

# PIK Report

---

No. 99

**KLARA**

**KLIMAWANDEL - AUSWIRKUNGEN,  
RISIKEN, ANPASSUNG**

Manfred Stock  
(Hrsg.)



---

POTSDAM INSTITUTE  
FOR  
CLIMATE IMPACT RESEARCH (PIK)

---



Das Verbundvorhaben KLARA wurde von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) im Rahmen des Werkvertrages B.-Nr. 50047467/23 gefördert.

Die Projektleitung und die Koordination übernahm das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.

Ansprechpartner:  
Dr. Manfred Stock  
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.  
PF 60 12 03, D-14412 Potsdam  
Tel.: +49-331-288-2506  
Fax: +49-331-288-2510  
E-mail: stock@pik-potsdam.de

Herausgeber:  
Prof. Dr. F.-W. Gerstengarbe

Technische Ausführung:  
U. Werner

---

POTSDAM-INSTITUT  
FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG  
Telegrafenberg  
Postfach 60 12 03, 14412 Potsdam  
GERMANY  
Tel.: +49 (331) 288-2500  
Fax: +49 (331) 288-2600  
E-mail-Adresse:pik@pik-potsdam.de

---

## ABSTRACT

The regional study KLARA, an acronym for 'Climate change - impacts, risks, Adaptation', presents results of investigations on different areas of potential vulnerability for the German federal state of Baden-Württemberg.

The areas covered are:

1. Analysis of vulnerabilities
2. Regional climate change in Baden-Württemberg
3. Possible impacts on human health
4. Impacts on agriculture including fruit-growing and viticulture
5. Impacts on forestry
6. Possible chances for tourism in the summer
7. Impacts on nature, in particular ornithology
8. Impacts on river navigation and use of hydropower
9. Development of extreme events with high damage potential

An essential objective of the study is the identification of impact-reducing measures of adaptation in the areas considered.



## VORWORT

Im Ressortbereich des Umweltministeriums Baden-Württemberg, vormals Ministerium für Umwelt und Verkehr, wurden im Verbundprojekt KLARA die möglichen Folgen des Klimawandels für das Bundesland untersucht. KLARA steht für Klimawandel, Auswirkungen, Risiken und Anpassung. Anpassung ist der Schlüsselbegriff der Studie, in der es darum geht, Prioritäten für den Umgang betroffener Teilregionen und Wirtschaftssektoren zu finden und Maßnahmen zur Verminderung vorhandener Verwundbarkeiten zu identifizieren. Das Projekt wurde vorbereitet und begleitet von einer Projektgruppe unter Federführung der Landesanstalt für Umweltschutz (LfU), die vorab die für Baden-Württemberg relevanten Themen analysiert und Hintergrundinformationen zum Klimawandel, insbesondere in Form eines Analyserasters vorgelegt hat (UVM-BW 2003, siehe Anhang).

Das Analyseraster

- fasst den bei der wissenschaftlichen Begleitung und der Projektleitung vorliegenden Kenntnisstand über bisher vorliegende Erkenntnisse und über mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf Baden-Württemberg zusammen,
- schlägt eine vorläufige Rangfolge der möglichen Auswirkungen nach ihrer Relevanz für das Land und damit für die weitere Bearbeitung in KLARA vor,
- formuliert darüber hinaus offene Fragen und Forschungsbedarf zur Konkretisierung der Problemlagen und zur Erarbeitung von Anpassungsstrategien,
- schlägt beispielhaft Anpassungsmaßnahmen gegen einzelne Auswirkungen vor.

Der vorliegende Bericht stützt sich auf dieses Analyseraster und greift einige der dort herausgearbeiteten Themen auf, die im Auftrag des LfU während einer Projektlaufzeit von fünfzehn Monaten vertieft untersucht wurden.

Die Kapitel des Berichts befassen sich schlaglichtartig mit den folgenden Themen:

1. Analyse bestehender Verwundbarkeiten
2. Regionale Ausprägung des Klimawandels in Baden-Württemberg
3. Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit
4. Auswirkungen auf Landwirtschaft und Weinbau
5. Auswirkungen auf die Forstwirtschaft
6. Auswirkungen auf den Tourismus
7. Auswirkungen auf Vogelwelt und Naturschutz
8. Auswirkungen auf Schifffahrt und Wasserkraftnutzung am Neckar
9. Entwicklungen bei Extremereignissen mit großem Schadenspotenzial

Die Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft wurden separat in einem Projekt "Klima-Veränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft" (KLIWA) untersucht und sind nicht Bestandteil dieses Berichtes (siehe dazu KLIWA 2004).

Bei solchen Verwundbarkeitsanalysen geht es nicht um die Darstellung von Katastrophenszenarien. Vielmehr sollen die Ergebnisse auf mögliche Gefährdungen und Schwachstellen hinweisen und Handlungsoptionen aufzeigen. Man sollte sich bewusst sein, dass selbst bei einem weltweit erfolgreichen Klimaschutz die zu erwartenden Auswirkungen empfindlich sein können. Hier soll die vorliegende Studie helfen, vermeidbare Risiken der Klimaveränderung für Baden-Württemberg zu erkennen und mögliche Chancen der Landesentwicklung auch im Zeichen des Klimawandels zu nutzen.

Die Ergebnisse des Verbundprojekts KLARA werden am 07.07.2005 in Stuttgart präsentiert und sind auf CD-ROM mit ergänzenden Informationen erhältlich.

Potsdam, den 30. Juni 2005

Dr. Manfred Stock

## AUTOREN

Projektleitung & Herausgeber

Dr. Manfred Stock

Kapitel 1

Dr. Manfred Stock, Oliver Walkenhorst, Clemens Haße

Kapitel 2

Prof. Dr. Friedrich-Wilhelm Gerstengarbe, PD Dr. habil. Peter C. Werner,  
Dr. Hermann Österle, Martin Wodinski

Kapitel 3

Christina Koppe, Prof. Dr. Gerd Jendritzky, Dr. Thomas Holst  
Deutscher Wetterdienst, Medizin-Meteorologie, Freiburg  
(Auszüge von Dr. Manfred Stock und Oliver Walkenhorst)

Kapitel 4

Weizen und Mais: Dr. Frank Wechsung, Dr. Valentina Krysanova  
Obstbau: Dr. Frank Wechsung, Alexa Hanspach, Dr. Lucas Menzel  
Weinbau: Dr. Thomas Kartschall, Markus Wolff, Martin Wodinski, Dr. Manfred Stock

Kapitel 5

Dr. Felicitas Suckow, Petra Lasch, Dr. Franz-W. Badeck, Ylva Hauf

Kapitel 6

Markus Wolff, Oliver Walkenhorst, Dr. Manfred Stock

Kapitel 7

Dr. Markus Peintinger (Projektkoordination), Dr. Wolfgang Fiedler, Dr. Hans-Günther Bauer,  
Siegfried Schuster (Vogelwarte Radolfzell)  
(Auszüge von Dr. Manfred Stock und Oliver Walkenhorst)

Kapitel 8

Dr. Lucas Menzel

Kapitel 9

Prof. Dr. Ch. Kottmeier, Dr. M. Kunz, T. Hofherr, N. Lichtenberger, J. Sander  
Institut für Meteorologie und Klimaforschung,  
Universität Karlsruhe (TH) / Forschungszentrum Karlsruhe  
(Auszüge von Dr. Manfred Stock und Oliver Walkenhorst)  
(Ergänzung Winterstürme von Dr. Manfred Stock)



## DANKSAGUNG

### Kapitel 1 und Bericht insgesamt

Für die Bereitstellung von Daten: © Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart. Für Diskussionen, redaktionelle Hinweise und viele Anregungen danken wir Herrn Werner Franke, LfU Baden-Württemberg und Herrn Dr. Jürgen Höß, Umweltministerium Baden-Württemberg. Ferner danken wir Frau Dagmar Schröter vom Projekt ATEAM, dem Umweltbundesamt (UBA) und Herrn Clemens Haße, Mitarbeiter des PIK an der UBA-Studie, für Hinweise und Abbildungen.

### Kapitel 2

Wir danken dem Deutschen Wetterdienst DWD für die freundliche Bereitstellung der meteorologischen Ausgangsdaten von 551 Stationen für den Zeitraum 1951-2000 für Baden-Württemberg.

### Kapitel 3

Für die Bereitstellung von Daten bedanken wir uns bei Herrn Baumann vom Statistischen Landesamt Baden-Württemberg,

### Kapitel 4

Für Diskussionen, Hinweise und Anregungen danken wir Herrn Klaus Mastel, Landesanstalt für Pflanzenbau, Forchheim. Unser besonderer Dank gilt ferner dem Kompetenzzentrum Bodensee (KOB Bavendorf) und hier im Speziellen Herrn Trautmann und Herrn Scheer für die Beratung und Bereitstellung von Boniturdaten zum Askosporen- und Falterflug sowie Herrn Zoth und Herrn Spenninger für die freundliche Auskunft in allen Pflanzungs- und Apfelbaumfragen. Des Weiteren danken wir Herrn Meinert und Herrn Maier von der Landesanstalt für Pflanzenschutz für die Möglichkeit zur Verwendung stündlicher Klimadaten für die Verifizierung unseres Modells und Herrn Kollar von der Biologischen Bundesanstalt Dossenheim (BBA) für die wissenschaftlichen Informationen und die Bereitstellung nachgewiesener Schorfinfektionsdaten.

### Kapitel 5

Die Arbeiten zur Klimasensitivität des Forstsektors wurden mit der FVA, Herrn Prof. Dr. Klaus von Wilpert, abgestimmt und als Ergänzung zu den in Baden-Württemberg laufenden Forschungsarbeiten konzipiert. Bezüglich der Level II Standorte wurde ein Datenaustausch vorgenommen. Die FVA stellte Daten zur Initialisierung von Rechnungen an den Level II Standorten und am Standort erhobene Klimadaten bereit. Am PIK wurden den Level II Flächen Klimastationen zugeordnet und an diesen Stationen Wetterzeitserien (Basisszenarium und Klimaänderungsszenarium) abgeleitet, die der FVA zur Verfügung gestellt wurden. Weitere gemeinsame Arbeiten zur Auswertung der Wasserhaushaltsrechnungen sind geplant.

### Kapitel 6

Unser Dank gilt Frau Elke Vetter, IHK Nordschwarzwald und Tourismusakademie Baden-Württemberg, Freudenstadt, für viele Hinweise und Informationen sowie der Südbaden-Bus GmbH für die freundliche Bereitstellung von Daten über Fahrgastzahlen zu "Freizeitbus Hinterzarten" und "WanderBus Wutachschlucht".

### Kapitel 7

Ohne die Mitarbeit vieler Feldornithologen wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Für Auskünfte bzw. Bereitstellung von Ankunftsdaten danken wir A. Brall, M. Dallmann, R. H. Ebenhöf, J. Einstein, K. F. Gauggel, J. Hölzinger, H. Jacoby, H. Jakober,

R. Kratzer, K. Kußmaul, H. Püschel, H. Riedinger, D. Rockenbauch, R. Schlenker, A. & W. Schmitt, W. Schnabel, H. Schonhardt, E. Seitz, R. Senk, W. Stauber, B. Ullrich, Th. Ullrich, P. Wolf. Alexandra Sproll übernahm dankenswerter Weise die Eingaben der brutbiologischen Daten. Den ehrenamtlichen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der Vogelwarte Radolfzell verdanken wir die brutbiologischen Daten. Ohne die zahlreichen Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen der Ornithologischen Arbeitsgemeinschaft Bodensee (OAB) wären die Rasterkartierungen 1980, 1990 und 2000 nicht möglich gewesen. Auch ihnen einen herzlichen Dank für das Zusammentragen dieses in Mitteleuropa fast einmaligen Datenmaterials. Nicht zuletzt möchten wir auch Roland Heinzmann (LfU Baden-Württemberg) danken, der die Arbeit initiiert und stets gefördert hat.

#### Kapitel 8

Wir danken den Herren Gerlinger und Pfaff vom Ingenieurbüro Ludwig in Karlsruhe, Herrn Bremicker von der LfU Baden-Württemberg, Frau Schneider und Herrn Bierweiler vom Wasser- und Schifffahrtsamt Heidelberg sowie Herrn Brandt vom Wasser- und Schifffahrtsamt Stuttgart.

#### Kapitel 9

Für die Radiosondendaten danken wir dem DWD und für die Bereitstellung von Daten der Elementarschadenversicherung bedanken wir uns besonders beim Vorstand der SV Sparkassen Versicherung Stuttgart.

**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
<b>VORWORT</b> .....	<b>V</b>
<b>AUTOREN</b> .....	<b>VII</b>
<b>DANKSAGUNG</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 VERWUNDBARKEIT BADEN-WÜRTTEMBERGS IM KLIMAWANDEL</b> .....	<b>1</b>
1.1 Allgemeine Zusammenfassung .....	1
1.1.1 Kapitel 1: Gesamtbild der Verwundbarkeitsanalyse .....	1
1.1.2 Kapitel 2: Klimatische Belastungen und Extreme .....	1
1.1.3 Kapitel 3: Gesundheit .....	1
1.1.4 Kapitel 4: Landwirtschaft, Obst- und Weinbau .....	2
1.1.5 Kapitel 5: Forstsektor .....	2
1.1.6 Kapitel 6: Tourismus .....	3
1.1.7 Kapitel 7: Naturschutz .....	3
1.1.8 Kapitel 8: Schifffahrt und Energieerzeugung .....	3
1.1.9 Kapitel 9: Meteorologische Ereignisse mit großem Schadenspotenzial .....	4
1.2 Ausgangsposition .....	4
1.3 Problemstellung und methodischer Ansatz .....	8
1.4 Integrierte Analyse der Verwundbarkeit und Handlungsoptionen .....	11
1.4.1 Zielsetzung .....	11
1.4.2 Bewertungsmatrix .....	12
1.4.3 Ermittlung von Potenzialen und Strategien der Anpassung .....	14
1.5 Ausblick .....	19
<b>2 KLIMATISCHE BELASTUNGEN UND EXTREME</b> .....	<b>21</b>
2.1 Zusammenfassung .....	21
2.2 Einführung .....	21
2.3 Auswahl der regionalen Klimaszenarien und Modelle .....	22
2.4 Datenbasis der Klimaszenarien .....	23
2.5 Das aktuelle Klima Baden-Württembergs .....	24
2.5.1 Einleitende Bemerkungen .....	24
2.5.2 Lufttemperatur .....	25
2.5.3 Niederschlag .....	30
2.5.4 Zusammenfassende Übersicht zur Klimaentwicklung 1951/2000 .....	34
2.6 Ergebnisse der Szenarienrechnungen .....	34
2.6.1 Das transiente Zukunftsszenarium .....	34

2.6.2 Mittlere Verhältnisse und Trends .....	35
2.6.3 Extreme und deren Veränderungen .....	42
2.7 Ausblick .....	45
<b>3 GESUNDHEITSGEFAHREN .....</b>	<b>47</b>
3.1 Zusammenfassung .....	47
3.2 Einführung .....	48
3.3 Methode .....	49
3.3.1 Exposition .....	49
3.3.1.1 <i>Gefühlte Temperatur</i> .....	50
3.3.1.2 <i>Thermische Belastungsklassen</i> .....	50
3.3.2 Sensitivität .....	52
3.3.2.1 <i>Bestimmung der aktuellen Sensitivität auf Landesebene</i> .....	52
3.3.2.2 <i>Übertragung der aktuellen Sensitivität auf Kreisebene</i> .....	53
3.3.2.3 <i>Abschätzung der Sensitivität vor 1968 und nach 2003 auf Kreisebene</i>	54
3.3.2.4 <i>Abschätzung der Mortalitätsrate vor 1968 und nach 2003 auf Landesebene</i>	54
3.3.3 Vulnerabilität .....	55
3.4 Ergebnisse .....	55
3.4.1 Exposition .....	55
3.4.2 Sensitivität .....	57
3.4.3 Vulnerabilität .....	58
3.5 Diskussion und Ausblick .....	61
<b>4 LANDWIRTSCHAFT, OBST- UND WEINBAU .....</b>	<b>63</b>
4.1 Zusammenfassung .....	63
4.2 Einleitung .....	63
4.3 Auswirkungen auf die Erträge von Winterweizen und Mais .....	64
4.3.1 Einleitung .....	64
4.3.2 Methode .....	64
4.3.3 Ergebnisse und Diskussion .....	65
4.4 Obstbau: Gefährdungspotenzial durch Apfelschorf ( <i>Venturia inaequalis</i> ) .....	69
4.4.1 Einleitung .....	69
4.4.2 Methoden .....	70
4.4.3 Ergebnisse und Diskussion .....	72
4.5 Obstbau: Auswirkungen auf die Generationsfolge des Apfelwicklers ( <i>Cydia pomonella</i> ) .....	76
4.5.1 Einleitung .....	76
4.5.2 Methoden .....	77

4.5.3 Ergebnisse und Diskussion .....	78
4.6 Weinbau .....	81
4.6.1 Einleitung .....	81
4.6.2 Methode .....	82
4.6.3 Ergebnisse und Diskussion .....	84
4.7 Ausblick .....	88
<b>5 FORSTSEKTOR .....</b>	<b>89</b>
5.1 Zusammenfassung .....	89
5.2 Einleitung .....	89
5.3 Das Simulationsmodell 4C .....	90
5.3.1 Einführung .....	90
5.3.2 Wasser- und Nährstoffbilanzierung .....	90
5.3.3 Assimilation und Allokation .....	91
5.3.4 Phänologie .....	91
5.3.5 Mortalität .....	91
5.3.6 Regeneration und Management .....	92
5.3.7 Parameter, Initialisierung und Triebkräfte .....	92
5.4 Produktivität unter Klimawandel .....	93
5.4.1 Wasserhaushalt an ausgewählten Standorten .....	93
5.4.1.1 Fragestellung .....	93
5.4.1.2 Methode .....	93
5.4.1.3 Resultate .....	94
5.4.2 Produktivität und Vegetationsperiodenlänge .....	96
5.4.2.1 Fragestellung .....	96
5.4.2.2 Methode .....	96
5.4.2.3 Resultate .....	96
5.4.3 Wachstumstrends .....	98
5.4.3.1 Fragestellung .....	98
5.4.3.2 Methode .....	99
5.4.3.3 Resultate .....	99
5.5 Waldbrand .....	101
5.5.1 Fragestellung .....	101
5.5.2 Methode .....	101
5.5.3 Resultate .....	102
5.6 Ausblick .....	104
5.7 Nachtrag .....	105
5.7.1 Methode .....	105
5.7.2 Ergebnisse .....	105
<b>6 TOURISMUS .....</b>	<b>107</b>

6.1 Zusammenfassung	107
6.2 Einführung	108
6.3 Badetourismus am Bodensee	110
6.3.1 Untersuchungsmethode: Definition eines potentiellen Badetages	110
6.3.1.1 Schwellenwert für die tägliche Maximaltemperatur	111
6.3.1.2 Schwellenwert für den mittleren Bewölkungsgrad	115
6.3.1.3 Schwellenwert für die tägliche Sonnenscheindauer	115
6.3.1.4 Definition: potentieller Badetag	116
6.3.2 Ergebnisse	117
6.4 Wandertourismus im Schwarzwald	119
6.4.1 Methode: Ermittlung wanderrelevanter Klimaparameter	121
6.4.2 Ergebnisse	127
6.5 Ausblick	130
<b>7 NATURSCHUTZ</b>	<b>133</b>
7.1 Zusammenfassung	133
7.2 Einführung	134
7.3 Veränderungen im Zugverhalten häufiger Brutvogelarten	134
7.3.1 Erstankunftszeiten im Frühjahr	135
7.3.1.1 Methode	135
7.3.1.2 Ergebnisse	136
7.3.1.3 Diskussion	137
7.3.2 Wegzugszeiten und Verweildauer im Spätsommer	138
7.3.2.1 Methode	139
7.3.2.2 Ergebnisse	140
7.4 Veränderungen der Brutbiologie ausgewählter Arten	142
7.4.1 Methode	142
7.4.2 Ergebnisse	142
7.4.3 Diskussion	143
7.5 Veränderungen der Artenzusammensetzung und Verschiebung der Verbreitungsgebiete von Brutvögeln	144
7.5.1 Methode	144
7.5.2 Ergebnisse	145
7.5.3 Diskussion	146
7.6 Ausblick: Folgen von Klimaveränderungen für Vogelwelt und Naturschutz	147
7.6.1 Erstankünfte	147
7.6.2 Herbstzug	147
7.6.3 Brutbeginn	147
7.6.4 Wintergäste	148
7.6.5 Arealverschiebungen	148

7.6.6 Arealverschiebung und Mobilität .....	148
7.6.7 Artenrückgang und Klimaschutz .....	149
7.6.8 Habitatfragmentierung und Arealveränderungen .....	149
7.6.9 Resümee .....	149
<b>8 SCHIFFFAHRT UND ENERGIEERZEUGUNG .....</b>	<b>151</b>
8.1 Zusammenfassung .....	151
8.2 Einführung .....	152
8.3 Methode .....	152
8.4 Ergebnisse .....	153
8.4.1 Modellvalidierung .....	153
8.4.2 Anwendung von Klimaszenarien .....	155
8.4.3 Ausblick .....	159
<b>9 METEOROLOGISCHE EREIGNISSE MIT GROSSEM SCHADENSPOTENZIAL .</b>	<b>161</b>
9.1 Zusammenfassung .....	161
9.2 Einführung .....	162
9.3 Gewitter- und Hagelereignisse .....	163
9.3.1 Methode .....	163
9.3.1.1 <i>Bestimmung der Häufigkeit von Gewittertagen und Hagelereignissen</i> . . .	163
9.3.1.2 <i>Berechnung von Konvektionsindizes</i> .....	163
9.3.2 Ergebnisse .....	164
9.3.2.1 <i>Häufigkeit von Gewittertagen</i> .....	164
9.3.2.2 <i>Veränderungen der Konvektionsindizes</i> .....	164
9.3.2.3 <i>Hagelereignisse</i> .....	166
9.4 Starkwindereignisse .....	168
9.4.1 Methode .....	169
9.4.2 Ergebnisse zur Sturmentwicklung .....	169
9.4.3 Veränderungen der Großwetterlagen .....	170
9.5 Ausblick .....	171
<b>LITERATUR .....</b>	<b>173</b>
<b>GLOSSAR .....</b>	<b>181</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>189</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>191</b>
<b>HINWEISE ZUM ANHANG .....</b>	<b>199</b>



# 1 VERWUNDBARKEIT BADEN-WÜRTTEMBERGS IM KLIMAWANDEL

Dieses Kapitel integriert die verschiedenen, in den folgenden Kapiteln dargestellten Einzeluntersuchungen zu einem vorerst nur partiell ausgefüllten Gesamtbild der Verwundbarkeit Baden-Württembergs im Klimawandel.

## 1.1 Allgemeine Zusammenfassung

### 1.1.1 Kapitel 1: Gesamtbild der Verwundbarkeitsanalyse

Beschrieben wird eine einheitliche Methode zur Analyse der Verwundbarkeit verschiedener Wirtschaftssektoren. Die Auswahl der Untersuchungsthemen richtet sich nach einem vorab erstellten Analyseraster (Anhang 1). Die Einwirkung einer regionalen Klimaänderung führt zu unterschiedlichen Belastungen der verschiedenen betrachteten Sektoren, die zudem unterschiedlich empfindlich reagieren. Dies führt zu einem Mosaik nebeneinander möglicher potenzieller Auswirkungen. Ansätze einer Synthese dieser Facetten zu einem Gesamtbild der Verwundbarkeit werden aufgezeigt. Dazu gehören auch verschiedene Verfahren, die Potenziale und Strategien der Anpassung Baden-Württembergs an den Klimawandel zu ermitteln und landesspezifische Prioritäten zu setzen. Der Weg dazu wird aufgezeigt, die Ausführung bleibt einer folgenden Projektphase vorbehalten.

