

Regionale Klimaanalyse Hochrhein-Bodensee (2017)

Bearbeitung:
Prof. Dr. Andreas Schwab
Pädagogische Hochschule Weingarten
Kirchplatz 2
88250 Weingarten

Erstellt im Auftrag des Regionalverbandes Hochrhein-Bodensee

Inhalt

1	Einleitung	5
2	Die Bedeutung von Klima und Luft in der räumlichen Planung	7
2.1	Wärmebelastung durch hohe Temperaturen und Schwüle	7
2.2	Schlechte Durchlüftung bei geringen Windgeschwindigkeiten und Inversionswetterlagen	9
2.3	Entlastung durch lokale Windsysteme	12
2.3.1	Hangwindsysteme und Berg-Tal-Windsysteme	12
2.3.2	Flurwindsysteme (=Stadt-Umland-Windsysteme)	15
2.3.3	Land-See-Windsysteme	15
2.4	Auswirkungen des globalen Klimawandels	16
2.5	Bedeutung des Klimas in der räumlichen Planung	16
2.6	Zusammenfassung	17
3	Klimatische Einordnung des Untersuchungsraums	18
3.1	Allgemeine Beschreibung	18
3.2	Klimatische Einordnung der Region	22
3.2.1	Großklimatische Einordnung	22
3.2.2	Mittlere Lufttemperaturen und Anzahl der Sommertage	23
3.2.3	Wind	23
3.2.4	Inversionshäufigkeit	26
3.2.5	Durchlüftungsverhältnisse	26
3.2.6	Wärmebelastung	26
3.2.7	Zusammenfassung	27
4	Fragestellungen und Konzeption der Regionalen Klimaanalyse	28
4.1	Fragestellungen	28
4.2	Konzeption	28
5	Grundlagen zum Kartenteil	30
5.1	Bereitstellung der Datengrundlage	30
5.1.1	Räumliche Ausdehnung der Rechengebiete	30
5.1.2	Horizontale Auflösung der Rechengitter	30
5.1.3	Landnutzungsdaten	30
5.1.4	Digitales Geländemodell (DGM)	31
5.2	Anwendung reliefanalytischer Verfahren	32
5.2.1	Charakterisierung von Einzugsgebieten	32
5.2.2	Potentielle Kaltluftstaugebiete	40
5.2.3	Sonnenuntergangszeiten	43
5.3	Kaltluftabflussmodellierung mit KLAM_21	47
5.3.1	Modellbeschreibung	47
5.3.2	Modellrechnungen	49
5.3.3	Grafische Aufbereitung der Modellergebnisse	49
5.4	Bestimmung von Kaltluft-einzugsgebieten und Luftleitbahnen	51
5.4.1	Grundannahmen	51
5.4.2	Bestimmung der potentiellen Wirkungsräume	52
5.4.3	Bestimmung von Kaltluft-einzugsgebieten und Luftleitbahnen	53
5.5	Klimaanalysekarten	57
5.5.1	Landnutzungsklassen anstelle von Klimatopen	57
5.5.2	Angaben zum Luftaustausch	60
5.5.3	Windrosendarstellungen	62
5.5.4	Verzicht auf Angaben zur Schadstoffbelastung, angehobenen Inversionen und Windfeldveränderungen durch Hochhausbebauung	62
5.5.5	Auswertung der Klimaanalysekarte	65
6	Kartenteil	66
6.1	Grundlagenkarten (G1-G5)	66
6.1.1	Höhe, Schattenrelief und Neigung (Karten G2, G3 und G4)	67
6.1.2	Landnutzung (Karte G5)	68

6.2	Ergebniskarten (E1-E7)	70
6.2.1	Potentielle Kaltluftstaugebiete (Karte E1)	70
6.2.2	Sonnenuntergangszeiten als potentielle „Startzeiten der Kaltluftproduktion“ (Karten E2a – E2c)	70
6.2.3	Kaltluftbewegungen berechnet mit KLAM_21 (E3-E7)	71
6.3	Analysekarten (A1-A3)	75
6.3.1	Kaltlufteinzugsgebiete und Luftleitbahnen (Karten A1-A2)	75
6.3.2	Klimaanalysekarten (Karten A3a-A3c)	75
7	Anwendung der regionalen Klimaanalyse im Rahmen der Regional- und Landschaftsrahmenplanung und der kommunalen Bauleitplanung	78
7.1	Klima und Luft in der Regional- und Landschaftsrahmenplanung	78
7.2	Anwendung im Rahmen der kommunalen Bauleitplanung	78
8	Zusammenfassung und Ausblick	80
9	Literatur	82

1 Einleitung

Die öffentliche Auseinandersetzung mit dem Klima hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Vor allem die bereits sichtbaren und für den Menschen unmittelbar spürbaren Auswirkungen des Klimawandels verdeutlichen seine Bedeutung als zentrales Zukunftsthema, nicht nur auf globaler und nationaler sondern auch auf regionaler und kommunaler Ebene. Neben den wichtigen Maßnahmen zum Klimaschutz rücken dabei die Strategien zur Anpassung an die sich ändernden Klimabedingungen zunehmend in den Fokus. Für die regionale und kommunale Planung stellen insbesondere der durchschnittliche Temperaturanstieg und die erhöhte Anreicherung von Luftschadstoffen in dicht besiedelten Räumen eine große Herausforderung dar. Bei der zukünftigen Siedlungsentwicklung und Stadtplanung muss daher vor allem eine ausreichende Durchlüftung durch die Erhaltung und Aufwertung der vorhandenen Frisch- und Kaltluftströme sichergestellt werden (vgl. Schwab et al, 2010, S. 5).

In der Region Hochrhein-Bodensee und im Kanton Schaffhausen sind Inversionswetterlagen in Verbindung mit schlechten Durchlüftungsverhältnissen vor allem im Hochrheintal und in den größeren Tälern der Zuflüsse zu beobachten. Die Berücksichtigung von klimatischen und lufthygienischen Aspekten bei Planungsvorhaben war dort aufgrund einer unbefriedigenden Datengrundlage bisher nicht in angemessener Weise möglich. Von Regionalverband und Kantonsverwaltung wurde deshalb im Jahr 2016 eine regionale Klimaanalyse in Auftrag gegeben. Die Analyse wurde von Prof. Dr. Andreas Schwab, Pädagogische Hochschule Weingarten, in enger Kooperation und regelmäßiger Absprache mit dem Auftraggeber durchgeführt.

Im hier vorliegenden wissenschaftlichen Abschlussbericht wird in einem vorangestellten Grundlagenkapitel zunächst gezeigt, wie es insbesondere in Städten zu Situationen mit erhöhter Wärmebelastung und schlechten Durchlüftungsverhältnissen kommen kann und wie lokale Windsysteme in solchen Fällen Entlastung bringen können. Anschließend wird abgeleitet, welche Bedeutung diese Zusammenhänge, gerade im Hinblick auf den globalen Klimawandel, in der räumlichen Planung einnehmen.

Im anschließenden Kapitel wird die klimatische Situation der Region Hochrhein-Bodensee vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Beschreibung der thermischen Situation und der allgemeinen Durchlüftungsverhältnisse. Daraus ergeben sich die in Kapitel 4 dargelegten Fragestellungen und die Konzeption der regionalen Klimastudie.

Im Mittelpunkt des Berichts steht die Erstellung von Klimaanalysekarten für die Region Hochrhein-Bodensee. Zunächst werden dazu die methodischen Ansätze ausführlich dargelegt (Kapitel 5). Im anschließenden Kartenteil (Kapitel 6) werden Grundlagenkarten, Ergebniskarten und Analysekarten beschrieben und interpretiert. Wesentliches Instrument zur flächendeckenden Analyse der Durchlüftungssituation der gesamten Region ist das Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes. Zur Unterstützung der Ergebnisauswertung kamen Verfahren zum Einsatz, die im Rahmen der Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben (REKLIBO) entwickelt und auch bei der Regionalen Klimaanalyse Donau-Iller eingesetzt wurden. Sie dienen dazu, wichtige Leitbahnen für lokale Kaltluftbewegungen (Bergwinde und Hangabwinde) und gleichzeitig die wichtigen Herkunftsgebiete der Kaltluft flächenhaft herauszuarbeiten und räumliche Zusammenhänge zu verdeutlichen.

Anwendungsbereich der regionalen Klimaanalyse

Die Ergebnisse der regionalen Klimaanalyse für die Region Hochrhein-Bodensee stellen eine wichtige Bewertungsgrundlage für den Regionalplan (insbesondere Festsetzungen von Regionalen Grünzügen, Grünzäsuren), die begleitende Strategische Umweltprüfung sowie die kommunale Bauleitplanung dar. Für die Bewertung von Einzelbauvorhaben sind die in den

Karten dargestellten Ergebnisse aufgrund des Zielmaßstabs (1 : 50.000 und kleiner) nicht geeignet. Die korrekte Interpretation der Ergebnisse der Klimaanalyse erfordert im Übrigen ein fundiertes klimatologisches Fachwissen.

Datenrechte

Im Rahmen der Klimaanalyse wurden verschiedene digitale Datensätze verwendet, die dem Auftragnehmer vom Auftraggeber zur internen Verwendung zur Verfügung gestellt wurden. Hierbei handelt es sich um digitale Geländemodelle und Landnutzungsdaten. Auf großformatigen Karten wird jeweils auf die Herkunft dieser Daten hingewiesen. Aus layouttechnischen Gründen und aus Gründen der besseren Lesbarkeit wurde bei einigen kleineren Abbildungen auf diese Angabe verzichtet, zumal es sich dabei häufig lediglich um einen Ausschnitt aus Abbildungen des Gesamttraumes handelt.

Es sei deshalb an dieser Stelle explizit auf die folgenden Datenquellen verwiesen:

Digitale Geländemodelle:

- Digitales Geländemodell (DGM5): © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de)
- Digitales Geländemodell (DGM25): © Bayerische Vermessungsverwaltung (www.geodaten.bayern.de)
- Digitales Gelaendemodell (SRTM-3): frei verfügbare Fernerkundungsdaten, Shuttle Radar Topography Mission - SRTM, 2000-2009

Landnutzungsdaten:

- ATKIS Basis-DLM: © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de)
- ATKIS Basis-DLM: © Bayerische Vermessungsverwaltung (www.geodaten.bayern.de)
- Corine Land Cover (CLC) 2006
- Satellitenbildszenen Landsat TM5 (2006), Spektralkanäle 1, 2, 3, 4, 5, 7

2 Die Bedeutung von Klima und Luft in der räumlichen Planung

Klima und Luft sind Bestandteile des Ökosystems und wirken unter anderem über Niederschlag, Sonneneinstrahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und die Luftqualität auf den Landschaftshaushalt, die Artenvielfalt sowie die Gesundheit, das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit des Menschen. Damit haben sie eine große Bedeutung für Wohn- und Arbeitsverhältnisse, Erholung und Tourismus, für die Landwirtschaft sowie für die Lebensräume von Tieren und Pflanzen. Klimatische und lufthygienische Aspekte sind deshalb auch in der räumlichen Planung, insbesondere bei der Siedlungsentwicklung von großer Bedeutung.

Im hier vorliegenden Abschlussbericht zur Regionalen Klimaanalyse für die Region Hochrhein-Bodensee wird der Schwerpunkt auf die Aspekte Lufttemperatur und Wind gelegt. Bei bestimmten Wetterlagen treten im Zusammenhang mit diesen Elementen besondere Belastungssituationen auf, die im Folgenden näher beschrieben werden.

2.1 Wärmebelastung durch hohe Temperaturen und Schwüle

Ein gesunder Mensch besitzt im Allgemeinen eine gute Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche atmosphärische Bedingungen (bei extremer Kälte wird er sich z.B. geeignet kleiden oder geschützte Bereiche aufsuchen). Bei hohen Temperaturen sind diese Anpassungsmöglichkeiten jedoch begrenzt. Problematisch wird es dann vor allem für Menschen mit Herz-Kreislauf- oder Atemwegsproblemen. Dies zeigt sich unter anderem auch in Statistiken, die den Zusammenhang zwischen Sterblichkeitsdaten aus Baden-Württemberg und den thermischen Umgebungsbedingungen beleuchten. Bei besonders hohen „gefühlten Temperaturen“¹ weicht demnach die Sterblichkeitsrate vom Normalwert deutlich nach oben ab (Laschewski u. Jendritzky, 2002, in NATIONALATLAS, 2003).

Hohe Temperaturen verbunden mit Schwüle und geringen Windgeschwindigkeiten können also extreme Belastungssituationen bzw. Stress erzeugen (Wärmebelastung, Hitzestress). Daher ist es wichtig, das Auftreten von Wärmebelastung bei regionalen und kommunalen Planungen (Landschaftsrahmenplanung, Regionalplanung, Bauleitplanung) in die Betrachtungen einzubeziehen und wenn möglich zu verhindern. Zunächst stellt sich deshalb die Frage, wo mit besonders häufigen bzw. mit besonders hohen Belastungssituationen zu rechnen ist. Zur Klärung dieser Frage können Karten des Klimaatlas von Baden-Württemberg (LUBW, 2006) oder des Nationalatlas der Bundesrepublik Deutschland (NATIONALATLAS, 2003) herangezogen werden. Für die Schweizer Gebiete stehen Karten des Bundesamts für Meteorologie und Klimatologie (www.meteoschweiz.ch) online zur Verfügung.

Wärmebelastung in der Region

In Baden-Württemberg ist Wärmebelastung demnach am häufigsten im Oberrheingraben und entlang des Hochrheins, im Raum Mittlerer Neckar und im Bereich des Bodenseebeckens zu erwarten, in den Hochlagen von Schwarzwald und Schwäbischer Alb dagegen kaum. Innerhalb der Schweiz sind die Gebiete entlang des Hochrheins und der Aare, südwestlich des Genfer Sees, im Wallis und im Tessin am stärksten belastet. Dies entspricht der allgemeinen Kenntnis, dass die thermischen Bedingungen eines Ortes in erster Linie höhenabhängig sind. Stark modifizierend wirken jedoch auch die Geländeform (Beckenlagen, Tallagen) sowie die Art der Landnutzung. Innerhalb weniger Kilometer können die bioklimatischen Verhältnisse deshalb sehr große Unterschiede aufweisen.

¹ Unter der gefühlten Temperatur versteht man die von einem Menschen wahrgenommene Umgebungstemperatur, die sich aufgrund verschiedener Faktoren (u.a. Luftfeuchte und Wind) von der gemessenen Lufttemperatur unterscheidet. Es handelt sich um ein Maß für das thermische Wohlbefinden eines Menschen.

Besonders deutlich zeigt sich dies bei einem Vergleich von Wald- und Siedlungsflächen. Der Wald reduziert mit seiner thermisch ausgleichenden Wirkung die Wärmebelastung; innerhalb bebauter Gebiete nimmt sie gegenüber den umliegenden Freiflächen zu. Dies geht auf den sogenannten städtischen Wärmeineffekt zurück.

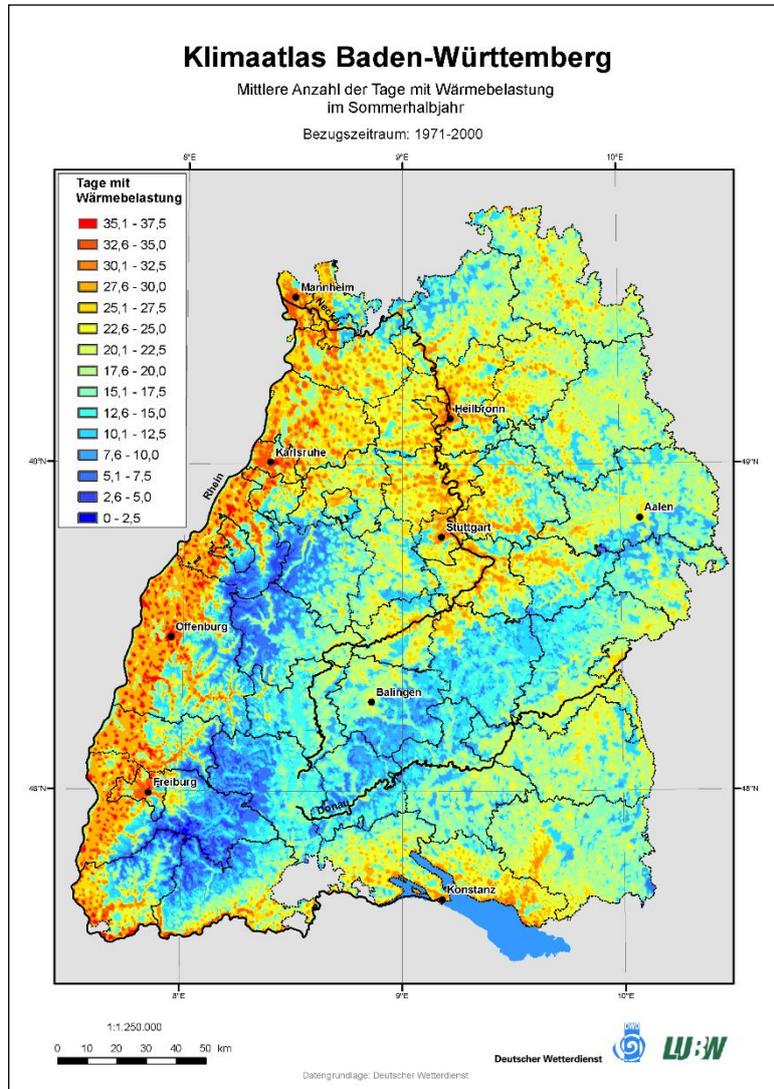


Abb. 1 : Anzahl der Tage mit Wärmebelastung im Sommerhalbjahr Bezugszeitraum 1971-2000.
(aus LUBW, 2006)

Mittlere Anzahl Hitzetage pro Jahr (1981–2010)

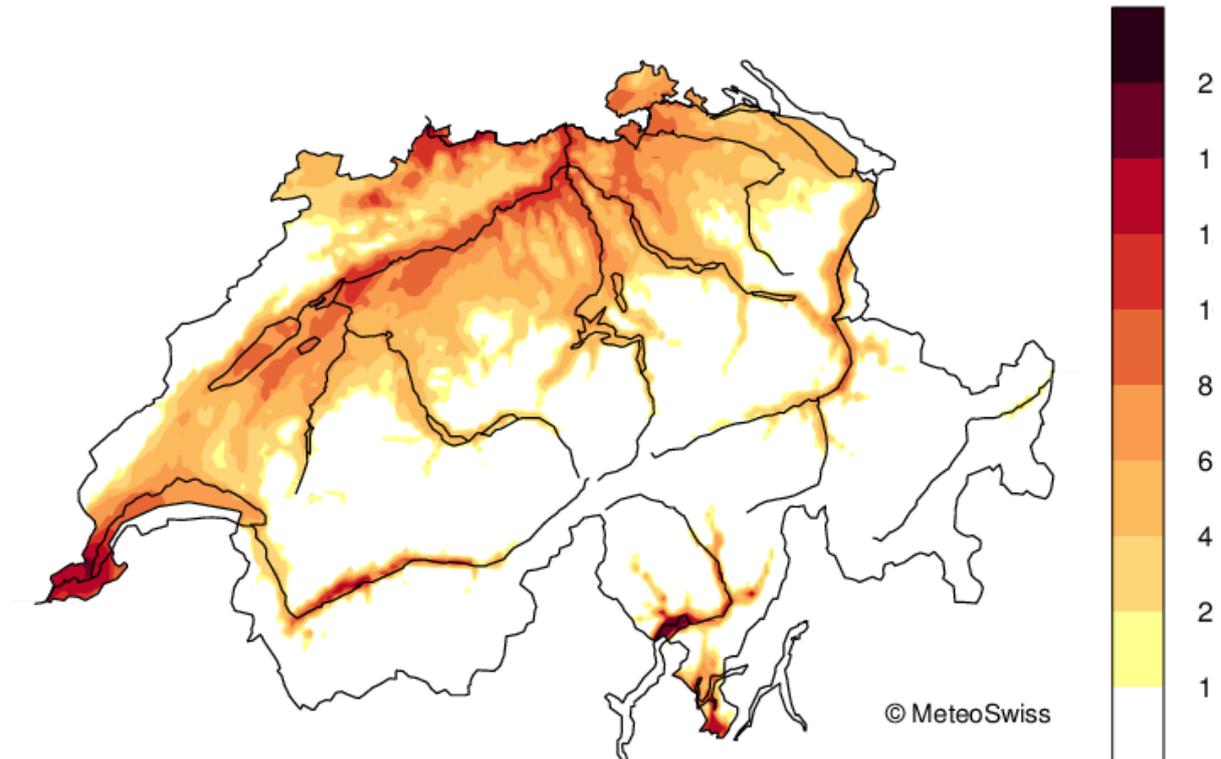


Abb. 2: Anzahl der Hitzetage in der Schweiz. (aus: www.meteoschweiz.ch)

Besondere Belastung der Städte durch den städtischen Wärmeinseleffekt

Durchschnittlich sind Städte im Jahresmittel um 1 bis 2 °C wärmer als die sie umgebende Landschaft. Besonders große Temperaturunterschiede treten jedoch in windarmen Strahlungs Nächten auf. Sie sind zudem stark abhängig von der Größe der Stadt, der Bebauungsdichte und dem jeweiligen Versiegelungsgrad. Für Millionenstädte kann der maximale Temperaturunterschied über 10 Grad betragen. Aber auch bei kleineren Städten ist durchaus ein merkbarer Wärmeinseleffekt feststellbar (vgl. STÄDTEBAULICHE KLIMAFIBEL, 2008).

Die Ursachen für den städtischen Wärmeinseleffekt sind vielfältig. Entscheidend ist sicherlich die Tatsache, dass durch die Oberflächenversiegelung und den damit verbundenen geringeren Grünflächenanteil die Verdunstung stark reduziert ist. Große Anteile der einfallenden Sonnenenergie führen somit tagsüber direkt zur Erwärmung der städtischen Baumassen. Die tagsüber in den Baumassen gespeicherte Energie wird während der Nacht nur langsam wieder abgegeben. Siedlungen sind deshalb auch am Morgen noch relativ warm. Dies gilt sowohl für die Oberflächen als auch für die bodennahen Luftschichten.

2.2 Schlechte Durchlüftung bei geringen Windgeschwindigkeiten und Inversionswetterlagen

Bei geringen horizontalen Windgeschwindigkeiten und behindertem vertikalen Luftaustausch besteht vor allem in Ballungsgebieten die Gefahr der Anreicherung von Luftschadstoffen.

Der Einfluss des Reliefs

Einen großen Einfluss auf den bodennahen Wind hat das Geländere relief. Erhebungen stellen sich dem Wind als Hindernis entgegen und müssen um- und überströmt werden. Im Gipfelbereich von Hügeln und Bergen kommt es deshalb häufig zu erheblichen Windgeschwindigkeitszunahmen, während der Wind im Leebereich eines Berges durch Wirbelbildung stark abgebremst werden kann (NATIONALATLAS, 2003, S. 52).

In Tälern oder Becken kommt es in der Regel zu einer Abschwächung des Windes. Im Bereich von Talverengungen können Kanalisierungs- und Düsen effekte jedoch auch zu einer Geschwindigkeitszunahme führen.

Verminderte Durchlüftung in Siedlungsgebieten

Auch die Ausprägung der Landnutzung hat Einfluss auf die Windgeschwindigkeiten. So kommt es etwa durch die Errichtung von Bauwerken zu einer Erhöhung der Oberflächenrauigkeit und somit zu einer Veränderung der Strömungsbedingungen für den bodennahen Luftaustausch. Als Folge sind die Windgeschwindigkeiten in Siedlungsgebieten im Vergleich zum Umland allgemein reduziert, auch Windstillen treten vermehrt auf. Die Durchlüftungsverhältnisse sind also vergleichsweise schlecht.

Besondere Gefahr bei Inversionswetterlagen

Eine erhöhte Gefahr der Schadstoffanreicherung besteht bei sogenannten Inversionswetterlagen. Bei solchen Wetterlagen liegt wärmere Luft über kälterer Luft. Diese auch als „Temperaturumkehr“ bezeichnete Situation führt dazu, dass ein vertikaler Luftaustausch unterbunden wird.

Eine besondere Neigung zur Bildung von Inversionen besteht in Tiefländern sowie Becken- und Tallagen. Hier kommt es während windschwacher Strahlungswetterlagen nachts zur Ansammlung von Kaltluft, die aufgrund der Reliefsituation nicht in ausreichendem Maße abfließen kann (s.u.). Sie kühlt dann von der Erdoberfläche her extrem ab. Bei herbstlichen und winterlichen Hochdruckwetterlagen ist dies häufig mit Nebelbildung verbunden. Löst sich eine solche Nebelschicht tagsüber nicht mehr auf, kann sich die Temperaturinversion verstärken. Die Sonnenstrahlen erwärmen dann nur noch die Höhenlagen, die oberhalb der Nebelgrenze liegen.

Durchlüftungsverhältnisse in der Region

Aus den Informationen über bodennahe Windverhältnisse und Inversionshäufigkeiten können nach bestimmten Kriterien Karten der Durchlüftungsverhältnisse erstellt werden. Es zeigen sich dann die erwarteten Strukturen (vgl. u.a. Klimaatlas von Baden-Württemberg (LUBW, 2006):

Bei geringen Inversionshäufigkeiten in Verbindung mit hohen Windgeschwindigkeiten sind die Durchlüftungsverhältnisse gut. Dies betrifft vor allem die höher gelegenen, windstarken Gebiete von Schwarzwald und Schwäbischer Alb sowie den Schweizer Jura.

Großräumig schlecht durchlüftet (geringe Windgeschwindigkeit in Verbindung mit hoher Inversionshäufigkeit) sind die Oberrheinebene und das Hochrheintal, das mittlere Neckartal, sowie das Bodenseebecken. Schlecht bis mäßig durchlüftet dürfte das Gebiet des Kantons Schaffhausen sein. In besonderem Maße schlecht durchlüftet sind nach den obigen Anmerkungen die größeren Städte dieser Teilräume.

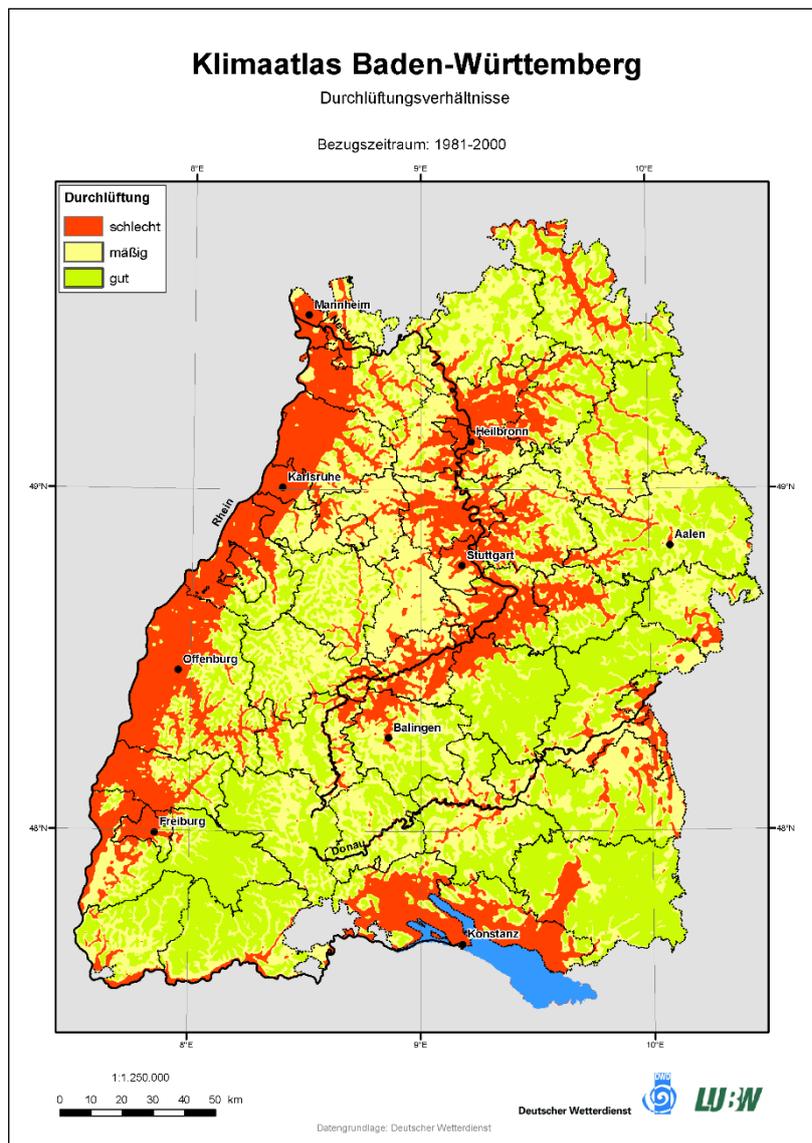


Abb. 3: Durchlüftungsverhältnisse in Baden-Württemberg, Bezugszeitraum 1981-2000. (aus LUBW, 2006)

2.3 Entlastung durch lokale Windsysteme

In Gebieten mit erhöhter Wärmebelastung und schlechten Durchlüftungsverhältnissen sind lokale Windsysteme (Hangwindsysteme, Berg-Tal-Windsysteme, Flurwindsysteme, Land-See-Windsysteme) für die Lebensbedingungen der Menschen in Siedlungen von großer Bedeutung, da sie die belasteten Bereiche mit frischer bzw. kühler Luft versorgen können. Sie werden deshalb im Folgenden ausführlich beschrieben.

2.3.1 Hangwindsysteme und Berg-Tal-Windsysteme

Kaltluftentstehung

In wolkenlosen Nächten kann die Erdoberfläche nahezu ungehindert Energie ins Weltall abstrahlen, wodurch sie sich merklich abkühlt. Sobald die Temperatur der Erdoberfläche jene der bodennahen Luft unterschreitet, wirkt erstere wie eine Kühlfläche. Die Luft darüber kühlt sich daran ab – es entsteht „bodennahe Kaltluft“. Die Intensität der Abkühlung ist in erster Linie abhängig von der Bodenbedeckung. Wiesen, Äcker und Wälder gelten als wichtige Kaltluft produzierende Flächen. Versiegelte Flächen und Wasserflächen scheiden als solche aus.

Kaltluftfluss – Hangabwinde und Talabwinde

Auf ebenem Gelände würde sich im Laufe einer Nacht mit der Zeit eine immer mächtigere und schwerere Kaltluftschicht bilden. Die vom Boden her abgekühlte Luft hat jedoch eine vergleichsweise hohe Dichte. Daher setzt sie sich an Hängen mit hinreichendem Gefälle talabwärts in Bewegung. Die Winde wehen nun von den Hängen in die Täler bzw. Becken (Hangabwinde) (vgl. Abb. 5 und 6). Hat sich Kaltluft in einem Tal angesammelt, kann auch eine talabwärts gerichtete Luftströmung entstehen. Solch ein Wind wird Bergwind bzw. Talabwind genannt (vgl. 4).

Die auftretenden Windgeschwindigkeiten im Kaltluftfluss werden entscheidend mitbestimmt von der Größe der Kaltlufteinzugsgebiete, den Anteilen der verschiedenen Landnutzungen sowie den Neigungsverhältnissen im Kaltlufteinzugsgebiet. Diese Zusammenhänge sind im Rahmen zahlreicher empirischer Studien auch formelhaft beschrieben worden. Hier soll die qualitative Angabe genügen.

Die Geschwindigkeit des Kaltluftabflusses steigt mit zunehmender Größe der Einzugsgebiete und zunehmenden Geländeneigungen. Je größer allerdings ein Talsystem ist, desto mehr Zeit wird benötigt, bis der Kaltluftfluss die Talmündung in messbarer Stärke erreicht.

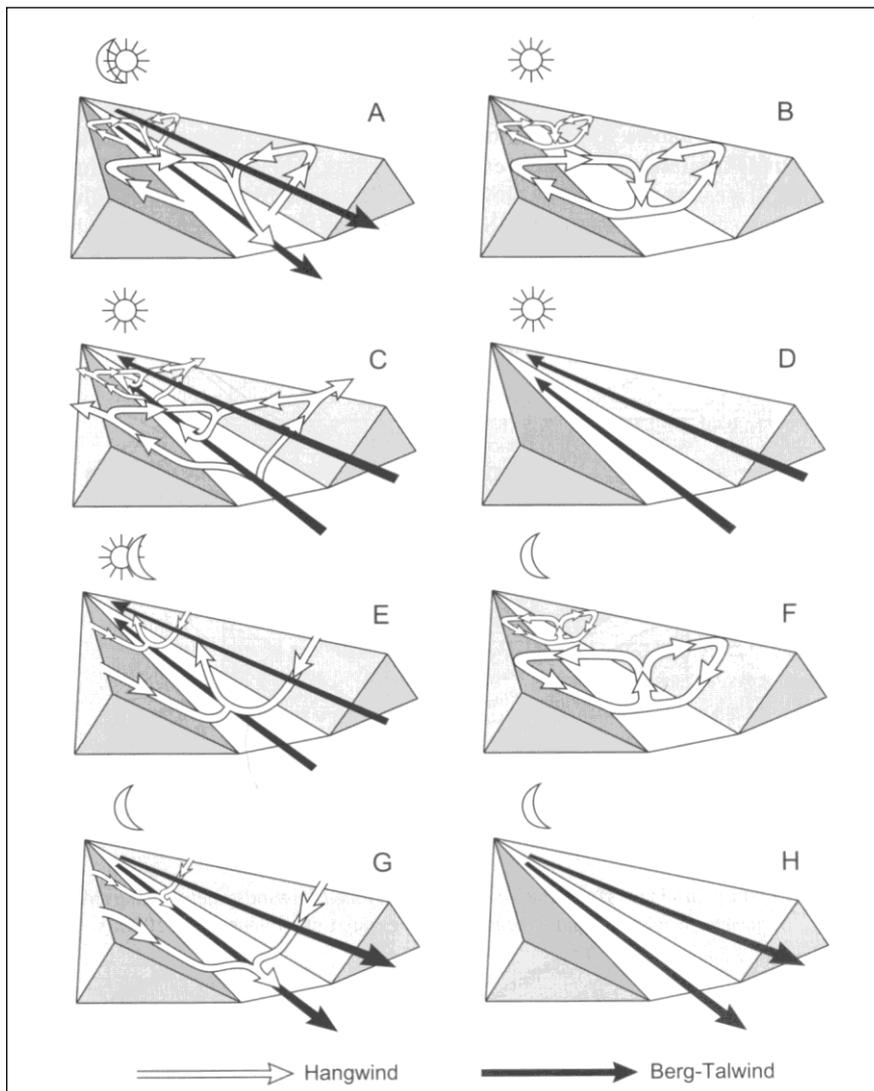


Abb. 43: Das idealisierte Berg-Tal-Windsystem bei symmetrischer Hangerwärmung und Hangabkühlung (nach Defant 1949, in BENDIX, 2004, S. 167).

