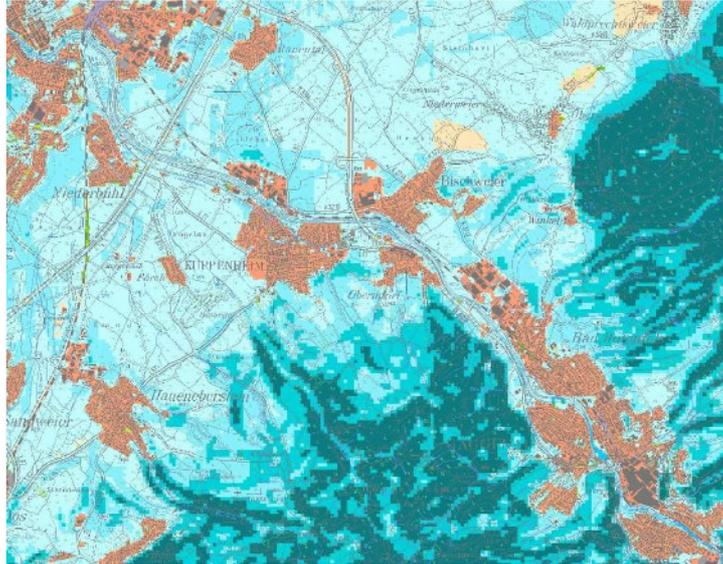


**Leitfaden zur Berücksichtigung klimatischer Ausgleichsfunktionen
in der räumlichen Planung am Beispiel der Regionen
Mittlerer Oberrhein und Nordschwarzwald“**



Auftraggeber: **Regionalverband Nordschwarzwald**
Habermehlstr. 20
75172 Pforzheim
Regionalverband Mittlerer Oberrhein
Baumeisterstrasse 2
76137 Karlsruhe
Stadt Baden-Baden
Marktplatz 2 (Rathaus)
76530 Baden-Baden

Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Große Pfahlstraße 5 a
30161 Hannover
Tel. (0511) 3887200 FAX (0511) 3887201
www.geo-net.de

Projektleiter: Dipl. Geogr. Peter Trute
E-Mail: trute@geo-net.de

in Zusammenarbeit mit:

Prof. Dr. G. Gross, Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover,
anerkannt beratender Meteorologe (DMG). Von der IHK Hannover-Hildesheim,
öffentlich bestellter Gutachter für Immissionsfragen und Kleinklima.

Inhaltsverzeichnis

Seite:

Inhaltsverzeichnis	I
1 Einleitung	1
2 Methodisch-inhaltliches Konzept.....	3
2.1 Methoden zur Ermittlung meteorologischer Kennwerte.....	3
2.2 Prinzip Ausgleich - und Wirkungsraum Gefüge.....	3
3 Untersuchungsgegenstand	5
3.1 Belastungssituation im Wirkungsraum	5
3.2 Klimaökologische Größen und Prozesse im Kaltlufthaushalt	7
3.3 Klimaökologische Ausgleichsleistung durch Luftaustauschprozesse.....	9
4 Klimaökologische Situation im Untersuchungsgebiet	11
4.1 Auswahl eines exemplarischen Raumes	11
4.2 Stationen der klimaökologischen Prozesse	11
4.3 Ausgangssituation bodennahes Luftfeld	12
Station 1: Kaltluftproduktion (Gernsbach-Reichental).....	14
Station 2: Hangabwinde (Gernsbach-Lautenbach).....	16
Station 3: Tagesperiodische Hangabwinde / Bergwinde (Gernsbach-Scheuern).....	18
Station 4: Hinderniswirkung versch. Strukturen (Gaggenau-Ottenau).....	20
Station 5: Einwirkbereiche Kaltluft / Durchlüftung (Rastatt)	22
Station 6: Kaltluftleitbahnen (Rastatt).....	24
Station 7: Bioklima (Rastatt).....	26
Station 8: Flurwinde (Karlsruhe / Alter Flugplatz).....	28
5 Allgemeines zur den Planungshinweisen Klimaökologie in der Region Mittlerer Oberrhein / Nordschwarzwald	30
5.1 Planerische Einordnung der Siedlungsflächen.....	30
5.2 Planerische Einordnung der Grünflächen	31
6 Klimawandel in den Regionen Mittlerer Oberrhein und Nordschwarzwald	33
6.1 Grundlegendes zum Klimawandel in den Regionen Mittlerer Oberrhein und Nordschwarzwald	33
6.1 Auswirkungen des Klimawandels in den Regionen Mittlerer Oberrhein und Nord- schwarzwald.....	37
7 Literatur	39

1 Einleitung

Wärmebelastung kann durch Luftaustausch mit kühleren Bereichen verringert werden. Dies geschieht zum einen durch großräumige Winde. Zum anderen entstehen auch durch die unterschiedliche Höhenlage und die unterschiedliche Nutzung der Flächen, aufgrund derer sich die Luft unterschiedlich stark aufheizt und abkühlt, ausgleichende Luftströmungen. Hier fließt kältere Luft aus höher gelegenen, unbebauten Flächen in die wärmeren, tiefer gelegenen Räume ab.

Um die Belastungen nicht weiter zu steigern und die Leistungsfähigkeit der Region zu bewahren ist es wichtig, diese natürlichen Ausgleichsfunktionen zu erhalten und zu verbessern. Hierzu können Kaltluftentstehungsgebiete und Luftleitbahnen planerisch gesichert werden.

Die lokalklimatischen Phänomene sind häufig für Nicht-Klimatologen schwer nachvollziehbar. Mit dem vorliegenden Leitfaden sollen die Phänomene nachvollziehbar gemacht und anschaulich dargestellt werden. Zusätzlich sollen mögliche planerische Schlussfolgerungen transparent hergeleitet werden. Hierbei ist der Handlungsspielraum der jeweiligen Ebene zu betrachten. Auf regionaler Ebene beispielsweise ist das wesentliche Instrument die Freihaltung von Bebauung.

Mit dem vorliegenden Leitfaden sollen die klimatischen Ausgleichsfunktionen und die bioklimatischen Belastungssituation in den Regionen Mittlerer Oberrhein und Nordschwarzwald transparent dargestellt werden. Es wird aufgezeigt, wie sich diese Funktionen und Prozesse in der Landschaft verorten lassen und welche Rückkopplungen es in die Umweltplanung der Regionen geben kann. Es ist Ziel des Leitfadens, die planerischen Möglichkeiten von Regional- und Bauleitplanung zur Minimierung der thermischen Belastung darzustellen.

Der Leitfaden richtet sich an Planer, politische Entscheidungsträger aus unterschiedlichen behördlichen Ebenen und an interessierte Bürger

Grundlagenuntersuchungen zu den Schutzgütern Klima und Luft und die Problem-orientierte Inwertsetzung der Ergebnisse gewinnen zunehmend an Bedeutung für eine nachhaltige (Umwelt-)Planung. Die Schutzgüter Klima und Luft nehmen dabei auch in der Raumplanung einen wichtigen Stellenwert ein.

Ziel der Planung soll sein, auf die betroffenen Räume bezogene und in die Regionalplanung umsetzbare Aussagen zu den klima- und immissionsökologischen Zusammenhängen zu machen. Diese bilden dann die Grundlage für eine adäquaten Berücksichtigung dieser Schutzgüter im planerischen Abwägungsprozess mit den Raumansprüchen anderer Nutzung (Wohnen, Gewerbe/Industrie...) Gleichzeitig sind sie Grundlage für Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung der Funktionen und Prozesse im Themenfeld Klima und Luft. Die Instrumente der Planung zur Berücksichtigung und Sicherung der lokalen und regionalen klimaökologischen Funktionen und Prozesse (Beispiel: Ausgleichsfunktion von Kaltluftabflüssen, Flurwind) sind in unterschiedlichen Planungsebenen und Planwerken verankert (s. Tab. 1).

Stufen der räumlichen Planung	Maßstabsbereich	Zuordnung von exemplarischen klima-ökologischen Fragestellungen
Landesebene: Landesentwicklungsplan	1 : 1.000.000	Grundsätzliche Steuerung der Berücksichtigung von Klima/Luft auf der Landesebene
Regionesebene: Regionalplan	1 : 50.000	Großräumiger Luftaustausch: Berg-/Talwindssysteme <u>Wesentliches Instrument: Bereiche von Bebauung freihalten</u>
Kommunale Ebene: Flächennutzungsplan	1 : 25.000 – 1 : 10.000	Wärmeinsel und (lokal induzierte) Luftbelastung. <u>Exemplarische Maßnahme: Freihalten von Frischluftleitbahnen in Stadtkörper</u>
Bebauungsplan	1 : 5.000 – 1 : 1.000	Hitzestress im Quartier. <u>Exemplarische Maßnahme: Schutz und Entwicklung von Grün-/Freiflächen, Grün in der Stadt</u>

Tab. 1 Berücksichtigung der Schutzgüter Klima/Luft auf den unterschiedlichen Ebenen der räumlichen Planung. Blau hervorgehoben sind die Planungsebenen, für die die Aussagen und Darstellungen des Leitfadens fokussieren.

Die (Mindest-) Anforderungen an die Bearbeitung der Schutzgüter Klima/Luft in der Planung umfassen allgemein die Definierung von Umweltqualitätszielen für das Schutzgut Klima/Luft, basierend auf den Funktionen eines Raumes als

- Wirkungsraum – Ausgleichsraum Gefüge
- Erholungsgebiet.

Daraus lassen sich Handlungsempfehlungen und Maßnahmen zum Schutz und zur Sicherung von relevanten Flächeneinheiten ableiten wie z.B.