### 1.1.2 Kapitel 2: Klimatische Belastungen und Extreme

Die klimatischen Belastungen für Baden-Württemberg ergeben sich aus dem Vergleich des bisherigen Klimas, dargestellt als Basisszenarium im Zeitraum 1951-2000, und einer zu erwartenden zukünftigen Klimaveränderung im Zeitraum 2001-2055, dem Zukunftsszenarium. Im Basisszenarium nimmt die Temperatur zwischen 0.6 und 1.5 °C je nach Region zu. Gleichzeitig wird bis auf wenige Ausnahmen eine Niederschlagszunahme um im Mittel 90 mm im Jahr beobachtet, was einer relativen mittleren Zunahme um 9% entspricht. Hinsichtlich der Veränderung von Schwellenwertereignissen sind eine Zunahme der Sommertage (maximale Temperatur > 25 °C), eine Abnahme der Frosttage (minimale Temperatur < 0 °C) und eine Zunahme der Starkniederschlagstage (Niederschlag > 10 mm) hervorzuheben. Für das Zukunftsszenarium (2001-2055) wurde ein moderater mittlerer Temperaturanstieg von 1.2 °C vorgegeben. Unter Verwendung eines statistischen Regionalmodells ergibt sich daraus im Gebietsmittel eine geringfügige Abnahme des Niederschlags im Vergleich zum Basisszenarium. Allerdings weisen große Teile im Westen und Norden von Baden-Württemberg eine deutliche Zunahme des Niederschlags auf, während im Lee des Schwarzwaldes bis hin zur östlichen Landesgrenze ein Rückgang zu verzeichnen ist. Zudem kommt es zu einer saisonalen Verschiebung, wobei die Niederschläge im Sommer abnehmen und im Winter zunehmen. Im Hinblick auf Extreme wurden Schwellenwertereignisse analysiert. So ergibt sich wie im Basisszenarium eine Zunahme der Sommertage und eine Abnahme der Frosttage, jedoch ein uneinheitlicher Trend bei den Starkniederschlagstagen (Zunahme im Westen und Norden, Abnahme im restlichen Gebiet).

### 1.1.3 Kapitel 3: Gesundheit

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die witterungsbedingte Mortalität in den einzelnen Kreisen Baden-Württembergs wird durch einen Vergleich der geschätzten witterungsbedingten Mortalität im Basisszenarium mit der im Zukunftsszenarium verglichen.

rungsbedingten Todesfälle im Basisszenarium (1951-2000) mit den prognostizierten für das Zukunftsszenarium (2001-2055) untersucht. Der Vergleich zeigt, dass ein deutlicher Anstieg der Anzahl der Tage mit Wärmebelastung und ein Rückgang der Anzahl der Tage mit Kältestress zu erwarten ist. Dabei fällt der Anstieg der Zahl der Tage mit Wärmebelastung relativ gesehen stärker aus als der Rückgang des Kältestresses. Neben der Auftretenshäufigkeit thermischer Belastungen wurde die Sensitivität der Bevölkerung für diese Art von Stress bestimmt. Dabei zeigt sich, dass die Bevölkerungsgruppe über 75 Jahre besonders sensitiv auf thermische Belastung reagiert. Die Vulnerabilität der Bevölkerung gegenüber thermischer Belastung ergibt sich schließlich als Produkt der Auftretenshäufigkeit einer thermischen Belastung mit der Sensitivität. Die Vulnerabilität gegenüber Wärmebelastung erhöht sich im Zukunftsszenarium im Vergleich zum Basiszenarium über alle Kreise gemittelt um ca. 20%. Daher ist landesweit mit jährlich 180 bis 400 zusätzlichen hitzebedingten Todesfällen zu rechnen. Der Rückgang der Vulnerabilität gegenüber Kältestress kann diesen Anstieg nicht kompensieren.

### **1.1.4 Kapitel 4: Landwirtschaft, Obst- und Weinbau**

Im Zukunftsszenarium (2001-2055) kommt es im Norden und Westen Baden-Württembergs voraussichtlich zu günstigeren klimatischen Bedingungen (Temperaturanstieg, CO<sub>2</sub>-Düngung) für den Maisanbau, während beim Weizen mit leichten klimabedingten Ertragseinbußen (Trockenstress) gerechnet werden muss. Diese Einbußen könnten aber durchaus durch bessere Qualitäten in Folge einer verkürzten Kornfüllungsphase ausgeglichen werden. In der Bodensee-Region führt ein wärmeres und feuchteres Klima im Zukunftsszenarium zu einem höheren Schaderregerdruck im Apfelanbau, wie exemplarisch für den Apfelwickler (Schädling) und den Apfelschorf (Pilzerkrankung) gezeigt werden konnte. Die höheren Temperaturen begünstigen die Vollendung der zweiten Generation des Apfelwicklers und führen damit zu höheren Populationsdichten im Sommer und im nächsten Frühjahr. Die leicht zunehmenden Niederschläge in der Region erhöhen das Risiko von Apfelschorfinfektionen.

Beim Weinbau wurde ein Temperatursummenindex nach Huglin zur Beurteilung der klimatischen Entwicklung benutzt. Der in den 90er Jahren beobachtete Trend zu prinzipiell besseren Anbaubedingungen setzt sich in die Zukunft fort. Dies sollte in den nächsten Jahrzehnten die Bedingungen des Weinbaus und den Charakter der kultivierten Weine nachhaltig beeinflussen. Es ist aber zu überlegen, inwieweit der zunehmenden Erwärmung im Weinbaugebiet Baden beim An- und Ausbau traditioneller Sorten durch konservative Maßnahmen (z.B. Züchtung spätreifender Weißweinsorten) Rechnung getragen werden kann. Für das Anbaugebiet Württemberg scheinen die in den nächsten Jahrzehnten zu erwartenden klimatisch bedingten Änderungen eher günstig zu sein, sie lassen die Kultivierung der bisher bevorzugten und einen zunehmenden Anbau anspruchsvollerer Sorten erwarten.

### **1.1.5 Kapitel 5: Forstsektor**

Die entscheidenden klimatischen Parameter für den Forstsektor sind Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchte und Strahlung. Durch Klimawandel können sich somit Auswirkungen auf Produktivität, Trockenstress und Waldbrandgefahr ergeben. Ein Vergleich zwischen Basisszenarium (1951-2000) und Zukunftsszenarium (2001-2055) für Baden-Württemberg zeigt, dass der angenommene zukünftige Klimawandel nur geringe Auswirkungen auf die Produktivität der Waldbestände hat. Im Mittel über die verschiedenen

Regionen und Baumarten zeichnet sich allenfalls ein leicht positiver Trend der erwarteten Produktivität ab. Das Risiko für Trockenstress nimmt für die drei Baumarten Fichte, Kiefer und Buche leicht ab. Die klimatische Waldbrandgefahr erhöht sich leicht in den Regionen Baden-Württembergs, die von einem Rückgang des Niederschlags betroffen sind (v.a. im Lee des Schwarzwalds und im Südosten), während sie im Westen und Norden leicht zurückgeht.

### **1.1.6 Kapitel 6: Tourismus**

Die möglichen Auswirkungen zukünftiger Klimaveränderungen auf den Sommertourismus in Baden-Württemberg wurden exemplarisch für die Bereiche "Badetourismus am Bodensee" und "Wandertourismus im Schwarzwald" untersucht. Für die Bodensee-Region ergibt sich für das Zukunftsszenarium (2001-2055) eine günstige Entwicklung der baderelevanten Klimaparameter Maximaltemperatur, Bewölkungsgrad und tägliche Sonnenscheindauer. Es ist somit mit einer Zunahme der Anzahl der "potentiellen Badetage" und zusätzlich mit einer Verlängerung der Badesaison zu rechnen. Als wanderrelevante Klimaparameter stellten sich Maximaltemperatur, relative Feuchte und vor allem die tägliche Sonnenscheindauer heraus. Im südlichen Schwarzwald treten im Zukunftsszenarium ebenfalls öfter Tage mit für den Wandertourismus günstigen Wetterverhältnissen auf. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für den Sommertourismus – im Gegensatz zum Wintertourismus – für Baden-Württemberg eine positive klimatische Entwicklung prognostiziert wird.

### **1.1.7 Kapitel 7: Naturschutz**

Die Klimaveränderungen im Verlauf der letzten 30 Jahre hatten deutliche Auswirkungen auf Zug- und Brutverhalten sowie auf Artenzusammensetzung und Verbreitungsgebiete von Vögeln in Südwestdeutschland. Die Erstankunftszeit vieler Zugvogelarten im Frühjahr verfrühte sich um durchschnittlich 3-5 Tage pro zehn Jahre, vermutlich wegen der Verschiebung der Überwinterungsgebiete vieler Arten nach Norden. Das steht in Einklang mit der allgemeinen Tendenz, dass Langstreckenzieher (südlich der Sahara) zu Kurzstreckenziehern (Mittelmeerraum) und Kurzstreckenzieher zu Standvögeln werden. Der Wegflug im Spätsommer verzögerte sich bei über der Hälfte der untersuchten Arten, nur bei wenigen Arten wurde eine frühere Ankunft festgestellt. Bei einigen der untersuchten Arten wurde in Bezug auf das Brutverhalten ein früherer Legebeginn (ca. 3 Tage in zehn Jahren) festgestellt, teilweise wurde gleichzeitig auch eine höhere Gelegegröße und ein höherer Schlüpfertag beobachtet. Hinsichtlich der Artenzusammensetzung und -verbreitung in der Bodensee-Region zeigte sich, dass südlich verbreitete Arten zunahmen, während nördlich verbreitete allerdings nicht so stark abgenommen haben wie ursprünglich vermutet. Die Ergebnisse machen deutlich, dass sich Vogelgemeinschaften aufgrund der Klimaerwärmung stark verändern werden und deshalb ein "konservierender" Naturschutz in Zukunft kaum noch möglich sein wird.

### **1.1.8 Kapitel 8: Schifffahrt und Energieerzeugung**

Für den Neckar wurde die statistische Verteilung der täglichen Abflüsse in Basisszenarium (1951-2000) und Zukunftsszenarium (2001-2055) miteinander verglichen, um Aussagen über eine mögliche Veränderung der zu erwartenden Bedingungen für Schifffahrt und Wasserkraftnutzung zu gewinnen. Generell zeigt sich bei diesem Vergleich eine Tendenz zu höheren mittleren täglichen Abflüssen in den Wintermonaten bis hinein ins

Frühjahr, während sich in den Sommermonaten wenig verändert. Dieser Anstieg der mittleren jährlichen Abflussverhältnisse führt zu tendenziell günstigeren Bedingungen für die Wasserkraftnutzung am Neckar, da diese nur durch Niedrigwasser limitiert ist. Hinsichtlich der Einschränkungen der Schiffbarkeit des Neckars durch Hochwasser liefern die verwendeten regionalen Klimaszenarien-Modelle keine eindeutigen Aussagen, wobei sich jedoch die Anzahl der Tage mit eingeschränkter Schiffbarkeit im ungünstigen Fall von 6 auf 15 Tage pro Jahr erhöhen kann.

### **1.1.9 Kapitel 9: Meteorologische Ereignisse mit großem Schadenspotenzial**

Aus täglichen Wetterstations-Daten für den Zeitraum 1949-2000 in Baden-Württemberg ergibt sich, dass die Gewittertätigkeit an den meisten Stationen im betrachteten Zeitraum um 2-8 jährliche Gewittertage zugenommen hat. Zusätzlich wurden zur Abschätzung des Gewitterpotenzials der Atmosphäre für den Zeitraum 1971-2003 für die Station Stuttgart verschiedene Konvektionsindizes berechnet. Es zeigte sich hier ein starker Anstieg insbesondere bei den relevanten Indizes. Zur Verbindung zwischen Punktmessungen und flächendeckenden Messungen wurden Schadendaten der SV Sparkassen Versicherung bezüglich Hagelschlag für den Zeitraum 1986-2004 analysiert. Sowohl die Anzahl der Schadenmeldungen als auch die Schadenssummen, jeweils korrigiert um die jährliche Veränderung der Vertragszahlen, zeigten trotz starker jährlicher Schwankungen eine nahezu dramatische Zunahme in den vergangenen 20 Jahren. Annähernd dasselbe Bild ergab sich für die Anzahl der Hageltage pro Jahr, die aus den Schadendaten für Baden-Württemberg rekonstruiert wurden. Eine Analyse der historischen Daten zu Winterstürmen ergab, dass von den neun schwersten Stürmen der vergangenen 200 Jahre in Baden-Württemberg allein sechs in die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts fallen. Die Auswertung der Messdaten von verschiedenen SYNOP-Stationen ergab eine Zunahme der Böengeschwindigkeit an Flachlandstationen, während dies an Bergstationen nicht zu erkennen war.

Aufgrund der Analysen kann der vorsichtige Schluss gezogen werden, dass das Potenzial für Gewitter und Hagel sowie insbesondere für schwere Gewitter im betrachteten Zeitraum zugenommen hat. Auch für einige Großwetterlagen, die im Zusammenhang mit meteorologischen Ereignissen mit großem Schadenspotenzial stehen, zeigen sich signifikante Veränderungen seit Anfang der 70er Jahre. So ist die beobachtete Zunahme der Andauer der "Westlage zyklonal" im Winter sowohl für schwere Winterstürme (z.B. Sturm Lothar) als auch für Hochwasserereignisse als sehr kritisch anzusehen.

## **1.2 Ausgangsposition**

Nach dem heutigen Stand von Wissenschaft und Forschung muss man von einer relativ raschen globalen Klimaveränderung während der nächsten Jahrzehnte ausgehen, die sich regional sehr differenziert gestalten wird. In den letzten 100 Jahren ist in Baden-Württemberg die Temperatur im Mittel um mehr als 1 °C angestiegen und dieser Trend wird sich demnach zukünftig fortsetzen bzw. sogar noch verstärken. Neben den langfristigen Veränderungen der Mittelwerte der Klimaparameter sind insbesondere die der Extremwerte für die Auswirkungen von Bedeutung.

Die Ergebnisse des International Panel on Climate Change (*IPCC, 2001*) der Vereinten Nationen führen dazu zusammengefasst Folgendes aus:

- die globale durchschnittliche Oberflächentemperatur steigt – je nach angenommenem Emissionsszenarium - um 1,4 bis 5,8 °C bis 2100
- erwartet werden höhere Maximaltemperaturen; mehr heiße Tage und Hitzewellen über fast allen Landmassen und höhere Minimaltemperaturen; weniger kalte Tage, Frosttage und Kältewellen
- zu erwarten sind ferner intensivere Niederschlagsereignisse über vielen Gebieten und eine Zunahme von extremen Windereignissen in mittleren Breiten

Diese globalen Angaben sind für regionale Auswirkungen in Baden-Württemberg mit seiner starken geographischen Differenzierung (siehe [Abbildung 1.1](#)) nur bedingt aussagekräftig. Daher wurden im Rahmen des Projektes KLIWA regionale Klimaszenarien erarbeitet und für eine Analyse zu erwartender Auswirkungen im Sektor Wasserwirtschaft verwendet. In KLARA wurden daher zu diesem Sektor nur einige ergänzende Untersuchungen durchgeführt. Grundsätzlich wurde auch in KLARA auf die aus KLIWA bekannten Methoden zur Ermittlung der regionalen Klimaszenarien zurückgegriffen, wobei punktuell Datenlage und Auflösung verbessert wurden.

Das Verbundprojekt KLARA wurde von einer Projektgruppe unter Federführung der Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) vorbereitet und begleitet. Vorab wurden die für Baden-Württemberg relevanten Themen analysiert und in Form eines Analyserasters vorgelegt (UVM-BW 2003, siehe Anhang 1).

Im Analyseraster wurden die verschiedenen Sektoren einer ersten Analyse unterzogen und die weiter zu untersuchenden Themen spezifiziert (siehe [Tabelle 1.1](#)). In der Tabelle sind die im vorliegenden Bericht näher untersuchten Fragestellungen fett markiert. Bei einer Reihe dieser offenen Fragen spielen meteorologische Extremereignisse mit hohem Schadenspotenzial eine wichtige Rolle. Daher wurde zusätzlich dieser Untersuchungspunkt mit aufgenommen.

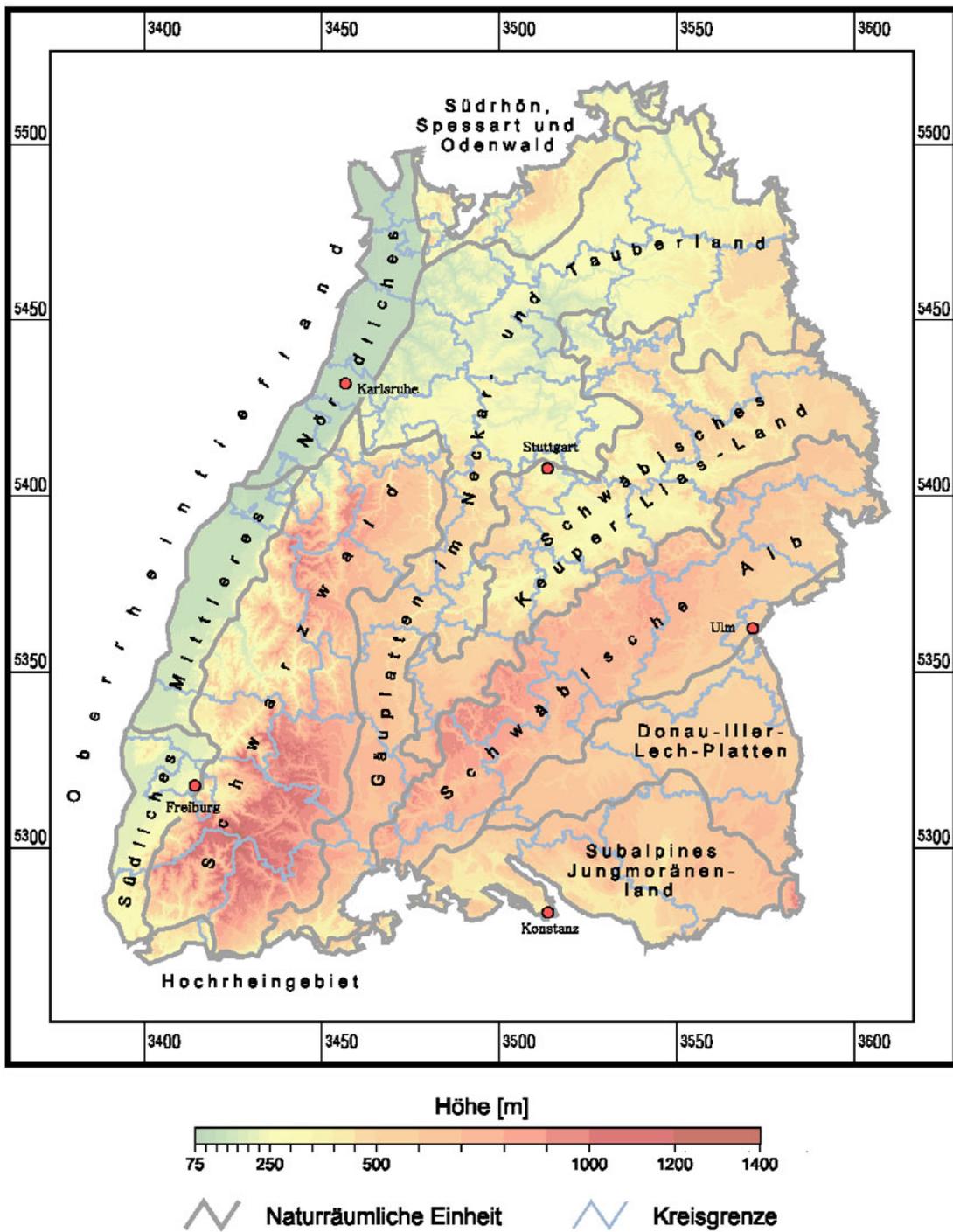


Abb. 1.1: Topographische Karte Baden-Württembergs mit naturräumlichen Einheiten (graue Linien) und Landkreisen (blaugraue Linien)

Tab. 1.1: Identifizierter Forschungsbedarf in verschiedenen Sektoren gemäß Analyseraster (UVM-BW 2003, siehe Anhang 1). Die im vorliegenden Bericht aufgegriffenen Fragestellungen sind fett markiert.

Sektor	Untersuchungsbedarf in KLARA
<b>Wasserwirtschaft</b>	keiner: Ergebnisse von KLIWA abwarten
<b>Gesundheitsschutz,</b> Luftreinhaltung (siehe Kapitel 3)	<p><b>Erhebung detaillierter epidemiologischer Daten für das Verständnis der Zusammenhänge zwischen Klima und Krankheit. Als Grundlage für die Abschätzung des Klimaeinflusses und Entwicklung und Evaluierung von Modellen.</b></p> <p>Erforschung der Auswirkungen des deutlich längeren Aufenthalts in klimatisierten Räumen auf die natürliche Anpassungs- und Schutzfunktion des Körpers.</p> <p>Analyse der modellierten Klimadaten aus den regionalen Klimaszenarien für Baden-Württemberg im Hinblick auf mögliche kurzzeitige oder langfristige Einflüsse auf die Luftqualität (Leitsubstanzen Ozon, Feinstaub und NO<sub>x</sub>) unter Berücksichtigung regionaler Besonderheiten (z.B. Stuttgarter Kessel-lage, Oberrheinebene).</p> <p>Untersuchung zukünftiger Trends für Staub-Ferntransporte (Art, Häufigkeit, Intensität, Auswirkungen) aus südlichen Regionen nach Baden-Württemberg.</p> <p>Erarbeitung eines Konzepts, wie die Auswahl, Betreuung und Nachsorge von Beschäftigten gewährleistet werden kann, die während Perioden von erhöhter Ozon- Feinstaubbelastung im Freien arbeiten müssen.</p> <p>Erhebung von epidemiologischen Daten über das Arbeitsunfallgeschehen während längerer Hitzeperioden.</p> <p>Erarbeitung eines Konzeptes, das professionelle Helfer in die Lage versetzt, mit den Folgen zunehmender extremer Wetterlagen umzugehen.</p>
<b>Landwirtschaft</b> (Kapitel 4)	<p><b>Auswirkungen des Klimawandels (höhere Temperaturen, weniger Sommerniederschläge und längere Vegetationszeit) auf Erträge und Qualitäten der wichtigsten Nutzpflanzen des Acker-, Obst-, Gemüse- und Weinbaues sowie der Grünlandwirtschaft und erforderliche Anpassungsmaßnahmen (Fruchtfolge, Beregnung, Bodenbearbeitung, Düngung, Pflanzenschutz...)</b></p> <p><b>Auswirkungen einer durch den Klimawandel bedingten möglicherweise allgemein verändernden Schadorganismensituation auf landwirtschaftlich genutzte Kulturpflanzen</b></p> <p>Auswirkungen nicht-parasitärer Einwirkungen (Strahlung, Ozon) auf landwirtschaftlich genutzte Kulturpflanzen (z.B. durch Blattverbräunungen).</p>
<b>Forstwirtschaft</b> (siehe Kapitel 5)	<p><b>Hierzu ist wegen der komplexen Wechselwirkungen Ergänzungsforschung erforderlich: Verbesserung der Repräsentativität von Eingangsdaten für Modellrechnungen in klimasensitiven Räumen sowie Einrichtung von Waldklimamessstationen. Außerdem sollen für die einzelnen fachlichen Sektoren (z.B. Bodenwasserhaushalt bei unterschiedlichen Klimaszenarien und Bodentypen, C- und N-Speicherung und -mobilisierung) Prognosemodelle erstellt und validiert werden.</b></p>
<b>Tourismus</b> (siehe Kapitel 6)	<p><b>Welche veränderten Wetterbedingungen sind als Einwirkungen und welche Auswirkungen sind als deren Folgen neben dem wahrscheinlichen Anstieg der Schneefallgrenze für welche Bereiche der Tourismuswirtschaft vordringlich von Bedeutung?</b></p>
<b>Naturschutz</b> (siehe Kapitel 7)	<p><b>Identifikation der durch Klimawandel bedingten Veränderungen der Verbreitung und Häufigkeit von Arten. Ziel ist die Unterscheidung von solchen Veränderungen, die auf Häufungen ungewöhnlicher Wetterlagen ohne Zusammenhang mit dem Klimawandel, oder solchen, die auf anderen Prozessen beruhen.</b></p> <p><b>Auswirkungen der Verschiebung von Ausbreitungsgebieten von Tierarten in höhere Breiten und in höher gelegene Regionen,</b></p> <p><b>Auswirkungen der Verschiebung der Brutzeiten,</b></p> <p><b>Auswirkungen der Verschiebung des Ausbreitungsgebiets von Schmetterlingen und Vögeln.</b></p>

Tab. 1.1: Identifizierter Forschungsbedarf in verschiedenen Sektoren gemäß Analyseraster (UVM-BW 2003, siehe Anhang 1). Die im vorliegenden Bericht aufgegriffenen Fragestellungen sind fett markiert.

