Reutlingen sind die Stadtteile Gönningen und Bronnweiler sowie Ohmenhausen von ausgedehnten Freiflächen (Streuobst, landwirtschaftliche Nutzflächen) umgeben. Größere, für die Kernstadt von Reutlingen relevante Freiflächen befinden sich im unteren Talverlauf des Breitenbach, westlich des Sportbereichs Markwasen sowie im Bereich der Achalm und des Scheibengipfels. Weithin von Freiflächen umgeben sind die nördlich der Kernstadt gelegenen Stadtteile wie Orschel-Hagen, Rommelsbach, Mittelstadt, Sickenhausen, Altenburg, Degerschlacht, Oferdingen, Reicheneck.

Wald-Klimatop

Das Klima im Stammraum eines Waldes wird durch den Energieumsatz der Erdoberfläche im Waldbestand (verminderte Ein- und Ausstrahlung) bestimmt. Dichte und höher wachsende Baumvegetation führt zu gedämpften Tagesgängen von Lufttemperatur und -feuchte sowie zu niedrigen Windgeschwindigkeiten im Bestand. Das Kaltluftentstehungsgebiet befindet sich oberhalb des Kronenraums. Deshalb können (ausgedehnte) Waldgebiete auf geneigten Flächen hoch relevant für die Entstehung von Kaltluft/Frischlufte und deren Dynamik sein. Waldflächen erweisen sich aufgrund sehr geringer thermischer und human-biometeorologischer Belastungen als wertvolle Regenerations- und Erholungsräume. Darüber hinaus übernehmen Wälder bei geringen oder fehlenden Emissionen die Funktion als Frischluftentstehungsgebiete, können jedoch aufgrund der hohen Rauigkeit keine bzw. eine nur sehr eingeschränkte Luftleitfunktion übernehmen /20/. Am Tag dämpft das Kronendach der Bäume die sommerliche thermische Belastung (PMV 2 bis 3), während demgegenüber nachts die Ausstrahlung vermindert ist (PMV 1 bis 2).

Ausgedehnte Waldflächen finden sich im Stadtgebiet von Reutlingen insbesondere in den die Stadtteile Gönningen und Bronnweiler umgebenden Hanglagen, am Oberlauf des Breitenbachs (Wasenwald) sowie im Bereich zwischen Achalm und Bundesstraße B 28. Darüber hinaus sind nur vereinzelte kleinere Waldstücke vorhanden.

Grünanlagen-Klimatop

Die klimatischen Verhältnisse ausreichend großer (innerstädtischer) Park- und Grünanlagen sind zwischen denen von Freiland- und Waldklima einzustufen. Dabei variiert die klimatische Reichweite von Parkflächen in Abhängigkeit von der Größe und Form der Parkanlagen, deren Ausstattung sowie von der Anbindung an die Bebauung oder Durchlüftungsbahnen /20/.

Die Klimawirksamkeit von Grünflächen beschränkt sich je nach Größe, Relief und Rauigkeit auf die Fläche selbst (Mikroklimaeffekt), kann jedoch auch stadtklimatisch positive Fernwirkungen aufweisen bis zu mehreren hundert Metern je nach Größe der Fläche /32/ /33/.

Verschiedene Untersuchungen und Modellierungen haben gezeigt, dass mikroklimatische Kühlungseffekte in Abhängigkeit von der Verdunstungsleistung und Beschattung auch bei geringer Flächengröße nachweisbar sind /34/. Bei einer engen Vernetzung können auch kleinere Grünflächen zur Abmilderung von Wärmeinseln beitragen, z.B. indem sie den Luftaustausch fördern.

Die PMV-Werte an Sommertagen können z.T. deutlich unter denen der Umgebungsbebauung liegen.

Im Stadtgebiet von Reutlingen sind insbesondere der Volkspark bzw. die Pomologie, der Stadtpark mit Planie sowie der Friedhof unter den Linden hervorzuheben. Weitere größere Grünflächen befinden sich in Stadtrandlagen (meist Sportanlagen).

Vorstadt-Klimatop

Das Klimatop ist dem Übergangsbereich zwischen Freilandklima und dem Klima bebauter Flächen zuzuordnen und wird durch eine grün geprägte Flächennutzung und Oberflächenstruktur geformt. Es überwiegt der Einfluss des unbebauten Geländeanteils. Dieser Klimatotyp ist charakteristisch für Vorstadtsiedlungen, Gartenstädte oder Ortsränder, die darüber hinaus oft im unmittelbaren Einflussbereich des Freilands stehen und dadurch günstige bioklimatische Verhältnisse aufweisen. Das Klima in den Vorstadtsiedlungen zeichnet sich durch eine leichte Dämpfung der Tagesgänge der Klimaelemente Lufttemperatur, -feuchte, Wind und Strahlung aus. Die Windgeschwindigkeit ist niedriger als im Freiland, aber höher als in der Innenstadt /20/. Der Typus ist betroffen der thermischen Behaglichkeit von einer früher einsetzenden, nachhaltigeren Abkühlung als bspw. die Innenstadt gekennzeichnet.

Generell ist die Luftschadstoffbelastung in diesen Bereichen eher gering. Belastungen können im Wesentlichen durch Hausbrand (eher flächige Belastung) oder durchziehende Hauptverkehrsstraßen (lokal begrenzt) entstehen.

Im Stadtgebiet von Reutlingen sind weite Teile von Gönningen, Teile von Bronnweiler der Bereich unterhalb des Georgenbergs und des Scheibengipfels bzw. der Achalm, der östliche Stadtrand von Sondelfingen sowie weite Teile von Orschel-Hagen als Vorstadt-Klimatop klassifiziert.

Stadtrand-Klimatop

Das Stadtrandklima unterscheidet sich vom Vorstadtklima durch eine dichtere Bebauung und einen geringeren Grünflächenanteil. Dennoch handelt es sich um Bereiche mit einer lockeren Bebauung, einer relativ günstigen Durchgrünung sowie einer auch reliefbedingt verhältnismäßig günstigen Lage innerhalb des Stadtraumes. Hieraus resultiert eine nur schwächere Ausprägung der Überwärmung als im Stadtkern- bzw. Innenstadt-Klimatop, zumeist kann von einem ausreichenden Luftaustausch insbesondere bzgl. Kaltluft sowie eher günstigen bioklimatischen Bedingungen in diesen Gebieten ausgegangen werden /20/.

Generell ist die Luftschadstoffbelastung in diesen Bereichen eher gering. Belastungen können im Wesentlichen durch Hausbrand (eher flächige Belastung) oder durchziehende Hauptverkehrsstraßen (lokal begrenzt) entstehen.

Im Stadtgebiet von Reutlingen sind dichter bebaute, den Stadtkern umgebende Bereiche wie der Hohbuch, die Weststadt zwischen Ringelbach und der B 28 oder weite Bereiche von Betzingen nördlich der Echaz sowie Teile von Sondelfingen als Stadtrand-Klimatop kartiert.

Stadt-Klimatop

Charakteristisch für das Stadtklima sind eine überwiegend dichte, geschlossene Zeilen- und Blockbebauung mit überwiegend hohen Baukörpern und Straßenschluchten und/oder die räumliche Lage mit gewisser Entfernung zum besser durchlüfteten Stadtrand. Bedingt durch den höheren Versiegelungsgrad, die ausgeprägten Oberflächenrauigkeiten und geringeren Grünflächenanteile ist der Stadtkörper während austauscharmer Strahlungsnächte deutlich überwärmt. Tagsüber treten hohe strahlungsbeeinflusste Lufttemperaturen auf, die zu Hitze stress führen können. Die dichte städtische Bebauung verursacht ausgeprägte Wärmeinseln mit eingeschränkten Austauschbedingungen, die mit zeitweise ungünstigen humanbiometeorologischen Verhältnissen und erhöhter Luftbelastung verbunden sind und das Stadtklima prägen /20/.

Generell ist die Luftschadstoffbelastung in diesen Bereichen gering bis mäßig. Belastungen können im Wesentlichen durch Hausbrand (eher flächige Belastung) oder durchziehende Hauptverkehrsstraßen (lokal begrenzt) entstehen. Da durch die verhältnismäßig dichte Bebauung im Allgemeinen niedrigere Windgeschwindigkeiten zu erwarten sind wird der Abtransport von Schadstoffen zunehmend erschwert. Je nach lokaler Belastungssituation kann es in diesem Klimatop-Typ bereits zu thermischen bzw. lufthygienischen Spitzenbelastungen kommen.

Im Stadtgebiet von Reutlingen fallen innenstadtnahe Bereiche wie Teile des Bereichs Ringelbach, der Bereich der Oststadt und der Bereich zwischen Emil-Adolff-Straße und B 28 in das Stadt-Klimatop. Je nach räumlicher Lage wirken sich die Entfernung zum Stadtrand, die Lage im Relief oder die Bebauung bzw. der Versiegelungsgrad negativ aus.

Innenstadt-Klimatop

Kennzeichnend für das Innenstadtklima sind ein sehr hoher Versiegelungsgrad, hohe Oberflächenrauigkeit sowie ein geringer Grünflächenanteil, der lediglich durch Einzelbäume im Straßenraum sowie kleine Rasenflächen, zum Teil mit Strauchvegetation als Straßenbegleitgrün, charakterisiert ist. In dicht bebauten Bereichen kann starke Verschattung mildernd auf die Strahlungswärme wirken. Aufgrund dieser Eigenschaften weist das Innenstadtklima die stärksten mikroklimatischen Veränderungen gegenüber dem Ausgleichsraum im Stadtgebiet auf. Hierzu zählt vor allem der starke Wärmeinseleffekt, bedingt durch die Wärmespeicherfähigkeit der städtischen Oberflächen und die starken Windfeldveränderungen, die sich in den straßenparallelen Be- und Entlüftungssituationen widerspiegeln. Zusätzlich kann die Lage im Relief wie z.B. in Tiefenlagen mit umgebenden Randhöhen eine Durchlüftung bzw. nächtliche Abkühlung behindern. Das Innenstadtklima ist human-biometeorologisch sehr ungünstig /20/.

Auch aus lufthygienischer Sicht zählen die Innenstadtklimatope zu den am stärksten belasteten Bereichen, da sich hier mehrere Faktoren (z.B. dichte Bebauung und/oder z.T. hohe Verkehrsbelastung) addieren, so dass es lokal zu Extremen bzgl. lufthygienischer Belastung und /oder Wärmebelastung kommen kann.

Im Stadtgebiet von Reutlingen betrifft dieser Klimatop-Typ lediglich den Innenstadtkern zwischen Betzenriedstraße und Karlstraße bzw. zwischen Lederstraße/Am Echazufer und Bismarckstraße.

Gewerbe-/ Industrie-Klimatop

Gewerbebetriebe mit den dazugehörigen Produktions-, Lager- und Umschlagstätten prägen das Mikroklima. Bedingt durch den sehr hohen Versiegelungsgrad und großflächige teilweise hohe Gebäude in Kombination mit ggf. erhöhten Emissionen an Produktionsstätten kann es verstärkt zu lufthygienischen und human-bioklimatischen Belastungssituationen kommen /20/.

Auch aus lufthygienischer Sicht können Gewerbe- und Industrie-Klimatope zu den am stärksten belasteten Bereichen zählen, da sich hier mehrere Faktoren (z.B. hoher Versiegelungsgrad und/oder z.T. hohe Verkehrsbelastung, aber auch mögliche Emissionen durch ansässige Betriebe) addieren, so dass es lokal zu Extremen bzgl. lufthygienischer Belastung und /oder Wärmebelastung kommen kann.

Im Stadtgebiet von Reutlingen ist die Signatur insbesondere im Bereich Reutlingen West, beiderseits der Steinachstraße/Tübinger Straße in Betzingen, nordöstlich der Emil-Adolff-Straße sowie im Industrie-/Gewerbegebiet „In Laisen“ vergeben. Außerhalb der Kernstadt finden sich Industrie-/Gewerbegebiete geringerer Größe an Ortsrändern. Industrie und Gewerbe jedoch nur untergeordnet zur Luftschadstoffbelastung der lufthygienisch relevanten Schadstoffe Stickoxide und Feinstaub PM 10 bei. Teilweise gelten in diesen Bereichen Verwendungsverbote für feste und/oder flüssige Brennstoffe sowie Fernwärmesetzungen.

Kaltluftphänomene

Kaltluftabfluss (Hangabwinde) unbelastet / belastet



Der Kaltluftabfluss ist ein thermisches, während der Nacht induziertes Windsystem (Hangabwind); dabei fließt die am Hang bodennah erzeugte Kaltluft ab. Die bodennahen Kaltluftabflüsse werden durch Temperatur- und Dichteunterschiede initiiert.

Neben der Stärke des Abflusses ist es entscheidend, ob durch die Kaltluft unbelastete (= Frischluft) oder belastete Luftmassen herabtransportiert werden. Hangabwinde sind wesentlich für die Abkühlung und Belüftung von Stadtrandbereichen und kleineren Siedlungen insbesondere zu Beginn der Nacht verantwortlich. Grundlage der Ausweisung von Hangabwinden im Rahmen dieser Untersuchung bildet die Kaltluftmodellierung mit KLAM_21 für die Anfangsphase des Kaltluftabflusses (siehe auch Kapitel 4.1). Bereiche mit flächenhafter Ausprägung von Hangwinden werden gekennzeichnet, wenn Strömungsgeschwindigkeiten von mindestens 0,3 m/s (entspricht 1 Beaufort) auftreten. Ab dieser Geschwindigkeit sind Windbewegungen messtechnisch erfassbar und für den Menschen spürbar.

Im Stadtgebiet von Reutlingen sind für die Kernstadt wirksame Hangabwinde insbesondere am Georgenberg, dem Scheibengipfel sowie an den Hängen der Achalm modelltechnisch ermittelt worden. Diese sind generell nahezu frei von Luftverunreinigungen.