- das Sichern von z.B. Leitbahnen, Luftqualität, Lokalklimaten
- Entwickeln von z. B. Durchlässen und Möglichkeiten zum Abbau von Immissionen
- Wiederherstellen von z. B.: Frischluftleitbahnen, Klimaoasen, immissionsarmen Räumen
- Schutz klima- und immissionsökologisch wichtiger Landschaftselemente: z.B. Kaltluftentstehungsgebiete, Flächen mit Klimavielfalt im Stadtgebiet, Hängen mit Kaltluftabfluss.

Vor diesem Hintergrund bildet der Leitfaden eine Schnittstelle zwischen einer wissenschaftlich-planerischen Analyse und den Umsetzungsmöglichkeiten in der Planung. Er zeigt relevante Prozesse und Funktionszusammenhänge in Abhängigkeit aus dem Untersuchungsgebiet Region Mittlerer Oberrhein und Region Nordschwarzwald auf und verdeutlicht die dort auftretenden klima- und immissionsökologischen Funktionszusammenhänge an Hand von Illustrationen und Skizzen.

Der Leitfaden wurde im Dialog zwischen GEO-NET Umweltconsulting GmbH und Planern der beteiligten Regionalverbände sowie der Stadt Baden-Baden erarbeitet.

2 Methodisch-inhaltliches Konzept

2.1 Methoden zur Ermittlung meteorologischer Kennwerte

Die Untersuchung und Erfassung des Lokalklimas kann mit Hilfe verschiedener Methoden erfolgen. Hierzu zählen Feldmessungen und Fernerkundungsverfahren genauso wie Windkanalstudien und die Anwendung numerischer Simulationsmodelle.

Mit Hilfe numerischer Simulationsmodelle können in einem Untersuchungsgebiet meteorologische Parameter (z.B. Temperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit) unter der Berücksichtigung von Geländehöhe und Nutzungsstruktur (z.B. Siedlung, Acker, Wald) in einem Raster flächenhaft berechnet werden (Abb. 1). Somit können räumliche und/oder zeitliche Lücken zwischen Messungen geschlossen werden, die an einen festen Standort gebunden sind. Zusätzlich können auch meteorologische Größen berechnet werden, die evtl. nicht gemessen wurden.

Der Großteil praxisnaher umweltmeteorologischer Fragestellungen behandelt einen Raum von der Größenordnung einer Stadt oder einer Region. Die Bandbreite der hier relevanten meteorologischen Erscheinungen haben eine räumliche Erstreckung von Metern bis hin zu einigen Kilometern und eine Zeitdauer von Minuten bis hin zu Stunden. Unter Verwendung des üblichen Einteilungsschemas meteorologischer Erscheinungen müssen diese in die Mikro- und Mesoskala eingeordnet werden. Beispiele für solche Erscheinungen sind der Einfluss der Geländehöhe auf den Wind wie Kanalisierung und Umströmungseffekte, Land-See-Winde, Flurwinde oder auch Düseneffekte in Straßen, Kaltluftabflüsse sowie das Phänomen der urbanen Wärmeinsel. Meteorologische Erscheinungen dieser Größenordnung werden demzufolge mit mikroskaligen oder mesoskaligen Simulationsmodellen errechnet. Die horizontale Erstreckung liegt bei mikroskaligen Modellen im Bereich bis zu 2 km, bei mesoskaligen Modellen im Bereich bis zu 2000 km.

Die Ergebnisse der Klimaanalyse der Regionen Mittlerer Oberrhein und Nordschwarzwald beruhen auf den Berechnungen des dreidimensionalen numerischen Modells FITNAH 3-D (Flow Over Irregular Terrain With Natural And Anthropogenic Heat Sources), entwickelt von Prof. Dr. G. Groß (1992). FITNAH ist ein mesoskaliges, dreidimensionales Klima- und Strömungsmodell zur Ermittlung von Windfeldern und der räumlichen Ausprägung verschiedener Klimaparameter (z.B. Kaltluftmassenströme, Temperaturfelder).

Für die Region Mittlerer Oberrhein wurden zusätzlich die Ergebnisse des numerischen Kaltluftabflussmodells KALM (Schädler und Lohmeyer, 1994) aus der „Ermittlung natürlicher klimatischer Ausgleichsfunktionen in der Region Mittlerer Oberrhein“ des Ingenieurbüros Lohmeyer GmbH & Co. KG aus dem Jahr 2009 verwendet. KALM entspricht den Anforderungen an Kaltluftmodelle der Richtlinie VDI 3787, Blatt 5 "Umweltmeteorologie - Lokale Kaltluft" (2003) und kann mit einer Rasterweite von 50 m den gesamten Bereich erfassen (s. Abb. 1).

2.2 Prinzip Ausgleich- und Wirkungsraum-Gefüge

Bei der Erarbeitung der modellgestützten Klimaanalyse in den Regionen Mittlerer Oberrhein und Nordschwarzwald standen gemäß der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1 „Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen“ austauscharme sommerliche Hochdruckwetterlagen im Vordergrund. Während solcher Wetterlagen herrschen geringe Windgeschwindigkeiten und ein bewölkungsarmer Himmel, sodass tagsüber eine hohe Sonneneinstrahlung (Erwärmung der Erdoberfläche) und nachts eine hohe Ausstrahlung (durch Wärmeabgabe von der Erdoberfläche) ungestört erfolgen können. Solche Wetterlagen treten in den beiden Regionen mit ungefähr 20 % bis 30 % der Jahresstunden auf.

Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen können die unterschiedlichen lokalklimatischen Unterschiede besonders deutlich hervortreten. Eine wichtige Ursache für die Entstehung und die Ausbildung eines typischen lokalklimatischen Gefüges sind die unterschiedlichen Boden- und Oberflächeneigenschaften der verschieden genutzten Räume und ihre Geländehöhe. Daraus ergeben sich Temperaturunterschiede in den

einzelnen Teilräumen und dynamische Luftausgleichsbewegungen zwischen ihnen. Wind und Temperatur sowie daraus abgeleitete Größen sind die hauptsächlichen Einflussfaktoren zur Bewertung des Lokalklimas unter bioklimatischen und lufthygienischen Gesichtspunkten.

Bei der Bearbeitung klimaökologischer Schutzgüter in der Raumplanung müssen Räume ausgewiesen werden können, die während austauscharmer sommerlicher Hochdruckwetterlagen (oder auch: austauscharmen Strahlungswetterlagen) einer überdurchschnittlichen lufthygienischen Belastung oder Überwärmung unterliegen, bzw. im Planungsfall unterliegen werden. Dies sind in der Regel bebaute oder zur Bebauung vorgesehene Flächen, genannt Wirkungsraum. Grenzt an diese ein vegetationsgeprägter unbebauter Raum, in dem frischere und kühlere Luft gebildet werden kann, die durch Austauschprozesse in den Wirkungsraum gelangt, spricht man von einem Ausgleichsraum. Wirkungsraum und Ausgleichsraum werden in der Raumplanung immer im klimaökologischen Zusammenhang betrachtet (s. Abb. 1).