Treten im Tal Schwellen oder Engstellen auf, so kann der Kaltluftstrom periodisch unterbrochen sein, es kommt zu Kaltluftpulsationen (BENDIX, 2004, S. 173). Solche schwankenden

Geschwindigkeiten des Kaltluftstroms sind aber auch an Hängen zu beobachten. Vor allem bei weniger starken Neigungsverhältnissen ist hier immer wieder eine verstärkte bodennahe Abkühlung nötig, bevor es zu einem markanten Abfluss von Kaltluft kommen kann.



Abb. 5: Rauchversuche zur Visualisierung von Hangauf- und Hangabwinden am 11.10.06 nordwestlich von Baidnt-Friesenhäusle. Eine Stunde vor Sonnenuntergang sind noch hangaufwärts gerichtete Luftbewegungen zu beobachten. Während des Sonnenuntergangs herrscht annähernd Windstille. Eine Stunde nach Sonnenuntergang haben bereits Hangabwinde eingesetzt. (Fotos: Schwab 2006)

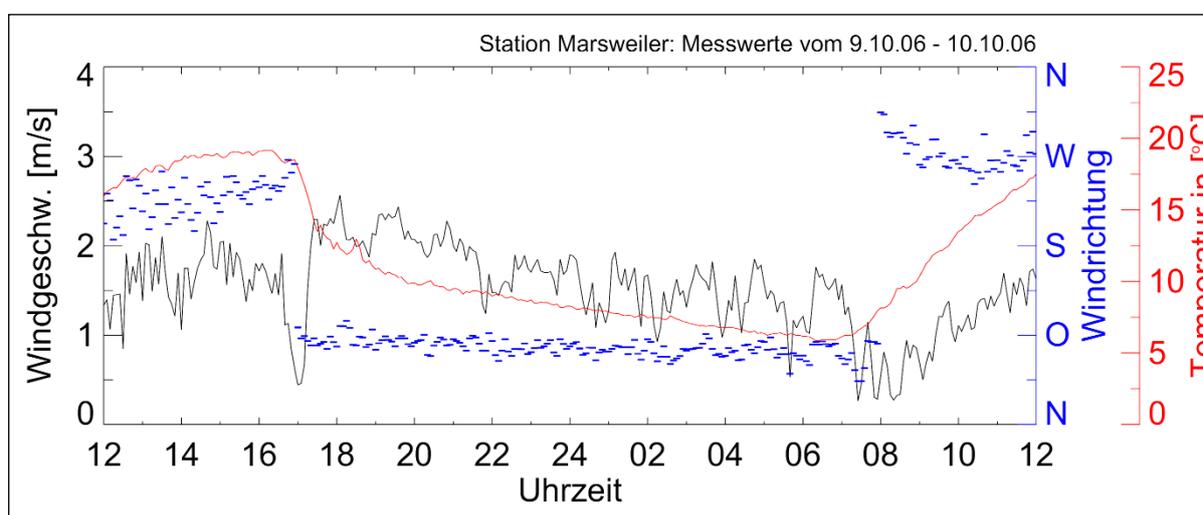


Abb. 6: Verlauf von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Lufttemperatur an der Station Baidnt-Marsweiler vom 9.10.2006 auf 10.10.2006. Gut zu erkennen ist die Tagesperiodik der Windrichtungen mit einem kontinuierlich wehenden nächtlichen Hangabwind.

Beeinflussung von Kaltluftabflüssen durch Siedlungen

Siedlungen können Kaltluftströmungen deutlich beeinflussen. In der Regel werden Hangabwinde und Bergwinde deutlich gebremst und damit abgeschwächt. Es kann jedoch in bestimmten Situationen auch zu einer Kanalisierung und damit zu einer Verstärkung der lokalen Windsysteme kommen. Entscheidend sind dabei Höhe und Anordnung von Gebäudekörpern.

Wenn geschlossene Siedlungsränder quer zur Windrichtung verlaufen, kann es in Verbindung mit spezifischen Reliefsituationen auch zur Ausbildung von Kaltluftstaugebieten (Kaltluftseen) kommen. Solche Kaltluftansammlungen, die vor allem in schwach geneigten Tälern und Beckenlagen in klaren Strahlungsnächten auftreten, führen zu einer erhöhten Kältebelastung und zu einer Verschlechterung der lufthygienischen Situation, da die Häufigkeit bodennaher Inversionen hier stark erhöht ist und vertikale bzw. horizontale Luftaustauschprozesse häufig unterbunden sind (s.o.).

Umkehrung der Situation in den Tagstunden

Während der Tagstunden kehren sich die Verhältnisse in der Regel um. Bedingt durch die an Hängen verstärkte Erwärmung bodennaher Luftschichten kommt es zu einem thermisch bedingten Aufsteigen. Als Ausgleichsströmungen wehen die sogenannten Hangaufwinde bzw. Tal(auf)winde nun in entgegengesetzter Richtung (vgl. 4 B/C/D, Abb. 5, Abb. 6).

Neben diesen reliefbedingten lokalen Windsystemen sind mit den Flurwinden und den Land-See-Winden zwei weitere Systeme bekannt, die lediglich auf die unterschiedlich starke Erwärmung verschiedener Oberflächen zurück gehen.

2.3.2 *Flurwindsysteme (=Stadt-Umland-Windsysteme)*

Der Flurwind ist ein in Städten ausgeprägtes Lokalwindsystem, welches im Idealfall auf das Stadtzentrum hin ausgerichtet ist und nachts bzw. morgendlich auftritt. Induziert wird er durch Temperatur- und Druckunterschiede zwischen Stadt und Stadtumland die sich wiederum speziell bei warm-trockenen, austauscharmen und windschwachen Hochdruckwetterlagen entwickeln (SCHÖNWIESE, 2003, S. 176).

Als Motor für den Flurwind gilt der Wärmeinseleffekt über dem Stadtgebiet (s.o.). Die über der Stadt aufgeheizte Luft steigt konvektiv auf. Dadurch ergibt sich zunächst in der Höhe ein Druckgefälle von der Stadt zum Umland. Die daraus resultierenden Luftbewegungen erzeugen am Boden ein umgekehrtes Druckgefälle vom Umland zum Stadtgebiet. Kühlere Luft aus dem Umland strömt so in Bodennähe in das Stadtgebiet ein.

Da für den Grad der Ausprägung einer Wärmeinsel die Stadtgröße ausschlaggebend ist, steigt auch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Flurwinden mit zunehmender Stadtgröße. Flurwinde erreichen selten größere Windgeschwindigkeiten als 1–2 m/s und werden durch Reibungseinflüsse wie Bewuchs oder Bebauung sehr leicht abgebremst oder sogar komplett aufgelöst. Die Mächtigkeit der Luftströmung bewegt sich im Meter- bis Dekameter-Bereich.

Dennoch sind auch Flurwinde für die Belüftung von Städten durchaus nützlich, weil sie im Stadtgebiet als Frischluftzubringer dienen und eventuell belastete Luft erneuern.

2.3.3 *Land-See-Windsysteme*

Auch Land-See-Winde können zur Verbesserung der Durchlüftungssituation beitragen. Im Hinblick auf die Entstehung sind sie den Flurwinden sehr ähnlich. Auch hier sorgt die unterschiedlich starke Erwärmung der beteiligten Oberflächen für die Entstehung von Luftdruckunterschieden und die damit verbundenen Ausgleichsströmungen.

Entscheidend ist das Verhalten der Wasserflächen. Sie wirken als Wärmespeicher, der tagsüber viel Energie aufnehmen und nachts wieder abgeben kann. Dadurch weisen Wasserflächen einen gegenüber Landflächen gedämpften Temperaturgang auf. Tagsüber sind sie kühler, nachts und am frühen Morgen jedoch wärmer als Landflächen. Entsprechend kommt es tagsüber zur Ausdehnung der Luft über Land, was letztlich auflandige Winde (Seewind) zur Folge hat. Abends und nachts herrscht eine umgekehrte Situation mit ablandigen Winden (Landwind) (vgl. 7).

Für die Entstehung ausgeprägter Land-See-Winde sind ausreichend große Wasserflächen nötig. Von der Größe der Wasserflächen hängt auch die Reichweite der jeweiligen Winde auf den See hinaus bzw. ins Hinterland des Sees ab. Deutlich messbare Land-See-Windsysteme treten an allen Meeresküsten auf. Sie können aber auch im Uferbereich von sehr großen Binnengewässern nachgewiesen werden. So sind z.B. für den Bodensee Land-See-Winde mehrfach belegt (vgl. WELLER 2001).

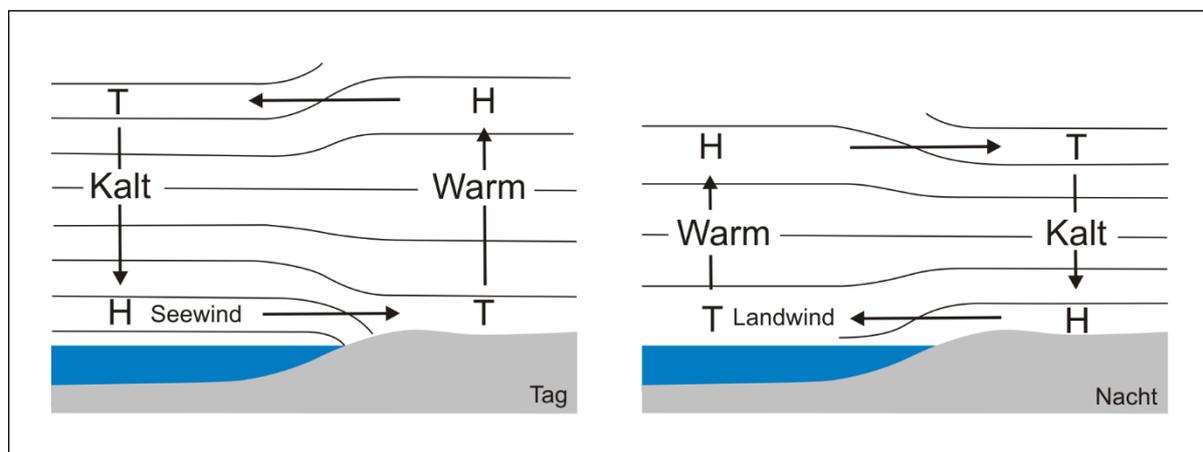


Abb. 7: See-Wind am Tag und Land-Wind in der Nacht als Ergebnis der unterschiedlichen Erwärmung von Land- und Wasseroberflächen und der daraus resultierenden Druckfelder. Die Linien stellen isobare Flächen dar. (Entwurf: Schwab, verändert nach GOSSMANN, 1988, S. 139)

2.4 Auswirkungen des globalen Klimawandels

Im Kontext des globalen Klimawandels ist von einer allgemeinen Erwärmung auszugehen. Damit verbunden sind in unserer Region kürzere Frost- und längere Vegetationsperioden, aber auch eine Häufung extremer Wetterereignisse (Sturm, Hochwasser etc.). Als Konsequenz wird es zu Veränderungen der Ökosysteme kommen, die letztlich auch für den Menschen als Teil dieser Systeme von Bedeutung sein werden.

Die Folgen auf die verschiedenen Nutzungen in Baden-Württemberg und die Möglichkeiten der Anpassung wurden unter anderem in den Verbundprojekten KLIWA² und KLARA³ untersucht. Detaillierte Informationen zum Projekt KLARA findet man im entsprechenden Forschungsbericht (STOCK & GERSTENGARBE 2005) sowie auf der Internetseite der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz (www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/6991/, Zugriff: 12.08.2010).

Unter anderem muss von Verschiebungen bei der Zusammensetzung der Pflanzen- und Tierwelt (auch der Schädlinge) ausgegangen werden, die landwirtschaftlichen und forstwirtschaftlichen Anbaubedingungen werden sich wandeln, im Bereich des Tourismus ist z.B. von einer Verlängerung der Badesaison auszugehen.

Zunahme der Wärmebelastung

Für das allgemeine Wohlbefinden des Menschen von großer Bedeutung ist die Tatsache, dass die Anzahl Hitzetage deutlich zunehmen wird. Damit erhöht sich die Wärmebelastung der Bevölkerung erheblich. Für die Zukunft (bis 2055) wird landesweit mit jährlich 180 bis 400 zusätzlichen hitzebedingten Todesfällen gerechnet (STOCK & GERSTENGARBE 2005). Vor diesem Hintergrund und angesichts der Erfahrungen aus dem Extremjahr 2003 ist in Baden-Württemberg seit 2005 ein Hitzewarnsystem im Einsatz. Auch die regionale Klimaanalyse der Region Hochrhein-Bodensee setzt sich intensiv mit dem Thema Wärmebelastung auseinander.

2.5 Bedeutung des Klimas in der räumlichen Planung

Aus den bisherigen Ausführungen wird deutlich, dass gerade in Gebieten mit erhöhter Wärmebelastung und schlechten Durchlüftungsverhältnissen bei konkreten Planungsaufgaben Fragen nach der Standorteignung auch unter klimatisch-lufthygienischen Gesichtspunkten zu

² KLIWA steht für Klimaveränderungen und Wasserwirtschaft (www.kliwa.de, 12.08.2010)

³ KLARA steht für Klimawandel, Auswirkungen, Risiken und Anpassung

betrachten sind. Dies gilt gemäß NatSchG § 16 Abs. 3 Nr. 4f unter anderem bei der Aufstellung von Landschaftsrahmenplänen und gemäß BauGB §1 Abs. 6 Nr. 7a bei der Aufstellung von Bauleitplänen (Flächennutzungsplänen, Bebauungsplänen).

Im Hinblick auf die Veränderungen durch den globalen Klimawandel kommt diesem Aspekt sogar eine verstärkte Bedeutung zu. Alle Bereiche des öffentlichen Lebens müssen sich mit dem Klimawandel auseinandersetzen, Anpassungsstrategien entwickeln und Beiträge zum Klimaschutz erbringen.

Um die Fragen der Standorteignung auf einem möglichst gesicherten Kenntnisstand beantworten zu können, sind regionale Klimaanalysen hilfreich. Sie sollen unter anderem die derzeit wirksamen Zusammenhänge zwischen Klima, Luftqualität und dem Lebensraum der Bevölkerung aufzeigen („Istzustand“) und die Beurteilung voraussichtlicher Nutzungsänderungen aus klimatologischer Sicht ermöglichen (Vorsorgeprinzip), um räumlich differenzierte Planungsempfehlungen ableiten zu können (REKLISO, 2006, Wiss. Abschlussbericht, S. 2).

2.6 Zusammenfassung

Zusammenfassend lassen sich folgende Punkte festhalten:

- Wetter und Klima können das Wohlbefinden, die Leistungsfähigkeit und letztlich auch die Gesundheit des Menschen stark beeinflussen (Bioklima). Besonders belastend sind Wetterlagen mit hohen Temperaturen und Schwüle. Dann kommt es zu Wärmebelastung und Hitzestress.
- Der Grad der Wärmebelastung hängt von Höhenlage, Relief und Landnutzung ab. Besonders gefährdet sind Städte (städtischer Wärmeinseleffekt) in Beckenlagen.
- Bei geringen horizontalen Windgeschwindigkeiten und vermindertem Vertikalaustausch tritt außerdem die Gefahr der Anreicherung von Luftschadstoffen auf. Man spricht dann von schlechten Durchlüftungsverhältnissen. Besondere Bedeutung kommt hier den sogenannten Inversionswetterlagen zu. Wiederum sind Städte in Beckenlagen besonders gefährdet.
- Bei kritischen Wetterlagen (windschwache Strahlungswetterlagen) können lokale Windsysteme Entlastung bringen. Dabei ist zu unterscheiden zwischen den reliefbedingten Hangwind- und Talwindsystemen sowie den landnutzungsabhängigen Flurwind- und Land-See-Windsystemen.
- Angesichts des globalen Klimawandels wird die Anzahl der Hitzetage und damit die Wärmebelastung der Bevölkerung in den kommenden Jahren deutlich zunehmen.
- Bei konkreten Planungsaufgaben sind Fragen nach der Standorteignung auch unter klimatisch-lufthygienischen Gesichtspunkten zu betrachten. Im Hinblick auf die Veränderungen durch den globalen Klimawandel kommt diesem Aspekt sogar eine verstärkte Bedeutung zu.
- Regionale Klimaanalysen sollen die derzeit wirksamen Zusammenhänge zwischen Klima, Luftqualität und dem Lebensraum der Bevölkerung aufzeigen („Istzustand“) und räumlich differenziert Planungsempfehlungen aussprechen.
- Aufgrund des bislang mangelhaften Kenntnisstands über Kaltluft- und Frischluftströme in der Region beauftragte der Regionalverband Hochrhein-Bodensee mit dem Kanton Schaffhausen Prof. Dr. Andreas Schwab, Fachbereich Geographie der Pädagogischen Hochschule Weingarten, mit der Durchführung einer Regionalen Klimaanalyse.

3 Klimatische Einordnung des Untersuchungsraums

3.1 Allgemeine Beschreibung

Die Planungsregion Hochrhein-Bodensee ist eine von 12 Planungsregionen innerhalb Baden-Württembergs. Sie erstreckt sich entlang der 315 km langen Grenze des Landes zur Schweiz vom Bodensee bei Konstanz bis zum Dreiländereck um Basel. Während die Region in der Ost-West-Richtung in Luftlinie 126 km lang ist, misst sie in der Nord-Süd-Richtung an der breitesten Stelle zwischen Bad Säckingen und Todtnau nur 35 km. Dabei umfasst sie eine Fläche von 2756 qkm. Dem Regionalverband gehören die Landkreise Lörrach, Waldshut und der Konstanz an. In dieser Region leben ca. 670.000 Menschen.

Planerische Zusammenarbeit findet hier in vielen Fällen über Grenzen hinweg statt. Wenn auch die Staatsgrenze noch manche Eigenentwicklung in den Ländern gegeneinander abschirmt, so bildet die Region mit den intensiven grenzüberschreitenden Verflechtungen einen einheitlichen Lebensraum. Viele Maßnahmen wirken sich in Folge der engen Verflechtungen direkt über die Grenze aus; beispielhaft seien hier nur Fragen der Siedlung und des Freiraumes, der Reinhaltung des Bodensees, des Schutzes der Flachwasserzone, des Arbeitsmarktes mit 35 000 Grenzgängern und des Fernverkehrs auf Schiene und Straßen genannt. (Stand 2009) (<http://www.hochrhein-bodensee.de/>, Zugriff: 22.02.2017).

Dies ist ein wesentlicher Grund für die Entscheidung, das Gebiet des Kantons Schaffhausen in das Untersuchungsgebiet der beauftragten Studie mit aufzunehmen. Wenn im Folgenden also von „Region“ gesprochen wird, ist damit immer die deutsche Verwaltungsregion Hochrhein-Bodensee zusammen mit dem Gebiet des Schweizer Kantons Schaffhausen gemeint. Aus inhaltlichen Gründen ist es ferner sinnvoll, auch immer wieder Teilräume der südlich an die Region angrenzenden Kantone Basel-Stadt, Basel-Landschaft, Aargau, Zürich und Thurgau in die Betrachtung mit einzubeziehen.

In seiner naturräumlichen Gliederung zeigt der Untersuchungsraum eine große Mannigfaltigkeit (vgl. Abb.8). Im Westen gehören ihm der südliche Teil der Markgräfler Rheinebene und des Markgräfler Hügellandes an, Dinkelberg und Hochrheintal begrenzen die Region im Süden, nördlich davon steigt der Schwarzwald bis 1.415 Meter an. Die Schwarzwaldsüdabdachung mit dem Hotzenwald gehört ebenso dazu wie das Alb-Wutachgebiet, dem auch das Klettgau Schichtstufenland zugeordnet wird. Letzteres nimmt auch im Kanton Schaffhausen zusammen mit Randen und Reiat größere Flächen ein. Der Osten der Region wird durch die Naturräume von Hegaualb und Hegau mit seinen markanten Vulkanschloten geprägt.

Der Untersuchungsraum weist damit einige typische Landschaftselemente auf, die im Hinblick auf die Ausprägung lokalklimatischer und lufthygienischer Eigenschaften von Bedeutung sind. Besonders auffällig sind die unterschiedlichen Talstrukturen. Im Einzelnen sind zu nennen:

- *tief gelegene, überwiegend weite Talräume mit breiter Talsohle und schwach geneigtem Tallängsprofil*
 - umrahmt von unterschiedlich hohen bzw. verschieden steilen Randgebirgen
 - z.T. tektonisch bedingt bzw. beeinflusst
 - Talsohlen z.T. terrassenartig strukturiert
 - z.T. abschnittsweise Talverengungen und Talweitungen
 - Talsohlen häufig verbaut
 - Hochrheintal, Wiesental
- *extrem steile und tiefe, von Norden nach Süden verlaufende Täler mit wenig breiter bzw. ganz ohne Talsohle (Kerbtäler)*
 - mit stark geneigten Hängen und
 - mit stark geneigtem Tallängsprofil

- mit überwiegend bewaldeten Einzugsgebieten
- ggf. Talsohlen in den Unterläufen, die dann z.T. verbaut sind
- an der Südabdachung des Hochschwarzwalds
- münden bzw. gehen über in das Wiesental (Täler von Wiese und kleiner Wiese, Tal des Klosterbachs)
- oder gehen über in Täler des Markgräfler Hügellands (Täler von Wollbach und Kander)
- oder münden direkt in das Hochrheintal (Wehratal)
- *relativ kleine, kurze Täler*
 - mit kleinen Einzugsgebieten
 - mit unterschiedlich großen Waldanteilen
 - im Markgräfler Hügelland
 - im Bereich des Dinkelbergs
 - im Bereich des Weitenauer Berglands
 - im Bereich der „Vorwald-Gebiete“ nördlich des Hochrheins
 -
- *große, weniger steile Täler mit gleichmäßigem Gefälle und wenig breiter Talsohle*
 - haben ihren Ursprung auf der Ostseite des Schwarzwaldes
 - mit insgesamt geringeren Höhenunterschiede
 - mit relativ gleichmäßigem Gefälle des Tallängsprofils
 - mit nur wenig breit ausgebildeter Talsohle
 - mit auffällig häufigen Talwindungen
 - höher gelegene Teile der Einzugsgebiete stark bewaldet, tiefer gelene Teile mit hohen Freilandanteilen
 - Täler von Wehra, Alb, Schwarza/Schlücht und Steina
- *Das Wutachtal*
 - flussgeschichtlich bedingt mit einem sehr großen Einzugsgebiet
 - und einer im Unterlauf über lange Strecken relativ breiter Talsohle
 - mit deutlich weniger Talwindungen
- *Der Klettgau*
 - als relativ weiter Talraum (Klettgauer Haupttalung = ehemaliges Rheintal)
 - umgeben von randlichen Erhebungen (Hallauer Rücken, großer Klettgaurücken, Randen), z.T. zertalt
 - mit geringem Gefälle des Tallängsprofils
 - mit hohem Anteil an Freiflächen
- *Randen und Reina*
 - Als nordöstlichster Ausläufer des Schweizer Jura Im Übergangsbereich zur Schwäbischen Alb/Hegualb
 - mit relativ großen Höhenunterschieden und dadurch verursachter
 - nach Süden ausgerichteter intensiver Zertalung (insbesondere durch den Fluss Durach im Merishusertal)
 - mit hohen Waldanteilen in den Hochlagen
 - alle Talausgänge verbaut (Schaffhausen)
- *Der Hegau als Teil des westlichen Bodenseebeckens:*
 - im Norden und Westen umrahmt von den Höhen der Hegualb, deren Südrand unterschiedlich stark zertalt ist. Die dortigen Täler gehen in das „Hegau-Becken“ über.
 - mit allen Elementen einer glazial überprägten Beckenlandschaft
 - Weitgespannte Niederungen dominieren gegenüber klaren Talstrukturen (Singerer Niederung, Niederung zwischen Orsingen und Espasingen).

- strukturbildend sind die Vulkanruinen der Hegauberge sowie mehrere Molasse-Erhebungen wie der Schienerberg oder die Hochlagen des Bodanrück.
- Im Osten markante ehemalige fluvioglaziale Schmelzwasserrinnen mit gering geneigter Talsohle
- das großräumige Gefälle ist zum Überlinger See bzw. Untersee hin ausgerichtet.

Die Landnutzungsanteile unterscheiden sich in den verschiedenen Teilräumen der Region markant. Während in den Hochlagen von Schwarzwald, Schwäbischer Alb und Schweizer Jura die Waldnutzung dominiert, weisen in allen anderen Gebieten die Freiflächen deutlich höhere Anteile auf. Waldflächen findet man hier nur noch in steileren Lagen an Talhängen.

Die Region ist insgesamt eher ländlich geprägt, verfügt aber mit den Oberzentren Weil a.Rh.-Lörrach und Konstanz, dem Kantons-Hauptort Schaffhausen sowie weiteren starken Mittelzentren auch über bedeutende städtische Funktionen und Strukturen.

Intensive menschliche Eingriffe im Hinblick auf die Oberflächengestaltung finden in der Region vor allem durch den Ausbau von Siedlungs- und Gewerbeflächen und den Kiesabbau statt. In Bezug auf die Gesamtfläche der Region erscheinen diese Eingriffe zwar relativ unbedeutend. Lokal betrachtet sind die Veränderungen jedoch erheblich, da neben der reinen Oberflächenbedeckung auch das Kleinrelief stark umgestaltet wird.

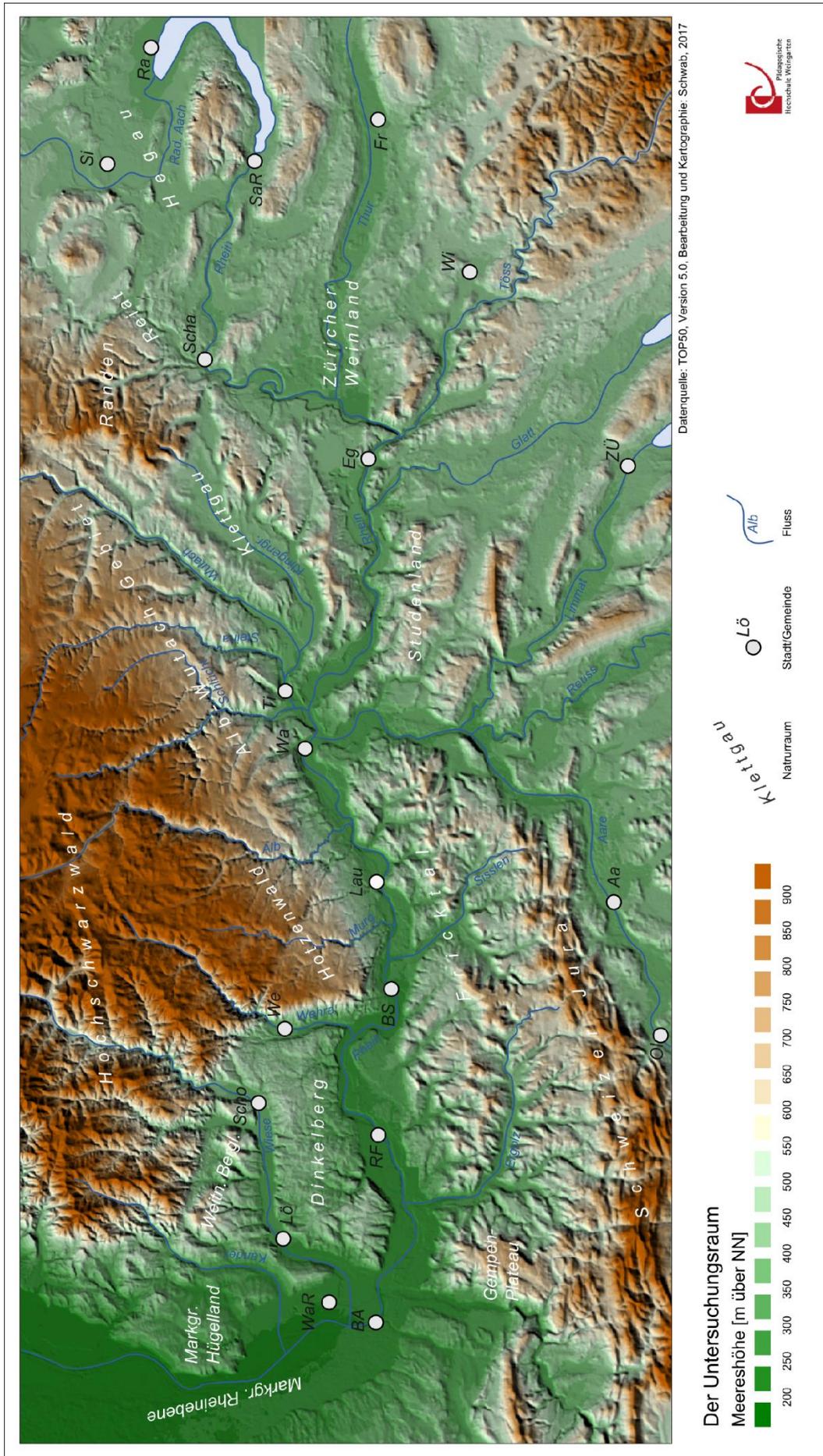


Abbildung 8: Grobe naturräumliche Gliederung des Untersuchungsraums (westlicher Teil)..

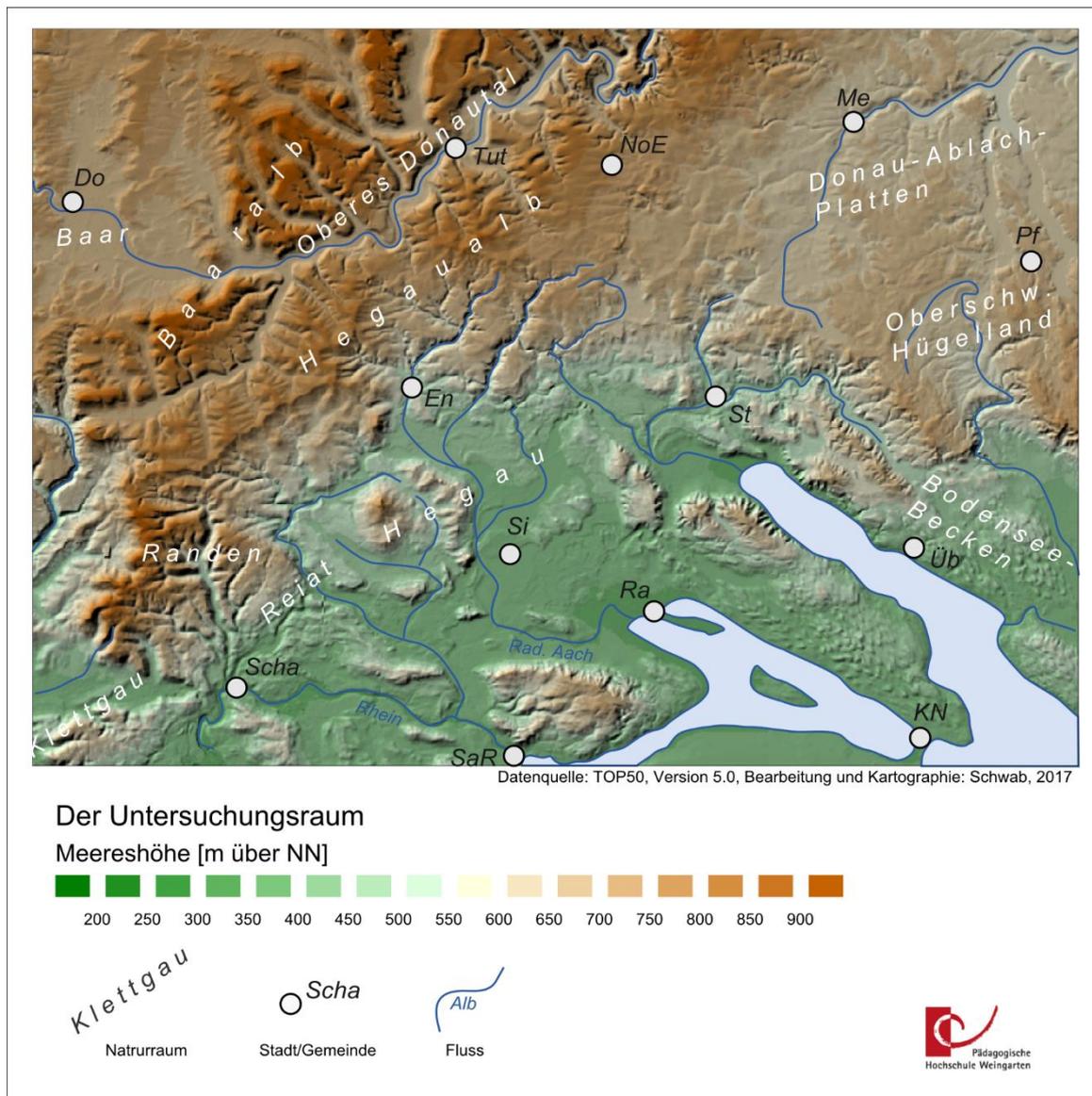


Abbildung 9: Grobe naturräumliche Gliederung des Untersuchungsraums (östlicher Teil).