Kaltluftstrom (Bergwindssystem) unbelastet / belastet



Die von den Hängen fließende Kaltluft sammelt sich im weiteren Nachtverlauf in Tälern und Geländeeinschnitten. Bei ausreichender Neigung und geringer Rauigkeit der Talsohle bilden sich ab einer bestimmten vertikalen Mächtigkeit der Kaltluft Kaltluftströme (auch Talabwinde genannt) heraus, die bei austauscharmen, windschwachen Wetterlagen Frisch- bzw. Kaltluft von Ausgleichsraum bis weit in den Wirkraum hinein transportieren können.

In die Klimaanalysekarte sind die klimatisch relevanten Kaltluftströme eingezeichnet. Grundlage der Ausweisung von Bergwindssystemen bildet die Kaltluftmodellierung mit KLAM_21 für die Hochphase des Kaltluftabflusses (siehe auch Kapitel 4.1). Explizit berücksichtigt wurden Kaltluftvolumenstromdichten $> 30 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

Dichte Bebauung, wie sie in den Kern- bzw. Innenstadtbereichen von Reutlingen, aber auch in den Kaltluftproduktionsgebieten (insbes. Echaztal) anzutreffen ist, bewirkt eine teilweise Erwärmung und/oder lufthygienische Belastung der diesen Gebieten zufließenden Kaltluftmassen. Durch Erwärmung und erhöhte Rauigkeit werden diese Kaltluftströme vom Boden abgehoben und können sogar aufgelöst und somit stromabwärts nicht mehr wirksam werden.

Kaltluftproduktionsgebiete

Wesentliche Kaltluftproduktionsgebiete zeichnen sich durch eine hohe Kalt- und Frischluftproduktion aufgrund der negativen nächtlichen Energiebilanz und einem mehr oder minder direkten Siedlungsbezug aus. Darüber hinaus sind diese Flächen meist durch eine geringe Rauigkeit in Verbindung mit einer gewissen Hangneigung gekennzeichnet. An den Oberhängen wird generell die ganze Nacht über Kaltluft produziert und fließt von dort ab. An Unterhängen oder

Talbereichen kommt das System aufgrund der Auffüllung tiefer liegender Bereiche oder aufgrund von Rückstau von Kaltluft meist im Verlauf der Nacht zum Erliegen.

Wichtige Beispiele für solche Gebiete sind im Stadtgebiet von Reutlingen das Breitenbachtal, der Bereich Scheibengipfel/Achalm, die Freiflächen um Gönningen und Bronnweiler sowie weite Teile der ausgedehnten Freiflächen zwischen den nördlichen Ortsteilen.

Wesentliche Gebiete außerhalb des Stadtbereichs von Reutlingen (nicht in der Klimaanalysekarte dargestellt) betreffen insbesondere das Arbachtal mit seinen Seitentälern sowie leicht untergeordnet das Echaztal, ebenfalls mit Seitentälern (insbesondere Eierbachtal).

Kaltluftsee

Kaltluftseen bezeichnen größere, räumlich zusammenhängende Gebiete, in denen sich die Kaltluft sammelt bzw. staut. Dort bestehen u. a. erhöhte Nachtfrostgefahr sowie eine verstärkte Neigung zu Dunst- und Nebelbildung.

Gründe für die Bildung von Kaltluftseen sind relief- oder Rauigkeitsbedingt wie z.B.

1. Topographische Tiefenlage ohne wesentlichen Abfluss
2. Übergang eines Hang- oder Bergwindsystems in einen Bereich größerer Rauigkeit
3. Größere Kaltluftlieferung als Kaltluftabfluss
4. Rückstau aus gefüllten Talbereichen

Sofern Hindernisse oder erhöhte Rauigkeit der Grund für die Bildung von Kaltluftseen sind, können diese Hindernisse mit zunehmender Mächtigkeit der Kaltluft überströmt werden. Auch ist es möglich, dass Kaltluftseen als Hindernisse wirken und randlich umströmt werden.

Wesentliche Kaltluftseen, welche sich im Stadtgebiet von Reutlingen im Verlauf der Nacht herausbilden, sind z.B. der Bereich des unteren Breitenbachtals im Übergang zum Echaztal Richtung Wannweil, das Neckartal im Norden des Stadtgebietes sowie die Einmündungen der Seitentäler des Neckars sowie einzelne Bereiche im oberen Wiesaztal.

Wesentliche Gebiete außerhalb des Stadtbereichs von Reutlingen (nicht in der Karte dargestellt) betreffen, wie bei den Kaltluftproduktionsgebieten, insbesondere das Arbachtal mit seinen Seitentälern sowie leicht untergeordnet das Echaztal, ebenfalls mit Seitentälern (insbesondere Eierbachtal).

Kaltluft-Eindringtiefe

Die Kaltluft-Eindringtiefe ist die Strecke bzw. der Bereich, ab der die in die Bebauung einfließende Kaltluft durch eine merkliche Luftbewegung (Untergrenze $> 0,3 \text{ m/s} = 1 \text{ Beaufort}$) gegenüber der „stehenden“ Luft innerhalb des Siedlungsbereichs erkennbar ist. Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebautes Gebiet hängt somit wesentlich ab von der Bebauungsausdehnung und -dichte, der Überwärmung des Siedlungsbereichs sowie dem Vorhandensein von Straßenzügen oder vergleichbaren Nutzungen geringer Rauigkeit, die Leitbahnfunktionen übernehmen können.

Eine bestimmte Eindringtiefe weist auf ein damit zusammenhängendes Hangwindssystem im siedlungsnahen Bereich hin. Wenn Hangwinde in die Siedlungskörper eindringen, führen sie zu einer Reduktion der Wärmebelastung in den frühen Abendstunden aber auch – durch Verdrängung vorhandener Luft – zu lufthygienischer Entlastung .

Grundlage der Ausweisung von Hangabwinden bildet die Kaltluftmodellierung mit KLAM_21 für die Anfangsphase des Kaltluftabflusses (siehe auch Kapitel 4.1).

Herausragende Beispiele im Stadtgebiet von Reutlingen sind der Bereich unterhalb des Georgenberges sowie der Bereich unterhalb des Scheibengipfels, wo an den Hängen produzierte Kaltluft bis weit in den Stadtbereich hinein für merkliche Luftbewegungen sorgt. Hier unterstützt bspw. auch die Länge und Orientierung der Planie für ein tieferes Eindringen der Kaltluft in den frühen Abendstunden. Ein weiteres Beispiel sind weite Teile von Sondelfingen, welche aus dem Bereich des Burgholz gespeist werden.

Luftleitbahn (Regionalwind) unbelastete / belastet



Eine Luftleitbahn ist eine durch Ausrichtung, Oberflächenbeschaffenheit und Breite bevorzugte Fläche für den bodennahen Luftmassentransport.

Luftleitbahnen, auch als Ventilations- oder Durchlüftungsbahn bezeichnet, sind durch geringe Rauigkeit (keine hohen Gebäude, nur einzeln stehende Bäume), möglichst geradlinige oder nur leicht gekrümmte Ausrichtung und größere Breite (möglichst in einem Längen-Breiten-Verhältnis von $> 20 : 1$ /35/) gekennzeichnet. Die Ausrichtung einer Luftleitbahn sollte in etwa derjenigen der Hauptanströmungsrichtungen entsprechen.

Luftleitbahnen ermöglichen den Luftmassenaustausch zwischen Umland und Stadt. Die Wirksamkeit hängt von der Windverteilung ab. Ferner können Luftleitbahnen vor allem bei Schwachwindlagen von großer Bedeutung für die klimatische Entlastung innerstädtischer Gebiete sein. Das Relief kann die Funktion als Luftleitbahn unterstützen. Effiziente Luftleitbahnen werden z.B. durch breite Flussauen gebildet. Breite, geradlinige Straßen oder Bahnanlagen können Luftleitbahnen darstellen. Luftleitbahnen können je nach Nutzung und Emissionen lufthygienisch beeinträchtigt sein.

In der Kernstadt von Reutlingen sind generell keine unbelasteten Luftleitbahnen zu verzeichnen. Auch in das Stadtgebiet hineinreichende, unbelastete Luftleitbahnen, abseits von Kaltluftleitbahnen, fehlen. Größere zusammenhängende, wenig raue Grünflächen, welche als Luftleitbahn dienen könnten sind nicht vorhanden. Als Luftleitbahnen in der Kernstadt von Reutlingen sind insbesondere Straßenzüge (Lederstraße, Bismarckstraße, Karlstraße) oder das Gleisfeld im Bereich zwischen Hauptbahnhof und Industrie- bzw. Gewerbegebiet „In Laisen“ hervorzuheben.

Lufthygiene

Der Straßenverkehr stellt in Reutlingen die Hauptquelle für Luftschadstoffemissionen und -immissionen dar. Durch eine Flächensignatur unterschiedlicher Farbe und Dichte werden die Belastungen durch Verkehrsemissionen kartographisch dargestellt. Es wird dabei zwischen drei

Belastungsstufen unterschieden (s.u.). Als Maß für die Belastung dienen die Berechnungen zu den NO₂-Immissionen aus dem Basisfall des Wirkgutachtens zur 3. Fortschreibung des Luftreinhalteplans Reutlingen /36/.

- a) Straßen mit überhöhter NO₂-Belastung: 
Straßen mit Immissionswerten im Nahbereich von > 40 µg/m³
- b) Straße mit hoher NO₂-Belastung: 
Straßen mit Immissionswerten im Nahbereich von > 30 - < 40 µg/m³
- c) Straße mit erhöhter NO₂-Belastung: 
Straßen mit Immissionswerten im Nahbereich von 20 - < 30 µg/m³

Die angegebene Signatur dokumentiert entsprechend in Anlehnung an VDI 3787 Blatt 1 aufgrund hoher Verkehrsbelastung und dadurch hoher Schadstoffemissionen entstehende hohe Schadstoff- und Lärmbelastungen. Um die betroffenen Straßen wurde ein Puffer von 40 m gelegt, um die Belastung direkt angrenzender Nutzungen zu würdigen. Der Grenzwert für NO₂-Immissionen im Jahresmittel beträgt nach 39. BImSchV/ TA Luft 40 µg/m³.

Klimatopausweisung

Die Klimatope wurden nicht aus den vorliegenden Grundlegendaten automatisch berechnet, sondern entsprechend der Einschätzung des Fachgutachters (unter Zuhilfenahme aller zur Verfügung stehenden Informationen, siehe Kapitel 2.3) zugewiesen.

Die Zuordnung erfolgte unter Beachtung u. a. aufgrund der

- der Bebauungsdichte und -höhe,
- der Abschätzung des Versiegelungsgrades,
- der Struktur der Bebauung (Einzelgebäude, Reihenhausbauung, Blockbauung),
- der Art und Dichte der vorhandenen Vegetation bzw. Ausgleichsraumnutzung,
- der Lage im Relief,
- der Lage des betrachteten Bereiches in Bezug auf das Stadtgebiet,
- der Lage des betrachteten Bereiches in Bezug auf die mit KLAM_21 berechneten Kaltluftverhältnisse,
- der Ergebnisse der Berechnungen mit ENVI-Met in Teilen des Stadtgebietes sowie
- der Immissionsbelastung.

6.3 Zusammenfassende Erläuterungen zur Klimaanalysekarte

Klimatope

Kernstadt

Die Kernstadt von Reutlingen im Zentrum des Stadtgebietes ist von städtischen Klimatopen (Wohnen, Gewerbe, Industrie) geprägt. Je nach Belastung sind die einzelnen Bereiche der Stadt nach Vorstadt-Klimatop, Stadtrand-Klimatop, Stadt-Klimatop und Innenstadt-Klimatop ausdifferenziert.

Das Vorstadt-Klimatop findet sich insbesondere an den Hängen des Georgenberges des Scheibengipfels bzw. der Achalm, am südlichen Ortsrand von Betzingen Richtung Breitenbachtal sowie am Ortsrand von Sondelfingen Richtung Metzingen. In diesen Bereichen wirken sich die Gunst der Siedlungsrandlage mit der Nähe zu kalt- bzw. frischluftliefernden Bereichen sowie die lockere durchgrünte Siedlungsstruktur positiv auf den thermischen Tagesgang aus. In diesen Bereichen dringt zusätzlich Kaltluft in geringen Höhen teilweise mehrere 100 m in den Siedlungsraum ein. Ähnliches gilt für viele Teilbereiche der Stadtteile wie bspw. Gönningen, Bronnweiler und Orschel-Hagen. In ersteren wirkt sich die Höhenlage relativ zum übrigen Stadtgebiet zusätzlich positiv aus.

In den Wohngebieten Hohbuch, Lerchenbuckel und Ringelbach sind Stadtrand- bzw. Stadt-Klimatop-Signaturen vergeben. Hier wirken sich die dichtere Bebauung (Hohbuch, Schafstall) sowie die zunehmende Entfernung zum Siedlungsrand (Ringelbach mit zunehmender Innenstadtnähe) tendenziell negativ aus. Insbesondere im Bereich Lerchenbuckel ist keine zuströmende Kaltluft zu verzeichnen. Gleichwohl wirkt sich die Lage im Relief auf die Anströmbarkeit bei allochthonen, d.h. durch großräumige Luftdruckunterschiede geprägte, Wetterlagen positiv aus. Der Bereich der Gustav-Schwab-Straße kann bei Kaltluftabflüssen als Leitbahn für Kaltluftströme in Richtung Betzingen wirken. In ausgeprägten Kaltluftnächten sind dort ein Rückstau und die Bildung eines Kaltluftsees möglich.

Im Bereich Ringelbach/Katzensteg wirkt sich trotz der relativ dichten Bebauung die Siedlungsrandlage durch den Anschluss an Kaltluftliefergebiete wie Gaisbühl, Markwasen und Georgenberg positiv aus, so dass Kaltluft relativ weit in den Siedlungskörper eindringen kann.

Die höchsten thermischen und lufthygienischen Belastungen treten in der Innenstadt auf, weswegen der Bereich zwischen Betzenriedstraße und Karlstraße bzw. zwischen Lederstraße/Am Echazufer und Bismarckstraße dem Innenstadt-Klimatop zugeordnet ist. Hier wirken sich eine hohe Verkehrsbelastung, die dichte Bebauung, der z.T. sehr hohe Versiegelungsgrad, eine verhältnismäßig schlechte Durchlüftung, die Entfernung zu Bereichen mit Hangabwinden, das Fehlen unbelasteter Durchlüftungsbahnen und die allgemein ungünstige Tiefenlage im Relief negativ aus, so dass ein ausgeprägter Wärmeinseleffekt auftritt und erhebliche lufthygienische Belastungen auftreten können.