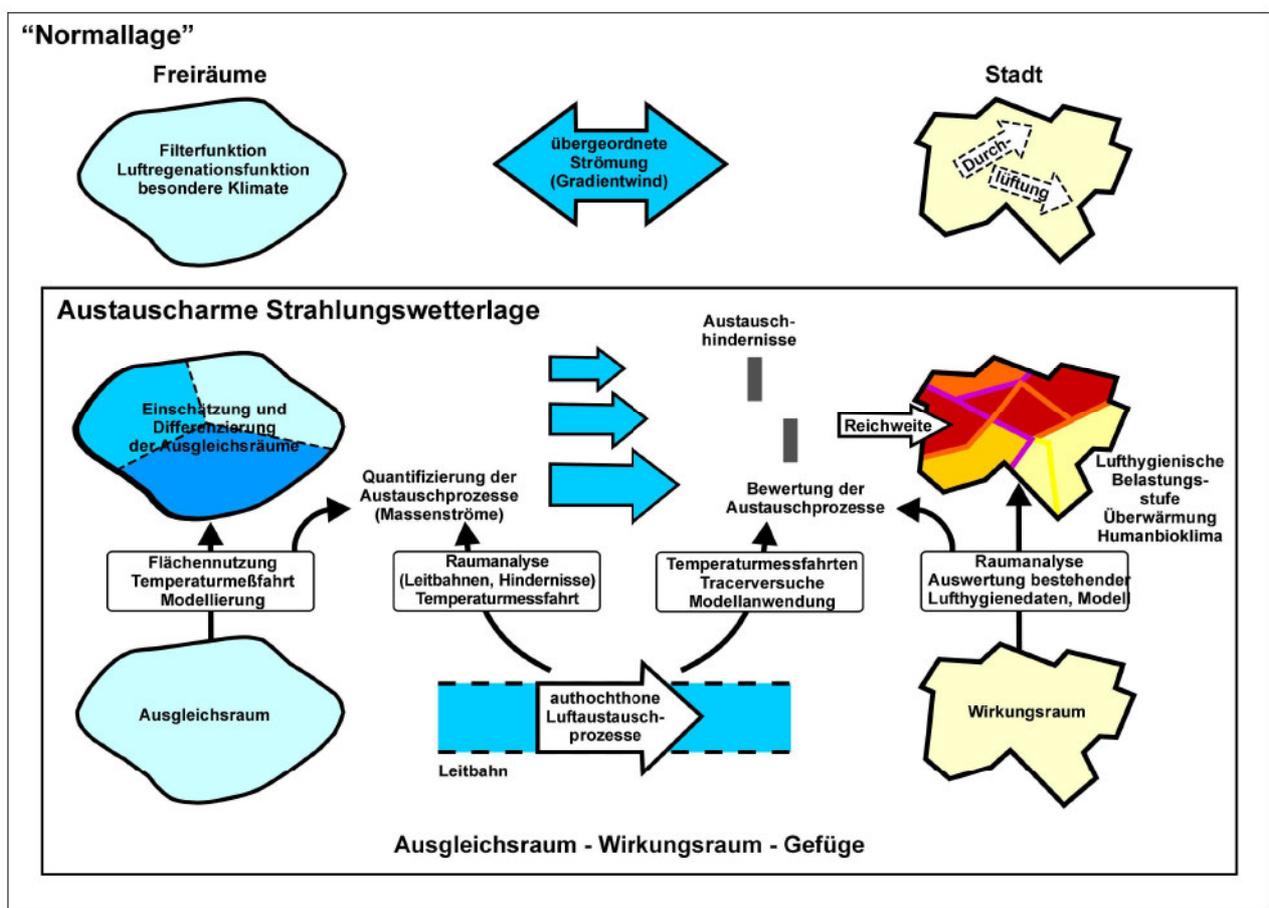


Abb. 1: Ausgleichsraum – Wirkungsraum Gefüge

3 Untersuchungsgegenstand

Im Vordergrund der Klimaanalyse der beiden Regionen Mittlerer Oberrhein und Nordschwarzwald steht die Identifikation von Flächen, die aus klimaökologischer Sicht von Bebauung freigehalten werden sollten. Dazu gehören die Ermittlung von bioklimatischen Gunst- und Ungunsträumen, sowie die Ermittlung von klimaökologischen Ausgleichsgebieten (Kaltluftentstehungsgebiete). Ziel der Klimaanalyse ist die planerische Inwertsetzung der durch die numerische Simulation gewonnenen Aussagen über die klimaökologischen Funktionen. Eine zusätzliche Informationsebene bildeten die mit der Modellrechnung übereinstimmenden Ergebnisse der „Ermittlung natürlicher klimatischer Ausgleichsfunktionen in der Region Mittlerer Oberrhein“ des Ingenieurbüros Lohmeyer GmbH & Co. KG aus dem Jahr 2009.

3.1. Belastungssituation im Wirkungsraum

Bodennahes Lufttemperaturfeld

Grundlage für die hier aufgeführten klimaökologischen Kenngrößen und Prozesse ist die Entwicklung des bodennahen Lufttemperaturfeldes. Durch dessen Ermittlung wird es planerisch möglich, Bereiche mit potenziellen Belastungen abzugrenzen, Aussagen zum Auftreten von Ausgleichsströmungen zu treffen und die räumliche Ausprägung und Wirksamkeit von Kalt- bzw. Frischluftströmungen abzuschätzen.

Der Tagesgang der Lufttemperatur ist direkt an die Strahlungsbilanz eines Standortes gekoppelt und zeigt daher in der Regel einen ausgeprägten Abfall während der Abend- und Nachtstunden. Dieser erreicht kurz vor Sonnenaufgang des nächsten Tages ein Maximum (vgl. Abb. 2 und Station 1). Das Ausmaß der Abkühlung kann dabei – je nach den meteorologischen Verhältnissen, der Lage des Standorts und den landnutzungsabhängigen Boden- und Oberflächeneigenschaften – große Unterschiede aufweisen, so dass sich bereits auf kleinem Raum ein differenziertes Temperaturfeld mit bis zu 8 K Temperaturabweichung einstellen kann. Für das gesamte Untersuchungsgebiet lässt sich sagen, dass bedingt durch die Höhenlagen in der Region Nordschwarzwald das Temperaturniveau gesamthaft um 2 bis 3 K niedriger liegt als in der Region Mittlerer Oberrhein.

Die stärkere nächtliche Abkühlung des Umlandes im Vergleich zur Stadt hat ihre tiefsten Werte kurz vor Sonnenaufgang. Der Temperaturtagesgang in der Stadt hat eine weniger breite Amplitude, die nächtliche Abkühlung fällt schwächer aus. Das Fehlen einer nächtlichen Abkühlung fördert die menschliche Wärmebelastung.

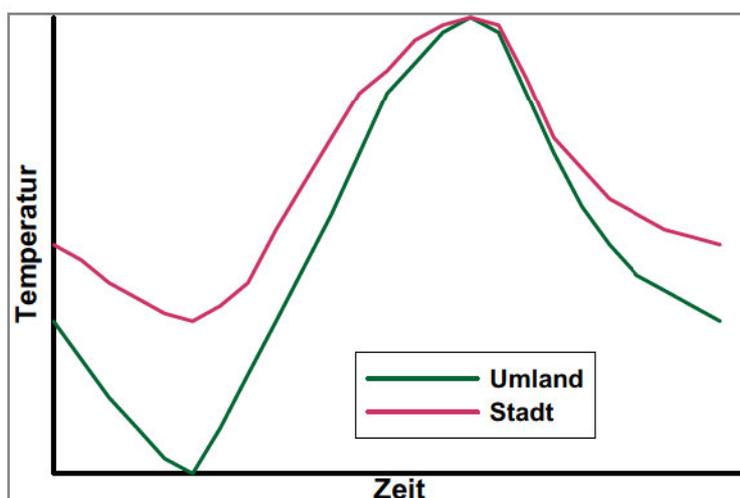


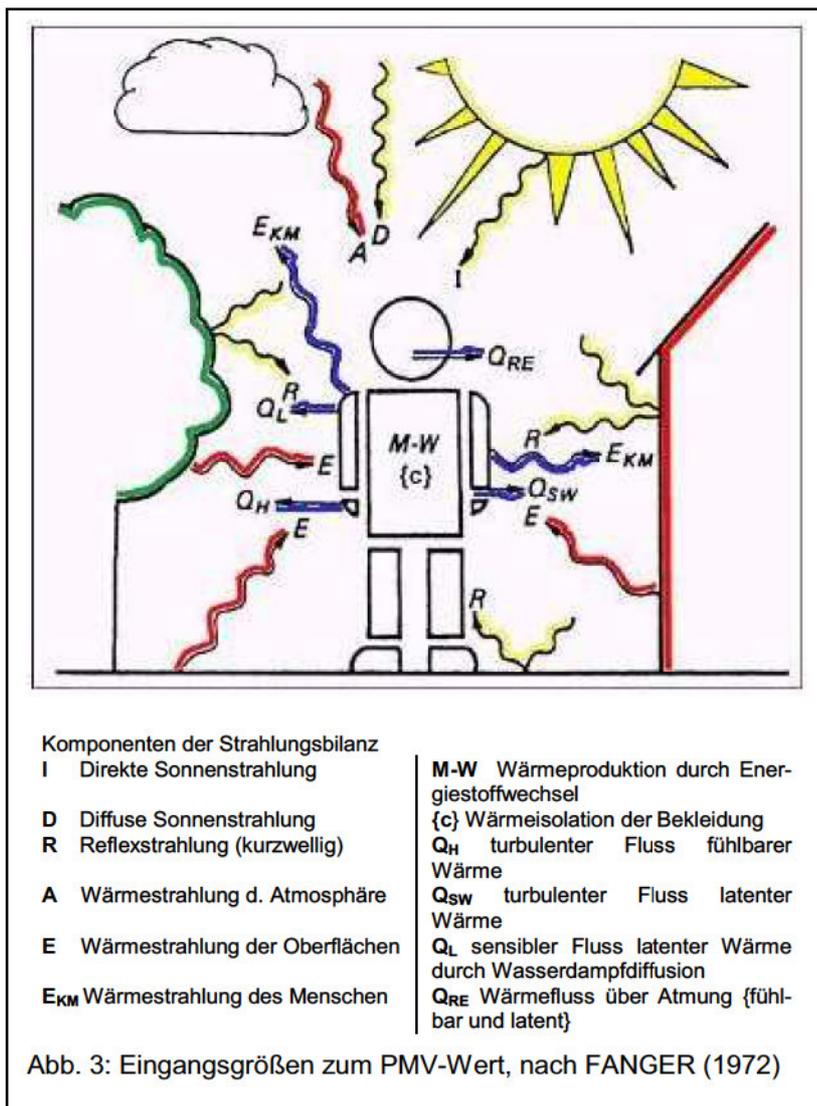
Abb. 2: Vergleich Temperaturtagesgang Stadt und Umland

Bioklimatische Belastung – PMV Wert

In der Bioklimatologie (Wirkung des Klimas auf den Menschen) wird versucht, die verschiedenen Klimaelemente miteinander zu verknüpfen und meist subjektiv zu bewerten, wie dies zum Beispiel bei der thermischen Belastung ("Schwüle") durch die Kombination von Lufttemperatur, Luftfeuchte und Strahlung der Fall ist.

Austauscharme Wetterlagen im Sommer gehen häufig mit einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung in den Siedlungsräumen einher. Die Auswirkungen auf den Menschen machen sich in Wärmebelastung und Schwüleempfindlichkeit bemerkbar. Im Winter hingegen kann es bei austauscharmen Wetterlagen beim Menschen auf Grund der starken Auskühlung zu Kältestress kommen.

