



Regionale Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben

REKLIBO

Wissenschaftlicher Abschlussbericht - Band 1



Regionale Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben

REKLIBO

Wissenschaftlicher Abschlussbericht - Band 1

Wissenschaftliche Bearbeitung:

Prof. Dr. Andreas Schwab und Denis Zachenbacher
Pädagogische Hochschule Weingarten,
Kirchplatz 2, 88250 Weingarten

Erstellt im Auftrag des Regionalverbandes
Bodensee-Oberschwaben und der Landkreise
Bodenseekreis, Ravensburg und Sigmaringen

04.12.2009

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Klima und Luft in der räumlichen Planung	2
2.1	Die Wirkung des Klimas auf den menschlichen Organismus - Bioklima	2
2.2	Berücksichtigung des Klimas in der räumlichen Planung	3
2.3	Zu den verschiedenen Klimaelementen	5
2.3.1	Lufttemperatur	5
2.3.2	Luftfeuchte	7
2.3.3	Niederschlag	7
2.3.4	Nebel	8
2.3.5	Wind.....	8
2.3.6	Strahlung	12
2.3.7	Luftzusammensetzung und Luftverunreinigungen	12
2.3.8	Zusammenhänge zwischen Klima und Luftbelastung	13
3	Der Untersuchungsraum	14
3.1	Allgemeine Beschreibung	14
3.1.1	Geologie und Relief	15
3.1.2	Landnutzung	19
3.1.3	Zusammenfassung	21
3.2	Klimatische Einordnung des Untersuchungsraums	22
3.2.1	Großklimatische Einordnung	22
3.2.2	Regionale Klimadifferenzierung	22
4	Regionale Klimaanalyse in der Region Bodensee-Oberschwaben (REKLIBO)	33
4.1	Fragestellungen	33
4.2	Konzeption	34
5	Literatur	35
6	Anhang: Karten zur klimatischen Einordnung des Untersuchungsraumes:	36

1 Einleitung

Die Studie „Regionale Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben (REKLIBO)“ wurde im Auftrag des Regionalverbandes Bodensee-Oberschwaben und der Landkreise Sigmaringen, Ravensburg und Bodenseekreis erstellt. Die wissenschaftliche Bearbeitung erfolgte durch Prof. Dr. Andreas Schwab und Denis Zachenbacher aus dem Fachbereich Geographie der Pädagogischen Hochschule Weingarten.

Die Erstellung der Studie erfolgte in enger Kooperation und regelmäßiger Absprache von Auftraggeber und Auftragnehmer. Die zur Anwendung gekommenen Methoden, die dargestellten Inhalte und die Form der Ergebnisaufbereitung wurden im Rahmen regelmäßiger Arbeitstreffen ausführlich diskutiert und gemeinsam festgelegt. Der vorliegende Bericht dokumentiert die verwendeten Daten und Methoden sowie die damit erzielten Ergebnisse. Er ist in drei Bände unterteilt.

Im hier vorliegenden Band 1 wird zunächst dargestellt, welche Rolle Klima und Lufthygiene in der räumlichen Planung spielen. Die anschließende Beschreibung des Untersuchungsraumes umfasst Aussagen zur naturräumlichen Gliederung, zu Geologie und Relief sowie zur Landnutzung. Sie wird abgeschlossen durch eine ausführliche klimatische Einordnung des Raumes. Hierzu wurde in erster Linie auf die Karten des Klimaatlas Baden-Württemberg (LUBW, 2006) zurückgegriffen. Aus dieser klimatischen Einordnung, insbesondere aus den Karten zur Wärmebelastung und zu den Durchlüftungsverhältnissen in der Region ergeben sich zahlreiche Fragestellungen, denen im Rahmen von REKLIBO nachgegangen wurde. Eine kurze Beschreibung der dabei zugrunde liegenden Konzeption schließt den ersten Band ab.

Im Mittelpunkt von Band 2 steht die Erstellung von Klimaanalysekarten für die Region Bodensee-Oberschwaben. Zunächst werden dazu die methodischen Ansätze ausführlich dargestellt. Im anschließenden Kartenteil werden Grundlagenkarten, Ergebniskarten und Analysekarten näher beschrieben und interpretiert. Zur Überprüfung der Modellergebnisse wurde ein umfangreiches Messprogramm durchgeführt. Band 3 stellt die dabei zur Anwendung gekommenen Messkonzepte vor und geht anschließend ausführlich auf die Messergebnisse ein.

Anwendungsbereich der regionalen Klimaanalyse

Die Ergebnisse der regionalen Klimaanalyse stellen eine wichtige Bewertungsgrundlage für den Landschaftsrahmen- und Regionalplan (Regionale Grünzüge und Grünzäsuren) sowie die kommunale Bauleitplanung (Landschaftsplan) 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.

2 Klima und Luft in der räumlichen Planung

2.1 Die Wirkung des Klimas auf den menschlichen Organismus - Bioklima

Das Bioklima beschreibt die Gesamtheit aller auf lebende Organismen, insbesondere auf den Menschen wirkenden Faktoren des Klimas. Um ein Gleichgewicht seiner Lebensfunktionen zu erhalten, muss sich der Mensch mit den atmosphärischen Umgebungsbedingungen dauernd auseinandersetzen. Sie beeinflussen seine Gesundheit, seine Leistungsfähigkeit und sein Wohlbefinden (LUBW, 2006).

Der gesunde Mensch besitzt eine außerordentliche Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche atmosphärische Bedingungen, wobei die Anpassungsleistungen über autonome Regulationen meist unbemerkt erbracht werden. Wie zahlreiche epidemiologische Studien belegen wird das Anpassungsvermögen von empfindlichen Personen - insbesondere bei entsprechender Prädisposition im Bereich des Herz-Kreislaufsystems und der Atemwege - schneller überfordert. So zeigt Abbildung 1 die Beziehung zwischen Mortalitätsdaten aus Baden-Württemberg und den thermischen Umgebungsbedingungen - dargestellt über die gefühlte Temperatur (Walther, 1999 in LUBW, 2006). Man erkennt, dass hohe gefühlte Temperaturen - also *Wärmebelastung* - starken Stress bedeuten. Kühle Bedingungen dagegen fordern den Organismus im Sinne eines Reizes, der die Regulationsmechanismen trainiert. Sind die *Kältereize* allerdings zu stark, führen auch kalte Bedingungen zu einer Belastung, die sich ungünstig auf den Organismus auswirken kann.

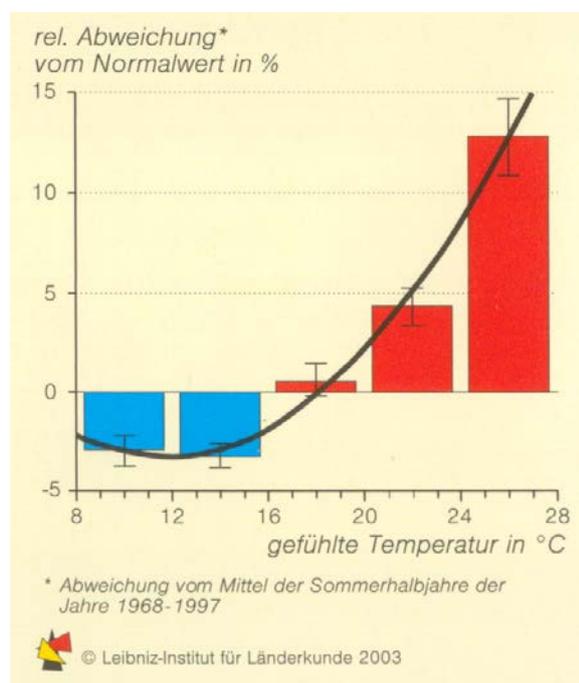


Abbildung 1: Relative Abweichung der Mortalitätsrate in Baden-Württemberg in Abhängigkeit der gefühlten Temperatur im Sommerhalbjahr (Nationalatlas, 2006)

Das Beispiel zeigt die Relevanz des Klimas als natürliche Lebensgrundlage. Das gilt insbesondere deshalb, weil auch unterhalb der Schwelle extremer Ereignisse von einer massiven Beeinflussung der Lebensqualität durch die gegebenen klimatischen Bedingungen ausgegangen werden muss.

Während Kältereize durch geeignete Bekleidung oder durch das Aufsuchen von geschützten Bereichen vermindert oder sogar vermieden werden können, sind bei Wärmebelastung die Anpassungsmöglichkeiten begrenzt. Daher ist es wichtig, insbesondere das Auftreten von

Wärmebelastung bei Planungsfragen in allen Maßstäben als kritische Randbedingung in die Betrachtungen einzubeziehen.

Die bioklimatischen Verhältnisse können innerhalb weniger Kilometer sehr große Unterschiede aufweisen. Sie werden zwar maßgeblich durch die jeweilige Höhenlage des Ortes festgelegt, die Art der Landnutzung sowie die Geländeform wirken jedoch stark modifizierend. Dies wird zum Beispiel bei der Erstellung von Bioklimakarten berücksichtigt.

2.2 Berücksichtigung des Klimas in der räumlichen Planung

Klima und Lufthygiene sind feste Bestandteile der meisten räumlichen Planungen (s. § 1 (6) (7a) Baugesetzbuch). Ihre Berücksichtigung hat das allgemeine Ziel, die zukünftige Entwicklung der Landnutzung und ihre konkrete Ausgestaltung so zu planen, dass negative Effekte auf das lokale Klima reduziert bzw. vermieden, positive Auswirkungen hingegen erhalten bzw. gefördert werden (REKLISO, Wiss. Abschlussbericht, S. 2).

Bei konkreten Planungsaufgaben stellen sich daher unter anderem folgende Fragen zur Standorteignung und zur Auswirkung bzw. Verträglichkeit eines Vorhabens aus klimatologischer und lufthygienischer Sicht (vgl. VDI-Richtlinie 3787, S. 2):

- Ist der Standort im Hinblick auf natürliche Klimaphänomene und lufthygienische Vorbelastung prinzipiell geeignet für die beabsichtigte Nutzung? Wie ist er im Vergleich zu möglichen alternativen Standorten zu beurteilen?
- Welche Auswirkungen hat eine emittierende Nutzung (Straße, Industrieanlage usw.) oder eine kleinklimatisch wirksame Bebauung, Bepflanzung oder eine sonstige Veränderung der Erdoberfläche auf benachbarte bzw. im Einwirkungsbereich liegende empfindliche Nutzungen im Hinblick auf Temperaturveränderungen, Nebelbildung, Luftaustauschprozesse und Immissionsbelastungen, und ergeben sich daraus regelungsbedürftige Konflikte?
- Welche Gestaltungsanforderungen (Bauhöhe, Baukörperstellung, Freiflächenanteil, Oberflächengestaltung, Bepflanzung, Beheizungssystem usw.) und Nutzungsbeschränkungen lassen sich aus den klimatisch-lufthygienischen Vorbedingungen und den Auswirkungen der geplanten Flächennutzung ableiten, um bioklimatische und lufthygienische Verschlechterungen der vorhandenen Situation zu vermeiden und nach Möglichkeit zur Verbesserung der klimatisch-lufthygienischen Situation für den geplanten Bereich und die umgebenden Nutzungen beizutragen?
- Welche Möglichkeiten hat die räumliche Planung, um erkannte bioklimatische Mängel und lufthygienische Belastungen in ihrem Bereich zu vermindern?

Aufgabe einer Klimaanalyse ist es daher, die derzeit wirksamen Zusammenhänge zwischen Klima, Luftqualität und dem Lebensraum der Bevölkerung aufzuzeigen („Istzustand“) und räumlich differenziert Planungsempfehlungen auszusprechen, welche die Beurteilung voraussichtlicher Nutzungsänderungen aus klimatologischer Sicht ermöglichen (Vorsorgeprinzip) (REKLISO, Wiss. Abschlussbericht, S. 2).

So kann ein Beitrag dazu geliefert werden, dass die räumliche Planung Klimaphänomene, welche positiv auf den menschlichen Organismus wirken, erhalten und eine Verschlechterung der klimatischen und lufthygienischen Verhältnisse verhindern kann.

Dies ist besonders wichtig angesichts der zu erwartenden großräumigen Klimaveränderungen, die, den aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen zu Folge, zu einer deutlichen Erwärmung und damit auch zu einer erhöhten Wärmebelastung für den menschlichen Organismus führen werden.

Um ein grundlegendes Verständnis für die relevanten klimatischen und lufthygienischen Wirkungszusammenhänge zu schaffen, werden im Folgenden einige wichtige Klimaelemente und abgeleitete Kenngrößen vorgestellt. Dabei soll verdeutlicht werden, wie diese Klimaelemente von den Klimafaktoren (Breitenlage, Lage zum Meer, Relief, Höhenlage, Landnutzung) abhängen, wie sie auf entsprechende Veränderungen reagieren und wie dies letztlich zu veränderten bioklimatischen Situationen führen kann.

2.3 Zu den verschiedenen Klimaelementen

2.3.1 Lufttemperatur

Das Klimaelement Lufttemperatur bezieht sich in der Regel auf eine Messhöhe von 2 m über Grund. Bei professionellen Messungen werden Beeinflussungen durch die direkte Sonnenbestrahlung ausgeschlossen (weiße Messhütten, belüftete Thermometer).

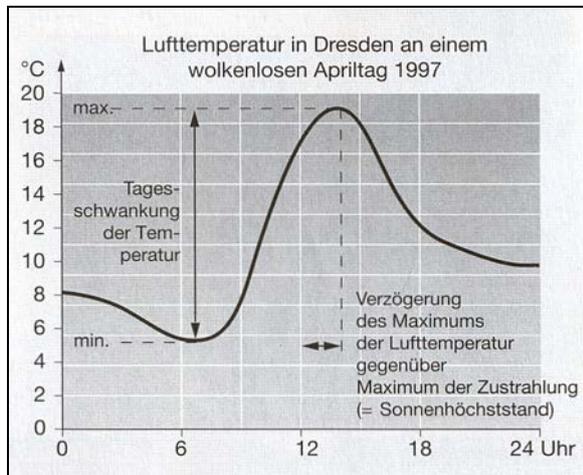


Abbildung 2: Typischer Tagesgang der Lufttemperatur an einem wolkenlosen Apriltag in Dresden 1997. (aus: BAUER et al, S. 82)

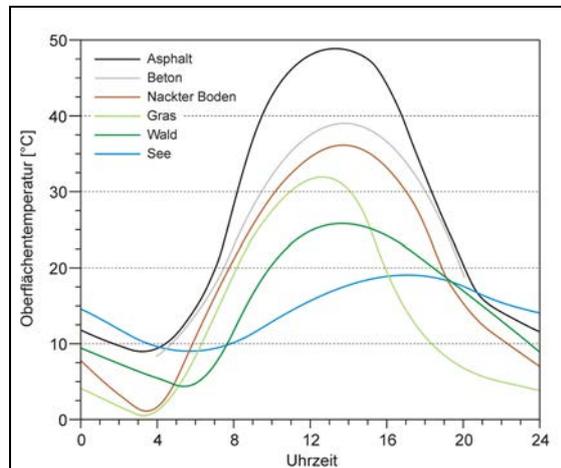


Abbildung 3: Typischer Tagesgang der Oberflächentemperaturen verschiedener Oberflächen (verändert nach Häckel, 1999, S.226).

Ein typischer Tagesgang der Lufttemperatur an einem wolkenlosen Tag (vgl. Abbildung 2) zeigt die starke Erwärmung nach Sonnenaufgang mit einem Temperaturmaximum, das zeitlich verzögert gegenüber dem Sonnenhöchststand erst in den Nachmittagsstunden auftritt. Vor Sonnenuntergang nimmt die Temperatur stark ab. Die Abkühlung setzt sich verlangsamt aber kontinuierlich über die ganze Nacht hinweg fort.

Bedingt durch die Tatsache, dass sich die Luft an der Erdoberfläche erwärmt bzw. abkühlt, besteht eine direkte Abhängigkeit der Lufttemperatur von Relief und Landnutzung.

So ist hinlänglich bekannt, dass sich etwa ein nach Süden ausgerichteter Hang tagsüber viel schneller und stärker erwärmt als ein nordexponierter Hang (steilerer Einfall der Sonnenstrahlen). Ferner dürfte jeder bereits die Erfahrung gemacht haben, wie stark sich geteerte Oberflächen (oder auch Sandstrände) an Sommertagen aufheizen können. Dies geht auch aus Abbildung 3 hervor, die den Tagesgang verschiedener Oberflächentemperaturen wiedergibt. Asphalt- und Betonflächen sind sowohl tagsüber als auch nachts am wärmsten; Gras und nackter Boden dagegen sind nachts am kältesten, was sich auch in der nächtlichen Taubildung äußert. Wälder weisen geringere Temperaturschwankungen auf; besonders ausgeglichen ist der Tagesgang der Temperatur von Wasseroberflächen (Wasser als Wärmespeicher).

Entsprechend werden sich auch die bodennahen Luftschichten über solchen Oberflächen unterschiedlich stark erwärmen. Bedingt durch vertikale und horizontale Luftbewegungen (Wind) werden diese Temperaturunterschiede jedoch nicht so stark ausfallen.

Frostgefahr und Wärmebelastung

Für die klimatologische Einordnung eines Standortes sind die Jahresdurchschnittstemperatur und der Jahresgang (kältester und wärmster Monat, Temperaturverlauf) von besonderer Be-

deutung. Daneben findet man häufig auch Angaben zur Anzahl von Tagen, an denen ein bestimmter Schwellenwert über- oder unterschritten wird.

So ist etwa die Anzahl von Frosttagen (Tagesminimum $< 0,0 \text{ }^\circ\text{C}$) bei agrarmeteorologischen Fragestellungen von besonderer Bedeutung. Im Hinblick auf die Wärmebelastung des Menschen ist die Anzahl der Sommertage (Tagesmaximum $> 25,0 \text{ }^\circ\text{C}$) oder Hitzetage (Tagesmaximum $> 30,0 \text{ }^\circ\text{C}$) von großem Interesse.

Wärmebelastung in Städten

Besonders groß kann diese Wärmebelastung in Städten werden. Hier wirkt der sogenannte *städtische Wärmeinseleffekt*. Durchschnittlich sind Städte im Jahresmittel um 1 bis 2 Grad wärmer als die sie umgebende Landschaft. Besonders große Temperaturunterschiede treten jedoch in Strahlungsnächten bei den täglichen Temperaturminima auf. Sie sind zudem stark abhängig von der Größe der Stadt, der Bebauungsdichte und dem jeweiligen Versiegelungsgrad (vgl. Städtebauliche Klimafibel, Online-Version, 2009).

Für Millionenstädte kann der maximale Temperaturunterschied über 10 Grad betragen. Aber auch bei kleineren Städten ist durchaus ein merkbarer Wärmeinseleffekt feststellbar (vgl. Abbildung 4).

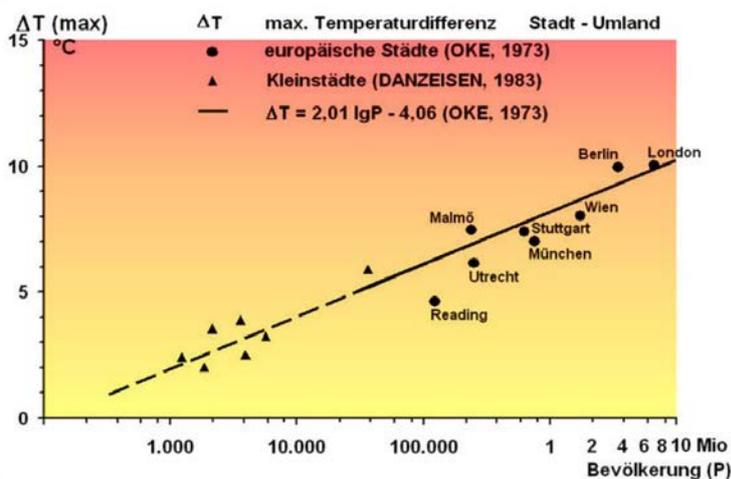


Abbildung 4: Maximale Temperaturunterschiede für europäische Städte unterschiedlicher Größe (aus: Städtebauliche Klimafibel, Online-Version, 2009).

Die Ursachen für den städtischen Wärmeinseleffekt sind vielfältig. Durch die Oberflächenversiegelung und den damit verbundenen geringeren Grünflächenanteil ist die Verdunstung reduziert. Große Anteile der einfallenden Sonnenenergie führen also direkt zur Erwärmung der städtischen Baumassen. In diesen Baumassen wird demnach Energie gespeichert, die in der Nacht nur langsam wieder abgegeben wird. Sie sind deshalb auch am Morgen noch relativ warm. Durch den vergleichsweise hohen Anteil von Schadgasen, die langwellige Wärmestrahlung absorbieren können (z. B. Kohlendioxid), ist die effektive Abstrahlung städtischer Oberflächen reduziert (lokaler Treibhauseffekt). Ein nicht zu vernachlässigender Faktor in Städten ist schließlich die anthropogene Wärmezeugung. Sie führt speziell im Winter ebenfalls zu einer zusätzlichen Erwärmung.

Bedeutung von Temperaturinversionen für die Lufthygiene

Eine besondere Bedeutung kommt der Lufttemperatur zu, wenn man ihre Veränderung mit der Höhe betrachtet. Im Normalfall nimmt die Temperatur mit der Höhe ab (durchschnittlich um $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$ pro 100 m). Es gibt jedoch auch Wetterlagen, in denen der umgekehrte Fall eintritt: Wärmere Luft liegt dann über kälterer Luft. Man spricht in solchen Situationen von Inversi-

onswetterlagen („Temperaturumkehr“). Solche Wetterlagen sind von besonderer lufthygienischer Bedeutung, da hier, bedingt durch die Schichtungsverhältnisse, ein vertikaler Luftaustausch unterbunden wird. Vor allem bei länger anhaltenden Inversionswetterlagen kommt es dadurch in Ballungsgebieten zur Anreicherung von Luftschadstoffen und damit zu einer erhöhten lufthygienischen Belastung.

Kleinräumig betrachtet treten Temperaturinversionen relativ häufig in sogenannten Kaltluftstaugebieten auf (s.u.), in denen sich Kaltluft bodennah sammelt, stagniert und von der Erdoberfläche her extrem abkühlt. Bei einer Ansiedlung von Emittenten muss in solchen Bereichen während Strahlungswetterlagen lokal mit der Gefahr einer erhöhten Schadstoffbelastung gerechnet werden.

2.3.2 Luftfeuchte

Für die Feuchte der Luft sind in der Klimatologie verschiedene Messgrößen bekannt. Die *absolute Feuchte* gibt an, wie viel Gramm Wasserdampf sich in einem Kubikmeter Luft befinden. Die Menge an Wasserdampf, die Luft maximal aufnehmen kann, hängt jedoch stark von der Lufttemperatur ab (Sättigungskurve).

Das Verhältnis von tatsächlich in der Luft vorhandenem Wasserdampf zum sogenannten Sättigungswert wird als *relative Feuchte* bezeichnet. Sie wird in Prozent angegeben und steht in engem Verhältnis zu möglichen Verdunstungsprozessen. In einer Luft mit hoher relativer Feuchte ist die Verdunstung erschwert, da kaum noch Wasserdampf von der Luft aufgenommen werden kann. Vor allem in Verbindung mit hohen Lufttemperaturen wird dadurch der Wärmehaushalt des Menschen erheblich gestört (*Schwüleempfinden*), da die Temperaturregulation über die Ausscheidung von Schweiß nicht mehr problemlos funktioniert.

Die auftretenden Luftfeuchtigkeiten hängen stark vom Charakter der großräumig herangeführten Luftmassen ab. So entstehen Wetterlagen mit extremer Schwüle etwa dann, wenn wir in den Einflussbereich feuchtwarmer Luftmassen aus subtropischen Bereichen kommen.

In regionalen und lokalen Maßstäben wirken vor allem große Wasserflächen und Feuchtgebiete, indem sie zu einer Erhöhung der Feuchtigkeitswerte beitragen.

2.3.3 Niederschlag

Niederschlagsmengen werden häufig als Niederschlagshöhen in mm angegeben. Dabei entspricht 1 mm Niederschlagshöhe der Wassermenge von 1 Liter pro Quadratmeter.

Wie bei den Lufttemperaturen interessieren Jahreswerte (hier Jahressummen), aber auch der Jahresgang mit feuchteren und trockeneren Abschnitten. Von besonderer Wichtigkeit sind auch die auftretenden Schwankungen (Variabilität des Niederschlags) und bislang aufgetretene Extremniederschlagsmengen.

Berücksichtigung finden mittlere Niederschlagshöhen und Extremregenmengen zum Beispiel bei der Dimensionierung von Kanalnetzen oder Regenrückhaltebecken. Besondere Wichtigkeit kommt ihnen natürlich im Hinblick auf die landwirtschaftliche Nutzung zu.

Die Höhe der auftretenden Niederschläge hängt entscheidend von der Lage innerhalb der allgemeinen planetarischen Zirkulation und den damit verbundenen typischen Wetterlagen ab. Modifizierend wirken die Lage und Entfernung zur Küste sowie großräumige aber auch kleinräumige Reliefverhältnisse. In der Regel werden Niederschlagsmengen mit zunehmender Entfernung zur Küste abnehmen (hygrische Kontinentalität). Überlagert wird dieses Muster durch reliefbedingte Luv-Lee-Effekte, die über das Phänomen des Steigungsregens eine Zunahme der Niederschläge mit der Höhe bedingen.