Auch wenn die Bebauung in den Innenstadtklimatopen im Wesentlichen von dem Kaltluftstrom aus dem Arbach- bzw. Echaztal nur überströmt wird, profitiert sie von dem - bei ausgeprägten Strahlungswetterlagen - ca. 1 - 3 Stunden nach Sonnenuntergang einsetzenden mächtigen Kaltluftstrom, der die städtische Bebauung überstreicht und durch vertikale Durchmischung in der bodennahen Reibungsschicht für Abkühlung sorgt. Bei mehreren Tagen andauernden austauscharmen Wetterlagen – wie z.B. im Spätwinter – kann der Effekt der vertikalen

Durchmischung jedoch ausbleiben, so dass eine Anreicherung von Luftschadstoffen die Folge sein kann.

Dabei ist der Teilstrom aus dem Echaztal wegen talaufwärts liegender Siedlungs- und Verkehrsbereiche bereits lufthygienisch vorbelastet (siehe Kapitel 5.1), verbessert jedoch aufgrund der Durchlüftung die Ausbreitungsbedingungen für bodennah emittierte Luftschadstoffe in der Innenstadt. Bei mehrere Tage andauernden Hochdrucklagen im Winter ist diese Funktion jedoch stark eingeschränkt. Der Teilstrom aus dem Arbachtal kann dagegen als lufthygienisch und thermisch gering belastet gelten. Insgesamt ist der Kaltluftstrom aus dem Arbach bzw. Echaztal für Klima und Lufthygiene in weiten Teilen der Kernstadt von Reutlingen von überragender Bedeutung und muss unbedingt erhalten bleiben. Beeinträchtigungen im Zu- und Abstrom sind zu vermeiden.

Die Belastung des Innenstadtraumes drückt sich in verhältnismäßig hohen Lufttemperaturen (siehe Kapitel 3), sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten und einer außerordentlich hohen Schadstoffbelastung, wie an der LUBW-Station „Lederstraße“ am Rand des Klimatops ersichtlich, aus. Der östliche Teil der Innenstadt (etwa ab der Bismarckstraße) profitiert den thermischen Ausgleich betreffend von der Nähe zu den Hängen des Scheibengipfels und der Achalm. Über entsprechend orientierte Straßenzüge (z.B. Burgstraße) oder Grünanlagen (z.B. Stadtpark und Planie) kann Kalt- bzw. Frischluft verhältnismäßig weit in den Siedlungsraum eindringen.

Nördlich der Bundesstraße B 28 schließen sich großflächig Industrie- bzw. Gewerbe-Klimatope an den Innenstadtbereich an (Voller Brunnen, In Laisen, Tübinger Straße). Hier bildet sich – wie auch im Innenstadt-Klimatop – ein ausgeprägter Wärmeinseleffekt aufgrund flächendeckender Bebauung bzw. eines sehr hohen Versiegelungsgrades aus, der erst spät in der Nacht abgebaut werden kann (insb. In Laisen, siehe z.B. auch Kap. 4.3.2). Insbesondere im östlichen Bereich des Industrie- und Gewerbegebietes „In Laisen“ wirkt ein Kaltluft-Teilstrom aus dem Bereich „Burgholz“ in die Bebauung hinein (der andere Teil dieses Kaltluftstromes wirkt in die Wohnbereiche von Sondelfingen). Aufgrund fehlender Wohnbebauung im Bereich „In Laisen“ ist jedoch die Belastung nur eingeschränkt immissionsseitig wirksam.

Der südliche Teil von „In Laisen“ sowie der Bereich „Voller Brunnen“ mit Möbel- und Baumärkten sind ebenfalls thermisch belastet und besitzen keinen direkten Anschluss an flache, in die Bebauung hineinreichende Kaltluftströme. Das zwischen den Bereichen liegende Gleisfeld der Bahn wirkt jedoch durch seine große Breite und die Ausrichtung in etwa parallel zu den Hauptwindrichtungen als Durchlüftungsbahn sowie Kaltluftleitbahn für Kaltluft aus dem Bereich „Storlach“.

Im Bereich „Tübinger Straße“ wirkt sich bereits der Kaltluftstrom aus dem Breitenbachtal mildernd auf die thermischen Verhältnisse aus. Zusätzlich liegt dieser Bereich bereits früh in der Nacht im Rückstaubereich der in Richtung Neckartal abfließenden Kaltluft aus dem Breitenbachtal. Die geringe Durchlüftung ist dann mit ungünstigen Ausbreitungsbedingungen für bodennahe Luftschadstoffemissionen verbunden. Im Winter sind vermehrt Nebel- und Inversionslagen möglich.

Die Wohngebiete nördlich der Industrie- und Gewerbegebiete in Betzingen und Sondelfingen, in den Bereichen „Römerschanze“, „Storlach“ und „Voller Brunnen“ sind je nach Dichte der Bebauung, Versiegelungsgrad und Anschluss an Kaltluftabflüsse aus dem Freiland-Klimatop dem Stadt- bzw. dem Stadtrand-Klimatop zugeordnet.

Stadtteile (ohne Kernstadt)

In den nicht an die Kernstadt angeschlossenen Stadtteilen sind vorwiegend Vorstadt- bzw. Stadtrand-Klimatope – in dichter bebauten Ortskernen auch kleinflächig Stadt-Klimatope – als Einheiten vergeben. Hier wirken sich insbesondere Dichte der Bebauung, Lage relativ zu Kaltluftströmen und Durchlüftungsbahnen sowie die generelle Lage im Relief aus.

Gönningen profitiert bei sommerlichen Wärmebelastung z.B. stark von der Höhenlage und zufließender Kaltluft, während Stadtteile wie Oferdingen – relativ gesehen – eine stärkere Wärmebelastung zu verzeichnen haben und z.T. nur randlich an die neckarwärts gerichteten Kaltluftströme angeschlossen sind.

Kaltluftströme und -entstehungsgebiete

Wichtige größtenteils unbelastete Kaltluftströme (Bergwindssysteme) im Stadtgebiet von Reutlingen sind (jeweils mit Wirkraum):

- „Wiesaztäl Windsystem“ (Gönningen, Bronnweiler)
- „Breitenbachtäl Windsystem“ (Betzingen südl. Heppstraße)
- „Reichenbachtäl Windsystem“ (Oferdingen randlich)
- „Arbachtäl Windsystem“ (Innenstadt/Oststadt, Betzenried)
- „Windsystem Oberes Reichenbachtal/Burgholz“ (In Laisen/Sondelfingen)

Wichtige z.T. belastete Kaltluftströme (Bergwindssysteme) im Stadtgebiet von Reutlingen sind (jeweils mit Wirkraum):

- „Echaztäl Windsystem“ (Innenstadt-West/östl. Ringelbach)
- „Windsystem Storlach“ Richtung Hauptbahnhof (Hauptbahnhof)

Wichtige Kaltluftentstehungsgebiete größtenteils mit Wirkraumbezug sind:

- Breitenbachtal
- Scheibengipfel/Achalm
- Wiesaztal
- Georgenberg
- Orscheläcker
- Lange Äcker zwischen Degerschlacht und Betzingen
- Freiflächen zwischen den Stadtteilen nördlich der Kernstadt

Windrosen

Zusätzlich sind in der Klimaanalysekarte synthetische Windrosen der LUBW an verschiedenen Standorten im Stadtgebiet (von Süd nach Nord: Roßberg, Ohmenhausen, Innenstadt, Altenburg) dargestellt, um die Windverhältnisse im Jahresmittel zu charakterisieren.

Lufthygiene NO₂ (Verkehrsbelastete Straßen)

In der Klimaanalysekarte sind des Weiteren Straßen mit hohen, sehr hohen und extremen Verkehrsbelastungen verzeichnet. In deren Nahbereich ist mit erhöhten Schadstoffbelastungen zu rechnen, besonders wenn die dortigen Austauschbedingungen durch Randbebauung und Vegetation zusätzlich herabgesetzt sind (insb. Lederstraße und Karlstraße) oder im Rahmen von Planungen herabgesetzt werden könnten. Außerdem muss an Tunnelportalen mit erhöhten Schadstoffbelastungen gerechnet werden. Diese wurden in der Klimaanalysekarte daher separat mit dem Symbol „Tunnelportal“ gekennzeichnet.

7 Klimatologische Planungshinweiskarte

7.1 Grundlagen

Während die Klimaanalysekarte eine Bestandsaufnahme der stadtklimatischen Gegebenheiten für den Istzustand darstellt und durch eine Vielzahl zu berücksichtigender Einzelinformationen gekennzeichnet ist, soll die Planungshinweiskarte die Bauleit- und Stadtplanung, die Grün- und gewässerökologische (Entwicklungs-)Planung sowie die Verkehrs- und Luftreinhalteplanung aus klimaökologischer Sicht unterstützen.

Grundlage der Kategorien der Planungshinweiskarte sind die Ausweisungen der Klimaanalysekarte (Kapitel 6), die Ergebnisse der Kaltluftsimulationen (Kapitel 5), der mikroklimatischen Simulationen zu den Tagesgängen (PMV und Temperatur) (Kapitel 5.2) und die topografischen Gegebenheiten (Höhe, Exposition) sowie die Landnutzung (Kapitel 2.3).

Die Planungshinweise unter klimatisch-lufthygienischen Gesichtspunkten wurden für das gesamte Stadtgebiet von Reutlingen erarbeitet. Ebenso wie für die Klimaanalysekarte wurde die Karte als sog. „Inselkarte“ erstellt, so dass für Bereiche außerhalb der Stadtgrenzen keine Planungshinweise dargestellt werden.

Die Ausweisung der Klimatope und der Kaltluft- sowie die der Durchlüftungsverhältnisse wurden unter fachlichen Gesichtspunkten bewertet, um die zusammengestellten klimatisch-lufthygienischen Informationen unterschiedlicher Raumtiefe und Qualität auf die Fläche des Stadtgebietes zu übertragen.

Ebenso wie für die Klimaanalysekarte orientieren sich Legendeneinheiten und Darstellungen der klimatologischen Planungshinweiskarte an den Hinweisen der VDI 3787, Blatt 1 /20/.

Die Erstellung einer klimatischen Planungshinweiskarte basiert auf den Ausweisungen der Klimaanalysekarte, um aus der Klimaanalyse die entsprechenden Planungshinweise abzuleiten, die ohne Expertenwissen zu lokalklimatischen Funktionsabläufen verwendet werden können. Die flächenhaften Ausweisungen der relativ einfach gehaltenen Einteilung der Hinweise für die Planung werden durch die entsprechenden Inhalte in der Klimaanalysekarte näher erläutert. Dadurch entstehen in der „Übersetzung“ der Klimaanalysekarte in die Planungshinweiskarte gewisse Gesetzmäßigkeiten (s.u.). Die Umsetzung sieht flächenhafte Ausweisungen in vier Stufen für Siedlungsflächen und drei Stufen für Freiflächen vor /20/.

Die bewertenden Stufen beinhalten Hinweise bezüglich der klimatischen Empfindlichkeit gegenüber nutzungsändernden Eingriffen oder Bebauungsänderungen. Für Flächenausweisungen mit hohen Schutzfunktionen sind bei Überplanungen gutachterliche, fachliche Begleitungen sinnvoll.

Generell gilt für die Planungshinweiskarte nach VDI 3787 Blatt 1 /20/:

- *Planungshinweiskarten dienen vor allem dem Schutz und der Vorsorge zum Erhalt gesunder Lebens- und Arbeitsverhältnisse (u.a. § 1 BauGB /16/) für die ansässige Bevölkerung. Das schließt die Sicherung bestehender günstiger lokalklimatischer und lufthygienischer Verhältnisse ebenso ein wie im Bedarfsfall die Verbesserung etwaiger Belastungssituationen oder die Optimierung von Planungen.*
- *Vegetationsflächen haben eine bedeutende positive Wirkung auf das Lokalklima und die Luftreinhaltung, da sie einerseits die nächtliche Frisch- und Kaltluftproduktion*

verursachen und andererseits bei hohem Baumanteil tagsüber thermisch ausgleichend wirken sowie Schadstoffe filtern bzw. binden können. Innerstädtische und siedlungsnaher Grünflächen können die direkte Umgebung in mikroklimatischer Sicht positiv beeinflussen. Zudem fördern Vegetationsflächen am Siedlungsrand auch den Luftaustausch. Größere zusammenhängende Vegetationsflächen stellen das klimatisch-lufthygienische Regenerationspotenzial dar; insbesondere bei direktem Bezug zum Siedlungsraum sind sie für den Luftaustausch sehr wichtig. Deshalb sollten die Freiflächen aus klimatischer Sicht für bauliche Nutzungen nicht verwendet werden.