Sektor	Untersuchungsbedarf in KLARA
<b>Energiewirtschaft</b> (siehe Kapitel 8)	Welche Auswirkungen haben ein durch allgemeine Erwärmung winters erheblich verminderter Heizenergie-/ Heizbrennstoffbedarf und ein sommers deutlich erhöhter Strombedarf für Kühlung auf die Energiewirtschaft, insbesondere auf Energieumwandlung und Lastmanagement der Netze? Welche Auswirkungen haben die erwarteten Folgen des Klimawandels auf die Nutzung und Nutzbarkeit erneuerbarer Energien wie Solarthermie, Photovoltaik, Wind, Wärmerückgewinnung? zusätzlich: <b>Verfügbarkeit von Wasserkraft</b>
Gebäude, <b>Infrastruktur</b> (siehe Kapitel 8)	Anpassungsbedarf von Bemessungsvorgaben und -verfahren sowie technischen Auslegungen an / von Gebäuden Anpassungsbedarf von Bauvorschriften und Baunormen, Innovationen zur Vermeidung sommerlicher Überhitzung Weiterentwicklung der Bemessungsvorgaben für Einrichtungen der Wasserversorgung, Energieversorgung, Kommunikation und von Verkehrswegen und weiterer Infrastruktureinrichtungen entsprechend den sich ändernden Anforderungen, Überprüfen der Anfälligkeit der Kommunikationssysteme gegenüber meteorologischen Extremereignissen und Entwickeln robuster Alternativen, Prüfen, inwiefern die Effizienz und Effektivität der zivilen Hilfsdienste (Feuerwehr, Katastrophenschutz, Technisches Hilfswerk, Unfallrettung und Krankentransport etc.) durch veränderte Klimabedingungen beeinflusst wird oder verbessert werden kann, <b>Untersuchen der möglichen Effekte eines Klimawandels auf die einzelnen Verkehrsträger</b> (Straßenverkehr, Schienenverkehr, Luftverkehr, <b>Schifffahrt</b> ) sowie auf die jeweiligen Verkehrsinfrastrukturbauten, Untersuchen / Charakterisieren der Verletzlichkeit der bestehenden städtischen wie auch der überörtlichen Verkehrsinfrastruktureinrichtungen durch Klimaveränderungen, Untersuchen, ob oder wie die bestehende Verkehrswegeplanung an die zu erwartenden Klimaveränderungen angepasst werden muss um Verkehrsstörungen zu vermeiden. Einflüsse intensivierter UV-Strahlung auf die Haltbarkeit / Dichtheit von Geotextilien im Deponiebau, Untersuchen, inwiefern durch stadtklimatologisch wirksame Maßnahmen das Kleinklima in den dicht bebauten Gebieten verbessert und so gesundheitsschädlichen Effekte der Klimaveränderung in den Stadtgebieten frühzeitig begegnet werden kann.
<b>Versicherungswirtschaft</b> (siehe Kapitel 9)	Inwiefern kann den zunehmenden Risiken versicherungstechnisch, bspw. durch eine Wiedereinführung einer Versicherungspflicht gegen <b>Elementarschäden</b> begegnet werden? Inwieweit ist die Eigenversicherung von Kommunen gegen Hochwasserschäden und andere auch klimabedingte Risiken im Bereich der Wasservers- und Abwasserentsorgungsinfrastruktur und anderen Einrichtungen noch angemessen abzusichern? Welche anderen Versicherungskonzepte sind ggf. besser geeignet, die steigenden Hochwasserrisiken abzusichern?

### 1.3 Problemstellung und methodischer Ansatz

Die fortschreitende Klimaänderung mit weiter steigenden Temperaturen, Niederschlagsänderungen und mit dem wahrscheinlich einhergehenden gehäuftem Auftreten extremer Witterungsereignisse (z. B. Trockenperioden, Hitzewellen, Starkniederschläge und Hochwasser) wird voraussichtlich das Risikopotenzial klimasensibler Wirtschaftssektoren gemäß den Ansätzen im Analyseraster erhöhen. Hinzu kommen neben dem Klimawan-

del andere nichtklimatische Veränderungen im Zusammenhang mit dem Globalen Wandel, die das klimabedingte Risikopotenzial beeinflussen.

Die weiteren vertiefenden Untersuchungen spezifischer klimasensibler Sektoren erfordern einen im folgenden beschriebenen integrativen Ansatz, der es ermöglichen soll, die Einzeluntersuchungen des Vorhabens bezüglich der generellen Verwundbarkeit Baden-Württembergs gegenüber dem Klimawandel einzuordnen. Dieser Ansatz ist in [Abbildung 1.2](#) skizziert und die verschiedene Elemente mit Wirkungsfaktoren aus dem Bereich Gesundheitsgefahren anschaulich gemacht.

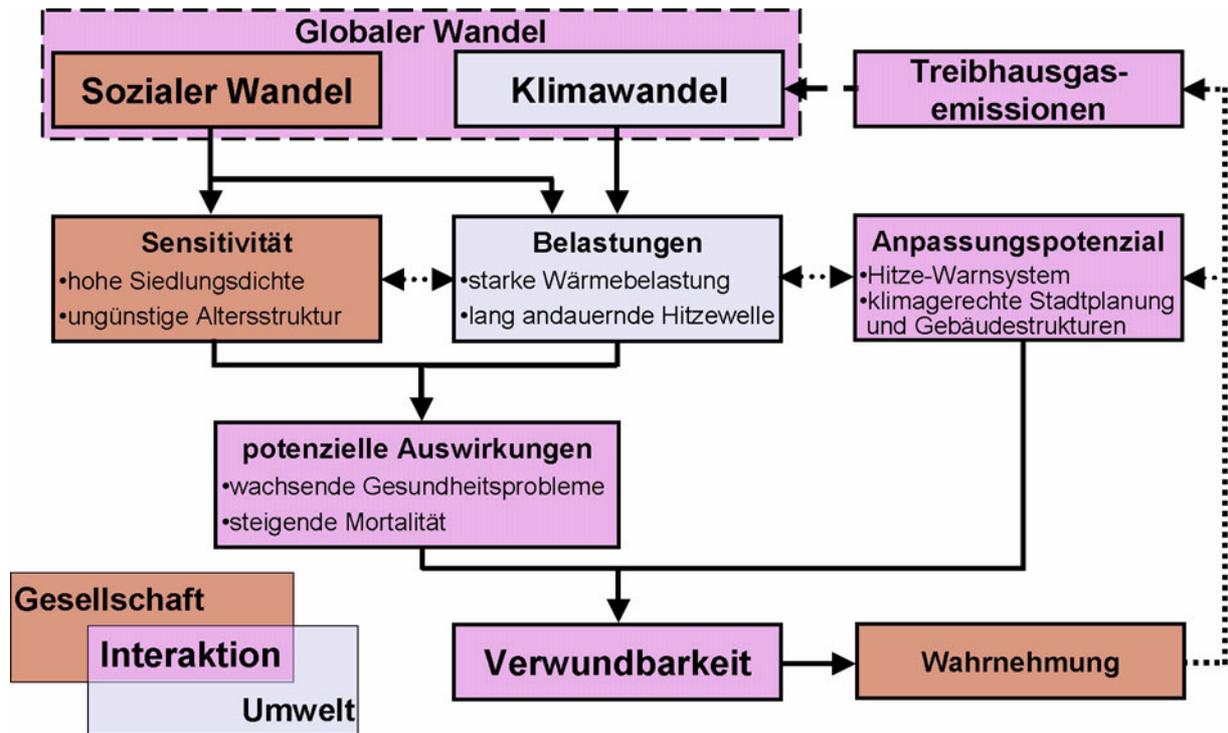


Abb. 1.2: Bestandteile einer Analyse der sektoral spezifizierten und regional differenzierten Verwundbarkeit im Klimawandel mit Beispielen für Indikatoren in Bezug auf das Gesundheitsrisiko bei Hitzewellen. Andere Arten der Verwundbarkeit z.B. bezüglich landwirtschaftlicher Erträge oder Überschwemmungen lassen sich nach den gleichen Aspekten mit entsprechend anderen Indikatoren untersuchen.

Die wesentlichen Bestandteile der Verwundbarkeitsanalyse sind:

- **Belastungen** durch klimabedingte Einwirkungen auf ein System (Region, Bauwerk, Anlage, Staat, Unternehmen etc.), im Beispiel Gesundheit ist dies die Wärmebelastung der Bevölkerung in Ballungsgebieten in einer längeren Hitzeperiode,
- die **Sensitivität** oder Empfindlichkeit, die das System gegenüber den Belastungen aufgrund seiner sozioökonomischen Struktur aufweist, im Beispiel Gesundheit sind dies Siedlungsdichte und ein Anteil älterer bzw. empfindlicherer Menschen,
- die **potenziellen Auswirkungen**, die sich aus der Kombination von Belastung und Sensitivität ergeben können, im Beispiel Gesundheit sind dies wachsende Gesundheitsprobleme (Kreislaufkrankungen) und Mortalität,

- das **Anpassungspotenzial** des Systems (Gesellschaft, Region, Wirtschaftssektor, Unternehmen). Darunter versteht man seine Fähigkeit zur Planung, Vorbereitung, Unterstützung und Implementierung von Handlungsmaßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel (im Beispiel Gesundheit: Warn- und Notfallsysteme, Gebäudedesign und Stadtplanung),
- die tatsächliche **Verwundbarkeit** ergibt sich erst als Kombination der vorherigen Faktoren und mit Hilfe der aus einem Bündel unterschiedlicher Maßnahmen aus verschiedenen Sektoren bestehenden vorausschauenden Anpassung.

In Baden-Württemberg erhöhen einige naturräumliche und klimatische Randbedingungen, z.B. vergleichsweise geringe Niederschläge im landwirtschaftlich intensiv genutzten Oberrheingraben, windexponierte Hanglagen am Westabfall des Schwarzwaldes oder bioklimatisch ungünstig in Kessellage gelegene Verdichtungsräume, die Empfindlichkeit (Sensitivität) gegenüber den Einwirkungen (Belastungen) von Klimaänderungen. Es besteht somit eine regional- und sektorenspezifische potenzielle Verwundbarkeit. Aus der Wahrnehmung der Verwundbarkeit kann die Gesellschaft Handlungsoptionen zur Durchführung gezielter Anpassungsmaßnahmen ableiten und implementieren.

Im Verbundprojekt KLARA wurde in der etwa einjährigen ersten Untersuchungsphase in Zusammenarbeit mit anderen Institutionen ein erstes Grobraster zur Verwundbarkeit Baden-Württembergs erarbeitet, mit folgenden Themenbereichen und Sektoren:

- Optimierung von Klimaszenarien im Hinblick auf die Wirkungszusammenhänge langfristiger klimatischer Veränderungen und Extremwettereinflüssen ([Kapitel 2](#))
- Gesundheitsbelastungen ([Kapitel 3](#))
- Landwirtschaft mit der Sonderkultur Weinbau ([Kapitel 4](#))
- Forstsektor ([Kapitel 5](#))
- Tourismus ([Kapitel 6](#))
- Naturschutz ([Kapitel 7](#))
- Schifffahrt und Wasserkraft ([Kapitel 8](#))
- Versicherungsrelevante Extremwetterereignisse ([Kapitel 9](#))

Für die wissenschaftliche Untersuchung ist dabei im Einzelnen zu klären, welche charakteristischen Eigenschaften die betrachteten naturräumlichen Inventare bzw. Wirtschaftssektoren in welchen Gebieten für Klimawirkungen in besonderem Maße empfindlich machen. Dazu müssen je nach betrachtetem Sektor geeignete Indikatoren und Modelle identifiziert und evaluiert werden. Neben den Klimaparametern spielen hier charakteristische naturräumliche Gegebenheiten, wie z.B. Hangneigung, Exposition gegenüber meteorologischen Größen oder Bodenart, aber auch bevölkerungs- und wirtschaftsstatistische Informationen zur Sensitivität eine Rolle, z.B. zur Bevölkerungsdichte (siehe [Abbildung 1.3](#)). Die Datenbasis für solche Indikatoren ist in Baden-Württemberg grundsätzlich sehr gut und Daten sind z.B. über das Interaktive Kartenverzeichnis des Statistischen Landesamtes verfügbar.

Zur Bewertung der Auswirkungen von Klimaänderungen in einem System (z.B. Wasser- oder Forstwirtschaft) mit Hilfe von Indikatoren bedarf es entweder quantitativer Modelle oder qualitativer Experteneinschätzung zur Antwort des Systems auf eine bestimmte

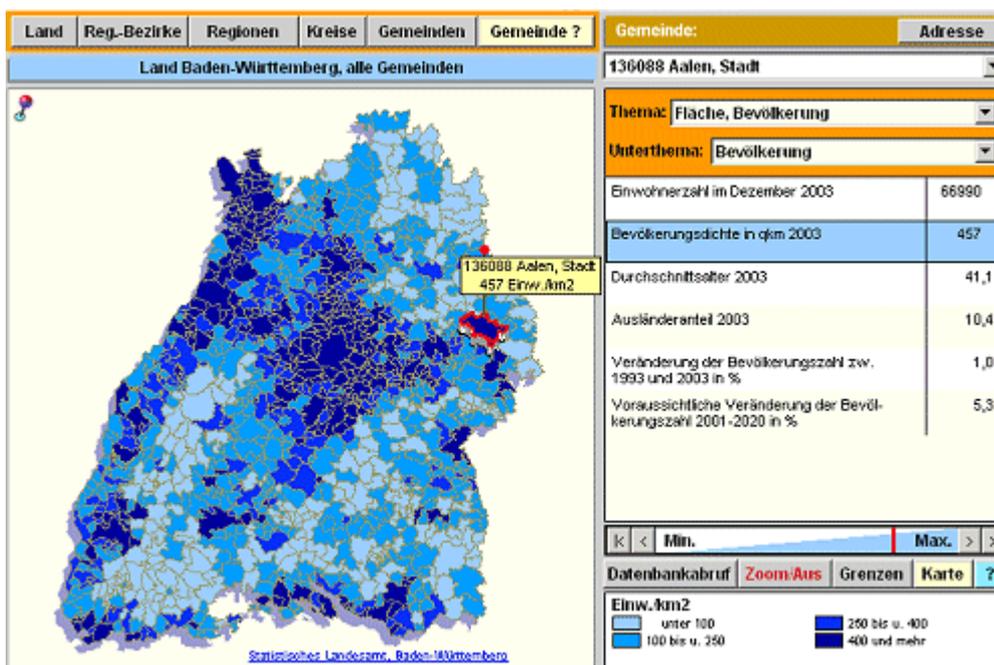


Abb. 1.3: Verteilung der Bevölkerungsdichte im Land als Beispiel für den Datenzugang zum Interaktiven Kartenverzeichnis des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg (<http://www.statistik-bw.de/intermaktiv/>).

Einwirkung. Dies soll **Abbildung 1.4** veranschaulichen. Eine bestimmte Klimaänderung kann für ein angepasstes System (grüne Kurve) unerheblich sein (grünblauer Bereich), für ein verwundbares System dagegen kritisch (orange). Dazwischen liegt der gelb markierte Bereich deutlich spürbarer Auswirkungen, wobei die Reaktion des Systems über einem kritischen Schwellwert, aber noch unter einem kritischen Grenzwert liegt.

Je nach Wirkungs- bzw. Schadenskategorie müssen unter Umständen mehrere unterschiedliche Indikatoren gemeinsam herangezogen werden. Die Auswahl der Indikatoren erfolgt nach naturräumlichen, klimatischen sowie statistikbasierten Kriterien und kann durch Modellergebnisse gestützt werden. Die kritischen Indikatoren werden kombiniert und zur Diagnose der potentiellen Verwundbarkeit in räumlich hinreichender bzw. verfügbarer Auflösung genutzt.

## 1.4 Integrierte Analyse der Verwundbarkeit und Handlungsoptionen

### 1.4.1 Zielsetzung

Übergeordnetes Ziel der integrierenden Analyse ist eine vergleichende Bewertung der verschiedenen in den einzelnen Sektoren ermittelten Verwundbarkeiten zur Identifikation von:

- Sektoralen und gebietsbezogenen Schwerpunkten von Risiken und Chancen,
- Prioritäten der Risikovororge,
- Unsicherheiten und Wissensdefiziten,
- Handlungsoptionen und Strategien.

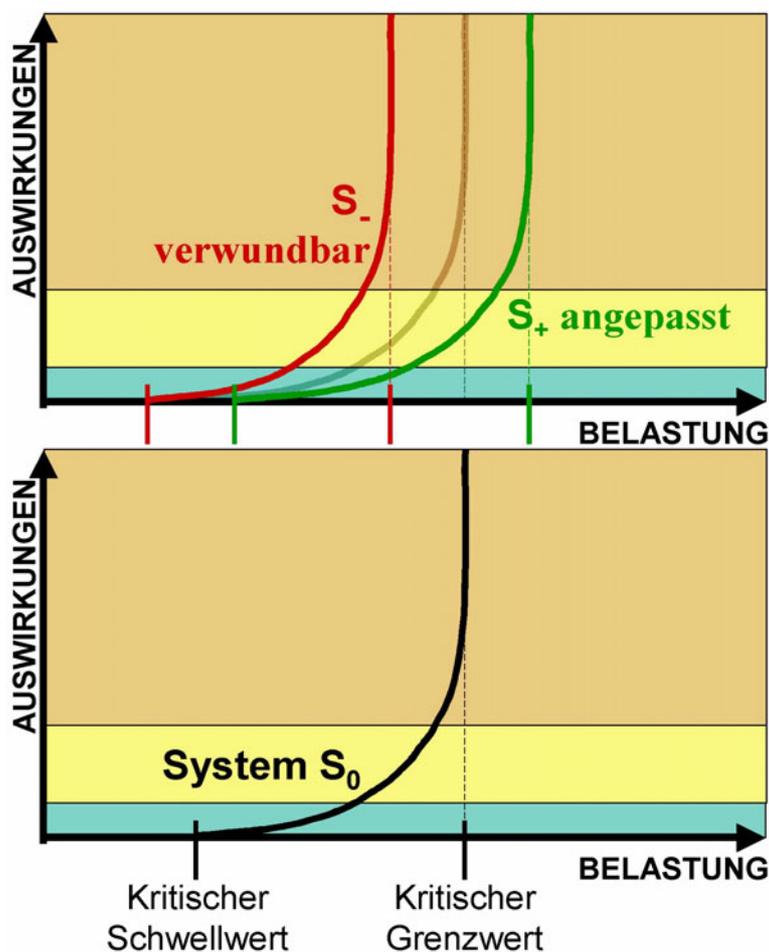


Abb. 1.4: unten: Einordnung der Auswirkungen von belastenden Klimaänderungen auf ein System  $S_0$  (schwarze Kurve). Die Reaktion auf die Belastung kann vorhanden, aber unerheblich sein (grünblauer Bereich), deutlich spürbar (gelb) oder kritisch (orange). Im ersten Fall liegt die Belastung knapp über einem kritischen Schwellwert während sie im dritten Fall in der Nähe eines kritischen Grenzwertes liegt. Der kritische Zustand kann zu teilweiseem oder kompletten Versagen führen. Oben: dieselbe Belastung infolge Klimaänderung kann für ein angepasstes System  $S_+$  (grüne Kurve) unerheblich, für ein verwundbares  $S_-$  (rote Kurve) aber kritisch sein.

Im Rahmen des abgeschlossenen, etwas über einjährigen Projekts KLARA konnte dies allenfalls exemplarisch behandelt werden, um den zur Erreichung oben genannter Ziele erforderlichen Aufwand innerhalb weiterführender Untersuchungen abzuschätzen.

#### 1.4.2 Bewertungsmatrix

Auf der Basis der einzelnen sektoralen Ergebnisse wird die im Analyseraster verwendete Matrix (Tabelle 1 in Anhang 1) im Hinblick auf eine gemeinsame Einordnung der verschiedenen Indikatoren der sektoralen Verwundbarkeiten weiterentwickelt (siehe [Tabelle 1.2](#)). Die jeweiligen Einflussfaktoren, Zielgrößen und Indikatoren liegen zum Teil als quantitative Größen mit unterschiedlichen Dimensionen, teilweise auch nur als qualitative Größe (niedrig, hoch) vor. Die sektoralen Verwundbarkeiten sind daher a priori nicht vergleichbar. Ansätze zur scheinbar objektiven Relativierung, z.B. über den Anteil des jeweiligen Sektors am Bruttosozialprodukt sind fragwürdig, da immaterielle Werte und Interessen unberücksichtigt bleiben. Ein anderer Ansatz wurde im GLOWA-Elbe Projekt

zur integrierten Bewertung der Verwundbarkeit des Berliner Wasserhaushalts verfolgt (Wenzel, 2004). Mittels Stakeholderpartizipation wurden neben den aus Modellen abgeleiteten quantitativen Indikatoren auch Interessen, Kompetenzen und Spielräume ermittelt und mit einer Multikriteriellen Analyse aggregiert. Dabei können auch Kompromisse zwischen interessenbedingt unterschiedlichen Optionen gefunden werden.

Tab. 1.2: Matrix zur integrierten Bewertung von sektoral abgeleiteten Einflussfaktoren, Zielgrößen und Indikatoren der Verwundbarkeit. Es handelt sich um einzelne Beispiele aus KLARA, KLIWA und anderen Projekten, aber nicht um eine vollständige Betrachtung.

Sektoren	Einflussfaktoren (Determinanten)			Zielgrößen	Gesamtindikator
	Sensitivität	Belastung	Anpassungsfähigkeit	Auswirkungen	Verwundbarkeit
Wasserwirtschaft Hochwassergefahr	Gebäudelage und Konstruktion	Extremereignis bei Niederschlag und Abflüssen	Warnsysteme, Siedlungswandel, Versicherungen	Hochwasserschäden	Massive und existenzbedrohende Schäden, Mortalität
Gesundheit	Altersstruktur, Siedlungsdichte	Gefühlte Temperatur, Wärmebelastung	Warnsysteme, Baumaßnahmen, Siedlungswandel	Kreislaufschwäche, Gesundheitsprobleme	Lebensqualität, Mortalität
Landwirtschaft	Betriebsgröße, Standort, Bodengüte	Trockenstress, Schädlingsbefall	Fruchtwechsel, Pflanzenschutz	Ertrags einbußen, Ernteauffälle	Bedrohung der betrieblichen Existenz
Weinbau	Betriebsgröße, Lage, Sortenfixierung	Sonnenbrand, veränderte Reife, Schädlingsbefall	Wechsel bei Sorten und Bewirtschaftung, Pflanzenschutz	Qualitätsänderungen, Ernteauffälle	Bedrohung der betrieblichen Existenz
Forstwirtschaft	Waldbestand, Zustand, Standort, Windexposition	Trockenstress, Windlast, Wildfraß, Schädlingsbefall	Waldumbau, genetische Herkunft, Biodiversität	Wachstumsschäden, Waldbrand, Windwurf	großflächige Waldschäden und Bestandsverluste
Tourismus	Wetterabhängige Aktivitäten wie Skifahren, Baden, Wandern	Wettervariabilität, Schneesicherheit, Hitze-, Sommertage	Angebot alternativer Aktivitäten, Hallenbad, Kunstschnee	Zu-/Abnahme der Zahlen bei Eintritten, Übernachtungen	Bedrohung der betrieblichen Existenz
Naturschutz	Vogelzugverhalten, Bruthabitat, Verbreitung von Arten	Kälteeinbrüche im Frühjahr	Veränderungen bei Ankunft, Abflug, Winter- und Sommergebiete	Veränderungen bei Artenzusammensetzung und Bestandszahlen	Bedrohung von Artenvielfalt und Lebensqualität
Schifffahrt	Schiffbare Wasserstände	Abflussveränderungen	Wasserbauliche Maßnahmen	Einschränkung der Schiffbarkeit	Betriebsausfälle, Rentabilitätseinbußen
Energieerzeugung	Mittlere Durchflüsse	Veränderung der Durchflüsse	Wasserbauliche Maßnahmen	Einschränkung der Wasserkraftnutzung	Betriebsausfälle, Rentabilitätseinbußen
Wirtschaft, Verkehr, Infrastruktur	Konzentration von großen Werten in Risikobereichen	Sturmereignisse, Gewitter, Hagel, Sturzfluten	Warnsysteme, Siedlungswandel, Versicherungen	Schäden an Gebäuden und Installationen	Massive und existenzbedrohende Schäden, Mortalität

Von den die Verwundbarkeit bestimmenden Einflussfaktoren ist die Anpassungsfähigkeit von entscheidender Bedeutung im Hinblick auf Handlungsoptionen. Hier kommen auch am stärksten die angesprochenen Interessenskonflikte zum Tragen.