Im Hinblick auf die Klimaveränderungen ist insbesondere auf die prognostizierte Zunahme von Extremereignissen (Häufigkeit, Stärke) hinzuweisen.

2.3.4 *Nebel*

Nach einer einfachen Definition versteht man unter Nebel die Sonderform einer Wolke, die dem Erdboden aufliegt. Neben der reduzierten Sichtweite (Verkehrsbehinderungen) ist mit Nebelwetterlagen in der Regel auch die Gefahr von Schadstoffanreicherungen in Ballungsgebieten verbunden, da sie meist mit *Inversionen* und niedrigen Windgeschwindigkeiten einher gehen, wodurch vertikale und horizontale Luftaustauschprozesse fast zum Erliegen kommen (s.o.).

Im Hinblick auf die lufthygienischen Verhältnisse sind *Bodennebelfelder* und *Hochnebeldecken* von Interesse. Erstere entstehen durch nächtliche Ausstrahlungsvorgänge im Bereich einer Bodeninversion (Strahlungsnebel). Letztere bilden sich bei winterlichen Hochdruckwetterlagen, wenn Polarluft am Boden durch Warmluft überlagert wird. Sie sind durch eine sehr stabile und lang anhaltende Höheninversion und deshalb lufthygienisch besonders bedenklich (Nationalatlas, S. 50).

Eine besondere Neigung zu Nebelbildung besteht in Tiefländern sowie Becken- und Tallagen. Hier kommt es häufig zur Ansammlung von Kaltluft aus unterschiedlichen Einzugsgebieten, die bei entsprechenden Reliefsituationen nicht in ausreichendem Maße abfließen kann (s.u.). Wird bei der nächtlichen Abkühlung der Taupunkt unterschritten, entsteht Nebel. Wenn Wasserflächen oder Feuchtgebiete über Verdunstungsprozesse am Tage zusätzlich für relativ hohe absolute Feuchtwerte in der Luft sorgen, ist die Wahrscheinlichkeit der Nebelbildung besonders hoch. Begünstigt sind hingegen Höhenlagen, da sie häufig oberhalb der Inversionsschichten liegen und somit aus ausgedehnten Nebelmeeren herausragen.

2.3.5 *Wind*

Wind ist eine Ausgleichsbewegung der Luft. Er entsteht auf Grund von Luftdruckunterschieden als horizontale Luftbewegung vom hohen zum tiefen Druck. Bei der Betrachtung des Windes muss unterschieden werden zwischen dem Wind der freien Atmosphäre und dem Wind in Bodennähe. Die Luftbewegung in der freien Atmosphäre wird nur beeinflusst von der Druckgradientkraft und der ablenkenden Kraft der Erdrotation (Coriolisbeschleunigung). In Bodennähe wird der Wind zusätzlich noch von der Reibungskraft beeinflusst. Diese Kraft muss man sich als Strömungswiderstand durch die Rauigkeit der Erdoberfläche vorstellen. Sie führt zu einer Ablenkung und Abbremsung des Windes (LUBW, 2006).

Einen großen Einfluss auf den bodennahen Wind hat deshalb 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 häufig zu erheblichen Windgeschwindigkeitszunahmen, während der Wind im Leebereich eines Berges durch Wirbelbildung stark abgebremst werden kann. Taleinschnitte können zu einer Abschwächung des Windes, aber auch zu einer Verstärkung und Ablenkung des Windes durch die Kanalisierung der Strömung entlang des Talverlaufs führen (Nationalatlas, S. 52).

In den amtlichen Messnetzen wird zur Bestimmung der Windverhältnisse in der Regel eine Messhöhe von 10 m über Grund über ebenem, ungestörten Gelände angestrebt, damit extrem bodennahe Effekte, die häufig sehr lokale Ursachen haben, ausgeschlossen werden können. So ergibt sich eine erhöhte Repräsentanz für eine größere Umgebung. In Fällen, wo dies nicht zu erreichen ist (Standortfrage, Kostenfrage), liegen Messhöhen jedoch auch niedriger. Die Messergebnisse sind entsprechend zu interpretieren.

Die Windgeschwindigkeit wird in unterschiedlichen Einheiten angegeben (m/s, km/h, Knoten, 12-teilige Beaufort-Skala).

Bedingt durch die über Land höheren Reibungseffekte nehmen Windgeschwindigkeiten mit zunehmendem Abstand zur Küste ab.

Auch die konkrete Ausprägung der Landnutzung hat großen Einfluss auf die Reibungswirkung. 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 allgemeinen reduziert. Auch Windstillen treten vermehrt auf.

Insgesamt kommt es in Siedlungsgebieten also zu einer verminderten Durchlüftung. Insbesondere bei großräumig windschwachen Wetterlagen sind deshalb tagesperiodische lokale Windsysteme (Hangwindsysteme, Berg-Tal-Windsysteme, Flurwindsysteme, Land-See-windsysteme) für die Lebensbedingungen der Menschen in Siedlungen von großer Bedeutung. Sie sollen deshalb im Folgenden beschrieben werden.

2.3.5.1 Hangwindsysteme und Berg-Tal-Windsysteme

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 (vgl. 2.3.1).

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*). Hat sich Kaltluft in einem Tal angesammelt, kann auch eine talabwärts gerichtete Luftströmung entstehen, die ins Vorland hinaus weht. Solch ein Wind wird *Bergwind* genannt (vgl. Abbildung 6).



Abbildung 5: Rauchversuche zur Visualisierung von Hangauf- und Hangabwinden am 11.10.06 nordwestlich von Baint-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. (eigene Aufnahmen)

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 ansteigenden Gefälleverhältnissen. Je größer allerdings ein Talsystem ist, desto mehr

Zeit wird benötigt, bis der Kaltluftfluss die Talmündung in messbarer Stärke erreicht. Treten im Tal Schwellen oder Engstellen auf, so kann der Kaltluftstrom periodisch unterbrochen sein, es kommt zu Kaltluftpulsationen (Bendix, 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.

Auch 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 Gebäudkörpern.

Wenn geschlossene Siedlungsränder quer zur Windrichtung verlaufen, kann es in Verbindung mit spezifischen Reliefsituationen auch zur Ausbildung von *Kaltluftstaugebieten* kommen. Solche Kaltluftansammlungen, die vor allem in nur 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.).

Besonders bekannt und gut erforscht sind die Bergwindssysteme am Westrand des Schwarzwaldes. Sie erreichen hier, bedingt durch das starke Relief und große Kaltluftzugsgebiete, beachtliche Stärken und Häufigkeiten und tragen entscheidend zur Belüftung der an den Talausgängen liegenden Siedlungen bei (Beispiel Höllentäler, Freiburg).

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. Abbildung 6 B/C/D).

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

2.3.5.2 Flurwindssysteme (=Stadt-Umland-Windssysteme)

Der Flurwind ist ein in Städten ausgeprägtes Lokalwindssystem, 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, 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 die Ausprägung einer Wärmeinsel die Stadtgröße ausschlaggebend ist (s.o.), steigt auch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Flurwinden mit zunehmender Stadtgröße.

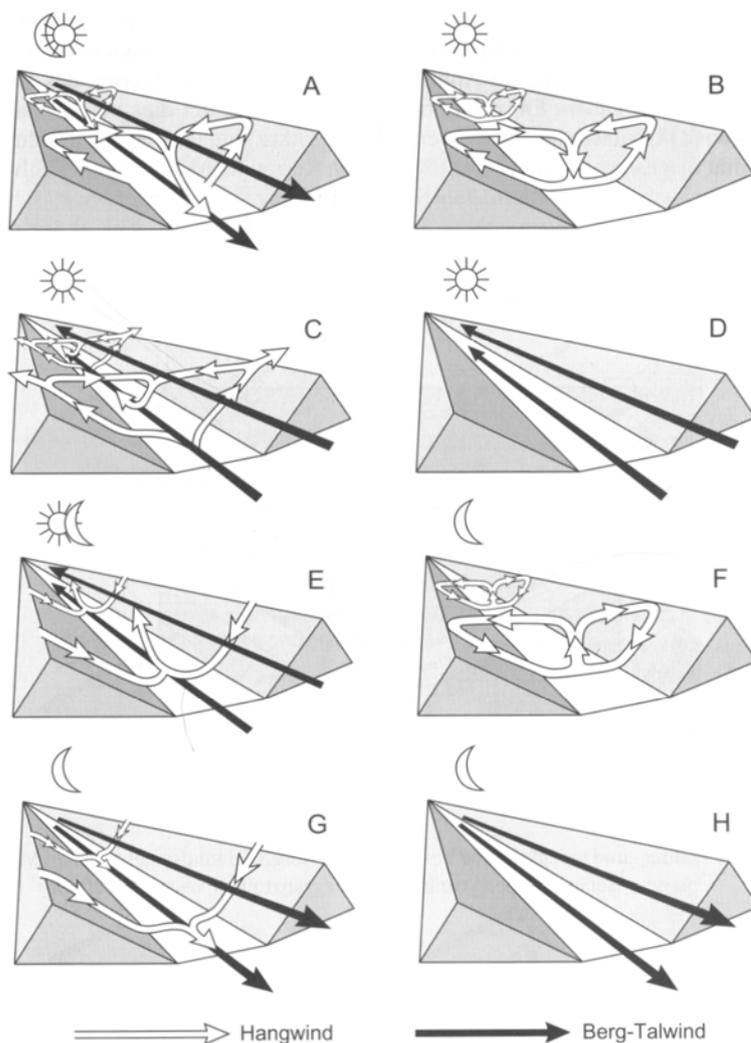


Abbildung 6: Das idealisierte Berg-Talwindsystem bei symmetrischer Hangerwärmung und Hangabkühlung (nach Defant 1949, in Bendix 2004, S. 167).

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 hinsichtlich der Durchlüftungssituation in Städten durchaus nützlich, weil sie im Stadtgebiet als Frischluftzubringer dienen und eventuell belastete Luft erneuern

2.3.5.3 Land-See-Windsysteme

Im Hinblick auf die Entstehung sind die Land-See-Winde 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 hier das Verhalten der Wasserflächen. Sie wirken im Laufe eines Tages 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 hier tagsüber zur Ausdehnung der Luft über Land, was letztlich auf landige Winde (Seewind) zur Folge hat. Abends und nachts herrscht eine umgekehrte Situation mit ablandigen Winden (Landwind) (vgl. Abbildung 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.

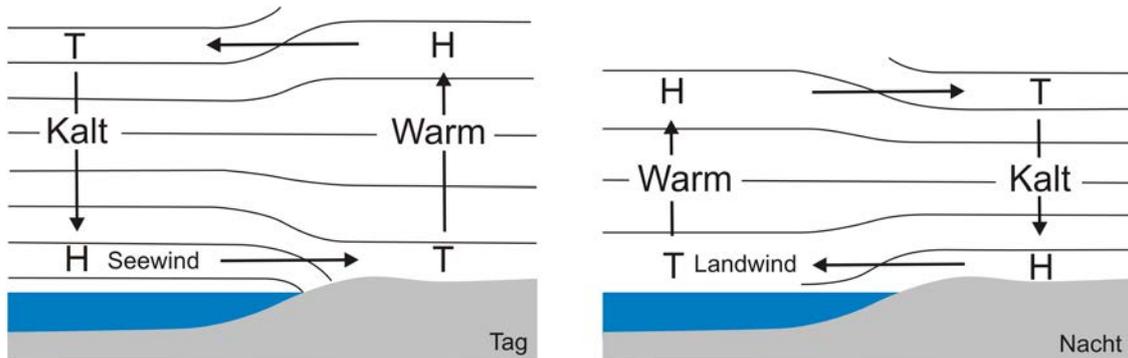


Abbildung 7: Seewind am Tag und Landwind in der Nacht als Ergebnis der unterschiedlichen Erwärmung von Land- und Wasseroberflächen und der daraus resultierenden Druckfelder. Die Linien stellen isobare Flächen dar. (Entwurf: Schwab, verändert nach Gossmann, S. 139)

Für den Bodensee sind Land-Seewinde mehrfach belegt (vgl. Weller 2001). Über die Reichweite gibt es jedoch recht unterschiedliche Aussagen. Während einige Autoren nur die direkten Uferregionen als Wirkungsbereiche sehen, verweisen andere auf Extremsituationen, in denen Seewinde bis südlich von Ravensburg, also fast 20 km ins Hinterland nachweisbar sein sollen.

Fallen die Uferbereiche stark zum See hin ab, so weisen die entsprechenden Hang- und Talwindsysteme eine Tagesperiodik auf, die mit jener des Land-See-Windsystems vergleichbar ist. Es ist daher oft schwierig, mit Hilfe bodennaher Messungen die beiden Systeme voneinander zu trennen. Sie verstärken sich vielmehr gegenseitig.

Auch Land-Seewinde können zur Verbesserung der Durchlüftungssituation beitragen.

2.3.6 Strahlung

Wenn von einfallender Sonnenstrahlung und ihrer räumlichen Differenzierung die Rede ist, dann wird darunter meist die sogenannte Globalstrahlung verstanden. Sie ist die Summe aus der direkten Sonnenstrahlung und dem diffusen Anteil des Sonnenlichts (an Wolken und Atmosphärenteilchen gestreut). Gemessen wird dabei die Menge an kurzwelliger (solarer) Strahlungsenergie, die auf eine horizontale Fläche trifft. Die Werte werden in der Regel in W/m^2 angegeben.

Bedeutung erlangen diese Werte im Hinblick auf eine sinnvolle Gebäude-Standortwahl und Bebauungsgeometrie. So können Besonnungseffekte zum Beispiel direkt oder über Photovoltaikanlagen oder zur Warmwassererzeugung optimiert genutzt werden.

2.3.7 Luftzusammensetzung und Luftverunreinigungen

Unter Luft versteht man das die Erde umgebende Gasgemisch. Die wichtigsten Gase der Luft sind der Stickstoff (ca. 78 Vol. %) und der Sauerstoff (ca. 21 Vol. %). In wesentlich ge-

ringeren Anteilen sind Edelgase und Spurengase enthalten, unter anderem auch Kohlendioxid (CO₂).

Durch menschliche Aktivitäten wurde in den letzten Jahrzehnten die Luft mit großen Stoffmengen angereichert, die häufig als Schadstoffe anzusehen sind. Mit den sogenannten Treibhausgasen werden globale Klimaveränderungen in Verbindung gebracht.

Lokal kommt es vor allem in Ballungsgebieten und hier insbesondere bei austauscharmen Wetterlagen zu extremen Belastungssituationen, da Siedlungsflächen ein vergleichsweise hohes *Emissionsniveau* von Luftschadstoffen aufweisen. Neben Hausbrand, Gewerbe und Industrie ist dabei der Beitrag der Quellengruppe Verkehr besonders bedeutsam (REKLISO, S. 33). Es gilt jedoch zu bedenken, dass auch ländlich geprägte Räume über den Umweg des *Schadstofftransports* erhöhte Schadstoffkonzentrationen aufweisen können.

2.3.8 Zusammenhänge zwischen Klima und Luftbelastung

Zwischen einzelnen Klimaelementen und der Luftverschmutzung bestehen teilweise erhebliche Abhängigkeiten. Sie werden hier vereinfacht wiedergegeben (vgl. Klimaatlas Stuttgart, S. 24):

Tabelle 1: Zusammenhänge zwischen Klima und Luftbelastung (vgl. Klimaatlas Stuttgart, S. 24)

<i>Direkte Beeinflussung der Emission</i>	
<i>Temperatur</i>	<i>Heiztätigkeit, Klimatisierung</i>
<i>Wind</i>	<i>Staubaufwirbelung</i>
<i>Niederschlag</i>	<i>Bindet Staub am Boden</i>
<i>Schnee, Glatteis</i>	<i>Autos fahren langsamer, weniger Verkehr</i>
<i>Schönes Wetter</i>	<i>Ausflugsverkehr</i>
<i>Strahlung</i>	<i>Heiztätigkeit, Klimatisierung</i>
<i>Beeinflussung des Abtransports und der Verdünnung</i>	
<i>Wind</i>	<i>Bestimmt Richtung, Transport, Geschwindigkeit und Verdünnung</i>
<i>Inversion</i>	<i>Verhindert vertikalen Luftaustausch</i>
<i>Strahlung</i>	<i>Abbau von Inversionen Verstärkung des vertikalen und horizontalen Luftaustauschs</i>
<i>Bildung und Aufbau von Luftverunreinigungen</i>	
<i>Strahlung</i>	<i>Bildung und Umwandlung von Luftschadstoffen (z.B. Ozon)</i>
<i>Regen</i>	<i>Auswaschung von Staub und Schadgasen</i>
<i>Schnee</i>	<i>Chemische Reaktion an der Oberfläche</i>
<i>Nebel, Reif</i>	<i>Abscheiden über Nebelphase</i>

In Kapitel 3 wird gezeigt, in welcher räumlichen Differenzierung diese Klimaelemente im Untersuchungsraum auftreten.

3 Der Untersuchungsraum

3.1 Allgemeine Beschreibung

Der eigentliche Untersuchungsraum umfasst das Gebiet der Region Bodensee-Oberschwaben. Als eine der 12 Regionen von Baden-Württemberg liegt sie im äußersten Südosten des Landes an der Grenze zu Bayern sowie – über den Bodensee hinweg – zur Schweiz und zu Österreich. Sie besteht aus den Landkreisen Sigmaringen und Ravensburg sowie dem Bodenseekreis mit der Kreisstadt Friedrichshafen. Innerhalb Baden-Württembergs grenzen die Regionen Hochrhein-Bodensee, Donau-Iller, Neckar-Alb und Schwarzwald-Baar-Heuberg an. Nach der naturräumlichen Gliederung Deutschlands von Meynen et al. (1953-1962) hat der Raum, der eine Fläche von insgesamt 3.500 km² umfasst, Anteil am oberschwäbischen Alpenvorland, den Iller-Lech-Platten und an der Schwäbischen Alb. Als kleinere Einheiten können zusätzlich das markante Durchbruchstal der Donau durch die Schwäbische Alb zwischen Tuttlingen und Sigmaringen, das nördlich des Obersees gelegene „Höchsten-Bergland“ sowie das südliche und mittlere Schussenbecken genannt werden. Letzteres erstreckt sich als Zweigbecken des Bodenseebeckens von Friedrichshafen nach Norden bis zum Altdorfer Wald.

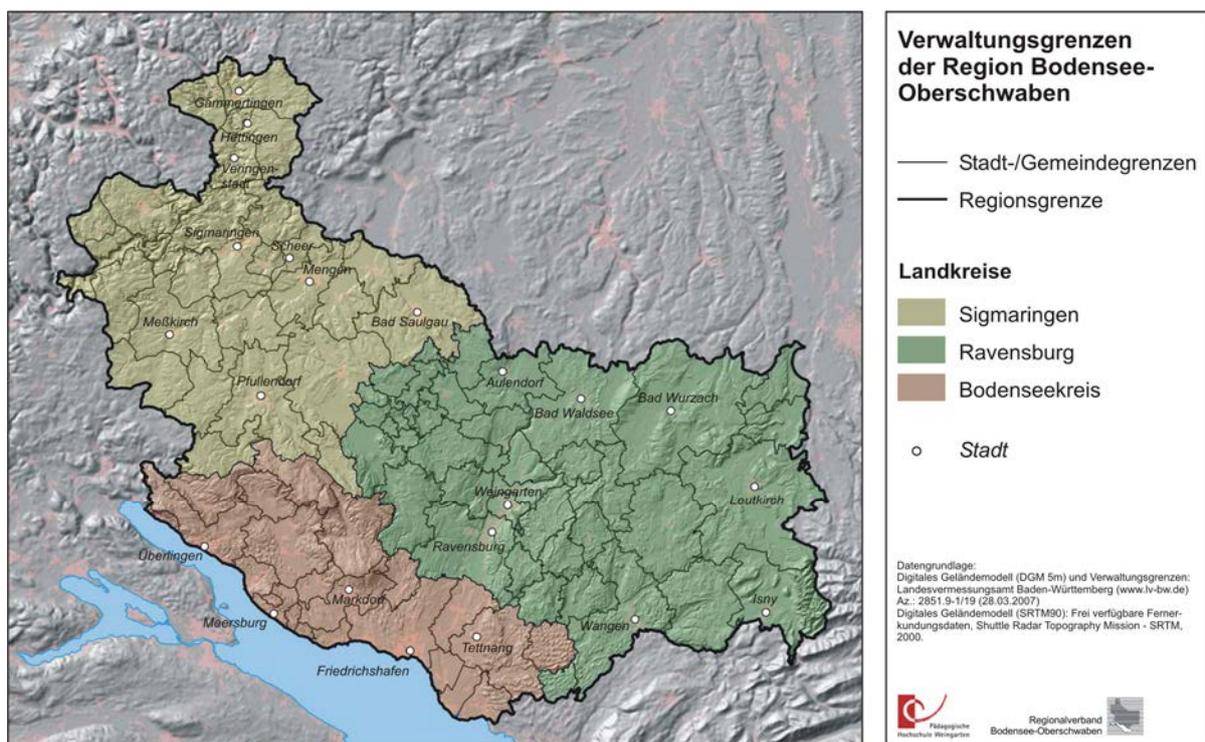


Abbildung 8: Verwaltungsgrenzen der Region Bodensee-Oberschwaben (Entwurf: Schwab).

Relief und Bodenbedeckung sind für die Ausprägung eines Lokalklimas entscheidend verantwortlich (vgl. Kap. 2). Deshalb sollen im Folgenden die im Untersuchungsgebiet auftretenden räumlichen Muster beschrieben werden.

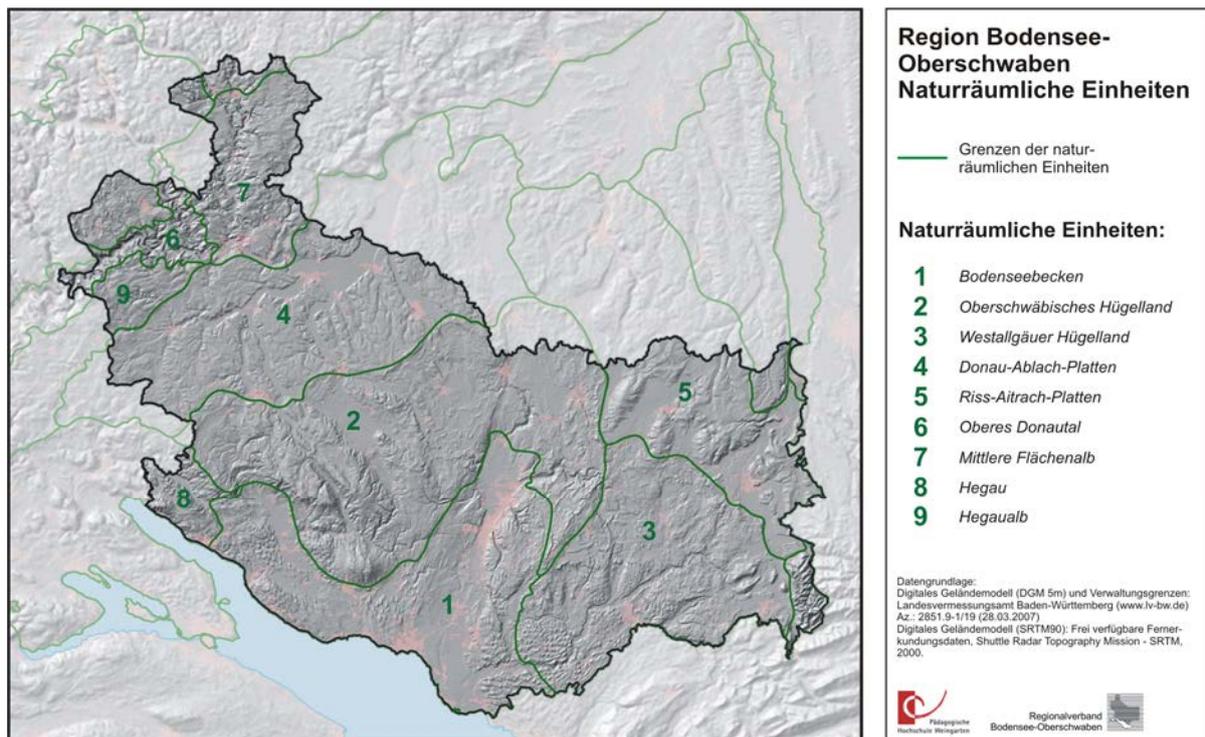


Abbildung 9: Naturräumliche Einheiten im Untersuchungsraum (Entwurf: Schwab).

3.1.1 Geologie und Relief

Bewegt man sich von Norden nach Süden durch das Untersuchungsgebiet und betrachtet dabei den geologischen Untergrund, so folgen auf die Jura-Kalke der Schwäbischen Alb nach Überquerung des Donautals flächenhafte Moränen und Schotterablagerungen der vergangenen Kaltzeiten des Quartärs.