Die häufigste Anwendung zur Bestimmung der möglichen Wärmebelastung des menschlichen Organismus findet die skalierte Bewertungsgröße Predicted Mean Vote (PMV), das heißt 'vorhergesagter durchschnittlicher Wert', durch den eine Einschätzung des thermischen Umgebungsmilieus angegeben wird. Nähere Einzelheiten zur Anwendung des Verfahrens sind der VDI Richtlinie 3787 Blatt 2 "Methoden zur humanbiometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung" zu entnehmen, welche den Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse widerspiegelt und dieses Verfahren als Regelanwendung empfiehlt (VDI 1998). Gleichzeitig findet der PMV - Wert als Bewertungsmaßstab im Gegensatz zu den in Deutschland ebenfalls verwendeten Größen „gefühlte Temperatur“ und „physiologische Äquivalenttemperatur“ (PET) in der Bestimmung der menschlichen Wärmebelastung internationale Anerkennung.



Bei der Berechnung des PMV-Wertes müssen wichtige meteorologische Eingangsgrößen wie Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und relative Feuchte am Aufenthaltsort bekannt sein (Abb. 3). Diese meteorologischen Parameter unterscheiden sich innerhalb städtischer Strukturen in weiten Grenzen. In Abhängigkeit von den stadtspezifischen Faktoren (z.B. Bebauungshöhe, Versiegelung, Durchgrünungsgrad) und der Charakterisierung der großräumigen Wettersituation (z.B. Wind, Luftmaseneigenschaften), können mit Hilfe eines mesoskaligen numerischen Simulationsmodelles können diese Verteilungen innerhalb der Siedlungsflächen berechnet werden. Bei dem Ergebnis handelt es sich um die Werteausprägung, wie sie sich in der zweiten Nachthälfte um 4 Uhr zur Zeit der stärksten nächtlichen Abkühlung im Untersuchungsraum einstellt. Das Spektrum der Werte ist immer in Abhängigkeit vom Untersuchungsraum zu sehen. Die bioklimatischen

Belastungsklassen entsprechen den insgesamt vier Kategorien gem. VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1 (sehr hoch, hoch, mäßig, gering).

3.2 Klimaökologische Größen und Prozesse im Kaltlufthaushalt

Kaltluft

Kaltluft ist die bodennahe Luftschicht, die sich bei nächtlicher Ausstrahlung besonders stark abkühlt, weil aus dem Boden nur wenig Wärme nachgeliefert wird. Kaltluft entsteht vor allem über Flächen mit Böden, die eine geringe Wärmespeicherfähigkeit aufweisen und mit isolierenden Vegetationsdecken (Wiese, Wald usw.) bestanden sind. Zur Bewertung von Freiräumen in ihrer Qualität als Ausgleichsraum werden die beiden von Kaltluft geprägten Klimaparameter Kaltluftvolumenstrom und Kaltluftproduktionsrate herangezogen.

Kaltluftvolumenstrom

Unter dem Begriff Kaltluftvolumenstrom versteht man, vereinfacht ausgedrückt, das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite). Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt, dargestellt in m^3 / s . Der Volumenstrom ist ein Maß für den Zustrom von Kaltluft und bestimmt neben der Strömungsgeschwindigkeit die Größenordnung des Durchlüftungspotenzials. Die Klassifizierung des Volumenstroms orientiert sich am auftretenden Wertespektrum innerhalb des Untersuchungsgebietes.

Kaltluftproduktionsrate

Einige landnutzungstypische Charakteristika der Kaltluftentstehung wurden bereits im Abschnitt zum bodennahen Lufttemperaturfeld angesprochen. Ganz allgemein erreicht die nächtliche langwellige Ausstrahlung des Erdbodens bei wolkenlosem Himmel und geringem Wasserdampfgehalt der unteren Luftschichten kurz nach Sonnenuntergang ihren maximalen Wert. Die damit verbundene Abkühlung der Erdoberfläche und der unmittelbar angrenzenden bodennahen Luft wird im weiteren Verlauf einerseits durch Wärmeaustausch aus benachbarten Luftschichten, andererseits durch Wärmeleitung aus den tiefer liegenden Bodenschichten verändert. Für die Ausprägung des bewegten (turbulenten) Wärmeaustausches sind das Relief (Geländeneigung und -ausrichtung) und die Lage des betreffenden Kaltluftentstehungsgebietes im thermisch unterschiedlichen Mosaik angrenzender Flächen verantwortlich. Die Wärmenachlieferung aus dem Boden wird vornehmlich von der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität des Substrates sowie von eventuell vorhandenen Oberflächenbedeckungen wie Vegetation und Laubstreu bestimmt.

Die Kaltluftproduktionsrate beschreibt die Menge der sich innerhalb einer Stunde pro Quadratmeter relativ zu ihrer Umgebung abkühlenden Luft. Ihre Bestimmung kann mit erheblichen Fehlern behaftet sein, was sowohl für die modellhafte Berechnung als auch für die Geländemessung gilt. Für die Modellierung größerer Untersuchungsgebiete ist beispielsweise kaum davon auszugehen, dass alle wichtigen, zum Teil sehr heterogenen Variablen wie etwa die thermischen Bodeneigenschaften – die u. a. von der Dichte des Substrates, dem Luft- und Wassergehalt und dem Porenvolumen abhängen – aus den Eingangsdaten in hinreichender Differenziertheit parametrisiert werden können. Daher ist bei der Angabe von Kaltluftproduktionsraten mit relativ hohen Unsicherheiten zu rechnen. Wie beim Kaltluftvolumenstrom orientiert sich auch die Einstufung der Kaltluftproduktionsrate am auftretenden Wertespektrum innerhalb des Untersuchungsgebietes (s. Station 1, Abb. I)..

Im Folgenden wird die Kaltluftproduktion über verschiedenen Oberflächen dargestellt.



Bild 1: Eine wolkenlose, trockene Atmosphäre begünstigt eine starke nächtliche Abkühlung genauso wie ein Erdboden mit geringer Wärmeleitfähigkeit, z.B. ein trockener Sandboden. Dabei wirkt der hohe Luftanteil innerhalb des Bodens isolierend.



Bild 2: Wasser hat eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Bei einem feuchten, grundwassernahen Boden führt dies zu geringerer Abkühlung der Luft, da die Bodenwärme besser an die Oberfläche geleitet werden kann als bei einem trockenem Boden.



Bild 3: Daneben spielt aber auch die Intensität des Luftaustausches mit der Höhe (Turbulenz) eine Rolle, denn bei starker vertikaler Vermischung wird in der Höhe lagernde wärmere Luft zum Boden eingemischt und verhindert damit eine starke Abkühlung.



Bild 4: Ein geringer Luftaustausch mit der Höhe (stabile Luftschichtung) begünstigt eine niedrige Temperatur in den Nachtstunden. Wolken hemmen darüber hinaus die nächtliche Ausstrahlung der Erdoberfläche.

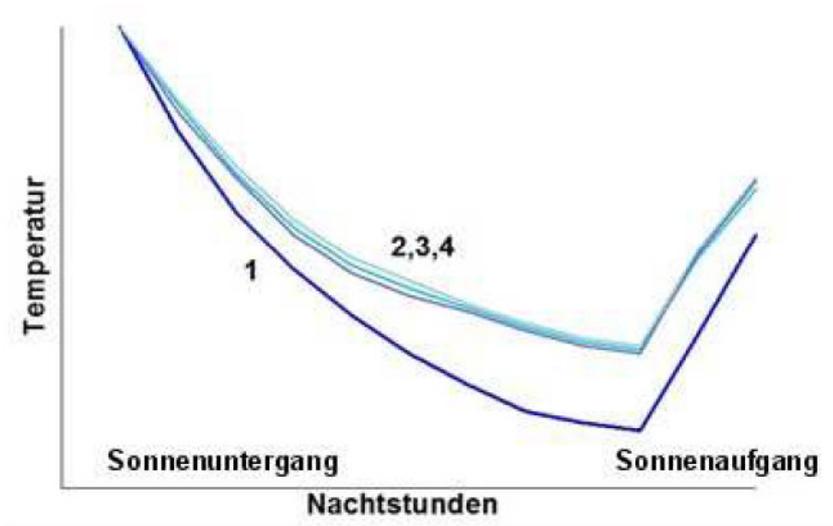


Abb. 4: Schematischer Temperaturverlauf zu vorigen gezeigten Situationen

3.3 Klimaökologische Ausgleichsleistungen durch Luftaustauschprozesse

Die unterschiedliche Lufttemperaturverteilung, die sich bei austauscharmen sommerlichen Hochdruckwetterlagen in der Nacht zwischen kühleren Grün- und Freiflächen und wärmeren Siedlungsflächen einstellt, bedingt horizontale und vertikale Luftdruckunterschiede. Zwischen diesen Flächen mit unterschiedlichem Luftdruck entstehen Ausgleichsströmungen, welche sich in lokalen thermischen Windsystemen widerspiegeln. Die wichtigsten nächtlichen Luftströmungen dieser Art sind zum einen die gravitationsbedingten Berg- und Hangabwinde, zum anderen die als direkte Ausgleichsströmungen vom hohen zum tiefen Luftdruck aufzufassenden Flurwinde.