- *Freiflächen sind möglichst zu erhalten. Im Fall einer Inanspruchnahme für bauliche Zwecke richtet sich die Möglichkeit einer Umnutzung nach der klimatischen und lufthygienischen Bedeutung der Flächen im Hinblick auf Entlastungs- und Ausgleichsleistungen für angrenzende Siedlungsgebiete. (Im Einzelfall können auch naturschutzfachliche Gesichtspunkte bedeutsam sein, etwa zum Erhalt von Arten mit speziellen Klimaanforderungen.)*
- *Tallagen sollen nicht verbaut werden, da dort einerseits bei Schwachwind der Kalt- und Frischlufttransport stattfindet und sie andererseits als Luftleitbahnen für regionale Winde dienen (können). Damit wird auch die Durchlüftung im Sinne der Luftreinhaltung und der Austausch schadstoffbelasteter Luft gefördert.*
- *Hanglagen in ausgedehnt besiedelten Gebieten, insbesondere wenn in den Talzonen Bebauung existiert, sollen unbebaut bleiben, da dort ein intensiver Kalt- und Frischlufttransport stattfindet. Dasselbe gilt für Schneisen und Klingen innerhalb der Hänge. Sattellagen in bebauten Berggrüben dienen als Luftleitbahnen und sollten aus Behaglichkeits- und aus lufthygienischen Gründen nicht dicht bebaut werden.*
- *Aus klimatischer Sicht empfehlen sich eine Umrandung der Siedlungen mit möglichst weiträumigen Grünzonen sowie ein Durchziehen der Siedlungen mit der Orografie folgenden Grünzügen (Belüftungsschneisen, Luftleitbahnen), um damit den Luftaustausch zu fördern. Einer Zersiedelung der Landschaft durch zahlreiche Streusiedlungen ist entgegenzuwirken. Bei Städten ist auf entsprechend große, nahe gelegene Frisch- und Kaltluftproduktionsgebiete und Belüftungsbahnen zu achten.*

Die Kartierung flächenhafter Planungsempfehlungen stützt sich generell auf entsprechende Darstellungen der Klimaanalysekarte, die einer klassifizierenden Bewertung (insbesondere Bezug zwischen klimaökologischen bzw. lufthygienischem Ausgleichs- und Wirkungsraum) unterzogen wurden. Damit stellen die Planungsempfehlungen generell keine parzellenscharfen Aussagen dar, sondern beinhalten, ebenso wie die Darstellungen der Klimaanalysekarte, Toleranzen bis zu wenigen 100 m. Wie oben angedeutet, bedeutet die Größe des Untersuchungsgebietes bzw. der Maßstab der Untersuchung, dass Detailfragen im Zusammenhang mit Planungsprozessen gegebenenfalls durch gesonderte Fachgutachten oder fachgutachtliche Einschätzungen geklärt werden sollten.

Die folgende Abbildung 55 sowie Abbildung 56 zeigen die generellen Ablaufschemata für die Ableitung der Einheiten der Planungshinweiskarte aus den Informationen der Klimaanalysekarte.

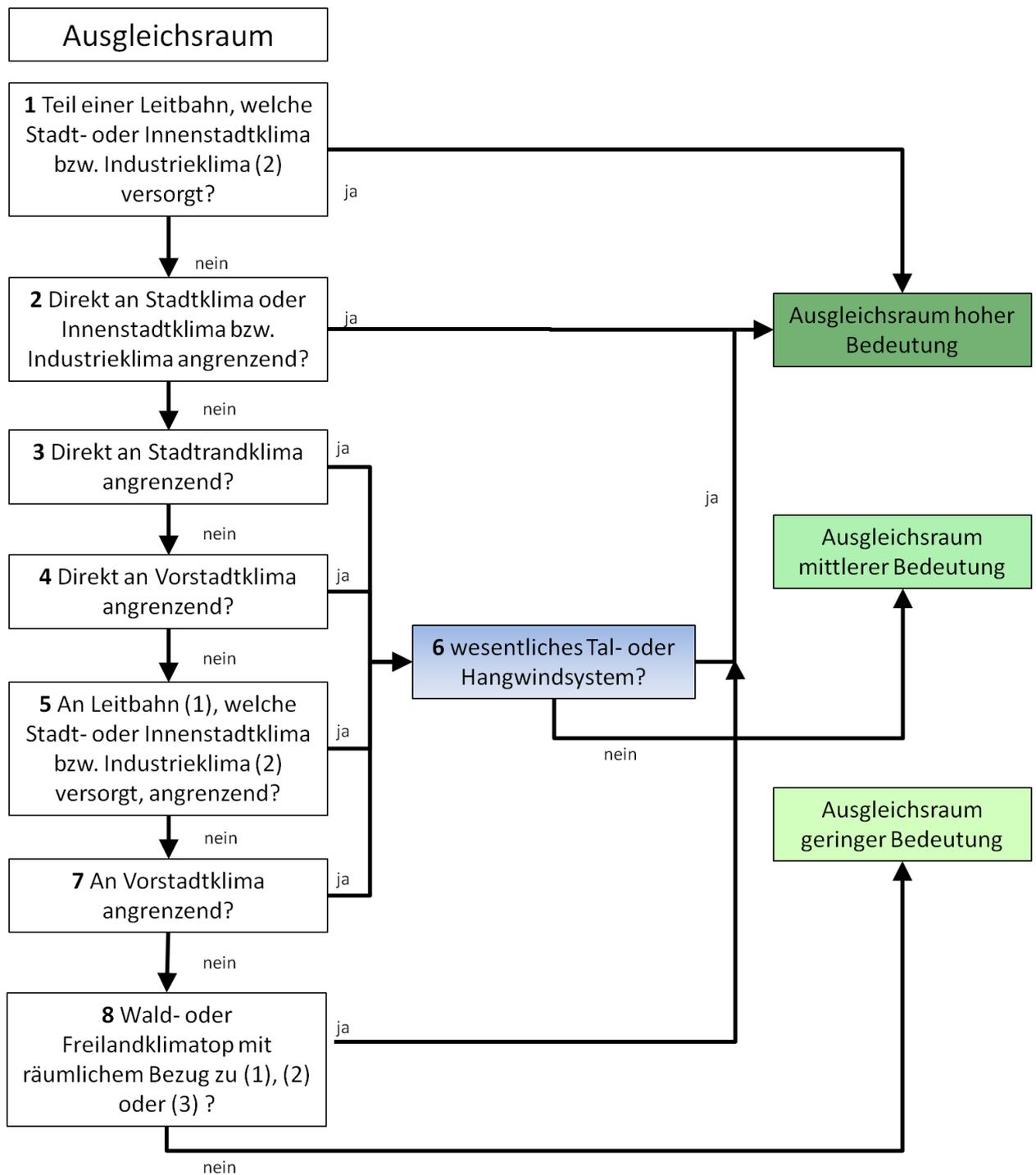


Abbildung 55: Schema Ausgleichsraum

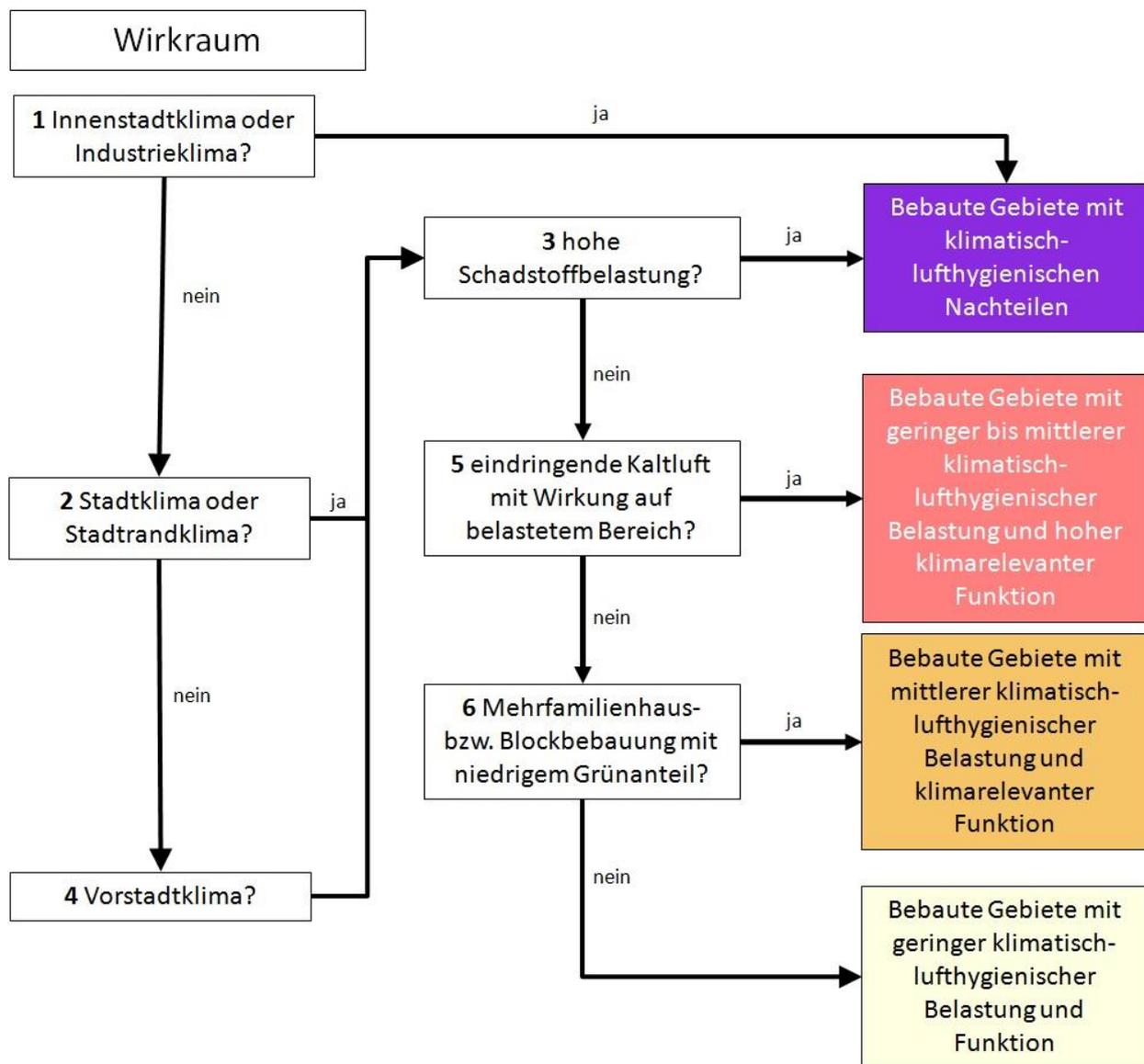


Abbildung 56: Schema Wirkraum

7.2 Legendeneinheiten

Klimatisch-lufthygienische Bedeutung der Ausgleichsräume (Ausgleichsraum)

Ausgleichsraum hoher klimatisch-lufthygienischer Bedeutung

Dies sind vor allem klimaaktive Freiflächen mit direktem Bezug zum Siedlungsraum wie z.B. innerstädtische und siedlungsnaher Grünflächen oder solche, die in Hanglage zu Siedlungsbereichen orientiert oder im Einzugsgebiet eines Bergwindsystems liegen.

Unbebaute bzw. unbewaldete Täler, Klingen und Geländeeinschnitte, in denen Kaltluftabfluss auftritt, zählen ebenfalls dazu und sind mit hohen Restriktionen gegenüber Bebauung und Nutzungsänderungen belegt.

Zusätzlich können – je nach räumlichem Zusammengang – große zusammenhängende Freiflächen (inkl. Waldflächen) im Umfeld des Wirk- bzw. Belastungsraumes aus klimatisch-lufthygienischen Gründen von großer Bedeutung sein. Die als Freiflächen mit hoher Klimaaktivität deklarierten Flächen fungieren als Kalt- bzw. Frischluftentstehungsgebiete und dienen als Erholungsraum für belastete Siedlungen.

Auch innerstädtische Grün- bzw. Freiflächen unterschiedlicher Art werden vollständig dieser Kategorie zugeordnet. Diese Flächen sind mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber nutzungsändernden Eingriffen bewertet; d. h. bauliche und zur Versiegelung beitragende Nutzungen können zu bedenklichen klimatischen Beeinträchtigungen führen. Dasselbe gilt für Maßnahmen, die den Luftaustausch behindern, wie z.B. dichte Aufforstung oder Bebauung in Bereichen mit wichtigen lokalen Luftströmungen.

Für eine möglichst geringe Beeinträchtigung des Lokalklimas sowie aus Gründen der Lufthygiene sind in diesen Bereichen die Erhaltung von zusammenhängenden Grünflächen und Grünzügen, die generelle Schaffung von Dach- und Fassadenbegrünungen, möglichst geringe Gebäudehöhen sowie windoffene Gebäudeanordnungen zu empfehlen.

Sollten trotz klimatischer Bedenken in solchen Gebieten Planungen in Erwägung gezogen werden, sind dafür klimatisch-lufthygienische Sondergutachten ratsam /20/.

Im Stadtgebiet von Reutlingen sind wegen der teilweise hohen Belastung der Kernstadt weite Teile der umgebenden Frei- und Waldflächen dieser höchsten Kategorie zugeordnet. Besonders hervorzuheben sind dabei die Freiflächen im Breitenbachtal, die Waldflächen im oberhalb liegenden Wasenwald, die Wald- und Freiflächen im Bereich des Scheibengipfels/der Achalm bzw. des Burgholzes und weite Teile der schwach geneigten, Kaltluft produzierenden Flächen, welche die nördlichen Stadtteile umgeben.

Ausgleichsraum mittlerer klimatisch-lufthygienischer Bedeutung

Die auf diesen Freiflächen entstehende Kalt- und Frischluft fließt nicht direkt in Richtung bebauter Gebiete, d.h. sie sind nicht Teil eines wesentlichen Tal- oder Hangwindsystems und grenzen nicht direkt an hoch- bzw. höchstbelastete Siedlungsräume an.

Diese Flächen sind demnach mit geringerer Empfindlichkeit gegenüber nutzungsändernden Eingriffen als die höchste Kategorie bewertet. Auf diesen Flächen ist aus klimatischer Sicht eine maßvolle Bebauung, die den lokalen und regionalen Luftaustausch nicht wesentlich beeinträchtigt, möglich. In der Regel kann dies durch die Anpassung an die Umgebungsbebauung erreicht werden.

Klimatisch bedeutsame lokale Gegebenheiten, wie Talsohlen, Schneisen, Bachläufe usw., können dennoch von besonderem Wert sein und sind in diesen Bereichen bei der Planung zu berücksichtigen. Für eine möglichst geringe klimatische und lufthygienische Beeinträchtigung sind die Erhaltung von Grünflächen und Grünzügen, die Schaffung von Dach- und Fassadenbegrünungen und möglichst geringe Gebäudehöhen sowie windoffene Gebäudeanordnungen zu empfehlen.