Sie bedecken hier mit unterschiedlichen Mächtigkeiten fast überall die im Tertiär entstandenen Molassegesteine, die im Wesentlichen aus dem Abtragungsschutt der Alpen und der Schwäbischen Alb bestehen. Nur an wenigen Stellen kommen diese Molassegesteine an der Oberfläche zum Vorschein. Dies ist im Bereich einzelner Erhebungen der Fall, wie zum Beispiel im Höchsten-Bergland oder auf dem Sipplinger Berg oder dort, wo Flüsse die quartären Ablagerungen durchschnitten und tiefe Täler geschaffen haben. Eine Sonderrolle spielt der südöstlichste Teil des Untersuchungsraumes. Hier tritt die sogenannte Adelegg mit Höhen über 1000 m als markanter Höhenzug in Erscheinung. Es handelt sich dabei um tertiäre Konglomerate, die als Ablagerungen der Ur-Iller in das Molassebecken entstanden sind und später in den Prozess der Alpenfaltung und Alpenhebung einbezogen wurden.

Die glazial geprägten Anteile der Region sind im Hinblick auf Alter und Relief ebenfalls differenziert zu betrachten. Aufgrund der unterschiedlich weiten Vorstöße des Rheingletschers während der verschiedenen Kaltzeiten, unterscheiden sich die heutigen Landschaftsformen markant. Nur die südlichen Teile des Untersuchungsraumes wurden auch in der jüngsten Kaltzeit (Würmkaltzeit) vom Rheingletscher überfahren und weisen deshalb noch sehr junge, kuppige Formen auf (Jungmoränenlandschaft) (vgl. Abbildung 10). Die nördlichen Teile sind bereits seit dem Abschmelzen des eiszeitlichen Eises den erosiven Kräften ausgesetzt. In der sogenannten Altmoränenlandschaft dominieren deshalb flachwellige Formen (vgl. Abbildung 11).



Abbildung 10: Beispiel einer kuppigen Jungmoränenlandschaft (Aufnahme: Schwab, 2007)



Abbildung 11: Beispiel einer flachwelligen Altmoränenlandschaft westlich von Bad Buchau (Aufnahme: Schwab, 2007).

Die vom würmzeitlichen Gletscher während seines maximalen Vorstoßes abgelagerte Endmoräne (Äußere Jungendmoräne) markiert die Grenze zwischen Jung- und Altmoränenlandschaft. Sie verläuft als bewaldeter Höhenzug von Pfullendorf, Ostrach (Wagenhart), Aulendorf (Atzenberger Höhe), Bad Schussenried, Bad Waldsee, Wolfegg, Bad Wurzach, Leutkirch bis nach Isny. Das allgemeine Geländeniveau wird dabei um 10 – 25 m, gelegentlich aber auch um 50 – 100 m überragt (vgl. Abbildung 12).

Neben solchen markanten *Endmoränen* weisen glazial geprägte Landschaften aber noch weitere typische Elemente auf. So haben die verschiedenen Teilzungen des Rheingletschers an einigen Stellen weite Becken ausgeräumt (*Zungenbecken*). Sowohl im Altmoränenland (z.B. Federseebecken, Wurzacher Becken) als auch im Jungmoränenland (z.B. Schussenbecken, Wilhelmsdorfer Becken, Salemer Becken) sind solche weitgespannten Hohlformen in unterschiedlicher Größe zu finden (vgl. Abbildung 13). Auch der Bodensee geht letztlich auf diese Schürfwirkung des Gletschers zurück. Besonders deutlich wird das im Bereich des Überlinger Sees, wo die Uferbereiche durch das Wirken des Eises extrem versteilt wurden, so dass hier fast fjordartige Formen vorliegen.



Abbildung 12: Äußere Jungendmoräne (Bildhintergrund) südöstlich von Bad Waldsee (Aufnahme: Schwab, 2007)



Abbildung 13: Das mittlere Schussenbecken als Beispiel für ein glazial geschaffenes Zungenbecken. Blickrichtung Nordwest. (Aufnahme: Schwab, 2007).

Als besonders eindruckliche Oberflächenform gelten auch die in Scharen auftretenden Hügel im Süden des Untersuchungsgebietes. Diese sogenannten *Drumlinfelder* (vgl. Abbildung 14)

treten als typisches Element einer *Grundmoränenlandschaft* besonders markant zwischen Lindau und Wangen, zwischen Gehrenberg und Friedrichshafen und westlich des Salemer Beckens auf.

Zu diesem System aus Endmoränen, Zungenbecken und kuppiger Grundmoränenlandschaft gehören auch die glazialen Schotter, die von den Schmelzwässern unweit des Gletscherrandes abgelagert wurden. Solche *Schotterebenen* liegen vor allem nördlich der oben genannten Äußeren Jungendmoräne und in den kleineren zur Donau hin orientierten Tälern. Sie sind aber auch innerhalb der Grundmoränenlandschaften immer wieder anzutreffen. Die darin enthaltenen Kiese stellen den einzigen natürlichen Rohstoff Oberschwabens dar und werden an vielen Stellen abgebaut (z.B. Kiesgruben bei Pfullendorf, Ostrach, Krauchenwies) (vgl. Abbildung 15).



Abbildung 14: Drumlinfeld (Bildhintergrund) südöstlich von Markdorf. Blickrichtung Süd. (Aufnahme: Schwab, 2007).



Abbildung 15: Kiesabbau im Bereich einer eiszeitlichen Schotterebene nördlich von Ostrach (Aufnahme: Schwab, 2004).

Unterschiedliche Talformen

Bei einer Betrachtung der im Untersuchungsraum auftretenden Talformen fällt deren unterschiedlicher Charakter auf. Im Süden dominieren relative kurze steile Kerbtäler (Tobel) (vgl. Abbildung 16), während im Norden die flach zur Donau hin abfallende Tälchen von Kehlbach, Andelsbach, Ostrach und Schwarzach das Landschaftsbild prägen (vgl. Abbildung 17). Bei letzteren handelt es sich um leicht in die Altmoränenlandschaft eingetieft, ehemalige Schmelzwasserrinnen. Die steileren Formen im Süden gehen auf die hier wesentlich höhere Reliefenergie zurück. Durch den mehrfachen kaltzeitlichen Gletschervorstoß wurde das Bodenseebecken immer weiter vertieft (höhere Eismächtigkeit, häufigere Gletscherbedeckung), so dass nicht nur der zu Beginn des Pleistozäns noch zur Donau hin entwässernde Alpenrhein, sondern auch alle kleineren Flüsse im südlichen Teil des Untersuchungsraumes ihre Fließrichtung verändern mussten.

Entscheidend für die heutigen Flussverläufe waren häufig die vergangenen 18000 Jahre. Mit dem Abschmelzen des Rheingletschers wurden die tief ausgeräumten Zungenbecken eisfrei. In diese Becken hinein strömten von den Seiten nun zahlreiche Flüsse, die auf recht kurzer Distanz beträchtliche Höhenunterschiede zu überwinden hatten. Entsprechend kam es zu einer intensiven Zerschneidung der Beckenhänge. Beispielhaft ist dies rund um das mittlere Schussenbecken zu erkennen.



Abbildung 16: Das Tal der Wolfegger Aach westlich von Bergatreute als Beispiel für einen spät- bzw. post-glazial entstandenes steiles Kerbtal (Tobel). (Foto: Schwab, 2007).



Abbildung 17: Das Kehlachtal nördlich von Pfullendorf als Beispiel für eine zur Donau hin gerichtete glaziale Schmelzwasserrinne (Aufnahme: Ratz, 2006).

Besonders markant ist das Deggenhausertal. Durch seine Lage im Bereich der höchsten Erhebungen des südlichen Oberschwaben (Höchsten-Bergland) ist hier ein sehr tiefes Tal mit steilen Hängen entstanden.

Weniger auffällig sind einzelne von Ost nach West verlaufende Täler, die heute nur noch kleine Fließgewässer aufweisen. Sie sind als sogenannte Umfließungsrinnen bei Rückzugsstadien des würmzeitlichen Gletschers entstanden (z.B. Markdorfer Rinne, Urnauer Rinne).

Die noch zur Schwäbischen Alb gehörenden nördlichen Bereiche des Untersuchungsraumes weisen eine intensive Zertalung der nach Südosten einfallenden Jurakalke auf. Von Westen nach Osten verläuft die Donau. Sie hat im Laufe von Jahrmlionen zwischen Tuttlingen und Sigmaringen ein markantes *Durchbruchstal* geschaffen. An vielen Stellen haben sich hier beachtliche Talschlingen gebildet, die im Wechsel mit Talverengungen auftreten. Die umliegenden flachen Anhöhen überragen das Donautal um bis zu 70 m. Die größeren nördlichen Donauzuflüsse Schmeie und Lauchert weisen einen ganz ähnlichen Talcharakter auf. Zwischen Laiz und Sigmaringen weitet sich das Tal der Donau zur sogenannten Sigmaringer Talweitung, aber erst ab Scheer verlässt sie geologisch gesehen endgültig die Schwäbische Alb. Sie fließt dann, eingebettet in eine flachwellige Landschaft aus tertiären und rißzeitlichen Ablagerungen, in einer breiten Talau.



Abbildung 18: Typischer Talcharakter des Oberen Donautals zwischen Tuttlingen und Sigmaringen. (aus: Schwab, 2008, S. 43)



Abbildung 19: Donautal bei Mengen (Foto: Nonnenmacher, 2005, wikipedia, Zugriff: 01.10.2009)

3.1.2 Landnutzung

Die Landnutzung in der Region wird dominiert von Freiflächen (ca. 63 %). Während in den nördlich gelegenen Altmoränengebieten der *Ackerbau* dominiert, treten mit zunehmender Alpennähe die *Grünlandflächen* (Wiesen und Weiden) immer mehr in den Vordergrund. Eine Sonderrolle spielt der Anbau von *Sonderkulturen* in Bodenseenähe (Obst, Wein, Hopfen) (vgl. Tabelle 2).

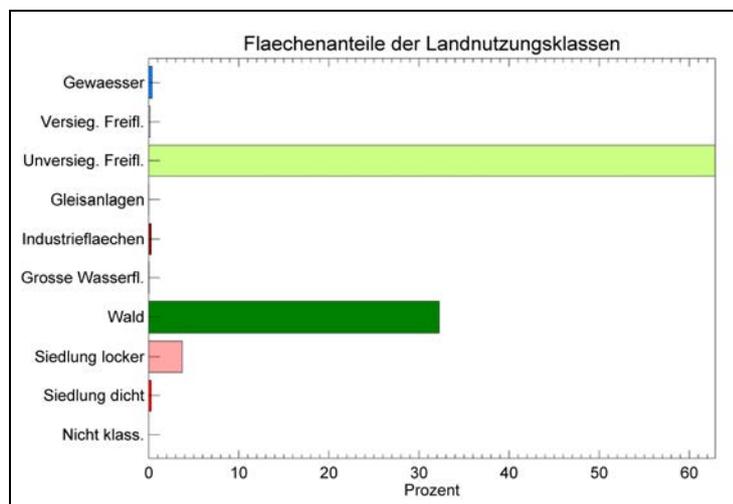


Abbildung 20: Flächenanteile der Landnutzung in der Region Bodensee-Oberschwaben.

Tabelle 2: Anteile der Hauptnutzungsarten ausgewählter Gemeinden (Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Landesinformationssystem, <http://www.statistik-bw.de>, Zugriff: 22.06.2009).

Gemeinde	Ackerbau	Dauergrünland	Obst	Rebland
Mengen	65	35	0	0
Fronreute	45,4	52,6	1,9	0
Bodnegg	23,0	74,6	2,4	0
Isny	2,2	97,8	0	0
Bermatingen	54,1	27,0	16,5	2,3
Kressbronn	19,2	35,0	44,4	2,3
Hagnau	0,0	1,0	55,4	43,5

Ca. 32 % des Untersuchungsraumes sind waldbedeckt. Dabei handelt es sich sowohl um einzelne größere zusammenhängende Gebiete (z.B. Tettlinger Wald, Altdorfer Wald, Wagenhart, Sigmaringer Forst usw.), als auch um sehr kleine Flächen wie etwa die bewaldeten Kuppen kleinerer Hügel. Meist geht die *Bewaldung* auf landwirtschaftliche Ungünstfaktoren wie starke Hangneigungen, Höhenlage oder ungünstige Bodenverhältnisse zurück.

Typisch für das gesamte oberschwäbische Alpenvorland sind die großen (und kleinen) Feuchtgebiete. Dort wo die späteiszeitlichen Schmelzwässer sich in abflusslosen Hohlformen sammelten, haben nacheiszeitliche Verlandungsprozesse zur Bildung von *Moorlandschaften* geführt (z.B. Wurzacher Ried, Pfrunger Ried, Federsee-Ried). Zum Zwecke des Torfabbaus und der landwirtschaftlichen Nutzung wurden diese vielerorts entwässert. Aus ökologischen Gründen wurde in den vergangenen Jahrzehnten jedoch vermehrt versucht, durch Renaturierungsmaßnahmen diese wieder in ihren ursprünglichen Zustand zurückzusetzen.

Intensive menschliche Eingriffe im Hinblick auf die Oberflächengestaltung finden auch durch den intensiven *Kiesabbau* in der Region statt. In Bezug auf die Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes erscheinen diese Eingriffe zwar relativ unbedeutend. Lokal betrachtet sind

die Veränderungen im Bereich von Kiesgruben jedoch erheblich, da neben der reinen Oberflächenbedeckung auch das Kleinrelief stark umgestaltet wird (vgl. Abbildung 15).

Das markanteste Zeugnis menschlicher Aktivitäten sind wie überall die *Siedlungsgebiete*. In der Region Bodensee-Oberschwaben leben derzeit ca. 615.000 Einwohner (Regionalverband Bodensee-Oberschwaben, 2009). In Verbindung mit der Gesamtfläche von 3500 km² ergibt sich dadurch eine mittlere Bevölkerungsdichte von ca. 175 EW/km². Damit gehört der Raum zu den eher ländlich geprägten Räumen in Baden-Württemberg. Die Strukturkarte der Region weist mit dem Gebiet zwischen Friedrichshafen und Ravensburg-Weingarten nur einen einzigen Verdichtungsraum aus. Zusammen mit den angrenzenden Randzonen umfasst er im Wesentlichen das südliche und mittlere Schussenbecken. Hier leben insgesamt ca. 220000 Menschen.

Weitere als Mittelzentren ausgewiesene größere Städte mit Einwohnerzahlen von bis zu 30000 sind Überlingen, Pfullendorf, Sigmaringen, Bad Saulgau, Bad Waldsee, Leutkirch und Wangen (vgl. Abbildung 8). In unmittelbarer Nachbarschaft der Region liegen die Oberzentren Konstanz und Memmingen sowie die Mittelzentren Stockach, Tuttlingen, Albstadt, Riedlingen, Biberach, Lindenberg und Lindau.



Abbildung 21: Ackerbau im nördlichen Oberschwaben bei Bad Saulgau. (Foto: Schwab, 2002)



Abbildung 22: Grünlandwirtschaft im südlichen Oberschwaben bei Waldburg. (Foto: Schwab, 2007)



Abbildung 23: Sonderkulturanbau (hier Weinanbau) am Bodensee (Foto: Ratz, 2006)



Abbildung 24: Das Mittlere Schussenbecken als Beispiel für ein dicht besiedeltes Gebiet. Blick von der Veitsburg (Ravensburg) nach Norden (Foto: Schwab, 2007).



Abbildung 25: Wiedervernässung im Bereich des Wur-zacher Riedes, einer typischen oberschwäbischen Moorlandschaft. (Foto: www.wikipedia.de, Zugriff: 01.10.2009)

3.1.3 Zusammenfassung

Der Untersuchungsraum weist einige typische Landschaftselemente auf, die gerade im Hinblick auf die Ausprägung lokalklimatischer und lufthygienischer Eigenschaften von Bedeutung sind (vgl. Kap. 2). In den meisten Fällen gehen sie auf die formbildenden Prozesse der Kaltzeiten zurück. Im Einzelnen sind zu nennen:

- Weitgespannte Beckenlandschaften (Zungenbecken)
- Große Feuchtgebiete als verlandete Reste ehemaliger Zungenbeckenseen
- Markante Höhenzüge (Endmoränen)
- Hügellandschaften (Drumlinfelder)
- Kleinere sanft nach Norden zur Donau abfallende Tälchen (Schmelzwasserrinnen) mit mächtigen Kiesvorkommen (Schotterebenen, Sanderflächen)
- Kurze steile zum Bodensee oder zu den tiefen Becken hin orientierte Kerb- bzw. Kerbsohlentäler (nacheiszeitlich entstanden Tobel)

Aufgrund ihrer Größe separat zu nennen sind:

- Das Durchbruchstal der Donau mit den Tälern der nördlichen Zuflüsse
- Das Deggenhausertal als mächtiges Tal
- Das Argental
- Der Gehrenberg

3.2 Klimatische Einordnung des Untersuchungsraums

3.2.1 Großklimatische Einordnung

Das Klima von Deutschland und Baden-Württemberg 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. Dabei beruhen die höheren Werte im Sommer auf dem zu dieser Jahreszeit stärker konvektiv gesteuerten Niederschlagsgeschehen, während im Winter vermehrt vom Atlantik herangeführte Luftmassen an den Niederschlägen beteiligt sind (advektives Niederschlagsregime) (Rosner, 2008, S. 121 ff).

Da große Wasserflächen thermisch ausgleichend wirken (hohe Wärmekapazität des Wassers), zeigt sich der Einfluss der Meeresnähe in erster Linie in geringeren Jahresschwankungen der Lufttemperatur. Bedingt durch die vorherrschenden Windrichtungen und die Lage zur Nordsee nehmen diese Schwankungen innerhalb Deutschlands von West nach Ost allmählich zu. So ist hier ein Übergang von einem maritimen zu einem (Sub-) Kontinentalklima zu beobachten (Nationalatlas, S. 32). Vergleichbare Muster zeigen sich auch in Baden-Württemberg. Wegen seiner Lage im Landesinneren weisen jedoch nur wenige Gebiete maritimen Charakter auf.

Niederschlags- und Temperaturwerte können lokal durch die Höhenlage und das Relief sehr stark modifiziert werden (vgl. Kap. 2.3). Die Jahresdurchschnittstemperaturen nehmen mit zunehmender Geländehöhe ab. Für den Niederschlag ist die Lage der Gebirge relativ zur Hauptwindrichtung von Bedeutung, denn im Luv der Berge wird durch die erzwungene Hebung der Luft verstärkt Wolkenbildung und Niederschlag ausgelöst, während sich im Lee der Gebirge durch das Absinken der Luft die Wolken auflösen, so dass relativ trockene Gebiete entstehen (LUBW, 2006).

3.2.2 Regionale Klimadifferenzierung

Im Folgenden sollen diese regionalen Modifikationen anhand von Karten aus dem Klimaatlas Baden-Württemberg (2006) beschrieben werden. Dabei darf sich der Blick nicht auf das eigentliche Untersuchungsgebiet beschränken, da erst durch eine vergleichende Betrachtung gemessene oder berechnete Werte richtig eingeordnet werden können. Insofern macht es Sinn, grundsätzlich von der Situation des gesamten Bundeslandes auszugehen, um anschließend die Besonderheiten der Region Bodensee-Oberschwaben herauszuarbeiten.

Bei der Interpretation der Karten muss die Methodik berücksichtigt werden, die zu ihrer Erstellung benutzt wird. Mit Hilfe der Daten von Messstationen werden zunächst Regressionsbeziehungen zwischen den Messwerten und der Topographie der Stationsumgebung bestimmt. Da Informationen über die Topographie (Höhe, Landnutzung) flächenhaft vorhanden sind (Digitale Geländemodelle, Landnutzungsdatensätze), können diese Regressionsbeziehungen auf die gesamte Fläche angewandt werden. Je nach Fragestellung ergeben sich so Kartendarstellungen unterschiedlicher räumlicher Auflösung. Sehr kleinräumige Effekte können jedoch bei den hier zugrunde liegenden Auflösungen nicht erfasst sein. Dies gilt auch für Phänomene, die nicht durch eine Messstation erfasst sind.

3.2.2.1 Kontinentalität und Maritimität

Die Karte der Kontinentalität (Anhang, Karte 1) stellt die Differenz zwischen den Mitteltemperaturen des wärmsten und des kältesten Monats dar. Sie zeigt in den Tiefländern eine *Zunahme von Nordwest nach Südost*.

In noch stärkerem Maße bildet die Karte aber die topographische Höhe ab, denn die Temperatur der freien Atmosphäre, in welche die Berge hineinragen, wird weitgehend von den global dominierenden Wasserflächen beeinflusst, so dass das *Klima des Berglands* in Bezug auf die Temperatur einen *maritimen Charakter* hat (LUBW, 2006).

In der Region Bodensee-Oberschwaben liegen die Jahresschwankungen fast überall über 17,5 K. Der Nationalatlas Deutschland weist dem Gebiet zu großen Teilen den subkontinentalen Klimatyp zu. Nur kleinere Teilgebiete auf der Schwäbischen Alb und im Bereich des Höchsten-Berglandes können mit 17-17,5 Kelvin Lufttemperatur-Jahresschwankung dem submarinen Typ zugeordnet werden. Diese Flächen fallen zusätzlich in die Sonderklasse des Gebirgsklimas, das sich durch kühle Juli-Mitteltemperatur von unter 16 °C und eine Januar-Mitteltemperatur von unter 0 °C auszeichnet (Nationalatlas, S. 33). Besonders hohe Jahresschwankungen von über 18,5 K weist das Schussenbecken auf. Auch das Donautal und die Bodenseeregion sind kontinentaler geprägt als etwa die Oberrheinebene. Dies entspricht der wachsenden Entfernung vom Atlantik.

3.2.2.2 Lufttemperaturen

Für die klimatologische Einordnung eines Standortes sind Jahresdurchschnittstemperaturen aber auch die Extremsituationen (kältester und wärmster Monat) sowie der gesamte Jahresgang von besonderer Bedeutung. Zur Charakterisierung thermischer Gunst- und Ungunsträume eignet sich aber auch die Darstellung der durchschnittlichen Anzahl von Frosttagen (Tage mit Minimumtemperatur < 0 °C) und Sommertagen (Tage mit Maximumtemperatur > 25 °C). Für eine umfassende Beschreibung sei auf den Klimaatlas Baden-Württemberg verwiesen (LUBW, 2006). Hier werden nur die folgenden Karten erläutert (s. Anhang):

- Karte 2: Januartemperaturen in Baden-Württemberg (aus LUBW, 2006).
- Karte 3: Julitemperaturen in Baden-Württemberg (aus LUBW, 2006).
- Karte 4: Jahresmitteltemperaturen in Baden-Württemberg (aus LUBW, 2006).
- Karte 5: Mittlere Anzahl der jährlichen Sommertage (aus LUBW, 2006)
- Karte 6: Mittlere Anzahl der jährlichen Frosttage (aus LUBW, 2006)

Das Gebietsmittel der Jahresdurchschnittstemperatur (Anhang, Karte 4) von Baden-Württemberg liegt bei 8,1 °C. Im Oberrheintal finden sich jedoch überwiegend Werte um 10 °C (Karlsruhe 10,3 °C, Freiburg 10,4 °C). In den Tälern des Neckargebiets und am Hochrhein liegen die Mitteltemperaturen zwischen 9 und 10 °C. In den übrigen Gebieten des nördlichen Baden-Württembergs bewegen sich die Jahresmittel meist um das Landesmittel. Kühler als im Landesdurchschnitt ist es auf der Schwäbischen Alb und im Schwarzwald. Dort bleiben die Mittelwerte teilweise unter 7 °C.

Der im zeitlichen und flächenmäßigen Mittel kälteste Monat ist der Januar mit einem durchschnittlichen Gebietsmittel von -0,7 °C. In den Niederungen von Oberrhein und Neckar liegen die Temperaturen aber auch in diesem Monat im Mittel über 0 °C, in der Rheinebene sogar über 1 °C (Freiburg 1,8 °C, Heidelberg 1,9 °C). In den Hochlagen von Südschwarzwald und Schwäbischer Alb liegen die Mittelwerte andererseits unter -3 °C (Feldberg -3,4 °C).

Der wärmste Monat ist normalerweise der Juli mit einem Landesmittel von 17,1 °C. Dabei werden im Oberrheintal und in den Tallagen von Stuttgart Monatsmittel von fast 20 °C er-

reicht (Freiburg, Heidelberg, Stuttgart–Neckartal 19,9 °C). Auf den Höhen von Schwarzwald und Alb bleiben die Mitteltemperaturen hingegen unter 15 °C.

Auch bei den Sommertagen (Tage mit Maximum > 25 °C) und Frosttagen (Tage mit Minimum < 0 °C) gibt es erwartungsgemäß große Unterschiede. Die Anzahl der Sommertage schwankt zwischen 0 (Hochlagen des Schwarzwaldes und der Schwäbischen Alb) und 60 (wärmste Gegenden im Oberrheingraben), die Zahl der Frosttage liegt im Bereich von 40 bis 185.

Damit lassen sich aus den Karten die bekannten Gesetzmäßigkeiten bestätigen:

- Die tief gelegenen Großlandschaften sind thermisch bevorzugt.
- Gebirgslagen sind ganzjährig am kältesten, die Jahresschwankungen sind hier jedoch weniger groß.
- Gebiete besonderer thermischer Gunst sind Tal- und Beckenlagen.