### 1.4.3 Ermittlung von Potenzialen und Strategien der Anpassung

Unter *Anpassung* wird hier die Planung und Durchführung von Maßnahmen auf verschiedenen administrativen Ebenen (z.B. Gemeinde, Kreis, Bundesland) verstanden, die die Verminderung von möglichen nachteiligen Auswirkungen des Klimawandels zum Ziel hat. Diese Maßnahmen gehen somit über die individuellen Reaktionsmöglichkeiten hinaus.

Ein zusammenfassendes Maß für die Anzahl, Qualität und Durchführbarkeit der verschiedenen prinzipiell zur Verfügung stehenden Anpassungsmöglichkeiten ist die *Anpassungsfähigkeit*. Die Anpassungsfähigkeit kann im Allgemeinen nicht generell angegeben werden, sondern muss im Hinblick auf mindestens drei Fragen spezifiziert werden:

- Welche administrativen Ebenen werden berücksichtigt?
- Welcher Sektor wird untersucht?
- Welche Klimaereignisse werden berücksichtigt?

Je nach administrativer Ebene, Sektor und Klimaereignis kann die Anpassungsfähigkeit beträchtlich variieren.

Derzeit besteht keine wissenschaftlich eindeutige Position, welches die am besten geeignete Methode zur Ermittlung der Anpassungsfähigkeit ist. Grundsätzlich lassen sich jedoch zwei Ansätze unterscheiden:

Objektivistischer Ansatz (top-down): Dieser Ansatz basiert auf "objektiven" Indikatoren, die aus Vorstellungen über die dem Anpassungsprozess zugrundeliegenden Mechanismen gewonnen werden und die die verschiedenen Aspekte des Anpassungsprozesses erfassen sollen. Die verschiedenen Indikatoren werden anschließend mit geeigneten Methoden aggregiert, um einen Anpassungsfähigkeits-Index zu erhalten. Schließlich sollte eine Sensitivitätsanalyse des Anpassungsfähigkeits-Index gegenüber Veränderungen der einzelnen Indikatoren durchgeführt werden, um die Robustheit des Ergebnisses abzuschätzen.

Subjektivistischer Ansatz (bottom-up): Bei diesem Ansatz sollen die subjektiv wahrgenommenen Risiken und Anpassungsmöglichkeiten von Entscheidungsträgern ermittelt werden. Dafür stehen in erster Linie strukturierte Experteninterviews bzw. Fragebögen zur Verfügung, in denen Angaben zu wahrgenommenen Risiken (Priorisierung nach Wichtigkeit, Wahrscheinlichkeit) und wahrgenommenen Anpassungsmöglichkeiten (Priorisierung nach Wichtigkeit, Aufwändigkeit, Status der Planung, Hindernisse) abgefragt werden. Die erhaltenen qualitativen bzw. semi-quantitativen Antworten werden mit geeigneten statistischen Methoden analysiert und dargestellt. Hier lässt sich oft unmittelbar eine Einschätzung der Vulnerabilität vornehmen: die Vulnerabilität ist groß, wenn das Risiko hoch und gleichzeitig die entsprechende Anpassungsfähigkeit niedrig ist.

Im Folgenden werden für beide Ansätze exemplarische Beispiele für eine mögliche Operationalisierung – teilweise mit ersten Ergebnissen – gegeben.

Der *objektivistische Ansatz* wurde unter Beteiligung des PIK im Rahmen des EU-Projekts ATEAM (Advanced Terrestrial Ecosystem Analysis and Modelling) verwendet (Schröter et al., 2004). Hier soll lediglich das zugehörige Konzept für die Konstruktion eines allgemeinen Anpassungsfähigkeits-Index kurz erläutert werden, das in [Abbildung 1.5](#) dargestellt ist.

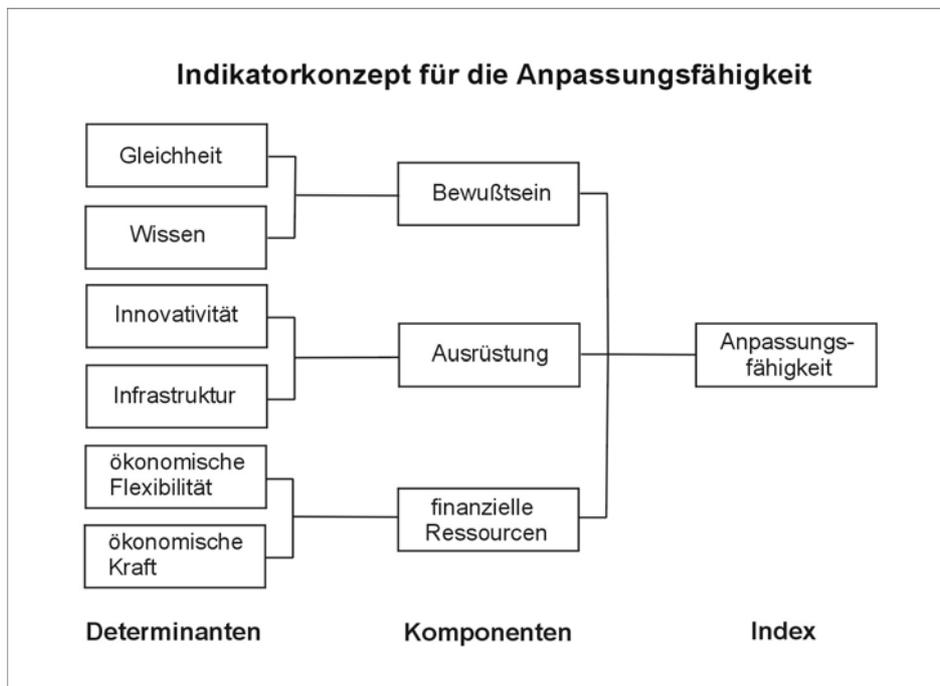


Abb. 1.5: Konzept für die Zusammensetzung eines allgemeinen Anpassungsfähigkeits-Index aus den Indikatoren verschiedener Bereiche (modifiziert nach Schröter et al., 2004).

Der allgemeine Anpassungsfähigkeits-Index setzt sich aus drei Komponenten und sechs Determinanten zusammen. Für die weitere Operationalisierung müssen nun für jede der sechs Determinanten je nach administrativer Ebene, Sektor und Klimaereignis ein oder mehrere geeignete Indikatoren gefunden werden, z.B. Einkommensgleichheit (Gleichheit), Abiturquote der Schulabgänger (Wissen), Anzahl der Patente (Innovativität), Ärzte pro Einwohner (Infrastruktur), BSP pro Kopf (ökonomische Flexibilität) und Überschuss des öffentlichen Haushalts (ökonomische Kraft). Die Verknüpfung der einzelnen Indikatoren erfolgt dann schrittweise mit Methoden aus dem Bereich der fuzzy logic.

Die folgenden Anwendungsbeispiele des *subjektivistischen Ansatzes* samt ersten Ergebnissen für Baden-Württemberg wurden vom PIK im Rahmen der UBA-Studie zur Vulnerabilität klimasensitiver Systeme in Deutschland erarbeitet. Gegenstand der Untersuchung war dabei der Sektor Forstwirtschaft. Die Befragung richtete sich an Entscheidungsträger aus Landesforstverwaltungen und Landesforstministerien, die in ihrem Referat die Verantwortung für das Thema Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel tragen. In strukturierten Interviews wurden semi-quantitative Angaben zu den wahrgenommenen Risiken/Chancen und Anpassungsmöglichkeiten abgefragt.

Die in der [Abbildung 1.6](#) bis [Abbildung 1.8](#) dargestellten ersten Ergebnisse sollen hier nur zur Illustration des Ansatzes und der aus ihm prinzipiell gewinnbaren Information dienen. Sie beruhen auf der Befragung von einem Experten pro Bundesland. Die Ergebnisse können daher - wie bei Experteninterviews üblich - nicht als repräsentatives Meinungsbild angesehen werden. Vielmehr stellen sie Einschätzungen von Sachlagen aus Sicht einzelner Experten dar.

### Forstwirtschaft: Risiken und Chancen (Baden-Württemberg)

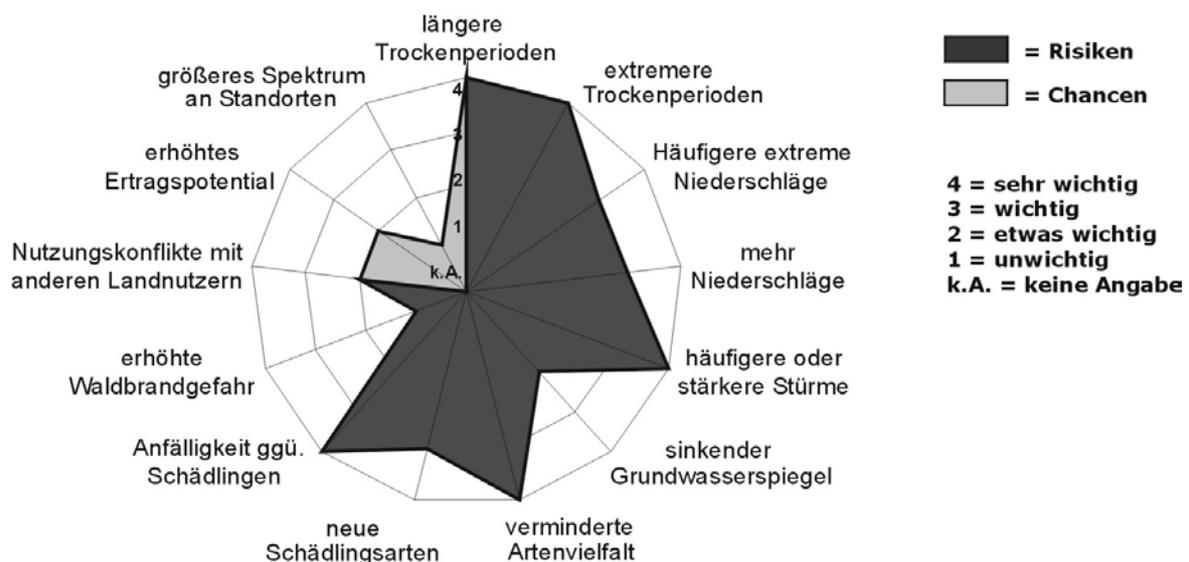


Abb. 1.6: Einschätzung der Wichtigkeit von elf Risiken und zwei Chancen auf einer Skala von "sehr wichtig" bis "unwichtig" für den Sektor Forstwirtschaft in Baden-Württemberg. Dieser exemplarischen Darstellung liegen allerdings nur die Angaben eines einzigen befragten Entscheidungsträgers zugrunde (modifiziert nach Haße, 2004).

Inhaltlich sollen diese Ergebnisse an dieser Stelle nicht weiter diskutiert werden, da sie auf nur wenigen Expertenmeinungen beruhen, daher also noch der Absicherung bedürfen. Dennoch scheinen sich beim Bundesländer-Vergleich bereits systematische Muster abzuzeichnen, so z.B. die klare Nord-Süd-Differenzierung bei der Wahrnehmung des Risikos "sinkender Grundwasserspiegel".

## Forstwirtschaft: Anpassungsmaßnahmen (Baden-Württemberg)

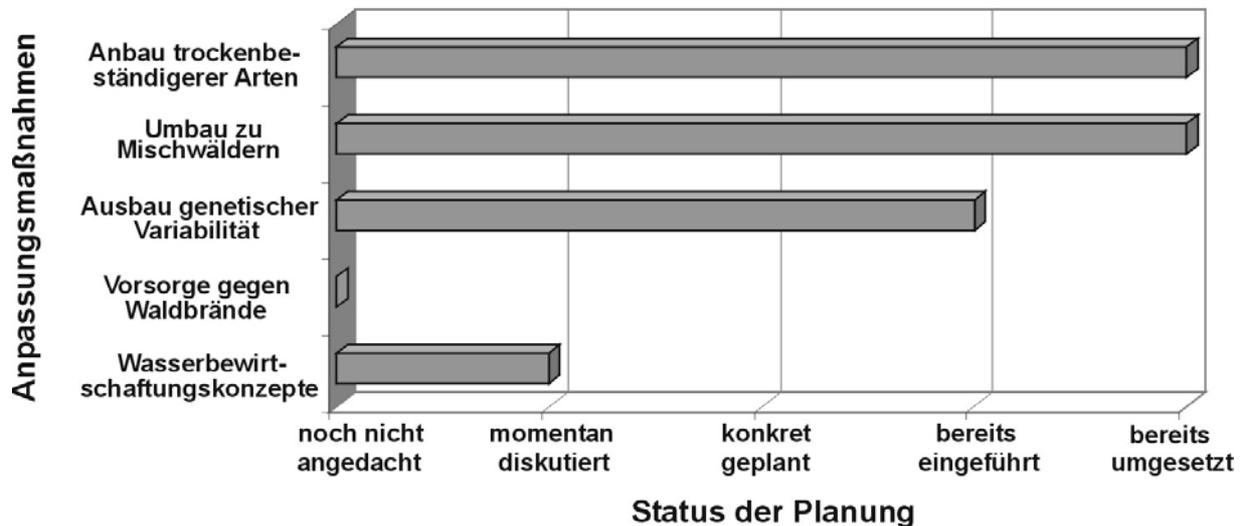


Abb. 1.7: Einschätzung des Planungsstatus von fünf verschiedenen Anpassungsmaßnahmen auf einer Skala von "noch nicht angedacht" bis "bereits umgesetzt" im Sektor Forstwirtschaft in Baden-Württemberg. Dieser exemplarischen Darstellung liegen allerdings nur die Angaben eines einzigen befragten Entscheidungsträgers zugrunde (modifiziert nach Haße, 2004).

## Forstwirtschaft: ausgewählte Risiken (Bundesländer im Vergleich)

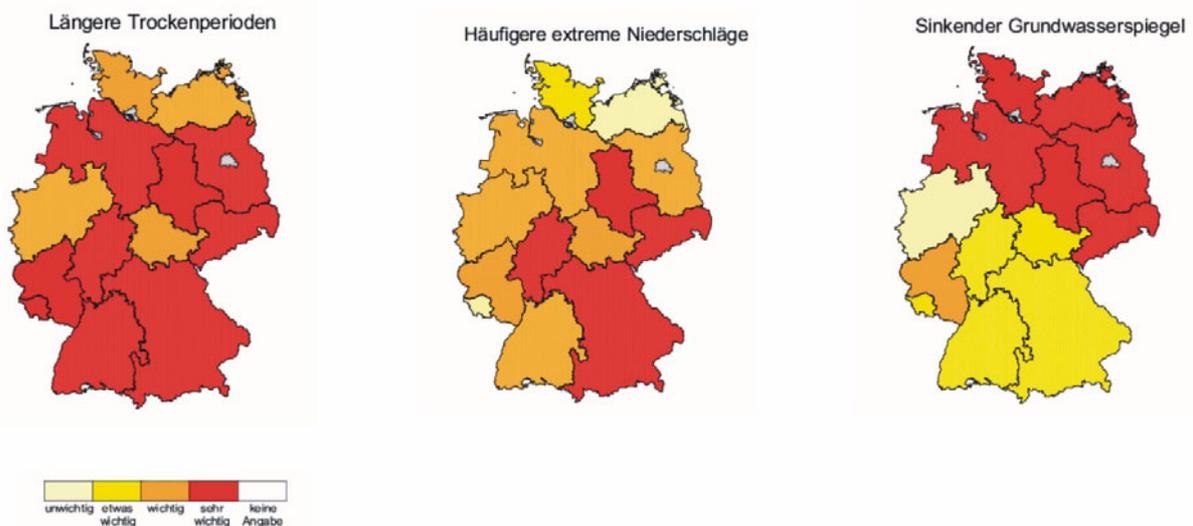


Abb. 1.8: Einschätzung der Wichtigkeit von drei ausgewählten Risiken auf einer Skala von "sehr wichtig" bis "unwichtig" für den Sektor Forstwirtschaft in allen Bundesländern (modifiziert nach Haße, 2004).

Als nächste Schritte bieten sich die Verbreiterung der statistischen Basis (mehr Interviews), die Anwendung des Ansatzes auf andere Sektoren und eventuell eine feinere räumliche Auflösung der Befragung an.

Nach diesen exemplarischen Beispielen sollen die Vor- und Nachteile der beiden Methoden stichwortartig gegenübergestellt werden:

### **Subjektivistischer Ansatz:**

- Vorteile:
  - Subjektive Wahrnehmung von Risiken und Einschätzung von Handlungsmöglichkeiten sind ausschlaggebend für das Handeln der Akteure.
  - Einbeziehung von Entscheidungsträgern erleichtert den Dialog zwischen Wissenschaft und Politik. In einem wechselseitigen Lernprozess können darauf aufbauend Anpassungsmaßnahmen gemeinsam entwickelt werden.
  - Mögliche Aufdeckung von Diskrepanzen zwischen wahrgenommenen und auf der Basis von Klimamodellen prognostizierten Risiken.
- Nachteile:
  - Politische Antworten; subjektive Meinung von Einzelpersonen
  - Hoher Aufwand

### **Objektivistischer Ansatz:**

- Vorteile:
  - Unabhängigkeit von subjektiven Expertenmeinungen
  - Bei Datenverfügbarkeit und vorliegenden Mechanismusvorstellungen schnell durchführbar
- Nachteile:
  - Problem der Indikatorenauswahl und deren Verknüpfung bzw. Gewichtung
  - Oft kaum Vertrauen in die Ergebnisse von Seiten der Stakeholder

Das Fazit aus dieser Gegenüberstellung der bisherigen Erfahrungen ist, dass die subjektivistische Methode aufgrund ihrer Vorteile und der Nachteile des objektivistischen Ansatzes vielversprechender ist und künftig primär weiterverfolgt werden soll. Möglicherweise ergeben sich aber aus den damit erzielten Resultaten wiederum Hinweise für die relevanten Indikatoren und deren Verknüpfung, so dass dann der objektivistische Ansatz zur Extrapolation der Resultate aus dem subjektivistischen Ansatz verwendet werden könnte.

Abschließend soll bemerkt werden, dass die *zukünftige Veränderung der Anpassungsfähigkeit* bisher nicht berücksichtigt wurde. Diese kann aber bei der Betrachtung längerer Zeiträume von entscheidender Bedeutung sein. Deshalb muss bei beiden Ansätzen auch die Entwicklung von Szenarien zur zukünftigen Veränderung der Anpassungsfähigkeit angestrebt werden. Beim objektivistischen Ansatz kann das durch die zeitliche Fortschreibung der Indikatoren geschehen. Diese Fortschreibung muss mit den zugrundegelegten Klimaszenarien (z.B. SRES-Szenarien des IPCC) konsistent sein und

ist im Allgemeinen auf multiple Regressionsverfahren angewiesen. Beim subjektivistischen Ansatz können die Entscheidungsträger explizit nach der zukünftigen Entwicklung der Anpassungsmöglichkeiten gefragt werden. Diese hängen von den subjektiv wahrgenommenen und prognostizierten sozio-ökonomischen, technologischen, demographischen und institutionellen Trends ab.

### 1.5 Ausblick

Die Untersuchungsergebnisse im Verbundprojekt KLARA, ergänzt durch das Projekt KLIWA der Länder Baden-Württemberg und Bayern, haben gezeigt, wie bereits heute alle Lebensbereiche von deutlichen Klimaveränderungen betroffen sind. Es werden auch Lücken und Defizite erkennbar, die ergänzende Untersuchungen erfordern, um die Synthese zu einem Gesamtbild der Verwundbarkeit des Landes Baden-Württemberg im Klimawandel vervollständigen zu können. Der in diesem Zusammenhang ermittelte weitere Forschungs- und Entwicklungsbedarf beinhaltet z.B. folgende Punkte:

- Zur Erweiterung der Bandbreite der betrachteten zukünftigen Klimaentwicklung im Untersuchungsgebiet sollten weitere aus GCM-Läufen abgeleitete Szenarien (z.B. Variation in den Emissionsszenarien, *IPCC, 2001*) herangezogen werden.
- Des Weiteren ist es sinnvoll, eine Kopplung dieser Szenarien mit einem nichthydrostatischen dynamischen regionalen Klimamodell durchzuführen, um so zu genaueren Aussagen hinsichtlich des räumlich-zeitlichen Auftretens extremer Ereignisse (z.B. Sturm, Starkniederschlag, Gewitter, Trockenperioden) zu kommen.
- Auf dieser Grundlage lassen sich Maßnahmen entwickeln, um kommunale Infrastrukturen zur Wasserbewirtschaftung oder Entwässerungssysteme an zukünftige Klimabedingungen besser anzupassen.
- Die Untersuchung der Gesundheitsgefahren in urbanen Ballungsräumen ist auf Anpassungsmaßnahmen wie Hitzewarnsysteme, Gebäudedesignvorschriften und klimagerechte Stadtplanung hin zu konkretisieren.
- Zusätzlich bedarf es der Betrachtung eventueller klimabedingter Erhöhung von Gesundheitsrisiken durch Allergien auslösende Pollen oder Infektionskrankheiten infolge Einschleppung neuer oder Ausbreitung bestehender Vektoren.
- Für Landwirtschaft und Weinbau ist eine mögliche Änderung im Sortenspektrum sowie die Verschiebung von Anbauzonen nach Norden bzw. in größere Höhenlagen, aber auch ein verstärkter Trockenstress während der Wachstumszeit durch häufigere Extremwetterlagen zu untersuchen. Eine steigende Belastung mit phototoxischen Spurengasen wie Ozon oder durch Schädlinge sollte nicht außer Acht gelassen bzw. vertieft werden.
- Der Waldumbau unter Klimawandel wirft zusätzliche Fragen auf, die bei entsprechender Datenlage modellgestützt untersucht werden können. Das betrifft den Stoffhaushalt, die Baumartenwahl in Mischbeständen und die Bewirtschaftung.
- Im Sektor Tourismus sind die zu erwartenden positiven Effekte genauer zu spezifizieren, um konkrete Handlungsempfehlungen abgeben zu können.

- Zur Anpassung von Naturschutzstrategien auf veränderte Klimabedingungen braucht es weiterer Untersuchungen zum bisherigen Verhalten von Ökosystemen allgemein und möglichen zukünftigen Entwicklungen im Besonderen.
- Nur am Rande betrachtet wurde der Versorgungssektor, z.B. bezüglich des Energiebedarfs. Diese Lücke wäre sinnvollerweise zu schließen.
- Eine weitere zu schließende Lücke betrifft Risiken für exportorientierte Wirtschaftsunternehmen aus Veränderungen der Marktsituation im Klimawandel.

Auf der Basis solcher ergänzender praxisorientierter Untersuchungen kann eine Synthese die Verwundbarkeit Baden-Württembergs im Klimawandel konkretisieren, die Prioritäten dazu unterstreichen und mit Handlungsempfehlungen ausstatten.

## 2 KLIMATISCHE BELASTUNGEN UND EXTREME

### 2.1 Zusammenfassung

Das derzeitige Klima im Untersuchungsgebiet ist gekennzeichnet durch eine mittlere Temperaturzunahme innerhalb des Zeitraums 1951/2000 zwischen 0.6 K und 1.5 K je nach Region. Gleichzeitig wird bis auf wenige Ausnahmen eine Niederschlagszunahme beobachtet, die sich im Mittel für das Gesamtgebiet auf 90 mm im Jahr beläuft. Das entspricht bei einem Gebietsmittel von 992 mm einer Zunahme von 9.1%, die allerdings saisonal unterschiedlich verteilt ist (Sommer - Abnahme, Winter - Zunahme). Während bei der Feuchte eine leichte Abnahme zu beobachten ist (-1.6%), nehmen der Luftdruck (1.2 hPa) und der Wasserdampfdruck (0.4 hPa) zu. Sonnenscheindauer (-0.2 h) und Bewölkung (0.1 1/8) und Wind (-0.2 m/s) ändern sich nur unwesentlich. Die Globalstrahlung nimmt in den meisten Fällen ab (Gebiet ~ -30 J/cm<sup>2</sup>). Bemerkenswert ist, dass in diesem Zeitraum die Frosttage im Mittel um 30 pro Jahr zurückgehen, während die Sommertage gleichzeitig um 20 zunehmen. Die Zunahme des Niederschlags im Schwarzwald mit bis zu 250 mm und die der Starkniederschlagstage um bis zu 11 im Jahr ist als extrem anzusehen.