Bei Planungen von Baumaßnahmen in diesen ausgewiesenen Flächen ist eine Beurteilung eines klimatisch-lufthygienischen Sachverständigen bezüglich der Dimensionierung und Anordnung von Bauwerken sowie der Schaffung von Grün- und Ventilationsschneisen von Vorteil. In Einzelfällen kann je nach Vorhabensgröße ein Fachgutachten erforderlich sein /20/.

Im Stadtgebiet von Reutlingen sind insbesondere die Wald- und Freiflächen fernab der Kernstadt (um Gönningen und Bronnweiler) sowie Teile der Freiflächen zwischen den nördlichen Stadtteilen dieser Kategorie zugeordnet. Auch Freiflächen im direkten Umfeld des Siedlungsrandes der Kernstadt fallen in diese Kategorie, da die Nähe zum bestehenden Siedlungsrand auch die lokale bzw. regionale Wertigkeit dieser Flächen bereits in ihrer Funktion beeinträchtigen kann.

Ausgleichsraum geringer klimatisch-lufthygienischer Bedeutung

Diese Flächen haben klimatisch betrachtet nur einen geringen Einfluss auf Siedlungsgebiete, da sie aufgrund ihrer Lage und Exposition von Siedlungen abgewandt oder für die Kalt- und Frischluftproduktion relativ unbedeutend sind. Dort sind in der Regel bauliche Eingriffe mit nur geringen klimatischen Veränderungen verbunden, d. h. sie sind relativ stabil gegenüber begrenzten nutzungsändernden Eingriffen.

Diese Klassifizierung ergibt sich für gut durchlüftete Gebiete mit schwach ausgeprägten Reliefverhältnissen, die nicht in unmittelbarer Nähe zu (belasteten) Siedlungsbereichen liegen oder in einem Zusammenhang mit lokalen Windsystemen stehen.

Aus klimatischer Sicht sind in diesen Gebieten größere Nutzungsänderungen ohne direkte Auswirkungen auf (belastete) Siedlungsräume möglich. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass bzgl. der Hauptwindrichtung die Durchlüftungsmöglichkeit erhalten bleibt. Allerdings können im Nahbereich von Gebäuden auch Nutzungskonflikte bezüglich des Windkomforts durch erhöhte Windgeschwindigkeiten und Böigkeiten entstehen. Zudem ist das schon vorhandene Emissionsaufkommen zu beachten, so dass in der Nähe stark frequentierten Verkehrswegen und ggf. von Gewerbestandorten keine empfindlichen Nutzungen geplant werden sollten /20/.

Im Stadtgebiet von Reutlingen wurde diese Kategorie aufgrund der verhältnismäßig hohen Belastung der Kernstadt sowie lokaler klimatischer Zusammenhänge nur für sehr vereinzelt Flächen (z.B. Waldstück nördlich des Neckar/der B27) vergeben.

Klimatisch-lufthygienische Belastung der Siedlungsräume (Wirkraum)

Bebaute Gebiete mit geringer klimatisch-lufthygienischer Belastung und Funktion

Dies sind bereits bebaute Gebiete mit geringen klimatischen Funktionen, die aufgrund ihrer Lage weitgehend geringe thermisch-lufthygienische Belastungen aufweisen und benachbarte Siedlungsbereiche nicht wesentlich beeinträchtigen.

Diesen Flächen ist keine nennenswerte klimatisch-lufthygienische Empfindlichkeit gegenüber mäßigen Nutzungsintensivierungen in Form von Bebauungsverdichtung bzw. Versiegelung zuzuschreiben. Lediglich bei intensiven Nutzungsänderungen, die die ortsüblichen Gegebenheiten überschreiten, sollten fachgutachtliche Einschätzungen zu Klima und Lufthygiene eingeholt werden.

Es handelt es sich um bebaute, gut durchlüftete Kuppenlagen oder um bebaute Gebiete, deren thermisch-lufthygienische Emissionen nicht zu Verschlechterungen in nahegelegenen Siedlungsbereichen führen. Bei einer zusätzlichen Verdichtung ist keine nennenswerte klimatisch-lufthygienische Auswirkung zu erwarten, da sich bei diesen überwiegend kleinen Flächen generell kein relevanter Wärmeineffekt ausbildet.

Es ist dennoch darauf zu achten, dass bestehende Belüftungsmöglichkeiten erhalten werden und zusätzliche Emissionen keine nachteilige Wirkung auf Siedlungsräume nach sich ziehen können. Durch Dach- und Fassadenbegrünung und Beibehaltung bzw. Erweiterung von Grünflächen kann einer zusätzlichen thermischen Belastung bei Nutzungsintensivierungen vorgebeugt werden /20/.

Im Stadtgebiet von Reutlingen sind insbesondere die Stadtteile Gönningen und Bronnweiler sowie große Teile der nördlichen Stadtteile dieser Kategorie zugeordnet. Innerhalb des bebauten Bereiches der Kernstadt konnte keine Fläche dieser Kategorie zugeordnet werden.

Bebaute Gebiete mit mittlerer Belastung und/oder klimarelevanter Funktion

Hierbei handelt es sich um bebaute Gebiete, die aufgrund ihrer Lage und ihrer Bebauungsart klimarelevante Funktionen übernehmen. Darunter fallen z.B. locker bebaute und durchgrünte Siedlungen oder Siedlungsränder oder Kernbereiche kleinerer Siedlungen, die nachts entsprechend abkühlen und relativ windoffen sind, oder gut durchlüftete verdichtete Siedlungsbereiche (z.B. Kuppenlagen).

Diese Gebiete führen weder zu intensiver thermisch-lufthygienischer Belastung noch zu Beeinträchtigungen des Luftaustauschs und weisen im Allgemeinen geringe klimatisch-lufthygienische Empfindlichkeiten gegenüber Nutzungsintensivierungen, die das ortsübliche Maß nicht wesentlich überschreiten auf. Damit sind z.B. Arrondierungen an den Siedlungsrändern und das Schließen von Baulücken gemeint, wobei die in diesem Gebiet vorhandene Dimension der Bebauung beibehalten werden sollte. Solche relativ geringfügigen und der Umgebung angemessenen Nutzungsänderungen ziehen keine wesentlichen klimatisch-lufthygienischen Änderungen nach sich.

Allerdings ist bei Planungen von Baumaßnahmen auf diesen ausgewiesenen Flächen eine fachliche Einschätzung der Größe und Anordnung von Bauwerken sowie der Erhaltung und Schaffung von Grün- und Ventilationsschneisen in Bezug auf Klima und Lufthygiene angezeigt. Lediglich bei bedeutsamen baulichen Eingriffen, die über die Eigenschaften der bestehenden ortsüblichen Bebauung hinausgehen, sind Beurteilungen auf der Grundlage von detaillierten klimatisch-lufthygienischen Fachgutachten angemessen.

Eine zusätzliche Versiegelung ist minimal zu halten und durch Schaffung von Vegetationsflächen sowie Dach- und Fassadenbegrünung auszugleichen. Durch die Festsetzung der Nutzung emissionsarmer Wärmeversorgung können lufthygienischen Auswirkungen minimiert werden /20/.

Im Stadtgebiet von Reutlingen sind in der Kernstadt vor allem die randlich gelegenen Stadtbeiriche mit lockererer Bebauung und geringen Entfernungen zum Ausgleichsraum dieser Gebietskategorie zugeordnet. In den nördlichen Stadtteilen fallen dichter bebaute Ortskerne in diese Kategorie.

Bebaute Gebiete mit geringer bis mittlerer Belastung und hoher klimarelevanter Funktion

Diese ausgewiesenen bebauten Bereiche übernehmen für sich und angrenzende Siedlungen bedeutende klimarelevante Funktionen, wobei Art und Dimension der vorhandenen Bebauung sehr unterschiedlich sein können.

Locker bebaute, gut durchgrünte Gebiete mit geringen Gebäudehöhen ermöglichen am Siedlungsrand einen nahezu ungestörten Luftaustausch, der auch lokale Windsysteme beinhaltet. Das trifft insbesondere auf Hanglagen zu, an deren Fuß sich bebaute Gebiete befinden, wobei diese Hanglagen auch zu Kaltluftbildung und Kaltluftabfluss beitragen. Aber auch Gebiete mit dichterem und höherer Bebauung können durch ihre Lage z.B. zwischen einem hochwertigen Ausgleichsraum und einem hochbelasteten Siedlungsbereich in diese Kategorie fallen.

Die genannten Gebiete weisen eine erhebliche klimatisch-lufthygienische Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen auf. Weitere Bau- und Versiegelungsmaßnahmen über das bestehende Maß hinaus führen zu negativen Auswirkungen auf die klimatische Situation innerhalb dieser Gebietskategorie und/oder einer ggf. höher belasteten angrenzenden Kategorie. Für diese Gebiete wird eine Beibehaltung bzw. Vergrößerung des Vegetationsanteils und eine Betonung oder Erweiterung der Belüftungsflächen empfohlen. Bei nutzungsändernden Planungen, die in ihrem Ausmaß die Ortsüblichkeit überschreiten, sind in diesen ausgewiesenen Flächen klimatisch-lufthygienische Gutachten angezeigt /20/.

Im Stadtgebiet von Reutlingen sind insbesondere die Siedlungsränder, in denen Kaltluft z.T. weit in den (belasteten) Siedlungsbereich eindringt mit dieser Gebietskategorie belegt. Zwei herausragende Beispiele sind die Hänge des Georgenbergs bzw. des Scheibengipfels. In diesen Bereichen ermöglicht die bestehende lockere Bebauung die Durchleitung von Kaltluft ohne wesentliche zusätzliche thermische oder lufthygienische Belastung in höher belastete Bereiche.

Bebaute Gebiete mit klimatisch-lufthygienischen Nachteilen

Diese Ausweisung umfasst vornehmlich verdichtete Siedlungsräume, die entweder klimatisch (bebaute Tal- bzw. Kessellagen) und/oder lufthygienisch (z.B. stark befahrene Verkehrsachsen) stark belastet sind. Zudem zählen dazu auch diejenigen bebauten Bereiche, in denen der Luftaustausch maßgeblich durch Bauwerke behindert ist.

Diese Gebiete sind unter stadtklimatischen und/oder lufthygienischen Gesichtspunkten sanierungsbedürftig.

Als Aufwertungs- oder Sanierungsmaßnahmen kommen Erhöhung des Vegetationsanteils, Verringerung des Versiegelungsgrads und Verringerung des Emissionsaufkommens, insbesondere der Verkehrsemissionen, infrage.

Zudem wird eine Schaffung oder Erweiterung von möglichst begrünten Durchlüftungsbahnen empfohlen; damit ist auch die Entfernung oder Verlagerung störender Bauwerke verbunden. Ferner sollte darauf geachtet werden, dass zur Begrünung nur solche Pflanzenarten verwendet werden, die keine biogenen oder nur in geringen Mengen biogene Kohlenwasserstoffe freisetzen, die eine Ozonproduktion begünstigen.

Bei allen wesentlichen Änderungen innerhalb dieser lilafarbenen Flächenausweisungen sind detaillierte klimatisch-lufthygienische Gutachten, um negative Auswirkungen zu minimieren, angezeigt.

7.3 Zusammenfassende Erläuterungen zur Planungshinweiskarte

Die Planungshinweise beziehen sich insbesondere auf mögliche Nutzungsänderungen, die zu ungünstigeren lokalklimatischen und lufthygienischen Verhältnissen beitragen können, wie beispielsweise zusätzliche Bebauung, Versiegelung, Luftschadstoffemissionen (Hausbrand, Verkehr) etc.

Maßnahmen zur Erhöhung des Freiflächen- und Vegetationsanteils, zur Beseitigung von Strömungshindernissen oder zur Reduzierung von Schadstofffreisetzungen sind generell in jeder Kategorie wünschenswert.

Im Bereich um die Kernstadt von Reutlingen wurden die Freiflächen schwerpunktmäßig als Ausgleichsraum hoher klimatisch-lufthygienischer Bedeutung (dunkelgrüne Flächen) klassifiziert. Geneigte stadtnahe Freiflächen in Hanglagen tragen wesentlich zur Belüftung der Kernstadtrandbereiche bei. Wesentlich für den klimatisch-lufthygienischen Ausgleich sind insbesondere auch die Waldflächen nördlich des Scheibengipfels und des oberen Breitenbachtals, welche für die Belüftung von Sondelfingen bzw. Teilen von Betzingen wichtig sind. Aus klimatischer Sicht sollten Nutzungsänderungen, die eine erhöhte Versiegelung oder Rauigkeit der Oberflächen nach sich ziehen, möglichst vermieden werden. Eine Zersiedelung dieser Flächen ist möglichst ebenfalls zu vermeiden.

Eine wichtige Rolle spielen auch die innerstädtischen Freiflächen bzw. Grünflächen, welche generell mit hoher klimatisch-lufthygienischer Bedeutung bewertet wurden, da diese in den angrenzenden bebauten Bereichen für thermischen Ausgleich sorgen und als Schadstoffsenken können. Von besonders hoher Bedeutung sind diese Flächen jedoch insbesondere dann, wenn sie sich innerhalb von Flächen mit hoher klimarelevanter Funktion (rote Signatur) oder

mit klimatisch-lufthygienischen Nachteilen (violette Signatur) befinden (z.B. Stadtpark mit Planie, Pomologie, Volkspark, Echazufer, Friedhof unter den Linden) und eine gewisse Größe (> 1 ha) umfassen.

Zusätzlich sind in der Karte Bereiche mit geringerer klimatisch-lufthygienischer Bedeutung dargestellt (hellere Grüntöne). Dies betrifft oft Randbereiche bestehender baulicher Nutzungen, da dort die Klimagunst oft bereits durch die Siedlungsnähe beeinträchtigt ist, und Bereiche, wo keine Hang- oder Bergwinde unmittelbar in die Siedlung eindringen. Diese Kategorie wurde in fast allen Stadtteilen sowie einigen Bereichen der Kernstadt vergeben. Aber auch Frei- bzw. Waldflächen in der weiteren Umgebung der Stadtteile haben oft keine unmittelbare, siedlungswirksame klimatische oder lufthygienische Relevanz.