Gravitationsbedingte Berg- und Hangabwinde

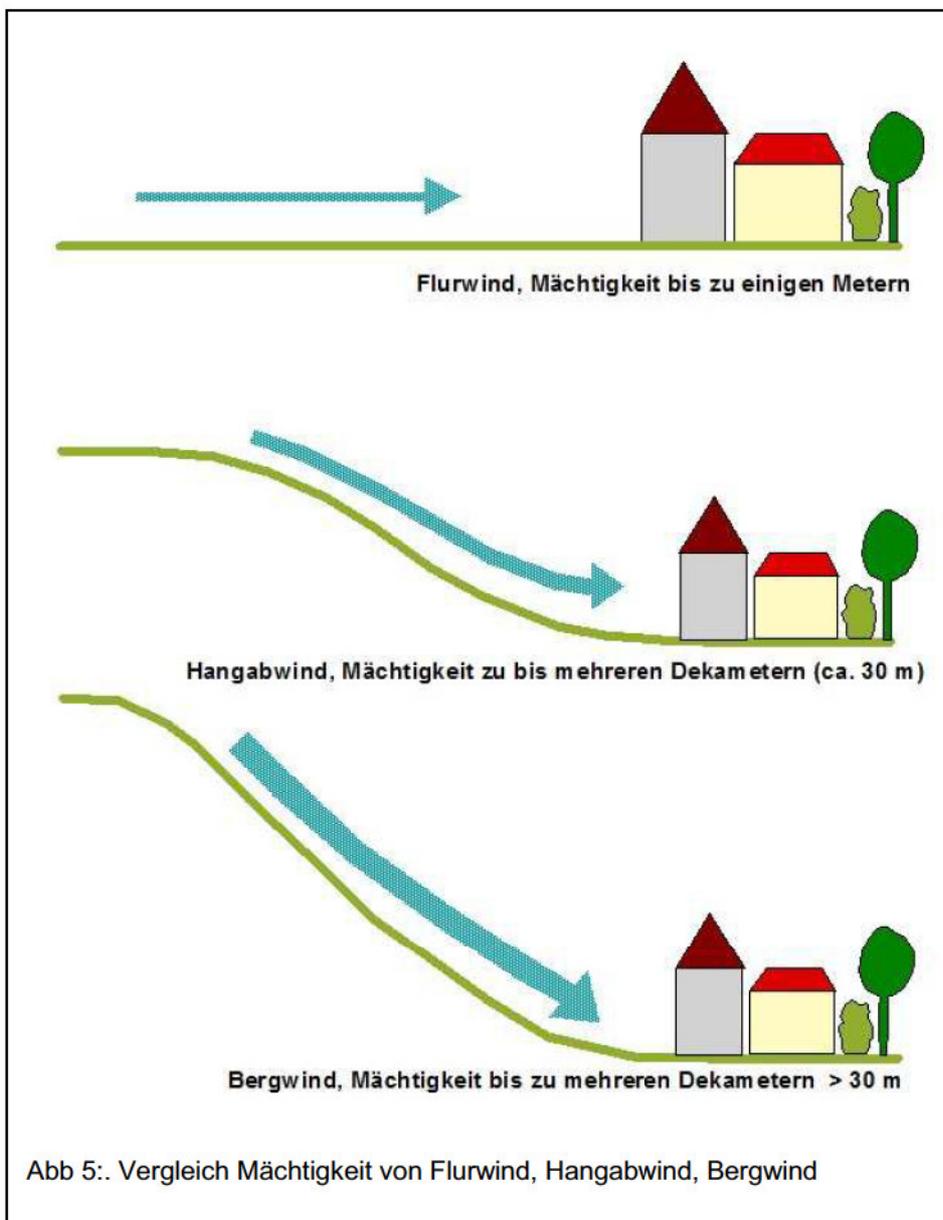
Ab einer Geländeneigung von ein bis zwei Grad setzen nach Sonnenuntergang über natürlichen Oberflächen abwärtsgerichtete Strömungen ein, weil die hangnahe Luft durch nächtliche Ausstrahlung stärker abkühlt als die freie Luft in gleicher Höhe. Aufgrund ihrer höheren Dichte fließt die kühlere Bodenluft hangabwärts. Die Ausprägung dieses kleinräumigen Phänomens wird in erster Linie durch den Temperaturunterschied zur umgebenden Luft und durch die Neigung des Geländes bestimmt (siehe z.B. Mosimann et al. 1999). Hangabwinde erreichen maximale Abflussgeschwindigkeiten von etwa 3 m/s, ihre Mächtigkeit liegt zumeist unterhalb von 10 m. Sie können bis zu 1,5 km in die Bebauung eindringen (Gross et al. 1996). Im Berg- und Bergvorland sind Hangwinde oftmals Teilglieder einer übergeordneten Berg- und Talwind-Zirkulation. Aufgrund ihrer größeren Einzugsgebiete sind nächtliche Bergwinde deutlich stärker ausgeprägt als Hangabwinde und erreichen bei Mächtigkeiten von mehreren Dekametern Strömungsgeschwindigkeiten von über 5 m/s (Werner 1979) (vgl. Abb. 5)

Flurwinde

Neben diesen durch das Relief beeinflussten Strömungen bilden sich in ebenen Lagen unter günstigen Bedingungen sogenannte Flurwinde aus. Sie sind radial auf einen überwärmten Raum ausgerichtet und an hindernisarme Leitbahnen gebunden. Flurwinde entstehen, wenn sich infolge der Überwärmung von überbauten oder versiegelten Gebieten – und dem damit verbundenen konvektiven Aufstieg der betroffenen Luftmassen – gegenüber dem Umland ein lokales thermisches Tief aufbaut. Der resultierende Druckgradient kann daraufhin durch einströmende kühlere Luftmassen aus dem Umland ausgeglichen werden (u.a. Kiese et al. 1992). Die Flurwinde sind eng begrenzte, oftmals nur schwach ausgeprägte Strömungsphänomene, die be-

reits durch einen schwachen überlagernden Wind überdeckt werden können. Je nach landschaftlicher Ausprägung liegt ihre Geschwindigkeit meist unterhalb von 2 m/s, ihre Reichweite in die Bebauung beträgt maximal 2 km (Mosimann et al. 1999). Die Mächtigkeit kann mehrere Meter umfassen.

Den hier beschriebenen Phänomenen kommt eine besondere landschaftsplanerische Bedeutung zu: Größere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernis. Aus diesem Grund ist die Durchlüftung der Stadtkörper und ihr Luftaustausch mit dem Umland generell herabgesetzt. Die Abfuhr von schadstoffbelasteten und überwärmten Luftmassen in den Straßenschluchten kann in Abhängigkeit von der Bebauungsart und -dichte deutlich eingeschränkt sein. Speziell bei austauschschwachen Wetterlagen und für Städte in Muldenlage wirken sich diese Faktoren bioklimatisch sehr ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr frischer und kühlerer Luft eine bedeutende klima- und immissionsökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.



4 Klimaökologische Situation im Untersuchungsgebiet

4.1 Auswahl eines exemplarischen Raumes

Aus dem Gesamtuntersuchungsgebiet wurde der Raum zwischen Gernsbach und Rastatt als Beispielraum ausgesucht. Rastatt liegt bereits in der oberrheinischen Tiefebene, Gaggenau im unteren Murgtal des Nordschwarzwaldes. Hier treten die lokalklimatischen Ausprägungen in Form von nächtlicher Überwärmung deutlich zutage, und die entstehenden Luftaustauschprozesse erzielen eine starke Wirksamkeit. An Hand des Beispielraumes werden die dort auftretenden klimaökologischen Zusammenhänge erläutert und illustriert. Allein das Phänomen des Flurwindes wird am Beispiel der Stadt Karlsruhe dargestellt, da hier Ausprägung und Wirksamkeit besonders hoch sind.

4.2 Stationen der klimaökologischen Prozesse

Die klimaökologischen Zusammenhänge und Prozesse werden an so genannten „Stationen“ erläutert. Jede Station umfasst zwei Abschnitte, einen allgemeingültigen und einen ortsbezogenen. Die ortsbezogenen Teile der Stationen beziehen sich auf den Beispielraum aus der Region Mittlerer Oberrhein, die gleichen klimaökologischen Wirkmechanismen wurden auch an Stationen in der Region Nordschwarzwald verortet (vgl. Abb 6 und 7).

1. Kaltluftentstehung / Kaltluftproduktion
2. Hangabwind
3. Tagesperiodische Hangabwindssysteme / Bergwind
4. Hinderniswirkung verschiedener Strukturen
5. Einwirkbereiche Kaltluft
6. Bioklimatische Belastungssituation im Siedlungsraum
7. Kaltluftleitbahn

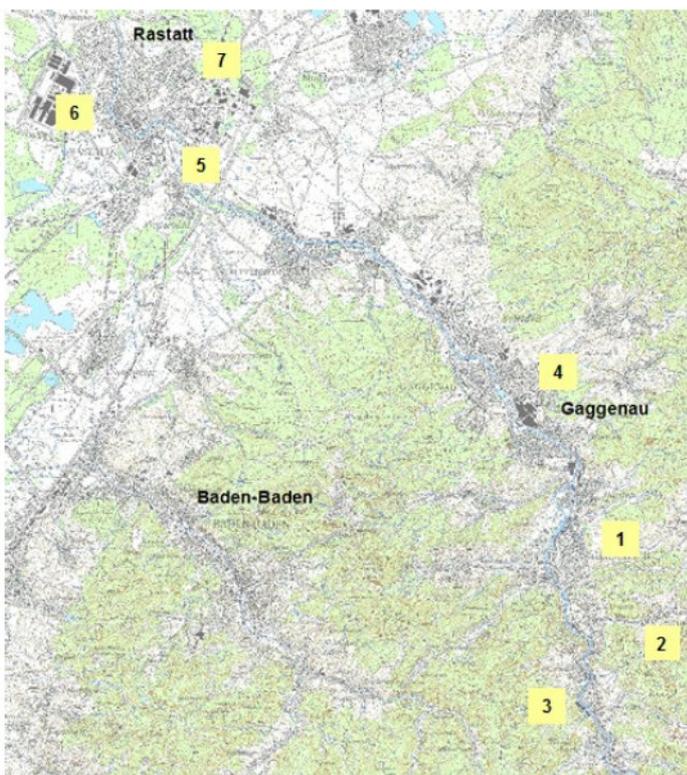


Abb. 6: Verortung der Stationen der klimaökologischen Prozesse in der Region Mittlerer Oberrhein