3.2 Klimatische Einordnung der Region

3.2.1 Großklimatische Einordnung

Das Klima der Region wird durch die Lage im Bereich der Westwindzone bestimmt. Ozeanische und kontinentale Einflüsse wechseln sich ab und gestalten das Witterungsgeschehen sehr vielfältig. Niederschläge fallen in jedem Monat. Die Jahresniederschlagsmengen variieren zwischen < 800 mm im Hegau, 800 – 900 mm im Markgräfler Land und entlang des Hochrheins, zwischen 900 und 1100 mm auf dem Schweizer Randen und im Bereich der Hegaualb und bis zu 2000 mm im Hochschwarzwald. Diese räumliche Differenzierung der Niederschlagsmengen geht im Wesentlichen auf Steigungsregen- und Föhnneffekte zurück.

Bei den Temperaturen und Windverhältnissen zeigen sich sehr kleinräumige Unterschiede. Sie sind auf die unterschiedliche Wirkung von Höhenlage, Relief und Bodenbedeckung zurückzuführen. In abgeschwächter Form gilt dies auch für die auftretenden Inversions- bzw. Nebelhäufigkeiten. Im Folgenden sollen diese regionalen Modifikationen beschrieben werden.

3.2.2 *Mittlere Lufttemperaturen und Anzahl der Sommertage*

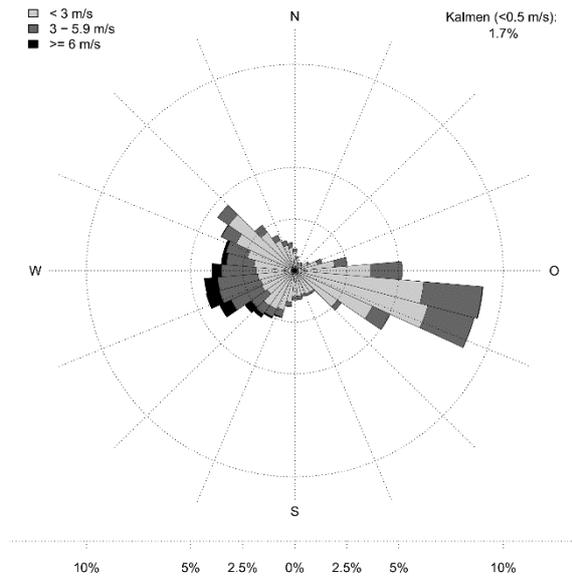
Bei der Betrachtung der mittleren Lufttemperaturen und der Anzahl der Sommertage (Tage mit Temperaturen über 25 °C) ergeben sich im Untersuchungsraum folgende Erkenntnisse:

- Unter dem Durchschnitt liegen die Temperaturen im Schwarzwald, auf der Hegualb und auf dem Randen.
- darüber liegen sie entlang des Hochrheins, im Markgräfler Land, im Hegau und am Unterlauf der Aare.
- Die Zahl der Sommertage (Tage mit über 25 °C) liegt in besonders warmen Lagen (Hochrhein, Markgräfler Land) bei über 50, innerhalb der Städte sicher noch etwas höher (städtischer Wärmeinseleffekt). Auch entlang der Aare werden noch über 40 Sommertage gezählt.
- Hochschwarzwald, Randen und Hegualb weisen hingegen nur bis 20 Sommertage auf.
- Damit zeigt die Region auch in dieser Hinsicht starke Gegensätze, welche im Wesentlichen auf die bekannte Höhenabhängigkeit der Lufttemperatur zurückzuführen sind.

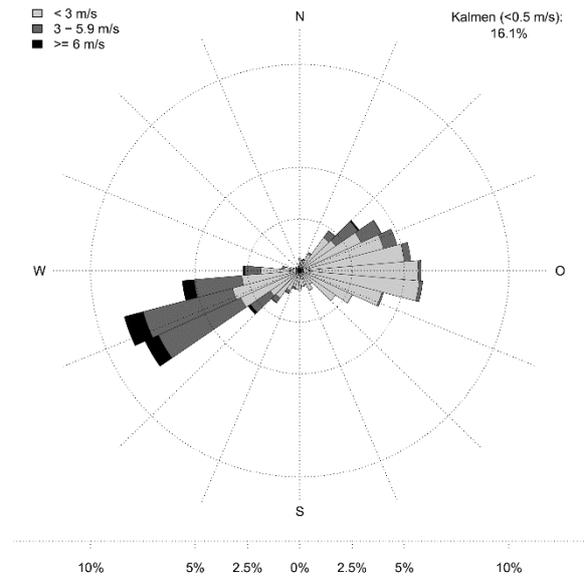
3.2.3 *Wind*

Aufgrund der Lage innerhalb der Westwindzone dominieren großräumig an vielen Standorten Winde aus Südwest bis West. Hochdruckwetterlagen mit Kern über Mitteleuropa führen jedoch auch zu Winden aus nordöstlichen Richtungen. Die Lage im Relief kann kleinräumig zu Kanalisierungseffekten führen, sodass im konkreten Fall eines Messstandortes die beobachteten Windrichtungen von den oben genannten abweichen können. Im Hinblick auf die Windgeschwindigkeiten fallen wieder die extremen Unterschiede innerhalb der Region auf (vgl. Klimaatlas von Baden-Württemberg (LUBW, 2006) sowie MeteoSchweiz (2017)):

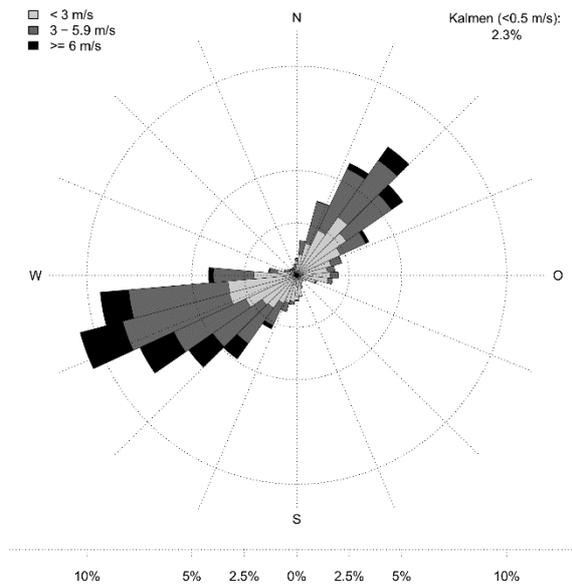
- Extrem hohe mittlere Windgeschwindigkeiten (10 m über Grund) werden in den Hochlagen des Schwarzwalds erreicht (ca. 6 m/s).
- Noch überdurchschnittlich sind die Windgeschwindigkeiten im Bereich der exponierten Lagen im Alb-Wutach-Gebiet und auf dem Randen.
- Besonders windschwach (2,0-2,3 m/s) ist das Tal des Hochrheins.
- Auch die tiefen Schwarzwaldtäler wie das Wiesental weisen niedrige mittlere Windgeschwindigkeiten auf.
- Der Hegau kann ebenfalls als windschwacher Teilraum angesehen werden.
- Damit bestätigen sich im Untersuchungsraum auch hinsichtlich der Windgeschwindigkeiten die bekannten Gesetzmäßigkeiten (vgl. Kap. 2):
- Tiefländer, Becken und Täler sind relativ windschwach.
- Bergländer weisen deutlich höhere Windgeschwindigkeiten auf.
- Einen bedeutenden Einfluss hat auch die jeweilige Landnutzung: Im Bereich von Siedlungen und Waldflächen sind die bodennahen Windgeschwindigkeiten deutlich reduziert.
- Die Windrosendarstellungen der verschiedenen Messstationen im Untersuchungsgebiet (vgl. Abb. auf den Folgeseiten) zeigen zum einen die Dominanz der übergeordneten Hauptwindrichtungen, zum anderen aber auch deren Modifikation durch die lokalen Standort-Effekte.



Station Basel/Binningen
 km-Koord. 610 911 / 265 600
 Höhe: 316 m ü. M.
 Messzeitraum: von 01.01.1981 – 31.12.2000

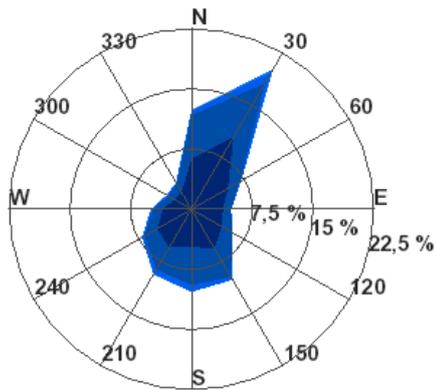


Station Leibstadt
 km-Koord. 656 378 / 272 111
 Höhe: 341 m ü. M.
 Messzeitraum: von 01.01.1985 – 31.12.2000

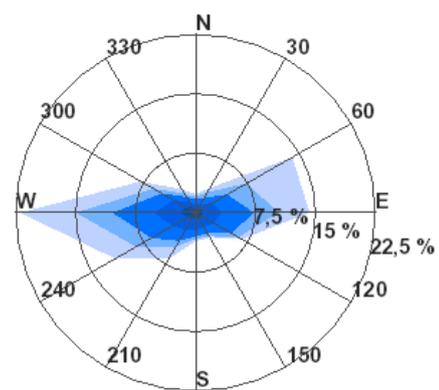


Station Schaffhausen
 km-Koord. 688 698 / 282 796
 Höhe: 438 m ü. M.
 Messzeitraum: von 01.01.1982 – 31.12.2000

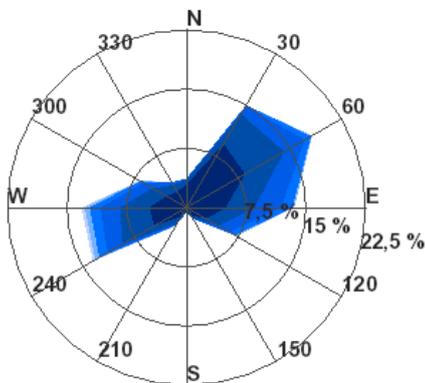
Abb.10: Mittlere Windrosen, berechnet aus Stundenmittelwerten der Windgeschwindigkeit an verschiedenen amtlichen Wetterstationen (MeteoSchweiz, 2017).



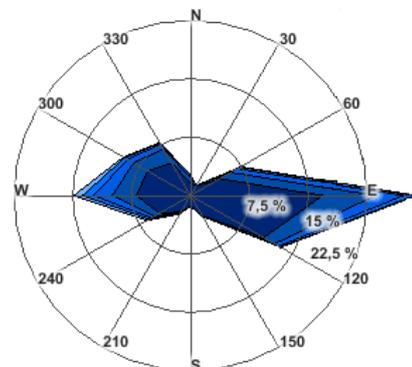
Messstation Waldshut
LUBW-Station (aktiv)
mittlere Windgeschw.: 1,03 m/s
Rechtswert: 3441525 Hochwert: 5276025
Höhe ü.NN: 340 m
Messzeitraum: von 01.01.1997 bis 21.12.2006



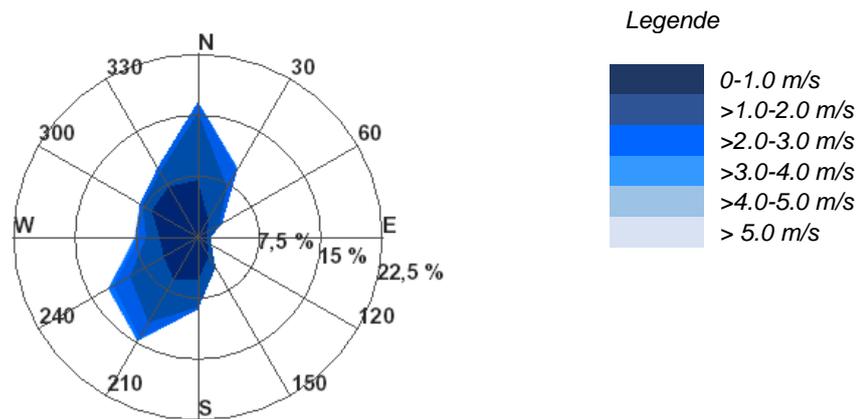
Messstation: Herrischried-Hornberg
LUBW-Station (stillgelegt)
mittlere Windgeschw.: 3,81 m/s
Rechtswert: 3421800 Hochwert: 5280750
Höhe ü.NN: 1000 m
Messzeitraum: von 22.11.1990 bis 10.02.1992



Messstation: Rheinfeldern
LUBW-Station (stillgelegt)
mittlere Windgeschw.: 1,44 m/s
Rechtswert: 3408950 Hochwert: 5270125
Höhe ü.NN: 285 m
Messzeitraum: von 01.01.1994 bis 31.12.2003



Messstation: Weil am Rhein
LUBW-Station (aktiv)
mittlere Windgeschw.: 1,9 m/s
Rechtswert: 3397275 Hochwert: 5273100
Höhe ü.NN: 275 m
Messzeitraum: von 01.09.1997 bis 31.12.2006



Messtation: Singen
 LUBW-Station (stillgelegt)
 mittlere Windgeschw.: 1,18 m/s
 Rechtswert: 3487425 Hochwert: 5291525
 Höhe ü.NN: 440 m
 Messzeitraum: von 16.09.1990 bis 15.10.1991

Abb. 11: Mittlere Windrosen, berechnet aus Stundenmittelwerten der Windgeschwindigkeit an verschiedenen amtlichen Wetterstationen (LUBW, 2017).

3.2.4 Inversionshäufigkeit

Auch im Hinblick auf die Inversionshäufigkeit kann der Untersuchungsraum als eine Region der Gegensätze gelten. Aus dem Klimaatlas von Baden-Württemberg (LUBW, 2006) lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Die Region hat Anteil an zwei Teilgebieten Baden-Württembergs, die eine sehr hohe Inversionshäufigkeit aufweisen. So werden entlang des Hochrheins und Oberrheins sowie im Bodensee-Becke an über 225 Tagen im Jahr Inversionen beobachtet.
- Die Höhenlagen im Untersuchungsraum sind erwartungsgemäß deutlich weniger inversionsgefährdet. So werden z.B. auf der Hegaualb unter 100, im Hochschwarzwald unter 75 Tage mit Inversionen gezählt.

3.2.5 Durchlüftungsverhältnisse

Bereits in Kap. 2 wurden die Durchlüftungsverhältnisse großräumig betrachtet. Demnach sind die Talniederungen entlang des Hochrheins und teilweise auch seiner Zuflüsse schlecht durchlüftet (hohe Inversionshäufigkeit, relativ geringe Windgeschwindigkeiten). Ebenso das Bodensee-Becken. Gute Durchlüftungsverhältnisse sind in allen höher gelegenen Gebieten außerhalb der Talstrukturen anzutreffen.

3.2.6 Wärmebelastung

Wärmebelastung tritt hauptsächlich bei sommerlichen, strahlungsreichen Hochdruckwetterlagen mit geringer Luftbewegung und auf. Die in Kap. 2 erklärten Zusammenhänge mit Höhenlage, Relief und Landnutzung lassen sich auch in der Region Hochrhein-Bodensee gut nachvollziehen (vgl. LUBW, 2006: Karte der Wärmebelastung):

- Am häufigsten ist demnach in den großen, tiefgelegenen Tallandschaften mit Wärmebelastung zu rechnen, in erster Linie entlang von Hochrhein und Oberrhein aber auch entlang von Wiese, Wehra und entlang der Unterläufe weiterer Rheinzuflüsse.
- Außerdem tritt auch das westliche Bodensee-Becken mit dem Hegau als Belastungsraum hervor.
- Für die flächengrößten Siedlungen werden innerhalb dieser Belastungsgebiete teilweise über 30 Tage mit Wärmebelastung angenommen.
- Zum Vergleich: Für die am stärksten belasteten Städte in der Oberrheinebene (z.B. Karlsruhe) werden bis zu 37 Tage Wärmebelastung angenommen.
- Im Kontext des globalen Klimawandels ist auch im Untersuchungsraum mit einer steigenden Anzahl an Hitzetagen und mit einer allgemein zunehmenden Wärmebelastung zu rechnen.

3.2.7 Zusammenfassung

- Aufgrund der Lage in der Westwindzone dominieren in der Region Westwinde bzw. Südwestwinde.
- Die Niederschlagsmuster zeigen extreme regionale Unterschiede, die auf Steigungsregen- bzw. Föhnneffekte zurückgehen.
- Die vielfältigen Landschaftsformen und die Landnutzungsverteilung führen auch zu einer starken regionalen Differenzierung von Wind, Lufttemperatur, Wärmebelastung und Durchlüftungsverhältnissen.
- Vor allem in den Städten in Tallage bzw. Beckenlage ist mit einer hohen Wärmebelastung und schlechten Durchlüftungsverhältnissen zu rechnen.
- Dies betrifft vor allem die Städte Weil am Rhein, Bad Säckingen, Rheinfelden, Lörrach, Schopfheim, Wehr und Waldshut-Tiengen. Auch Konstanz, Singen und Radolfzell sowie Schaffhausen weisen diese Eigenschaft auf.
- Städte und Ortschaften in den höher gelegenen Teilgebieten dürften hingegen aktuell kaum mit Durchlüftungsproblemen bzw. Wärmebelastung zu kämpfen haben.
- Im Hinblick auf den aktuellen Klimawandel ist jedoch allgemein mit einer deutlichen Zunahme der Wärmebelastung zu rechnen.

4 Fragestellungen und Konzeption der Regionalen Klimaanalyse

4.1 Fragestellungen

Innerhalb des Untersuchungsraumes gilt das Hochrheintal und das Wiesental (jeweils zusammen mit den größeren Nebentälern) und der Hegau als schlecht durchlüftet (vgl. Kapitel 3). Bei windschwachen Strahlungswetterlagen kommt es hier häufig zur Ausbildung von Inversionen. Durch den damit verbundenen reduzierten vertikalen und horizontalen Luftaustausch verschlechtern sich die lufthygienischen Verhältnisse. In größeren Städten können so Belastungssituationen entstehen.

Große Bedeutung erlangen dann lokale Windsysteme, insbesondere nächtliche Bergwinde und Hangabwinde. Sie können in ihren Wirkungsräumen die tagsüber mit Schadstoffen angereicherte Luft durch frische Luft ersetzen (Frischluftröme) und für Abkühlung sorgen (vgl. Kap. 2). Während solche Windsysteme in vielen Regionen bereits näher untersucht wurden, sind im Hochrhein-Bodensee-Gebiet bislang nur relativ geringe Detailkenntnisse über lokale Windsysteme vorhanden. Betrachtet man die naturräumliche Ausstattung des Raumes, insbesondere die auftretenden Höhenunterschiede, sind jedoch auch hier solche Phänomene zu erwarten. Dadurch ergeben sich für eine regionale Klimaanalyse folgende Fragestellungen:

- Mit welchen Intensitäten treten nächtliche Kalt- und Frischluftröme aus Tälern (nächtliche Bergwinde, Talabwinde) bzw. an Hängen (Hangabwinde) auf?
- Wie weit reichen sie in die jeweiligen Vorländer hinein?
- Wo ist mit starken bodennahen Inversionen (Kaltluftseen) zu rechnen?
- Wo liegen bedeutende Frischluff produzierende Flächen?
- Welche Siedlungsräume profitieren besonders von den positiven Wirkungen?
- In welchen Siedlungsräumen ist mit besonderen Belastungssituationen zu rechnen?
- Wie können die Freiflächen hinsichtlich ihrer Durchlüftungsaktivität bewertet werden?
- Welche Konsequenzen für Raumordnung und Städtebau sind daraus abzuleiten?

4.2 Konzeption

Die Klimaanalyse hat somit das übergeordnete Ziel, klimakritische Bereiche flächendeckend zu ermitteln und entsprechende Handlungsstrategien vorzuschlagen. Um zu einer möglichst großmaßstäblichen Darstellung klimakritischer Bereiche zu kommen, wurden die im Rahmen der Regionalen Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben (REKLIBO) entwickelten und getesteten Modellierungsverfahren auf das Untersuchungsgebiet angewandt.

Eine flächendeckende Analyse der klimatischen Situation in der Gesamtregion wird dabei durch die Anwendung verschiedener Rechenmodelle erreicht, mit deren Hilfe nächtliche Kaltluftbewegungen und potentielle Kaltluftstaugebiete bestimmt werden können. Neben vergleichsweise einfachen numerischen Ansätzen kommt hier in erster Linie das Kaltluftabflussmodell des Deutschen Wetterdienstes (KLAM_21) zum Einsatz.

Eine zusammenfassende Darstellung der Modellergebnisse erfolgt in Form von Klimaanalysekarten. Als hilfreiche Ergänzung für die Auswertung der Klimaanalysekarten dienen Analysemethoden zur Bestimmung siedlungsrelevanter Kaltlufteinzugsgebiete und Luftleitbahnen, die auf den Daten der verwendeten Rechenmodelle basieren.

Aufgrund mangelnder finanzieller und zeitlicher Ressourcen wurde im Rahmen der Klimaanalyse Hochrhein-Bodensee auf die Durchführungen von Messungen verzichtet. Dies erscheint im Hinblick auf die umfangreichen Datengrundlagen aus REKLIBO gerechtfertigt, da die Modellergebnisse hier an vielen Beispielen verifiziert werden konnten. Auch Analogie-Schlüsse sind für viele Situationen im Untersuchungsraum möglich. Es wird an dieser Stelle dennoch darauf hingewiesen, dass eine Überprüfung der Modellergebnisse durch Messungen

insbesondere in den naturräumlichen Einheiten der Region Hochrhein-Bodensee sinnvoll wäre, die in der Region, in der der Ansatz für REKLIBO entwickelt wurde, nicht ebenfalls vorkommen.

5 Grundlagen zum Kartenteil

5.1 Bereitstellung der Datengrundlage

Für die Erstellung von Grundlagenkarten, für die Anwendung der reliefanalytischen Verfahren und für die Modellierung mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 müssen *digitale Geländemodelle* und *Landnutzungsdatensätze* bereitgestellt werden. Dazu sind die räumliche Ausdehnung und die horizontale Auflösung des Rechengebiets sinnvoll festzulegen. Es muss abgewogen werden, welcher Aufwand bei der Beschaffung und Aufbereitung von „Rohdaten“ gerechtfertigt erscheint. Auch ist zu berücksichtigen, welche Rechenzeiten bei der Wahl bestimmter Gitterauflösungen zu erwarten sind. Ferner sollte danach gefragt werden, mit welchem Mehrwert bei der Verwendung alternativer „besserer“ Daten gerechnet werden kann. Im Rahmen der Klimaanalyse Hochrhein-Bodensee wurde ein Mittelweg gewählt, der im Folgenden beschrieben wird.

5.1.1 Räumliche Ausdehnung der Rechengebiete

Die Größe des Rechengebietes orientiert sich hier vor allem an den von den Rechenmodellen zu simulierenden Prozessen. Da es in erster Linie um die Darstellung nächtlicher Kaltluftbewegungen geht, ist nicht nur der eigentliche Untersuchungsraum zu berücksichtigen. Vielmehr sind die Gebietsgrenzen so großzügig zu wählen, dass potentielle Kaltlufteinzugsgebiete möglichst komplett erfasst werden. Dies gilt sowohl für einzelne Talsysteme, insbesondere aber auch für die großräumigen Reliefeinheiten.

5.1.2 Horizontale Auflösung der Rechengitter

Die verwendete horizontale Auflösung der Rechengitter ist ebenfalls abhängig von den jeweils angewandten Rechenverfahren. Da KLAM_21 in der verwendeten Version nur mit Rechengittern von maximal 1500 x 1500 Punkten arbeiten kann, ergibt sich bei der gewählten Gebietsgröße eine maximale horizontale Auflösung von 90 m x 90 m. Auch aus rechenökonomischen Gründen wären höhere Auflösungen nicht sinnvoll. Die reliefanalytischen Verfahren sind weniger anspruchsvoll im Hinblick auf Speicherbedarf und Rechenzeit. Hier kommen Datensätze in einer 30 m x 30 m – Auflösung zur Anwendung.

5.1.3 Landnutzungsdaten

Zur Beschreibung der Landnutzung wurde vom Auftraggeber ein Datensatz zur Verfügung gestellt, der auf folgenden Ausgangsdaten beruht:

- ATKIS Basis-DLM: © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de)
- ATKIS Basis-DLM: © Bayerische Vermessungsverwaltung (www.geodaten.bayern.de)
- Corine Land Cover (CLC) 2006
- Satellitenbildszenen Landsat TM5 (2006), Spektralkanäle 1, 2, 3, 4, 5, 7, zur Differenzierung von Siedlungsklassen (Siedlung dicht, Siedlung locker)

Die hier unterschiedenen Landnutzungsklassen sind Tabelle 1 zu entnehmen. Da die Zuordnung bestimmter Klassen bei einer Satellitenbilddauswertung in erster Linie nach spektralen Kriterien vorgenommen wird, muss auf das Problem von Fehlklassifikationen hingewiesen werden, die häufig durch Unschärfen in den Spektraleigenschaften hervorgerufen werden. So unterscheiden sich auf den Satellitenbildern des Untersuchungsraums zum Beispiel Siedlungsflächen kaum von Kiesabbauflächen. Ähnliche spektrale Eigenschaften bedeuten jedoch in der Regel auch, dass sich die entsprechenden Flächen im Hinblick auf die Produktion nächtlicher Kaltluft ähnlich verhalten. So kann im genannten Beispiel für beide Landnutzungstypen (Siedlung, Kiesabbau) intensive Kaltluftproduktion ausgeschlossen werden. Im Hinblick auf die

Kaltluftentstehung ist eine solche Fehlklassifikationen also nur von untergeordneter Bedeutung.

Dies trifft auch auf die Landnutzungsänderungen zu, die sich im Bereich von Freiflächen (Grünland oder Ackerbau) seit dem Aufnahmedatum ergeben haben. Insbesondere für die Berechnungen mit KLAM_21 sind diese Veränderungen unproblematisch, da das Rechenmodell in seinen Standardeinstellungen nicht zwischen Ackerflächen und Grünland unterscheidet. Auch bei den aus der Literatur bekannten Kaltluftproduktionsraten wird hier keine Unterscheidung vorgenommen.

Anders verhält es sich, wenn Freiflächen in Siedlungsflächen (Neubaugebiete, neue Gewerbeflächen) oder versiegelte Freiflächen (z.B. Straßen) umgewandelt wurden. Dann ergeben sich neue Situationen im Hinblick auf Kaltluftentstehung („Kälteproduktion“) und Kaltluftbewegung (Reibungskoeffizienten). Bei der Auswertung der Modellergebnisse ist dies gegebenenfalls zu berücksichtigen.

Tabelle 1: Klassennummerierungen samt Kurznamen der Klassen im Ausgangsdatensatz und innerhalb des Kaltluftabflussmodells KLAM_21.

Ausgangsdatensatz		KLAM_21	
Value	Beschreibung	Value	Beschreibung
1	Siedlung (dicht bebaut)	1	Siedlung (dicht)
2	Siedlung (locker bebaut)	2	Siedlung (locker)
3	Industrie/Gewerbe	5	Industriegebiet
4	Gewässer	9	Wasser
5	Wald	3	Wald
6	Unversiegelte Freiflächen	7	Unversiegelte Freiflächen
7	Versiegelte Freiflächen	8	Versiegelte Flächen
8	Gleisanlagen	6	Gleisanlagen
		4	Großes Gewässer

5.1.4 Digitales Geländemodell (DGM)

Zur Beschreibung des Reliefs wurde vom Auftraggeber ein Digitales Geländemodell zur Verfügung gestellt, das auf folgenden Ausgangsdaten beruht:

- Digitales Geländemodell (DGM5): © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de)
- Digitales Geländemodell (DGM25): © Bayerische Vermessungsverwaltung (www.geodaten.bayern.de)
- Digitales Gelaendemodell (SRTM-3): frei verfügbare Fernerkundungsdaten, Shuttle Radar Topography Mission - SRTM, 2000-2009, für Bereiche außerhalb der Region

Die bereitgestellten Datensätze (DGM und Landnutzungsklassifikation) haben eine horizontale Auflösung von 30 m x 30 m und umfassen 4500 x 4500 Bildpunkte. Diese Daten und die entsprechenden Bilder werden für kartographische Zwecke und für hoch aufgelöste Rechnungen in Teilgebieten verwendet. Für die Rechnungen mit KLAM_21 im Gesamtgebiet dienen Datensätze mit einer Auflösung von 90 m x 90 m und 1500 x 1500 Bildpunkten, die im Falle der Landnutzungsklassifikation über ein Nearest Neighbour-Verfahren und im Falle des Geländemodells durch Mittelwertbildung aus den höher aufgelösten Daten abgeleitet wurden.

Das von den Datensätzen abgedeckte Rechengebiet reicht von RW 3386000 HW 5355000 bis RW 3521000 HW 5220000. Es bedeckt somit eine Fläche von 135 km x 135 km.

5.2 Anwendung reliefanalytischer Verfahren

Für eine erste Analyse potentieller nächtlicher Kaltluftbewegungen eignen sich einfache reliefanalytische Verfahren. So wurden aus den flächenhaft vorhandenen Informationen über die Geländehöhen und Landnutzungen durch Anwendung der nachfolgend beschriebenen Berechnungsvorschriften Größe und mittlere Neigung von Einzugsgebieten, aber auch die in den Einzugsgebieten vorkommenden Landnutzungsanteile berechnet. Zur Vereinfachung liegt dabei die Annahme zugrunde, dass hydrologische Einzugsgebiete in vielen Fällen recht gut mit Kaltlufteinzugsgebieten übereinstimmen.

5.2.1 Charakterisierung von Einzugsgebieten

5.2.1.1 Verwendeter Algorithmus

Zur umfassenden Charakterisierung von (Kaltluft-)einzugsgebieten wurde ein modifizierter single-flow-Algorithmus verwendet, der von SCHWAB (2000) ausführlich beschrieben wurde. Im Folgenden wird die grundlegende Idee des Verfahrens am Beispiel der Berechnung von Einzugsgebietsflächen vorgestellt.

Der Algorithmus arbeitet folgende Schritte ab (vgl. Abbildung):

Schritt 1: Die Indizes der Punkte des DGM werden der Geländehöhe nach absteigend sortiert. Der so entstehende Index-Vektor legt die anschließende Bearbeitungsreihenfolge fest.

Schritt 2: Jeder Pixel im DGM wird mit seiner Flächengröße belegt (im Falle einer Auflösung von 30 m x 30 m also mit dem Wert 900).

Schritt 3: Beginnend beim höchsten (=„ersten“) Punkt, werden folgende Teilschritte ausgeführt:

- Aus den Höhendifferenzen und den Entfernungen zu den acht Nachbarn werden die jeweiligen Gefälle bestimmt.
- Der an einem Punkt vorhandene Wert wird an jenen Nachbarn „weitergegeben“, zu dem das stärkste Gefälle besteht. Besteht dieses Gefälle in mehrere Richtungen, so muss der Wert entsprechend aufgeteilt werden.
- Es wird beim nächst tiefer gelegenen (=„nächsten“) Punkt fortgefahren.

Schritt 3 ist beendet, wenn man beim tiefsten (=„letzten“) Punkt innerhalb des DGM angelangt ist.

Die Abarbeitung der einzelnen Pixel in der absteigend sortierten Reihenfolge gewährleistet, dass zu jedem Zeitpunkt der Rechnung alle höher gelegenen Punkte bereits bearbeitet sind. Eine Veränderung des Wertes am aktuell betrachteten Punkt zu einem späteren Zeitpunkt der Berechnung ist also auszuschließen. Ein einmaliges Abtasten des DGM reicht somit aus. Durch die sukzessive Aufsummierung der Flächen entlang der bestimmten Fließpfade entsteht ein flächenhafter Datensatz, der für alle Punkte die Flächen der jeweiligen Einzugsgebiete angibt. Die Einzugsgebietsgrößen einzelner Täler lassen sich bestimmen, indem die Werte an den entsprechenden Punkten an den Talausgängen abgefragt werden.

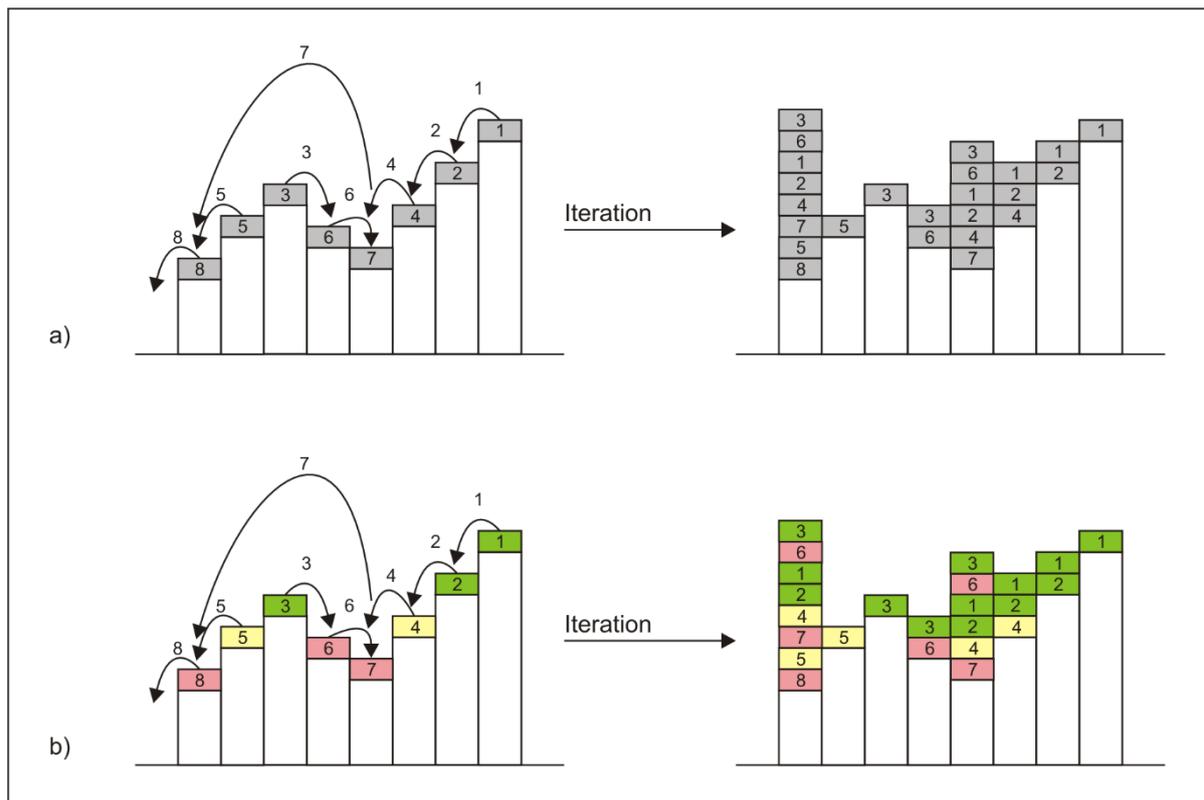


Abbildung 12: Aufsummierung von Pixelattributen durch Umverteilung in Richtung des stärksten Gefälles in absteigend sortierter Reihenfolge („single flow“-Ansatz). a) Unabhängig von der jeweiligen Landnutzung b) In Abhängigkeit der jeweiligen Landnutzung. (Entwurf: Schwab).