Zur Berechnung des Zukunftsszenariums wurde ein statistisches "Downscaling-Verfahren" gewählt, das generalisierte Informationen aus einem globalen Klimamodell für die Untersuchungsregion mit regionalen Beobachtungsdaten verbindet. Der Einsatz einer Monte-Carlo-Simulation machte es möglich, die Genauigkeit der Schätzung für die wahrscheinlichste Realisierung deutlich zu verbessern. Eine Gütekontrolle des Modells erfolgte durch den Vergleich simulierter mit tatsächlich beobachteten Daten. Bei einem Fehler < 10% für die Simulation aller meteorologischen Größen konnte ein Zukunftsszenarium mit folgenden Ergebnissen berechnet werden:

Der vorgegebene moderate Temperaturtrend von im Mittel 1.2 K für das transiente Szenarium 2001/2055 führt zu einer weiteren Verringerung der Frosttage, je nach Region um bis zu 40 Tage. Parallel dazu nimmt die Anzahl der Sommertage um bis zu 25 zu. Für den Zeitraum 2046/55 kommt es zu einer geringfügigen Abnahme des Mittels des Gebietsniederschlags im Vergleich zum Beobachtungszeitraum um etwa 9 mm. Allerdings weisen große Teile des Westens und Nordens von Baden-Württemberg eine deutliche Zunahme des Niederschlags auf, während im Lee des Schwarzwaldes bis hin zur östlichen Landesgrenze ein Rückgang zu verzeichnen ist, besonders ausgeprägt im Südosten. Die bereits im Beobachtungszeitraum festgestellten jahreszeitlichen Tendenzen bleiben erhalten. Die Anzahl der Tage mit Starkniederschlägen nimmt vor allem im Westen und Norden weiter zu, in den übrigen Gebieten allerdings ab. Wie im Beobachtungszeitraum ändern sich die anderen meteorologischen Größen nur unwesentlich.

### 2.2 Einführung

Die derzeit ablaufenden Klimaänderungen haben einen Grad erreicht, der global bis regional die menschliche Gesellschaft beeinflusst. Damit stellt sich die Frage, mit welchen Klimaänderungen in den nächsten Jahrzehnten zu rechnen ist und wie sich diese in einzelnen Regionen auswirken. Ein solches Szenarium wird im Folgenden für die Klimaentwicklung bis 2055 für Baden-Württemberg vorgestellt.

Grundsätzlich muss gesagt werden, dass es keine Vorhersage einer zukünftigen Klimaentwicklung gibt. Dies liegt am nichtlinearen Charakter des Klimas und der Tatsache,

dass nicht alle Randbedingungen der zukünftigen Entwicklung bekannt sind, zum Beispiel wie die Treibhausgaskonzentrationen ansteigen werden. Deshalb spricht man bei der Abschätzung zukünftiger Klimaentwicklungen von Szenarien. Dabei versteht man unter einem Szenarium die Wiedergabe zeitlicher und/oder räumlicher charakteristischer Zustände eines Systems auf der Basis definierter Ausgangsbedingungen sowie mehrerer dieses System beschreibender Parameter. Für die Klimaszenarienentwicklung bedeutet dies die Bereitstellung meteorologischer Informationen und deren Änderungen im erforderlichen raum-zeitlichen Maßstab.

Die zukünftige Klimaentwicklung kann man über entsprechende Modellansätze berechnen. Dabei unterscheidet man im Wesentlichen zwei Vorgehensweisen: zum einen den Einsatz dynamischer Modelle (ähnlich denen in der Wettervorhersage), zum anderen den von Modellen, die auf statistischer Basis arbeiten. Beide Vorgehensweisen haben Vor- und Nachteile. Für die folgenden Untersuchungen wird ein statistisches Modell eingesetzt, dessen Vorteile eine hohe räumliche Auflösung, der Erhalt der physikalischen Zusammenhänge, die Möglichkeit einer variablen Szenarienbildung sowie der geringe Rechenzeitaufwand sind. Von Nachteil ist, dass die physikalischen Prozesse nicht direkt erfasst werden und die Stationarität der statistischen Zusammenhänge vorausgesetzt wird, was in der Realität nicht immer der Fall ist. Die Grundidee des Modells besteht darin, zukünftige Klimaänderungen durch Kombination generalisierter Klimamodellergebnisse mit Beobachtungsdaten zu berechnen (*Werner, Gerstengarbe, 1997*).

### 2.3 Auswahl der regionalen Klimaszenarien und Modelle

Man versteht unter einem Szenarium keine Vorhersage im herkömmlichen Sinn sondern die Abschätzung einer möglichen Entwicklung unter der Annahme bestimmter, diese Entwicklung beeinflussender Faktoren (z. B. die zukünftige Zunahme von CO<sub>2</sub> als Faktor für mögliche Klimaänderungen). Im Projekt KLIWA wurden Klimaszenarien mit drei verschiedenen Ansätzen auf der Basis des IPCC-Szenariums A1 berechnet.

- a) REMO - hydrostatisches dynamisches regionales Klimamodell des MPI für Meteorologie Hamburg
- b) GROWEL - Statistisches Regionalmodell der Firma Meteo-Research
- c) STAR - statistisches Regionalmodell des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK).

Wie sich die einzelnen Modelle in die Landschaft der regionalen Klimamodellierung eingliedern, ist der [Abbildung 2.1](#) zu entnehmen.

Für das Projekt KLARA sollten im Rahmen des Auftrags die daraus vorliegenden Ergebnisse berücksichtigt und bezüglich ihrer Möglichkeiten und Grenzen zur Abschätzung von Klimawirkungen in Baden-Württemberg evaluiert werden. Der Schwerpunkt sollte dabei insbesondere auf den Ergebnissen der regionalen Szenarienmodelle STAR und GROWEL liegen.

Im Anhang wird ausführlich dargelegt, warum in Ergänzung zu den KLIWA-Szenarien optimierte Zukunftsszenarien auf der Basis des regionalen Szenarienmodells STAR berechnet wurden. Die Optimierung besteht im Wesentlichen in der Verwendung einer größeren Anzahl an Stationen, der Beseitigung fehlerhafter Daten sowie einer räumlichen und zeitlichen Abgleichung des gesamten Datensatzes. Die Modellergebnisse

unterscheiden sich in ihren grundlegenden Aussagen kaum von den Ergebnissen des Modells GROWEL, so dass für die Abschätzungen in KLARA hauptsächlich auf die Ergebnisse aus dem Modell STAR zurückgegriffen wurde.

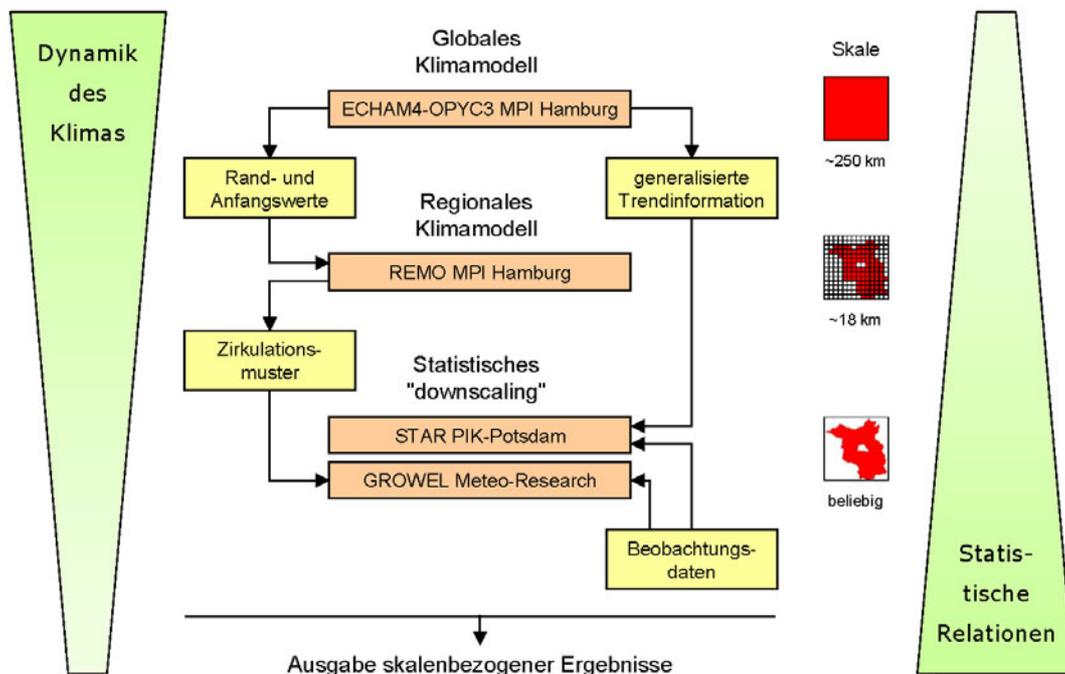


Abb. 2.1: Schema der Modelltypen

## 2.4 Datenbasis der Klimaszenarien

Durch den Deutschen Wetterdienst wurden Daten von 551 Stationen für den Zeitraum 1951-2000 für Baden-Württemberg und Umgebung zur Verfügung gestellt. Davon sind 91 meteorologische Hauptstationen und 460 Niederschlagsmessstellen. Direkt in Baden-Württemberg lagen 245 Stationen (44 Hauptstationen und 201 Niederschlagsstationen). Für die Hauptstationen lagen auf Tageswertbasis die meteorologischen Größen Temperatur (Maximum, Mittel, Minimum), Niederschlag, relative Luftfeuchte, Luftdruck, Wasserdampfdruck, Sonnenscheindauer, Bedeckungsgrad, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit vor.

Die genannten meteorologischen Größen (außer Niederschlag) wurden auf die Niederschlagsmessstellen interpoliert. Dafür und für die Datenprüfung war es notwendig, mehr Stationen einzubeziehen, als dann letztendlich für Klimaanalyse und die Zukunftsszenarien gebraucht werden. Die Überprüfung der bereitgestellten Daten wurde wie folgt vorgenommen:

- Für jedes Element Berechnung der Differenzen zwischen zu prüfender Station mit benachbarten Stationen
- Feststellung signifikanter Änderungen in den Differenzen
- Ursachenbestimmung anhand der Stationsgeschichte soweit wie möglich

- Vorsichtige Korrektur der Daten unter Berücksichtigung der Differenzwerte und der Entwicklungen an den Nachbarstationen
- Listung der nicht korrigierbaren Inhomogenitäten.

Von den 551 Stationen waren 64 statistisch signifikant inhomogen, das entspricht einer Fehlerquote von 11.6%. Durch vorsichtige Korrektur der Daten war es möglich, die fehlerhaften Reihen so zu homogenisieren, dass sie in den Untersuchungen verwendet werden konnten.

Nähere Einzelheiten zur Qualitätskontrolle und ein entsprechendes Beispiel können dem KLIWA-Abschlussbericht entnommen werden.

## 2.5 Das aktuelle Klima Baden-Württembergs

### 2.5.1 Einleitende Bemerkungen

Zur Analyse des aktuellen Klimas wurden die bereits von den unter [Kapitel 2.4](#) angegebenen 551 Stationen (grenzüberschreitende Interpolation zur Kartendarstellung) verwendet, wobei sich die statistischen Auswertungen immer auf die in Baden-Württemberg liegenden 245 Stationen beziehen. Zur Auswertung wurde das Geographische Informationssystem (GIS) ArcView eingesetzt. Um die Kartendarstellungen zu komprimieren, wurden diese so aufgebaut, dass sowohl die mittlere räumliche Verteilung des jeweiligen Parameters, die Trendentwicklung und die Stationen mit ihrer jeweiligen Trendsignifikanz in ihr enthalten sind. Als Parameter wurden neben den Jahresmitteln bzw. mittleren Jahressummen auch die Häufigkeit von Ereignistagen ausgewählt. Letztere definieren sich aus Schwellenwertüber- oder -unterschreitungen. Im Einzelnen liegen für folgende Parameter Auswertungen bezüglich der jeweiligen Größen vor:

Tagesmaximum der Lufttemperatur (Tmax)

- Jahresmittel
- Sommertage (Tmax  $\geq$  25.0 °C)
- Heiße Tage (Tmax  $\geq$  30.0 °C)
- Eistage (Tmax  $<$  0.0 °C)

Tagesmittel der Lufttemperatur (Tmit)

- Jahresmittel
- Kältesumme (Summe von Tmit  $<$  0.0 °C pro Winter)

Tagesminimum der Lufttemperatur (Tmin)

- Jahresmittel
- Frosttage (Tmin  $<$  0.0 °C)

Tagessumme des Niederschlags (Nied)

- Mittlere Jahressumme
- Tage mit ohne oder geringem Niederschlag (Nied  $\leq$  0.1 mm)
- Tage mit starkem Niederschlag (Nied  $\geq$  10.0 mm)

- Mittlere Sommersumme (JJA)
- Mittlere Wintersumme (DJF)

Tagesmittel der relativen Luftfeuchte (Relf)

- Jahresmittel
- Trockene Tage (Relf < 50.0%)
- Feuchte Tage (Relf  $\geq$  90.0%)

Tagesmittel des Wasserdampfdrucks (Dadr)

- Jahresmittel
- Tage mit hohem Wasserdampfdruck (Dadr  $\geq$  15.0 hPa)

Tagessumme der Sonnenscheindauer (Sonn)

- Jahresmittel

Tagesmittel des Bedeckungsgrads (Bewo)

- Jahresmittel

Tagesmittel der Globalstrahlung, der Windgeschwindigkeit und des Luftdrucks

- Jahresmittel

### 2.5.2 Lufttemperatur

In der [Abbildung 2.2](#) ist die räumliche Struktur der Jahresmitteltemperatur für Baden-Württemberg angegeben (Anmerkung: Hier, wie bei den folgenden Abbildungen, sind außerdem Trends und deren Signifikanz angegeben). Man erkennt, dass sich die Orographie in den Temperaturwerten widerspiegelt (z.B. Schwarzwald und Schwäbische Alb). Interessant ist das Trendverhalten der Temperaturgrößen im Zeitraum 1951/2000. Alle Trends sind positiv und statistisch mit mindestens 95% gesichert. Für das Maximum (s. Anhang 2 Abbildung A2.22) liegt der Trend je nach Region zwischen 0.4 K und 1.2 K. Beim Mittelwert beträgt die Spanne 0.6 K - 1.5 K. Den größten Trend verzeichnet das Minimum (s. Anhang 2 Abbildung A2.23) mit 1.0 K - 1.6 K. Einhergehend mit der generell zu beobachtenden Erwärmung sind Änderungen im Auftreten der Ereignistage zu verzeichnen.

#### Frosttage (Abbildung 2.3)

Je nach Region treten in Baden-Württemberg im Mittel pro Jahr zwischen 40 und 200 Frosttage auf wobei parallel zur Temperaturzunahme eine Abnahme der Ereignistage um bis zu 30 zu beobachten ist. Dabei verschiebt sich der Termin des ersten Frostes zum Jahresende hin (bis zu 30 Tagen) und der letzte Frosttag tritt nicht mehr so spät im Jahr auf (bis zu 20 Tagen). Gleichzeitig geht die Andauer von Frostperioden zurück.

#### Eistage (s. Anhang 2 Abbildung A2.27)

Ein analoges Verhalten ist bei den Eistagen zu beobachten.

Kältesumme (s. Anhang 2 Abbildung A2.31)

Der Betrag der Kältesumme verringert sich im Lauf des Beobachtungszeitraumes deutlich.

Sommertage (Abbildung 2.4)

Generell ist eine Zunahme der Sommertage im Mittel um bis zu 20 pro Jahr festzustellen, wobei die absolut deutlichsten Änderungen im Westen des Landes auftreten. Beim Auftreten des ersten und letzten Sommertages ergibt sich ein regional sehr heterogenes Bild sowohl mit Verfrühungen als auch Verspätungen. Mit der Zunahme der Sommertage nimmt auch deren Andauer zu.

Heiße Tage (s. Anhang 2 Abbildung A2.35)

Tendenziell verhält sich die Entwicklung der heißen Tage so wie die der Sommertage. Aufgrund der geringeren Häufigkeit insbesondere in den Gebirgsregionen wird hier auf eine Darstellung des ersten und letzten Auftretens sowie der Andauer verzichtet.

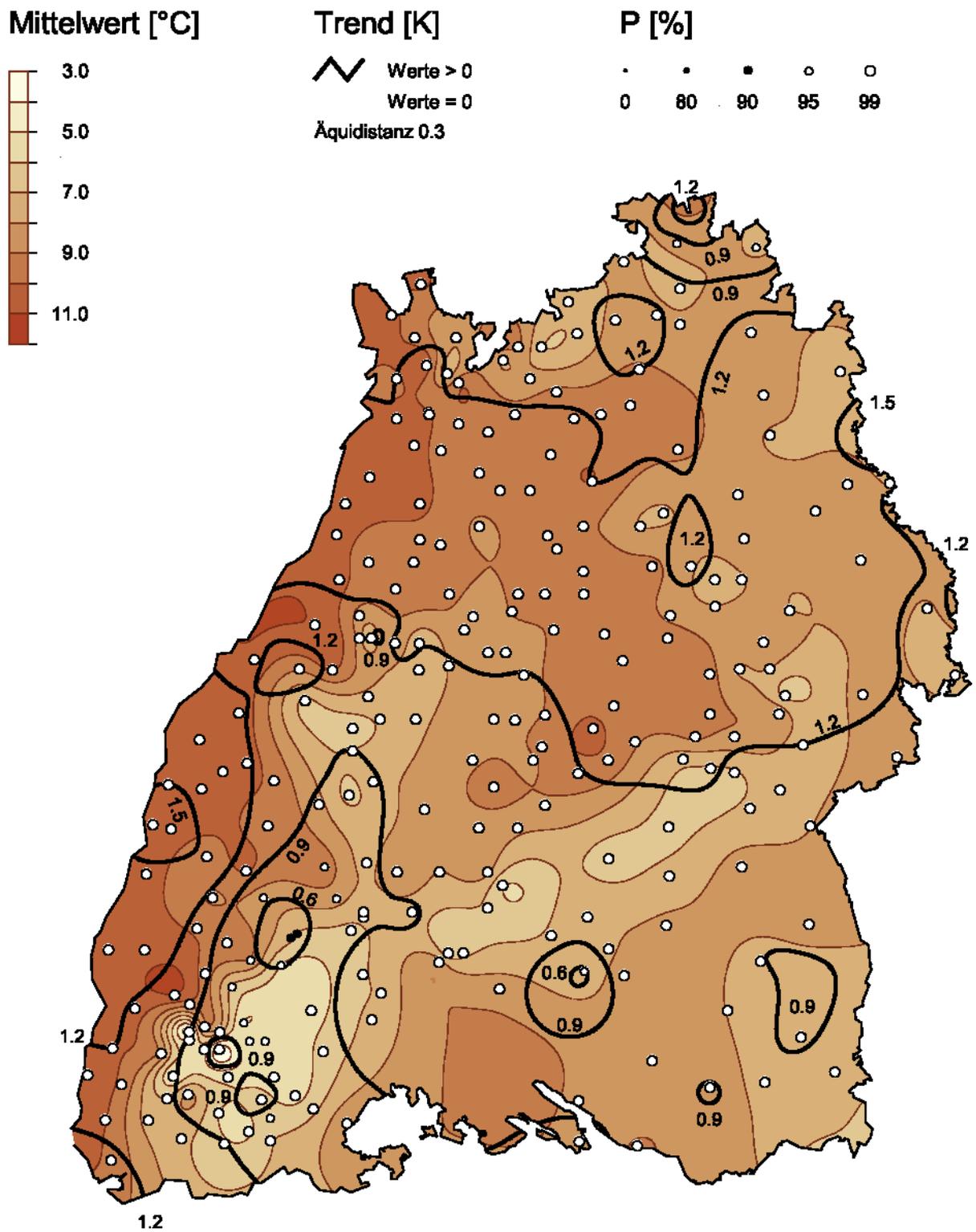


Abb. 2.2: Jahresmittel der Lufttemperatur, 1951-2000

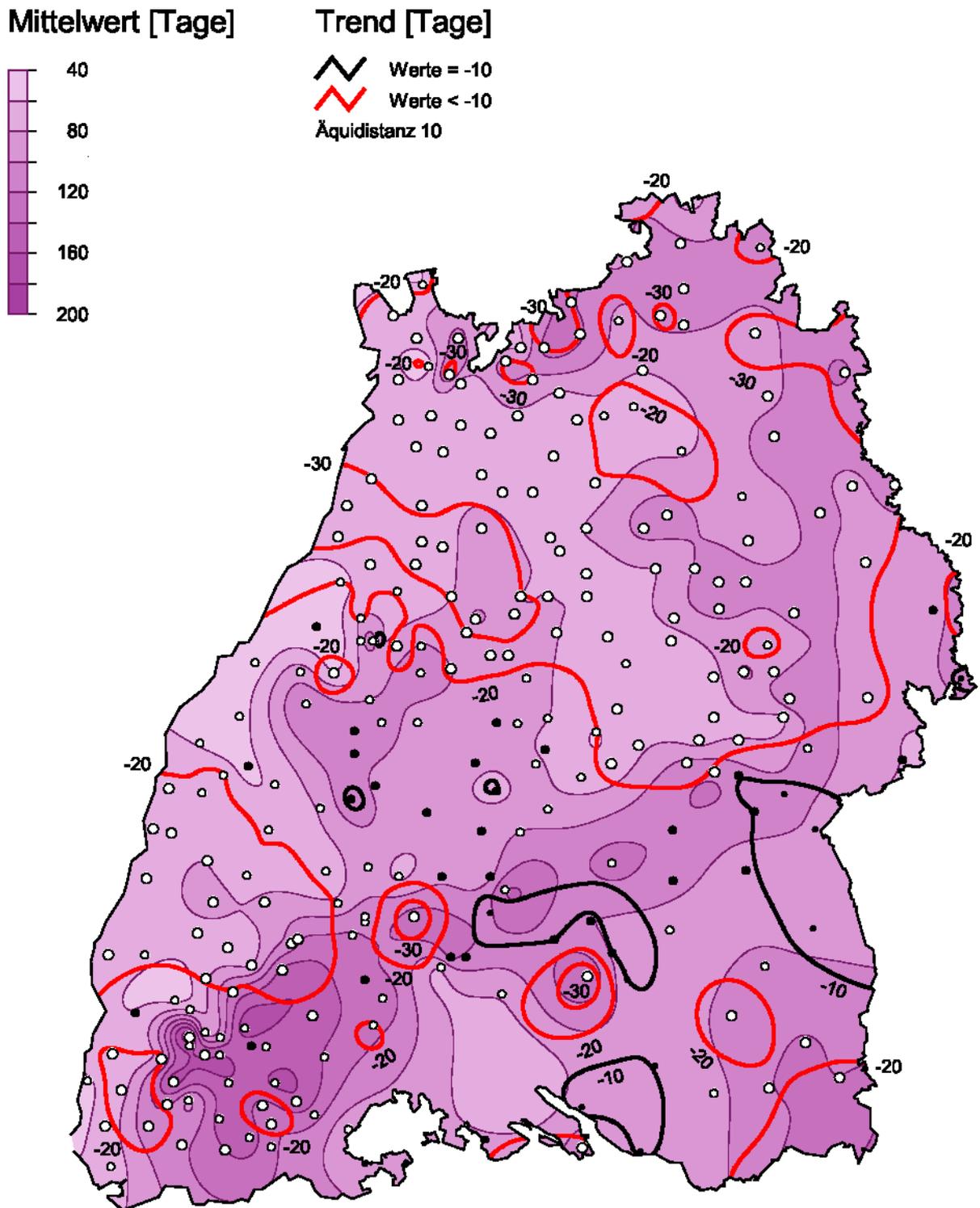


Abb. 2.3: Mittlere Anzahl der Frosttage pro Jahr, 1951-2000

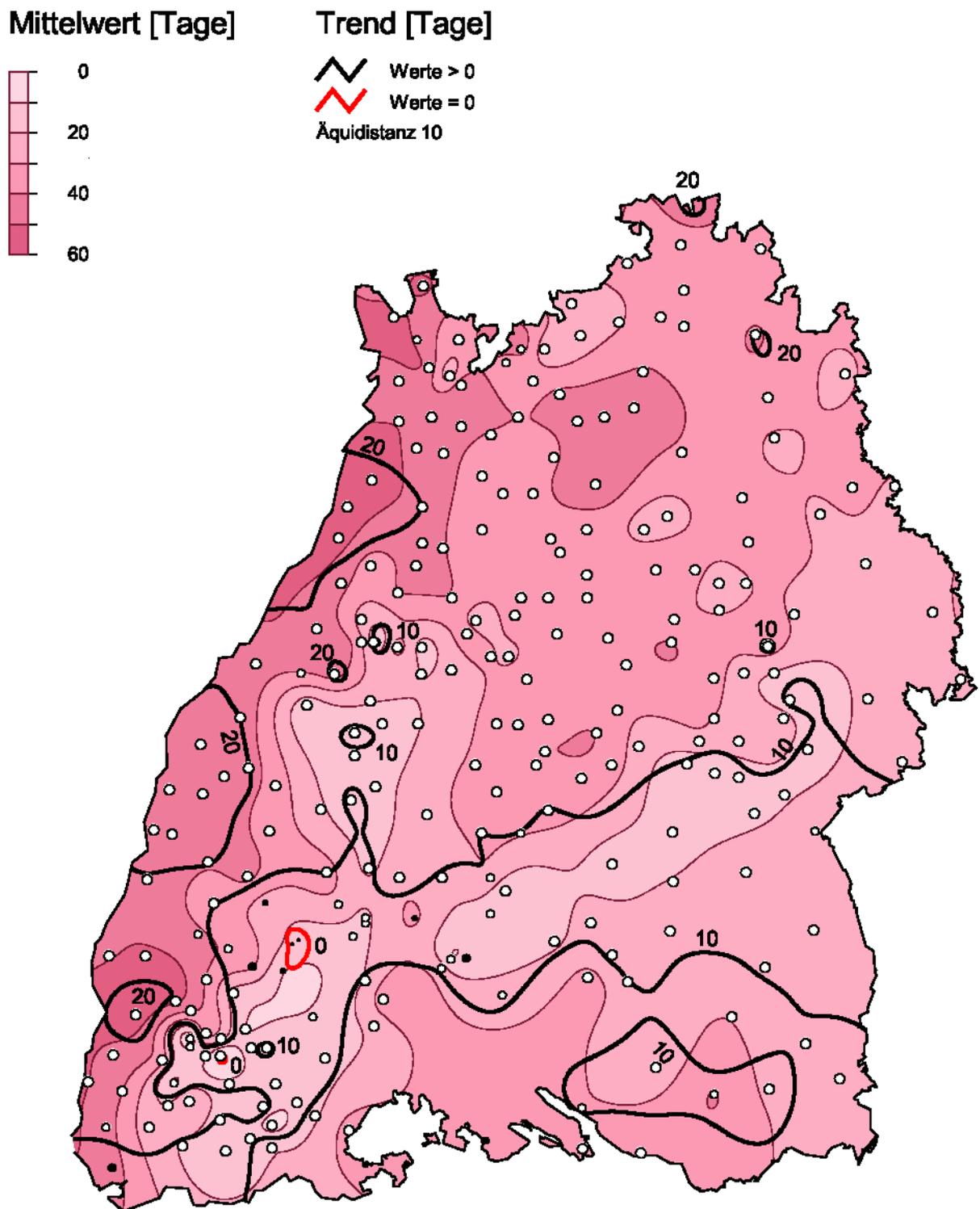


Abb. 2.4: Mittlere Anzahl der Sommertage pro Jahr, 1951-2000

### 2.5.3 Niederschlag

**Abbildung 2.5** zeigt die räumliche Verteilung des Jahresniederschlags im Untersuchungsgebiet. Ebenso wie bei der Temperatur spiegelt sich auch hier die Orographie deutlich wider. Es gibt einige wenige Gebiete (rot umrandet), in denen der Niederschlag über den gesamten Zeitraum konstant geblieben ist. Alle anderen Regionen weisen einen positiven Niederschlagstrend auf, der in einigen Gebieten des Schwarzwaldes bis zu 300 mm beträgt. Dieser Trend tritt im Frühjahr, Herbst und Winter (**Abbildung 2.6**) auf. Im Sommer (**Abbildung 2.7**) ist bis auf geringe Ausnahmen ein Niederschlagsrückgang zu beobachten. Markant fallen die Änderungen (Zu- bzw. Abnahme) im Schwarzwald aus.