Das eigentliche Untersuchungsgebiet zeigt eine vergleichbare Höhenabhängigkeit der Lufttemperaturen. Im Einzelnen sind folgende Punkte festzuhalten:

- Unter dem Landesdurchschnitt liegen die Temperaturen im Allgäu, auf der schwäbischen Alb und im Bereich des Höchsten-Berglands
- Deutlich darüber liegen sie rund um den Bodensee und im Schussenbecken.
- Eine thermische Sonderstellung nimmt die Uferregion des Bodensees ein. Milde Wintertemperaturen nur knapp unter dem Gefrierpunkt finden ihre Erklärung im Wärmespeichervermögen des Seewassers. Die Frostgefahr ist dadurch vermindert.
- Die Zahl der Frosttage liegt in besonders begünstigten Lagen bei lediglich 66-70 (Konstanz, Stadtgebiet). Insgesamt kann für die erweiterte Uferregion um den Bodensee jedoch von 80-90 Frosttagen pro Jahr ausgegangen werden.
- Im klimatisch ebenfalls noch begünstigten Schussenbecken muss mit 90-95 Frosttagen gerechnet werden.
- Im Bereich des Höchsten-Berglandes und den nördlich angrenzenden Gebieten, im Gebiet der Adelegg und auf der Schwäbischen Alb sinkt die Temperatur an 115-125 Tagen im Jahr unter 0 °C.
- Die Zahl der Sommertage liegt in besonders warmen Lagen bei 41-45 (Konstanz, Friedrichshafen, Ravensburg-Weingarten). Hier wurde offensichtlich der städtische Wärmeinseleffekt mit Messstationen erfasst.
- Für die erweiterte Uferregion um den Bodensee und das Schussenbecken kann von 36-40 Sommertagen pro Jahr ausgegangen werden.
- Die kühleren Regionen (Höchsten-Bergland, Adelegg, Schwäbischen Alb) weisen 21-25 Sommertage auf.
- In den restlichen Teilgebieten ist mit 26-35 Sommertagen zu rechnen.

3.2.2.3 Sonnenscheindauer

Die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer eines Ortes ergibt sich durch Breitenlage, Höhenlage und Horizontgestaltung. Die tatsächliche Sonnenscheindauer wird dagegen vom täglichen Wetterablauf bestimmt. Insbesondere die Bewölkung limitiert den Strahlungsinpult an der Erdoberfläche.

In den Wintermonaten ist die Sonnenscheindauer insgesamt gering (vgl. Anhang, Karte 7). Die Maxima sind in diesen Monaten auf den Höhen der Gebirge zu finden, da die Berge dann bei Inversionswetterlagen häufig oberhalb der Nebelschichten liegen. Die Maxima bleiben aber unter 100 Stunden im Monat, in den nebelreichen Niederungen liegen die Monatssummen teilweise nur um 30 Stunden.

Auch in der Region Bodensee-Oberschwaben zeigt sich diese Struktur im Januar nahezu lehrbuchartig:

- Die größten Teile des Untersuchungsraumes weisen eine Sonnenscheindauer von 51-60 Stunden auf.
- Im Allgäu werden Werte von 61-70 Stunden erreicht.
- Sie werden nur noch übertroffen vom äußersten Südosten: Im Bereich der Adelegg werden 71-80 Stunden Sonnenscheindauer verzeichnet.
- Im krassen Gegensatz dazu stehen die nur 41-50 Stunden im Bodenseebecken und im angrenzenden Schussenbecken. Beide Teilgebiete sind für ihre hohe Nebelhäufigkeit im Winter bekannt (vgl. auch Anhang, Karte 13 und Abbildung 26).

Die höchste Sonnenscheindauer tritt im Juli auf (vgl. Anhang, Karte 8). In den Niederungen finden sich dann Monatssummen um 230 Stunden. Am Oberrhein werden sogar teilweise mehr als 240 Sonnenstunden beobachtet. Das Minimum findet sich im Sommer im Südschwarzwald, wobei dort Monatswerte um 180 Stunden zu verzeichnen sind.

Im Untersuchungsgebiet kann im Juli nur ansatzweise eine Gesetzmäßigkeit erkannt werden. Großflächig dominieren Werte um 221-240 Stunden. Nur im Bereich der Adelegg und auf der schwäbischen Alb sind etwas geringere Werte verzeichnet. Hier kommt es wohl etwas häufiger zur Bildung konvektiver Bewölkung.

Da die Verteilung der jährlichen Sonnenscheindauer von den großen Werten des Sommerhalbjahrs dominiert ist, erscheint auch bei dieser Darstellung der Untersuchungsraum einheitlich (vgl. Anhang, Karte 9). Die Werte liegen zwischen 1600 und 1700 Stunden und damit in einem Bereich, der auch in den meisten anderen Teilen Baden-Württembergs erwartet wird.

3.2.2.4 Globalstrahlung

In den letzten Jahren ist im Zusammenhang mit der fortschreitenden passiven und aktiven Nutzung der Solarenergie die Nachfrage nach flächendeckenden Informationen zu den Einstrahlungsverhältnissen in Deutschland stetig gestiegen. Die am Boden ankommende Sonnenstrahlung, bezogen auf eine horizontale Fläche, wird Globalstrahlung genannt. Sie setzt sich aus der direkten Sonnenstrahlung und dem diffusen Himmelslicht zusammen. Wichtig für die Globalstrahlungswerte ist die Sonnenscheindauer im Zusammenspiel mit den sich im Tages- und Jahresverlauf verändernden Positionen der Sonne (scheinbare Sonnenbahnen).

Das höchste Strahlungsangebot pro Tag ist in der Regel im Juli anzutreffen. Je nach Orts- und Höhenlage variiert die Globalstrahlung im Mittel zwischen über 5700 Wh/m² und 5100 Wh/m². Im Dezember steht hingegen nur etwa 10 – 15% der Julieinstrahlung zur Verfügung.

In der Jahressummenverteilung (vgl. Anhang, Karte 10) erstreckt sich eine bevorzugte Einstrahlungsregion im Süden Baden-Württembergs von westlich und südlich Freiburgs ostwärts in Richtung Wangen/Isny. Die Höchstsummen werden jeweils mit über 1161 kWh/m² im äußersten Südwesten und Südosten des Bundeslandes erreicht. Deutlich geringere Einstrahlungsverhältnisse werden im Nordschwarzwald und an der nördlichen Landesgrenze angetroffen. Dort liegen die Werte unter 1080 kWh/m². Im östlichen Baden-Württemberg überwiegt eine Einstrahlung von 1081 kWh/m² bis 1120 kWh/m².

Das Untersuchungsgebiet liegt also in einer strahlungsbegünstigten Zone. Es weist in sich folgende Differenzierung auf:

- Die höchsten Globalstrahlungssummen treten in den östlichen Teilen auf.
- Die Werte nehmen nach Nordwesten, aber auch nach Südwesten zum Bodensee hin ab (höhere Nebelhäufigkeit am See)

3.2.2.5 Niederschlag

Betrachtet man die räumliche Verteilung der Jahresniederschläge in Baden-Württemberg (Anhang, Karte 11), so ist grundlegend festzustellen, dass die Gebirge hohe, Tiefländer und Beckenlagen hingegen niedrige Niederschläge verzeichnen. Das ist eine logische Konsequenz des zyklonalen Niederschlagstyps und der Luv-Lee-Effekte (Nationalatlas, S. 42).

Die maximalen Werte werden mit über 1800 mm pro Jahr im Schwarzwald erreicht. Im Gegensatz dazu fallen in den trockensten Gebieten (Oberrheinebene, Neckartal, Taubertal) gerade einmal 600 – 800 mm.

Auch die Niederschläge in der Region Bodensee-Oberschwaben zeigen Strukturen, die aufgrund der geltenden Reliefabhängigkeiten zu erwarten sind (vgl. auch Tabelle 3):

- Die Donauniederung erhält aufgrund ihrer Lage im Regenschatten der Schwäbischen Alb geringe Niederschläge von ca. 700 - 850 mm. Sie gehört damit zu den regenarmen Gebieten in Baden-Württemberg.
- Zum Alpenrand hin steigen die Niederschläge aufgrund der extremen Stauwirkung der Alpen (insbesondere bei nördlichen/nordwestlichen Wetterlagen) kontinuierlich und deutlich an. Im Bereich der Adelegg werden Jahressummen von über 1800 mm verzeichnet. Mit Blick auf die vergleichsweise geringe Höhenlage gehört dieser Teil des Untersuchungsraumes damit zu den besonders auffälligen Niederschlagsgebieten Deutschlands.
- Als Bereich mit etwas erhöhten Niederschlagsmengen (bis 1100 mm) tritt auch das Höchsten-Bergland hervor.

Tabelle 3: Jahresniederschlagssummen ausgewählter Messstationen (Quelle: www.klimadiagramme.de)

Stationsname	Höhe über NN in m	Jahresniederschlag in mm
Ehingen	520	742
Veringenstadt	632	824
Pfullendorf-Brunnhausen	638	858
Wolfegg	623	1032
Isny	712	1602

3.2.2.6 Nebel

Betrachtet man die Karte der Relativen Häufigkeiten von Strahlungsnebel in Deutschland (Anhang, Karte 13), so fallen folgende Strukturen auf:

- Der südliche Oberrheingraben weist nur leicht überdurchschnittliche Nebelhäufigkeiten auf (50-60%).
- Hohe relative Nebelhäufigkeiten sind entlang der gesamten Donauniederung zu beobachten (60-80 %).
- Zu den Alpen nehmen sie mit zunehmender Höhenlage wieder ab (im Bereich der Adelegg nur noch 10-30 %).
- Auch im Bereich des Höchsten-Berglands sind die Nebelhäufigkeiten reduziert (50-60%).
- Das absolute Nebelmaximum (=100 %) von ganz Deutschland findet sich im Bereich des Bodenseebeckens und des Hochrheintales.

Vor allem das Winterhalbjahr ist davon betroffen. Die hohe Nebelhäufigkeit geht hier auf die Kombination mehrerer Ursachen zurück. Eine vergleichsweise feuchte Luft (Bodensee und Feuchtgebiete als Wasserdampfquellen) wird bei starker nächtlicher Ausstrahlung (Hochdruckwetterlagen, Höhenlage) stark abgekühlt, hat jedoch nur schlechte Abflussmöglichkeiten (Relief: Hochflächencharakter mit einer mittleren Höhe von rund 500 m über NN, geringe Höhenvarianzen und flachen Neigungen). So entstehen seichte Tal- und Bodennebelfelder,

die sich zu größeren Nebelgebieten verbinden können. Sie halten sich im Alpenvorland häufig länger als in anderen Gebieten.

Die Nebelstrukturkarte des Klimaatlas Baden-Württemberg (Anhang, Karte 12) zeigt die Obergrenze des Talnebels, die Untergrenze des Hoch- bzw. Wolkennebels und die dazwischen liegende nebelarme, warme Hangzone.

Deutlich spiegelt sich in der Nebelstruktur die Orographie des Bundeslandes wider: Man erkennt die Oberrheinebene, die tiefer liegenden Teile des Neckartals sowie das Bodenseebecken und die Donauniederungen als großräumige Bereiche, in denen häufig Talnebel zu erwarten ist. Auch in den angrenzenden Tälern und Zweigbecken ist dies der Fall (vgl. Abbildung 26).

Die höheren Geländeteile liegen oberhalb des Talnebels. Im Untersuchungsraum handelt es sich dabei um das Höchsten-Bergland und die Adelegg, aber auch Erhebungen rund um das Wurzacher Becken (u.a. Grabener Höhe und Ziegelberg), die höchstgelegenen Teile der äußeren Jungendmoräne (Atzenberger Höhe, Wagenhart) und die nördlich/nordwestlich des Höchsten-Berglandes relativ hoch gelegenen Altmoränengebiete ragen heraus.

Oberhalb der Talnebels liegt der Bereich der nebelarmen, warmen Hangzone. Bei großen Hangneigungen nimmt sie nur relativ kleine Flächen ein, da es dann zu einem raschen Übergang in den Hoch- bzw. Wolkennebelbereich kommt (Höchsten-Bergland, Adelegg). Bei geringerer Hangneigung ist sie großflächiger ausgeprägt.

Großräumige Gebiete die häufig im Hoch- oder Wolkennebel liegen, findet man in den Höhenlagen der Schwäbischen Alb und des Schwarzwalds. Im Untersuchungsgebiet fallen nur die Hochlagen der Adelegg und des Höchsten-Berglands sowie Anteile an der Schwäbischen Alb in diese Klasse.



Abbildung 26: Nebel im Schussenbecken am Morgen des 9.11.2008. Blickrichtung WSW. (Foto: Schwab, 2008)

3.2.2.7 Wind

Die Karte der bodennahen *Windrichtungen* aus dem Nationalatlas der Bundesrepublik Deutschland (Anhang, Karte 14) zeigt an vielen Standorten ein Vorherrschen von Winden aus Südwest bis West. Dies entspricht der großklimatischen Lage Deutschlands innerhalb der Westwindzone der Mittelbreiten. Herrschen jedoch Hochdruckwetterlagen mit Kern über Mitteleuropa vor, so führt dies häufig zu Winden aus nordöstlichen Richtungen. Deshalb zeigen einige Stationen ein sekundäres Windrichtungsmaximum im nordöstlichen bis östlichen Sektor (Nationalatlas, S. 52).

Dies gilt insbesondere für die Stationen im oberschwäbischen Alpenvorland. Hier sind die Winde aus nordöstlicher Richtung als sogenannte Bise bekannt. Im Winter wird mit ihr häufig trocken-kalte Kontinentalluft aus dem Nordosten Europas herangeführt.

Aus den vom Deutschen Wetterdienst berechneten Jahresmitteln der Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 10 m über Grund (vgl. Anhang, Karte 15) gehen folgende Gesetzmäßigkeiten hervor (vgl. auch Kap. 2.3.5):

- 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 Windgeschwindigkeiten liegen in der vergleichsweise windoffenen Oberrheinebene deshalb je nach Landnutzung nur zwischen 2,6 und 2,9 m/s. Abgeschirmt durch die Höhenlagen von Schwarzwald und Schwäbischer Alb weist das obere und mittlere Neckartal zusammen mit seinen Seitentälern noch geringere Werte auf (2,0 – 2,3 m/s). Ähnliche Windverhältnisse findet man im Kraichgau und in den nordöstlichen Landesteilen.

Wesentlich höher sind die Windgeschwindigkeiten im Schwarzwald und auf der Schwäbischen Alb. Deutlich zeichnen sich hier auch das kleinräumig Relief mit Kuppen und Talstrukturen sowie die unterschiedlich hohen Freiflächenanteile (vgl. Südschwarzwald-Nordschwarzwald) heraus. Sie führen zu einem differenzierten räumlichen Muster.

In der Region Bodensee-Oberschwaben liegen die mittleren Windgeschwindigkeiten meist im Bereich zwischen 2,6 und 3,5 m/s. Höhere Werte (bis 4,6 m/s) werden im Allgäu, im Bereich des Höchsten-Berglandes und nördlich der Donau auf der Schwäbischen Alb erreicht.

Auch die kleinräumige Abhängigkeit von Geländeform und Landnutzung wird deutlich. Besonders windschwach (2,0-2,3 m/s) sind die Tallagen (z.B. Deggenhausertal, Täler rund um das mittlere Schussenbecken, Donautal, Ablachtal, Täler von Schmeie und Lauchert). Auch größere Siedlungsflächen (Friedrichshafen, Ravensburg-Weingarten) und große zusammenhängende Waldgebiete (z.B. Altdorfer Wald, Tettlinger Wald) sind als relativ windschwache Gebiete zu erkennen.

Zusätzlich zu den Karten der Windverhältnisse wurden für die vorliegende Analyse auch die Winddaten von Messstationen der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) herangezogen. Sie werden in einem Online-Daten- und Kartendienst bereitgestellt (LUBW, 2009). Aus Gründen der Einheitlichkeit in der Darstellung wurden die Daten in Stärkewindrosen umgesetzt, die auch bei der Auswertung der REKLIBO-Messungen eine zentrale Rolle spielen (vgl. Wissenschaftlicher Abschlussbericht – Teil 2: Messungen im Untersuchungsraum). Die Länge der Balken gibt hier für die verschiedenen Richtungssektoren die Häufigkeit der aus dieser Richtung wehenden Winde in % an. Anhand der verschiedenfarbigen Teilbalken ist zu erkennen, welche mittleren Geschwindigkeiten

dabei auftreten (vgl. Anhang, Karte 16). Beispielhaft werden an dieser Stelle die Stationen Illmensee und Ravensburg verglichen (vgl. Abbildung 27).

Die Station Illmensee liegt südlich des Illmensees auf einem Höhenzug nordöstlich des Deggenhauserals. Ihre exponierte Lage inmitten des Höchsten-Berglandes zeigt sich deutlich in der Dominanz der Winde aus südwestlicher Richtung (Lage in der Westwindzone der Mittelbreiten). Ein sekundäres Windrichtungsmaximum liegt im nordöstlichen Sektor (Hochdruck mit Kern über Mitteleuropa).

Geringfügig verschoben sind diese Windrichtungsmaxima an der Station Ravensburg (Innenstadt-Station). Bedingt durch die Lage am Südrand des mittleren Schussenbeckens ergeben sich hier offensichtlich Kanalisierungseffekte. Es fällt ferner auf, dass die Windgeschwindigkeiten in Ravensburg merklich geringer sind.

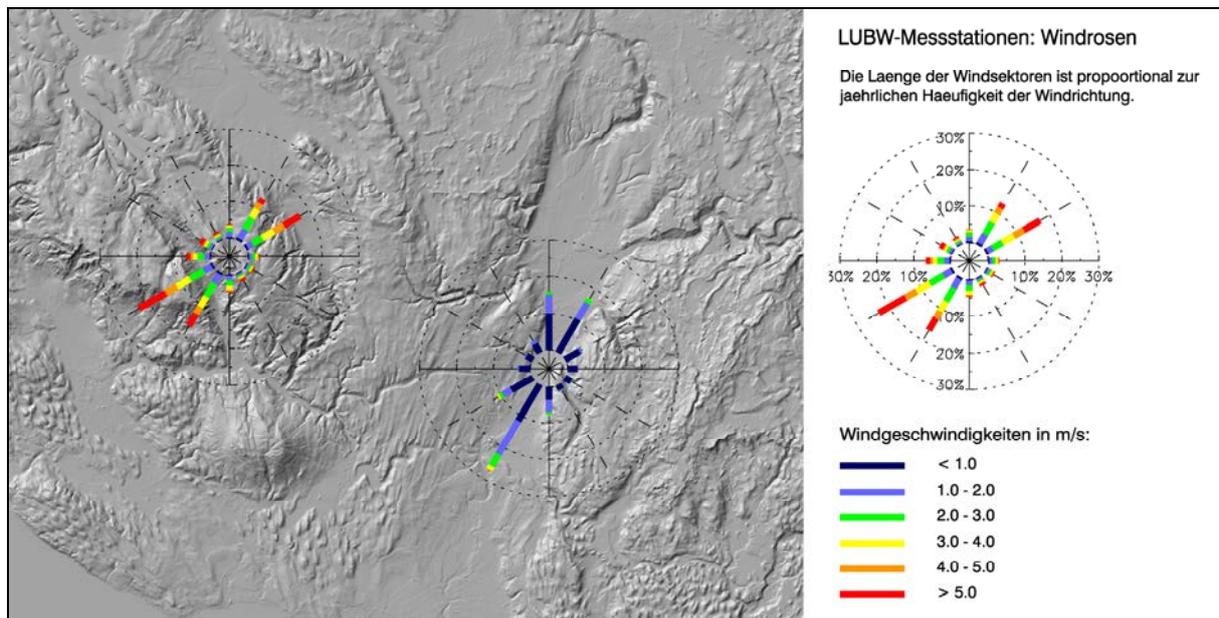


Abbildung 27: Stärkewindrosen der LUBW-Messstationen Illmensee und Ravensburg. (Ausschnitt aus Anhang, Karte 16).

Damit zeigt der Vergleich dieser Stationen die regelhaften Abhängigkeiten zwischen Geländehöhe, Reliefsituation und Bodenbedeckung in besonders klarer Weise. Diese Regelmäßigkeiten gehen auch aus Karte 16 im Anhang hervor, in der die Stärkewindrosen ausgewählter LUBW-Stationen über dem Relief des gesamten Untersuchungsraumes dargestellt sind.

Weil Windrichtung und Windgeschwindigkeit häufig sehr stark von den lokalen Gegebenheiten des Messstandortes abhängen, ist ihre Repräsentanz für eine größere Umgebung immer schwierig zu beurteilen. Aus diesem Grunde werden verstärkt Rechenmodelle eingesetzt, um räumlich höher aufgelöste Aussagen über die Windverhältnisse machen zu können. Solche Modelle sind in der Lage, mit den Informationen über Relief und Landnutzung (aus digitalen Geländemodellen und Landnutzungsdatensätzen) bei vorgegebenen großräumigen Anströmungssituationen (Richtung und Stärke) entsprechende Windfelder zu berechnen. Dies geschieht über die numerische Lösung physikalischer (meteorologischer) Gleichungen. Sind die Auftrittswahrscheinlichkeiten der Anströmsituationen bekannt, können aus der Gewichtung der Einzelergebnisse ebenfalls mittlere Stärkewindrosen erzeugt werden. Sie werden dann als synthetische Windrosen bezeichnet. Auch hier stellt die LUBW die Werte über ihr Online-Portal zur Verfügung. Für die Darstellung im Anhang, Karte 17 wurden die Wind-

rosen so gewählt, dass möglichst viele typische Reliefsituationen im Untersuchungsraum berücksichtigt sind.

Es muss an dieser Stelle jedoch betont werden, dass es sich bei den vorgestellten Karten und Stärkewindrosen um Jahresmittelwerte handelt. Es lässt sich deshalb nicht direkt auf die Durchlüftungs- und lufthygienischen Verhältnisse schließen, da sich besondere Belastungssituationen auf windschwache Strahlungswetterlagen konzentrieren. In dieser Hinsicht sind Karten der Inversionshäufigkeit von großer Aussagekraft.

3.2.2.8 Inversionshäufigkeit

Zur Bestimmung der Inversionshäufigkeit benötigt man den Temperaturverlauf mit der Höhe (vertikales Temperaturprofil). In der Bundesrepublik Deutschland werden nur an wenigen Orten Radiosondenaufstiege durchgeführt, die jedoch keine Übertragung auf den Mittelgebirgsbereich zulassen. Zur Zeit der größten Inversionshäufigkeit (früh morgens) liegen an den Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes tägliche Minima der Lufttemperatur vor. Da dieses Stationsnetz relativ dicht ist und genügend Stationen in unterschiedlicher Höhe vorhanden sind, kann für jeden Tag des Jahres ein vertikales "Minimumtemperaturprofil" erstellt werden. Gegenüber den Radiosondenaufstiegen unterscheidet sich dieses Vertikalprofil nur dadurch, dass die Messungen am Boden (jedoch in verschiedenen Höhenlagen ü. NN) erfolgen und nicht in der freien Atmosphäre (LUBW, 2006).

In Karte 18 im Anhang erkennt man drei großräumige Regionen mit hoher Minimumtemperaturinversionshäufigkeit (über 225 Inversionstage pro Jahr):

- Das Rheintal in seiner vollen Länge samt einiger Nebentäler im Schwarzwald und im Kraichgau. Höher gelegene Regionen im Rheintal zeichnen sich durch eine geringere Inversionshäufigkeit aus (Bsp. Kaiserstuhl).
- Der Bereich des mittleren Neckartals und die ins Neckartal mündenden Nebentäler.
- Große Teile des Bodenseebeckens einschließlich des südlichen und mittleren Schussenbeckens.

Auch der tiefer liegende Bereich des Donautals bei Ulm ist hoch inversionsgefährdet, während das übrige Donautal mit 200 bis 224 Inversionstagen pro Jahr in die nächst niedere Klasse fällt.

Erwartungsgemäß sind die Höhenlagen im Untersuchungsraum wesentlich weniger inversionsgefährdet (75-125 Tage). So ragen z.B. der Sipplinger Berg und der Gehrenberg aus dem inversionsreichen Bereich heraus. Dies gilt jedoch auch für die wesentlich größeren Flächen östlich und westlich des Schussenbeckens. Die geringste Inversionsgefahr besteht im Bereich der Adelegg (< 75 Tage).

3.2.2.9 Durchlüftungssituation

Die Durchlüftungsverhältnisse spielen insbesondere für bebaute Flächen eine wichtige Rolle. Dabei sind sowohl ihre klimatischen als auch ihre lufthygienischen Auswirkungen von Bedeutung, zum Beispiel die abkühlende Wirkung guter Durchlüftung auf wärmebelastete Gebiete oder die mögliche Anreicherung von Luftbeimengungen in Gebieten mit geringer Durchlüftung.

Durchlüftungsverhältnisse können jedoch nicht direkt gemessen werden. Vielmehr werden Durchlüftungskarten durch eine Überlagerung von Inversionshäufigkeit und Windgeschwindigkeit nach bestimmten Kriterien erstellt. Man spricht daher auch von einer synthetischen Klimakarte (MATHYS, 1980). Die vorliegende kartographische Darstellung (Anhang, Karte 19) erfolgte auf der Grundlage der topographischen Daten im 200-m-Raster (LUBW, 2006).