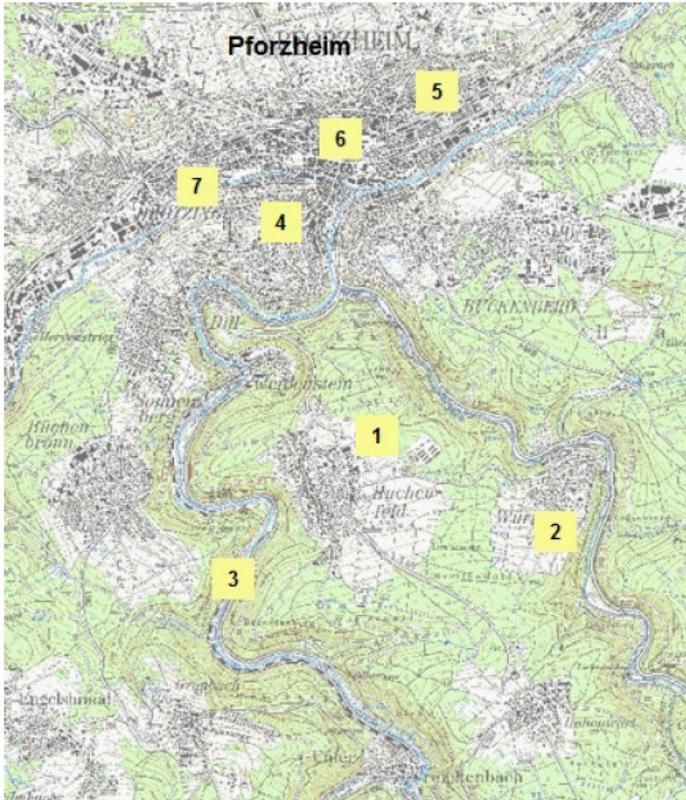


Abb. 7: Verortung der Stationen der klimaökologischen Prozesse in der Region Nordschwarzwald

Das Phänomen Flurwind hat seine deutlichste Ausprägung im Raum Karlsruhe und wird daher am Beispiel Karlsruhe / Alter Flughafen illustriert.

4.2 Ausgangssituation bodennahe Lufttemperaturfeld

Als Ausgangssituation und Grundvoraussetzung für die klimaökologischen Prozesse gilt das bodennahe Lufttemperaturfeld in seiner unterschiedlichen Ausprägung. Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potenziellen bioklimatischen Belastungen abzugrenzen, Aussagen zum Auftreten von Luftaustauschprozessen zu treffen und die räumliche Intensität von Kalt- bzw. Frischluftströmungen abzuschätzen (vgl. Kap. 3.1).

Wie in den Abbildungen 8 und 9 zu erkennen ist, zeigen die Siedlungsflächen im Raum der Stationen beider Regionen während einer Strahlungsnacht deutlich höhere Temperaturen im Vergleich zu den umliegenden Landwirtschafts- und Waldflächen. Der Temperaturgradient kann in Pforzheim zwischen Freifläche und Siedlungsfläche auf einer Strecke von 1600 m 8 K betragen. In Gaggenau ergibt sich ein Temperaturgradient zwischen Freifläche und Siedlung von 7 K auf einer Strecke von 500 m.

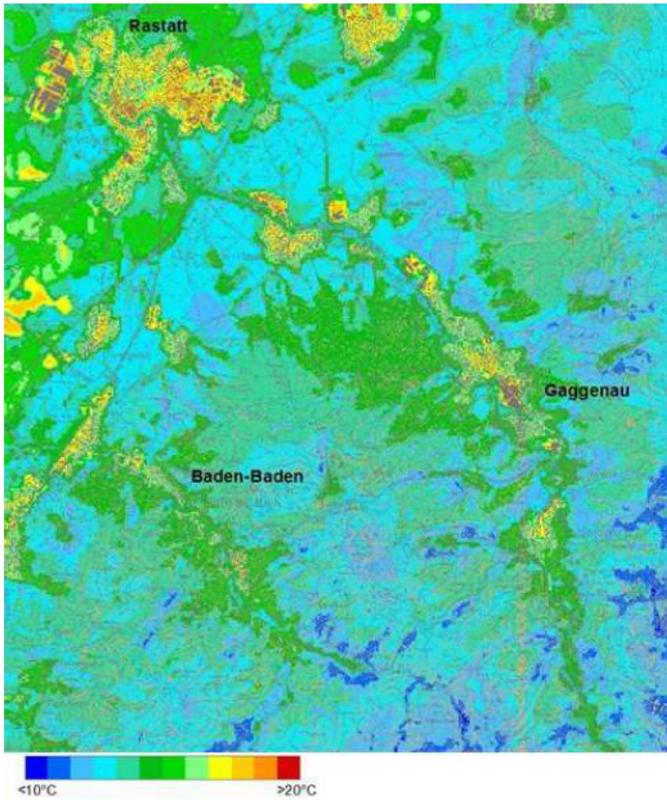


Abb. 8: Situation des bodennahen Lufttemperaturfeldes um 4 Uhr morgens in 2 m Höhe während einer austauscharmen Hochdruckwetterlage im Raum Gernsbach / Rastatt. Angaben in °C.

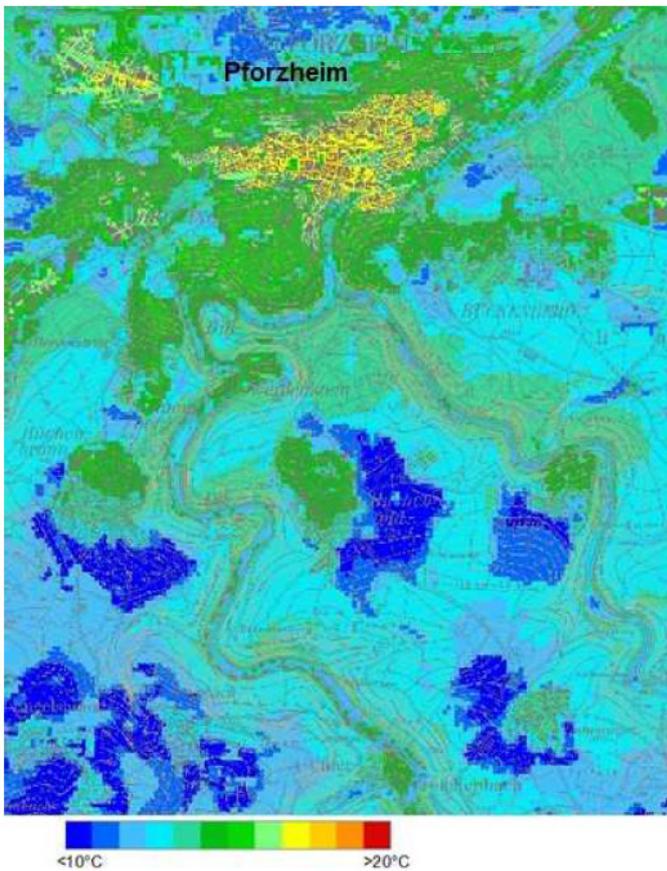
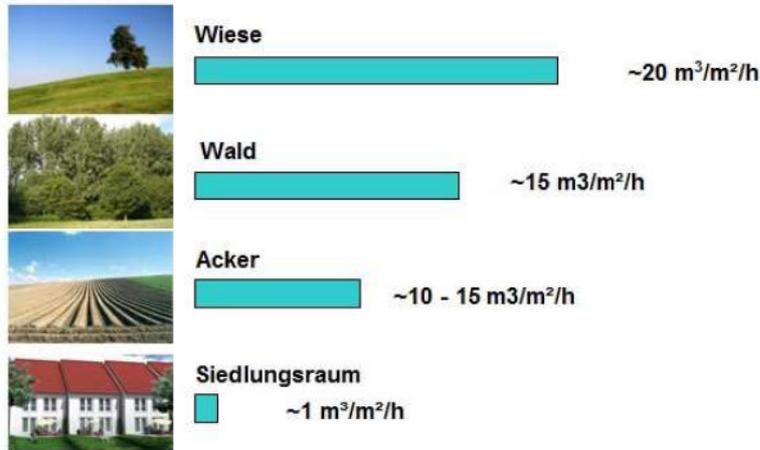


Abb. 9: Situation des bodennahen Lufttemperaturfeldes um 4 Uhr morgens in 2 m Höhe während einer austauscharmen Hochdruckwetterlage im Raum Pforzheim. Angaben in °C.

Station 1: Kaltluftentstehung / Kaltluftproduktion (Gernsbach-Reichental)



Verschiedene vegetationsgeprägte Freiflächen weisen unterschiedliche Abkühlungsintensitäten und somit eine unterschiedlich hohe Kaltluftproduktion auf.

Das gebildete Volumen kalter Luft kann mit Hilfe der Kaltluftproduktionsrate abgeschätzt werden.

Die Einheit ist dabei m³ gebildete Kaltluft pro m² Boden und pro Stunde.