Natürlich lassen sich auch andere Attribute aufsummieren und damit etwa folgende Eigenschaften bestimmen:

- **Potentielle Volumenströme:** Initialisiert man die Pixel im Rechengebiet mit Kaltluftvolumen in Abhängigkeit von landnutzungsspezifischen Kaltluftproduktionsraten, so erhält man als Ergebnis potentielle Volumenströme an den Talausgängen.
- **Flächenanteile einzelner Landnutzungsklassen:** Hier sind im Attribut-Gitter nur solche Pixel mit ihrer Fläche zu initialisieren, die in die entsprechende Landnutzungsklasse fallen. Alle anderen erhalten den Wert 0. Den relativen Flächenanteil der Klasse in Prozent erhält man, indem gleichzeitig die Gesamtfläche des Einzugsgebietes (s.o.) bestimmt und der entsprechende Quotient gebildet wird. Um sich mehrmaliges Rechnen für die verschiedenen Landnutzungsklassen zu ersparen, können für alle interessierenden Klassen eigene Rechengitter eingerichtet werden. Aus den so bestimmten Werten kann dann die mittlere Ausprägung aller landnutzungsspezifischen Größen (z.B. Rauigkeitslängen oder Kaltluftproduktionsraten) im Einzugsgebiet berechnet werden.

Um die mittlere Ausprägung von Attributen im Einzugsgebiet jedes einzelnen Pixels zu bestimmen, ist das Verfahren geringfügig abzuwandeln. Es gilt, dass zu jedem Zeitpunkt der Berechnung jedem Punkt eine Einzugsgebietsfläche und die mittlere Ausprägung des Attributes auf dieser Fläche zugeordnet sind. Wird im aktuellen Bearbeitungsschritt einem Punkt nun eine weitere Fläche zugeteilt (von einem höher gelegenen Nachbarn), ergibt sich, wie bisher, die neue Einzugsgebietsfläche des Punktes als Summe von bisheriger und zugeteilter Fläche. Die mittlere Ausprägung des Attributes auf der neu bestimmten Fläche erhält man dann durch Gewichtung nach den Anteilen von alter und zugeteilter Fläche an der neu bestimmten Gesamtfläche.

Auf die beschriebene Art und Weise wurden zum Beispiel die mittleren Neigungen im Einzugsgebiet bestimmt:

Soll die mittlere Ausprägung von Attributen landnutzungsspezifisch bestimmt werden (z.B. mittlere Neigung der Wiesenflächen), muss das oben beschriebene Verfahren nicht mehr auf die gesamte Einzugsgebietsfläche, sondern nur noch auf den Anteil der entsprechenden Klasse angewandt werden. Man benötigt dann für jede zu behandelnde Klasse ein Rechengitter für den absoluten Flächenanteil und das entsprechende Attribut.

5.2.1.2 Ergebnisse

Mit den beschriebenen Algorithmen wurden das Relief und die Landnutzung des gesamten Rechengebietes analysiert. Die Ergebnisse liegen in flächenhaften Datensätzen vor. An einzelnen Talausgängen wurden die Werte abgegriffen und in tabellarischer Form (vgl. Tabelle 2) sowie in Form einfacher Balkendiagramme (vgl. 15– Abb.21) dargestellt. Abb.13 und Abb.14 zeigen die ungefähre Lage dieser Punkte. Bei den Diagrammdarstellungen wurden die Werte jeweils nach Größe sortiert, um einen besseren Überblick über die auftretenden Werte zu erhalten.

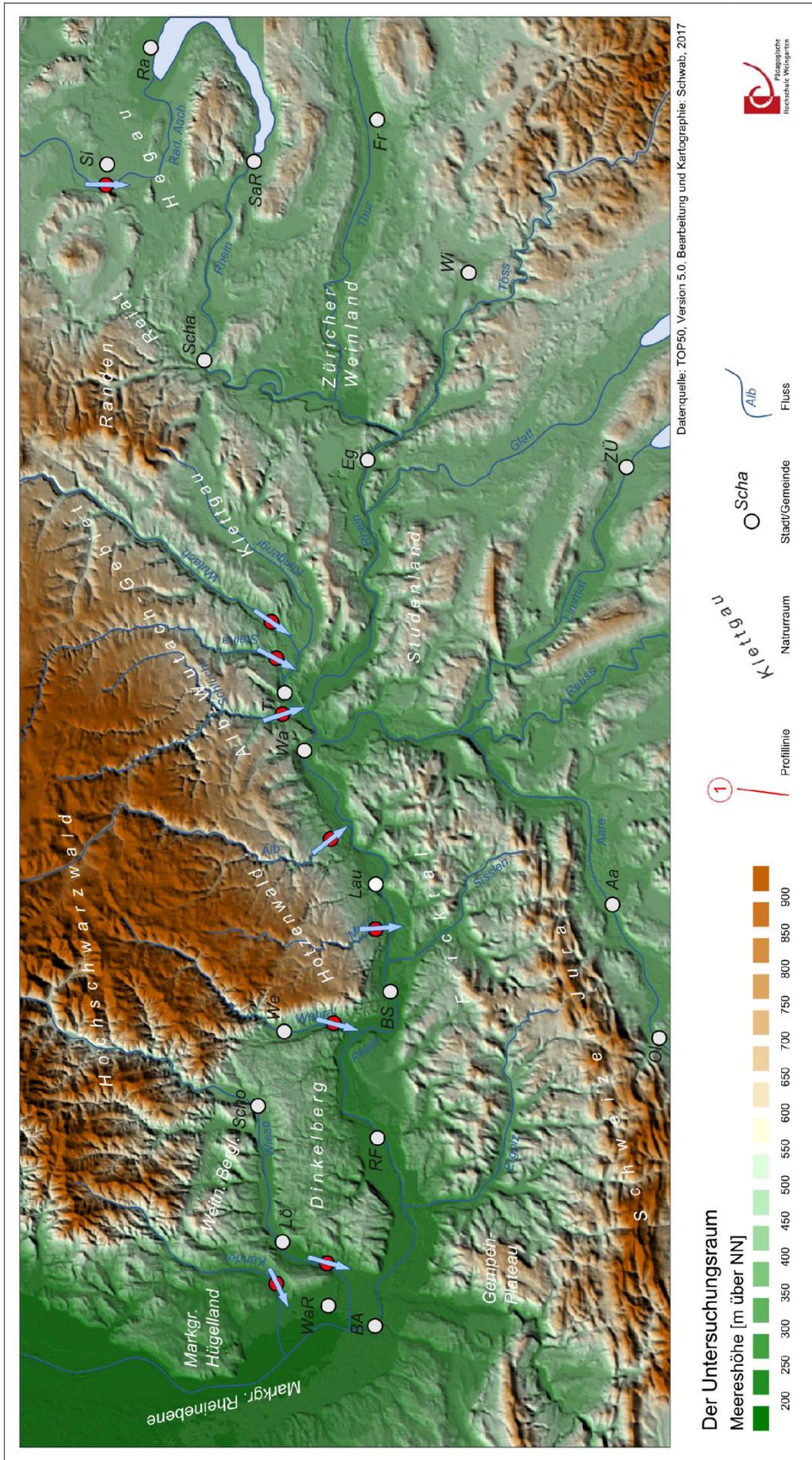


Abb. 13: Ungefähre Lage der Talausgänge, an denen die mit Hilfe der reliefanalytischen Verfahren berechneten Merkmale von Einzugsgebieten abgegriffen wurden (vgl. nachfolgende Grafiken und Tabelle).

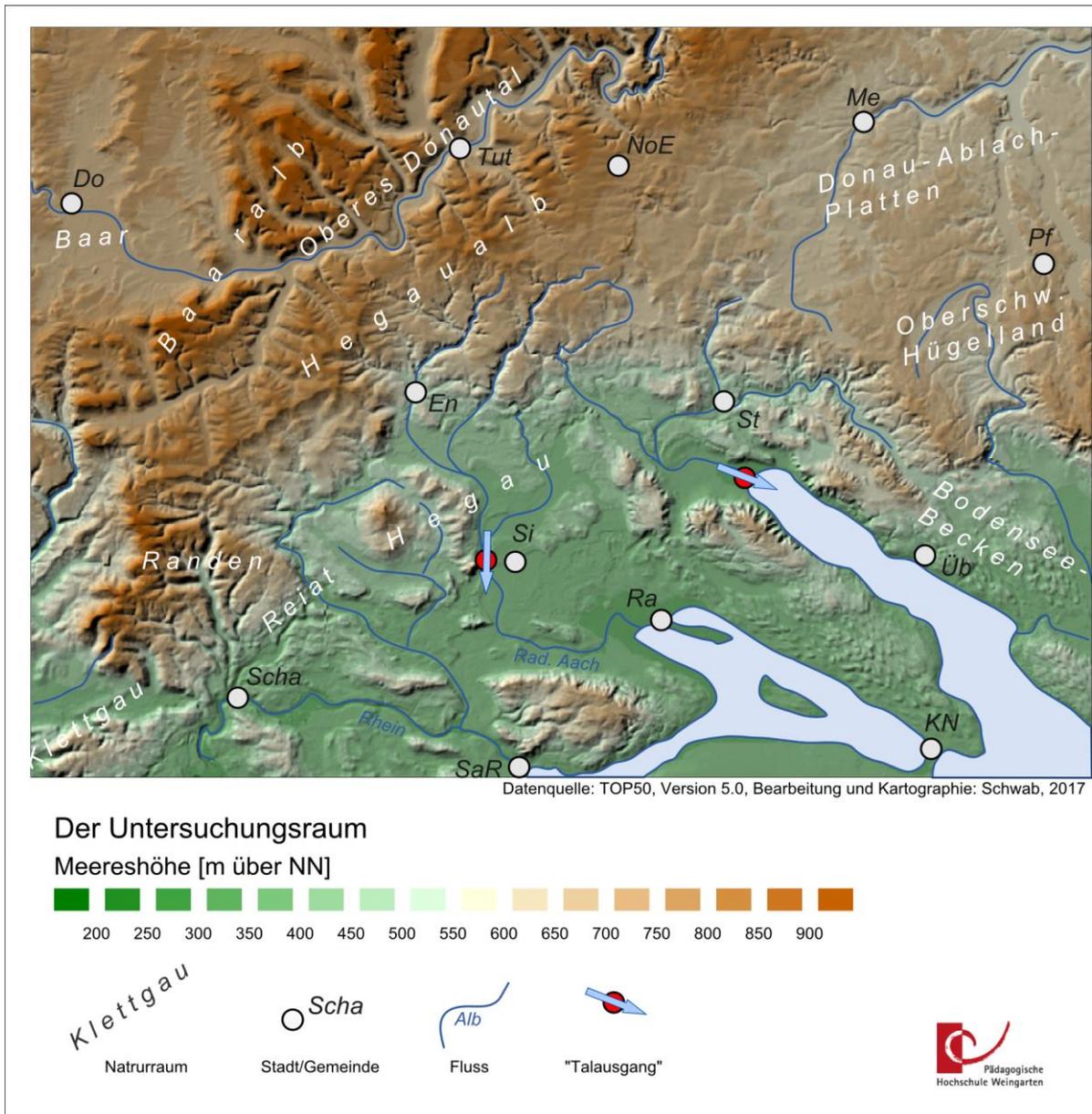


Abb. 14: Ungefähre Lage der Talausgänge, an denen die mit Hilfe der reliefanalytischen Verfahren berechneten Merkmale von Einzugsgebieten abgegriffen wurden (vgl. nachfolgende Grafiken und Tabelle).

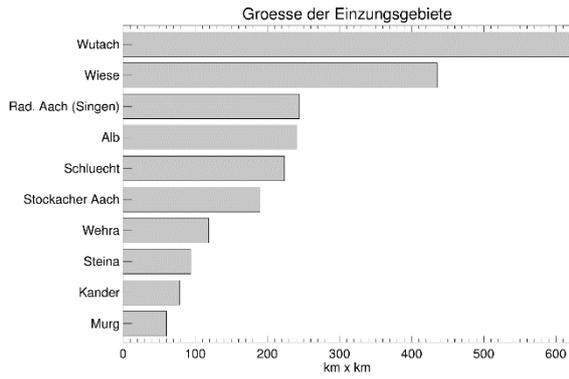


Abb.15: Grösse der Einzugsgebiete an verschiedenen Talausgängen. Angaben in km².

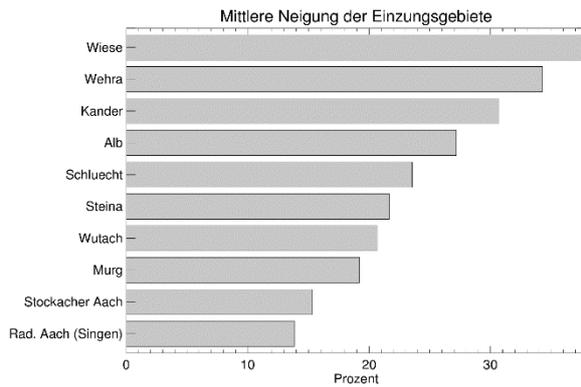


Abb.16: Mittlere Neigung der Einzugsgebiete an verschiedenen Talausgängen. Angaben der Neigung als Tangens des Winkels, also in Prozent.

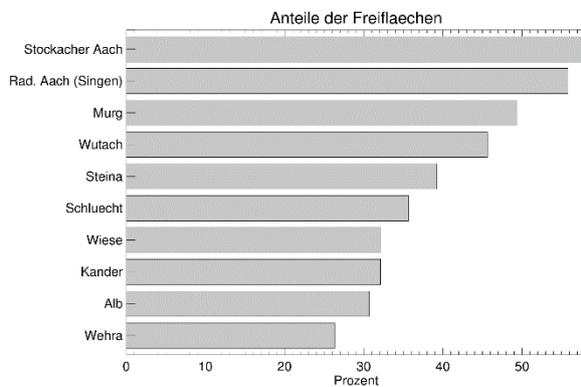


Abb.17: Anteile der Freiflächen im Einzugsgebiet an verschiedenen Talausgängen. Angaben in Prozent.

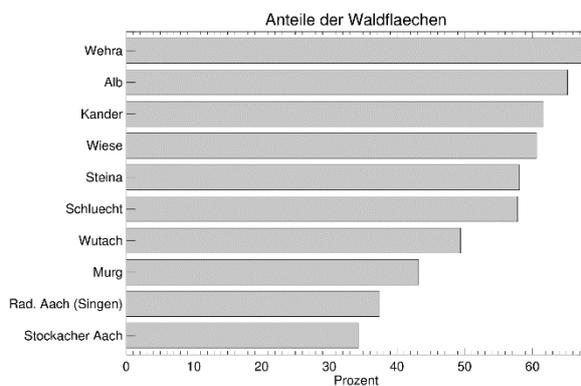


Abb.18: Anteile der Waldflächen im Einzugsgebiet an verschiedenen Talausgängen. Angaben in Prozent.

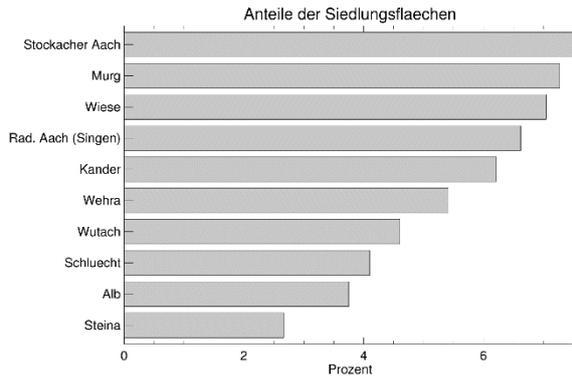


Abb.19: Anteile der Siedlungsflächen im Einzugsgebiet an verschiedenen Talausgängen. Angaben in Prozent.

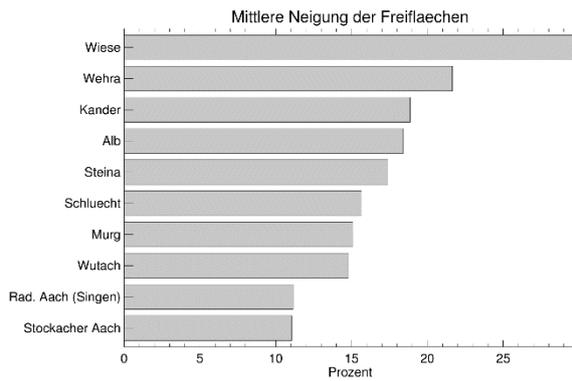


Abb.20: Mittlere Neigung der Freiflächen im Einzugsgebiet an verschiedenen Talausgängen. Angaben der Neigung als Tangens des Winkels, also in Prozent.

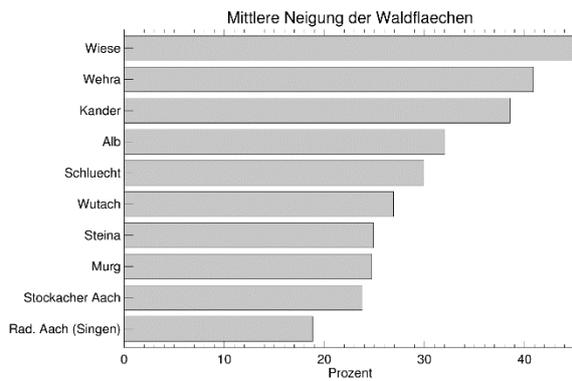


Abb.21: Mittlere Neigung der Waldflächen im Einzugsgebiet an verschiedenen Talausgängen. Angaben der Neigung als Tangens des Winkels, also in Prozent.

Tabelle 2: Ergebnisse der Reliefanalyse an ausgewählten Talausgängen. Eg_A steht für die Fläche des Einzugsgebiets in km². Eg_N steht für die mittlere Neigung des Einzugsgebiets, angegeben als Tangens des Neigungswinkels. Eg_H steht für die mittlere Höhe des Einzugsgebiets. Die anschließenden Angaben beziehen sich auf die verschiedenen Landnutzungsklassen K1 bis K9 (vgl. Tabelle 1). Dabei sind immer zunächst die Flächenanteile und anschließend die mittleren Neigungen auf diesen Flächen angegeben. Erläuterungen im Text.

Name_des_Tales	eg_A	eg_N	eg_H	K1	N_K1	K2	N_K2	K3	N_K3	K4	N_K4	K5	N_K5	K6	N_K6	K7	N_K7	K8	N_K8	K9	N_K9
Wiese	435	37.86	720	1.5	6.58	3.7	17.49	60.6	45.15	0.0	0.00	1.6	6.74	0.1	2.04	32.2	29.81	0.1	10.66	0.2	14.26
Wehra	118	34.27	739	0.9	8.62	3.3	16.85	67.9	40.86	0.2	12.52	1.1	10.95	0.0	0.00	26.3	21.64	0.1	10.73	0.1	24.19
Wutach	621	20.69	787	0.5	11.16	3.1	15.66	49.4	26.91	0.2	1.93	0.8	8.79	0.0	10.00	45.6	14.78	0.2	11.26	0.2	13.07
Kander	78	30.68	539	1.4	8.08	3.9	15.42	61.6	38.55	0.0	0.00	0.8	15.54	0.0	9.32	32.1	18.87	0.1	9.73	0.0	10.12
Murg	60	19.21	797	0.1	15.19	6.4	15.08	43.2	24.74	0.1	5.56	0.6	11.68	0.0	0.00	49.4	15.07	0.1	5.72	0.1	17.18
Alb	241	27.18	891	0.2	12.39	3.0	15.39	65.2	32.02	0.1	9.90	0.6	13.58	0.0	0.00	30.7	18.41	0.1	12.12	0.2	30.79
Schluecht	223	23.55	850	0.2	12.74	3.2	13.91	57.8	29.93	2.4	4.08	0.6	13.04	0.0	9.14	35.7	15.65	0.1	16.31	0.0	10.47
Steina	93	21.67	729	0.4	12.14	2.0	15.14	58.1	24.89	0.0	0.00	0.3	15.09	0.0	0.00	39.2	17.37	0.0	2.07	0.0	10.24
Rad. Aach (Singen)	244	13.84	587	0.9	8.11	3.9	9.35	37.4	18.84	0.1	3.76	1.2	7.38	0.0	4.30	55.8	11.14	0.6	7.43	0.1	5.65
Stockacher Aach	190	15.29	558	0.8	8.15	4.8	10.92	34.3	23.78	0.0	0.00	1.7	6.11	0.0	2.03	58.1	11.05	0.3	8.33	0.1	7.13

Bei der Betrachtung der Ergebnisse fallen unter anderem folgende Punkte auf:

Einzugsgebiet der Wutach

- Für das Tal der Wutach wird vor der Einmündung der Klettgau-Zuflüsse bei Waldshut-Tiengen mit ca. 621 km² das größte aller Einzugsgebiete berechnet.
- Mit durchschnittlich 21 % Neigung weist dieses Einzugsgebiet jedoch vergleichsweise geringe Neigungen auf. Nur das Tal der Murg sowie die Hegau-„Täler“ haben hier noch kleinere Werte. Dabei ist zu bedenken, dass sich dieser Mittelwert aus verschiedenen Teilräumen zusammensetzt, deren Werte sehr stark voneinander abweichen.
- Die Waldanteile sind mit knapp 50 % ebenfalls gering.
- Entsprechend sind die Anteile der Freiflächen vergleichsweise hoch (ca. 45 %).

Einzugsgebiet der Wiese

- Für das Tal der Wiese wird eine Einzugsgebietsfläche von ca. 435 km² berechnet.
- Mit durchschnittlich ca. 38 % Neigung weist dieses Einzugsgebiet die höchsten mittleren Neigungen auf. Dies geht auf den hohen Flächenanteil der steilen, nach Süden gerichteten Kerbtäler des Hochschwarzwalds zurück. Erst im Unterlauf der Wiese sorgen die flachen Talböden und die weniger steilen Gebiete von Dinkelberg und Weitnauer Bergland für einen gewissen Ausgleich.
- Die Waldanteile sind mit ca. 60 % ebenfalls sehr hoch. Nur die Einzugsgebiete von Wehra, Alb und Kander sind noch walddreicher.
- Entsprechend sind die Anteile der Freiflächen vergleichsweise niedrig (ca. 32 %).

Einzugsgebiete von Alb und Schlücht

- Für die Täler von Alb und Schlücht werden Einzugsgebietsflächen von ca. 241 km² bzw. 223 km² berechnet.
- Mit durchschnittlich 27 % bzw. 23,5 % liegen die mittleren Neigungswerte deutlich niedriger als jene von Wiese und Wehra, weil die Einzugsgebiete hier im Bereich des Hochflächenschwarzwaldes und des Hotzenwaldes liegen.
- Die Waldanteile sind im Einzugsgebiet der Alb mit ca. 65 % sehr hoch. Nur im Wehratal sind sie noch höher. Im Einzugsgebiet der Schlücht liegen sie bei ca. 58 %.
- Entsprechend geringer fallen die Anteile der Freiflächen aus (ca. 31 % bzw. 36 %).

Einzugsgebiete von Wehra und Kander

- Die Einzugsgebiete von Wehra und Kander ähneln von ihrer grundsätzlichen Struktur sehr stark jenem der Wiese.
- Auch hier liegen die Oberläufe der Flüsse bzw. Zuflüsse im südlichen Kammschwarzwald. Entsprechend groß sind die mittleren Neigungswerte (34 % bzw. 31 %).
- Im Unterlauf erfolgt der Übergang zu Tälern mit weiter Talsohle umgeben von Hügellandschaften (Markgräfler Hügelland, Dinkelberg).
- Als Sondersituation kann die asymmetrische Talform im unteren Wehratal angesprochen werden. Hier erfolgt auf der Ostseite ein steiler Anstieg zum Hotzenwald.
- Als Einzugsgebietsflächen werden ca. 118 km² bzw. 78 km² berechnet.
- Bei den Waldanteile nimmt das Wehratal mit ca. 68 % die Spitzenposition unter allen betrachteten Tälern ein. Im Einzugsgebiet der Kander liegen sie mit ca. 62 % ebenfalls noch sehr hoch.
- Entsprechend geringer fallen die Anteile der Freiflächen aus (ca. 26 % bzw. 32 %).

Einzugsgebiete von Steina und Murg

- Die Einzugsgebiete von Steina und Murg ähneln von ihrer grundsätzlichen Struktur auf den ersten Blick jenen von Alb und Schlücht.

- Beide Flüsse münden ohne Ausbildung eines markanten Unterlaufs direkt in das Hochrheintal.
- Auch hier liegen die Einzugsgebiete überwiegend im Hochflächenschwarzwald bzw. im Hotzenwald.
- Die Neigungswerte liegen mit durchschnittlich 22 % bzw. 19 % in der gleichen Größenordnung.
- Die Waldanteile sind im Einzugsgebiet der Steina mit ca. 58 % höher als im Einzugsgebiet der Murg. Hier liegen sie bei ca. 43 %.
- Entsprechend unterschiedlich fallen auch die Anteile der Freiflächen aus (ca. 39 % bzw. 49 %).

Einzugsgebiete von Radolfzeller Aach und Stockacher Aach

- Die Einzugsgebiete von Radolfzeller und Stockacher Aach können gesondert von allen anderen betrachtet werden.
- Beide Flüsse liegen im Hegau und damit in einem Naturraum, der sich deutlich vom Hochrheingebiet unterscheidet.
- Das mit über 240 km² erstaunlich große Einzugsgebiet der Radolfzeller Aach umfasst nicht nur große Teile des Hegaus, sondern zahlreiche weit nach Norden auf die Hegualb ausgreifende Täler. Die 190 km² der Stockacher Aach verteilen sich auf Teile der Hegualb und auf die direkt nördlich des Überlinger Sees gelegenen Gebiete, die von Molassehöhen und eiszeitlichen Schmelzwasserrinnen geprägt sind.
- Die Neigungswerte liegen mit ca. 14 % bzw. 15 % deutlich niedriger als jene der bisher betrachteten Täler. Dies liegt an den hohen Anteilen vergleichsweise flacher Becken- und Tallandschaften im Einzugsgebiet.
- Die Waldanteile sind in diesem landwirtschaftlich intensiv genutzten Raum erwartungsgemäß geringer. Im Einzugsgebiet der Radolfzeller Aach liegen sie bei ca. 37 %, im Fall der Stockacher Aach bei ca. 34 %.
- Entsprechend hoch fallen auch die Anteile der Freiflächen aus (ca. 56 % bzw. 58 %).

Die durchgeführte Reliefanalyse macht deutlich, dass sich die Einzugsgebiete der betrachteten Täler im Hinblick auf Größe, Neigung und Landnutzungsverteilung teilweise deutlich voneinander unterscheiden. Erste Vermutungen über die Intensität auftretender Kaltluftbewegungen ließen sich daraus ableiten. So dürften etwa mit großen Einzugsgebieten und einem hohen Anteil stark geneigter Freiflächen die stärksten Kaltluftströme verbunden sein. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die verwendeten Algorithmen keinerlei Aussagen über den eigentlichen Talverlauf machen. Das Auftreten von Talschlingen oder Talverengungen kann jedoch ebenfalls von großer Bedeutung für die Frage sein, ob sich gerade auch in Bodennähe kräftige nächtliche Talabwinde etablieren können. Letztlich lassen sich also aus den vorgestellten Werten noch keine direkten Schlüsse auf unterschiedlich starke Kaltluftbewegungen an den entsprechenden Talausgängen ziehen. Sie liefern aber dennoch einen guten Überblick über die kaltluftrelevante Ausstattung der verschiedenen Einzugsgebiete.

5.2.2 *Potentielle Kaltluftstaugebiete*

Bestimmte Reliefsituationen (z.B. schwach geneigte Tal- und Beckenlagen, abgeschlossene Hohlformen) erschweren oder verhindern den Abfluss von Kaltluft. Häufig in Verbindung mit Wald- oder Siedlungsrandern, die quer zur Richtung eines Kaltluftflusses verlaufen, kann es dann in klaren Strahlungsnächten zur Ausbildung von Kaltluftstaugebieten kommen. In der Regel sind damit erhöhte Kältebelastungen und verschlechterte lufthygienische Situationen verbunden. Um sich einen flächenhaften Überblick über die besonders gefährdeten Gebiete zu verschaffen, können Flutungsalgorithmen eingesetzt werden, die aus einem DGM alle abflusslosen Hohlformen bestimmen. Im vorliegenden Fall kam ein Verfahren zur Anwendung,

das auf PECKHAM (1996) zurückgeht. Es wurde von SCHWAB (2000) modifiziert und ausführlich beschrieben (SCHWAB, 2000, S. 40 ff).

5.2.2.1 Verwendeter Algorithmus

Die eigentlich aus hydrologischen Anwendungen bekannte Flutung von Digitalen Geländemodellen ist nicht trivial, da Situationen von sehr unterschiedlicher Komplexität auftreten können. Im einfachsten Fall liegt ein Pixel tiefer als alle seine Nachbarpunkte. Geflutet wird ein solches „Loch im Gelände“ dadurch, dass seine Höhe auf die Höhe des tiefstgelegenen Nachbarpixels gesetzt wird. Wesentlich schwieriger wird es, wenn Hohlformen aus mehreren Pixeln bestehenden. In sehr komplizierten Fällen liegen solche „Wannen“ dann ihrerseits wieder in noch größeren Depressionen.

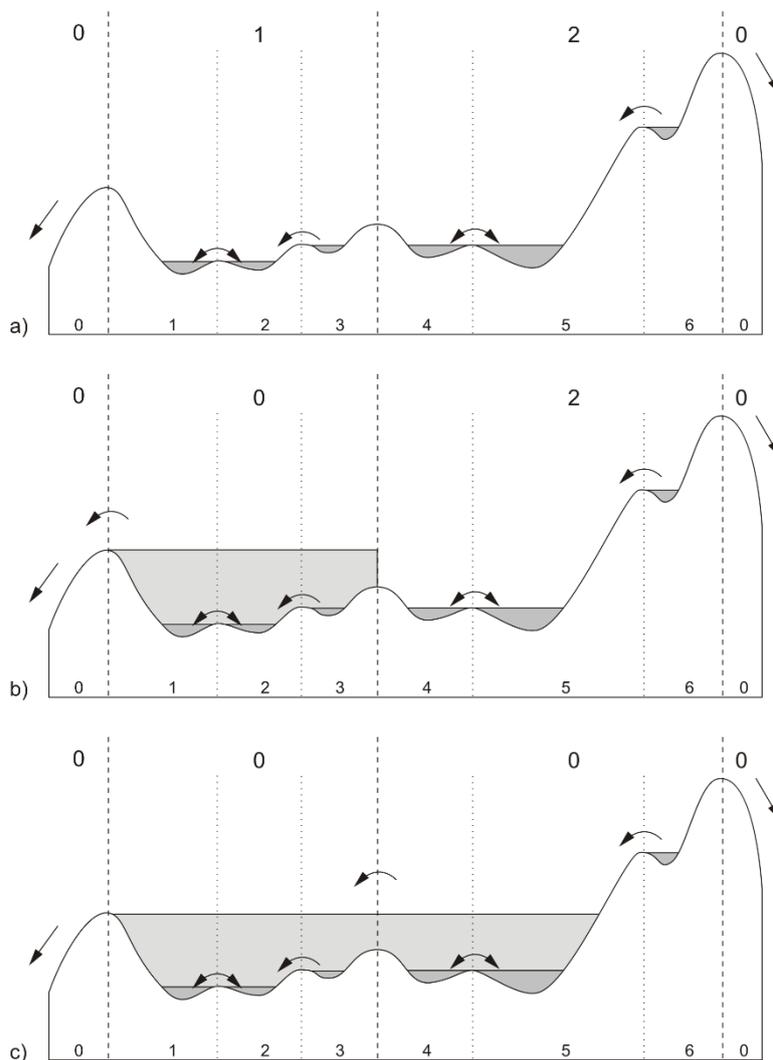


Abb.22: Flutung von abflusslosen Hohlformen in einem DGM. Erläuterungen im Text. (aus: SCHWAB, 2000, S. 43)

Der Flooding-Algorithmus von PECKHAM löst solche Situationen, indem er zunächst die Einzugsgebiete der Hohlformen bestimmt und anschließend nach dem niedrigsten Punkt entlang der jeweiligen Einzugsgebietsgrenzen sucht. Die Höhe dieses Punktes legt dann die Obergrenze des Flutbereiches innerhalb dieses Einzugsgebietes fest. Dies geschieht durch Abarbeitung einer komplexen Schrittfolge (vgl. dazu SCHWAB, 2000, S. 40 ff):

Als Ergebnis erhält man ein geflutetes Geländemodell. Aus dem Vergleich mit den originalen Höhendaten lassen sich die gefluteten Flächen, aber auch die jeweiligen Fluthöhen bestimmen. Diese Daten können dann als potentielle Kaltluftseen mit den jeweiligen vertikalen Mächtigkeiten gedeutet werden.