Großräumig schlecht durchlüftet (geringe Windgeschwindigkeit in Verbindung mit hoher Inversionshäufigkeit) sind die Oberrheinebene (von der nördlichen Landesgrenze bis nach Freiburg), das mittlere Neckartal (orographiebedingt zerfällt es in drei Teilgebiete) sowie das Bodenseebecken zusammen mit dem südlichen und mittleren Schussenbecken.

Alle übrigen Gebiete mit schlechter Durchlüftung sind kleinräumig und meist auf lokale Phänomene wie Kaltluftstaus zurückzuführen.

Das Donautal ist aufgrund der höheren Windgeschwindigkeiten überwiegend mäßig durchlüftet. Lediglich westlich von Sigmaringen treten in den tiefen Tallagen von Donau und Ablach sowie im Bereich um Ulm schlechte Durchlüftungsverhältnisse auf.

Bei geringen Inversionshäufigkeiten in Verbindung mit hohen Windgeschwindigkeiten sind die Durchlüftungsverhältnisse gut. Dies betrifft vor allem die höher gelegenen, windstarken Regionen von Schwarzwald und Schwäbischer Alb. Es gilt aber auch für die Höhenlagen beiderseits des mittleren Schussenbeckens.

Zwischen schlechter und guter Durchlüftung liegt ein mehr oder weniger breiter Übergangsbereich mit mäßigen Durchlüftungsverhältnissen. In Regionen mit niedriger Geländehöhe ist dies dann der Fall, wenn zwar eine hohe Inversionshäufigkeit vorherrscht, die Windgeschwindigkeiten aber recht hoch sind. Auch im umgekehrten Fall (niedrige Windgeschwindigkeiten in Verbindung mit geringer Inversionshäufigkeit) sollen mäßige Durchlüftungsverhältnisse herrschen. Dies ist hauptsächlich in den höherliegenden Teilen Baden-Württembergs der Fall (LUBW, 2006).

Im Hinblick auf Wärmebelastung und Lufthygiene ist die Lage der Siedlungen zu beachten. Vor allem größere Städte befinden sich häufig in Tal- oder Beckenlagen. Deshalb erstaunt es nicht, dass hohe Anteile (in Baden-Württemberg über 50 %) bebauter Flächen schlecht durchlüftet sind. Im Untersuchungsgebiet betrifft dies den kompletten Verdichtungsraum Friedrichshafen-Ravensburg-Weingarten, aber auch Städte und Ortschaften entlang des Bodenseeufer und in den Tälern der Donau und ihrer Zuflüsse (Schmeie, Lauchert, Ablach). Städte und Ortschaften in den höher gelegenen Teilgebieten dürften hingegen kaum mit Durchlüftungsproblemen zu kämpfen haben.

3.2.2.10 Bioklima (LUBW, 2006)

Zur Charakterisierung von unterschiedlichen Landschaften nach der Stärke der biometeorologischen Anforderungen an die Thermoregulation (vgl. Kap. 2) wird die Häufigkeit des Auftretens von Wärmebelastung und von Kältereizen tagsüber trotz jeweils angepasster Bekleidung benutzt. So ist auf den Bioklimakarten die räumliche Verteilung der Tage mit Wärmebelastung (Anhang, Karte 21) bzw. mit Kältereizen (Anhang, Karte 20) dargestellt, die im vieljährigen Durchschnitt zu erwarten ist. Dabei versteht man unter einem Tag mit Wärmebelastung bzw. Kältereiz einen Tag, an dem tagsüber ein fester Wert der gefühlten Temperatur überschritten wird bzw. das Tagesmittel zwischen 7:00 und 19:00 MEZ einen festen Wert unterschreitet (LUBW, 2006).

Wärmebelastung tritt hauptsächlich bei sommerlichen, strahlungsreichen Hochdruckwetterlagen mit geringer Luftbewegung auf. Kältereiz dagegen ist mit niedrigen Temperaturen und höheren Windgeschwindigkeiten verknüpft.

In Baden-Württemberg ist Wärmebelastung am häufigsten im Oberrheingraben (teilweise über 35 Tage), aber auch im Neckartal und im Bereich des Bodensees zu erwarten, in den Hochlagen von Schwarzwald und Schwäbischer Alb dagegen kaum. Hier spiegelt sich insbesondere die Höhenabhängigkeit der thermischen Bedingungen wider.

Allerdings trägt auch die Landnutzungsverteilung zu den tatsächlich auftretenden großen Unterschieden bei. Denn der Wald reduziert mit seiner ausgleichenden Wirkung die Wärmebelastung. Innerhalb von Bebauung nimmt die thermische Belastung gegenüber den umliegenden Freiflächen zu (Wärmeinseleffekt).

Diese Zusammenhänge lassen sich auch in der Region Bodensee-Oberschwaben gut nachvollziehen. So treten die größeren Waldflächen (z.B. Altdorfer Wald) als geringer belastete Areale deutlich hervor. Im Sommer bieten diese Wälder also eine Möglichkeit zur thermischen Entlastung des Organismus. Da sie jedoch häufig innerhalb weniger stark belasteter Gebiete liegen, relativiert sich diese Bedeutung.

Siedlungsgebiete zeigen das umgekehrte Bild. Noch häufiger als im Umland wird man hier mit Wärmebelastung konfrontiert. Im vorliegenden Fall zeigt sich dies in den orangefarbenen Flächen, die über 27,6 Tage mit Wärmebelastung anzeigen. Sie liegen im Bodenseebecken und Schussenbecken und damit in einem Bereich, der bereits eine relativ hohe flächenhafte Belastung aufweist (Relief, Höhenlage). In den flächengrößten Siedlungen werden über 30, vereinzelt sogar über 32,5 Tage mit Wärmebelastung berechnet. Dies geht auf die hier größten Wärmeinseleffekte zurück.

Im Winter bestimmen in den Hochlagen des Schwarzwalds und der Schwäbischen Alb Kältereize das Bioklima (bis zu 100 Tage pro Jahr, flächenhaft über 60 Tage). In den tiefer gelegenen Gebieten treten dagegen weniger, im Oberrheingraben, am Hochrhein und im unteren Neckartal nur selten Tage mit Kältereiz auf. Die hiermit verbundene Höhenabhängigkeit ist deutlich zu erkennen.

Daneben bildet sich erneut der Einfluss von Oberflächenform und Art der Landnutzung ab. In windgeschützten Tallagen ist der Mensch seltener Kältereizen ausgesetzt als bei gleicher Höhe in ebenem Gelände oder gar auf windexponierten Bergkuppen. Die Auswirkungen der Nutzungen Siedlung und Wald weisen im Gegensatz zur sommerlichen Belastungssituation in die gleiche Richtung, und zwar entlastend. In Wäldern und Städten ist gegenüber der Umgebung deshalb seltener mit Kältereizen zu rechnen (LUBW, 2006).

Im Untersuchungsraum schwanken die Werte großflächig zwischen 20-25 Tagen (Bodenseebecken, mittleres Schussenbecken) und 50-60 Tagen (Höchsten-Bergland, Schwäbische Alb, Adelegg).

Während Kältereize durch geeignete Bekleidung oder durch das Aufsuchen von geschützten Bereichen vermindert oder sogar vermieden werden können, sind bei Wärmebelastung die Anpassungsmöglichkeiten begrenzt. Daher ist es wichtig, das Auftreten von Wärmebelastung insbesondere bei Planungsfragen in allen Maßstäben als kritische Randbedingung in die Betrachtungen einzubeziehen.

Die Regionale Klimaanalyse in der Region Bodensee-Oberschwaben (REKLIBO) soll als Grundlage für entsprechende Planungsentscheidungen dienen. Sie setzt ihren Schwerpunkt auf die Wärmebelastung und Durchlüftungssituation in besonders belasteten Teilgebieten der Region. Im folgenden Abschnitt wird das Konzept der Studie vorgestellt.

4 Regionale Klimaanalyse in der Region Bodensee-Oberschwaben (REKLIBO)

In Baden-Württemberg gibt es drei großflächige Bereiche, in denen von schlechten Durchlüftungssituationen ausgegangen werden muss. Neben der Oberrheinebene und dem Mittleren Neckartal handelt es sich dabei um das Bodenseebecken samt dem nördlich angrenzenden Schussenbecken. Innerhalb der Region Bodensee-Oberschwaben gelten aber auch die Täler der Donau und ihrer Nebenflüsse als schlecht durchlüftet (vgl. Kap. 3 und Anhang Karte 19).

Bei windschwachen Strahlungswetterlagen kommt es hier häufig zur Ausbildung von Inversionen. Durch den damit verbundenen reduzierten vertikalen und horizontalen Luftaustausch verschlechtern sich die luftgigienischen Verhältnisse. In größeren Städten können so Belastungssituationen entstehen (vgl. Kap. 2).

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. Während solche Windsysteme im Rahmen regionaler Klimaprojekte in der Oberrheinebene und im Raum Stuttgart über Jahrzehnte intensiv untersucht wurden, sind in der Region Bodensee-Oberschwaben bislang nur relativ geringe Kenntnisse über lokale Windsysteme vorhanden. Im Vergleich etwa zum Schwarzwald-Westrand mit den großen Höhenunterschieden und entsprechend mächtigen Berg-Tal-Windsystemen (z.B. Höllentäler bei Freiburg) sind hier die Reliefverhältnisse wesentlich bescheidener, so dass nicht zwangsläufig mit einem häufigen und kräftigen Auftreten solcher Phänomene zu rechnen ist.

Eine besondere Situation ergibt sich durch die große Wasserfläche des Bodensees. Aus der Literatur ist bekannt, dass sich zumindest im ufernahen Bereich dadurch regelmäßig ein Land-See-Windsystem ausbildet, das seinerseits für einen zusätzlichen Luftaustausch sorgen kann.

4.1 Fragestellungen

Dadurch ergeben sich folgende konkrete Fragestellungen, die für die Klimaanalyse von zentraler Bedeutung sind:

- Gibt es in der Region nächtliche Kalt- und Frischluftströme aus Tälern (nächtliche Bergwinde, Talabwinde) bzw. an Hängen (Hangabwinde)? Wenn ja:
- Mit welchen Häufigkeiten und Intensitäten treten sie auf?
- Wie weit reichen sie in die jeweiligen Vorländer hinein?
- Mit welchen vertikalen Mächtigkeiten ist dabei zu rechnen?
- Wie verzahnen sie sich nächtliche Bergwinde und Hangabwinde untereinander?
- Wie verzahnen sich Hangwind- und Talwindssysteme ggf. mit dem Land-See-Windsystem des Bodensees?
- Wo ist mit starken bodennahen Inversionen (Kaltluftseen) zu rechnen?
- Wo liegen bedeutende Frischluft 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?

Somit hat die Klimaanalyse das übergeordnete Ziel, klimakritische Bereiche flächendeckend zu ermitteln und entsprechende Handlungsstrategien vorzuschlagen. Dabei ist auf eine praktische Anwendbarkeit zu achten. Die Ergebnisse sollen für die Landschaftsrahmen- und Re-

gionalplanung sowie die kommunale Bauleitplanung verwertet werden können, indem eine Bewertung hinsichtlich planungsrelevanter Belange vorgenommen wird. Insbesondere gilt es, Grundlagen für die Abgrenzung landschaftlicher Raumeinheiten zu schaffen, aus denen verbindliche Festlegungen im Zuge der Regionalplan-Fortschreibung abgeleitet werden können (Regionale Grünzüge und Grünzäsuren). Der Bewertung von Freiflächen kommt deshalb eine besondere Bedeutung zu.

4.2 Konzeption

Um zu einer möglichst großmaßstäblichen Darstellung klimakritischer Bereiche zu kommen, wurde im Rahmen von REKLIBO ein zweiteiliger Ansatz entwickelt und verfolgt.

Eine flächendeckende Analyse der klimatischen Situation in der Gesamtregion wird 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 (vgl. Band 2).

Um die Modellergebnisse zu überprüfen, werden gezielte Messprogramme in den klimakritischen Bereichen der Region durchgeführt. Diese Messungen ermöglichen ihrerseits weitergehende Aussagen zur lokalen Durchlüftungssituation in den ausgewählten Teilgebieten (vgl. Band 3).

Eine zusammenfassende Darstellung der Modellergebnisse und der wesentlichen Messergebnisse erfolgt in Form von Klimaanalysekarten. Als hilfreiche Ergänzung für die Auswertung der Klimaanalysekarten dienen Analysemethoden zur Bestimmung siedlungsrelevanter Kaltlufteinzugsgebiete und Luftleibahnen, die auf den Daten der verwendeten Rechenmodelle basieren (vgl. Band 2).

Um eine praktische Anwendbarkeit der erzeugten Ergebnis- und Analysekarten zu erreichen, werden die genauen Inhalte und Darstellungsformen in enger Abstimmung zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer festgelegt.

4.3 Anwendungsbereiche

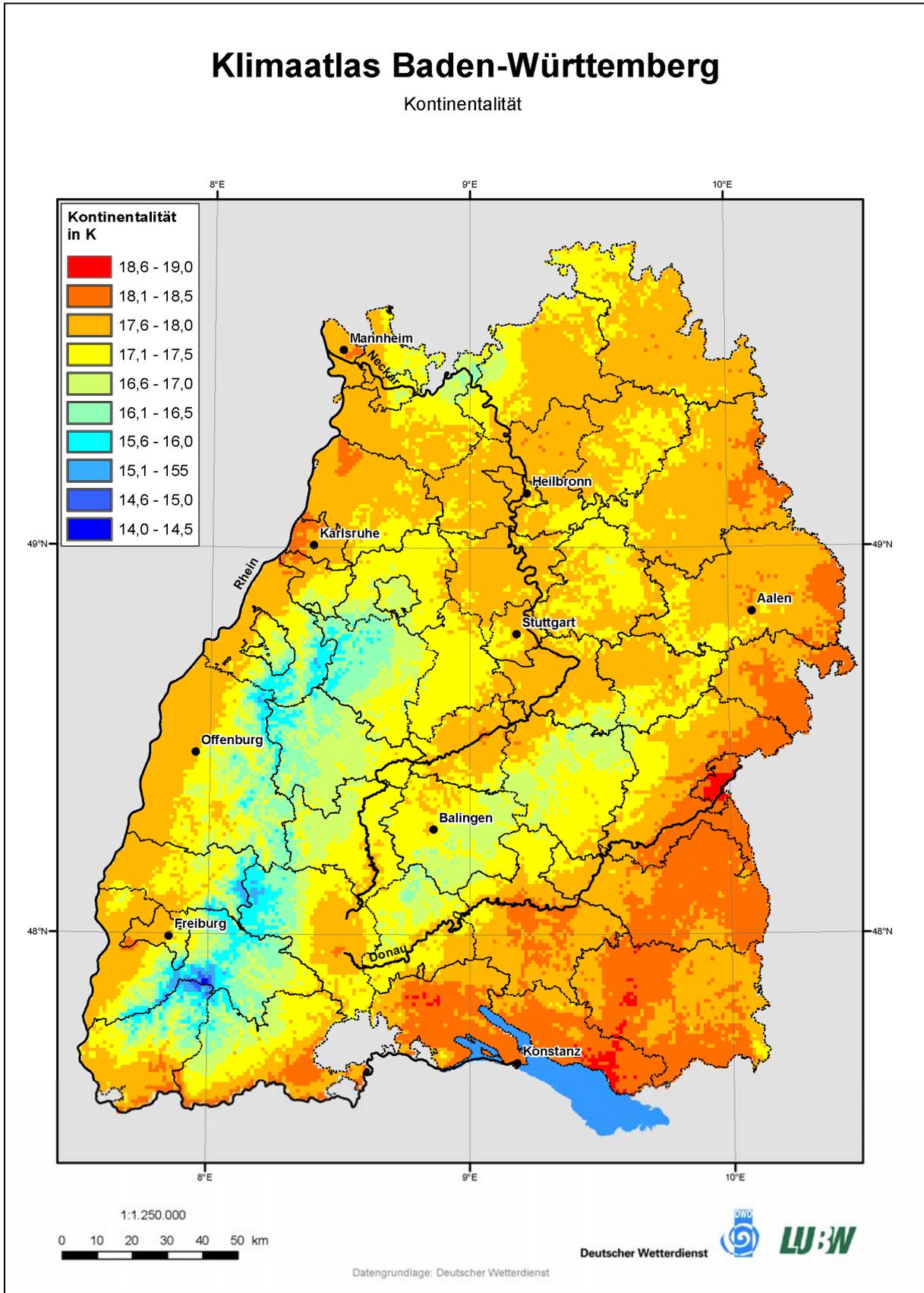
Die Ergebnisse der regionalen Klimaanalyse stellen eine wichtige Bewertungsgrundlage für den Landschaftsrahmen- und Regionalplan (Regionale Grünzüge und Grünzäsuren) sowie die kommunale Bauleitplanung (Landschaftsplan) dar. Für die Bewertung von Einzelbauvorhaben sind die in den Karten dargestellten 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.

5 Literatur

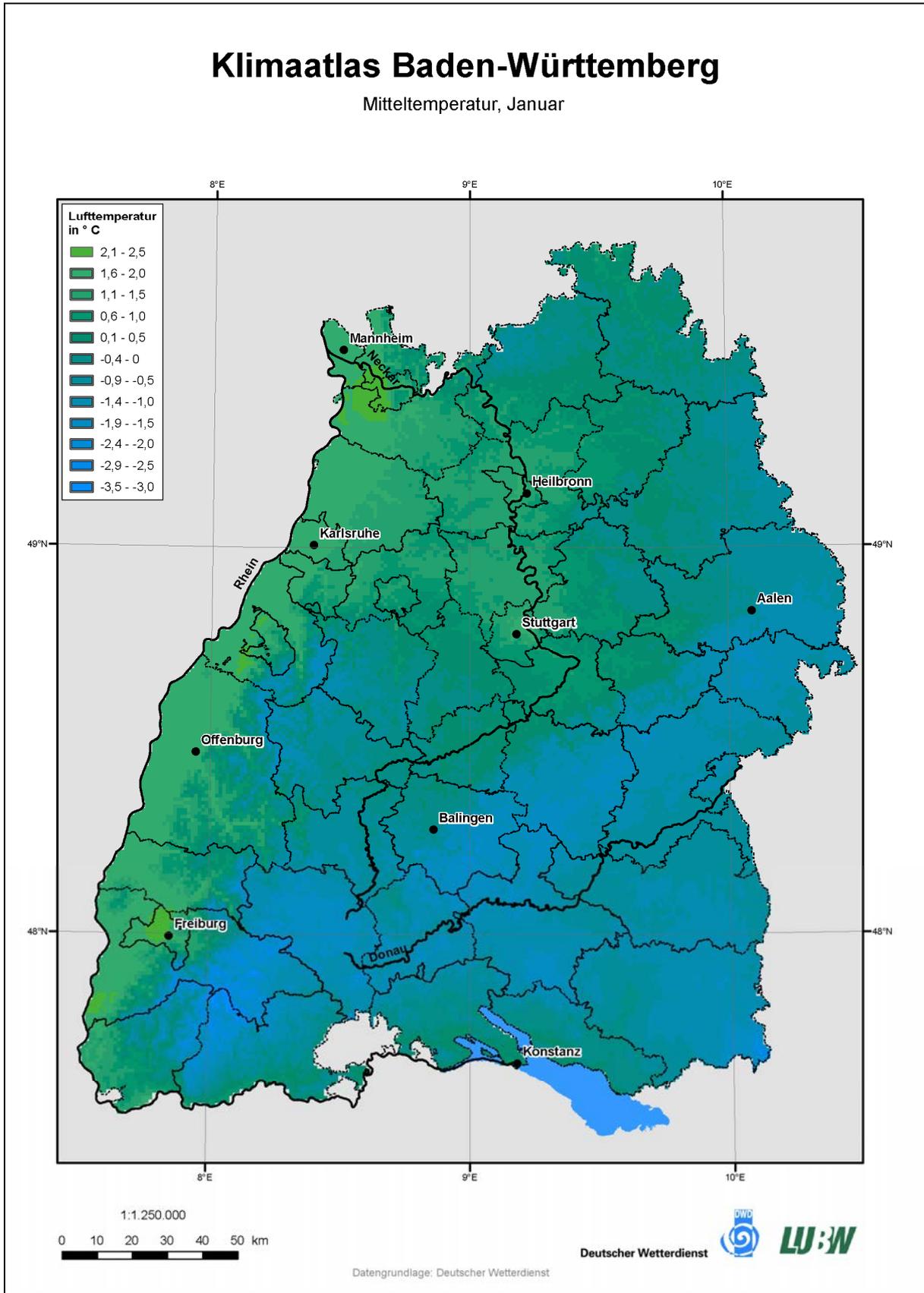
- BAUER, J. et al (2002): Physische Geographie kompakt. – Heidelberg.
- BENDIX, J. (2004): Geländeklimatologie. – Berlin, Stuttgart.
- GEBHARDT, H. (Hrsg.) (2008): Geographie Baden-Württembergs. Raum, Entwicklung, Regionen. = Schriften zur politischen Landeskunde Baden-Württembergs, Bd. 36. – Stuttgart.
- GLASER, R., GEBHARD, H. u. SCHENK, W. (2007): Geographie Deutschlands. – Darmstadt.
- GOSSMANN, H. (1988): Die Atmosphäre. Physikalische Grundlagen, Wetterabläufe und Planetarische Zirkulation. – In: NOLZEN, H. (Hrsg.): Handbuch des Geographie-Unterrichts, Bd 10/1: Physische Geofaktoren. – Köln.
- HÄCKEL, H. (1999): Meteorologie. 4. Auflage. – Stuttgart.
- INNENMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG (2004): Städtebauliche Klimafibel – Hinweise für die Bauleitplanung. Aktualisierte Online-Version der gedruckten Fassung (herausgegeben vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (1998)) - (www.staedtebauliche-klimafibel.de)
- KLIMAATLAS BADEN-WÜRTTEMBERG (2006): Hrsg.: LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz. – Mannheim.
- LEIBNITZ-INSTITUT FÜR LÄNDERKUNDE (Hrsg.) (2003): Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland. Klima, Pflanzen- und Tierwelt. – Heidelberg, Berlin.
- LUBW - LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ (Hrsg.) (2006): Klimaatlas Baden-Württemberg, CD-ROM. – Mannheim. Online-Version: www.lubw.baden-wuerttemberg.de
- LUBW - LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ (Hrsg.) (2009): Daten- und Kartendienst der LUBW. (www.lubw.baden-wuerttemberg.de, Zugriff: 10.01.2009)
- MATHYS, H., MAURER, R., MESSERLI, B., WANNER, H. u. WINNIGER, M. (1980): Klima und Lufthygiene im Raum Bern. – Veröffentlichungen der geographischen Kommission 7. – Bern.
- MEYNEN, E. und J. SCHMITHÜSEN (Hrsg.) (1962): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands 1953-62. – Bad Godesberg.
- MÜHR, B. (2009): Klimadiagramme weltweit. www.klimadiagramme.de (Zugriff: 15.06.2009)
- NATIONALATLAS DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (2003): Klima, Pflanzen- und Tierwelt. Hrsg.: Leibniz-Institut für Länderkunde. - Heidelberg, Berlin.
- 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.
- ROSNER, H.-J. (2008): Landschaftliche Großeinheiten, Klima, Hydrologie und Böden von Baden-Württemberg. In: Gebhardt, H. (Hrsg.): Geographie Baden-Württembergs. Raum, Entwicklung, Regionen. – Stuttgart.
- SCHÖNWIESE, C.-D. (2003): Klimatologie. 2. Auflage. – Stuttgart.
- SCHWAB, A. (2008): Die Flussgeschichte der Donau – ein erdgeschichtlicher Krimi. In: Bund für Naturschutz in Oberschwaben 2008) e.V. und Naturschutzzentrum Bad Wurzach (Hrsg.): Oberschwaben Naturnah, Jahreshaft 2008, S. 43-50.
- SIEVERS, U. (2005): Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21. Theoretische Grundlagen, Anwendung und Handhabung des PC-Modells. = Berichte des DWD, H. 227. – Offenbach.
- STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (2009): Landesinformationssystem, <http://www.statistik-bw.de>, Zugriff: 22.06.2009
- VERBAND REGION STUTTART (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.
- WALTHER, H. M. (1999): Einfluss der thermischen Bedingungen auf die tägliche Mortalität in Baden-Württemberg. Institut für Meteorologie und Klimaforschung Universität Karlsruhe (TH) Forschungszentrum Karlsruhe.
- WELLER, Friedrich (2001): Vermindert der Bodensee die Frostgefahr in seinem Umland? – In: Schriften des Vereins für Geschichte des Bodensees und seiner Umgebung, Heft 119, 2001.