#### Tage mit Niederschlag $\leq 0.1$ mm (s. Anhang 2 Abbildung A2.36)

Die Tage mit keinem bzw. sehr geringem Niederschlag sind in ihrer tendenziellen Entwicklung räumlich stark strukturiert. Dabei überwiegen die Gebiete, in denen ein Rückgang zu verzeichnen ist.

#### Tage mit Niederschlag $\geq 10$ mm (s. Anhang 2 Abbildung A2.37)

Bis auf wenige Ausnahmen nehmen die Tage mit starkem Niederschlag deutlich zu. Dies gilt vor allem für das gesamte Schwarzwaldgebiet.

Für alle weiteren meteorologischen Größen sind deren Entwicklungstendenzen im Anhang beschrieben.

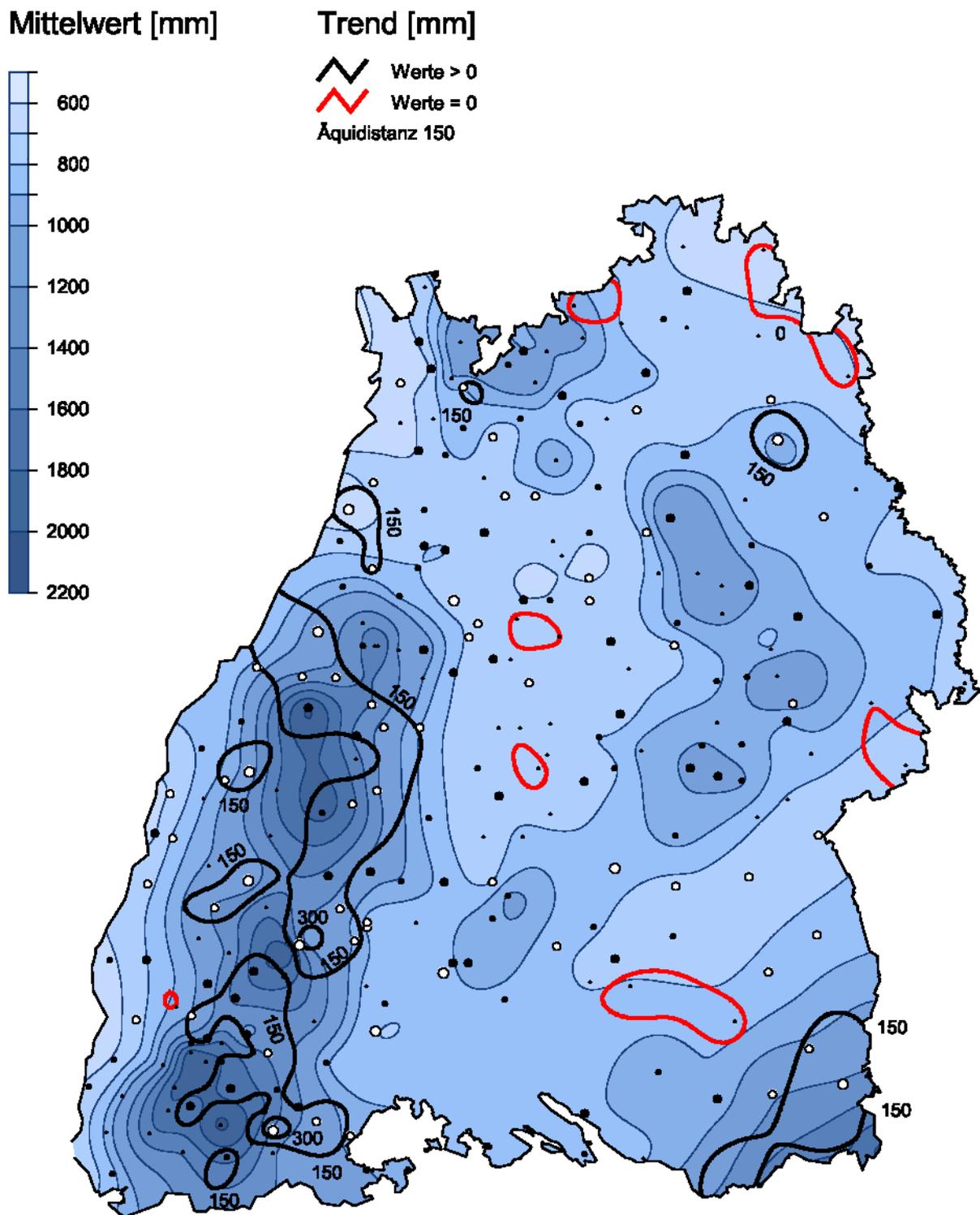


Abb. 2.5: Mittlere Jahressumme des Niederschlags, 1951-2000

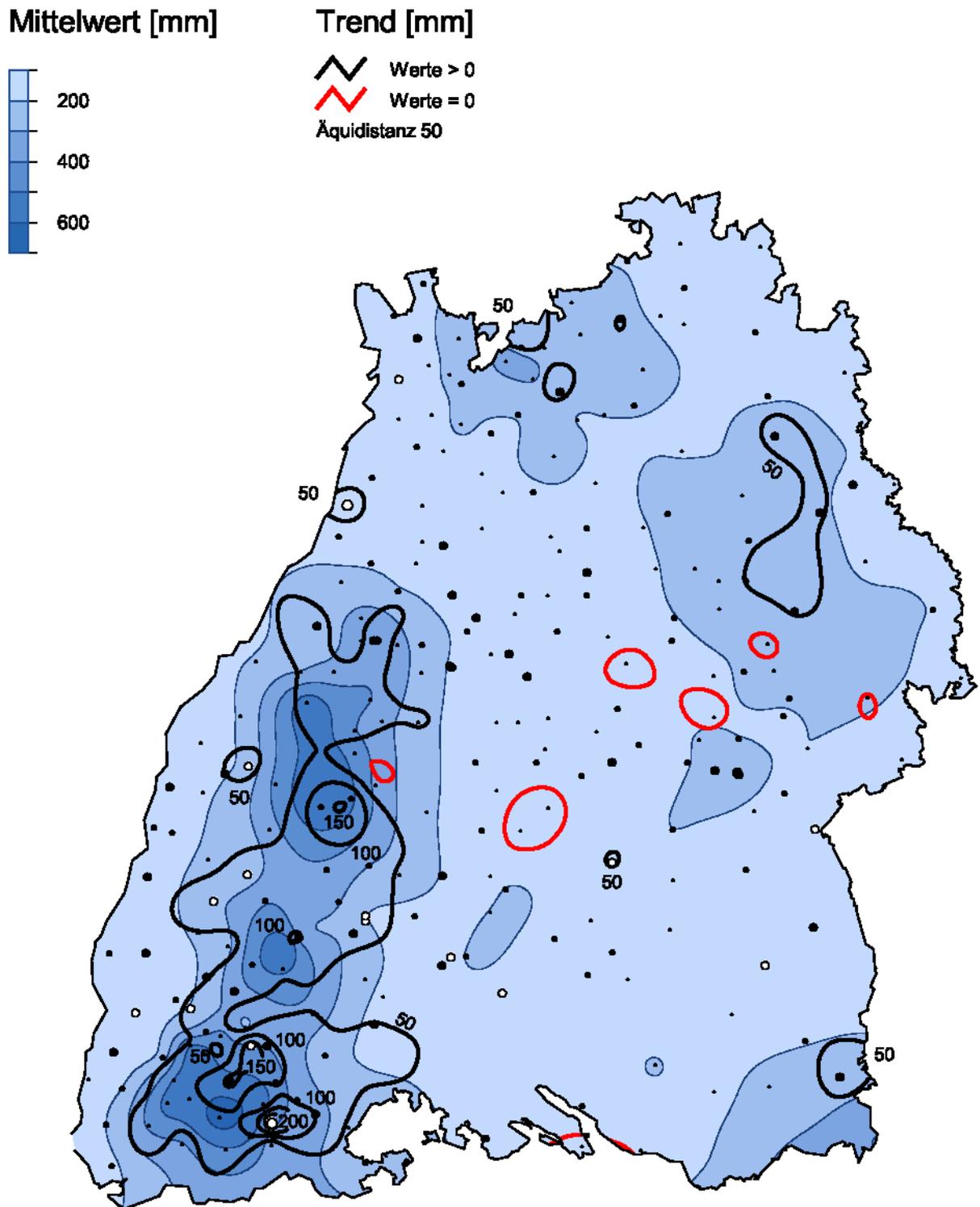


Abb. 2.6: Mittlere Wintersumme des Niederschlags, 1951-2000

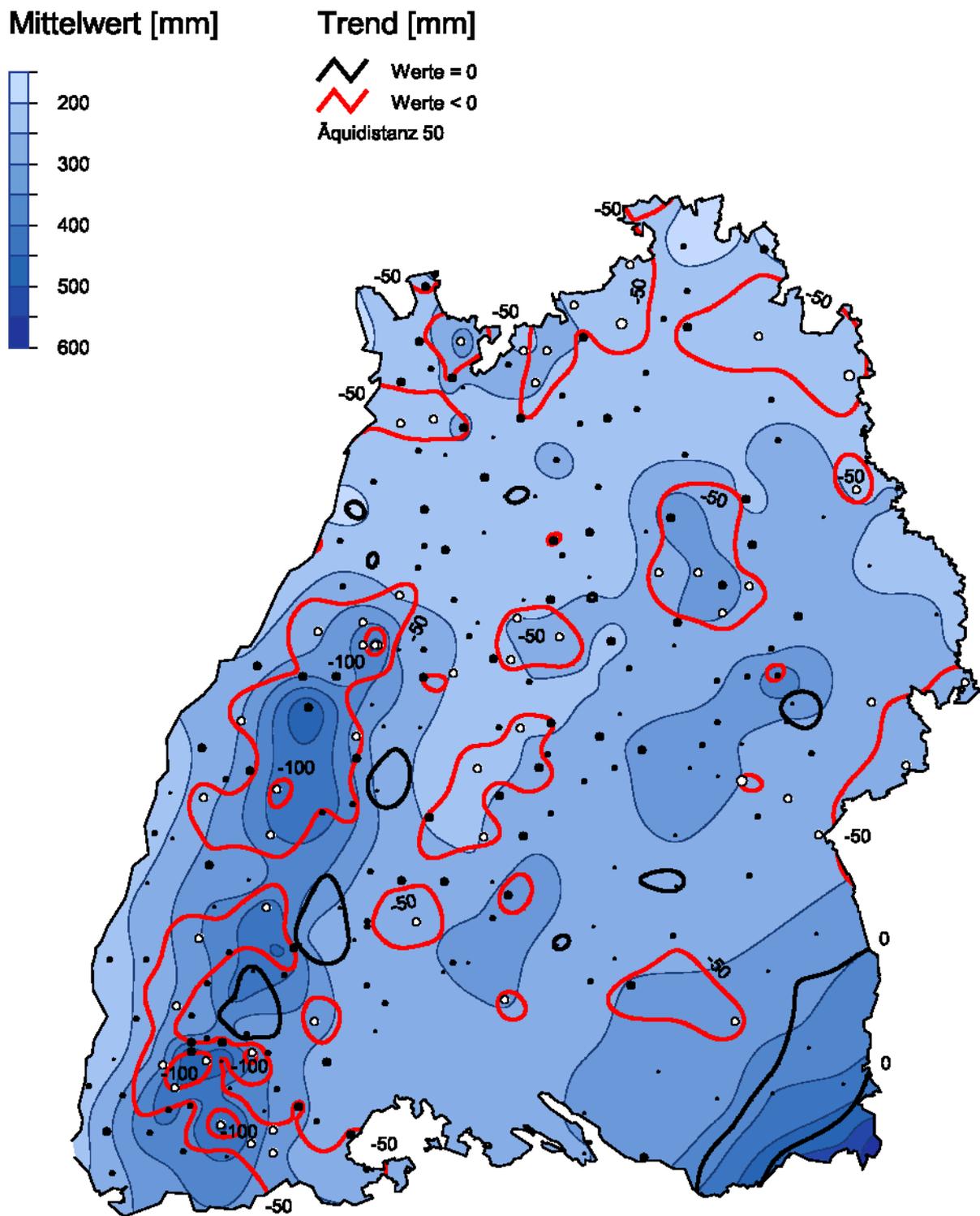


Abb. 2.7: Mittlere Sommersumme des Niederschlags, 1951-2000

## 2.5.4 Zusammenfassende Übersicht zur Klimaentwicklung 1951/2000

Baden-Württemberg weist zwischen 1951 und 2000 deutliche Klimaänderungen auf. Es kann festgestellt werden, dass es zu einer Temperaturerhöhung gekommen ist, die deutlich über dem mittleren globalen Temperaturanstieg liegt. Damit einhergeht, dass die Winter milder und niederschlagsreicher sowie die Sommer wärmer und in großen Teilen trockener geworden sind, wobei die wintertypischen Temperaturereignistage abgenommen, die sommertypischen zugenommen haben.

Die wesentlichsten Änderungen sind:

- Temperaturanstieg im Jahresmittel je nach Region bis zu 1.5 K
- Rückgang der Frosttage im Mittel um 30 Tage pro Jahr
- Zunahme der Sommertage im Mittel um 20 Tage pro Jahr
- Niederschlagszunahme in der Jahressumme um bis zu 250 mm (Schwarzwald)
- Zunahme der Starkniederschlagstage um bis zu 11 Tage pro Jahr (Schwarzwald)

## 2.6 Ergebnisse der Szenarienrechnungen

### 2.6.1 Das transiente Zukunftsszenarium

Unter einem transienten Szenarium versteht man die klimatische Entwicklung über einen definierten Zeitraum (hier 2001-2055) basierend auf der Änderung einer ausgewählten meteorologischen Größe (hier Lufttemperatur) innerhalb dieses Zeitraums. Entsprechend der Modellphilosophie (s. Anhang) wurde die zukünftige Temperaturentwicklung für die Region Baden-Württemberg aus den Ergebnisdaten des globalen Klimamodells ECHAM4/OPYC3 des Max-Planck-Instituts für Meteorologie Hamburg (MPI) berechnet.

Folgende Trendwerte wurden für die 55 Jahre bereits im KLIWA-Projekt ermittelt:

Maximum der Lufttemperatur	-	1.35 K
Mittel der Lufttemperatur	-	1.21 K
Minimum der Lufttemperatur	-	1.14 K.

Mit diesen Werten als Leitgröße und folgenden aus ihnen abgeleiteten Parametern

- Tagesmittel der Lufttemperatur
- Tagesamplitude der Lufttemperatur
- Intervallmittel des Tagesmaximums der Lufttemperatur über Dreiecksfilter
- Intervallmittel der Tagesamplitude der Lufttemperatur über Dreiecksfilter

sowie der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer als Zusatzparameter wurde die Szenarienberechnung durchgeführt.

## 2.6.2 Mittlere Verhältnisse und Trends

In der [Tabelle 2.1](#) und der [Tabelle 2.2](#) sind für alle meteorologischen Größen die Mittelwerte des Zeitraums 2046/2055 sowie die Trends über den Gesamtzeitraum 2001/2055 und deren statistische Sicherung für die in Baden-Württemberg liegenden meteorologischen Hauptstationen angegeben.

Tab. 2.1: Jahresmittelwerte - summen für das transiente Szenarium

Station	Tmax	Tmit	Tmin	Nied	Relf	Ludr	Dadr	Sonne	Bewo	Gstr	Wind
Lahr	16.6	12.0	7.5	803.4	75.3	995.8	10.8	4.8	5.1	1068.7	2.4
Vogtburg	16.6	12.0	7.6	683.3	75.1	981.7	10.6	5.1	4.5	1083.8	1.2
Eberbach/Neckar	15.7	10.6	6.6	1085.1	75.6	995.4	9.9	4.6	5.6	956.3	1.2
Eppingen	15.4	11.2	7.2	881.0	75.0	991.5	10.2	4.7	4.8	983.2	2.0
Freudenstadt	12.4	8.1	4.7	1846.6	78.6	924.7	8.8	4.6	5.2	1002.0	3.1
Gschwend	14.4	9.5	5.3	1067.3	80.3	958.8	9.7	4.7	5.1	951.0	1.7
Hechingen	14.6	9.8	5.3	733.3	79.1	956.2	9.7	4.7	4.8	1030.1	1.5
Karlsruhe	16.8	12.1	7.9	786.2	75.2	1000.0	10.6	4.7	5.3	955.8	3.1
Klippeneck	12.1	7.8	4.3	799.9	77.7	903.9	8.5	5.2	5.1	1040.0	3.8
Lenningen	12.7	9.0	5.8	975.6	76.0	928.6	8.8	4.5	5.8	1000.7	4.0
Mannheim	16.6	11.8	7.4	652.4	74.6	1005.3	10.4	4.2	8.3	995.4	2.8
Mergentheim	15.4	10.2	5.7	760.3	77.5	986.8	9.6	4.2	5.4	925.8	2.0
Münsingen	12.6	8.2	4.2	885.9	79.3	929.1	8.8	4.6	4.8	1028.9	2.8
Öhringen	15.3	10.8	6.7	842.8	76.7	984.5	10.0	4.5	5.2	925.8	2.0
Stötten	12.2	8.4	5.2	1050.2	79.9	931.3	9.0	4.8	5.4	1018.7	5.1
Triberg	13.0	8.5	4.8	1736.0	80.7	933.8	9.2	3.7	4.7	955.2	0.6
Ulm	13.5	9.4	5.6	659.2	79.7	950.6	9.4	4.5	5.4	986.3	2.7
Villingen	13.4	8.4	4.0	780.2	79.3	929.6	8.8	4.6	4.9	1042.6	1.9
Rottweil	14.3	8.9	4.3	784.6	79.2	954.8	9.3	4.7	5.3	1100.6	1.0
Laichingen	12.5	8.4	4.8	941.6	78.1	929.8	9.0	4.9	5.0	1200.7	2.7
Baden-Baden	15.8	10.8	6.1	1293.6	79.8	987.1	10.8	4.7	5.1	1028.5	1.8
Heidelberg	16.2	12.2	8.4	738.0	72.4	1003.9	10.2	4.4	5.0	1014.0	1.5
Herrrenalb	15.1	10.0	6.1	1460.9	77.6	973.0	9.8	3.8	5.0	923.9	1.9
Schömburg	13.3	8.8	5.4	1096.9	79.2	940.4	9.3	4.4	5.4	1008.3	1.1
Heilbronn	16.3	11.6	7.3	764.1	79.0	997.4	10.8	4.4	4.9	1012.9	1.2
Buchen	14.4	9.9	5.5	816.9	79.4	975.8	9.6	4.2	5.3	979.4	1.3
Neudena	16.0	11.1	6.7	799.0	76.5	992.2	10.2	4.5	4.7	1004.1	1.4
Murrhardt	14.7	9.6	5.6	1103.3	78.8	976.7	9.7	4.4	5.0	990.9	0.7
Dobel	12.8	9.1	5.8	1609.8	71.6	930.0	8.6	4.3	5.2	995.4	2.7
Dürrheim	14.9	8.6	3.5	727.2	80.2	936.1	9.3	4.8	4.9	1033.7	1.1
Siegmaringen	14.3	8.8	4.1	738.3	79.2	947.9	9.1	4.6	5.1	1072.5	1.0
Schwäb. Gmünd	14.9	10.5	6.5	868.6	74.9	967.5	9.7	4.5	5.1	1052.7	1.0
Crailsheim	14.4	9.7	5.6	791.9	74.0	966.6	9.0	4.8	5.1	1059.1	1.0

Tab. 2.1: Jahresmittelwerte - summen für das transiente Szenarium

Station	Tmax	Tmit	Tmin	Nied	Relf	Ludr	Dadr	Sonne	Bewo	Gstr	Wind
Badenweiler	15.7	11.2	7.2	925.3	73.8	970.8	10.1	4.6	4.8	1053.3	1.5
Freiburg	16.8	12.6	8.6	874.1	69.7	982.0	10.3	5.0	5.5	1076.0	3.4
Schalstadt	17.0	12.1	7.8	752.6	75.8	982.7	10.7	4.7	5.4	1057.1	2.3
Aulendorf	14.2	9.6	5.4	686.6	71.7	933.0	9.8	4.7	5.3	1086.7	2.4
Feldberg	8.0	5.0	2.3	1798.5	80.8	849.9	7.1	4.8	5.6	1002.6	8.2
Höchenschwandt	11.7	7.7	4.5	1523.6	78.7	899.9	8.7	4.8	4.8	1060.3	3.9
Überlingen	14.6	10.0	6.0	811.8	80.7	939.5	9.9	4.7	4.8	1072.2	2.0
Donaueschingen	13.7	8.8	3.9	791.0	79.2	937.9	9.2	4.8	4.9	1056.8	0.8
Hinterzarten	12.9	7.2	2.5	1485.4	80.3	912.8	8.5	4.7	5.0	1055.1	1.2
Sankt Blasien	13.0	7.9	3.5	1618.8	81.9	925.4	8.8	4.5	4.9	1021.2	1.2
Weingarten	15.0	10.2	6.0	802.9	81.6	963.9	10.2	4.7	5.2	1054.6	1.6