Die flächenhafte Ausdehnung potentieller Kaltluftstaugebiete an Hindernissen hängt von der Hindernishöhe aber auch von den Neigungsverhältnissen in der Umgebung ab. So muss ein gleich hohes Hindernis in Gebieten mit geringer Neigung rein rechnerisch zu wesentlich größeren Kaltluftstauflächen führen (vgl. Abb.23).

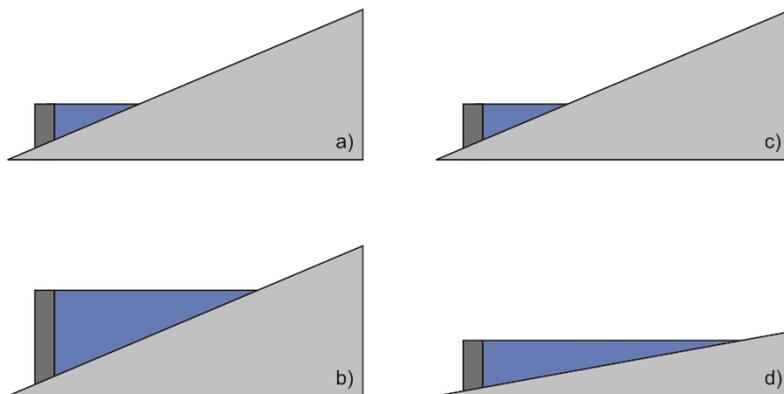


Abb.23: Größe von berechneten Kaltluftstaugebieten in Abhängigkeit von Geländeneigung und Hindernishöhe (schematisch). Entwurf: Schwab.

5.2.2.2 Modellrechnungen

Um die Einflüsse der reinen Orographie von jenen der Wald- und Siedlungsflächen zu trennen, müssen mehrere Modellrechnungen durchgeführt werden.

- In einem ersten Modelllauf bleibt die Landnutzung unberücksichtigt. Alle berechneten Flutbereiche gehen somit allein auf die Wirkung des Reliefs zurück.
- Beim zweiten Modelllauf wird ein Vorbereitungsschritt vorangestellt. Alle „Siedlungspixel“ werden um einen bestimmten Betrag erhöht, der den mittleren Gebäudehöhen dieser Flächen entsprechen soll. Im vorliegenden Fall werden die Standardwerte von KLAM_21 übernommen. Pixel, die in die Klasse „Siedlung dicht“ fallen, werden um 15 m erhöht, Pixel der Klasse „Siedlung locker“ um 8 m. Der Betrag für Industrieflächen liegt bei 12 m. Neben den reliefbedingten Flutbereichen, werden damit auch die Stauwirkungen an Siedlungsrändern berechnet.
- Beim dritten Modelllauf werden zusätzlich auch noch alle Waldpixel mit einer Höhe von 20 m belegt. Auch dieser Wert entspricht den KLAM_21-Standardinstellungen. Nun werden auch an den Waldrändern je nach umgebender Reliefsituation entsprechende Flächen geflutet.

5.2.2.3 Darstellungsform der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnungen können in einer einzigen Karte dargestellt werden, wenn eine sinnvolle Überlagerungsreihenfolge gewählt wird. Es kann davon ausgegangen werden, dass mit dem dritten Modelllauf die größten Flächen berechnet werden, da hier alle Stauwirkungen berücksichtigt sind. Innerhalb dieser Flächen liegen die Kaltluftstaugebiete aus Modelllauf 2, da hier lediglich die Staugebiete an Waldrändern fehlen. Die kleinste Ausdehnung haben die ausschließlich reliefbedingten Flächen aus Modelllauf 1. Eine Überlagerung in der Reihenfolge

„reliefbedingt“ deckend über „relief- und siedlungsbedingt“ deckend über „relief-, siedlungs- und waldbedingt“ erlaubt damit eine differenzierte Auswertung.

Abb.24 zeigt einen Kartenausschnitt für den Bereich des Hegaus. Deutlich sind größere reliefbedingten Kaltluftstaugebiete in den verschiedenen Niederungen zu erkennen. Mit Berücksichtigung der Waldrandeffekte werden diese Flächen zum Teil noch etwas größer. Es kommen aber auch völlig neue Staugebiete hinzu. Kaltluftstau an Siedlungsändern zeigt sich großflächig unter anderem rund um Singen sowie nördlich von Radolfzell.

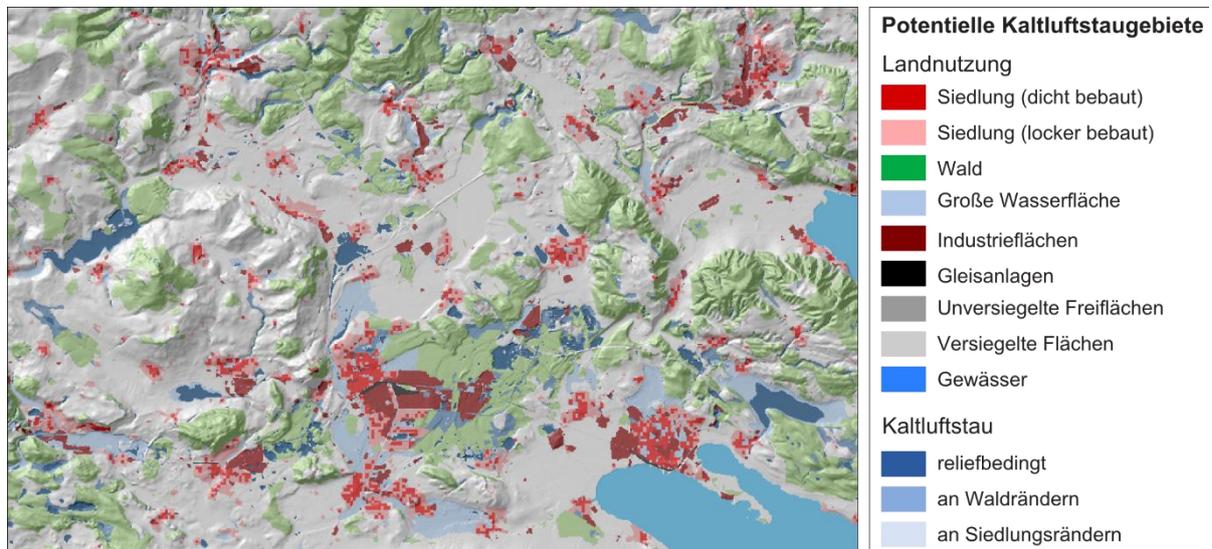


Abb.24: Potentielle Kaltluftstaugebiete im Hegau, berechnet durch Flutung eines DGM.

Es gilt zu berücksichtigen, dass die Modellergebnisse von der Auflösung des verwendeten digitalen Geländemodells abhängen. So können z.B. bei der Vergrößerung der horizontalen Gitterauflösung durch Resampling in engen Talquerschnitten zusätzliche Stauereffekte auftreten, die in Wirklichkeit so nicht vorhanden sind. Die Verifizierungsmessungen in REKLIBO zeigen jedoch, dass die Rechnungen in der 30 m x 30 m-Auflösung zufriedenstellende Ergebnisse geliefert haben. Überall dort, wo Kaltluftstau angezeigt wird, wurden auch tatsächlich lokal niedrigere Temperaturen beobachtet. Die Umkehrung dieser Aussage gilt jedoch nicht. In der Regel wird die Ausdehnung von Kaltluftstaugebieten größer sein, als vom Modell berechnet, da es schon bei erschwerten Abflussbedingungen zur Stagnation der Luftbewegungen kommen kann, obwohl sich aus den reinen Höhendaten rechnerisch (vgl. Algorithmus) noch Abflussmöglichkeiten ergeben.

5.2.3 Sonnenuntergangszeiten

Die Produktion von Kaltluft setzt näherungsweise mit dem Untergang der Sonne ein. Die tatsächlichen Sonnenuntergangszeiten an einem bestimmten Standort unterscheiden sich jedoch aufgrund von Horizontüberschattungen häufig deutlich von den astronomischen. Um das frühabendliche Auftreten von Kaltluftbewegungen zeitlich abschätzen zu können, bietet es sich deshalb an, die Sonnenuntergangszeiten reliefabhängig zu bestimmen und sie als Startzeiten der Kaltluftproduktion zu interpretieren. Auch hier kommen digitale Geländemodelle zum Einsatz.

5.2.3.1 Verwendeter Algorithmus

Ein Verfahren zur flächenhaften Bestimmung von Sonnenuntergangszeiten muss sich immer aus mehreren Bestandteilen zusammensetzen. Zunächst geht es darum, für beliebige Zeitpunkte eines Tages innerhalb des Jahresgangs die Position der Sonne im Horizontsystem zu

bestimmen (Sonnenhöhe und Sonnenazimut). Aus der Sonnenposition und den Höhenwerten des DGM muss dann auf ein jeweiliges Beschattungsmuster geschlossen werden. Der Tagesgang solcher Schattenmuster kann schließlich genutzt werden, um die Sonnenuntergangszeiten zu bestimmen. Es ist lediglich der letztmalige Übergang von Sonne nach Schatten zu registrieren.

Zur Bestimmung der Sonnenposition wurde in der vorliegenden Analyse auf die im VDI-Bericht 721 veröffentlichten Beziehungen zurückgegriffen (KASTEN 1989).

Für die Berechnung des jeweiligen Beschattungsmusters wurde eine Methode verwendet, die u.a. bei KUNZ (1983) beschrieben ist. Das Prinzip dieser Methode besteht darin, bei gegebener Sonnenposition eine Ebene von der Sonne weg durch das Gelände zu bewegen und dabei immer den Schlagschatten des gesamten bereits überstrichenen Gebiets in Form eines Schattenprofils mitzuführen (vgl. Abb.). Beim Verschieben des Schattenprofils um eine Spalte bzw. Zeile lässt sich die neue Schattenhöhe leicht bestimmen, da der Schattenwurf über den Richtungswinkel und den Neigungswinkel der Sonnenstrahlen festgelegt ist. Es gilt lediglich das Problem zu berücksichtigen, dass im Allgemeinen die Stützpunkte einer verschobenen Schattenebene nicht mehr mit den Stützpunkten des Geländeasters übereinstimmen. Mithilfe einer linearen Interpolation der Schattenhöhen lässt sich dieses Problem jedoch leicht lösen.

Die Sonnenuntergangszeiten werden bestimmt, indem eine ganze Abendsituation simuliert und zu jedem Zeitpunkt an jedem Pixel abgefragt wird, ob zwischen letztem und aktuellem Abtasten ein Übergang von Besonnung nach Beschattung stattgefunden hat. Ist dies der Fall, wird die jeweils aktuelle Zeit als Sonnenuntergangszeit abgespeichert.

Ohne weiteren Aufwand können natürlich auch ganze Tage simuliert werden. Man erhält dadurch zusätzliche Informationen, die in anderen Zusammenhängen von Bedeutung sind. Durch Aufsummierung der „besonnten Zeitintervalle“ lässt sich z.B. die potentiell mögliche Sonnenscheindauer (ohne Bewölkungseinfluss) bestimmen. Der erstmalige Übergang von Schatten nach Sonne entspricht den Sonnenaufgangszeiten.

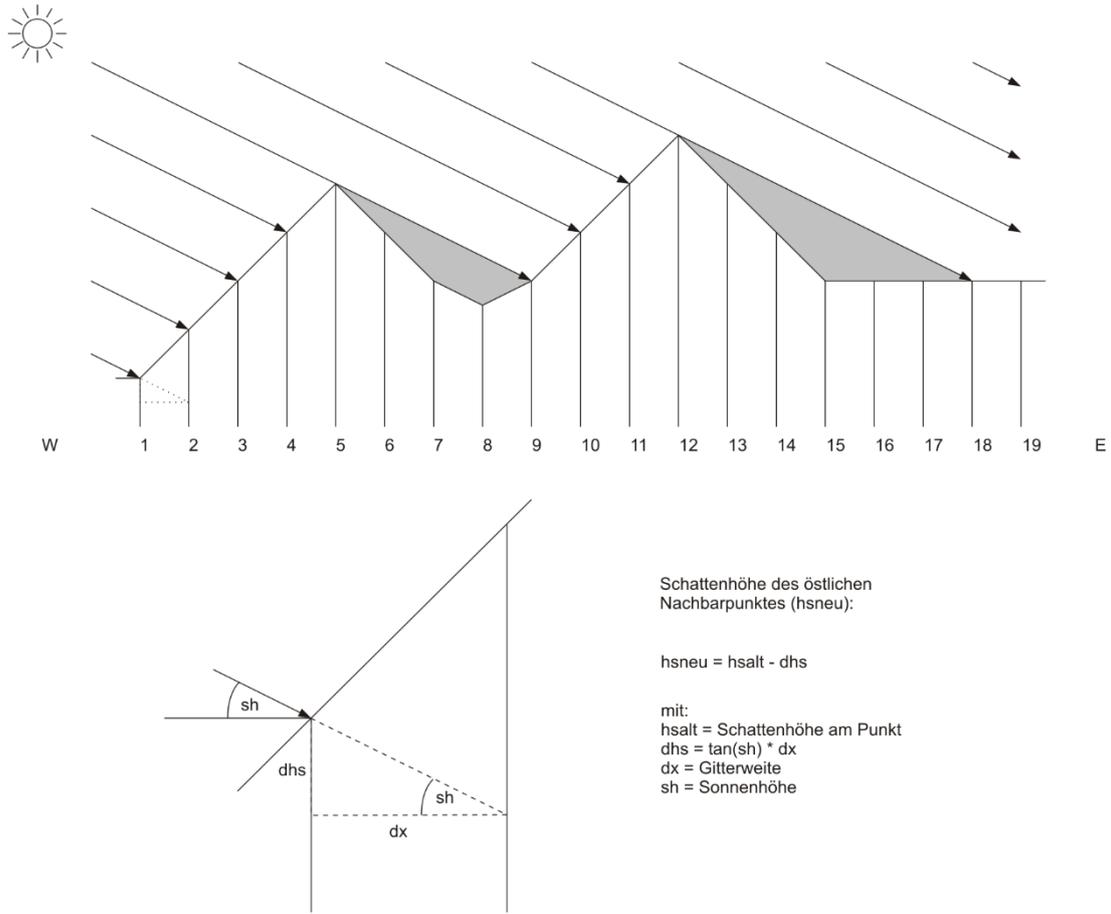


Abb. 25: Berechnung der Schattenhöhe bei Verschiebung der Schattenebene durch ein DGM. Erläuterungen im Text. (Entwurf: Schwab)

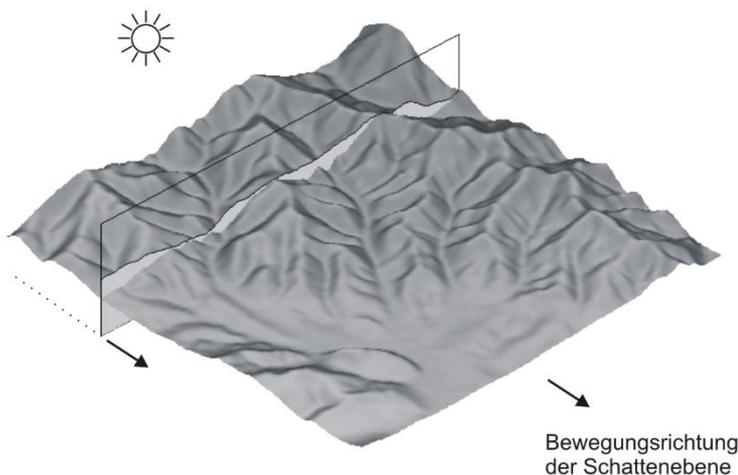


Abb. 26: Bestimmung des Beschattungsmusters aus einem DGM mit Hilfe einer Schattenebene, die durch das Gelände geführt wird Erläuterungen im Text. (Entwurf: Schwab)

5.2.3.2 Darstellungsform

Für kartographische Darstellungen bietet es sich an, die Sonnenuntergangszeiten als relative Zeiten in „Minuten vor dem astronomischen Sonnenuntergang“ anzugeben. Eine sinnvolle Farbgebung setzt Punkte, die extrem früh beschattet sind, auf schwarz bzw. dunkelgrau und

Punkte, die bis zuletzt besonnt bleiben, auf weiß. Die restlichen Grautöne können sinnvoll auf die dazwischen liegenden Zeitintervalle verteilt werden (vgl. Abbildung E2a-c im Kartenteil).

5.2.3.3 Modellläufe

Die scheinbaren Sonnenbahnen der Erde verändern sich im Laufe eines Jahres stark. Die astronomischen Tageslängen schwanken in unseren Breiten zwischen ca. 8 Stunden am 21. Dezember und ca. 16 Stunden am 21. Juni. Durch die im Winterhalbjahr wesentlich niedrigeren Sonnenstände müssen sich markante Unterschiede in den jeweiligen Beschattungsmustern und damit auch in den Sonnenauf- und -untergangszeiten ergeben. Um diesen jahreszeitlichen Unterschieden gerecht zu werden, wurden insgesamt drei Modellläufe mit dem Sonnenscheinmodell durchgeführt.

- Modelllauf 1 simuliert die Situation am 21.12. (Wintersonnenwende)
- Modelllauf 2 simuliert die Situation am 21.03. bzw. 23.09. (Tag-und-Nacht-Gleiche)
- Modelllauf 3 simuliert die Situation am 21.12. (Sommersonnenwende)

Die Ergebnisse sind in den Karten E2a – E2c dargestellt.

5.2.3.4 Auswertungsmöglichkeiten

Aus den Karten lassen sich früh beschattete Bereich sehr gut lokalisieren. Dies gilt sowohl großräumig als auch kleinräumig. Aus früh beschatteten Tälern ist ein Kaltluftabfluss unter Umständen bereits vor dem astronomischen Sonnenuntergang zu erwarten. Wenn besonnte und beschattete Talhänge in der Übergangszeit vor Sonnenuntergang direkt gegenüber liegen, kann dies zu Querkulationen im Tal führen, weil sich dann unter Umständen ein noch aktives Hangaufwindssystem positiv mit einem bereits einsetzenden Hangabwind koppelt.

5.3 Kaltluftabflussmodellierung mit KLAM_21

5.3.1 Modellbeschreibung

Die bisher beschriebenen Verfahren beschränken sich allesamt auf eine Analyse der „statischen“ Reliefverhältnisse und Landnutzungsverteilungen. Solche Methoden sind geeignet, um sich einen ersten Überblick über die kaltluftrelevante Ausstattung verschiedener Teilgebiete im Untersuchungsraum zu machen. Will man Kaltluftbewegungen jedoch in ihrer Dynamik im Laufe einer Nacht flächenhaft erfassen, so müssen komplexere Modelle herangezogen werden. Für die vorliegende Analyse wurde mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 gearbeitet.

KLAM_21 ist ein zweidimensionales, mathematisch-physikalisches Simulationsmodell zur Berechnung von Kaltluftflüssen und Kaltluftansammlungen in orographisch gegliedertem Gelände. Es wurde vom Deutschen Wetterdienst (DWD) entwickelt und wird von dessen Abteilung „Klima- und Umweltberatung“ zur Beurteilung von Kaltluftsituationen eingesetzt. Laut DWD hat es sich in zahlreichen Gutachten zur Standort-, Stadt- und Regionalplanung bewährt (SIEVERS, S. 5).

Die theoretischen Grundlagen und die Numerik des Modells wurden von SIEVERS (2005) ausführlich beschrieben. In der gleichen Arbeit wird die Anwendbarkeit des Modells durch einen Vergleich mit Messungen belegt und seine Handhabung erläutert. In der vorliegenden Arbeit werden die entscheidenden Punkte kurz zusammengefasst. Auf eine exakte formelhafte Beschreibung wird dabei verzichtet.

5.3.1.1 Generelles physikalisches Konzept

Das Modell geht davon aus, dass die Atmosphäre in ihrem unteren Bereich in zwei Schichten untergliedert werden kann (SIEVERS, S. 7). In einer sogenannten Oberschicht wird ein adiabatisches und hydrostatisches Gleichgewicht angenommen. Die als Kaltluftschicht bezeichnete Unterschicht hingegen kann vertikale Temperaturverteilungen aufweisen, die vom adiabatischen Gleichgewicht abweichen. In ihr ist die Schwerkraft deshalb nicht völlig ausbalanciert, sodass Dichteunterschiede einen Antrieb bewirken. Die so verursachten Luftbewegungen bedingen, dass die Unterschicht eine veränderliche Dicke besitzen muss.

Ursache für die vertikalen Temperaturverteilungen ist der Wärmeverlust der Atmosphäre. Dieser Wärmeverlust wird im Modell durch eine in Abhängigkeit von der Flächennutzung vorgebbare Kälteproduktion dargestellt bzw. erzeugt. Sie besitzt die Dimension einer Energiestromdichte (J/m^2) und wirkt auf die Unterschicht, deren Dicke und Intensität infolgedessen mit der Zeit zunehmen.

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. Hier werden durch Anwendung eines universellen Geschwindigkeitsprofils Aussagen über Windgeschwindigkeiten in unterschiedlicher Höhe möglich. Am Strömungsgeschehen ist jedoch nicht die gesamte Abkühlungsschicht beteiligt, sondern nur eine sogenannte Strömungsschicht, deren Mächtigkeit als effektive Kaltfluthöhe bezeichnet wird. Die effektive Kaltfluthöhe beträgt bei KLAM_21 immer $5/12$ der Höhe der gesamten Abkühlungsschicht. Das universelle Geschwindigkeitsprofil legt die Höhe des Geschwindigkeitsmaximums auf ein Viertel der Höhe

der Strömungsschicht. Dies entspricht ebenfalls den Ergebnissen aus zahlreichen Feldstudien.

Die Luftbewegungen in der Kaltluftschicht werden berechnet, indem eine vereinfachte Bewegungsgleichung gelöst wird. Diese Bewegungsgleichung enthält alle Teilkräfte, die am Prozess wesentlich beteiligt sind. Dies sind die Schwerkraft als beschleunigende Kraft, sowie als Bremskräfte die Bodenreibung, der angenommene Regionalwind und der horizontale Impulsaustausch.

Die Art der Behandlung der Bodenreibung hängt davon ab, ob im Rechengebiet explizite Hindernisse modelliert werden oder nicht und wie sich die Höhe dieser Hindernisse zur Kaltluflthöhe 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.

Auch der Regionalwind wirkt auf die Luftströmungen, indem er eine Schubkraft auf die Kaltluftschicht ausübt. Diese Kraft greift an der Oberfläche der Kaltluftschicht an. Als Basishöhe wird für den Regionalwind 40 m über der maximalen Orographiehöhe im Modellgebiet gesetzt.

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 Kälte transport durch die Kaltluftbewegungen zurück.

5.3.1.2 Handhabung und Modelloutput

Für eine Simulation mit KLAM_21 müssen ein Digitales Geländemodell und ein Landnutzungsdatensatz in vorgegebenen Formaten und mit den KLAM-eigenen Landnutzungsklassen bereitgestellt werden. Der eigentliche Modelllauf wird über eine Datei gesteuert, in der unter anderem die folgenden Punkte vorgegeben werden müssen:

- Geometrie des Rechengitters:
 - Spaltenanzahl und Zeilenanzahl
 - horizontale Gitterauflösung (in m)
 - Koordinaten der Eckpunkte
- Pfade und Namen der Eingabedateien
- Pfad und Namen für die Ausgabedateien
- Zeitliche Steuerung des Modelllaufs:
 - Gesamte Simulationsdauer (in Sekunden)
 - Ggf. fester Zeitschritt (in Sekunden)
 - Maximaler Zeitschritt (in Sekunden)
- Stärke und Richtung des Regionalwindes (in m/s und Grad)
- Bezugshöhe für das zusätzliche Strömungsfeld (Höhe z)
- Zeiten, wann Ausgabedatensätze geschrieben werden sollen (in Sekunden)
- Ggf. Umdeklarierung von bestimmten Landnutzungsklassen
- Ggf. Angabe von Einzelpunkten zum Abspeichern von Zeitreihen
- Ggf. Angabe von Einzelpunkten als Punktquellen für Ausbreitungsrechnungen (modellierte Rauchfahnen)

Bei jeder in der Steuerdatei angegebenen Ausgabezeit werden dann die folgenden Dateien als ASCII-Text-Dateien in vorgegebenen Formaten und mit standardisierten Dateinamen ausgegeben:

- Kälteinhalt der Pixel (*ex*) (in 100 J/m²):
- Kaltluftmächtigkeit (effektive Kaltluflthöhe) (*hx*) (in dm)

- Kaltluftbewegung im Mittel der Kaltluftsäule (uq und vq) (in cm/s)
- Kaltluftbewegung in vorgegebener Höhe z (uz und vz) (in cm/s)

Aus diesen Daten können weitere wichtige Werte direkt abgeleitet werden. So berechnen sich die Beträge der Windgeschwindigkeiten (wvq und wvz) über

$$wvq = \text{sqrt}(uq^2 + vq^2) \text{ bzw. } wvz = \text{sqrt}(uz^2 + vz^2).$$

Der Volumenstrom (*volstrom*) der Kaltluftbewegung ($\text{m}^3/(\text{ms})$) über die gesamte Kaltluftsäule ergibt sich aus:

$$\text{volstrom} = wvq \cdot hx$$

Dabei sind vorher die Geschwindigkeitswerte in m/s und die Kaltfluthöhen in m umzurechnen.

5.3.2 Modellrechnungen

Um auch angrenzende Gebiete mit in die Berechnungen einzubeziehen (Randprobleme) wurde die maximale Größe des KLAM_21-Rechengitters von 1500 x 1500 Punkten bei einer horizontalen Gitterauflösung von 90 m x 90 m ausgenutzt. Folgende Einstellungen wurden in der Steuerdatei festgelegt:

- Simulationsdauer: 43200 s (=720 min = 12 h)
- Ausgabeweiten f. die Resultate: 1800 (= 0,5 h), 3600 (= 1 h), 7200 (= 2 h), 10800 (= 3 h), 14400 (= 4 h), 18000 (= 5 h), 21600 (= 6 h), 25200 (= 7 h), 28800 (= 8 h), 32400 (= 9 h), 36000 (= 10 h), 39600 (= 11 h), 43200 (= 12 h)
- Bezugshöhe für das Strömungsfeld: 2 m
- Regionalwindgeschwindigkeit: 0 m/s (kein Regionalwind)

5.3.3 Grafische Aufbereitung der Modellergebnisse

Die in das Programm KLAM_21 integrierte grafische Ausgabe war für die vorliegenden Zwecke nicht ausreichend. Es wurden daher eigene Tools zur Visualisierung programmiert. Dazu wurde die Programmiersprache IDL (Integrated Data Language) Version 7.0 verwendet.

5.3.3.1 Klassifizierung der Ausgabedateien

In einem ersten Schritt wurden die Ausgabedateien bzw. die davon abgeleiteten Werte klassifiziert und in georeferenzierten TIFs abgelegt. Die Wahl der Klassengrenzen und Farben richtete sich dabei in den meisten Fällen an Karten bereits veröffentlichter Studien (Klimaatlas Region Stuttgart, REKLISO), um Vergleiche zu ermöglichen. Bei der Darstellung der Kälteinhalte wurde jeweils ein 5%-Stretch vorgenommen und die Daten in 256 Klassen eingeteilt.

Die Betrachtung der entsprechenden Karten (vgl. 6.2.3) gibt einen Überblick über die Entwicklung der Kälteinhalte, Kaltluftmächtigkeiten, Windgeschwindigkeiten und Volumenströme im Gesamttraum während der simulierten Zeit.

5.3.3.2 Vektorielle Darstellung der Kaltluftbewegung

Für die Darstellung der Kaltluftbewegungen reichen klassifizierte Windgeschwindigkeiten und Volumenströme jedoch nicht aus, da auch die entsprechenden Richtungen zu berücksichtigen sind. Dies ist in Form von Vektoren möglich. Bei vektoriellen Darstellungen ergeben sich jedoch folgende Probleme:

- Insbesondere bei Volumenströmen liegen die Werte oft sehr weit auseinander. Sollen sowohl kleine als auch große Werte sinnvoll abgelesen werden können, so muss auch hier sinnvoll klassifiziert werden.
- Die Darstellung eines Vektors beansprucht wesentlich mehr Fläche als eine reine Pixeldarstellung. Bei einer grafischen Umsetzung müssen deshalb die Pfeile ausgedünnt oder

andere Kartenmaßstäbe gewählt werden. Gegebenenfalls muss das Gesamtgebiet für Darstellungszwecke geteilt (gekachelt) werden.

Im vorliegenden Fall wurde auf eine Klassenbildung zurückgegriffen, die auch in anderen regionalen Klimaanalysen bereits angewandt wurde (Vergleichbarkeit). Außerdem wurden in automatisierter Form die verschiedenen Gebietskacheln jeweils als in sich abgeschlossene Karten mit eigener Legende in verschiedenen Maßstäben (1:50000, 1:100000) erzeugt. Spezielle Gebietsausschnitte können durch Angabe der Eckkoordinaten ebenfalls mit geringem Aufwand erzeugt werden.

Als Hintergrundbild für die Pfeildarstellungen wurde die Schummerungskarte mit einer auf die wesentlichen Klassen reduzierten transparenten Landnutzungskarte gewählt. Dadurch ist nicht nur eine rasche räumliche Orientierung möglich - vielmehr werden die Kaltluftbewegungen sozusagen „auf dem Hintergrund ihrer Entstehungsursachen“ abgebildet (vgl. Karten im Kartenteil).

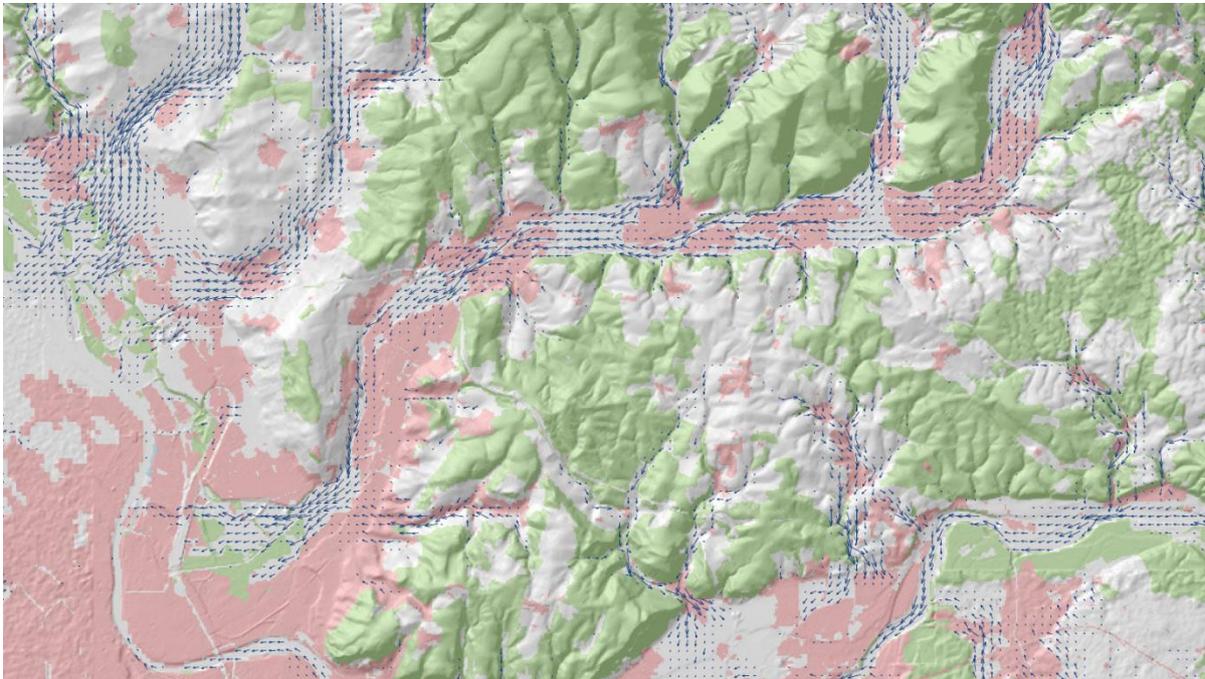


Abb. 27: Berechnete Volumenströme nach zwei Stunden Simulationszeit im Bereich Wiesental in vektorieller Darstellung (Ausschnitt aus Karte E7d).

5.4 Bestimmung von Kaltlufteinzugsgebieten und Luftleitbahnen

Für eine planungsrelevante Bewertung der Freiflächen des Untersuchungsraumes wurden ebenfalls in REKLIBO entwickelte Verfahren eingesetzt. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, aus den mit KLAM_21 berechneten Daten wichtige Leitbahnen für lokale Kaltluftbewegungen (Bergwinde und Hangabwinde) und gleichzeitig die wichtigen Herkunftsgebiete der Kaltluft flächenhaft herauszuarbeiten. Mit den entsprechenden Karten können Freiflächen, die eine große Bedeutung hinsichtlich der Kaltluft- und Frischluftversorgung größerer Siedlungen haben, lokalisiert und räumliche Zusammenhänge verdeutlicht werden.