6 Anhang zu Band 1: Karten zur klimatischen Einordnung des Untersuchungsraumes:

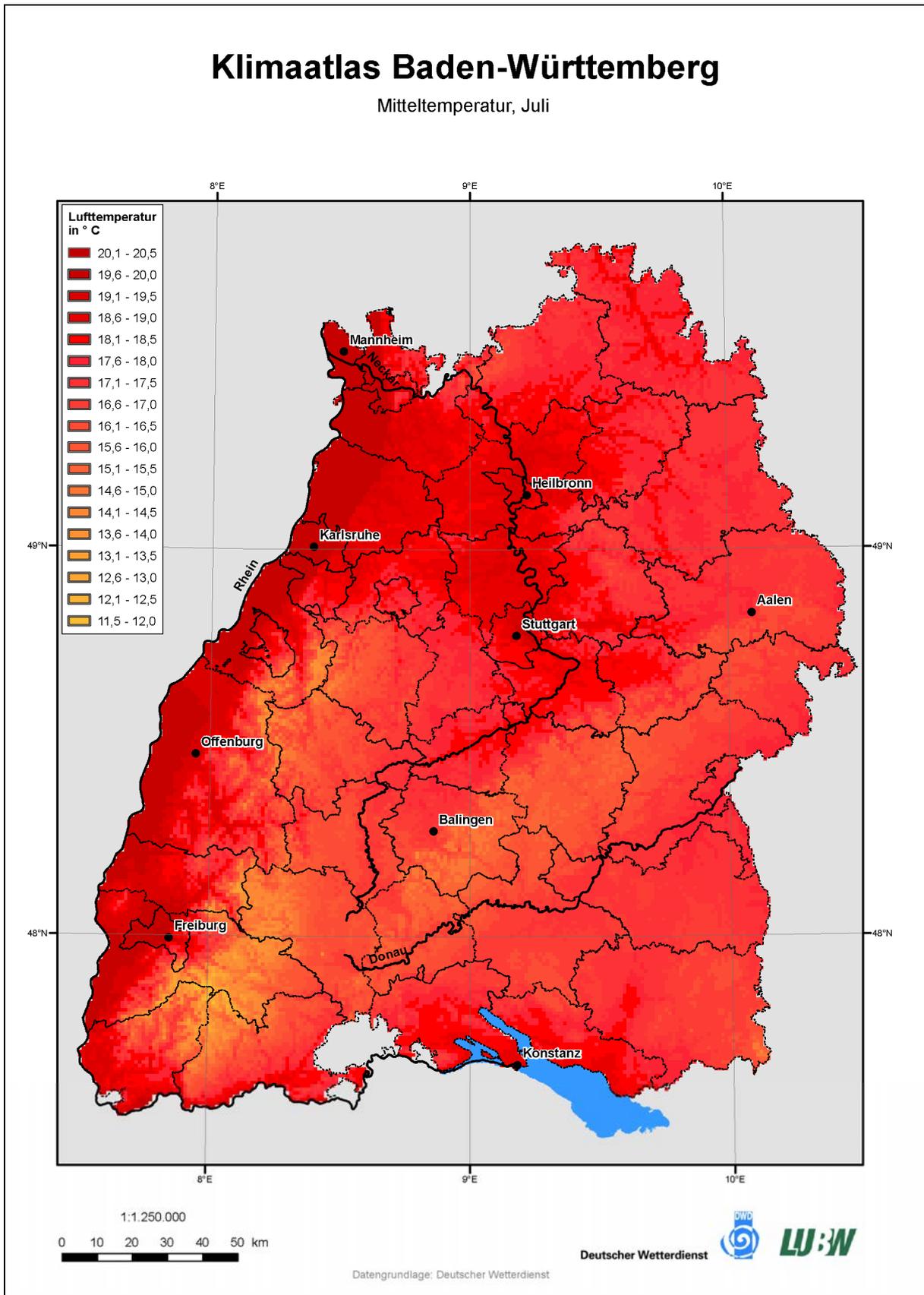
- Karte 1: Kontinentalität als Jahresschwankung der Lufttemperatur (LUBW, 2006).
- Karte 2: Mitteltemperatur, Januar (LUBW, 2006)
- Karte 3: Mitteltemperatur, Juli (LUBW, 2006)
- Karte 4: Mitteltemperatur, Jahr (LUBW, 2006)
- Karte 5: Anzahl der Sommertage (LUBW, 2006)
- Karte 6: Anzahl der Frosttage (LUBW, 2006)
- Karte 7: Mittlere Sonnenscheindauer im Januar (LUBW, 2006)
- Karte 8: Mittlere Sonnenscheindauer im Juli (LUBW, 2006)
- Karte 9: Mittlere jährliche Sonnenscheindauer (LUBW, 2006)
- Karte 10: Mittlere Jahressummen der Globalstrahlung (LUBW, 2006)
- Karte 11: Niederschlagshöhe im Jahr (LUBW, 2006)
- Karte 12: Nebelstruktur (LUBW, 2006)
- Karte 13: Nebelhäufigkeit (Nationalatlas Deutschland, S. 51)
- Karte 14: Bodennahe Windverhältnisse in Deutschland: Mittlere jährliche Windgeschwindigkeit sowie vorherrschende Windrichtungen in 10 m über Grund (Nationalatlas, S. 53)
- Karte 15: Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund in Baden-Württemberg (LUBW, 2006)
- Karte 16: Stärkewindrosen der LUBW-Messstationen im Untersuchungsraum (LUBW, 2006)
- Karte 17: Synthetisches Stärkewindrosen der LUBW im Untersuchungsraum (LUBW, 2006)
- Karte 18: Minimumtemperaturinversionshäufigkeit (LUBW, 2006)
- Karte 19: Durchlüftungsverhältnisse (LUBW, 2006)
- Karte 20: Mittlere Anzahl der Tage mit Kältereiz im Winterhalbjahr (LUBW, 2006)
- Karte 21: Mittlere Anzahl der Tage mit Wärmebelastung im Sommerhalbjahr (LUBW, 2006)



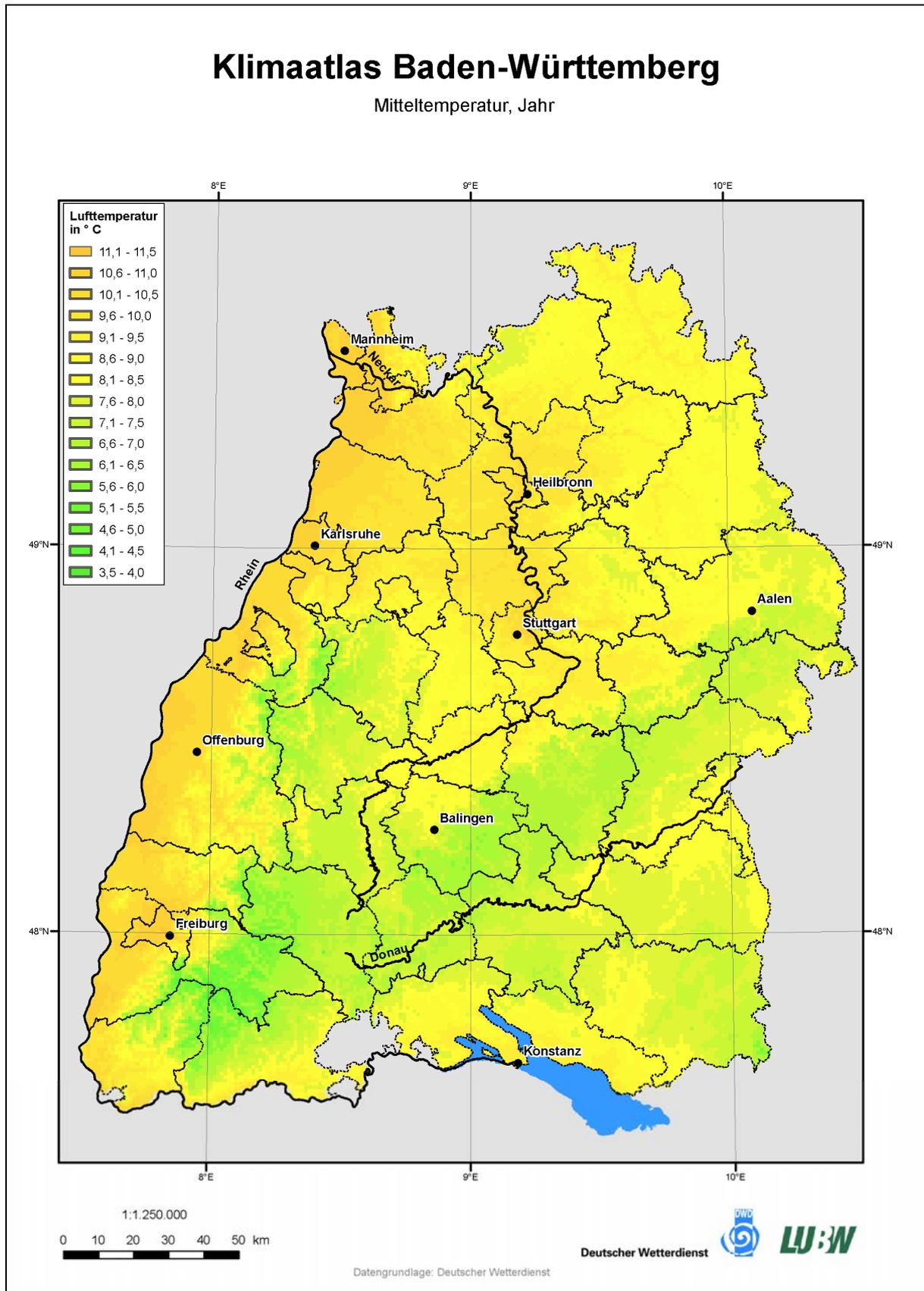
Karte 1: Kontinentalität als Jahresschwankung der Lufttemperatur in Baden-Württemberg (LUBW, 2006).



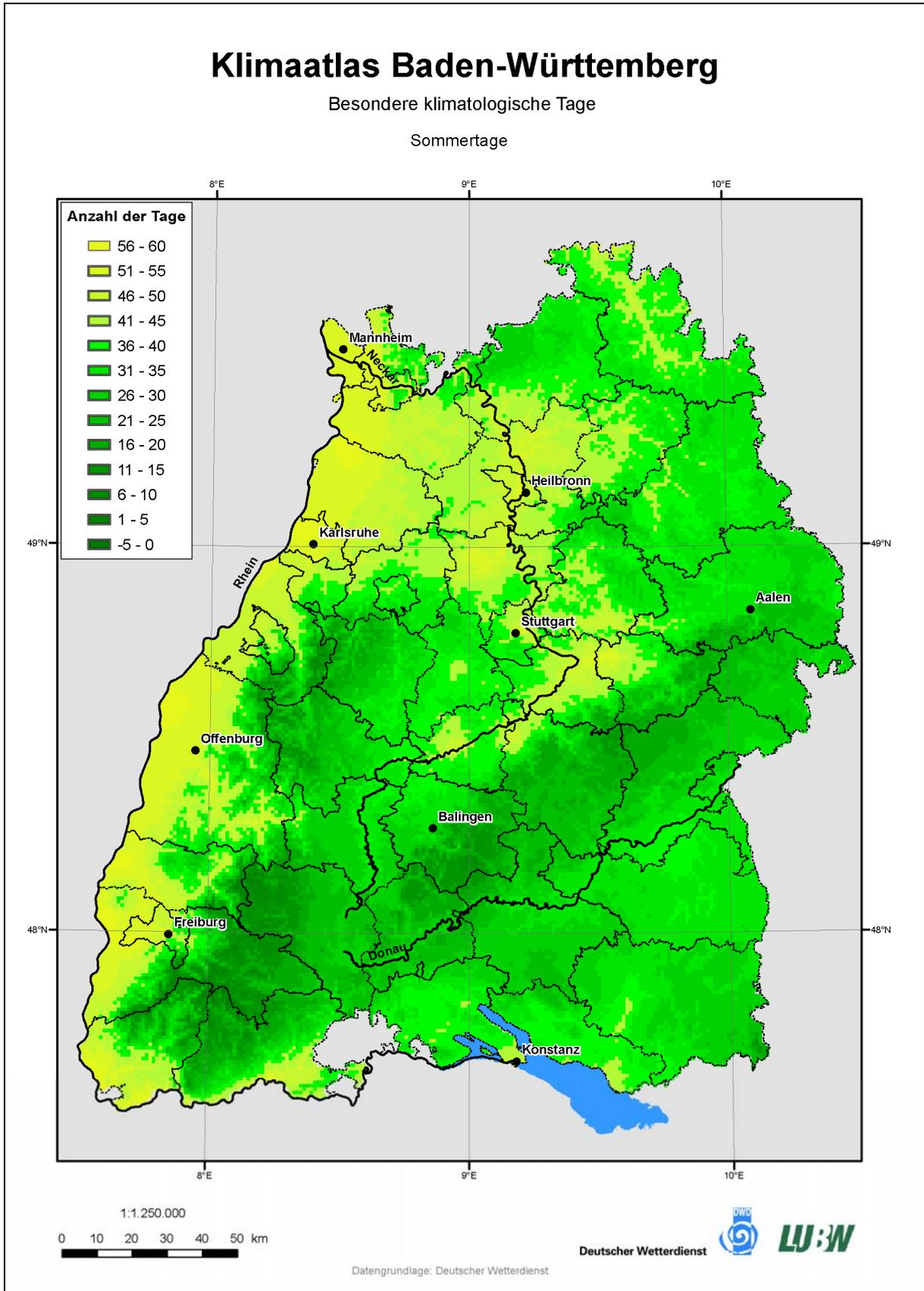
Karte 2: Mittelwert der Lufttemperaturen im Januar in Baden-Württemberg (LUBW, 2006).



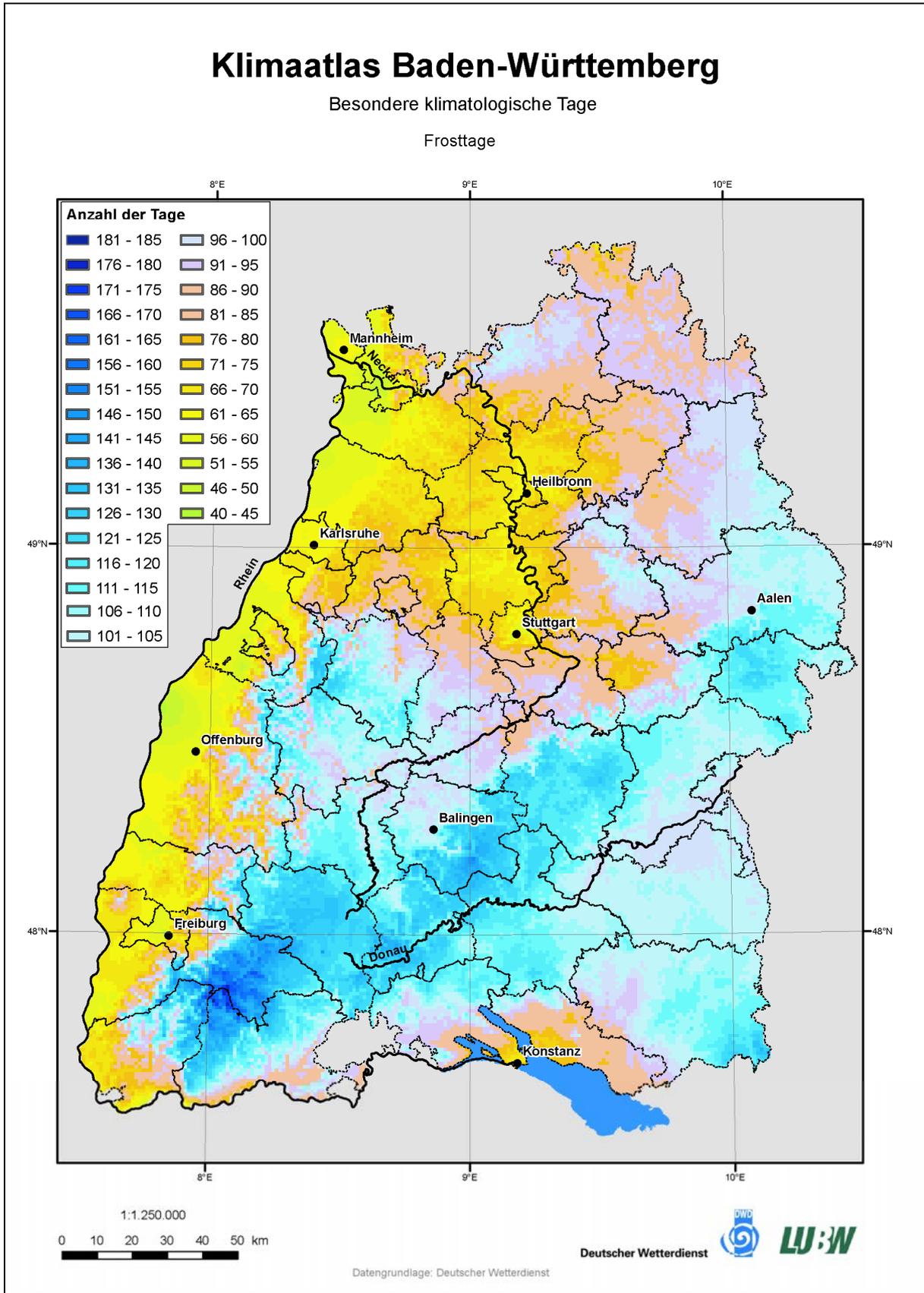
Karte 3: Mittelwert der Lufttemperaturen im Juli in Baden-Württemberg (LUBW, 2006).



Karte 4: Jahresmittelwerte der Lufttemperatur in Baden-Württemberg (LUBW, 2006).



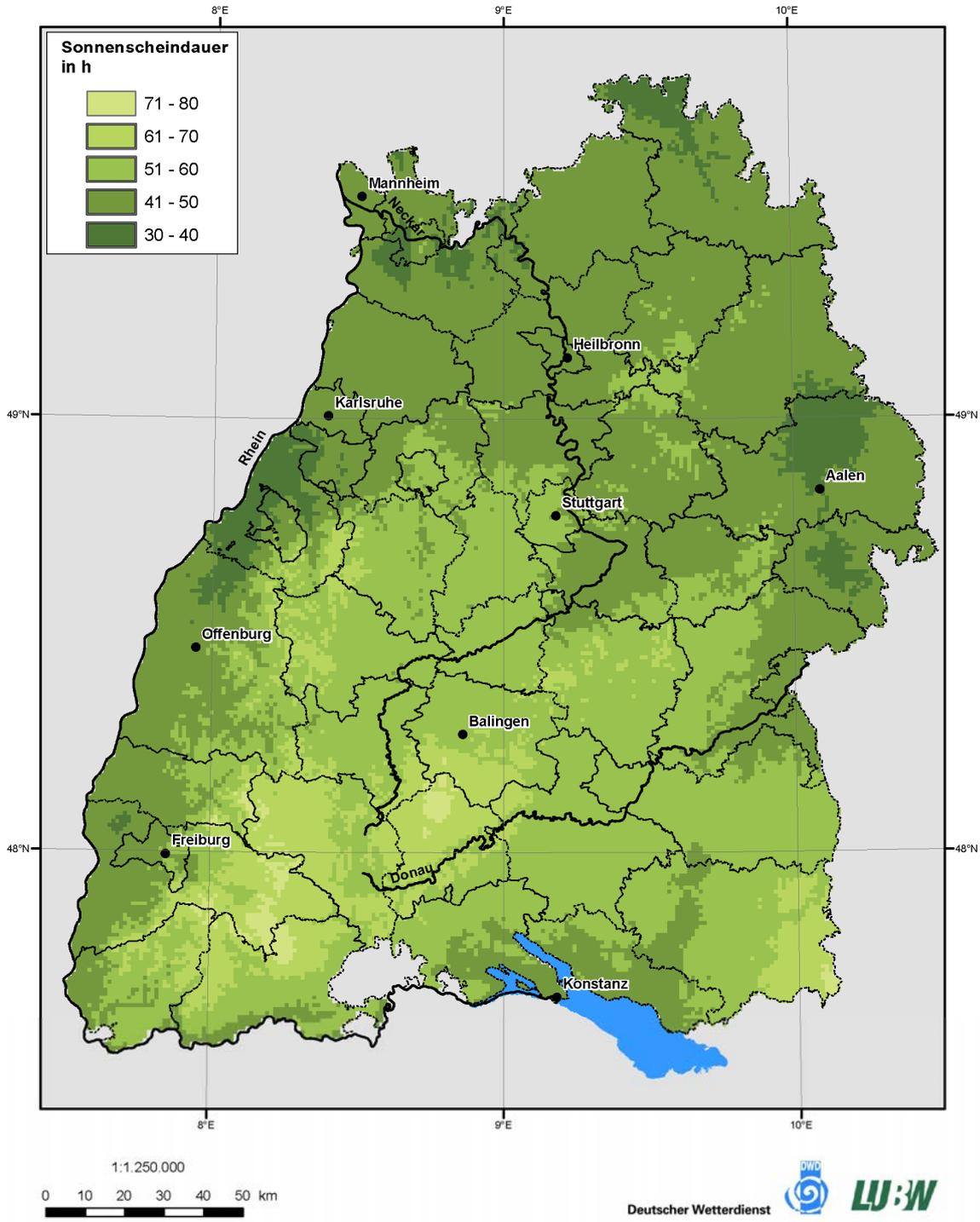
Karte 5: Anzahl der Sommertage in Baden-Württemberg (LUBW, 2006).



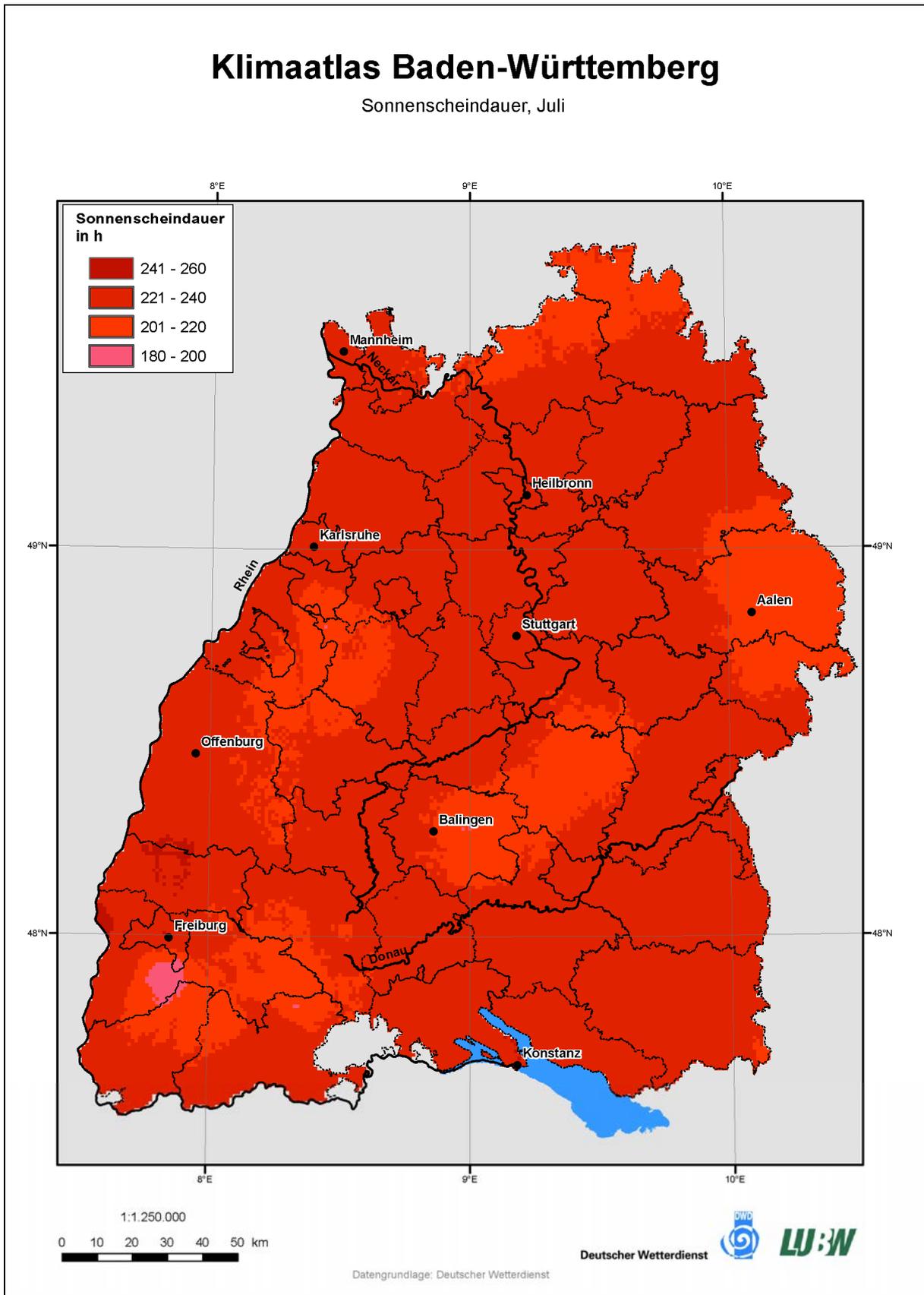
Karte 6: Anzahl der Frosttage in Baden-Württemberg (LUBW, 2006).