Die wirkraumbezogenen Signaturen beziehen sich auf die bebauten Bereiche des Stadtgebietes von Reutlingen. Diese wurden gestaffelt nach aktueller klimatisch-lufthygienischer Belastung sowie Empfindlichkeit gegenüber intensivierenden Nutzungsänderungen vergeben. Geringere Belastungen und Empfindlichkeiten (gelbe Flächen) ergeben sich insbesondere in den nördlichen bzw. südlich der Kernstadt gelegenen Stadtteilen, da dort wegen Höhen- bzw. Kuppenlagen sowie geringerer Bebauungsdichte generell weniger belastende Bedingungen herrschen. Maßnahmen die keine grundsätzliche Veränderung des Ortes darstellen, also ortsüblich sind, sind demnach generell als lokalklimatisch und lufthygienisch rückwirkungsfrei anzusehen.

Siedlungsrandbereiche sowie gering bis mäßig dicht bebaute Gebiete in Ortskernen der Stadtteile sowie innerhalb der Kernstadt wurden als bebaute Gebiete mit mittlerer Belastung und/oder klimarelevanter Funktion (orange Flächen) eingeordnet, da sie z.B. den Kaltluftzufluss in weiteren Siedlungsbereichen nicht relevant beeinflussen (z.B. Hohbuch, Teile des Burgholz sowie Lerchenbuckel). In diesen orange gekennzeichneten Bereichen ist eine maßvolle Nutzungsintensivierung, wie z.B. Arrondierung an den Siedlungsrändern und das Schließen von Baulücken, möglich. Diese sollte jedoch der Umgebung angemessen erfolgen.

Die in der Stadt Reutlingen aus klimatisch-lufthygienischer Sicht hochbelasteten Bereiche sind in der Planungshinweiskarte lila dargestellt. Dies sind zunächst generell dicht bebaute Siedlungsteilräume, die klimatisch-lufthygienisch stark belastet sind. Dazu zählen neben allen laut Klimaanalysekarte als Innenstadt-Klimatop ausgewiesenen Flächen auch diejenigen bebauten Bereiche, in denen der Luftaustausch maßgeblich durch Bauwerke behindert wird und die hohe thermische oder erhebliche lufthygienische Belastungen aufweisen, beispielsweise Teilbereiche des Stadt-Klimatopes und größere Gewerbe- und Industriegebiete, sofern sich diese innerhalb des bebauten Bereichs befinden. Weiterhin profitieren diese Bereiche nur randlich von (flachen) Kaltluftabflüssen aus Hangwindssystemen, die insbesondere bei Strahlungswetterlagen Entlastung bringen könnten. Im Stadtgebiet von Reutlingen betrifft dies die Innenstadt, sowie die Industrie- und Gewerbebereiche beiderseites des Gleisfeldes (z.B. Voller Brunnen/In Laisen/Tübinger Straße) sowie Straßenabschnitte außerhalb dieses Bereiches, die sehr hohe Belastungen aufweisen (z.B. Ortsdurchfahrt Ohmenhausen / Rommelsbach).

Der Innenstadtbereich ist zwar nicht von bodennahen Kaltluftzuflüssen begünstigt, profitiert jedoch wesentlich von - bei ausgeprägten Strahlungswetterlagen - ca. 1 - 3 Stunden nach Sonnenuntergang einsetzenden mächtigen Kaltluftstrom aus dem Arbach-/Echaztal, der die städtische Bebauung überstreicht und durch vertikale Durchmischung in der bodennahen Rei-

bungsschicht insbesondere in der Innenstadt für die wesentliche sommerliche Abkühlung sorgt. Wichtig ist jedoch, dass die Inversion wieder aufgelöst wird und keine mehrere Tage andauernde austauscharme Situation entsteht.

Auch in Bezug auf die Lufthygiene ist der Kaltluftstrom aus dem Arbach- bzw. Echaztal für weite Teile der Kernstadt von Reutlingen von überragender Bedeutung und muss unbedingt erhalten bleiben. Beeinträchtigungen im Zu- und Abstrom, durch bauliche Barrieren oder emissionsträchtige Vorhaben sind zu vermeiden.

Andere Bereiche wie z.B. „In Laisen“ sind dadurch benachteiligt, dass sie kein eigenes Kaltluftliefergebiet ausreichenden Potenzials im Ausgleichsraum haben.

In den lila gekennzeichneten Bereichen innerhalb des Stadtgebietes sind aufgrund der hohen klimatischen und/oder lufthygienischen Belastung dringend Maßnahmen zur Verbesserung der klimatisch-lufthygienischen Situation anzuraten. In den lila gekennzeichneten Flächen sind unter stadtklimatischen Gesichtspunkten folgende Minderungsmaßnahmen zu empfehlen:

- Verringerung des Versiegelungsgrades bzw. Entsiegelung,
- Erhöhung des Vegetationsanteils bzw. intensive Begrünung außerhalb des Straßenraumes (einschließlich Fassaden- und Dachbegrünung),
- Durchgrünung von Innenhöfen,
- Schaffung von Wasserflächen und Brunnen/Wasserspielen (
- Begrünung von Straßenräumen sowie Verringerungen des Emissionsaufkommens, insbesondere der Verkehrsemissionen (Verkehrsberuhigung, Förderung des ÖPNV, Verkehrswegverlagerung),
- Schaffung bzw. Erweiterung von möglichst begrünten Durchlüftungsbahnen; damit ist auch gegebenenfalls die Entfernung oder Verlagerung störender Bauwerke verbunden.

Bei allen Planungen innerhalb dieser lilafarbenen Flächenausweisungen sind detaillierte klimatisch-lufthygienische Fachgutachten evtl. mit Variantendarstellungen notwendig.

Die rot gekennzeichneten Bereiche umfassen bebaute Gebiete mit bedeutender klimarelevanter Funktion. Diese bilden generell den Übergang zu klimatisch hochwertigen Freiräumen, schließen sich an hoch, teilweise auch mäßig, belastete Bereiche an und zeigen Bereiche mit verhältnismäßig guter Durchlüftung an. Eine Verschlechterung der Durchlüftungsverhältnisse in diesen Bereichen würde über diese Gebiete hinausgehende nachteilige klimatische und lufthygienische Wirkungen nach sich ziehen.

Dies betrifft insbesondere die Bebauung an den Hängen des Scheibengipfels und des Georgenberges, aber auch die gut durchströmten östlichen Randbereiche von Sondelfingen, Ortsränder von Betzingen und kleine Bereiche an der Römerschanze. Dort sind generell Maßnahmen zu vermeiden, die ein Einsickern von Kaltluft in den Siedlungsraum (zusätzlich) erschwert. Diese Bereiche sind wichtig, da für die Kernstadt von Reutlingen, abgesehen von der die städtische Bebauung überströmenden Echaz- bzw. Arbachtäler Kaltluftstroms, keine bedeutsamen Kaltluftschneisen bestehen.

Bei Sanierungsmaßnahmen sollten nach Möglichkeit in rot gekennzeichneten Bereichen Riegel- bzw. Barrierewirkungen, zum Beispiel in Form bestehender Baustrukturen, beseitigt werden. Freiflächen sollten aus stadtklimatischen Gründen nach Möglichkeit nicht bebaut werden

und Bebauungsverdichtung sollte unterbleiben. Soweit dennoch eine weitergehende Bebauung vorgenommen werden soll, sollte nach eingehender Prüfung in strömungsoptimierter Weise gebaut werden, um mögliche Beeinträchtigungen der stadtklimatisch und lufthygienisch überaus bedeutsamen Kaltluftströme zu minimieren. Dabei ist auch die Gesamtwirkung verschiedener Einzelmaßnahmen zu beachten.

Die als bebauten Gebiete mit klimatisch-lufthygienischen Nachteilen gekennzeichneten Gebiete weisen eine erhebliche klimatisch-lufthygienische Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen auf. Weitere Bau- und Versiegelungsmaßnahmen führen zu negativen Auswirkungen auf die klimatische Situation. Für diese Gebiete ist daher eine Vergrößerung des Vegetationsanteils und eine Betonung bzw. Erweiterung der Belüftungsflächen zur Minderung von Nachteilen zu empfehlen.

Weitere Planungsempfehlungen enthält das folgende Kapitel mit den Klimaökologischen Leitlinien zur Vermeidung oder Minimierung klimaökologisch bzw. lufthygienisch negativer Auswirkungen.

8 Klimaökologische Leitlinien

Aus den Ergebnissen der lokalklimatischen Modellierungen (siehe Kapitel 5) sowie der darauf basierenden Klimaanalysekarte der Stadt Reutlingen (siehe Kapitel 6 sowie Karte „Klimaanalysekarte“ im Kartenteil) bzw. der klimatologischen Planungshinweiskarte der Stadt Reutlingen (siehe Kapitel 7 sowie Karte „Klimatologische Planungshinweiskarte“ im Kartenteil) ergeben sich Anforderungen und Hinweise an die räumliche Planung (insbesondere Stadt-, Verkehrs- Grün- und Luftreinhalteplanung), die insgesamt als Handreichung für die Bauleitplanung dienen können und hier zusammengefasst dargestellt werden sollen.

Die Klimaökologischen Leitlinien basieren u.a. auf den Darstellungen der Städtebaulichen Klimafibel Baden-Württemberg /23/ sowie dem Maßnahmenkatalog zu städtebaulichen Maßnahmen im Rahmen der klimaökologischen Bewertungen für die Stadt Berlin /24/ sowie den Maßnahmen nach VDI Richtlinie 3787 Blatt 1 /20/. Hier wird jeweils Bezug zur Situation der Stadt Reutlingen hergestellt.

Auf der gesamtstädtischen Ebene ergeben sich nach /23/ folgende wesentliche Hauptkomponenten einer klimaökologisch verträglichen Stadtplanung:

- Erhaltung und Gewinnung von Vegetationsflächen (siehe Kapitel 8.1)
- Sicherung des lokalen Luftaustauschs (siehe Kapitel 8.2)
- Maßnahmen zur Luftreinhaltung (siehe Kapitel 8.3)

Bezogen auf belastete oder zukünftig nicht zusätzlich zu belastende Siedlungsräume ergeben sich darauf basierend (im kleinräumigeren Maßstab, z.B. Quartiersebene) verschiedene Möglichkeiten der Entschärfung bzw. Vermeidung von Belastungssituationen, die in Kapitel 8.4 näher dargestellt werden.

Für die Stadt Reutlingen besteht innerhalb des Stadtgebietes die Möglichkeit, eigene Vorgaben im Rahmen der Bauleit- bzw. Fachplanung zu machen oder – soweit möglich – auch Einfluss auf die für Reutlingen relevante Bereiche außerhalb des eigenen Stadtgebietes zu nehmen. Hierzu ist eine Abstimmung der Bauleitplanung mit den Nachbargemeinden Pfullingen und Eningen u. A. im Rahmen des Nachbarschaftsverbandes unter klimatisch-lufthygienischen Gesichtspunkten zu empfehlen, deren Bebauung im Echaz- und Arbachtal unmittelbar an die Bebauung des Reutlinger Südens anschließt und so ggf. Auswirkungen auf die klima- und immissionsökologische Situation in Reutlingen haben kann.

8.1 Erhaltung und Gewinnung von Vegetationsflächen

Dem Erhalt und der Gewinnung von Grünflächen kommt insbesondere in bereits belasteten Bereichen oder in Gebieten, welche wichtige Funktionen für belastete Bereiche übernehmen, eine hohe Bedeutung zu. In der Planungshinweiskarte ist dies durch die Signaturen „Bebaute Gebiete mit geringer bis mittlerer Belastung und hoher klimarelevanter Funktion“ und „Bebaute Gebiete mit klimatisch-lufthygienischen Nachteilen“ dargestellt.

Eine Möglichkeit Vegetationsflächen in zukünftigen Planungen zu erhalten und zu gewinnen, kann über **Grünordnungs- und Landschaftspläne** erfolgen.

Diese umfassen eine Bestandsaufnahme der natürlichen Gegebenheiten sowie der Nutzungsansprüche an das betreffende Gebiet. Zu den zu untersuchenden natürlichen Gegebenheiten

und Potenzialen zählen u.a. auch klimatische und lufthygienische Aspekte mit einer ökologischen Bewertung der festgestellten Gegebenheiten und möglicher Einschränkungen und Nutzungskonflikte.

Die im Landschaftsplan enthaltenen Elemente werden in den Flächennutzungsplan eingearbeitet. Darstellungen im Landschaftsplan oder im Grünordnungsplan werden, soweit erforderlich und geeignet, in die Bebauungspläne aufgenommen und durch entsprechende Festsetzungen rechtsverbindlich (z.B. § 9 (1) BauGB).

Über einzelne Bebauungspläne kann der **Umfang der Bodenversiegelung** beeinflusst und der **Anteil von Grün- und Wasserflächen** erhöht werden. Dies kann belastete Bereiche entlasten und helfen zukünftige Belastungen zu vermeiden.

Durch eine Vernetzung von kleineren Grünflächen kann lokal zu einer Verminderung thermischer Belastungen beigetragen werden (siehe z.B. Unterschied thermische Belastung der Bereiche Orschel-Hagen und Kernstadt von Reutlingen in Kapitel 5.2). Im Falle einer Ausrichtung zu Belüftungsachsen kann so auch über den zu überplanenden Bereich hinaus Entlastung geschaffen und zusätzliche Belastung vermieden werden.

Anpflanzungen von Bäumen und Sträuchern entlang von Straßen sind eine häufig anzutreffende Maßnahme zur Begrenzung der Aufheizung von städtischen Oberflächen. Jedoch können insbesondere großkronige Bäume im Straßenraum zu einer Reduzierung der Windgeschwindigkeit und damit einer Einschränkung der Milderung thermischer, aber insbesondere lufthygienischer Belastungen führen, so dass im Einzelfall abgewogen werden muss.

Eine messbare klimatische Wirkung über die betrachtete Grünfläche hinaus kommt nur bei Größenordnungen von 10 bis 50 ha zustande (u.a. /26/). Kleinere Grünflächen können durch ihr Vorhandensein oft nur klimatisch nachteilige Nutzungen „verhindern“.