5.4.1 Grundannahmen

Die Verfahren gehen von folgenden Grundannahmen aus:

- Für die Belüftung von Siedlungsräumen in windschwachen Strahlungsnächten sind sowohl Talabwinde als auch Hangabwinde von Bedeutung.
- Hangabwind- oder Bergwindssysteme, die beim derzeitigen Muster der Landnutzungen *einer Siedlungsfläche zugewandt* sind, spielen bei der vorliegenden Fragestellung eine besonders wichtige Rolle.
- Hangwind- und Bergwindssysteme, die zwar nicht direkt einer Siedlung aber der unmittelbaren Umgebung einer Siedlung zugewandt sind, müssen ebenfalls berücksichtigt werden.
- Insbesondere sind Hangabwind- und Bergwindssysteme wichtig, die *Luftleitbahnen* zwischen zwei benachbarten Siedlungskörpern mit Frischluft versorgen.
- Besondere Bedeutung haben *Bergwindssysteme*, die *früh am Abend* einsetzen bzw. ihren Wirkungsraum früh erreichen und *lange anhalten*, da bei geringen Abkühlungsraten gerade am frühen Abend mit einer hohen Wärmebelastung zu rechnen ist.
- Im Falle der Bergwinde, die während einer Nacht länger anhalten, sind auch weiter entfernt liegenden Flächen von Bedeutung. Die dort produzierte Kaltluft erreicht ihren Wirkungsraum zwar später, trägt aber dennoch zur nächtlichen Abkühlung und Frischluftversorgung bei.
- Besondere Bedeutung haben *Hangabwindssysteme* mit hohen Windgeschwindigkeiten in Siedlungsnähe. Wenn sie in die Siedlungskörper eindringen führen sie zu einer Reduktion der Wärmebelastung in den frühen Abendstunden.
- Die Bedeutung von Flächen mit Hangwind- und Bergwindssystemen für eine Siedlung nimmt mit zunehmender *Entfernung zur Siedlung* ab, da dort entstehende Kaltluft erst mit Verzögerung im Wirkungsbereich eintrifft. Ferner würden sich eventuelle Emissionen auf dem Weg zum Wirkungsraum aufgrund von Diffusionsprozessen ausdünnen.
- Vor allem für *größere Siedlungen* sind lokale Windsysteme von Bedeutung, da sich nur hier deutliche Wärmeinseleffekte und lufthygienische Problemsituationen im Vergleich zum Umland ergeben.
- *Sehr kleine Siedlungen* gelten aufgrund ihrer geringeren Ausdehnung und ihrer weniger dichten Bebauung nicht als Wirkungsräume.

Ausgehend von diesen Grundannahmen ist die Suche nach Flächen mit einer bedeutenden Klimaaktivität also gleichbedeutend mit der Suche nach:

- Flächen mit starken Hangabwinden in den frühen Abendstunden (hier Flächen mit hoher berechneter Windgeschwindigkeit in 2 m über Grund nach einer Stunde Modellzeit), die größeren Siedlungen und ihrer direkten Umgebung zugewandt sind und nicht zu weit von diesen entfernt liegen.
- Flächen mit früh eintretenden und lang anhaltenden Bergwinden (hier Flächen mit hohen berechneten Volumenströmen), die größeren Siedlungen und ihrer direkten Umgebung zugewandt sind und nicht zu weit von diesen entfernt liegen.

Im folgenden Abschnitt werden die wesentlichen Grundlagen der entwickelten Algorithmen beschrieben, mit deren Hilfe solche Flächen lokalisiert werden können.

5.4.2 *Bestimmung der potentiellen Wirkungsräume*

Oben wurde betont, dass nur größere Siedlungen bei der Behandlung der Fragestellung von Bedeutung sind. Insbesondere können aber auch Flächen, die in der Nähe größerer Siedlungen liegen, von nächtlichen Kaltluftbewegungen profitieren (z.B. Luftleitbahnen zwischen zwei benachbarten größeren Siedlungen). Es stellt sich somit die Aufgabe, diese potentiellen Wirkungsräume aus den vorhandenen Landnutzungsdaten abzuleiten. Dazu dient das folgende Verfahren („filter_siedlungsnähe“).

Für jede Pixelfläche im Raster wird eine quadratische Umgebung vorzugebender Größe betrachtet. Ist der Anteil der Siedlungspixel in dieser Umgebung höher als ein vorzugebender Grenzwert, so wird der Pixelfläche selber das Attribut „Siedlungsnähe“ zugewiesen.

Im vorliegenden Fall wurde mit dem Landnutzungsdatensatz in 30 m x 30 m – Auflösung gearbeitet. Als Umgebung wurde jeweils ein Quadrat mit 900x900 m² gewählt (30 x 30 Pixel). Als Grenzwert für den Siedlungsanteil wurde 25 % festgelegt.

Abb. zeigt das ursprüngliche Muster der Siedlungsflächen im Vergleich zu den neu berechneten „siedlungsnahen Flächen“ im Bereich des Illertals im Raum Memmingen. Man erkennt, dass durch dieses Verfahren Lücken zwischen größeren Siedlungen „geschlossen“ und gleichzeitig die zahllosen kleinflächigen Siedlungen im Untersuchungsgebiet herausgefiltert werden. Die größeren Siedlungsflächen erscheinen zusätzlich „gepuffert“, die Siedlungsränder sind geglättet.

Wenn im Folgenden von „siedlungsnahen“ Flächen gesprochen wird, sind diese gepufferten großflächigen Siedlungsgebiete im Untersuchungsraum gemeint. Sie stellen die potentiellen Wirkungsräume für lokale Windsysteme dar. Im nächsten Schritt muss aus entsprechenden Windfeldern bestimmt werden, ob die von KLAM_21 berechneten Kaltluftbewegungen diesen Wirkungsräumen zugewandt sind. Letztlich geht es also um die Bestimmung von Kaltlufteinzugsgebieten zu allen „siedlungsnahen“ Pixelflächen.

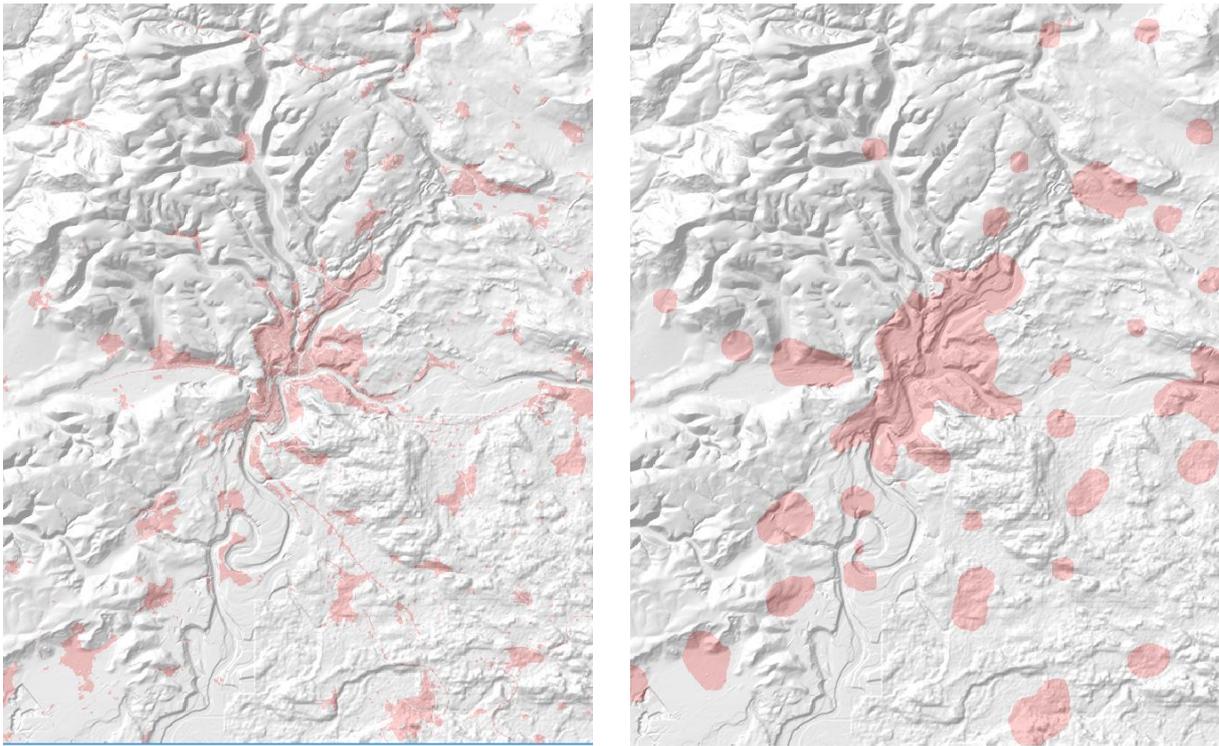


Abb. 28: Verteilung der Siedlungsflächen (links) und der daraus berechneten „siedlungsnahen Flächen“ (rechts) im Bereich von Schaffhausen. Erläuterungen im Text.

5.4.3 Bestimmung von Kaltlufteinzugsgebieten und Luftleitbahnen

Die zentrale Idee zur Bestimmung dieser Kaltlufteinzugsgebiete besteht in der Vorwärtsberechnung von Stromlinien aus den berechneten Windfeldern. Dies ist durch Abarbeitung folgender Teilschritte möglich:

An jedem Punkt im Rechengitter wird gemäß dem berechneten Windfeld ein Pfad gestartet. In 10 m-Schritten wird die jeweils neue Position berechnet. Diese liegt in der Regel nicht mehr auf einem Gitterpunkt. Die Windrichtung am neuen Punkt ergibt sich dann aus der entfernungsabhängigen Gewichtung der u- und v-Komponenten der nächstgelegenen Gitterpunkte (inverse Distanzwichtung) (vgl. Abb.). Mit der jeweils neuen Windrichtung wird der Pfad so lange verlängert, bis eine „siedlungsnaher Pixelfläche“ erreicht ist. Dann wird der gesamte Pfad mit den jeweiligen Entfernungen zum gefundenen Zielpunkt belegt. Falls jedoch die Länge des Pfades einen Grenzwert übersteigt, bevor ein „siedlungsnaher“ (Ziel-) Punkt erreicht ist, wird der Pfad nicht mit Werten belegt. Der Punkt ist dann zu weit vom Wirkungsraum entfernt, als dass ihm noch eine Klimaaktivität zugesprochen werden könnte.

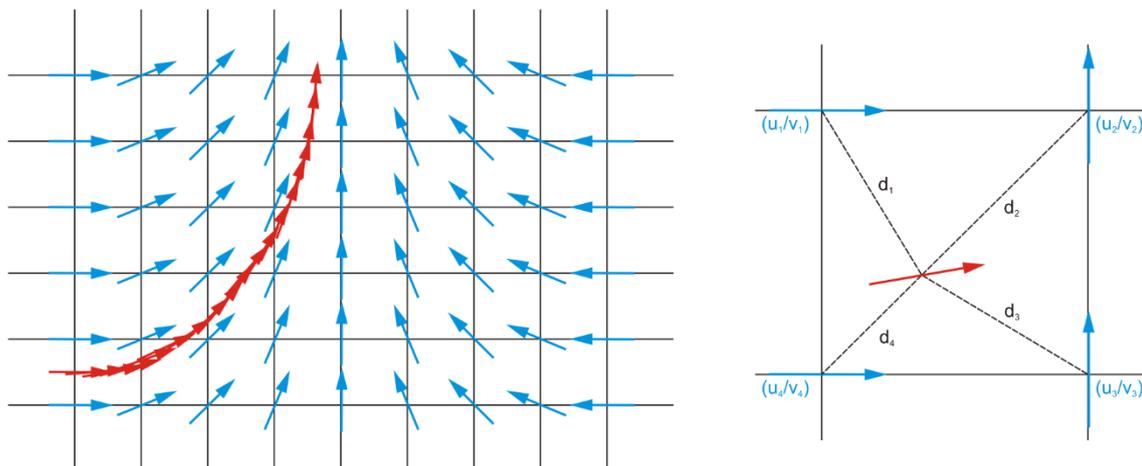


Abb. 29: Vorwärtsberechnung von Stromlinien aus einem Windfeld (schematisch). Die Windgeschwindigkeitskomponenten an einer beliebigen Stelle werden berechnet durch inverse Distanzwichtung der Windgeschwindigkeitskomponenten an den benachbarten Punkten. (Entwurf: Schwab)

Bestimmung der Hangabwind-Einzugsgebiete

Um Aussagen über die Einzugsgebiete potentieller Hangabwinde in den frühen Abendstunden zu machen, werden wie bei der Erstellung der Klimaanalysekarte die berechneten Datensätze der bodennahen Kaltluftbewegungen ($z=2\text{m}$) nach einer Stunde Simulationszeit verwendet (uz003600.90 und vz003600.90). Um eine bestmögliche Auflösung der Endergebnisse zu erreichen, werden diese Windfelder zunächst um den Faktor drei verfeinert (Resampling). Im vorliegenden Fall ergeben sich damit insgesamt 4500×4500 Startpunkte von Fließpfaden. Als Grenzwert für die zu verfolgenden Pfade wird eine maximale Pfadlänge von 5000 m vorgegeben. Falls entlang der Stromlinie Punkte mit einer Geschwindigkeit von 0 m/s auftreten bricht der Pfad sinnvoller Weise ab.

Sind alle Fließpfade bearbeitet, ist ein Ergebnisdatensatz entstanden, der die genauen Pfadlängen bis zum potentiellen Wirkungsraum beinhaltet, sofern diese geringer als 5000 m sind. Bei einer späteren Darstellung können diese Entfernungswerte sinnvoll klassifiziert werden.

Abb. zeigt einen Teilausschnitt des Untersuchungsgebietes. Deutlich ist zu erkennen, dass nur solche Flächen als Hangwindflächen gekennzeichnet sind, die Siedlungen oder siedlungsnahen Flächen zugewandt sind. Die Farbgebung gibt die Entfernungen (als Pfadlängen) zu diesen Wirkungsräumen wieder. Werte über 5000 m treten nicht auf.

Derselbe Teilausschnitt ist auch in Abb. dargestellt. Jetzt entsprechen die Farbwerte jedoch nicht den Entfernungen zum Wirkungsraum sondern den berechneten Windgeschwindigkeiten in 2 m über Grund nach einer Stunde Simulationszeit. Die Abbildung entspricht also den Darstellungen der Geschwindigkeitsbeträge, blendet die Werte jedoch dort aus, wo kein Bezug zu einem Wirkungsraum vorhanden ist.

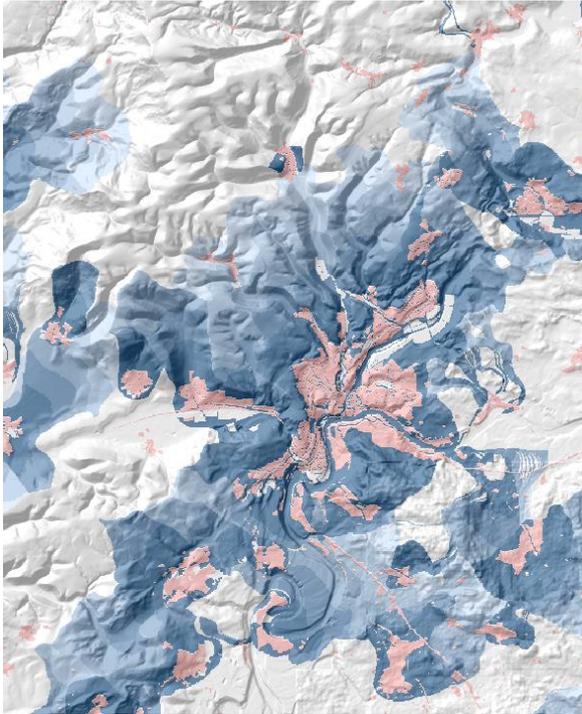


Abb. 30: Siedlungsrelevante Hangwind-Einzugsgebiete im Raum Schaffhausen. Die Farben geben die Entfernungen zum potentiellen Wirkungsraum an. Ausschnitt aus Karte A1a. Entwurf: Schwab.

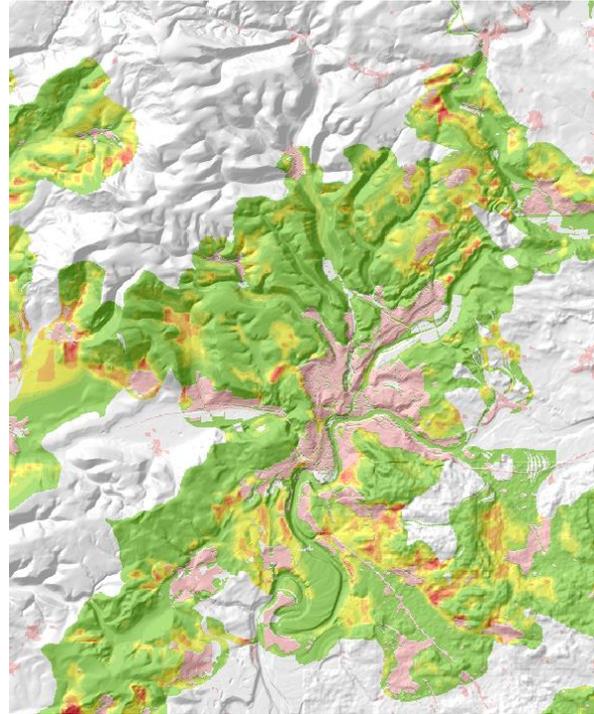


Abb. 31: Siedlungsrelevante Hangwind-Einzugsgebiete im Raum Schaffhausen. Die Farben geben die berechneten Windgeschwindigkeiten in 2 m über Grund an. Ausschnitt aus Karte A1b. Entwurf: Schwab.

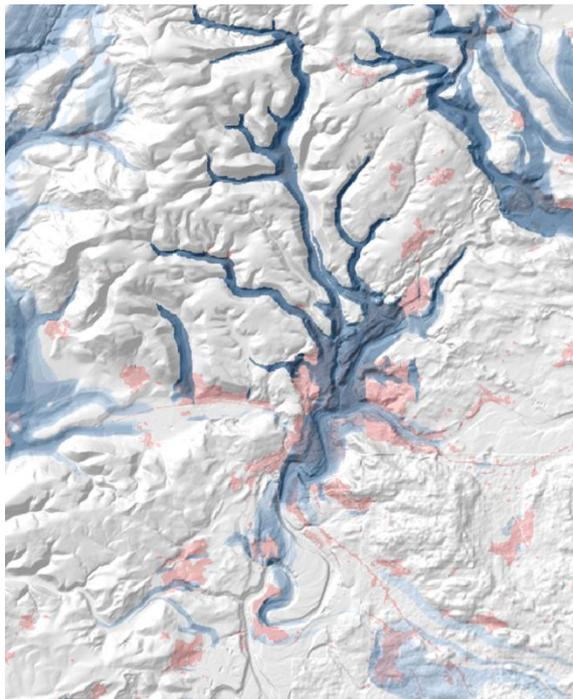
Bestimmung der Bergwind-Einzugsgebiete

Die Berechnung der Kaltlufteinzugsgebiete von Bergwinden gestaltet sich aufwendiger. Hier soll die Dauer des simulierten Phänomens in die Bewertung mit einfließen. Es müssen deshalb mehrere Zeitschnitte hintereinander betrachtet werden. Ferner sind größere maximale Pfadlängen zu wählen, um auch weiter entfernt liegende Kaltluft produzierende Flächen zu berücksichtigen. Da sich Bergwindssysteme durch hohe Werte der Volumenstromdichte auszeichnen, wird zusätzlich ein unterer Schwellenwert für den Volumenstrom eingeführt, der bei Unterschreitung zum Abbruch des Pfades führt.

Im vorliegenden Fall wurden die Bergwindeinzugsgebiete als Entfernungen zum potentiellen Wirkungsraum für insgesamt acht Zeitschnitte (Stunde 1 bis Stunde 8) berechnet. Die maximale Pfadlänge wurde dabei auf 15000 m gesetzt. Als Untergrenze für die Volumenströme wurde ein Wert von $15 \text{ m}^3/(\text{ms})$ gewählt.

Als Ergebnis liegen damit acht Datensätze vor, die für den jeweiligen Zeitschnitt anzeigen, wo auf Pfaden, die nach maximal 15000 m „siedlungsnahen Pixelflächen“ erreichen, ausschließlich Volumenflüsse über $15 \text{ m}^3/(\text{ms})$ zu beobachten sind. Wieder sind diese Pixelflächen mit den jeweiligen Entfernungen zu den potentiellen Wirkungsräumen belegt.

Die acht Zeitschnitte lassen sich zu einer Ergebniskarte zusammenfassen, in dem für jede Pixelfläche die Summe aller „Stunden mit Bergwind“ gebildet wird. Abb. zeigt einen entsprechenden Kartenausschnitt im Raum Memmingen. Dunkelblaue Farbtöne zeigen Gebiete mit „vielen Stunden Bergwind“, hellblau eingefärbte Flächen weisen nur für einen kurzen Zeitraum während der Simulation hohe Volumenflüsse auf. Die Darstellung zeigt eindrücklich, wo sich die Leitbahnen des Kaltluftflusses bei gleichzeitiger Relevanz für größere Siedlungen befinden. Im Kartenteil wird näher darauf eingegangen.



Talabwinde

Berechnung mit KLAM_21

Anzahl der Stunden mit
Volumenstromdichte über
 $15 \text{ m}^3/(\text{ms})$ während
8 h Simulationszeit

Anzahl der Stunden

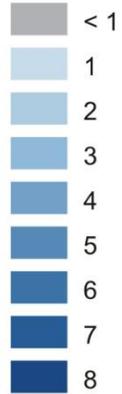


Abb. 32: Summe aller „Stunden mit Bergwind“ während einer achtstündigen Simulationsdauer im Raum Schaffhausen. Ausschnitt aus Karte A2. Erläuterungen im Text.

5.5 Klimaanalysekarten

Mit den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Methoden ist eine gute Datengrundlage zur Erstellung einer Klimaanalysekarte für die Region Hochrhein-Bodensee bereitgestellt.

5.5.1 Landnutzungsklassen anstelle von Klimatopen

In Klimaanalysekarten werden die lokalklimatologischen Gegebenheiten eines untersuchten Gebiets flächenhaft dargestellt. Die VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1 schlägt für die Erstellung solcher Karten unter anderem die Ausweisung sogenannter Klimatope vor. Klimatope beschreiben Gebiete mit ähnlichen mikroklimatischen Ausprägungen. Diese unterscheiden sich vornehmlich nach dem thermischen Tagesgang, der vertikalen Rauigkeit (Windfeldstörung), der topographischen Lage und vor allem nach der Art der Bodennutzung. Als zusätzliches Kriterium spezieller Klimatope wird das Emissionsaufkommen herangezogen. Da in besiedelten Räumen die mikroklimatischen Ausprägungen im Wesentlichen durch die reale Flächennutzung und insbesondere durch die Art der Bebauung bestimmt werden, sind die Klimatope nach den dominanten Flächennutzungsarten bzw. baulichen Nutzungen benannt.

Eine umfassende Kartierung in großem Maßstab konnte im Rahmen der vorliegenden Analyse aus Zeit- und Kostengründen nicht durchgeführt werden. Insbesondere wären dazu nach der oben genannten VDI-Richtlinie teure Thermalbefliegungen nötig gewesen, um flächenhaft Aussagen über den thermischen Tagesgang machen zu können. In vielen Fällen kann jedoch von den Flächennutzungen der verwendeten Landnutzungsdaten recht gut auf entsprechende Klimatope rückgeschlossen werden. Dies zeigt die folgende Zusammenstellung (aus STÄDTEBAULICHE KLIMAFIBEL (Online-Version), in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1). Sie verweist immer wieder auf konkrete Raumbeispiele aus der Region.

Gewässer-Klimatop

Das Gewässer-Klimatop (insbesondere großflächige Gewässer) hat gegenüber der Umgebung einen ausgleichenden thermischen Einfluss durch schwach ausgeprägte Tages- und Jahresgänge; dort sind die Lufttemperaturen im Sommer tagsüber niedriger und nachts höher als in der Umgebung. Das Gewässer-Klimatop zeichnet sich durch hohe Luftfeuchtigkeit und Windoffenheit aus.

Die Landnutzungsklasse „Gewässer“ kann mit dem Gewässer-Klimatop gleichgesetzt werden. Je größer eine zusammenhängende Wasserfläche ist, desto deutlicher tritt sie als Klimatop in Erscheinung. Im Untersuchungsgebiet fehlt ein großes zusammenhängendes Gewässer-Klimatop wie etwa der Bodensee. Die Auswirkungen der kleinen Seen und Weiher konzentrieren sich auf die Wasserfläche selber und die unmittelbaren Uferbereiche.

Freiland-Klimatop

Das Freiland-Klimatop weist einen extremen Tages- und Jahresgang der Temperatur und Feuchte sowie sehr geringe Windströmungsveränderungen auf. Damit ist eine intensive nächtliche Frisch- und Kaltluftproduktion verbunden. Dies trifft insbesondere auf ausgedehnte Wiesen- und Ackerflächen sowie auf Freiflächen mit sehr lockerem Gehölzbestand zu.

Die Landnutzungsklasse „Unversiegelte Freifläche“ kann mit dem Freiland-Klimatop gleichgesetzt werden. Sie besteht ursprünglich aus einer Vielzahl von Landnutzungsklassen (u.a. Sonderkulturen, Feuchtgebiete, Torf, Grünland, Ackerland), die aber allesamt zur nächtlichen Kaltluftproduktion beitragen.

Wald-Klimatop

Das Wald-Klimatop zeichnet sich durch stark gedämpfte Tages- und Jahresgänge der Temperatur und Feuchte aus. Während tagsüber durch die Verschattung und Verdunstung relativ

niedrige Temperaturen bei hoher Luftfeuchtigkeit im Stammraum vorherrschen, treten nachts relativ milde Temperaturen auf. Zudem wirkt das Blätterdach als Filter gegenüber Luftschadstoffen, so dass die Waldklimatope als Regenerationszonen für die Luft und als Erholungsraum für den Menschen geeignet sind.

Die Landnutzungsclassen „Wald“, hinter der sich verschiedene Waldklassen verbergen (Nadelwald, Laubwald, Mischwald), kann mit dem Wald-Klimatop gleichgesetzt werden. Je größer eine zusammenhängende Waldfläche ist, desto deutlicher tritt sie als Klimatop in Erscheinung. Besondere Reliefverhältnisse können für zusätzliche Beschattungseffekte sorgen und damit die Bedeutung des Waldes als Erholungsraum in Zeiten der Wärmebelastung zusätzlich erhöhen.

Grünanlagen-Klimatop

Innerörtliche, parkartige Grünflächen wirken aufgrund des relativ extremen Temperatur- und Feuchte-Tagesganges und der damit verbundenen Kalt- und Frischluftproduktion ausgleichend auf die bebaute und meist überwärmte Umgebung. Größere Grünflächen dienen als Ventilationsschneisen. Innerörtliche Grünflächen mit dichtem Baumbestand stellen durch Verschattung tagsüber kühle Ausgleichsflächen mit hoher Luftfeuchtigkeit gegenüber der erwärmten Umgebung dar.

Sind solche Grünanlagen groß genug, lassen sie sich auch in den Landnutzungsdaten wiedererkennen. Sie werden in den Daten jedoch nicht als eigentliche Klasse geführt, sondern tauchen dort als „*unversiegelte Freiflächen*“ oder „*Waldflächen*“ auf.

Gartenstadt-Klimatop

Das Gartenstadt-Klimatop umfasst bebaute Flächen mit offener, ein- bis dreigeschossiger Bebauung und reichhaltigen Grünflächen. Gegenüber dem Freiland-Klimatop sind alle Klimaelemente leicht modifiziert, wobei eine merkliche nächtliche Abkühlung stattfindet und Regionalwinde nur unwesentlich gebremst werden.

Stadttrand-Klimatop

Das Stadttrand-Klimatop wird durch dichter stehende, maximal dreigeschossige Einzelgebäude, Reihenhäuser oder Blockbebauung mit Grünflächen oder durch maximal fünfgeschossige freistehende Gebäude mit Grünflächen bestimmt. Die nächtliche Abkühlung ist stark eingeschränkt und im Wesentlichen von der Umgebung abhängig. Die lokalen Winde und Kaltluftströme werden behindert, Regionalwinde stark gebremst.

In den beiden letztgenannten Fällen ist eine Zuordnung zu einer bestimmten Landnutzungsclassen schwierig. Die verwendeten Landnutzungsdatensätze kennen nur die Unterscheidung zwischen „lockerer“ und „dichter Siedlung“. Die Classen „*Lockere Siedlung*“ könnte sowohl auf das Gartenstadt-Klimatop als auch auf das Stadttrand-Klimatop zutreffen. Die Classen „*Dichte Siedlung*“ passt besser zu den beiden folgenden Klimatopen.

Stadt-Klimatop

Mehrgeschossige geschlossene Bebauung mit wenig Grünflächenanteilen und freistehenden Hochhäusern prägt das Stadt-Klimatop. Bei starker Aufheizung am Tage ist die nächtliche Abkühlung sehr gering. Dadurch entsteht gegenüber der Umgebung ein Wärmeinseleffekt mit relativ niedriger Luftfeuchtigkeit. Die dichte und hohe Bebauung beeinflusst die regionalen und überregionalen Windsysteme in erheblichem Umfang, so dass der Luftaustausch eingeschränkt ist und eine insgesamt hohe Schadstoffbelastung besteht. In den Straßenschluchten sind sowohl hohe Luftschadstoff- und Lärmbelastungen als auch böenartige Windverwirbelungen anzutreffen.

Stadtkern-Klimatop

Dichte und hohe innerstädtische Bebauung mit sehr geringen Grünanteilen führt tagsüber zu einer starken Aufheizung und nachts zur Ausbildung einer deutlichen Wärmeinsel bei durchschnittlich geringer Luftfeuchtigkeit. Die massive Bebauung führt zusammen mit der ausgeprägten Wärmeinsel zu einer bedeutenden Beeinflussung der regionalen und überregionalen Winde. Insgesamt besteht eine hohe Schadstoffbelastung. In den Straßenschluchten treten neben böenartigen Windverwirbelungen hohe Luftschadstoff- und Lärmbelastungen auf.

Gewerbe-Klimatop

Das Gewerbe-Klimatop entspricht im Wesentlichen dem Klimatop der verdichteten Bebauung, d.h.: Wärmeinseleffekt, geringe Luftfeuchtigkeit, erhebliche Windfeldstörung. Zusätzlich sind vor allem ausgedehnte Zufahrtsstraßen und Stellplatzflächen sowie erhöhte Emissionen zu nennen. Im nächtlichen Wärmebild fällt teilweise die intensive Auskühlung im Dachniveau großer Hallen auf (insbesondere mit Blechdächern), während die von Gebäuden gesäumten Straßen und Stellplätze weiterhin stark erwärmt bleiben.

Industrie-Klimatop

Das Industrie-Klimatop ist mit dem Stadtkern- und Stadt-Klimatop vergleichbar, weist aber großflächige Verkehrsflächen und weit höhere Emissionen auf. Bei intensiver Aufheizung am Tage bildet sich auch nachts aufgrund der Ausdehnung versiegelter Flächen eine deutliche Wärmeinsel aus, obwohl die Dächer der Hallen teilweise bemerkenswert auskühlen. Die am Boden befindlichen Luftmassen sind erwärmt, trocken und mit Schadstoffen angereichert. Die massiven Baukörper und die bodennahe Erwärmung verändern das Windfeld wesentlich.

Gewerbe- und Industrieflächen lassen sich aus den verwendeten Landnutzungsdaten nicht differenziert zuordnen. Die Flächen der Klassen „Industrie“ und „Verkehr“ dürften in der Gesamtbetrachtung jedoch recht gut mit den Industrie- und Gewerbe-Klimatopen übereinstimmen.

Bahnanlagen-Klimatop

Das Bahnanlagen-Klimatop ist durch eine intensive Erwärmung am Tag und eine rasche nächtliche Abkühlung gekennzeichnet; allerdings liegen die Oberflächentemperaturen dort höher als im Freiland. Die Gleiskörper sind aufgrund ihrer geringfügigen Überbauung windoffen und dienen in bebauten Gebieten oftmals als Luftleitbahnen bzw. Luftaustauschflächen. Ihre Berücksichtigung als Klimatop erfolgt ab einer Breite von ca. 50 m, d.h. nur im Falle mehrgleisiger Bahnstrecken.

Da in den Landnutzungsdatensätzen ebenfalls nur Bahnanlagen mit großer flächenhafter Ausdehnung als solche erfasst sind (Klasse „Bahnanlagen“), passt in diesem Falle die Zuordnung zum gleichnamigen Klimatop problemlos.



Abb. 39: Beispiel eines Wald-Klimatops (Bildmittelgrund).

In der folgenden Tabelle werden die Entsprechungen noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 3: Zuordnung von Landnutzungsklassen zu den Klimatopen nach VDI-Richtlinie 3787.

Klimatop	Entsprechende Landnutzungsklasse:
Gewässer-Klimatop	Gewässer
Freiland-Klimatop	Unversiegelte Freiflächen
Wald-Klimatop	Wald
Grünanlagen-Klimatop	Unversiegelte Freiflächen/Wald
Gartenstadt-Klimatop	Lockere Siedlung
Stadttrand-Klimatop	Lockere Siedlung
Stadt-Klimatop	Dichte Siedlung
Stadtkern-Klimatop	Dichte Siedlung
Gewerbe-Klimatop	Industrie und Verkehr
Industrie-Klimatop	Industrie und Verkehr
Bahnanlagen-Klimatop	Bahnanlagen

5.5.2 Angaben zum Luftaustausch

Die Belüftung von Siedlungsgebieten durch Kaltluftfluss hat eine wesentliche Funktion insbesondere während austauscharmer Wetterlagen. Deshalb sind in den gängigen Klimaanalysekarten neben den flächenhaft dargestellten Klimatopen auch Piktogramme und Einzelsignaturen zu finden, die auf Kaltluftentstehungs- und Kaltluftammelgebiete hinweisen und Kaltluftstaubereiche bzw. bodeninversionsgefährdete Gebiete anzeigen. Potentielle Luftaustauschvorgänge werden differenziert in Bergwindysteme und Hangabwinde. Täler bzw. Sattellagen, die als Luftleitbahnen fungieren, werden ebenfalls durch Einzelsignatur hervorgehoben. Durch Farbgebung wird dabei gegebenenfalls eine mögliche Schadstoffbelastung angedeutet (vgl. STÄDTEBAULICHE KLIMAFIBEL (Online-Version), VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1, KLIMAATLAS REGION STUTTGART). Bei der vorliegenden Klimaanalysekarte wurde anders verfahren.

5.5.2.1 Darstellung potentieller Kaltluftstaugebiete

Die potentiellen Kaltluftstaugebiete wurden aus den Modellergebnissen übernommen und entsprechend den Ausführungen in Kap. 5.2.2 gegliedert (Kaltluftstau reliefbedingt, siedlungsbedingt, an Wald- und Siedlungsrändern). Die Informationen zu den Kaltluftbewegungen wurden in zwei verschiedene Kategorien unterteilt.