Klimaatlas Baden-Württemberg

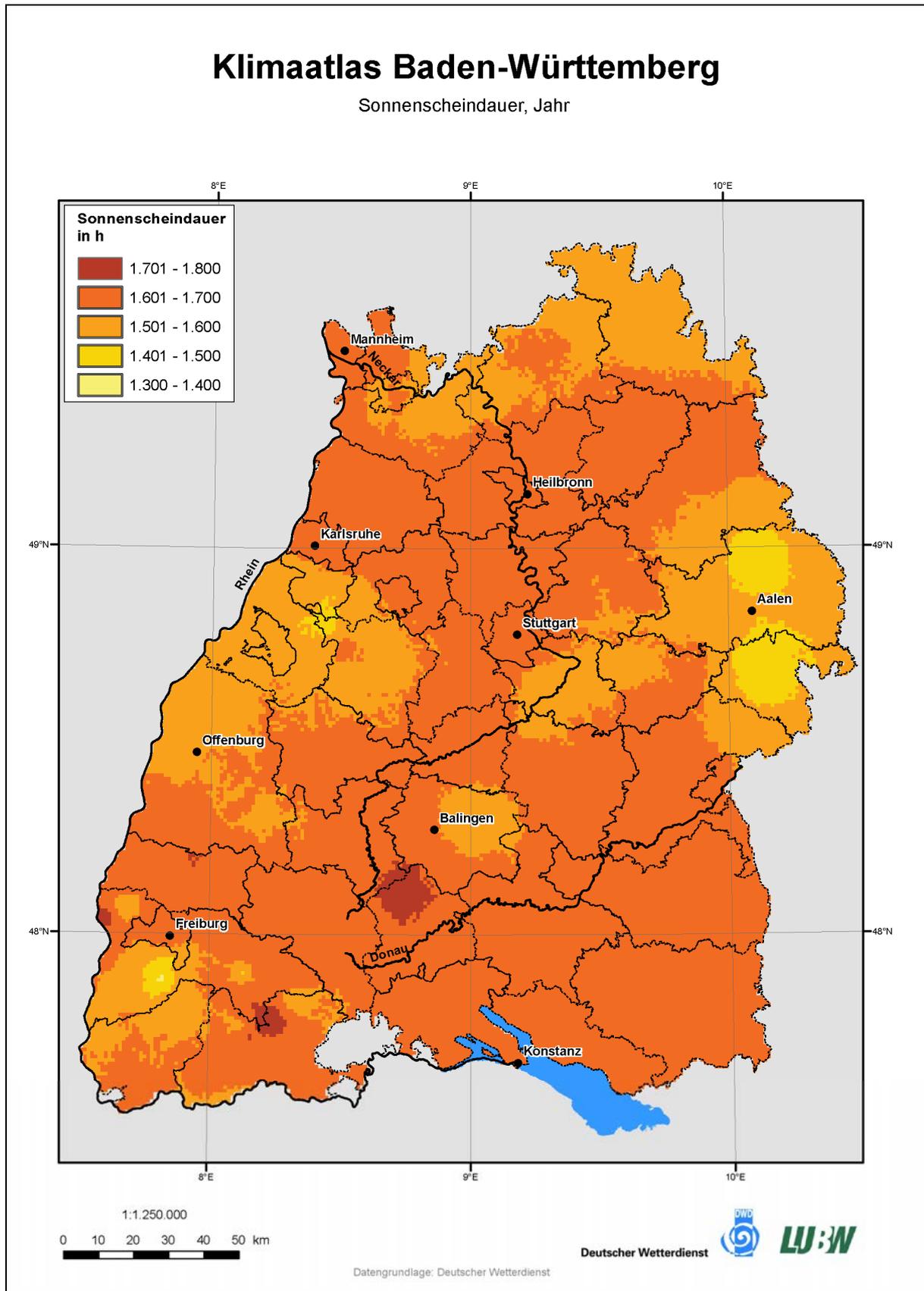
Sonnenscheindauer, Januar



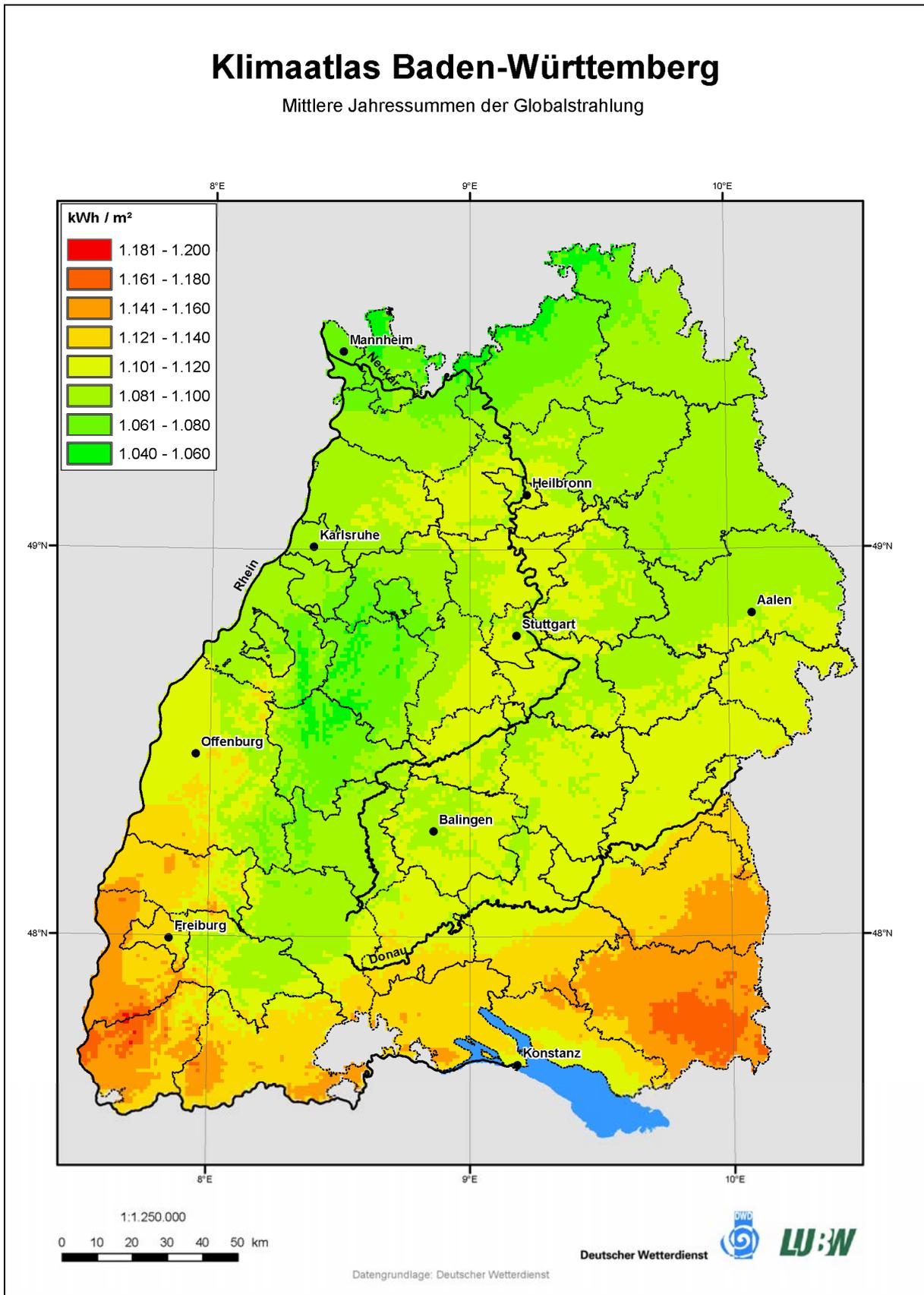
Karte 7: Sonnenscheindauer im Januar in Baden-Württemberg (LUBW, 2006).



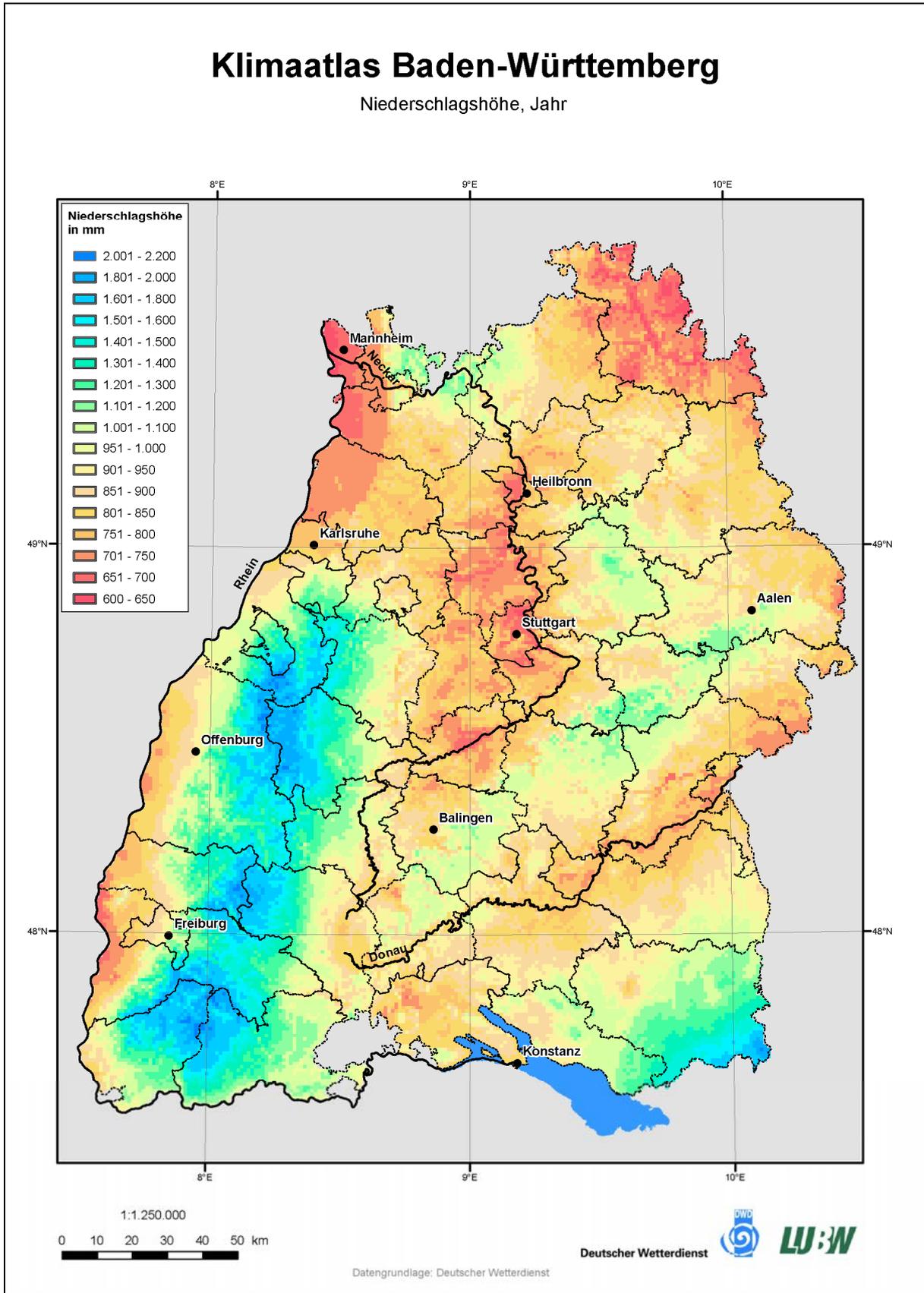
Karte 8: Sonnenscheindauer im Juli in Baden-Württemberg (LUBW, 2006).



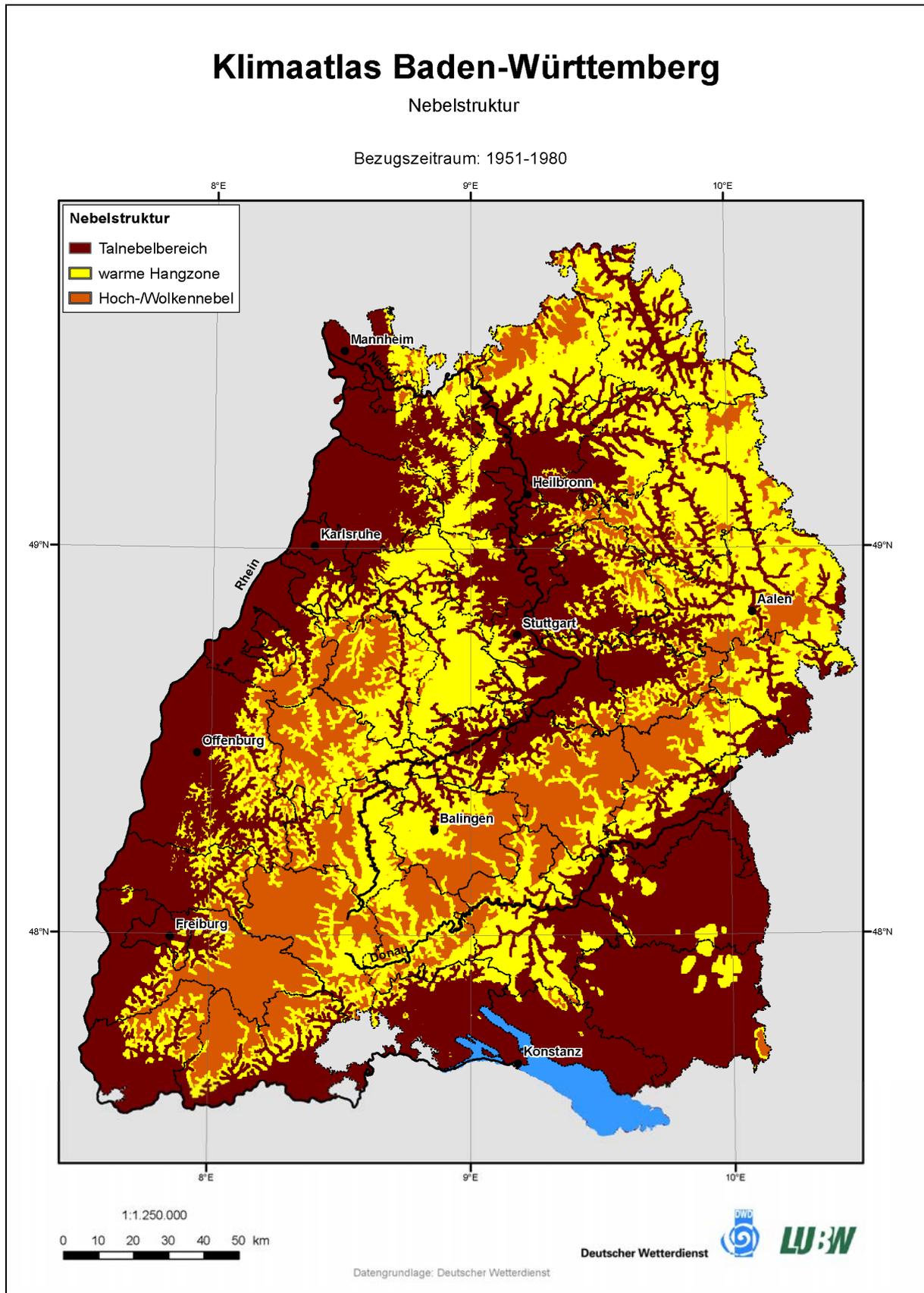
Karte 9: Jährliche Sonnenscheindauer in Baden-Württemberg (LUBW, 2006).



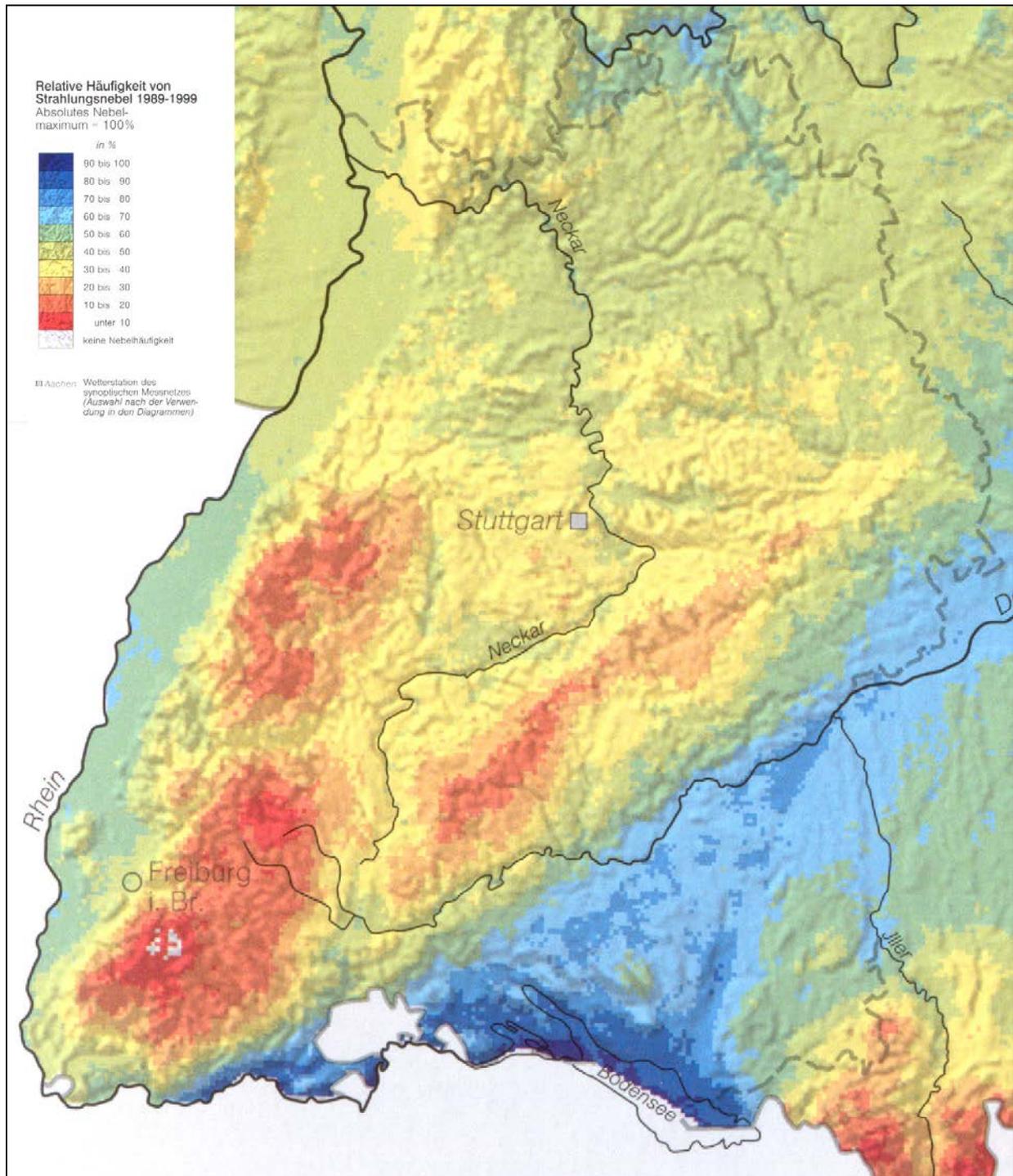
Karte 10: Mittlere Jahressummen der Globalstrahlung in Baden-Württemberg (LUBW, 2006).



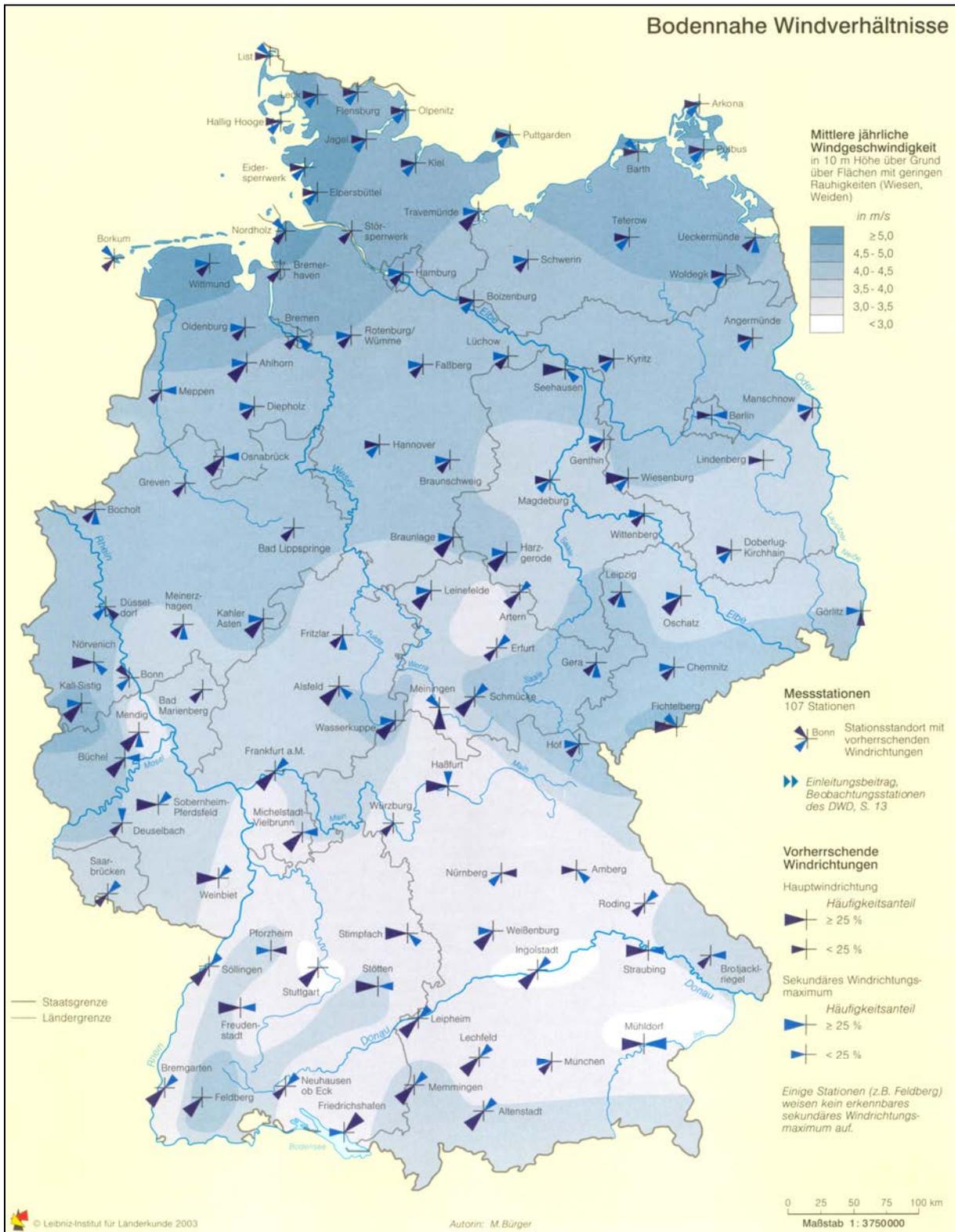
Karte 11: Jährliche Niederschlagshöhe in Baden-Württemberg (LUBW, 2006).



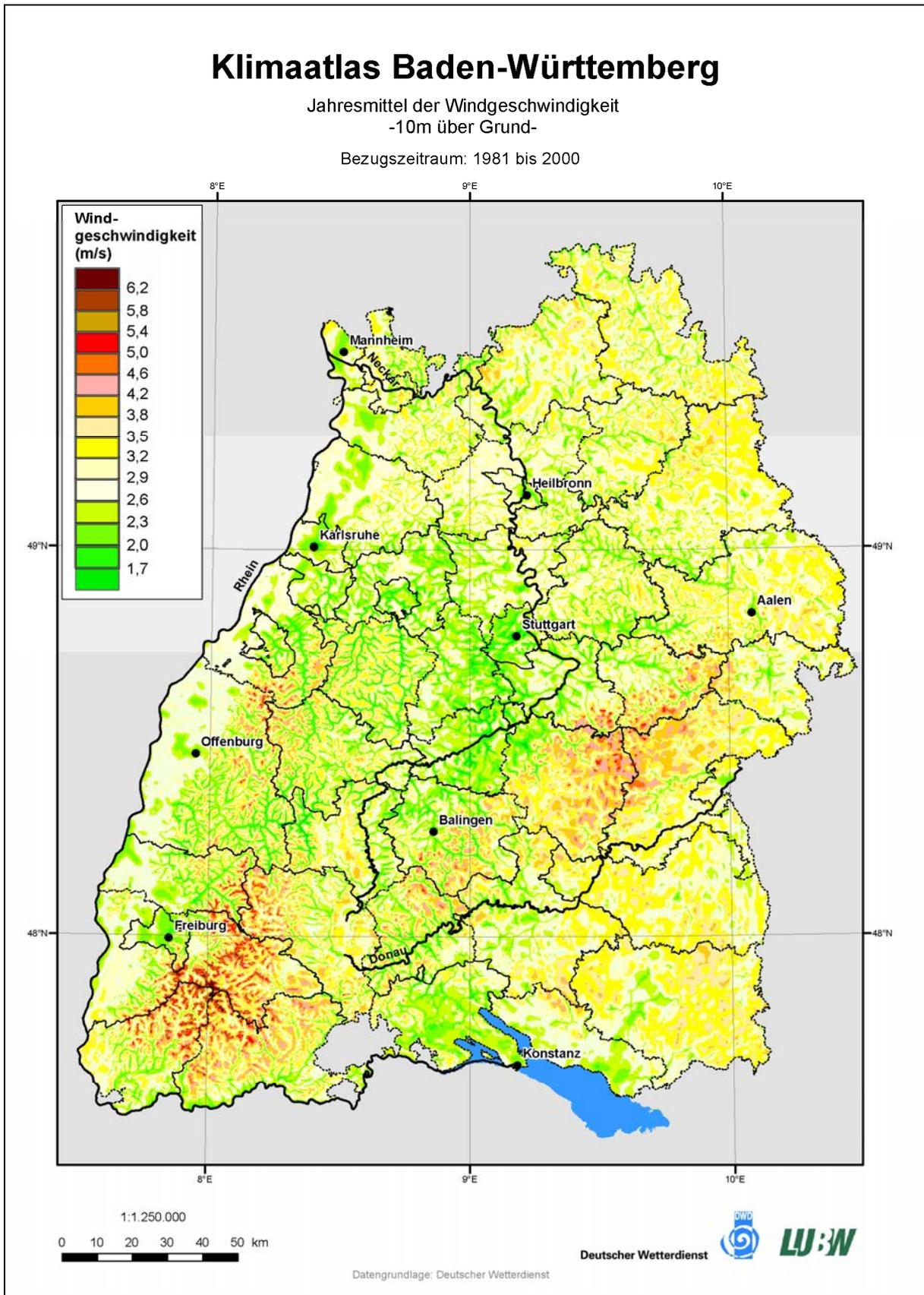
Karte 12: Nebelstruktur in Baden-Württemberg (LUBW, 2006).