Station 1, Abb. I: Unterschiedliche Kaltluftproduktionsraten

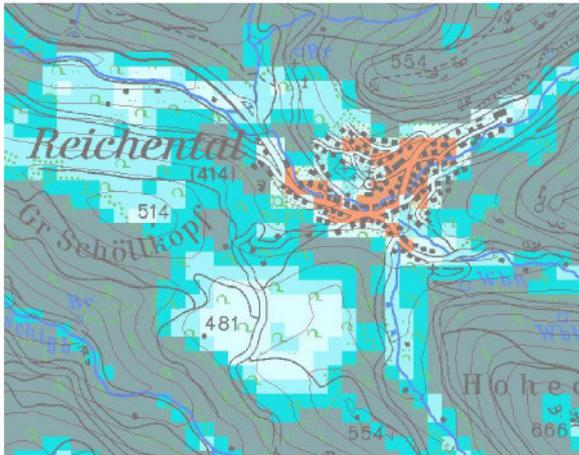
Kaltluft ist die bodennahe Luftschicht, die sich bei nächtlicher Ausstrahlung besonders stark abkühlt, weil aus dem Boden nur wenig Wärme nachgeliefert wird (Station 1, Abb. I). Die Kaltluftproduktion bewachsener Freiflächen ist lokalklimatisch von Bedeutung, da somit Luftströmungen in Gang gesetzt werden, die z.B. lufthygienische und bioklimatische Belastungen vermindern (s. Kap. 3.2).

Die Abkühlung des Erdbodens erreicht bei wolkenlosem Himmel und geringem Wasserdampfgehalt der unteren Luftschichten – d.h. bei verminderter atmosphärischer Gegenstrahlung – kurz vor Sonnenaufgang ihren maximalen Wert. Die damit verbundene Abkühlung der Erdoberfläche und der unmittelbar angrenzenden bodennahen Luft wird im weiteren Verlauf einerseits durch Luftaustauschprozesse mit der Umgebung, andererseits durch Wärmeleitung aus tiefer liegenden Bodenschichten beeinflusst. Für die Ausprägung der Kaltluftproduktion sind das Relief (Ausrichtung zur Sonneneinstrahlung, Geländeneigung) und die Beschaffenheit der Freifläche des betreffenden Kaltluftentstehungsgebietes verantwortlich. Hier bestimmen die Oberflächenbedeckung wie Vegetation / Laubstreu sowie die Wärmespeicherfähigkeit eines Bodens die Wärmenachlieferung aus dem Boden.

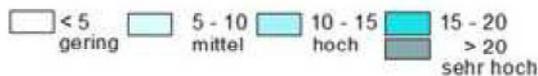
Das Ausmaß der Kaltluftproduktionsrate ist neben der unterschiedlichen Ausstattung der Freiflächen (Wiese, Gehölzbewuchs, Wald) besonders von der Hangneigung abhängig, da die an den Hängen gebildete Kaltluft hangabwärts fließt und so immer neue Kaltluft nachgeliefert werden kann. Ein Beispiel:

Kuppenlage mit Wiese, Hangneigung 2° - 4°	Kaltluftproduktion 8 bis 10 m³/m²/h
Gehölzfläche, Hangneigung 8° - 10°	Kaltluftproduktion 10 bis 15 m³/m²/h
Bewaldeter Hangbereich, Hangneigung 25° - 30°	Kaltluftproduktion 30 bis 40 m³/m²/h

Die auftretenden Kaltluftproduktionsraten decken das im gesamten Untersuchungsraum auftretende Wertespektrum ab, wobei innerhalb der Siedlungsflächen mit weniger als $5 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ die niedrigsten Werte auftreten. Die Kaltluftproduktion von Waldflächen ist sehr von den Geländebedingungen abhängig. Im Kronenbereich entstehen zwar relativ hohe Kaltluftvolumina, die in ebener Lage in den Stammraum einsinken und kaum aus dem Bestand austreten. Der Wald „ertrinkt“ sozusagen in seiner Kaltluft. Erst mit entsprechender Hangneigung, wie sie im Raum Weisenbach vorliegt, kann die Kaltluft dem Gefälle folgend aus den Waldflächen austreten und wird weiterhin durch die im Kronenbereich gebildete Kaltluft ersetzt. Somit wird über den stark geneigten Waldflächen besonders viel Kaltluft produziert.



Nächtliche Kaltluftproduktion in m^3/Stunde

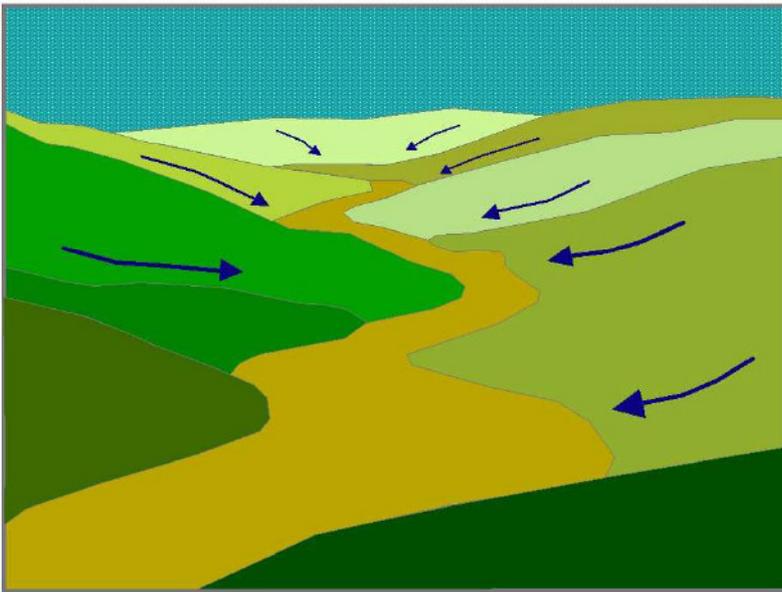


Station 1, Abb. II: Kaltluftproduktionsraten bei Weisenbach

Planungshinweise

Die klimaökologische Bedeutung der Kaltluftproduktion liegt in der Entstehung von Kaltluftströmungen, die lufthygienische und bioklimatische Belastungen vermindern können. Kaltluftproduzierende Flächen stellen klimaökologische Ausgleichsräume dar. Diese Funktion muss auf den Ebenen des Landschaftsrahmenplans und des Landschaftsplans berücksichtigt werden, z.B. durch das Freihalten von Bebauung und / oder die Vernetzung von Grünflächen. Andererseits können unter bestimmten Geländegegebenheiten Kaltluftsammelgebiete entstehen, die durch den Kaltluftstau eine steigende Häufigkeit im Auftreten von Nebel sowie Früh- und Spätfrösten mit sich bringt.

Station 2: Hangabwinde (Lautenbach)



Kaltluft bildet sich nachts über vegetationsgeprägten Freiflächen.

Kaltluft folgt dem Gefälle und sammelt sich im Talgrund.

Die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft richtet sich nach der Geländeneigung, der Beschaffenheit der Geländeoberflächen und der Größe des Kaltlufteinzugsgebietes.

Station 2, Abb. I: Kaltluftabfluss am Hang (nach Lohmeyer, 1994)

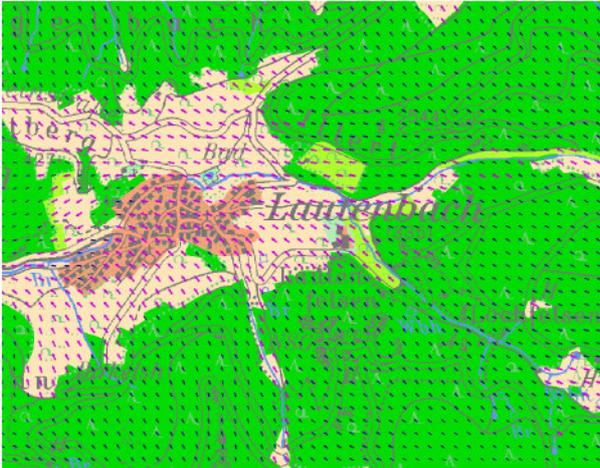
Die variable Lufttemperaturverteilung, die sich bei austauscharmen Wetterlagen (also bei windarmen und bewölkungsfreien Wetterlagen) zwischen überwärmten Siedlungsflächen und kühleren Grün / Freiflächen einstellt, bedingt horizontale und vertikale Luftdruckunterschiede. Diese sind wiederum Auslöser für lokale thermische Windsysteme. Eine wichtige nächtliche Luftströmung dieser Art sind die gravitationsbedingten Hangabwinde.

Ab einer Geländeneigung von ein bis zwei Grad setzen nach Sonnenuntergang über natürlichen Oberflächen abwärtsgerichtete Strömungen ein, weil die hangnahe Luft durch nächtliche Ausstrahlung stärker abkühlt als die freie Luft in gleicher Höhe (Station 2, Abb. I). Aufgrund ihrer höheren Dichte fließt die kühlere bodennahe Kaltluft hangabwärts. Die Ausprägung dieses kleinräumigen Phänomens wird in erster Linie durch das Temperaturdefizit zur umgebenden Luft und durch die Neigung des Geländes bestimmt.

Hangabwinde erreichen maximale Abflussgeschwindigkeiten von etwa 3 m/s, ihre Mächtigkeit liegt zumeist unterhalb von 10 m. Sie können bis zu 1,5 km in bebaute Siedlungsflächen eindringen. Um diese Wirksamkeit zu erreichen, sollte eine Streckenlänge von 400 m überflossen werden.

Die Kaltlufteinzugsgebiete der Hangabwinde umfassen Hänge und Hangmulden.