In Bezug auf die humanbioklimatische Behaglichkeit kommt insbesondere in der Kernstadt ohne wesentliche Gartenanteile der Erreichbarkeit öffentlicher zugänglicher Grünflächen mit besonnten und beschatteten Anteilen und ggf. Wasserflächen innerhalb einer Gehentfernung von 500 m eine große Bedeutung zu.

8.2 Sicherung des lokalen Luftaustauschs

Der Sicherung des lokalen Luftaustauschs kommt insbesondere in thermisch und lufthygienisch belasteten Bereichen wie der Kernstadt von Reutlingen eine sehr große Bedeutung zu. Hiermit ist der Schutz bestehender kalt- bzw. frischluftproduzierender Gebiete, wie Wiesen und Wälder, im direkten Siedlungsumfeld (siehe Planungshinweiskarte Signatur „Ausgleichsraum hoher klimatisch-lufthygienischer Bedeutung“) gemeint. Dies ist insbesondere auf der Ebene der Flächennutzungsplanung relevant.

Beim Übergang in den Siedlungsraum kommt den Bebauungsformen sowie der Gliederung der Baukörper eine hohe Bedeutung zu. Ziel muss sein, vorhandene Luftströmungen möglichst weit in den Siedlungsraum hinein nicht durch unangepasste Bebauung (zusätzlich) zu „behindern“. Wesentlich für Städte wie Reutlingen ist eine Steuerung von Hangbebauung (z.B. Hänge des Scheibengipfels und der Achalm), wobei diese, je nach lokalklimatischer Relevanz, eher vermieden werden sollte. Sofern im Einzelfall eine Bebauung realisiert werden soll, kann dies nur über sehr niedrige Bebauungshöhen und niedrige Grundflächenzahlen bei gleichzeitiger Beachtung der Ausrichtung der Gebäude untereinander erfolgen.

Bauwerke, die ihre Umgebung wesentlich überragen, tragen generell zu größerer Turbulenz und damit zur Verringerung der übergeordneten Windgeschwindigkeiten und Durchlüftung der Stadt bei. Lokal erfolgt demnach eine stärkere vertikale Durchmischung der Luft auf Kosten der horizontalen Windgeschwindigkeit und damit der Reichweite von Kaltluftströmungen. Zusätzlich sind aber auch Verschattung- und Düseneffekte möglich.

Daher ist zum Erhalt des für weite Teile der Kernstadt klimatisch und lufthygienisch überaus bedeutsamen Kaltluftstroms aus dem Echaz- und Arbachtal im Talraum auf eine strömungsdynamisch optimierte Bebauung zu achten. Diese ist im Wesentlichen geprägt durch eine Ausrichtung der Baukörper in Strömungsrichtung, eine möglichst einheitliche Verdrängungshöhe (Bauhöhe) und möglich geringe Rauigkeit, sodass die städtische Bebauung insgesamt vom Kaltluftstrom leicht überströmt werden kann.

8.3 Maßnahmen zur Luftreinhaltung

Bezüglich Maßnahmen zur Luftreinhaltung werden seit dem im Jahr 2005 in Kraft getretenen Luftreinhalteplan der Stadt Reutlingen und dessen Fortschreibungen in den Jahren 2007, 2012, 2014 und 2017 mögliche Verbesserungen dargestellt, erörtert sowie deren Wirkungen prognostiziert sowie Maßnahmen zur Luftreinhaltung festsetzt. Dies betrifft im Wesentlichen Maßnahmen zur Verkehrsbeeinflussung bzw. -vermeidung. Ein wesentliches diesbezügliches Entlastungspotential wohnt der Inbetriebnahme des Scheibengipfeltunnels, einer Realisierung der Regionalstadtbahn sowie eines neuen Stadtbussystems begleitet von Rad- und Fußwegekonzepten inne.

Weiterhin besteht ein Potential bezüglich der Verbesserung der Luftqualität in der Verringerung der durch Hausbrand verursachten Emissionen. Dies gilt insbesondere für die Tallagen des Echaztals in der Kernstadt während lufthygienisch kritischen, langanhaltenden winterlichen Inversionswetterlagen. Bei Überschreitungen der Feinstaub (PM10) Grenzwerte bestehen Möglichkeiten der Nutzungseinschränkung bestimmter Komfortkamine.

Mögliche Maßnahmen zu Verminderung der Staubimmissionen (PM_{2,5}; PM₁₀) in einzelnen Straßenzügen beinhalten:

- die regelmäßige (nasse) Reinigung belasteter Straßenabschnitte
- Geschwindigkeitsbeschränkungen
- eine Erhöhung der aerodynamischen Durchlässigkeit von Straßenabschnitten bzw. Senkung der Rauigkeit in einzelnen Straßenbereichen (z.B. durch Rückbau von Gebäuden, Anpassung der Vegetation)

Diese Maßnahmen zielen im wesentlichen auf eine Verringerung der Staubimmissionen durch Aufwirbelung ab. Motorbedingte Emissionen können z.B. durch:

- Verlagerung des Verkehrs
- Verstetigung des Verkehrs
- Fahrverbote

vermindert werden.

8.4 Kleinräumige Maßnahmen auf Quartiersebene

Verschattung im öffentlichen Raum

Zentrale öffentliche Aufenthaltsbereiche im städtischen Raum sind Straßen, Geh- bzw. Fahrradwege sowie zentrale Plätze wie der Marktplatz, der Platz um die neue Stadthalle oder auch offene Bereiche wie der Busbahnhof. Solche Bereiche werden entweder zum längeren Aufenthalt aufgesucht (wie z.B. der Marktplatz) oder dienen dem Zweck der Fortbewegung (z.B. Omnibusbahnhöfe).

Mit Blick auf zukünftig mögliche häufigere und intensivere Hitzeperioden, einen dem demographischen Wandel geschuldeten zukünftigen höheren Anteil an hitzesensiblen Bevölkerungsgruppen sowie dem u.a. aus Gründen der Luftreinhaltung auch gewollten zunehmenden Fußgänger- und Fahrradverkehr sollten thermisch belastende Situationen auf diesen Flächen vermieden werden bzw. Möglichkeiten zur Vermeidung gegeben werden.

Durch gezielte Verschattung kann die Aufenthaltsqualität im Außenraum deutlich verbessert werden, da – wie auch in den einzelnen thermischen Betrachtungen in Kapitel 5.2 deutlich wurde – die direkte Sonneneinstrahlung am Tag in unbeschatteten Bereichen wesentlich für die dortige thermische Belastung ist. Oberflächen wie Asphalt, Beton oder Stein geben – wenn sie am Tag unbeschattet waren – noch bis spät in die Nacht Wärme ab, was – je nach Nutzungsanspruch – positive oder negative Wirkungen haben kann.

Neben der Verbesserung der Aufenthaltsqualität im Straßenraum im engeren Sinne stehen bei der Verschattung auch die Wege der gezielt zur Erholung aufgesuchten Grün-/Freiflächen im Fokus (z.B. Stadtpark, Planie, Volkspark/Pomologie).

Die Beschattung sollte vorzugsweise durch Bäume und Sträucher erfolgen. Möglich ist auch die Beschattung durch Gebäudeanbauten (z.B. Markisen in Fußgängerzonen) oder Kleinbauten (z.B. Wartehäuschen an ÖPNV-Haltestellen). Perspektivisch ist auch der großflächigere Einsatz künstlicher Materialien denkbar (z.B. Sonnensegel auf Plätzen), wie es z.T. in südlichen Ländern seit langem praktiziert wird /24/.

Bäume und Sträucher im Straßenraum können zusätzlich zur Verschattung die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen übernehmen und dadurch die Luftqualität verbessern helfen. Wesentlicher zu beachtender Faktor hierbei ist jedoch, dass der vertikale Luftaustausch zum Schadstoffabtransport und der nächtlichen Ausstrahlung möglichst gewährleistet bleiben sollte. Geschlossene Kronendächer und großkronige Bäume können insbesondere bei kleinen Straßenquerschnitten und hoher Verkehrsbelastung die Durchlüftung behindern (siehe auch Kapitel 8.1). Dies ist im Einzelfall gegen die Vorteile hoher Vegetation bei der Beschattung, Temperaturdämpfung durch die Verdunstung und die Filterwirkung abzuwägen.

Begrünung und Verschattung von Parkplätzen bzw. versiegelten Flächen

Ungehinderte Sonneneinstrahlung führt tagsüber zu einer hohen Wärmebelastung auf Parkplatz- oder Logistikflächen (siehe z.B. thermische Betrachtungen zum Gebiet Betzingen Kapitel 5.2.6). Zusätzlich kann die hohe Wärmespeicherkapazität des jeweiligen Bodenbelags (Asphalt, Beton, Schotter) auch die nächtliche Abkühlung in angrenzenden Wohngebieten

verringern bzw. verzögern. Es gilt auch, den Beitrag zum Wärmeinseleffekt der Stadt generell zu mindern.

In Parkplatz- oder Logistikbereichen kann schattenspendende Vegetation diese Effekte deutlich verringern. Wegen der fehlenden Verdunstungskühlung können Überdachung oder Sonnensegel einer Überwärmung nur eingeschränkt entgegenwirken.

Bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen sollte auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz geachtet werden. Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen und damit negative lufthygienische Auswirkungen haben, aufweisen /24/.

Entsiegelung bzw. Vermeidung von Neuversiegelung

Entsiegelung meint den Austausch von komplett versiegelten Flächen zugunsten von teilversiegelten Oberflächenmaterialien wie z.B. Rasengittersteinen, Fugenpflaster, Sickerpflaster oder zugunsten von komplett unversiegelten Bereichen. Ziel solcher Maßnahmen ist die (teilweise) Wiederherstellung der natürlichen Bodenfunktionen (z.B. im Hinblick auf den Hochwasserschutz, s.u.). Aus klimatischer Sicht sind vor allem die Effekte einer reduzierten Wärmespeicherung sowie einer erhöhten Verdunstungskühlung von Bedeutung.

Entsiegelungsprojekte entsprechen zudem den Zielen des Bodenschutzes (siehe Bundesbodenschutzgesetz), des Hochwasserschutzes sowie eines naturnahen Wasserkreislaufs und unterstützen den Ansatz einer dezentralen Siedlungswasserwirtschaft.

Durch ähnliche Maßnahmen sollten auch bei Neubauprojekten (Neu-)Versiegelungen vermieden werden (z.B. Gleisbettbegrünung bei der geplanten Regionalstadtbahn).

Erhöhung der Oberflächen-Albedo

Eine vielfach bei Neubauprojekten schon umgesetzte Maßnahme ist die Erhöhung des Rückstrahlvermögens der Oberflächen (Albedo) durch Wahl von Baustoffen oder Fassadenanstrichen mit hoher Albedo (z.B. Festsetzung von hellen Oberflächen im Rahmen des Planungsprozesses). So wird die Aufheizung des Baustoffs selbst sowie der umgebenden Luft deutlich verringert.

Hier kann insbesondere bei Sanierungen im thermisch belasteten Bestand ein Beitrag zur Verringerung des Wärmeinseleffektes geleistet werden.

Anlage von offenen Wasserflächen im öffentlichen Raum

Offene, bewegte Wasserflächen im öffentlichen Raum bieten eine positive Wirkung auf thermisch belastete Bereiche, da die zur Verdunstung benötigte Energie aus der Umgebung gewonnen wird und sie diese somit abkühlen. Beispiele in Reutlingen sind der historische Rathausbrunnen sowie der neu gestaltete Echaz-Abschnitt zwischen Stadthalle und Busbahnhof und weite Teile des Echazverlaufes in der Kernstadt von Reutlingen (z.B. die Wasserflächen der „Obere Wässere“).

In thermisch stark belasteten, versiegelten Bereichen des öffentlichen Raumes bieten Brunnen, Wasserspiele (ebenerdige Brunnen), Wasserspielplätze oder künstliche Wasserfälle Möglichkeiten, Entlastung zu schaffen und die Aufenthaltsqualität im öffentlichen Raum in Hitzeperioden zu verbessern. Die neuen Brunnenanlagen im Bürgerpark und an der Marienkirche sind daher zukunftsfähige, zu begrüßende Ansätze. Wasservorhänge können zudem Luftschadstoffimmissionen mindern.

Dach- und Fassadenbegrünung

Mit Dach- und Fassadenbegrünungen kann zunächst für das begrünte Objekt selbst sowie die nächste Umgebung die thermische und lufthygienische Situation verbessert werden. Ein Verbund aus vielen begrünten Dächern und Fassaden kann helfen, den städtischen Wärmeineffekt zu mindern, Luftschadstoffe zu binden und– im Falle der Dachbegrünung – zudem zu einer Reduktion von Niederschlagsabflussspitzen beitragen.

Mit Fassadenbegrünung kann auch die Luftqualität verbessert werden. Ebenso sind positive Effekte bzgl. Lärminderung bekannt /24/.

Optimierung der Gebäudeausrichtung und der Bebauungsdichte bei Neubauten

Die Optimierung der Gebäudeausrichtung und der Bebauungsdichte bei Neubauten zählt zu den zentralen Maßnahmen in einer Stadt wie Reutlingen, die einerseits auf Kalt- bzw. Frischluftzuflüsse aus dem Umland angewiesen ist und andererseits gleichzeitig unter enormem Siedlungsdruck steht (Hauptpunkt Kapitel 8.2).

Ziel ist es, vorhandene Kaltluftströme optimal zu nutzen bzw. möglichst bei Umbaumaßnahmen bereits eingeschränkte Kaltluftströme zu verbessern. Wesentlich hierbei ist die Ausrichtung der Baulinien parallel zur Fließrichtung von Kaltluftströmen und eine Beschränkung der maximalen Gebäudehöhen in Anlehnung an die Umgebungsbebauung.

Stadtklimatische Entkopplung von Neubau- und Nachverdichtungsgebieten

Das im BauGB verankerte städtebauliche Leitbild der Stärkung der Innenentwicklung sowie das stadtplanerische Ziel der thermischen Entlastung von Siedlungsbereichen tragen eine gewisse Unverträglichkeit bereits im Grundsatz in sich.