5.5.2.2 Darstellung potentieller Bergwindsysteme

Aus den mit KLAM_21 berechneten Volumenströmen wurden Bereiche mit potentiellen Bergwindsystemen bestimmt. Da solche Talabwinde vor allem dann von Bedeutung sind, wenn sie relativ früh am Abend einsetzen, wurde auf die Volumenströme nach zwei Stunden Modellzeit zurückgegriffen. Zu dieser Zeit konzentrieren sich hohe Volumenströme auf Täler mit einer hohen Kaltluftproduktion im Einzugsgebiet und guten Abflussbedingungen.

Aus Darstellungsgründen kann jedoch nicht jeder Wert durch einen entsprechenden Pfeil abgebildet werden. Deshalb wurde ein Filter programmiert, der eine automatisierte Pfeilauswahl ermöglicht („Maximum-Filter“). Er wird im Folgenden kurz beschrieben:

„Maximum-Filter“

- zunächst werden die Werte an allen „Randpunkten“ auf 0 gesetzt (Vermeidung von „Randproblemen“)
- Anschließend werden alle Punkte, deren Volumenströme unter einem zu wählenden Grenzwert liegen (hier $15 \text{ m}^3/(\text{ms})$), ebenfalls auf 0 gesetzt.
- Dann werden die verbliebenen Werte der Größe nach absteigend sortiert. Damit wird die Bearbeitungsreihenfolge festgelegt.
- Beginnend beim Punkt mit den höchsten Volumenströmen werden folgende Schritte abgearbeitet:
 - Nur, falls der Wert des Punktes zuvor noch nicht auf 0 gesetzt wurde:
 - wird der Wert des Punktes beibehalten
 - und werden alle anderen Punkte in einer quadratischen Umgebung (vorzugebender Größe) auf 0 gesetzt.
- Beim nächsten Punkt in der Bearbeitungsreihenfolge wird fortgefahren.

Die Abarbeitung in der sortierten Reihenfolge gewährleistet, dass ein Punkt, der seinen Wert behalten hat, sicher nicht mehr durch einen anderen Punkt beeinflusst werden kann. Der neue Datensatz der Volumenströme hat unter anderem die Eigenschaft, dass der Abstand zwischen zwei Punkten mit Wert größer 0 mindestens so groß wie die Seitenlänge der angewandten Maske. Er dient anschließend zur Erzeugung der „Bergwindpfeile“, die als blau gefüllte „Flächenpfeile“ gezeichnet werden (vgl. Abb. Abb.41).

Die Wahl der Umgebungsgröße richtet sich dabei nach dem Maßstab der angestrebten Kartendarstellung. Großmaßstäbige Karten erlauben kleinere Masken, bei kleinmaßstäbigen Karten müssen die „realen Abstände“ zwischen den Pfeilen größer sein, damit die Überlappungen nicht zu groß sind.

5.5.2.3 Darstellung potentieller Hangabwinde

Zur Bestimmung von Gebieten mit potentiellen Hangabwinden wurden die mit KLAM_21 berechneten Windgeschwindigkeiten in 2 m Höhe herangezogen. Dabei war ebenfalls zu entscheiden, welcher konkrete Zeitschnitt dafür am besten geeignet ist.

KLAM_21 ist als Zweischichten-Modell nicht in der Lage, Mehrschicht-Phänomene zu simulieren. Dazu würde etwa ein bodennaher Hangabwind gehören, der auch unter einem bereits talauswärts wehenden Bergwind weiter bestehen kann. KLAM_21 würde solch einen Hangwind nur so lange bzw. nur dort wiedergeben, wo die Hänge noch nicht in angesammelter Kaltluft „ertrunken“ sind. Dies trifft in den ersten Stunden Modellzeit noch fast überall zu. Da auch für Hangabwinde gilt, dass sie vor allem in den frühen Abendstunden für eine angenehme Abkühlung sorgen können, erscheint es sinnvoll, die erste Stunde Modellzeit als Grundlage für die Bestimmung potentieller Hangwindgebiete heranzuziehen.

In der Klimaanalysekarte werden deshalb die bodennahen Windgeschwindigkeiten (2 m über Grund) nach einer Stunde Modellzeit mit potentiellen Hangabwinden gleichgesetzt und in klassifizierter Form dargestellt. Bei der Interpretation der Karten ist jedoch zu berücksichtigen, dass damit nicht zwangsläufig Hangabwinde während der gesamten Nacht zu erwarten sind.

5.5.3 *Windrosendarstellungen*

Werden Langzeitstudien im Untersuchungsraum durchgeführt, so können die beobachteten Windverhältnisse ebenfalls in die Kartendarstellung aufgenommen werden. In diesem Fall müsste eine wetterlagen- und tageszeitenabhängige Auswertung durchgeführt werden. Für die Thematik der vorliegenden Kartendarstellung wären dann die Nachtstunden bei wind-schwachen Strahlungswetterlagen von besonderer Bedeutung. Die Windrosen würden die prozentuale Verteilung der Windrichtungshäufigkeit für ebendiese Stunden an den einzelnen Messstationen darstellen. Da im Rahmen der Klimaanalyse Hochrhein-Bodensee auf Messungen verzichtet wurde, kommen in den vorliegenden Karten keine Windrosen vor.

5.5.4 *Verzicht auf Angaben zur Schadstoffbelastung, angehobenen Inversionen und Windfeldveränderungen durch Hochhausbebauung*

Die VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1 schlägt zusätzlich zu den flächenhaften Klimatopdarstellungen und den Signaturen zum Luftaustausch auch die Angabe von Piktogrammen zur Anzeige von bodeninversionsgefährdeten Gebieten und Tallagen mit häufigem Boden-/Talnebel vor. In der vorliegenden Klimaanalysekarte wurde darauf verzichtet, da sich diese Aussagen aus den Mustern der potentiellen Kaltluftstaugebiete und Kaltluftbewegungen ableiten lassen.

Auch Signaturen, die abgehobene Inversionen anzeigen (vgl. ebenfalls VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1), wurden nicht aufgenommen. Sie würden auf ausgedehnte Wärmeinseln in bebauten Gebieten hinweisen, da hier relativ hohe Oberflächentemperatur und damit eine erhöhte Turbulenz vorherrschen. Aussagen in einer entsprechenden räumlichen Differenzierung liegen für den Untersuchungsraum jedoch nicht vor, so dass auch hier auf die Verteilung der Landnutzungen, insbesondere auf die verschiedenen Siedlungsklassen verwiesen werden muss.

Es fehlen auch Hinweise zu Windfeldveränderungen, bedingt z.B. durch hohe Gebäude (Hochhäuser mit mindestens 10 Geschossen) oder besondere Geländeerhebungen (Auffüllberge, Halden).

Einfach zu realisieren wäre hingegen die Überlagerung der Darstellung mit den Hauptverkehrsstraßen. Sie haben einen großen Anteil am Emissionsaufkommen. Eine Gefahr erhöhter Schadstoffbelastungen ließe sich dann vor allem dort ablesen, wo sich Industrieflächen und Hauptverkehrsstraßen in Gebieten mit potentiell Kaltluftstau und nur geringen Luftbewegungen konzentrieren.

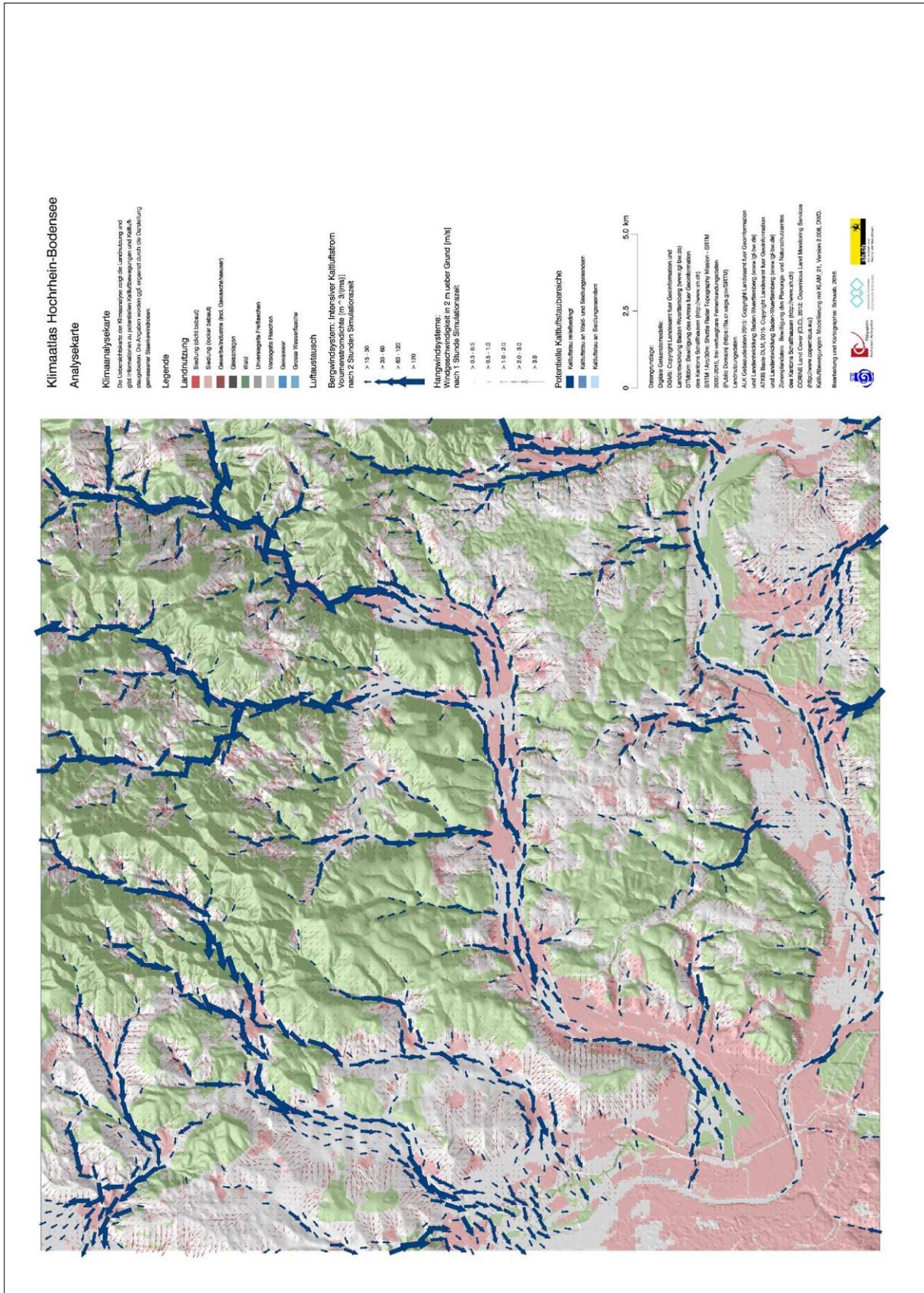


Abb.41: Klimaanalysekarte für den Raum Wiesental. Entwurf: Schwab. Erläuterungen im Text.

5.5.5 Auswertung der Klimaanalysekarte

Bei der direkten Deutung der Landnutzungsklassen als entsprechende Klimatope muss berücksichtigt werden, dass die Ausweisung von Klimatopen nie parzellenscharf erfolgen kann, da sich hier immer Übergangsbereiche einstellen. Dies erfordert zwangsläufig größere Toleranzen, die selbst bei einer ausführlichen Kartierung inklusive Thermalbefliegung mit bis zu 100 m angegeben werden. Für genauere Aussagen werden zusätzlich fachliche Detailgutachten notwendig (vgl. KLIMAATLAS DER REGION STUTTGART, S. 148). Ferner ist darauf hinzuweisen, dass bei Änderungen der Landnutzung, die sich seit der Erstellung des verwendeten Landnutzungsdatensatzes ergeben haben, gegebenenfalls Analogieschlüsse zu ziehen sind.

Die Darstellung der potentiellen Kaltluftstaugebiete liefert Hinweise darauf, wo mit einem stark verlangsamten bzw. stagnierenden Kaltlufttransport zu rechnen ist. Dies ist in Mulden und Beckenstrukturen der Fall, aber auch im Bereich von Talverengungen sowie durch Rückstau an Wald- und Siedlungsrändern. Die entsprechenden Gebiete sind besonders bodeninversionsgefährdet. Es ist mit einer reduzierten Durchlüftung und erhöhten Luftbelastungsrisiken zu rechnen. Die sommerlichen Wärmebelastungsrisiken sind reduziert, das Frostrisiko in den Wintermonaten erhöht.

Die Aussagen der Klimaanalysekarte zum Luftaustausch müssen als anwendungsorientierte Zusammenfassung der KLAM_21-Ergebnisse verstanden werden. Die Karte eignet sich deshalb sehr gut, um innerhalb des Untersuchungsgebiets Teilregionen mit unterschiedlicher Kaltluftempfindlichkeit zu lokalisieren. Es ist jedoch zu empfehlen, neben der Klimaanalysekarte zusätzlich die Entwicklung der Kälteinhalte, Kaltluftmächtigkeiten, Windgeschwindigkeiten und Volumenströme während des gesamten Modelllaufs zu betrachten, um sich ein umfassendes Bild zu machen.

Hohe Volumenstromdichten zeigen einen intensiven Kaltluftfluss in Tälern und Becken an (Bergwindssysteme), der durch die Konvergenz kleinerer Hangabwindssysteme und die damit verbundene Kältezufuhr hervorgerufen wird. Vor allem dort, wo sich im Bereich von Engstellen Kanalisierungs- und Düseneffekte einstellen, sorgen diese Kaltluftflüsse für eine deutlich verbesserte Durchlüftung. Die Luft- und Wärmebelastungsrisiken sind reduziert. Je kräftiger die Bergwinde ausgeprägt sind, umso geringer ist deren Empfindlichkeit gegenüber Einflüssen durch Bebauungsmaßnahmen. Es ist jedoch zu betonen, dass hohe Volumenströme nicht automatisch mit hohen bodennahen Windgeschwindigkeiten einher gehen (vgl. u.a. REKLIBO, WAB, Bd. 3). Selbst am Ausgang größerer Täler, für die kräftige Bergwindssysteme berechnet werden, wirken Bebauungsstrukturen auf das bodennahen Windfeld stark bremsend (vgl. Handmessungen in 2 m über Grund). Einfache Vertikalsondierungen hingegen belegten, dass in der Höhe trotzdem intensive Kaltluftströme stattfinden.

Mit den dargestellten Windgeschwindigkeiten in 2 m über Grund kann sehr gut auf Gebiete geschlossen werden, in denen frühabendliche Hangabwinde die Belüftungssituation von Siedlungen verbessern. Die potentielle Reichweite solcher Kaltluftbewegungen geht aus den entsprechenden Vektorfeldern hervor. Die starke Reliefabhängigkeit mit einer Reduktion der Windgeschwindigkeiten in der Tal- bzw. Beckenmitte wird dabei ebenso deutlich, wie die bremsende Wirkung von Bebauungsstrukturen. Oben wurde bereits darauf hingewiesen, dass die dargestellten Windfelder nicht zwangsläufig als Mittelwert über die gesamte Nacht gedeutet werden dürfen, obgleich durchaus solche Situationen vorherrschen können. Um hier verbindliche Aussagen treffen zu können, bieten sich Messungen mit einfachen Wetterstationen an.

Somit wird deutlich, dass eine Vielzahl der Ausgangsfragestellungen mit der Karte selber, insbesondere aber in Verbindung mit allen weiteren Simulationsergebnissen, beantwortet werden können (vgl. Tabelle 4). Es ist jedoch auch zu betonen, dass es sich beim verwendeten Modell um ein vergleichsweise einfaches „Einschichten-Modell“ handelt. Dadurch ergeben sich

Grenzen bei der Interpretierbarkeit der Ergebnisse. Insbesondere Phänomene, die zur Ausbildung einer differenzierten Atmosphären-Schichtung führen, können vom Modell nicht exakt nachgebildet werden.

Tabelle 4: Verwertbarkeit der Modellergebnisse zur Beantwortung der Ausgangsfragestellungen.

Ausgangsfrage	Verwertbare Modellergebnisse
Wo in der Region ist verstärkt mit nächtlichen Kalt- und Frischluftströmen zu rechnen?	Ergebnisse von KLAM_21: Klimaanalysekarte Karten mit den siedlungsrelevanten Einzugsgebieten von Hangwinden und Bergwinden. Karten der bodennahen Windgeschwindigkeiten, mittleren Windgeschwindigkeiten und Volumenströme
Handelt es sich dabei um Windsysteme in Tälern (nächtliche Bergwinde, Talabwinde) oder an Hängen (Hangabwinde)?	Ergebnisse von KLAM_21: Klimaanalysekarte
Mit welchen Intensitäten treten sie auf?	Ergebnisse von KLAM_21: Klimaanalysekarte Karten mit den siedlungsrelevanten Einzugsgebieten von Hangwinden und Bergwinden. Karten der bodennahen Windgeschwindigkeiten, mittleren Windgeschwindigkeiten und Volumenströme
Wie weit reichen sie in die jeweiligen Vorländer hinein?	Ergebnisse von KLAM_21: Klimaanalysekarte Karten mit den siedlungsrelevanten Einzugsgebieten von Hangwinden und Bergwinden. Karten der bodennahen Windgeschwindigkeiten, mittleren Windgeschwindigkeiten und Volumenströme
Mit welchen vertikalen Mächtigkeiten ist dabei zu rechnen?	Ergebnisse von KLAM_21: Entwicklung der Kaltluftmächtigkeiten
Wie verzahnen sie sich nächtliche Bergwinde und Hangabwinde untereinander?	Ergebnisse von KLAM_21: Entwicklung der Windfelder
Wo ist mit starken bodennahen Inversionen (Kaltluftseen) zu rechnen?	Ergebnisse der Reliefanalyse: Berechnete potentielle Kaltluftstaugebiete Ergebnisse von KLAM_21: Kaltluftmächtigkeiten, frühe Zeitschnitte
Wo liegen bedeutende Frischluft-produzierende Flächen?	Ergebnisse von KLAM_21: Klimaanalysekarte Karten mit den siedlungsrelevanten Einzugsgebieten von Hangwinden und Bergwinden.

Die verbleibenden Fragestellungen haben allesamt eher bewertenden Charakter bzw. zielen auf konkrete Handlungsempfehlungen hin (s. Kap.7).

6 Kartenteil

6.1 Grundlagenkarten (G1-G5)

Die Grundlagenkarten sollen einen kurzen Überblick über das Untersuchungsgebiet liefern. Zunächst werden die Verwaltungsgrenzen dargestellt. Die anschließend folgenden Karten der

Geländehöhe, des Schattenreliefs und der Geländeneigung (Karten G2, G3, G4) vermitteln einen guten Eindruck über die geomorphologische Situation des Untersuchungsraumes. Die Verbreitung der verschiedenen Landnutzungen geht aus Karte G5 hervor.

6.1.1 Höhe, Schattenrelief und Neigung (Karten G2, G3 und G4)

Aus den Karten zur Geländehöhe und Geländeneigung sowie aus der Schummerungskarte geht die landschaftliche Gliederung des Untersuchungsraumes hervor. Zu erkennen sind die bereits in Kapitel 3.1 genannten naturräumlichen Einheiten:

- Markgräfler Rheinebene
- Markgräfler Hügelland
- Hochrheintal
- Wiesental
- Südlicher Kammschwarzwald
- Weitenauer Bergland
- Dinkelberg
- Hotzenwald
- Alb-Wutach-Gebiet
- Klettgauer Schichtstufenland
- Randen und Reina
- Der Hegau als Teil des westlichen Bodenseebeckens:

Auch die in 3.1 beschriebene Typisierung von Tälern lässt sich anhand der Karte nachvollziehen:

- tief gelegene, überwiegend weite Talräume mit breiter Talsohle und schwach geneigtem Tallängsprofil (Hochrheintal, Wiesental)
- extrem steile und tiefe, von Norden nach Süden verlaufende Täler mit wenig breiter bzw. ganz ohne Talsohle (Kerbtäler des südlichen Kammschwarzwalds)
- relativ kleine, kurze Täler an den flussnahen Talhängen
- große, weniger steile Täler mit gleichmäßigem Gefälle und wenig breiter Talsohle im Alb-Wutach-Gebiet
- Wutachtal
- nach Süden gerichtete Täler von Randen und Hegualb
- breite, talartige Niederungen im Hegaubecken

Gerade im Hinblick auf die Ausprägung lokalklimatischer und lufthygienischer Eigenschaften sind diese naturräumlichen Einheiten und die darin vorkommenden Talräume von Bedeutung. Vor allem die Neigungskarte gibt erste Hinweise darauf, wo verstärkte bodennahe Kaltluftbewegungen erwartet werden können.

Betrachtet man die Flächenanteile verschiedener Höhen- und Neigungsklassen im Untersuchungsraum, so ergeben sich folgende Verteilungen:

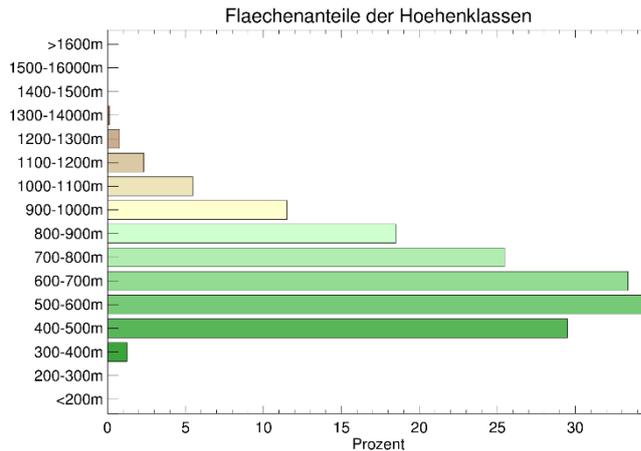


Abb.42: Flächenanteile der Höhenklassen in der Region Hochrhein-Bodensee.

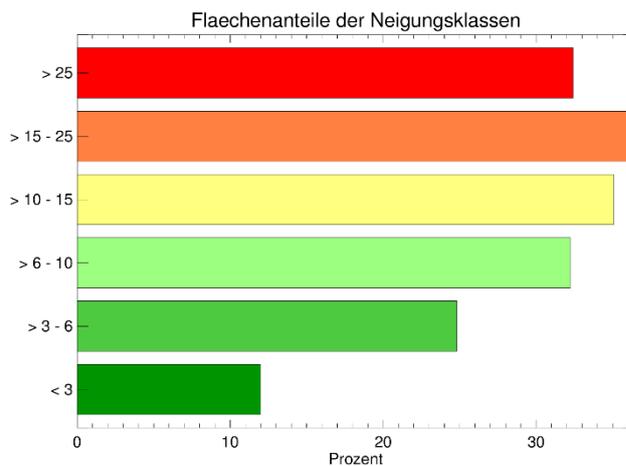


Abb.43: Flächenanteile der Neigungsklassen in der Region Hochrhein-Bodensee.

6.1.2 Landnutzung (Karte G5)

Zur Beschreibung der Landnutzung wurde vom Auftraggeber ein Datensatz zur Verfügung gestellt, der auf folgenden Ausgangsdaten beruht:

- ATKIS Basis-DLM: © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de)
- ATKIS Basis-DLM: © Bayerische Vermessungsverwaltung (www.geodaten.bayern.de)
- Corine Land Cover (CLC) 2006
- Satellitenbildszenen Landsat TM5 (2006), Spektralkanäle 1, 2, 3, 4, 5, 7

Innerhalb der Siedlungsgebiete liefern diese Daten eine Differenzierung zwischen locker und dicht bebauten Flächen. Dies ist für stadtklimatologische Fragestellungen von großer Bedeutung. Auf eine Differenzierung der Freiflächen wurde hingegen verzichtet, weil sich Ackerflächen, Brachflächen und Grünland hinsichtlich der zentralen Fragestellungen von Kaltluft-/Frischlufthproduktion und -bewegung nur unwesentlich unterscheiden.

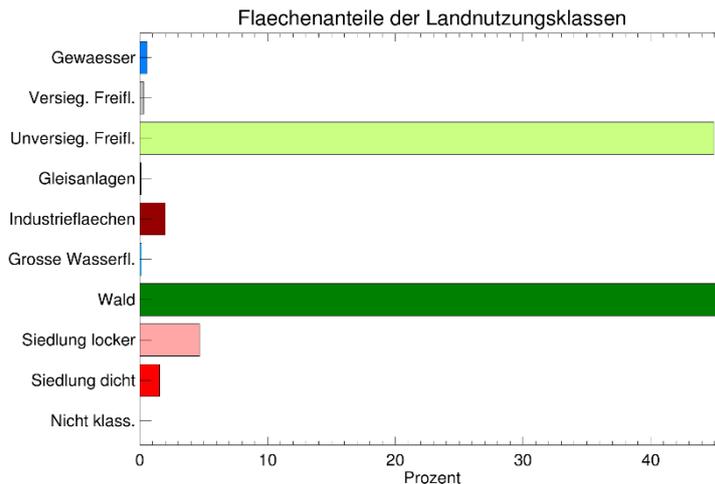


Abb.44: Flächenanteile der Landnutzungsklassen in der Region Hochrhein-Bodensee.

Die Landnutzung wird dominiert von Waldflächen und Freiflächen (je ca. 45 %). Wesentlich kleinere Anteile nehmen Siedlungsflächen (ca. 7 %), Industrieflächen (2 %) und die sonstigen Flächen (Gewässer, versiegelte Freiflächen = Verkehrsflächen).

Bei genauerer Betrachtung lassen sich folgende räumlichen Muster erkennen:

- Markgräfler Rheinebene
 - Waldflächen in den Auegebieten
 - Dominanz von Ackerbau auf der Niederterrasse
- Markgräfler Hügelland
 - überwiegend Ackerbau und Sonderkulturen (Obstbau und Weinbau)
 - an den Abhängen zur Niederterrasse überwiegend Weinbau
- Hochrheintal
 - hohe Anteile an Siedlungs- und Gewerbeflächen
 - auf den Freiflächen Dominanz von Ackerbau, daneben auch Grünland- und Streuobstnutzung
 - Waldflächen nur vereinzelt (direkt am Hochrhein sowie in den Randbereichen zum Schwarzwald und zum Dinkelberg hin)
- Dinkelberg
 - steile, bewaldete Hänge in den randlichen Bereichen (Ausnahme Abhang zum Wehratal)
 - auf dem Plateau sowohl Waldflächen als auch Wald-Offenland-Mischgebiete
 - Waldanteile im westlichen Teil deutlich höher als im östlichen Teil
- Hochschwarzwald (=Südschwarzwald)
 - überwiegend bewaldet
 - in den Tälern und in den weniger steilen Hochlagen auch Offenflächen, dann überwiegend grünlandgenutzt
 - bei breiten Talsohlen im Talraum Siedlungs- und Gewerbeflächen
- Alb-Wutach-Gebiet
 - Muschelkalk-Hochflächen überwiegend ackerbaulich genutzt
 - Täler und Talflanken überwiegend waldbestanden, vereinzelt kleine Weiler und Mühlen
 - Klettgauer Haupttalung (=Neunkirchener Talung) überwiegend ackerbaulich genutzt, in günstigen Lagen Anbau von Edelobst und Weinbau
 - auf den Höhen der Klettgau-Alb Buchenwald in steilen Lagen und Offenland bei geringerer Neigung

- Hegualb
 - im westlichen Teil Dominanz von Ackerbau und Grünland
 - im mittleren Teil Zweiteilung: im Norden meist Ackerbau, im Süden Dominanz von Waldflächen
 - im östliche Teil dominieren land- und forstwirtschaftliche Nutzungen

Innerhalb der Siedlungsbereiche differenziert die Karte zwischen dicht und locker bebauten Flächen. Auch Industrieflächen und Gleisanlagen werden separat ausgewiesen. Da die Klassenzuordnung ausschließlich auf den spektralen Signaturen der jeweiligen Flächen zur Zeit der Satellitenbildaufnahme beruht, der Übergang zwischen solchen Klassen aber fließend ist, muss mit Fehlklassifikationen gerechnet werden. Man erkennt jedoch deutlich, dass sich dicht bebaute Flächen zumeist zentral in größeren Siedlungen finden lassen. Auffällig sind auch die häufig am Rand der Siedlungen liegenden Industrie- und Gewerbeflächen.

6.2 Ergebniskarten (E1-E7)

6.2.1 *Potentielle Kaltluftstaugebiete (Karte E1)*

Die Darstellung der potentiellen Kaltluftstaugebiete liefert Hinweise darauf, wo mit einem stark verlangsamten bzw. stagnierenden Kaltlufttransport zu rechnen ist. Die entsprechenden Gebiete sind besonders bodeninversionsgefährdet. Es ist mit einer reduzierten Durchlüftung und erhöhten Luftbelastungsrisiken zu rechnen. Die sommerlichen Wärmebelastungsrisiken sind reduziert, das Frostrisiko in den Wintermonaten erhöht.

Die potentiellen Kaltluftstaugebiete wurden mit einem Flutungsalgorithmus bestimmt, der aus Höhenwerten die abflusslosen Hohlformen berechnet. Um die Einflüsse der reinen Orographie von jenen der Wald- und Siedlungsflächen zu trennen, wurden mehrere Modellrechnungen mit und ohne Überhöhung der Siedlungs- und Waldflächen durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnungen werden in einer einzigen Karte dargestellt (vgl. Kap. 5.2.2).

6.2.1.1 Reliefbedingter Kaltluftstau

Großflächiger reliefbedingter Kaltluftstau zeigt sich in der Region nur im Bereich des östlichen Dinkelbergs, in Einzelfälle auf dem Talboden des Hochrheintals, im Klettgau sowie im Hegau östlich des Kegelberglands und im Bereich ehemaliger Schmelzwasserrinnen.

6.2.1.2 Wald- und siedlungsbedingter Kaltluftstau

In Abhängigkeit von der Lage im Gelände ergeben sich an Wald- und Siedlungsrändern unterschiedlich große Staubereiche. Größere Stauplächen an Siedlungsrändern bilden sich insbesondere im Hochrheintal bei Rheinfeldern, im Klettgau, im Hegau bei Singen und im Wiesental. Sie entstehen immer dann, wenn die entsprechenden Siedlungen die Talbereiche komplett queren.

6.2.2 *Sonnenuntergangszeiten als potentielle „Startzeiten der Kaltluftproduktion“ (Karten E2a – E2c)*

Die Ergebnisse der Modellrechnungen mit dem Beschattungsmodell SOMOD werden in den Karten E2a – E2c vorgestellt. Da für die zu untersuchenden Fragestellung die Abendstunden von besonderem Interesse sind, kommen für drei ausgewählte Tage im Jahr die Sonnenuntergangszeiten zur Darstellung. Letztere werden in Minuten vor dem astronomischen Sonnenuntergang angegeben. Die Karte gibt Auskunft über die Entwicklung der Beschattung während der gesamten Phase des Sonnenuntergangs. Dunkel dargestellte Flächen liegen bereits deutlich vor dem astronomischen Sonnenuntergang im Schatten. Weiß eingefärbte Flächen liegen

bis zum allgemeinen Sonnenuntergang in der Sonne. Die entsprechenden Übergangsklassen werden in jeweils 5 Minuten-Schritten differenziert dargestellt. Damit lässt sich aus der Karte unter anderem entnehmen, wie der Schattenwurf in Tal- und Beckenlandschaften von Nordwesten nach Südosten vordringt. Ferner wird deutlich, wie viel früher die tief eingeschnittenen Täler nicht mehr von direkter Sonnenstrahlung erreicht werden.

Analoge Überlegungen lassen sich für den 21.03. (entspricht von der Beschattungssituation dem 23.09.) und den 21.12. anstellen. Dabei sind folgende Punkte zu berücksichtigen: Der Zeitpunkt des astronomischen Sonnenuntergangs liegt entsprechend der Jahreszeit wesentlich früher, die Einfallswinkel der Sonnenstrahlen während der vorausgegangenen Nachmittagsstunden sind flacher und die Richtung der Sonnenstrahlen zum Zeitpunkt des Sonnenuntergangs verschiebt sich von Nordwesten (im Sommer) über Westen (im Frühjahr und Herbst) bis nach Südwesten (im Winter).

Aus früh beschatteten Tälern ist Kaltluftabfluss unter Umständen bereits vor dem astronomischen Sonnenuntergang zu erwarten. Wenn besonnte und beschattete Talhänge in der Übergangszeit vor Sonnenuntergang direkt gegenüber liegen, kann dies zu Quercirkulationen im Tal führen, weil sich dann ein noch aktives Hangaufwindssystem positiv mit einem bereits einsetzenden Hangabwind koppelt.

6.2.3 Kaltluftbewegungen berechnet mit KLAM_21 (E3-E7)

Die Modellrechnungen mit KLAM_21 liefern vielfältige Ergebnisse, die unterschiedlich dargestellt werden müssen, um möglichst viele Aussagen ableiten zu können. Zunächst wird die Entwicklung der Kaltluftmächtigkeiten im Laufe einer Nacht dargestellt. Neben der Höhe der Kaltluftschicht ist auch der von KLAM berechnete Kälteinhalt ein Maß für die Ansammlung von Kaltluft in den entsprechenden Geländestrukturen (vgl. Karte E3a – E4c). Die Karten E5a – E6e zeigen die auftretenden Geschwindigkeiten der Kaltluftbewegungen. Dabei muss unterschieden werden zwischen den bodennahen Luftbewegungen (hier 2 m über Grund) (Karten E5a – E5e) und den mittleren Windgeschwindigkeiten der Strömungsschicht (Karten E6a – E6e). Die aus den mittleren Windgeschwindigkeiten und den Kaltluftmächtigkeiten berechneten Volumenströme geben ebenfalls wertvolle Hinweise, wo mit einem besonders intensiven Luftaustausch gerechnet werden kann. (Karten E7a – E7e)

6.2.3.1 Kaltluftmächtigkeiten (Karten E3a – E3c)

Aus den Karten E3a – E3e geht hervor, wie sich Kaltluft bereits in den frühen Abendstunden in den tiefer gelegenen Geländeteilen sammelt und wie die berechneten Kaltluftmächtigkeiten im Laufe der Nacht stetig ansteigen. Für die verschiedenen naturräumlichen Einheiten sind folgende Phänomene zu beobachten:

- Für den Bereich von Hochrheintal und Wiesental werden bereits früh am Abend große Kaltluftmächtigkeiten berechnet, die bis zum Ende der Simulation großflächig auf 150 – 200 m, z.T. sogar auf über 200 m ansteigen. Wegen der unterschiedlichen Talquerschnitte verläuft der Anstieg der Kaltluftmächtigkeiten dabei unterschiedlich schnell.
- Auch alle angrenzenden Täler des Hochschwarzwalds bzw. des Alb-Wutach-Gebiets, insbesondere auch das Wutachtal füllen sich rasch mit Kaltluft.
- Kaltluft sammelt sich auch in den beckenartigen Talweitungen im in den Hochlagen des Schwarzwalds (rund um St. Blasien und im Schluchsee-Becken).
- Auch für die Klettgau-Haupttalung, das Hochrheintal südlich von Schaffhausen und die Niederungen im Bereich des Hegaus werden bereits in den ersten Stunden der Simulation beträchtliche Kaltluftmächtigkeiten berechnet.