Tab. 2.2: Trends der Jahresmittelwerte - summen für das transiente Szenarium, grau = gesicherte Trends mit mindestens 90% stat. Sicherheit

Station	Tmax	Tmit	Tmin	Nied	Relf	Ludr	Dadr	Sonne	Bewo	Gstr	Wind
Lahr	1.3	1.2	1.2	-4.6	-0.3	0.1	0.3	0.1	-0.1	-47.3	0.1
Vogtburg	1.4	1.2	1.2	7.8	-0.3	0.1	0.2	0.1	-0.2	-26.8	0.0
Eberbach/Neckar	1.3	1.3	1.1	84.1	0.1	0.0	0.2	-0.1	-0.1	-68.5	0.0
Eppingen	1.3	1.2	1.1	48.6	-0.1	0.0	0.2	0.1	-0.2	-53.6	0.0
Freudenstadt	1.3	1.2	1.2	171.4	-0.9	0.2	0.3	0.2	-0.2	-32.6	0.0
Gschwend	1.5	1.2	1.2	34.2	-0.2	0.1	0.2	0.1	-0.2	-54.4	0.0
Hechingen	1.4	1.2	1.1	-69.5	-0.5	0.1	0.2	0.1	-0.3	-44.2	0.0
Karlsruhe	1.3	1.3	1.2	48.8	-0.1	-0.1	0.2	-0.1	-0.1	-67.1	0.1
Klippeneck	1.4	1.2	1.2	-93.2	-1.0	0.2	0.2	0.2	-0.2	-31.6	0.2
Lenningen	1.2	1.2	1.2	-53.7	-0.6	0.1	0.2	0.2	-0.2	-43.3	0.1
Mannheim	1.3	1.2	1.1	27.7	0.5	0.0	0.2	-0.1	-0.1	-56.2	0.0
Mergentheim	1.4	1.2	1.2	24.3	0.1	0.0	0.2	0.0	0.0	-69.1	0.0
Münsingen	1.4	1.3	1.2	-44.3	-0.6	0.2	0.2	0.2	-0.3	-34.8	0.0
Öhringen	1.4	1.3	1.1	38.2	-0.1	0.0	0.2	0.0	-0.1	-65.0	0.0
Stötten	1.3	1.2	1.2	-27.6	-0.9	0.1	0.2	0.2	-0.2	-29.7	0.2
Triberg	1.3	1.2	1.2	46.0	-0.2	0.2	0.2	0.1	-0.2	-28.5	0.0
Ulm	1.3	1.2	1.2	-48.2	0.1	0.1	0.2	0.2	-0.2	-36.2	0.0
Villingen	1.4	1.2	1.2	-34.3	-0.4	0.2	0.2	0.2	-0.3	-29.9	0.0
Rottweil	1.3	1.2	1.2	-22.6	-0.6	0.1	0.2	0.2	-0.2	-39.6	0.0
Laichingen	1.4	1.2	1.2	-38.5	-0.8	0.2	0.2	0.2	-0.2	-19.2	0.1
Baden-Baden	1.3	1.2	1.1	10.3	-0.1	0.0	0.3	0.1	-0.2	-30.2	0.0
Heidelberg	1.3	1.2	1.1	53.1	0.1	0.1	0.2	-0.1	-0.1	-58.7	0.1

Tab. 2.2: Trends der Jahresmittelwerte - summen für das transiente Szenarium, grau = gesicherte Trends mit mindestens 90% stat. Sicherheit

Station	Tmax	Tmit	Tmin	Nied	Relf	Ludr	Dadr	Sonne	Bewo	Gstr	Wind
Herrenalb	1.3	1.2	1.2	34.5	-0.2	0.1	0.2	0.0	-0.1	-43.9	0.1
Schömburg	1.3	1.2	1.2	15.2	-0.9	0.1	0.3	0.1	-0.2	-27.1	0.1
Heilbronn	1.3	1.3	1.2	11.3	0.2	0.0	0.2	0.0	-0.1	-48.6	0.0
Buchen	1.3	1.2	1.2	64.1	0.4	0.1	0.2	0.0	-0.1	-54.8	0.0
Neudena	1.4	1.2	1.1	45.7	0.3	0.0	0.2	0.0	0.0	-51.1	0.1
Murrhardt	1.3	1.2	1.1	52.0	-0.2	0.0	0.2	0.1	-0.2	-33.9	0.0
Dobel	1.4	1.3	1.2	61.4	-0.9	0.1	0.2	0.1	-0.2	-35.9	0.1
Dürrheim	1.4	1.2	1.2	-79.2	-0.5	0.1	0.2	0.2	-0.2	-19.7	0.0
Siegmaringen	1.3	1.2	1.1	-10.9	-0.2	0.2	0.2	0.0	-0.2	-30.9	0.0
Schwäb. Gmünd	1.3	1.2	1.1	-24.3	-0.9	0.1	0.2	0.2	-0.2	-23.6	-0.1
Crailsheim	1.3	1.2	1.1	-3.0	-0.2	-0.1	0.1	0.1	-0.2	-33.1	0.0
Badenweiler	1.4	1.2	1.2	-31.9	-0.7	0.1	0.2	0.0	-0.2	-58.4	0.1
Freiburg	1.3	1.2	1.1	7.6	-0.6	0.0	0.2	0.1	-0.1	-39.8	0.1
Schalstadt	1.4	1.3	1.2	-10.0	-0.1	0.1	0.2	0.1	-0.1	-21.6	0.1
Aulendorf	1.3	1.3	1.2	-92.4	-0.3	0.3	0.2	0.2	-0.2	-29.0	0.0
Feldberg	1.2	1.2	1.3	54.6	-1.6	0.4	0.2	0.3	-0.1	-6.9	0.2
Höchenschwandt	1.3	1.2	1.2	45.9	-0.9	0.3	0.2	0.2	-0.2	-28.8	0.2
Überlingen	1.3	1.1	1.2	-42.3	0.1	0.3	0.2	0.1	-0.2	-39.1	0.0
Donaueschingen	1.3	1.3	1.2	-9.7	-0.4	0.2	0.2	0.2	-0.2	-24.2	0.0
Hinterzarten	1.3	1.2	1.2	61.3	-1.3	0.3	0.2	0.2	-0.2	-16.1	0.0
Sankt Blasien	1.2	1.2	1.1	68.7	-0.3	0.2	0.1	0.2	-0.2	-14.0	0.0
Weingarten	1.4	1.2	1.2	-103.3	-0.2	0.2	0.2	0.1	-0.2	-19.0	0.0

Die zeitlichen Entwicklungen der einzelnen meteorologischen Größen an der Bezugsstation Gschwend wurden bereits im Rahmen des KLIWA-Projektes berechnet und beschrieben. Deshalb wird hier auf eine weitere Darstellung verzichtet.

Für den Zeitraum 2046/55 sind die mittleren räumlichen Strukturen sowie die Differenzkarten der einzelnen meteorologischen Größen den entsprechenden Abbildungen im Anhang zu entnehmen. Näher diskutiert werden im Folgenden für den Niederschlag die Differenzkarten dieses Zeitraums zu dem Zeitraum 1951/2000.

### Niederschlag

Die Entwicklung des Jahresniederschlags (Abbildung 2.8) ist gekennzeichnet durch einen sich fortsetzenden Anstieg im Westen und Norden und einem Niederschlagsrückgang auf und im Lee der Schwäbischen Alb. Die Veränderungen in den Jahreszeiten weichen davon ab. Im Sommer (Abbildung 2.9) setzt sich der Trend zur Abnahme im größten Teil BWs fort, wie er bereits zwischen 1951 und 2000 beobachtet wurde. Der stärkste Rückgang findet im Südosten statt. Kleinere Gebiete im Westen und Norden zeigen eine geringfügige Niederschlagszunahme. Im Winter (Abbildung 2.10) nimmt der Niederschlag fast im gesamten Untersuchungsgebiet zu, aber nicht ganz so stark wie im

Zeitraum 1951/2000. Betrachtet man die Entwicklung der Niederschlagssummen von Sommer und Winter über das Gesamtgebiet gemittelt, so ist eine Annäherung der Summen festzustellen. Während im Zeitraum 1951/2000 im Sommer noch 18% (bezogen auf die Sommersumme) mehr als im Winter fielen, beträgt der Unterschied 2046/2055 nur noch weniger als 2%.

Differenz [mm]

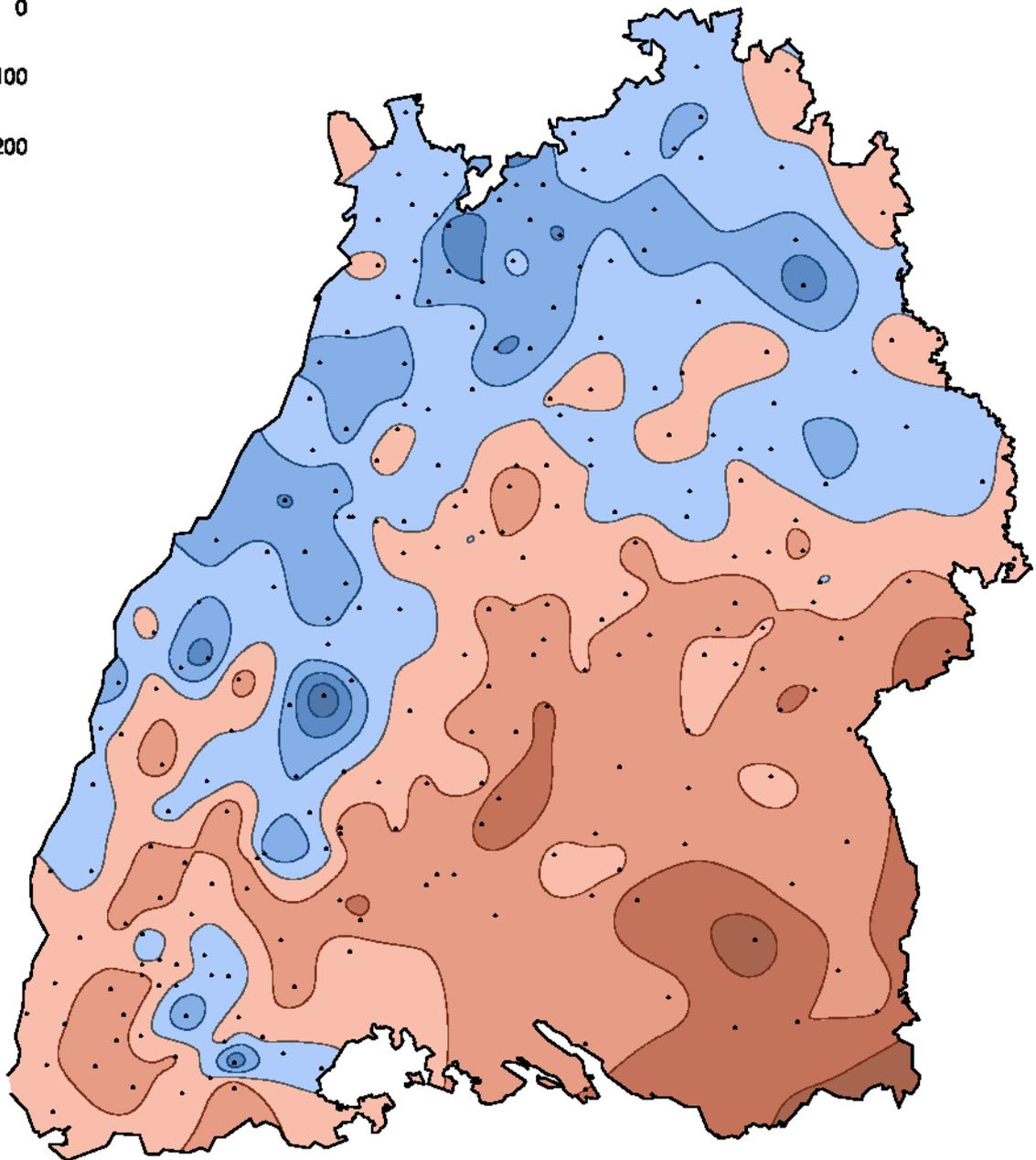
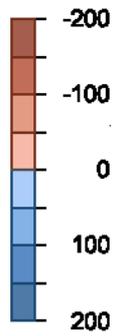


Abb. 2.8: Differenzen der Jahressumme des Niederschlags 2046/2055-1951/2000

Differenz [mm]

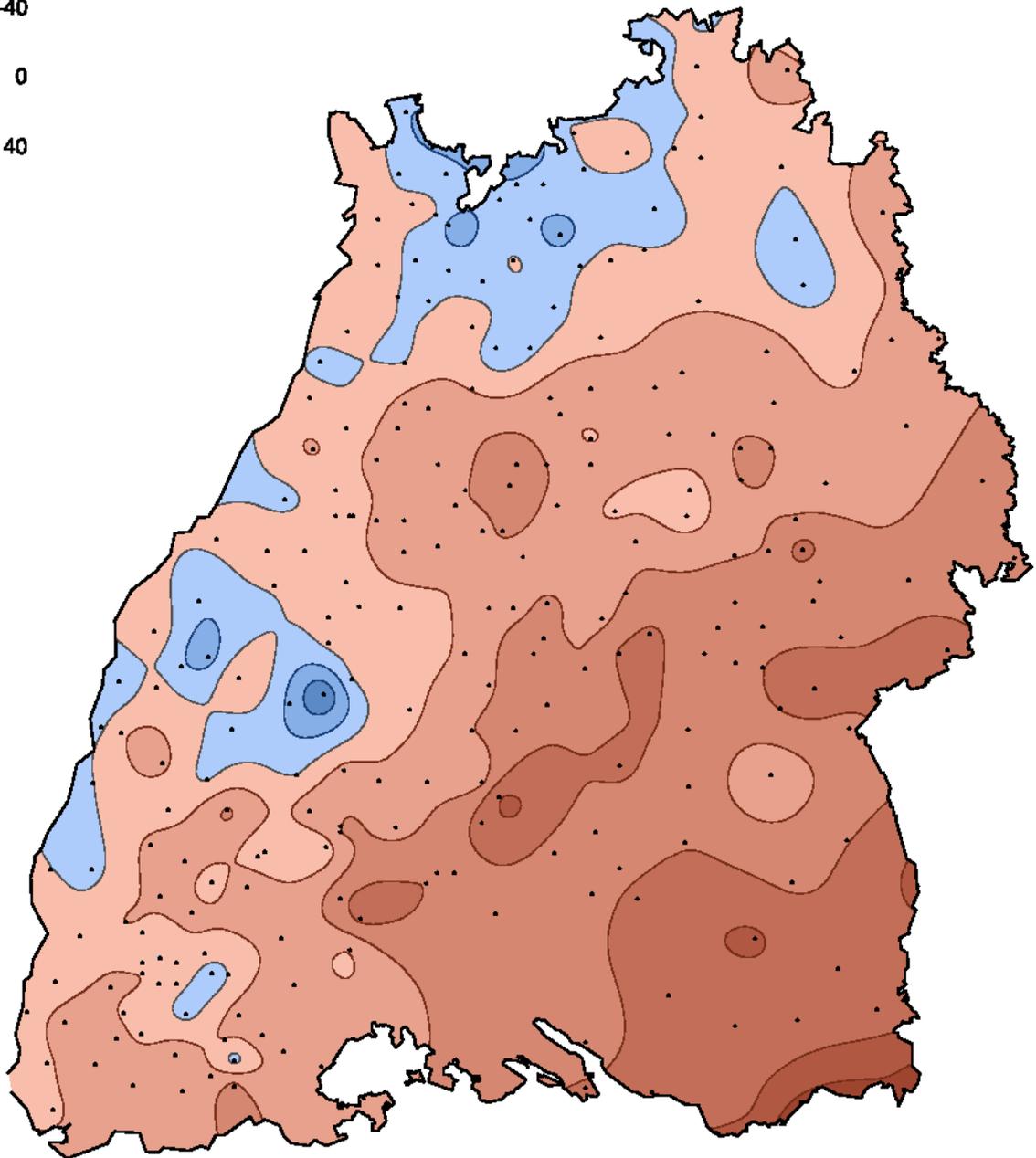
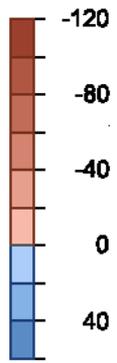


Abb. 2.9: Differenzen der Sommersumme des Niederschlags 2046/2055-1951/2000

Differenz [mm]

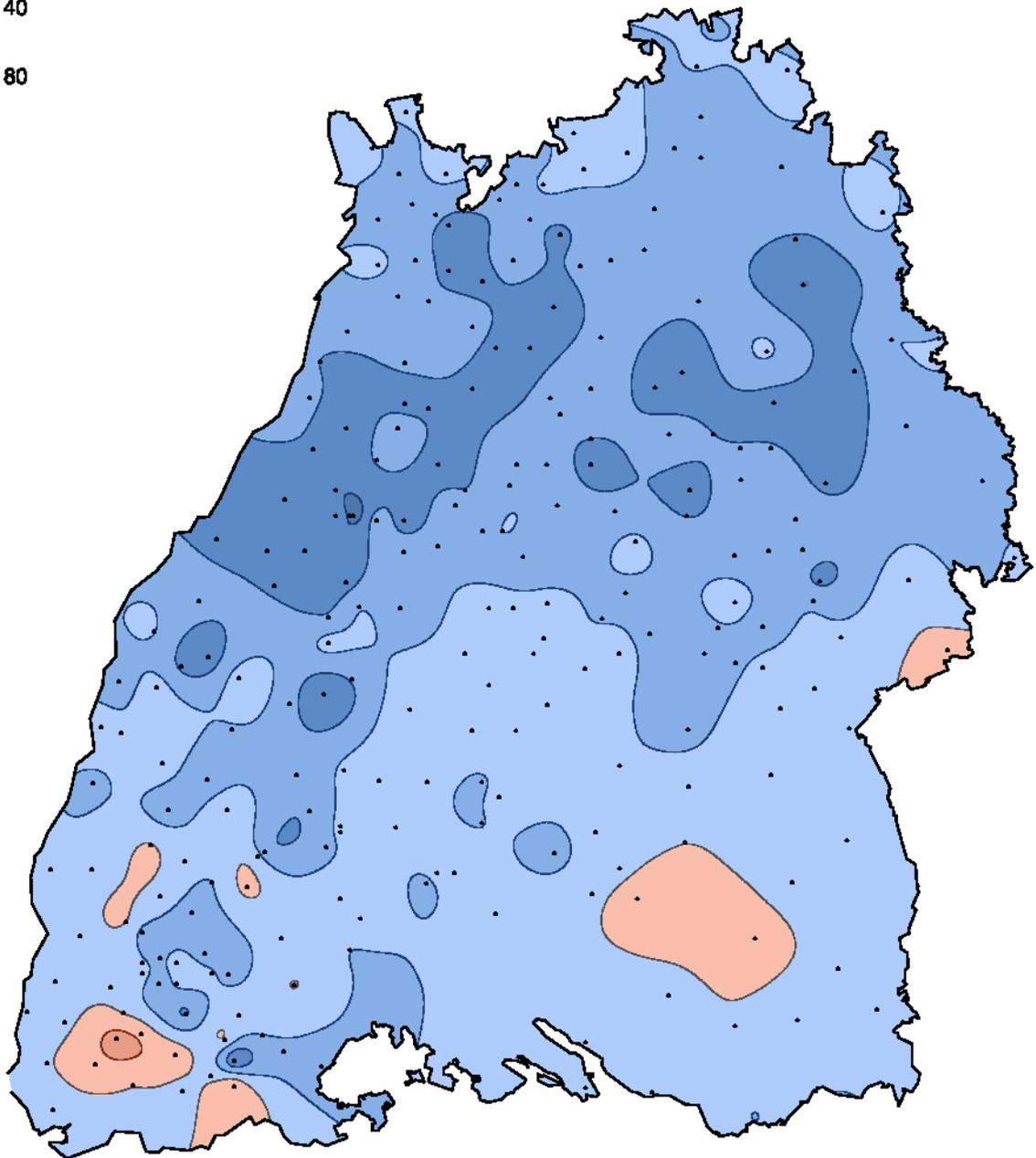
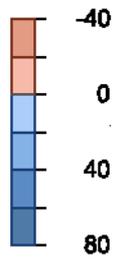


Abb. 2.10: Differenzen der Wintersumme des Niederschlags 2046/2055-1951/2000

### 2.6.3 Extreme und deren Veränderungen

#### Frosttage (Abbildung 2.11)

Aus der Abbildung ist zu erkennen, dass die Frosttage generell zurückgehen. Besonders deutlich ist dieser Rückgang im Nordosten Baden-Württembergs. Dabei tritt der erste Frosttag im größten Teil des Gebietes später ein. Nur im Gebiet des Hochschwarzwaldes und der Schwäbischen Alb sowie dem Südosten des Landes ist ein früherer Eintrittstag zu beobachten (s. Anhang 2 Abbildung A2.67). Der letzte Frosttag im Frühjahr verschiebt sich bis auf die Region des Hochschwarzwaldes mehr zum Jahresbeginn hin (s. Anhang 2 Abbildung A2.69).

Das heißt, dass sich in den meisten Teilen von BW sowohl die Anzahl der Frosttage vermindert als auch die Zeit, in der Frost auftreten kann, verkürzt.

#### Eistage (s. Anhang 2 Abbildung A2.71)

Die Eistage gehen relativ bezogen auf ihre Häufigkeit stärker zurück als die Frosttage, und sie vermindern sich absolut in den Gebieten am deutlichsten, wo ihre Anzahl am größten ist. Der Eintrittstermin des ersten Eistages verschiebt sich in einigen Regionen bis zu einem Monat in den Winter hinein. Die Saison mit Eistagen ist im größten Teil Baden-Württembergs eher zu Ende. Die Gründe für die Verlängerung dieses Zeitraums im Westen, Norden und Südosten trotz allgemeiner Erwärmung sind nicht bekannt.

#### Kältesumme (s. Anhang 2 Abbildung A2.77)

Der Betrag der Kältesumme, der infolge der Erwärmung im Gesamtgebiet zurückgeht, verringert sich dort am stärksten, wo er die höchsten Werte aufweist, also im Schwarzwald und auf der Schwäbischen Alb.

#### Sommertage (Abbildung 2.12)

Die Zunahme der Sommertage fällt insgesamt deutlich aus, in den Gebirgen etwas geringer und nimmt von West nach Ost ab.

#### Heiße Tage (s. Anhang 2 Abbildung A2.84)

Die Anzahl der heißen Tage nimmt räumlich in gleicher Weise wie die Sommertage zu.

#### Tage mit Niederschlag $\leq 0.1$ mm (s. Anhang 2 Abbildung A2.86)

Während die räumlich starke Strukturierung, wie im Beobachtungszeitraum bereits beschrieben, erhalten bleibt, kehrt sich der Trend um.

#### Tage mit Niederschlag $\geq 10$ mm (s. Anhang 2 Abbildung A2.88)

Während die Anzahl der Tage mit größerem Niederschlag im Westen und Norden weiterhin wie schon zwischen 1951-2000 zunimmt, ist im restlichen Gebiet eine Abnahme solcher Niederschlagsereignisse zu verzeichnen.