Eine Möglichkeit, diesen Konflikt zu bewältigen, ist die thermische Entkopplung von neu zu errichtenden bzw. zu verdichtenden Bereichen durch effektive Bau- und Außenbereichsgestaltung und Gebäudeausrichtung, so dass diese Bereiche möglichst geringe klimatische Auswirkungen auf angrenzende Bereiche haben. Ein Nachweis kann im Vorhinein durch einen modellhaften Vergleich von Alternativen im Rahmen von klimaökologischen Untersuchungen erbracht werden.

Erhöhung der mikroklimatischen Vielfalt in öffentlichen Grünflächen

Die Erhöhung der mikroklimatischen Vielfalt meint grundsätzlich eine Erhöhung des Angebots an Bewohner oder Besucher, sich in einer zu einem bestimmten Tages- oder Nachtzeitpunkt (bzw. Abend) ihnen angenehmen klimatischen Umgebung aufhalten zu können.

Ein Beispiel hierfür ist der Stadtgarten, in dem sich beschattete und besonnte Bereiche sowie Wasserfläche und Rasenfläche kleinräumig abwechseln. Auch kleine „Oasen“ wie der Klosterhof in der Spendhausstraße oder das neu gestaltete Echazufer zwischen Stadthalle und Busbahnhof sind positive Beispiele.

Schutz von für den Kaltlufthaushalt relevanten Flächen

Großräumige, gut wasserversorgte und durch flache Vegetation geprägte Freilandbereiche wie Wiesen, Felder, Kleingartenanlagen und Parklandschaften sind Ausgleichsräume im Stadtklimahaushalt und Produktionsraum für Kalt- und Frischluft und bedürfen daher – insbesondere bei hohen thermischen und lufthygienischen Belastungen – eines besonderen Schutzes sowie einer behutsamen und reflektierten Beplanung. Entweder besteht auf diesen Flächen eine wesentliche Funktion als „Entstehungsraum“ oder als „Transportraum“ positiver klimaökologischer Effekte.

Entsprechende wesentliche Flächen im Stadtgebiet Reutlingen sind in der Planungshinweiskarte explizit mit „Ausgleichsraum hoher Bedeutung“ gekennzeichnet.

Vernetzung von für den Kaltlufthaushalt relevante Flächen

Die Vernetzung von Grün- und Gewässerbereichen ist eine aus dem Biotop- und Artenschutz bereits länger bekannte Maßnahme und besitzt auch Potential zur Verbesserung des Kaltlufthaushaltes sowie des Angebots unterschiedlicher Mikroklimata (s.o.). Solche vernetzte Grünflächen müssen nicht durch größere Stadtumbaumaßnahmen erreicht werden, sondern können auch entlang von Radwegen oder Gleisflächen erfolgen. Ein Beispiel für einen längeren zusammenhängenden Grünbereich ist die stillgelegte Bahnstrecke zwischen dem Reutlinger Südbahnhof und dem Hauptbahnhof. Grundsätzlich können die Gewässerläufe und deren Umrandung, wie z.B. Echaz und Wiesaz, entsprechende klimaökologischen Entwicklungsbereiche sein, die im Rahmen einer vorsorgenden Gewässer-, Grün- und Erholungsplanung langfristig geschaffen werden könnten.

Vermeidung von Austauschbarrieren

Die Wirkung von Freiflächen im Ausgleichsraum am beabsichtigten Wirkungsort im Wirkraum hängt wesentlich von der Hindernisfreiheit des Transportweges zum Luftaustausch ab. So gilt es, natürliche Hindernisse (z.B. Baumgruppen) sowie künstliche Hindernisse (z.B. Bahndämme, Lärmschutzwände, große Gebäude) in relevanten Bereichen möglichst zu vermeiden. Ein bestehendes prominentes und auf einen Zielkonflikt hinweisendes Beispiel in Reutlingen ist z.B. die – ohne Zweifel aus Lärmschutzgründen notwendige – Lärmschutzbebauung an der B 28 auf der Brücke durch das Breitenbachtal im Bereich Betzingen, die je-

doch den Kaltluftstrom aus dem Breitenbachtal in Richtung Betzingen behindert und erst von ihm überströmt werden muss, um eine klimaökologisch-lufthygienische Wirkung zu erzielen.

Verbesserung der Luftqualität in Kaltluftleitbahnen

In der Regel handelt es sich bei den Kaltluftproduktionsflächen und -leitbahnen im Stadtgebiet von Reutlingen um lufthygienisch gering bzw. unbelastete Flächen. Wird jedoch ein belasteter Bereich wie z.B. ein vielbefahrener Straßenabschnitt Teil einer Leitbahn oder eines Kaltluftsystems, können die bereitgestellten Luftmassen relevant belastet werden (z.B. B 312 Am Echazufer/Lederstraße). Eine weitere wesentliche Belastung kann durch Hausbrand oder in Einzelfällen durch emissionsträchtiges Gewerbe oder Industrie entstehen.

Die Reduktion von Emissionen in Bereichen mit Leitbahnfunktion kann von großer Relevanz für die lufthygienische Situation sein. In Reutlingen wird dem beispielsweise mit der Verlagerung wesentlicher Verkehrsströme durch den Bau und die Eröffnung des Scheibengipfeltunnels in 2017 begegnet. Weitere verkehrsplanerische Maßnahmen können (situationsabhängige) Geschwindigkeitsbegrenzungen, Verstetigung des Verkehrsflusses oder Verkehrsvermeidung sein. Der Luftreinhalteplan für die Stadt Reutlingen des Regierungspräsidiums Tübingen stellt das zentrale Instrument zur Umsetzung von derartigen Maßnahmen dar. In Wirkgutachten wird darüber hinaus die Wirksamkeit dieser Maßnahmen prognostiziert. Die derzeit laufende 4. Fortschreibung des Luftreinhalteplans Reutlingen hat die Vorgaben des Verwaltungsgerichtes Sigmaringen vom 22.10.2014 die Grenzwerte schnellstmöglich einzuhalten zum Ziel.

Eine administrative Möglichkeit der Einflussnahme auf die wesentliche Komponente Hausbrand besteht über die Festsetzung von Flächen, in denen bestimmte luftverunreinigende Stoffe nicht oder nur beschränkt verwendet werden dürfen. Schon heute existieren zahlreiche entsprechende Festsetzungen in Bebauungsplänen. Zukünftig wird man dies möglicherweise zeitlich präziser und verursacherbezogener mit Beschränkungen bei Komfortkaminen lösen können.

9 Quellenverzeichnis

Datengrundlagen

- /1/ LUBW (2006): Klimaatlas Baden-Württemberg.
- /2/ Sievers, Uwe (2008): Das Kaltluft-Abfluss-Modell KLAM_21 – Theoretische Grundlagen und Handhabung des PC-Programmes. Deutscher Wetterdienst, Abteilung Klima- und Umweltberatung, Offenbach am Main
- /3/ Bruse, M. (1999): Die Auswirkungen kleinskaliger Umweltgestaltung auf das Mikroklima, Dissertation, Bochum
- /4/ Dr. Dütemeyer Umweltmeteorologie (2014): Mikroklimatisches Simulationsmodell ENVI-Met 3.x Handbuch zur praktischen Anwendung.
- /5/ Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (LGL): DGM5, TK10, DOP sowie Landnutzung für das Untersuchungsgebiet
- /6/ Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (2007): Amtliche Topographische Karten 1:25.000
- /7/ Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg: Geodatenviewer (<http://www.geoportal-bw.de/geoportal/opencms/de/geoviewer.html>)
- /8/ Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW): Synthetische Windstatistiken Baden-Württemberg, Stand 08.08.2016 [http://brsweb.lubw.baden-wuerttemberg.de/brsweb/home.cweb?AUTO_ANONYMOUS_LOGIN].
- /9/ Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW): Daten- und Kartendienst der LUBW (<http://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/>)
- /10/ Agrarmeteorologie Baden-Württemberg (2016): Messwerte der Stationen oberer und unterer Lindenhof (<http://www.wetter-bw.de>)
- /11/ Deutscher Wetterdienst (2016): Climate Data Center (CDC) <ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/>
- /12/ LUBW (2014): Flächendeckende Ermittlung der Immissions-Vorbelastung für Baden-Württemberg 2010 – Ausbreitungsrechnungen unter Verwendung des landesweiten Emissionskatasters und unter Berücksichtigung von gemessenen Immissionsdaten.
- /13/ Stadt Reutlingen (2010): Flechten und Luftqualität in Reutlingen 1994, 2000 und 2010.
- /14/ Regierungspräsidium Tübingen (2016): Informationen zum Luftreinhalteplan Reutlingen (<https://rp.baden-wuerttemberg.de/rpt/Abt5/Ref541/Luftreinhalteplaene/Seiten/Luftrein-haltung-Reutlingen.aspx>)
- /15/ LUBW (2008): Feinstaubbelastung in Baden-Württemberg: Immissionssituation, Grenzwertüberschreitungen und Einflussfaktoren

Gesetze, Verordnungen, Verwaltungsvorschriften

- /16/ Baugesetzbuch (BauGB) i.d.F. vom 23. September 2004, zuletzt geändert am 11.06.2013.
- /17/ BImSchG - Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge i.d.F 26. September 2002
- /18/ 39. BImSchV - Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen. Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes vom 02. August 2010 (BGBl. I Nr. 40 vom 05.08.2010 S. 1065).
- /19/ TA Luft: Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft) vom 24.07.2002.

Richtlinien, Handlungsempfehlungen und sonstige

- /20/ VDI (2015), VDI Richtlinie 3787 Blatt 1: Umweltmeteorologie - Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen, Beuth-Verlag, Berlin.
- /21/ VDI (2008), VDI Richtlinie 3787 Blatt 2: Methoden zur humanbiometeorologischen Bewertung von Klima- und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung, Teil 1 Klima. Beuth-Verlag, Berlin.
- /22/ VDI (2003), VDI Richtlinie 3787 Blatt 5: Umweltmeteorologie – Lokale Kaltluft. Beuth-Verlag Berlin.
- /23/ Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg (1998/2012): Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.
- /24/ Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin (2015): Planungshinweiskarte Stadtklima 2015. Begleitdokument zur Online-Version. http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/download/Planungshinweise_StadtklimaBerlin_2015.pdf
- /25/ <http://www.spektrum.de/lexikon/geographie/stadtklima/7543>
- /26/ Mosimann, T., Frey, T., Trute, P. (1999): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen, Heft 4/99
- /27/ Helbig, A., Baumüller, J., Kerschgens, M. (1999): Stadtklima und Luftreinhaltung. 2. Vollständig überarbeitete und ergänzte Auflage.
- /28/ Mayer, H., Beckröge, W., Matzarakis, A. (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Leitbahnen. UVP-Report 5/94
- /29/ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Hinweise zur Schätzung des Verkehrsaufkommens von Gebietstypen, 2006.
- /30/ VDI (2009), VDI Richtlinie 3782 Blatt 1: Umweltmeteorologie - Atmosphärische Ausbreitungsmodelle - Gauß'sches Fahnenmodell zur Bestimmung von Immissionskenngrößen. Beuth-Verlag, Berlin.

- /31/ Vogt, J.; Zanke, C. (2000) Die Kombination von Empirie und Simulation zur flächenhaften Bestimmung lufthygienischer Ausgleichsleistungen durch Kaltluftbewegungen. In: Forschungen zur Deutschen Landeskunde, Bd. 246, S 19-38.
- /32/ Bongardt, B.: Stadtklimatologische Bedeutung kleiner Parkanlagen – dargestellt am Beispiel des Dortmunder Westparks. In: Essener Ökologische Schriften. Bd. 24 (2006). Hohen-warsleben: Westarp Wissenschaften, ISBN 3-89432-110-5
- /33/ Kuttler, W.; Müller, N.; Dütemeyer, D.; Barlag, B.: Prognose und Diagnoseanalysen zur Verbesserung des Stadtklimas. Publikationsreihe der BMBF-Fördermaßnahme KLIMZUG-dynaklim Nr. 25 (2012)
- /34/ Kuttler, W.; Goldbach, A; Dütemeyer, D.; Barlag, B.: Messung der urbanen Evapotranspiration in Oberhausen. Vergleichende Energiebilanzmessungen in unterschiedlichen urbanen Flächennutzungsstrukturen. Publikationsreihe der BMBF-Fördermaßnahme KLIMZUG-dynaklim Nr. 24 (2012)
- /35/ Mayer, H.; Beckröge, W.; Matzarakis, A.: Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. In: UVP-Report 5 (1994), S. 265–268
- /36/ Ingenieurbüro Lohmeyer (2013): Berechnung der Immissionsauswirkungen von verkehrlichen Maßnahmen für den Luftreinhalteplan Reutlingen. Karlsruhe/Dresden
- /37/ Werner, G., Kress, R., Mai, H., Reuter, W., Roth, D., Schulz, V. (1979): Regionale Luftaustauschprozesse und ihre Bedeutung für die räumliche Planung. Schriftenreihe „Raumordnung“ des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn, in: Helbig, A., Baumüller, J., Kerschgens, M. (1999): Stadtklima und Luftreinhaltung
- /38/ Regionalverband Bodensee-Oberschwaben (2009): Regionale Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben.
- /39/ Bucher, K.: Die Bedeutung des thermischen Wirkungskomplexes im Wirkungsakkord des Wetters am Beispiel von Todesfällen im Herz-Kreislaufbereich. Ann. Met., Offenbach 28 (1992), S. 121–124
- /40/ Landschaftsökologische Bestandsaufnahme von Baden-Württemberg (1980): Freiräume in Stadtlandschaften – Nachbarschaftsverband Reutlingen Tübingen. Deutscher Wetterdienst Stuttgart.
- /41/ Regierungspräsidium Tübingen (2016): <https://rp.baden-wuerttemberg.de/rpt/Abt5/Ref541/Luftreinhalteplaene/Seiten/Luftreinhaltung-Reutlingen.aspx>
- /42/ <http://www.payer.de/tropenarchitektur/troparch012.htm>
- /43/ Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2016): Beitrag der Holzfeuerung zu den Partikel PM10-Konzentrationen in Baden-Württemberg, Karlsruhe