- Dort, wo die im Einzugsgebiet produzierte Kaltluft vergleichsweise rasch ins Vorland abfließen kann (Neigungsverhältnisse der Talhänge und der Talsohlen) und dort, wo extrem breite Talsohlen vorherrschen, nehmen die Kaltluftmächtigkeiten langsamer zu.
- Höher gelegenen Teile ragen zunächst noch aus der Kaltluft heraus. Erst im Laufe der Simulation sorgen Rückstaueffekte und autochthone Kaltluftproduktion dafür, dass auch diese Gebiete allmählich in Kaltluft „ertrinken“ oder von Kaltluft überströmt werden.
- Die höchsten Bereiche (Hochlagen von Kammschwarzwald, Weitenauer Bergland und westlichem Dinkelberg, Hochlagen des Alb-Wutach-Gebiets, Randhöhen der Klettgauer Talung, Randen, Hochlagen der Hegaualb, Hegauer Kegelberge, Molasseerhebungen im Bodenseebecken) bleiben bis zum Schluss kaltluftfrei (Höhenlage, Abflussbedingungen).
-

6.2.3.2 Kälteinhalt (Karten E4a – E4c)

Bei der Darstellung der Kälteinhalte wurde jeweils ein 5%-Stretch vorgenommen, die Daten in 256 Klassen eingeteilt und mit einer 256-Farben-Palette (linearer Farbverlauf von Rot über Gelb, Grün, Hellblau, Dunkelblau, Lila nach Schwarz) abgebildet. Die Daten stellen somit keine absoluten Werte dar, geben aber für jeden einzelnen Zeitschritt die Unterschiede innerhalb des Untersuchungsgebietes besonders gut wieder.

Aus den Karten E4a – E4e geht hervor, wie sich die produzierte Kälte in den tiefer gelegenen Geländeteilen sammelt. Einige grundlegende Beobachtungen sollen hier festgehalten werden:

Siedlungsflächen weisen in den frühen Abendstunden geringe Kälteinhalte auf, da sie selber keine Kälte produzieren. Wenn sie im Laufe der Nacht zunehmend von zugeflossener Kaltluft überlagert werden, sind sie im Muster der Kälteinhalte jedoch nicht mehr zu erkennen. Hier ist zu berücksichtigen, dass die von KLAM_21 berechneten Kälteinhalte als Volumenmittelwerte der Kaltluftschicht aufgefasst werden müssen. Als Zweischichtenmodell ist KLAM_21 nicht in der Lage eine zusätzliche Trennung zu den bodennahen Verhältnissen in der Stadt vorzunehmen. Hier kann es in Wirklichkeit trotzdem zu Wärmeinseleffekten kommen.

Während der ganzen Nacht treten Hang- und Kuppenlagen als Bereiche mit vergleichsweise geringen Kältegehalten hervor. Dies liegt an den dort guten Abflussbedingungen. Erst wenn aufgrund großer Kaltluftansammlungen in der unmittelbaren Umgebung ein Abfluss unterbunden ist, werden auch für solche Punkte höhere Kälteinhalte berechnet. Im Bereich der höchsten Erhebungen ist dies zuletzt der Fall. Sie erscheinen deshalb bis zum Schluss als Gebiete mit relativ geringen Kältegehalten.

6.2.3.3 Kaltluftbewegungen in 2 m über Grund (Karten E5a – E5e)

Die mit dem Modell KLAM_21 berechneten Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen in 2 m über Grund werden in verschiedener Form dargestellt. Die Karten E5a – E5c zeigen den Betrag der Windgeschwindigkeit in klassifizierter Darstellung. Eine vektorielle Darstellung liegt den Karten E5d und E5e zu Grunde.

Die stärksten bodennahen Kaltluftbewegungen treten erwartungsgemäß an den besonders steilen Hängen mit Freiflächen auf, insbesondere wenn auch deren Einzugsgebiete hohe Freiflächenanteile aufweisen. Dies ist im Untersuchungsgebietes in folgenden Teilräumen der Fall:

- im Übergangsbereich von Markgräfler Hügelland zur Oberrheinebene
- in den extrem steilen Lagen des Kammschwarzwaldes, insbesondere im Bereich von Freiflächen
- an den steilen Abfällen von Hotzenwald bzw. Alb-Wutach-Gebiet zum Hochrhein
- an den steilen Hängen im Klettgau und im Bereich der Hegaualb

- an den steilen Hängen der Hegau-Vulkane und der Molasseerhebungen im Bodenseebecken, insbesondere wenn diese nicht bewaldet sind.

Mit zunehmender Simulationsdauer weisen nur noch die höher gelegenen steilen Hänge große Windgeschwindigkeiten auf. Die niedriger gelegenen sind dann bereits in der angesammelten Kaltluft der Mulden-, Tal- und Beckenlandschaften „ertrunken“. Die Luft erfährt dort im Modell keinen hangabwärts gerichteten Antrieb mehr.

Sind steile Hänge waldbedeckt, werden vom Modell für 2 m über Grund nur geringe Windgeschwindigkeiten berechnet, da es sich dabei um die Windgeschwindigkeit im Bestand handeln würde. Ebenfalls nur geringe bodennahe Windgeschwindigkeiten sind in allen flachen Geländeteilen zu verzeichnen (Talböden, Beckenböden, Hochflächen).

Insgesamt ist ein enger Zusammenhang zwischen den simulierten Kaltluftmächtigkeiten und den berechneten bodennahen Windgeschwindigkeiten zu erkennen. Hohe Windgeschwindigkeiten während der ganzen Nacht werden ausschließlich für Gebiete berechnet, die bis zuletzt oberhalb der Kaltluftsammelgebiete liegen und eine hohe Neigung aufweisen.

Die Verifizierungsmessungen in REKLIBO zeigten für den Fall der hoch gelegenen Hangstandorte eine gute Übereinstimmung. Auch viele der niedrig gelegenen Hangstationen zeigten ein modellähnliches Verhalten. Es gab jedoch auch Standorte, an denen Kaltluftabflüsse während der ganzen Nacht auch an tiefer gelegenen Hängen zu beobachten waren. Ferner zeigten die Messungen, dass vor allem im Bereich von Talverengungen und an Talausgängen mit entsprechenden Düseneffekten ebenfalls mit beachtlichen bodennahen Windgeschwindigkeiten zu rechnen ist, obwohl dies vom Modell so nicht wiedergegeben wird. Es ist anzunehmen, dass dies auf die im Modell verwendeten universellen Profile der Windgeschwindigkeit zurückzuführen ist (vgl. Kap. 5.3.1), die in solchen Situationen die bodennahen Windgeschwindigkeiten offensichtlich unterschätzen. Die im Folgenden vorgestellten Karten zeigen nämlich im Mittel über die gesamte Kaltluftsäule gerade im Bereich der Täler die größten Luftbewegungen an.

6.2.3.4 Kaltluftbewegung im Mittel der Kaltluftsäule (Karten E6a – E6e)

Die mittleren Kaltluftgeschwindigkeiten (Mittelwert über die gesamte Strömungsschicht, vgl. 5.3) werden ebenfalls als reine Beträge und als Vektoren dargestellt. Hohe Werte werden für die steilen Hanglagen aber auch für die Täler berechnet, in denen sich die Kaltluft zu größeren Flüssen sammelt. Die Kaltluftflüsse an den Hängen weisen in der Regel nur geringe vertikale Mächtigkeiten auf. Die damit verbundenen Volumenströme sind deshalb vergleichsweise gering. Wesentlich bedeutender sind in dieser Hinsicht die Kaltluftbewegungen entlang der Tal- und Beckenlandschaften. Dies zeigen die Darstellungen der Volumenströme.

6.2.3.5 Volumenstrom der Kaltluftbewegung (Karten E7a – E7e)

Die aus der Kaltluftmächtigkeit und den mittleren Strömungsgeschwindigkeiten berechneten Volumenströme konzentrieren sich bereits in den frühen Stunden der Modellrechnung im Bereich der Täler. Im Einzelnen ist folgendes zu beobachten:

- Zunächst weisen die steilen Täler des Hochschwarzwalds und des Alb-Wutach-Gebiets die größten Beträge auf.
- Für die weiten Talniederungen von Hochrheintal und Wiesental werden große Beträge erst später berechnet.
- Hier strömen die Kaltluftmassen in breiter Front den tiefer gelegenen Geländeteilen zu. Eine Integration über die jeweiligen Talquerschnittsflächen würde damit für diese beiden Täler die größten Beträge ergeben.

- Im Laufe der Nacht bilden sich die Täler bzw. Talsysteme von Alb, Schlücht und Wutach als Hauptkaltluftlieferanten für das Hochrheintal heraus.
- Die zu Beginn der Simulation noch zu beobachtenden Zuflüsse von Kaltluft aus dem Aaretal werden im Laufe der Nacht zunehmend von den Kaltluftansammlungen im Hochrheintal blockiert bzw. nach Osten umgelenkt. In den späten Modellstunden führt dieser Effekt sogar zu kräftigen flussaufwärts (!) gerichteten Volumenströmen im Bereich der Täler/Becken von Rünz und Reuss im Kanton Aargau.
- Mit zunehmender Simulationsdauer treten alle größeren und kleineren Täler als Bereiche mit intensiven Volumenströmen auf.
- Es kommt zu Düseneffekten an Engstellen der Täler.
- Auch das Überströmen von Sattellagen ist an einigen Stellen zu beobachten. So wird z.B. entlang zweier Leitbahnen Kaltluft aus dem Wiesental über den Dinkelberg dem Hochrheintal zugeführt. Auch aus dem Klettgau strömt Kaltluft in den späten Modellstunden entgegen dem Geländegefälle nach Osten in Richtung Schaffhausen bzw. ins Hochrheintal.

Die berechneten Werte können als Hinweise auf wichtige Leitbahnen des Luftaustauschs bei windarmen Strahlungswetterlagen gedeutet werden. Dort, wo größere Talstrukturen fehlen und in den Hochlagen sind erwartungsgemäß nur relativ geringe Volumenflüsse zu beobachten.

6.3 Analysekarten (A1-A3)

6.3.1 Kaltlufteinzugsgebiete und Luftleitbahnen (Karten A1-A2)

6.3.1.1 Hangwindeinzugsgebiete (Karten A1a, A1b)

Die Karten der Hangwindeinzugsgebiete wurden aus den Stromlinien der mit KLAM_21 berechneten bodennahen Windgeschwindigkeiten (2 m über Grund, nach einer Stunde Simulationszeit) bestimmt. Karte A1a zeigt diese Einzugsgebiete mit einer Farbgebung, welche die Entfernungen (als Pfadlängen) zu diesen Wirkungsräumen in 1 km-Schritten wiedergibt. Deutlich ist zu erkennen, dass nur solche Flächen als Hangwindflächen gekennzeichnet sind, die Siedlungen oder siedlungsnahen Flächen zugewandt sind (vgl. 5.4.3).

Karte A1b zeigt die bodennahen Windgeschwindigkeiten in den so berechneten Hangwindeinzugsgebieten. Somit lassen sich die besonders bedeutenden siedlungsnahen Hangwindgebiete ausfindig machen. Der Einfluss der Geländeneigung wird an vielen Stellen sichtbar.

6.3.1.2 Bergwindeinzugsgebiete (Karte A2)

Karte A2 zeigt die berechnete Dauer von Bergwinden (Anzahl von Stunden mit hohen Volumenströmen) während einer achtstündigen Simulation (vgl. 5.4.3), wiederum nur in den Einzugsgebieten der größeren Siedlungen. Deutlich sind Bereiche zu erkennen, in denen Bergwindssysteme bereits früh am Abend einsetzen und lange anhalten.

Mit den Karten der Hangwind- und Bergwindeinzugsgebiete lassen sich die wichtigen Leitbahnen für lokale Kaltluftbewegungen (Bergwinde und Hangabwinde) und gleichzeitig die wichtigen Herkunftsgebiete der Kaltluft flächenhaft herausarbeiten und somit räumliche Zusammenhänge verdeutlichen. Die Karten dienen somit auch als hilfreiche Zusatzinformation für die Auswertung der erstellten Klimaanalysekarten (vgl. 6.3.2). Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass sich die Darstellung der Bergwindeinzugsgebiete über die Anzahl der Stunden mit hohen Volumenströmen deutlich von der Darstellung der Bergwindgebiete in den Klimaanalysekarten unterscheidet. Letztere betonen mit ihren Aussagen die frühen Abendstunden.

6.3.2 Klimaanalysekarten (Karten A3a-A3c)

Die im Folgenden beschriebenen Klimaanalysekarten fassen die Ergebnisse der Modellrechnungen und die Ergebnisse der Messungen im Hinblick auf die nächtlichen Kaltluftbewegungen bei windschwachen Strahlungswetterlagen zusammen. Sie stellen das wichtigste Ergebnis der regionalen Klimaanalyse dar.

Neben Informationen zur Verteilung der klimarelevanten Landnutzungsklassen und zu potentiellen Kaltluftstaugebieten beinhalten die Karten vor allem Informationen zum Luftaustausch durch nächtliche Kaltluftbewegungen bei windschwachen Strahlungswetterlagen.

Nächtliche Kaltluftbewegungen sind für größere Siedlungen vor allem in den frühen Abendstunden von Bedeutung (Abkühlungseffekte, Luftaustauscheffekte). Zur Darstellung wichtiger Bergwind- und Hangwindgebiete wurde bei der Erstellung der Klimaanalysekarten deshalb auf relativ frühe Zeitschnitte der Kaltluftabflussmodellierung zurückgegriffen (Windgeschwindigkeiten in 2 m über Grund nach einer Stunde Simulationszeit, Volumenströme nach zwei Stunden Simulationszeit).

Aus den dargestellten Landnutzungsklassen lassen sich grundlegende Aussagen über das thermische Verhalten und die Rauigkeit der jeweiligen Oberflächen ableiten. Die Darstellung der potentiellen Kaltluftstaugebiete liefert Hinweise darauf, wo mit einem stark verlangsamten bzw. stagnierenden Kaltlufttransport zu rechnen ist. Die Aussagen zum Luftaustausch sind als anwendungsorientierte Zusammenfassung der KLAM_21-Ergebnisse zu verstehen.

Hohe Volumenstromdichten zeigen einen intensiven Kaltluftfluss in den Tälern an (Bergwind-systeme). In den vorliegenden Karten basieren die Informationen auf den modellierten Volumenströmen nach zwei Stunden Simulationszeit. Aus der hohen Informationsdichte der berechneten Werte wurden mit einem gezielten Filterverfahren (vgl. 5.5.2) besonders bedeutende Volumenströme lokalisiert und in Form einer klassifizierten Pfeildarstellung kartographisch umgesetzt. Bergwindssysteme bilden sich demnach in fast allen Tälern aus. Ihre Stärke hängt jedoch stark von den jeweiligen Neigungsverhältnissen und Landnutzungsanteilen im Einzugsgebiet ab.

Mit den dargestellten Windgeschwindigkeiten in 2 m über Grund nach einer Stunde Simulationszeit kann auf Gebiete geschlossen werden, in denen frühabendliche Hangabwinde die Belüftungssituation von Siedlungen verbessern. Die potentielle Reichweite solcher Kaltluftbewegungen geht aus den entsprechenden Vektorfeldern hervor. Die starke Reliefabhängigkeit mit einer Reduktion der Windgeschwindigkeiten in flachen Bereichen wird dabei ebenso deutlich, wie die bremsende Wirkung von Bebauungsstrukturen.

Gliedert man den Gesamtraum nach vorgestellten typischen Landschaftseinheiten, so lassen sich aus den Klimaanalysekarten unter anderem folgende Erkenntnisse festhalten:

- Als Leitbahnen der Kaltluftbewegung in den frühen Abendstunden mit einer hohen Belüpfungsfunktion wirken alle zum Hochrheintal bzw. Wiesental gerichteten steilen Täler von Hochschwarzwald, Alb-Wutachgebiet und Dinkelberg.
- In breiten Tälern führen Divergenzprozesse in den frühen Abendstunden zu vergleichsweise geringen punktuell Volumenströmen. Gute Belüftungsverhältnisse können hier für jene Siedlungen angenommen werden, die an Talausgängen oder in unteren Talabschnitten der Seitentäler liegen. Die Kaltluftströme in den Haupttälern konzentrieren sich anfangs noch auf die Tiefenlinien im Bereich der Flussverläufe oder werden von den Siedlungsräumen gebremst bzw. abgelenkt.
- Die Hochlagen von Schwarzwald und Dinkelberg bzw. im Alb-Wutach-Gebiet weisen keine deutlichen Luftleitbahnen auf. Die simulierten Kaltluftbewegungen haben beim aktuellen Siedlungsmuster eher eine geringe Relevanz, da die Entfernung zu den nächstgelegenen größeren Siedlungen häufig recht groß und die auftretenden Geschwindigkeiten der Kaltluftbewegungen eher klein sind. In Einzelfällen können aber auch kleinere Taleinschnitte, die direkt auf Siedlungsbereiche hin ausgerichtet sind, eine wichtige Belüpfungsfunktion einnehmen.
- Im Klettgau liegen die Leitbahnen des Kaltluftflusses in den frühen Abendstunden abseits der größeren Siedlungen. Erst mit zunehmender Simulationsdauer füllt sich die dortige Haupttalung so stark mit Kaltluft, dass auch die Siedlungen überströmt werden.
- Die Stadt Schaffhausen profitiert früh am Abend von den früh einsetzenden, nach Süden gerichteten Talabwinden im Bereich des Randen.
- Den einzelnen größeren Erhebungen im Hegau fällt dort eine große Bedeutung zu, wo sie von größeren Siedlungen umgeben sind. Auch hier sind es dann die früh einsetzenden Hangabwinde, die positiv zur Belüftung der Siedlungen beitragen.
- Die Hochflächen der Schwäbischen Alb weisen dort, wo sie besonders kuppig ausgeprägt sind, Hangwindssysteme auf, deren Stärke jedoch stark von der jeweiligen Neigung abhängt. Ihre Reichweite ist stark beschränkt, sobald flachere Gebiete oder Muldenlagen erreicht werden.

Ein Vergleich mit den Analysekarten A1a – A2 macht noch einmal die wesentlichen Unterschiede der Darstellungen deutlich:

- Während in den Klimaanalysekarten die berechneten Windfelder unabhängig von potentiellen Wirkungsräumen dargestellt werden, zeigen die Karten A1a-A2 immer nur jene Kaltluft einzugsgebiete, die größeren Siedlungen zugewandt sind.
- Während die Klimaanalysekarten die potentiellen Bergwinde in den frühen Abendstunden darstellen und hierzu auf die berechneten Volumenströme nach zwei Stunden Simulationszeit zurückgreifen, gibt die Karte der siedlungsrelevanten Bergwindeinzugsgebiete die Anzahl der Stunden mit hohen Volumenströmen im Laufe einer achtstündigen Simulation wieder.

Für eine umfassende Deutung sei auf die Einzelkarten verwiesen, die in größeren Maßstäben erstellt wurden (vgl. z.B. Karte A3b bzw. A3c). Ebenfalls ist zu empfehlen, neben den hier beschriebenen Analysekarten zusätzlich die Entwicklung der Kältepotentiale, Kaltluftmächtigkeiten, Windgeschwindigkeiten und Volumenströme während des gesamten Modelllaufs zu betrachten (vgl. Karten E3 – E7 und Kap. 5.3).

7 Anwendung der regionalen Klimaanalyse im Rahmen der Regional- und Landschaftsrahmenplanung und der kommunalen Bauleitplanung

7.1 Klima und Luft in der Regional- und Landschaftsrahmenplanung

Die Regionalplanung hat die Aufgabe, die sozialen und wirtschaftlichen Ansprüche mit der dauerhaften Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen in Einklang zu bringen. Klima und Lufthygiene stellen einen wichtigen Teilaspekt der natürlichen Lebensgrundlagen dar. Sie wurden im Rahmen der regionalen Klimaanalyse Hochrhein-Bodensee untersucht. Somit liegen Informationen und Empfehlungen insbesondere zur bioklimatischen Situation vor.

In der Landschaftsrahmenplanung werden jedoch auch noch weitere Aspekte des Landschafts- und Naturhaushaltes aufgearbeitet und berücksichtigt wie z.B. die Tier- und Pflanzenwelt, der Boden oder das Wasser. Schließlich werden diese Einzelaspekte auch in ihrem räumlichen Zusammenwirken betrachtet und die Themen des menschlichen Wohlbefindens berücksichtigt. Klima und Luft bilden also nur einen Teilaspekt der Landschaftsrahmenplanung. Im Landschaftsrahmenplan sind auch Fragen des Klimawandels näher zu betrachten, insbesondere dort, wo sich aus den zu erwartenden Klimaveränderungen Konsequenzen für die Raumentwicklung ergeben.

Eine wesentliche Aufgabe des Landschaftsrahmenplans ist eine raumbezogene Konkretisierung von Zielen zum Schutz und zur Entwicklung von Natur und Landschaft, also auch zu Klima und Luft. Aus diesen Zielen für Klima und Luft können Handlungsansätze zur Aufwertung und Entwicklung der klimatischen Funktionen abgeleitet werden. Sie stellen dann einen Orientierungs- und Handlungsrahmen für die Regionalplanung dar und sind fachliche Vorgabe für die kommunale Planungsebene, den Landschaftsplan.

7.2 Anwendung im Rahmen der kommunalen Bauleitplanung

Bei der Aufstellung von Bauleitplänen (Flächennutzungspläne, Bebauungspläne) sind gemäß BauGB §1 Abs. 6 Nr. 7a die Auswirkungen auf Luft und Klima zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere in Gebieten mit erhöhter Gefahr von Wärmebelastung und Schadstoffanreicherung. (vgl. Kap. 2). Viele Anwendungssituationen sind denkbar, in denen klimatisch-lufthygienische Gesichtspunkte eine wichtige Rolle spielen (vgl. Kasten).

Anwendungssituationen

- Ausweisung eines Neubaugebietes in Hanglage am Stadtrand
- Zentrumsnahe Siedlungsverdichtung
- Siedlungserweiterung, die zu einem „Zusammenwachsen“ bisher noch räumlich getrennter Siedlungen führen würde
- Ausweisung eines neuen Gewerbegebietes am Rande einer Siedlung in Tallage
- Standortsuche für ein Unternehmen mit zu erwartenden hohen Emissionen
- Planung einer Straße mit zu erwartendem hohem Verkehrsaufkommen
- bioklimatische Mängel bzw. lufthygienische Belastungen in bestimmten Stadtgebieten
-

Grundsätzlich gilt es zu klären, welche Auswirkungen eine kleinklimatisch wirksame Veränderung der Erdoberfläche oder eine emittierende Nutzung auf benachbarte bzw. im Einwirkungsbereich liegende empfindliche Nutzungen unter anderem im Hinblick auf Temperaturveränderungen, Luftaustauschprozesse und Immissionsbelastungen haben wird.

Landschaftsrahmenplan und Regionalplan können über ihre Festlegungen hier erste Hinweise liefern. Diese können ergänzt werden durch Informationen aus Klimaatlant (z.B. Klimaatlas

von Baden-Württemberg (LUBW 2006), Online-Datendiensten (z.B. Online Karten- und Datendienst der LUBW, MeteoSchweiz), sowie insbesondere durch die Ergebnisse der durchgeführten regionalen Klimaanalyse.

Zusammen mit einer allgemeinen Ortskenntnis lassen sich damit folgende Fragen klären:

- Wo tritt vermehrt Wärmebelastung auf?
- Wo ist mit schlechten Durchlüftungsverhältnissen zu rechnen?
- Wo liegen Gebiete hoher lufthygienischer Belastung?
- Welche Belüftungsverhältnisse herrschen bei übergeordneter Strömung?
- Wo liegen bedeutende Hangabwind- und Talabwindssysteme bei windarmen Strahlungswetterlagen?
- Wo gibt es ggf. weitere lokale Frischluftströme?

Die entwickelten Leitfragen werden dabei zunächst immer mit Blick auf den Gesamttraum beantwortet. Gehen aus dem Fazit einer solchen gesamträumlichen Betrachtung klimakritische Standorte hervor, sind der betroffene Standort (Planungsraum) und benachbarte Siedlungsräume im Hinblick auf die gleichen Leitfragen näher zu untersuchen.

Auf der Basis dieser standörtlichen Betrachtung sind schließlich Handlungsempfehlungen abzuleiten, durch die eine Verschlechterung der vorhandenen Situation vermieden bzw. eine Verbesserung erreicht werden kann. Sie beziehen sich auf den Zielbereich Thermische Situation und den Zielbereich Lufthygiene (vgl. SCHWAB u.a., 2010, S. 41 ff).

8 Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb der Region Hochrhein-Bodensee gelten insbesondere die Täler von Hochrhein und Wiese, sowie deren Nebenflüsse und der Hegau als Teil des westlichen Bodenseebeckens als schlecht durchlüftet (vgl. LUBW, 2006). Bei windschwachen Strahlungswetterlagen kommt es im Sommer zu Situationen mit Wärmebelastung. Im Winterhalbjahr bilden sich häufig Inversionen aus. Durch den damit verbundenen reduzierten vertikalen und horizontalen Luftaustausch verschlechtern sich dann die lufthygienischen Verhältnisse.

Große Bedeutung erlangen in solchen Situationen lokale Windsysteme, insbesondere nächtliche Bergwinde und Hangabwinde. Sie können in ihren Wirkungsräumen die tagsüber mit Schadstoffen angereicherte Luft durch frische Luft ersetzen (Frischluftröme) und für Abkühlung sorgen.

In der Region waren bislang nur relativ geringe Kenntnisse über solche lokalen Windsysteme vorhanden. Die hier beschriebene Klimaanalyse setzte deshalb gerade hier ihren Schwerpunkt.

Zunächst wurden mit einfachen reliefanalytischen Verfahren die kaltluftrelevanten Merkmale der Einzugsgebiete verschiedener Täler untersucht. Anschließend kam das Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zum Einsatz, um flächenhafte Aussagen über die potentiell auftretenden Kaltluftbewegungen im Laufe einer idealen Strahlungsnacht machen zu können. Das Modell liefert insbesondere Informationen zur Entwicklung der Kaltluftmächtigkeiten, der potentiellen Geschwindigkeiten der Kaltluftströmung sowie zur Entwicklung der entsprechenden Volumenströme.

Anschließend wurden aus den Ergebnissen der Kaltluftabflussmodellierung Klimaanalysekarten in unterschiedlichen Maßstäben zu erzeugen. Diese Karten beinhalten Informationen zur Landnutzung, zu potentiellen Kaltluftbewegungen (Bergwinde und Hangwinde) und zu potentiellen Kaltluftstaugebieten.

Außerdem kamen Algorithmen zum Einsatz, mit denen die wichtigen Leitbahnen für lokale Kaltluftbewegungen (Bergwinde und Hangabwinde) und gleichzeitig die wichtigen Herkunftsgebiete der Kaltluft flächenhaft herausgearbeitet und somit räumliche Zusammenhänge verdeutlicht werden können. Die dabei erstellten Karten unterstützen bei der Auswertung der Klimaanalysekarten, indem sie den Focus auf jene Hangabwind- bzw. Talabwindssysteme richten, die Relevanz für die größeren zusammenhängenden Siedlungen haben.

Die umfangreichen Ergebnisse der Regionalen Klimaanalyse für die Region Hochrhein-Bodensee stellen eine wichtige Entscheidungsgrundlage für die räumliche Planung dar, um in klimatischer Hinsicht günstige Lebensbedingungen in der Region dauerhaft zu sichern.

Zukünftige Landschaftsrahmenpläne können im Themenbereich Klima und Luft auf diese Ergebnisse zurückgreifen. Die darin enthaltenen Handlungsansätze können Grundlage für das Kapitel Regionale Freiraumstruktur in zukünftigen Regionalplänen sein. Zur Integration der Ziele für Klima und Luft bieten sich hier vor allem die Regionalen Grünzüge und Grünzäsuren an.

Auch innerhalb der kommunalen Planung wurden vergleichbare Ergebnisse bereits verwendet. So wurde für den Gemeindeverband Mittleres Schussental 2009 eine Detailuntersuchung durchgeführt, die auf den zuvor gewonnenen Erkenntnissen und Erfahrungen der dortigen Regionalen Klimaanalyse aufsetzte und in wesentlich größerem Maßstab thermische Belastungssituationen und lokale Luftaustauschprozesse unter die Lupe nahm.

Unter der Annahme eines sich fortsetzenden Klimawandels ist davon auszugehen, dass die bereits jetzt in der Region auftretenden Belastungssituationen, insbesondere die sommerliche

Wärmebelastung, in den kommenden Jahrzehnten eher noch zunehmen werden. Dabei werden die auftretenden räumlichen Muster im Prinzip jedoch gleich bleiben. Ebendiese räumlichen Muster wurden im Rahmen der Studie flächenhaft hergeleitet. Jedoch können in Zukunft durch markante Nutzungsänderungen neue klimatisch-lufthygienische Belastungsräume entstehen - vermutlich auf einem insgesamt höheren thermischen Belastungsniveau. Klimatische Ausgleichsprozesse wie nächtliche Kaltluftströme erlangen dann eine noch größere Bedeutung.

Insofern wird auch die Bedeutung der Studie für die räumliche Planung in den kommenden Jahren eher noch zunehmen. Es wird verstärkt darauf ankommen, die Handlungsmöglichkeiten der räumlichen Planung sinnvoll auszuschöpfen, um eine klimatologisch verträgliche räumliche Steuerung der weiteren Siedlungsentwicklung zu erreichen

Es darf jedoch nicht erwartet werden, dass mit den jetzt vorliegenden Ergebnissen alle bestehenden oder künftigen klimatischen (und lufthygienischen) Einzelprobleme unmittelbar lösbar wären. In klimakritischen Bereichen werden gegebenenfalls zusätzlich vertiefende Untersuchungen in Form von Detailgutachten durchgeführt werden müssen.

9 Literatur

- ALBERTZ, J. (2007): Einführung in die Fernerkundung. 3. Auflage. – Darmstadt.
- BUNDESAMT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMATOLOGIE METEOSCHWEIZ (2017): Normwertkarten. - www.meteoschweiz.ch, Zugriff: 07.03.2017.
- INNENMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG (2004): Städtebauliche Klimafibel – Hinweise für die Bauleitplanung. Aktualisierte Online-Version (www.staedtebauliche-klimafibel.de) der gedruckten Fassung (herausgegeben vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg 1998. – Stuttgart).
- JACOBS, Heiko (1999): Abschlussbericht Satellitenbilddauswertung, erstellt im Rahmen des Interreg II - Projekts „Grundlagen für eine raumordnerische Grundkonzeption im deutsch-schweizerischen Grenzraum“, 1999.
- KASTEN, F. (1989): Strahlungsaustausch zwischen Oberflächen und Atmosphäre. In: VDI-Berichte Nr. 721. – Düsseldorf.
- KLIMAATLAS BADEN-WÜRTTEMBERG (2006): Hrsg.: LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz. – Mannheim.
- KLIMAATLAS REGION STUTTGART (2008): Hrsg.: VERBAND REGION STUTTGART.: = Schriftenreihe Verband Region Stuttgart, Nummer 26.
- KUNZ, S. (1983): Anwendungsorientierte Kartierung der Besonnung in regionalem Maßstab. = Geographica Bernensia, G19. – Bern.
- LUBW - LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ (Hrsg.) (2006): Klimaatlas Baden-Württemberg, CD-ROM. – Mannheim. Online-Version: www.lubw.baden-wuerttemberg.de
- PECKHAM, S. (1996): River Network Extraction from large DEMs. – <http://cires.colorado.edu/people/peckham.scott/appA.html>, Zugriff: 20.10.1996.
- REGIONALVERBAND SÜDLICHER OBERRHEIN (Hrsg.) (2006): Regionale Klimaanalyse Südlicher Oberrhein – Freiburg.
- REGIONALVERBAND SÜDLICHER OBERRHEIN (Hrsg.) (2006): Regionale Klimaanalyse Südlicher Oberrhein - Wissenschaftlicher Abschlussbericht auf Begleit-CD. – Freiburg.
- SCHWAB, A. (2000): Reliefanalytische Verfahren zur Abschätzung nächtlicher Kaltluftbewegungen. - Freiburger Geographische Hefte, H. 61. - Freiburg.
- SCHWAB, A. et al (20xx): Klimafibel.
- SCHWAB, A. et al (20xx): REKLIBO, WIB, Band 3.
- SIEVERS, U. (2005): Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21. Theoretische Grundlagen, Anwendung und Handhabung des PC-Modells. = Berichte des DWD, H. 227. – Offenbach.
- TÜV SÜD INDUSTRIE SERVICE GmbH (2011): Unabhängige Ermittlung des Windpotenzials für die Region Hochrhein-Bodensee. Regensburg (unveröff.).
- VERBAND REGION STUTTGART (2008): Klimaatlas Region Stuttgart. = Schriftenreihe Verband Region Stuttgart, Nummer 26.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (1997): Umweltmeteorologie; Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. = VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. – Düsseldorf.