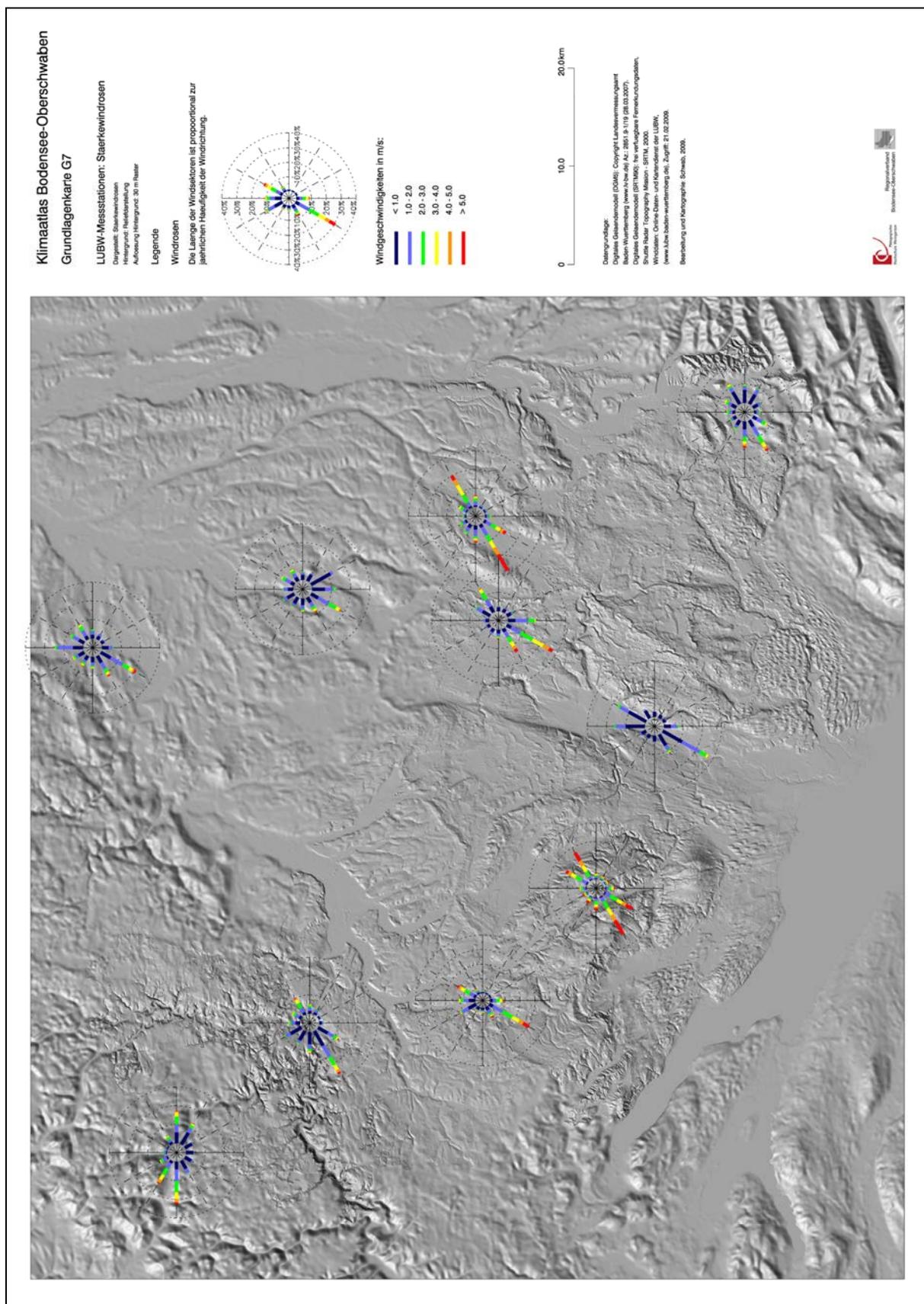
Karte 13: Relative Häufigkeit von Strahlungsnebel (Ausschnitt aus: Nationalatlas, 2003).



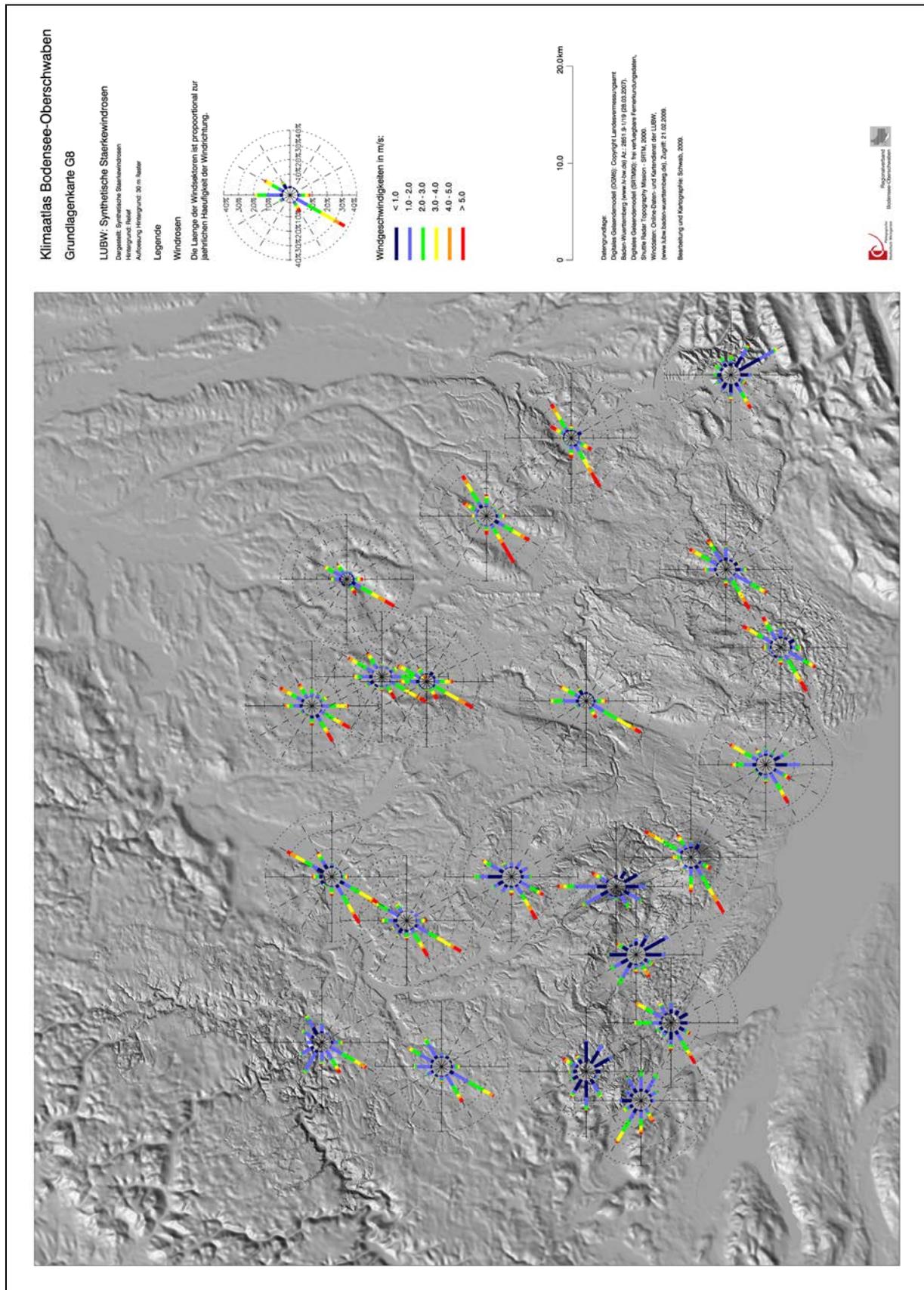
Karte 14: Bodennahe Windverhältnisse in Deutschland (aus: Nationalatlas, 2003).



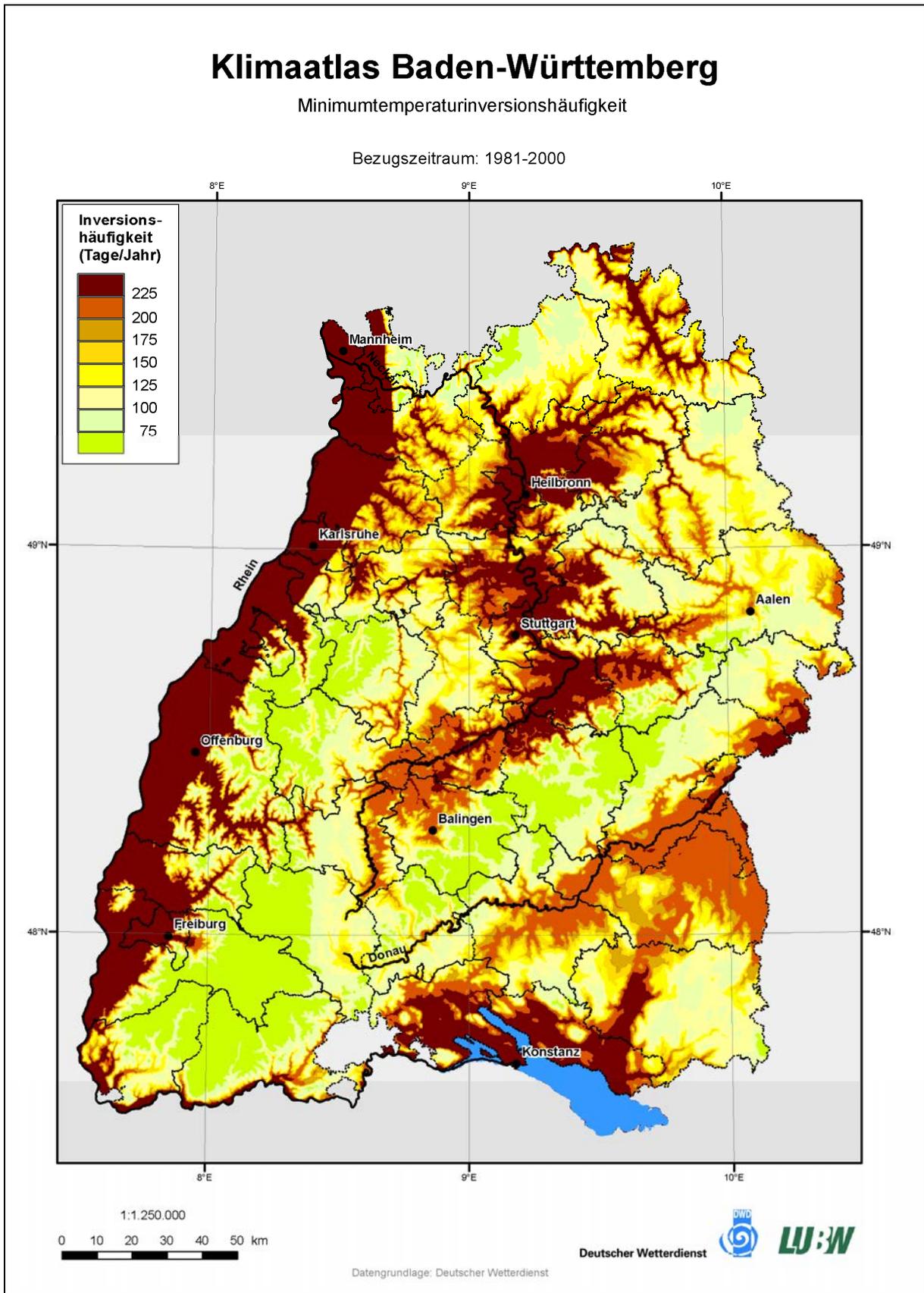
Karte 15: Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in Baden-Württemberg (LUBW, 2006).



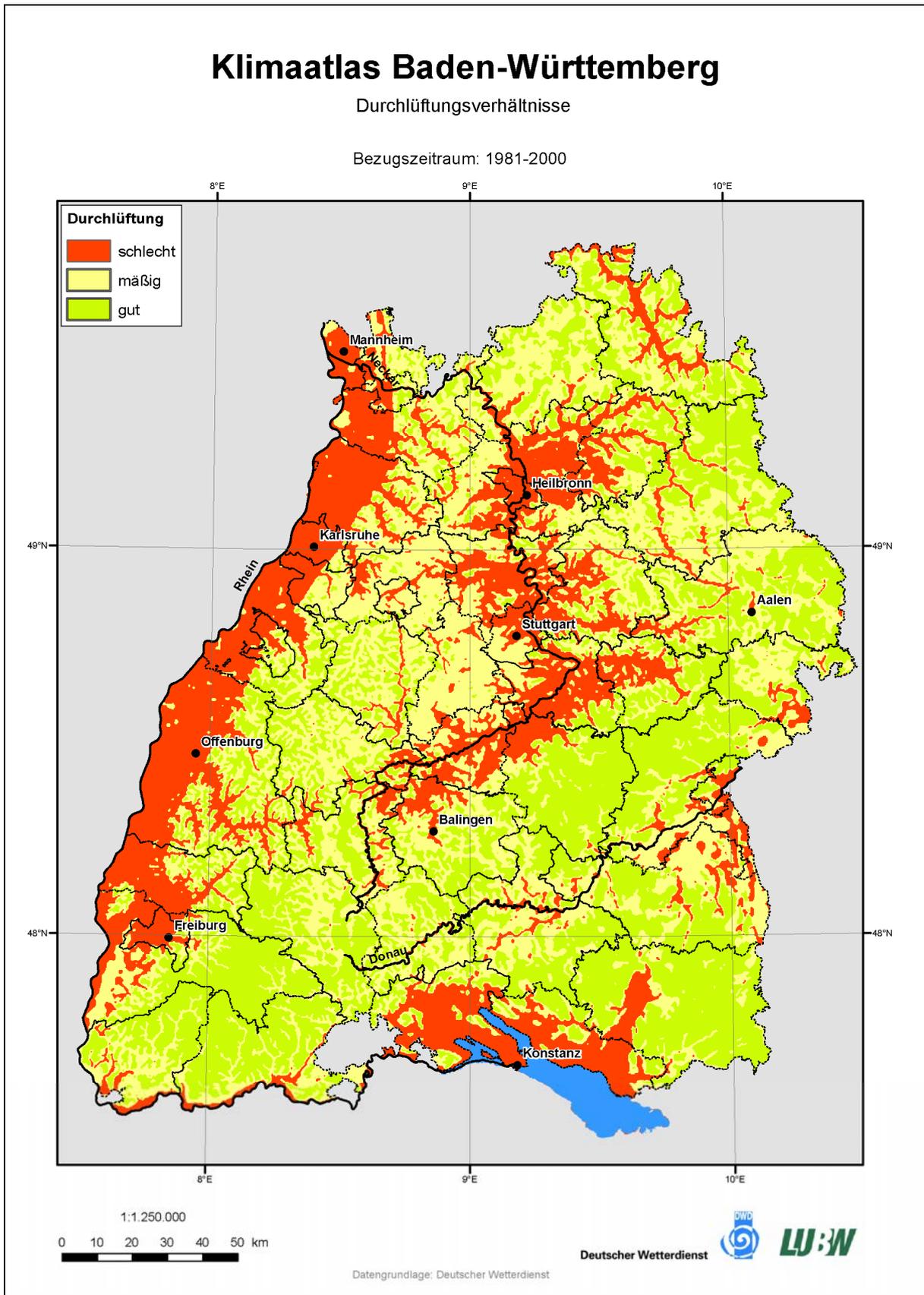
Karte 16: Stärkewindrosen der LUBW-Messstationen im Untersuchungsraum (LUBW, 2009). (=Karte G7 im eigentlichen Kartenteil der Klimaanalyse).



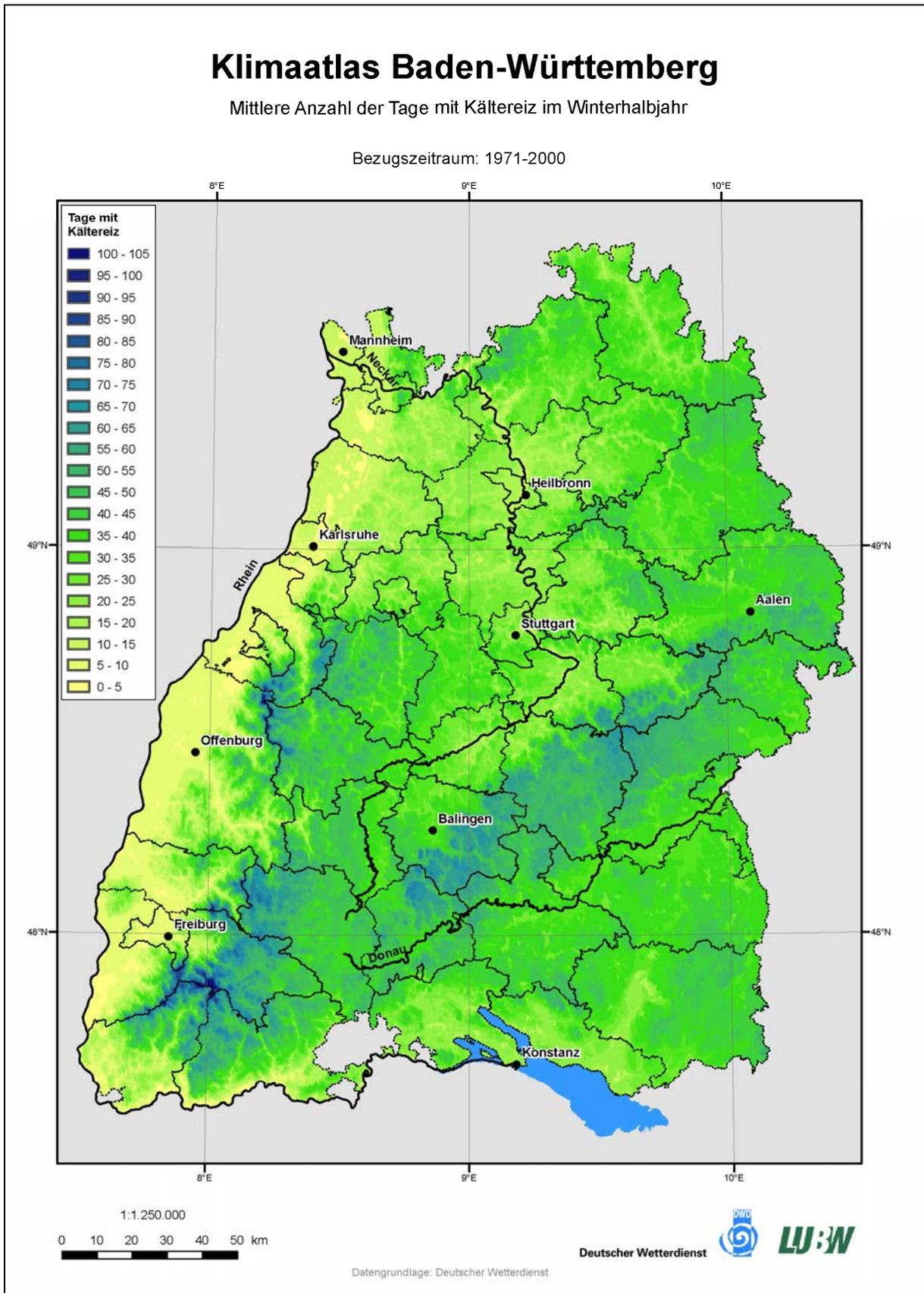
Karte 17: Synthetische Stärkewindrosen der LUBW im Untersuchungsraum (LUBW, 2009). (=Karte G8 im eigentlichen Kartenteil der Klimaanalyse).



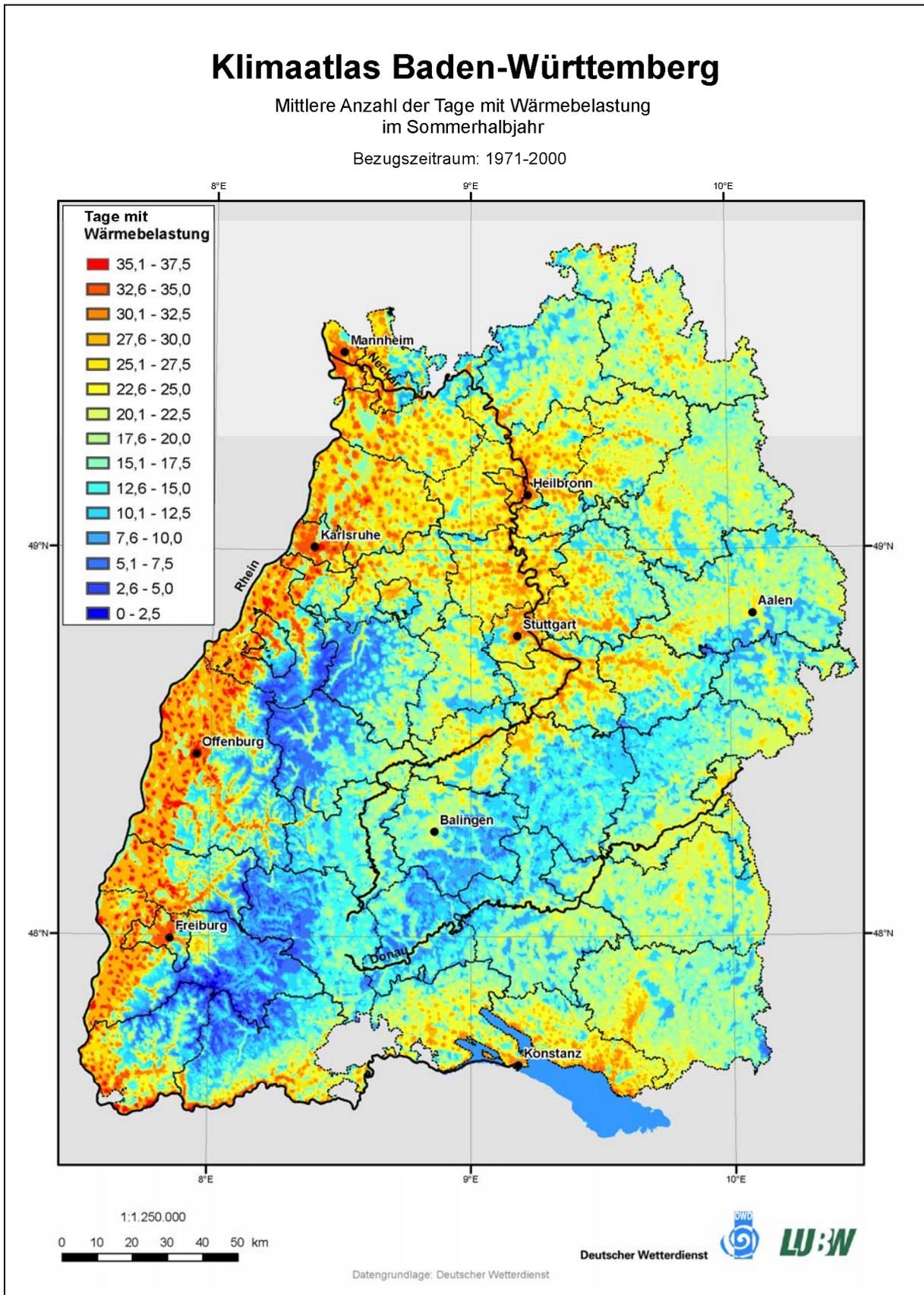
Karte 18: Minimumtemperaturinversionshäufigkeit (LUBW, 2006).



Karte 19: Durchlüftungsverhältnisse (LUBW, 2006).



Karte 20: Mittlere Anzahl der Tage mit Kältereiz im Winterhalbjahr (LUBW, 2006).



Karte 21: Mittlere Anzahl der Tage mit Wärmebelastung im Sommerhalbjahr (LUBW, 2006).