Die Strömungsgeschwindigkeiten der Hangabwinde sind, bezogen auf das Gesamtgebiet, im Bereich Lautenbach als überdurchschnittlich hoch anzusehen. Dies ist im Wesentlichen auf die starke Hangneigung des Geländes von bis zu 30° zurückzuführen. So beträgt die Strömungsgeschwindigkeit über Freiland bis zu 3 m/s und geht in den Waldflächen auf 0,6 bis 0,9 m/s zurück, da der Baumbestand bremsend auf die Hangabwinde einwirkt



Strömungsgeschwindigkeit
und -Richtung

-  > 1 (m/s)
-  < 1 (m/s)

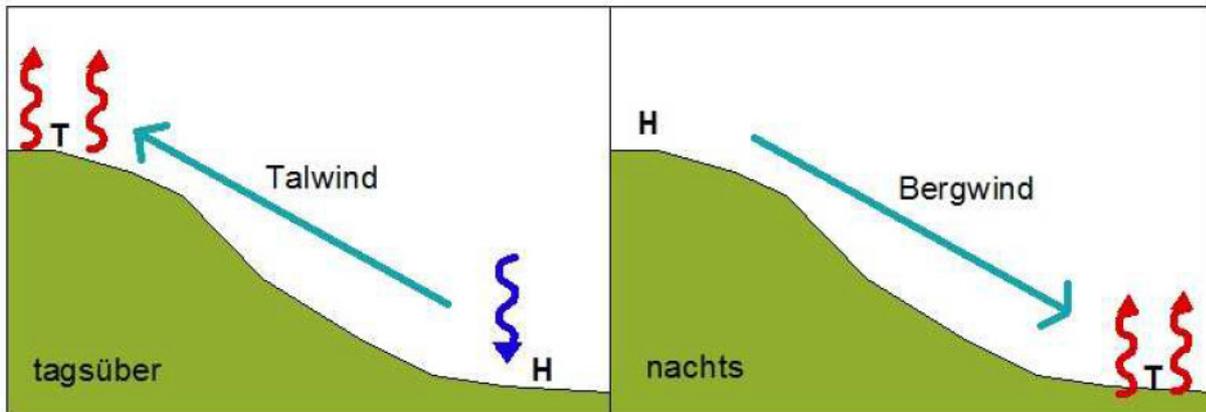
Station 2, Abb. II: Hangabwinde in Lautenbach

Planungshinweise

Hangwinde sind eng gekoppelt an Kaltluftentstehungsgebiete und Luftleitbahnen. Als besonders wirksame Gebiete für die Entstehung von Kaltluft gelten Wiesen, da hier die nächtliche Abkühlung der bodennahen Luft besonders hoch ist. Auch Waldbestände weisen eine hohe Kaltluftproduktion auf. Solange Kaltluftentstehungsflächen nicht direkt an überwärmte Siedlungsbereiche (Wirkungsraum) grenzen, ermöglichen Luftleitbahnen (z.B. gehölzarme Talbereiche oder größere zusammenhängende Grünflächen) die Kaltluftführung von ihrem Entstehungsgebiet hin zu in einem wärmeren Gebiet (z.B. Siedlungsfläche). Die für die Entstehung von Hangwinden in Frage kommenden bewachsenen Freiflächen müssen somit erhalten und geschützt werden. Auf der Ebene des Landschaftsrahmenplans und des Landschaftsplans kann dieses Ziel durch ein Freihalten von Bebauung erreicht werden.

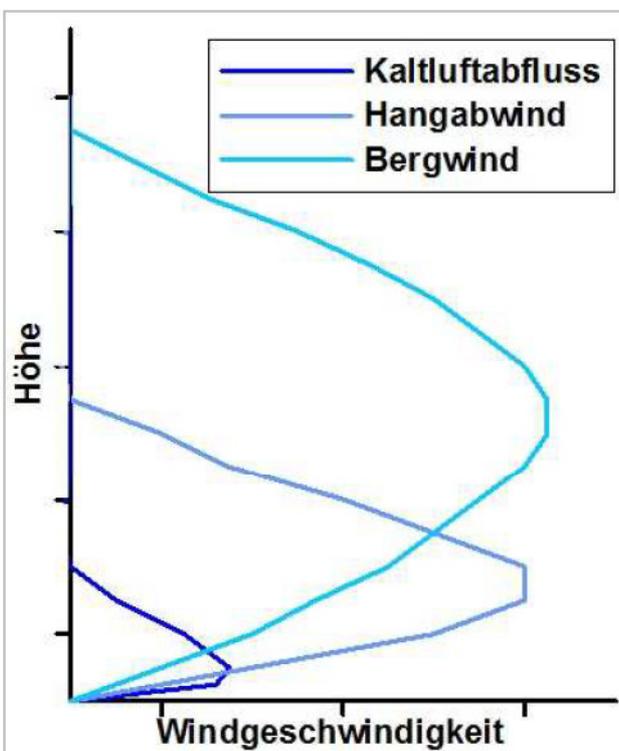
Station 3: Tagesperiodische Hangabwindssysteme / Bergwind (Scheuern)

Im Berg- und Bergvorland sind Hangabwinde oftmals Teilglieder einer übergeordneten Berg- und Talwind-Zirkulation (Abb I). Aufgrund ihrer größeren Einzugsgebiete weisen nächtliche Bergwinde höhere Mächtigkeiten auf als Hangabwinde. Die Windgeschwindigkeit ist ähnlich ausgeprägt wie bei Hangabwinden.



Station 3, Abb. I: Schematische Darstellung Berg- Talwindsystem

Nach Sonnenaufgang werden zuerst die Talhänge und Kuppenlagen erwärmt. In den Tälern sammelt sich die kalte Luft, die schwerer ist und dadurch absinkt, bzw. talabwärts fließt. Da an den sich früher erwärmenden Kuppenlagen auch früher Wärme abgestrahlt wird, bilden sich hier Tiefdruckgebiete. Die schwerere kalte Luft in den Tälern hingegen erzeugt einen hohen Luftdruck. Die sich hieraus ergebende Druckausgleichsströmung hat einen Wind vom Tal zum Berg zur Folge - den Talwind.



Im Laufe des Tages werden auch die Täler erwärmt. Doch beim Einbruch der Nacht kühlen die Kuppenlagen und Hänge schnell ab. Es bilden sich daher auf den Bergen Hochdruckgebiete und in den Tälern Tiefdruckgebiete – als Druckausgleichsströmung weht ein Bergwind.

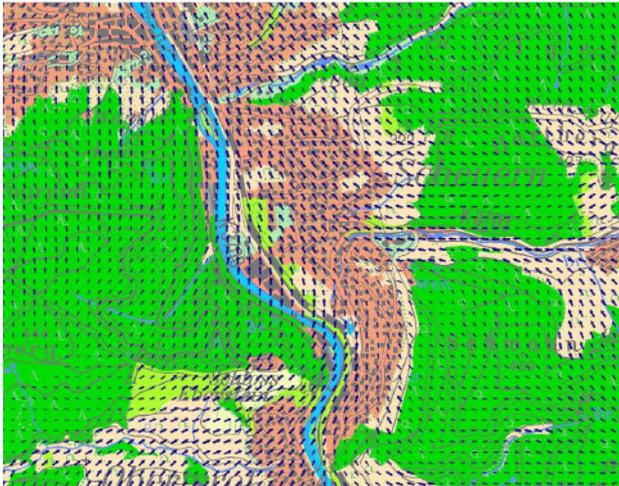
Ausgedehnte Hangwinde weisen meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten und eine höhere Mächtigkeit als die kleinräumigeren lokalen Kaltluftabflüsse auf.

Je nach räumlicher Größenordnung kann also zwischen „Kaltluftabflüssen“, Hangabwinden“ oder „Bergwinden“ unterschieden werden.

Bergwinde erreichen maximale Abflussgeschwindigkeiten von etwa 5 m/s. Ihre Mächtigkeit kann mehrere Dekameter betragen.

Station 3, Abb. II: Intensitätsunterschied bei Hangabwindssystemen

Am Beispiel des Siedlungsbereiches Scheuern wird sichtbar, wie sich die Hangabwinde aus dem Bereich Lautenbach in das Strömungssystem innerhalb des Murgtals einfügen. Während der Hangabwind innerhalb der Tiefenlinie südlich des Hartbergs noch eine Ost-West-Orientierung aufweist, schwenkt er in Höhe der Ortschaft Scheuern in eine nordwestliche Fließrichtung ein. Aufgrund der Hinderniswirkung der bebauten Areale ist die Fließgeschwindigkeit mit 1,0 m/s bis 1,8 m/s etwas geringer ausgeprägt als im angrenzenden Raum Lautenbach. Außerhalb der Siedlungsflächen kann die Strömungsgeschwindigkeit wieder zunehmen.



↑ Strömungsrichtung der Kaltluft

Station 3, Abb. III: Kaltluftabfluss und Hangabwinde in der Ortschaft Scheuern

Planungshinweise

Bergwinde sind – genau wie Hangwinde – eng an Kaltluftentstehungsgebiete gekoppelt. Die entsprechenden kaltluftproduzierenden Freiflächen müssen erhalten und geschützt werden. Daneben kann auch darauf geachtet werden, die Qualität der Freiflächen hinsichtlich ihrer Kaltluftproduktion zu verbessern. Hierzu gehört die Umwandlung von Ackerflächen zu Wiesen- oder Waldflächen. In der Regel sollten kaltluftproduzierenden Freiflächen auf der Ebene des Landschaftsrahmenplans und des Landschaftsplans von Bebauung freigehalten werden. Sollte dem nicht nachgekommen werden können, sollte die Bebauung hangparallel und nicht riegelartig ausgerichtet sein, um ein Abfließen der Kaltluft (in diesem Fall in Form von Bergwinden) zu ermöglichen und einen Kaltluftstau vor der Bebauung zu vermeiden. Diese Bebauungsart wirkt sich zudem positiv auf die Durchlüftung aus. Zusätzlich wäre im Fall einer Bebauung auf einen hohen Grünflächenanteil zu achten.