Differenz [Tage]

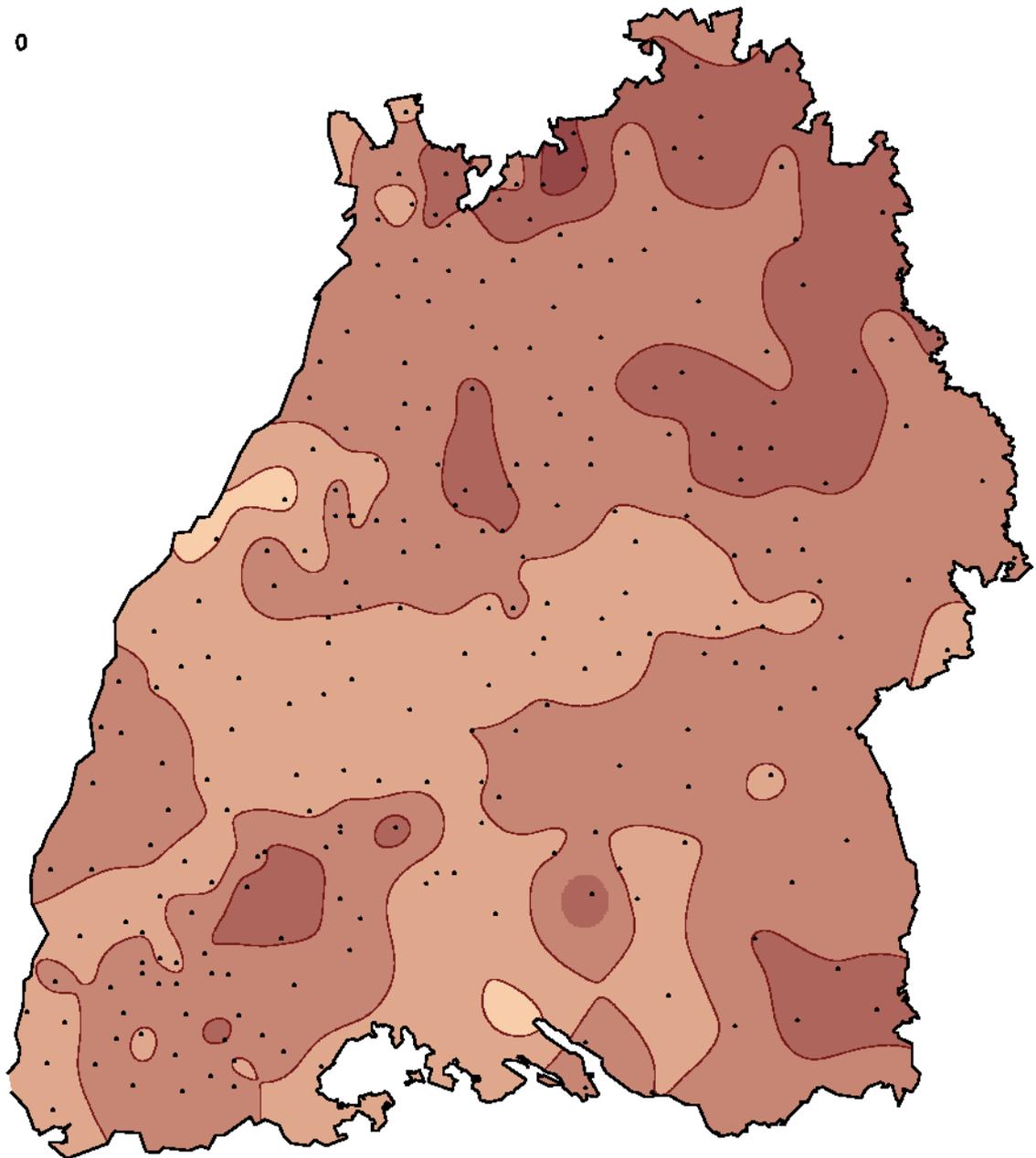
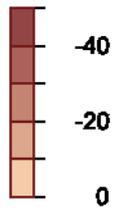


Abb. 2.11: Differenzen der mittleren Anzahl der Frosttage, 2046/2055-1951/2000

Differenz [Tage]

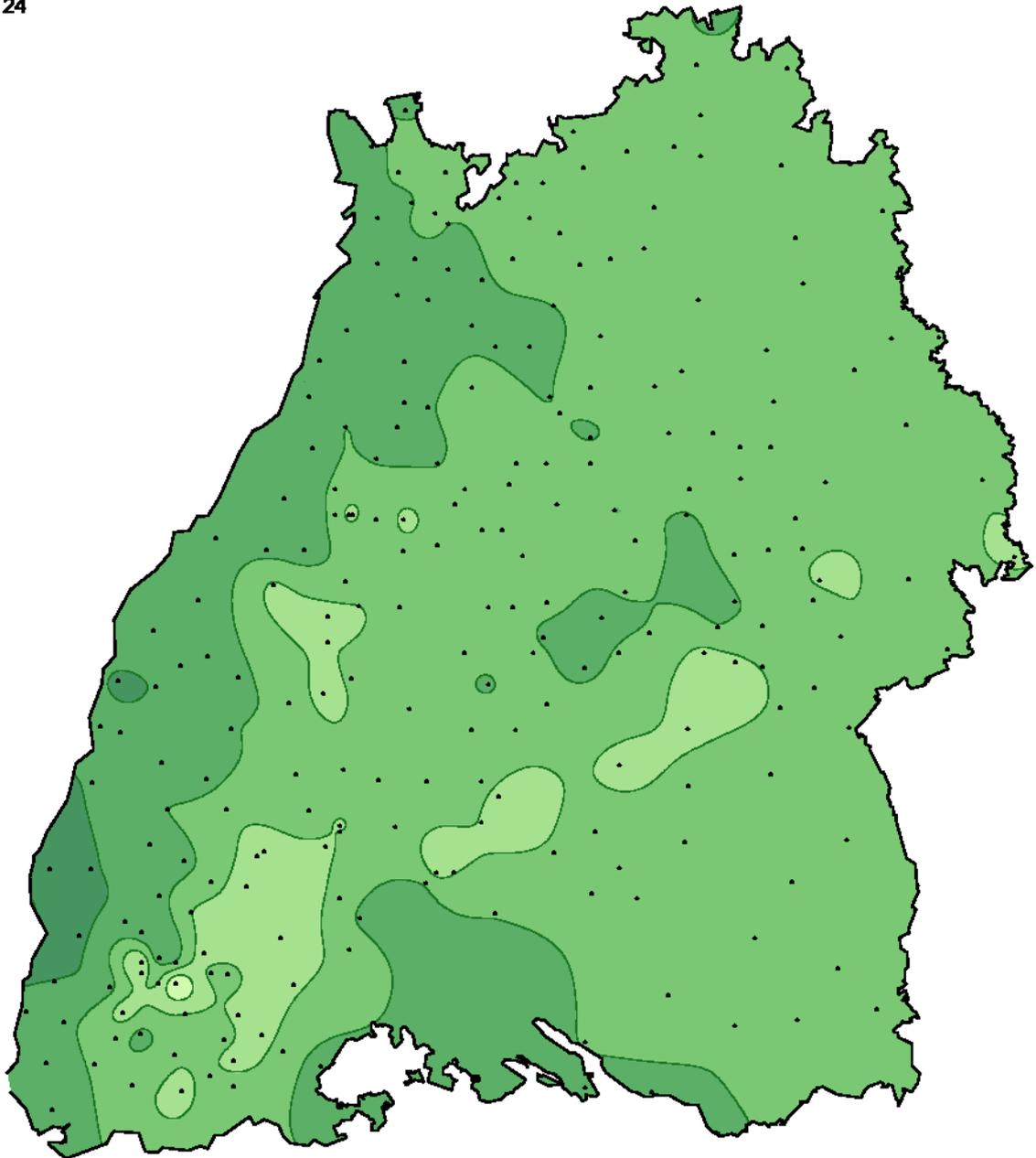
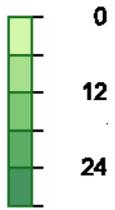


Abb. 2.12: Differenzen der mittleren Anzahl der Sommertage, 2046/2055-1951/2000

In der folgenden [Tabelle 2.3](#) sind die mittleren Verhältnisse für das Gesamtgebiet und das Basisszenarium sowie den Szenarienzeitraum 2046/55 für alle meteorologischen Größen angegeben. Es muss darauf hingewiesen werden, dass die mittleren Werte keine Aussage über die raum-zeitliche Änderungsstruktur einzelner Regionen Baden-Württembergs liefern!

Tab. 2.3: Vergleich der mittleren Verhältnisse zwischen Basisszenarium und Szenarium 2046/55

Met. Größe	Basisszenarium	2046/55	Diff. zu BASZ
Tmax	12.9	14.6	1.7
Tmit	8.4	9.9	1.5
Tmin	4.5	5.9	1.4
Niederschlag	991.9	983.0	-8.9
Rel. Luftfeuchte	78.2	77.7	-0.5
Luftdruck	960.7	961.6	0.9
Wasserdampfdruck	9.3	9.5	0.2
Sonnenscheindauer	4.6	4.6	0.0
Bedeckungsgrad	5.3	5.1	-0.2
Globalstrahlung	1057.1	1007.7	-49.4
Windgeschwindigkeit	2.2	2.1	-0.1

## 2.7 Ausblick

Für das beschriebene Szenarienmodell und die dargestellten Ergebnisse lässt sich folgende abschließende Bewertung und folgender Ausblick abgeben:

Die vorliegenden Untersuchungen basieren auf einem Ausgangsszenarium und daraus abgeleitet, **200** Realisierungen. Mit diesen 200 Realisierungen war es aufgrund der Vergrößerung des Stichprobenumfangs möglich, die Genauigkeit der Schätzung für die wahrscheinlichste Realisierung, auf der die gesamten Auswertungen beruhen, deutlich zu verbessern.

Damit konnte eine klimatologisch realistische Datenbasis den anderen Projektpartnern für ihre Modellrechnungen zur Verfügung gestellt werden.

Eine zusätzliche Möglichkeit der Abschätzung der Bandbreite der zukünftigen Klimaentwicklung im Untersuchungsgebiet besteht im Einsatz weiterer aus GCM-Läufen abgeleiteten Annahmen (z.B. Variation in den Emissionsszenarien, *IPCC, 2001*) bzw. der Vorgabe plausibler empirisch festgelegter Entwicklungstendenzen.

Des Weiteren ist es sinnvoll, eine Kopplung dieses Modellansatzes mit einem nicht-hydrostatischen dynamischen regionalen Klimamodell durchzuführen, um so zu genaueren Aussagen hinsichtlich des räumlich-zeitlichen Auftretens extremer Ereignisse (z.B. Sturm, Starkniederschlag, Trockenperioden) zu kommen.



## 3 GESUNDHEITSGEFAHREN

### 3.1 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen des Klimawandels auf die witterungsbedingte Mortalität in Baden-Württemberg untersucht. Dazu wurden die geschätzten witterungsbedingten Todesfälle im Basisszenarium (1951-2000) mit den prognostizierten für das Zukunftsszenarium (2001-2055) für die einzelnen Landkreise miteinander verglichen. Eine ausführlichere Darstellung findet sich in Anhang 3.

Die Bewertung der thermischen Umweltbedingungen (Exposition) wurde mit dem Standardverfahren des Deutschen Wetterdienstes, dem Klima-Michel-Modell, vorgenommen. Die zentrale Größe zur Charakterisierung der thermischen Umwelt des menschlichen Körpers ist dabei die "Gefühlte Temperatur", die aus vier thermischen Umweltfaktoren berechnet wird: Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Wasserdampfdruck und mittlere Strahlungstemperatur. Durch Festlegung von Schwellenwerten der Gefühlten Temperatur werden 9 thermische Belastungsklassen von "extremen Kältestress" bis "extremer Wärmebelastung" definiert. Diese Belastungsklassen beziehen im Gegensatz zu verschiedenen anderen Indizes die kurzfristige Anpassung an die aktuellen Witterungsbedingungen durch eine witterungsbedingte Abhängigkeit der Schwellenwerte mit ein. Der Vergleich zwischen Basis- und Zukunftsszenarium zeigt, dass es zu einem deutlichen Anstieg der Anzahl der Tage mit Wärmebelastung und zu einem Rückgang der Anzahl der Tage mit Kältestress kommen wird. Dabei fällt der Anstieg der Zahl der Tage mit Wärmebelastung relativ gesehen stärker aus als der Rückgang des Kältestresses.

Neben der Auftretenshäufigkeit thermischer Belastungen wurde die Sensitivität der Bevölkerung für diese Art von Stress bestimmt. Auf der Basis von täglichen Sterbefallzahlen für das gesamte Bundesland von 1968 bis 2003 wurde die Sensitivität der Bevölkerung für jede der 9 thermischen Belastungsklassen - aufgeteilt in zwei Altersgruppen (unter und über 75 Jahre) - abgeschätzt. Dabei zeigte sich, dass die Bevölkerungsgruppe über 75 Jahre besonders sensitiv auf thermische Belastung reagiert. Unter der Annahme, dass sich die altersspezifische Sensitivität über den gesamten Zeitraum des Basis- und Zukunftsszenariums nicht ändert und unter Verwendung von demographischen Szenarien für den Anteil der über 75-Jährigen, wurde die Sensitivität der Gesamtbevölkerung in den einzelnen Kreisen in den Zukunftszeitraum extrapoliert.

Das Produkt aus der Auftretenshäufigkeit einer thermischen Belastung und der Sensitivität der Bevölkerung für diesen Stress liefert die Vulnerabilität, wobei mögliche zukünftige Anpassungsmaßnahmen hier nicht berücksichtigt wurden. Ein Vergleich zwischen Basis- und Zukunftsszenarium zeigt, dass sich die Vulnerabilität der Bevölkerung für Wärmebelastung über alle Kreise gemittelt um ca. 20% erhöht. Im Zukunftsszenarium ist daher landesweit mit jährlich 180 bis 400 zusätzlichen hitzebedingten Todesfällen zu rechnen. Der ermittelte Rückgang der Vulnerabilität für Kältestress kann diesen Anstieg nicht kompensieren.

Vor diesem Hintergrund und angesichts der Erfahrungen aus dem Extremjahr 2003 ist es empfehlenswert, Maßnahmen zur Abmilderung dieser möglichen Auswirkungen zu ergreifen. Zu diesen Maßnahmen zählen einerseits relativ kurzfristig zu initialisierende Hitzewarnsysteme mit Integration des Gesundheitswesens und andererseits langfristig die konsequente Berücksichtigung der thermischen Umweltbedingungen bei Stadtplanung und Gebäudedesign.

### 3.2 Einführung

Nach *IPCC (2001)* gilt es als sehr wahrscheinlich, dass die Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen und heißen Tagen in Mitteleuropa in Zukunft zunehmen wird. Das kann auch eine Zunahme von hitzebedingter Morbidität und Mortalität in Baden-Württemberg bedingen. Hitzebedingte Sterbefälle treten auch unter aktuellen klimatischen Bedingungen in Baden-Württemberg auf, im Sommer 2003 waren schätzungsweise 2000 Sterbefälle der hitzebedingten Mortalität zuzurechnen.

Klimaänderungen verursachen in der Regel keine neuartigen Umwelteinflüsse. Sie können jedoch die Auswirkungen von klimasensitiven Erkrankungen verschlimmern, wenn keine zusätzlichen Anpassungsmaßnahmen getroffen werden. Um die Risiken aktueller und zukünftiger Auswirkungen von Klimaänderungen effektiv kontrollieren zu können, müssen die Vulnerabilität und die Anpassungsfähigkeit der Bevölkerung verstanden werden (*Kovats et al., 2004*). In anderen europäischen Ländern wie z.B. Portugal oder Großbritannien wurden bereits derartige "impact assessments" landesweit durchgeführt (z.B. *Santos et al., 2002*).

Ziel dieser Studie ist es, die Risiken von Klimaänderungen für die Gesundheit der Bevölkerung in Baden-Württemberg abzuschätzen. Sie liefert daher eine Planungsgrundlage, mittels welcher die Entscheidungsträger in die Lage versetzt werden sollen, geeignete Maßnahmen zur Reduktion der Vulnerabilität ergreifen zu können.

Ein wichtiges Konzept zur Abschätzung von möglichen Klimafolgen ist die Vulnerabilität (vgl. [Kapitel 1](#)). Die Vulnerabilität der Bevölkerung bezüglich der Auswirkungen von thermischem Stress im Rahmen eines sich ändernden Klimas ist eine Funktion von:

- Exposition, einschließlich des Charakters, der Intensität, der Variabilität und der Häufigkeit des thermischen Stresses;
- Sensitivität, einschließlich der relevanten Populationscharakteristika wie etwa der demographischen Struktur und ökonomischer Faktoren;
- Anpassung, wie zum Beispiel der Einführung von Hitzewarnsystemen oder klimaangepasste Bauweise der Häuser (*Kovats et al., 2004*).

Die Exposition ist abhängig vom jeweiligen Klima einer Region und daher für alle Individuen, welche in dieser Region leben, in erster Näherung gleich. Über Expositionseffekte, welche der Sensitivität zuzurechnen sind, wird sie jedoch modifiziert. Ein solcher Expositionseffekt kann beispielsweise das Bewohnen von schlecht isolierten Dachgeschosswohnungen sein. In der hier durchgeführten Untersuchung wird die Exposition über thermische Belastungsstufen, die durch Schwellenwerte der "gefühlten Temperatur" definiert sind, bewertet.

Die Sensitivität ist von individuellen, demographischen und ökonomischen Faktoren abhängig. Beispiele für solche Faktoren sind mangelnde Fitness, Alter, Bettlägerigkeit, Übergewicht, Einnahme bestimmter Medikamente, verminderte Wahrnehmung (Demenz), Vorerkrankungen, Hydrationsniveau, soziale Isolierung, schlechte Wohnsituation und das Fehlen von Klimaanlage in Alten- und Pflegeheimen (*Koppe et al., 2004*). Studien wie jene von *Havenith et al. (1995)* zeigen, dass das Alter integrierend über viele dieser Faktoren - wie mangelnde Fitness, Bettlägerigkeit, Medikamenteneinnahme, Demenz, Vorerkrankungen etc. - wirkt, selber jedoch keine negativen Auswirkungen auf die Reaktion des Organismus auf thermische Belastung hat, falls diese

Faktoren kontrolliert werden. Da Alter jedoch ein Faktor ist, der landesweit auf Kreisebene erhoben wird und Vorrausrechnungen über die zukünftige Entwicklung der demographischen Struktur in Baden-Württemberg existieren, wurde er in dieser Studie als integrierender Parameter für die Sensitivität der Bevölkerung gegenüber thermischer Belastung gewählt.

Anpassung gibt es bereits in Bezug auf das aktuelle Klima. Da es bei Untersuchungen von "historischen Daten" jedoch kaum möglich ist, zwischen dem Anteil dieser sogenannten autonomen Anpassung und dem der Sensitivität bei Mortalitätsanstiegen während thermischer Belastung zu differenzieren, wird diese Anpassung in der hier vorliegenden Studie als Teil der Sensitivität betrachtet. Die Vulnerabilität ist im Folgenden also eine Kombination von Exposition und Sensitivität.

### 3.3 Methode

Zur Bewertung der Auswirkungen von Klimaänderungen wurden folgende drei Arbeitsschritte durchgeführt:

Zuerst wurde die gefühlte Temperatur, welche zur Definition der thermischen Belastungsklassen dient, aus den in den PIK-Datensätzen vorhandenen Parametern für Basis- (1951-2000) und Zukunftsszenarium (2001-2055) berechnet. Mit Ausnahme der mittleren Strahlungstemperatur waren alle hierfür benötigten Parameter in den PIK-Datensätzen vorhanden, sie wurde daher aus den in den PIK-Datensätzen vorhandenen anderen Parametern abgeschätzt. Für jede der 254 Stationen aus den PIK-Szenarien wurde die Häufigkeit des Auftretens der unterschiedlichen thermischen Belastungsklassen für den Basis- und den Zukunftszeitraum ermittelt. Um Informationen über die Belastung auf Landkreisebene zu erhalten, wurden die Häufigkeiten der thermischen Belastung aller Stationen eines Landkreises gemittelt ([Kapitel 3.3.1](#)).

In einem weiteren Schritt wurde die aktuelle Sensitivität der Bevölkerung in Baden-Württemberg für die unterschiedlichen thermischen Belastungsklassen bestimmt. Hierfür wurde eine Zeitreihe der Mortalität von 1968-2003 im gesamten Bundesland mit der thermischen Belastung, die auf Basis von Messwerten von sogenannten Synop-Stationen berechnet wurde, verglichen. Die Kenntnis der aktuellen Sensitivität ermöglichte es, Szenarien über die Sensitivität der Bevölkerung gegenüber thermischer Belastung außerhalb des bekannten Zeitraumes zu entwickeln. Es war weiterhin notwendig, diese Szenarien, welche für das gesamte Bundesland entwickelt wurden, auf Kreisebene herunter zu brechen ([Kapitel 3.3.2](#)).

Die Informationen zur Sensitivität der Bevölkerung und über die thermischen Verhältnisse für die Zeiträume des Basis- und des Zukunftsszenariums ermöglichten es, die Vulnerabilität der Bevölkerung auf Kreisebene abzuschätzen ([Kapitel 3.3.3](#)).

#### 3.3.1 Exposition

Die Bewertung der thermischen Umweltbedingungen wurde mit dem Klima-Michel-Modell, dem Standardverfahren des Deutschen Wetterdienstes, vorgenommen. Das Verfahren beruht auf der PMV-Gleichung<sup>1</sup> von *Fanger (1970)* mit der PMV\*-Korrektur von *Gagge et al. (1986)* zur besseren Beschreibung der latenten Wärmeflüsse (Verdunstung

---

1. PMV = Predicted Mean Vote

von Schweiß). Es stellt ein komplettes Wärmehaushaltsmodell des menschlichen Organismus dar und berücksichtigt alle relevanten Wärmeflüsse (*Jendritzky et al., 1979, 1990; VDI, 1998*). Die thermischen Bedingungen werden dabei durch die Gefühlte Temperatur beschrieben. Zusätzlich werden die kurzfristigen physiologischen Anpassungsmechanismen des Menschen an seine thermische Umgebung berücksichtigt.

Neben den direkt durch Wärmebelastung ausgelösten Krankheiten wie Hitzeschlag oder Sonnenstich spielen die indirekt ausgelösten Beschwerden eine große Rolle. Indirekt wirkt sich die Wärmebelastung auf den Organismus aus, da das Thermoregulationssystem eine relative hohe Priorität im Körper einnimmt und deshalb bei thermischem Stress andere Systeme vernachlässigt werden. Somit ist der Mortalitätsanstieg während Hitzewellen nur zu einem kleinen Teil direkt durch "Hitzekrankheiten" bedingt und zu einem großen Teil indirekt durch das Versagen anderer Systeme wie dem Herz-Kreislauf-System oder dem respiratorischen System (*Parsons, 2003*).

### **3.3.1.1 Gefühlte Temperatur**

Die vier fundamentalen Umweltfaktoren, welche den Wärmeaustausch des Menschen bestimmen, sind Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Wasserdampfdruck und mittlere Strahlungstemperatur. Für eine Bewertung der Auswirkungen der thermischen Umwelt auf die Gesundheit ist es daher wesentlich, diese Faktoren zu berücksichtigen und zu quantifizieren. Zusammen mit der inneren Wärmeproduktion und der Bekleidung bilden sie die sechs fundamentalen Faktoren, welche den Wärmeaustausch eines Menschen bestimmen. Die folgenden Analysen wurden auf Basis der Gefühlten Temperatur durchgeführt, welche alle diese Faktoren berücksichtigt und daher eine thermophysologisch relevante Bewertung der Umwelt zulässt. Die Gefühlte Temperatur ist als die Lufttemperatur einer Standardumgebung definiert, in welcher das Wärme- bzw. Kälteempfinden den aktuellen Bedingungen entspricht (*Staiger et al., 1997*).

Bis auf die mittlere Strahlungstemperatur waren alle zur Berechnung der Gefühlten Temperatur benötigten meteorologischen Parameter in den PIK-Klimadatensätzen vorhanden. Für die Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur aus den vorhandenen meteorologischen Parametern wurden sowohl physikalisch als auch statistisch basierte Verfahren getestet. Schließlich wurde ein physikalisch basierter Ansatz unter Verwendung der mittleren Gesamtbedeckung verwendet.

### **3.3.1.2 Thermische Belastungsklassen**

Die so ermittelte Gefühlte Temperatur ermöglicht die Bewertung der thermischen Umwelt für das Basis- und das Zukunftsszenarium. Jeder Tag dieser beiden Zeiträume wurde basierend auf der Gefühlten Temperatur für alle 254 Stationen einer von neun thermischen Belastungsklassen zugeordnet (siehe [Tabelle 3.1](#)).

Tab. 3.1: Thermische Belastungsklassen auf der Basis einer Gefühlten Temperatur, die die physiologische Beanspruchung des menschlichen Organismus berücksichtigt (verändert nach VDI, 1998).

Klasse	Gefühlte Temperatur, °C	Thermisches Empfinden	Thermophysiologische Beanspruchung
-4	≤-39	sehr kalt	extremer Kältestress
-3	-26 bis -39	kalt	starker Kältestress
-2	-13 bis -26	kühl	mäßiger Kältestress
-1	0 bis -13	leicht kühl	schwacher Kältestress
0	0 bis +20	behaglich	Komfort möglich
1	+20 bis +26	leicht warm	schwache Wärmebelastung
2	+26 bis +32	warm	mäßige Wärmebelastung
3	+32 bis +38	heiß	starke Wärmebelastung
4	≥+38	sehr heiß	extreme Wärmebelastung

Eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens zur Ermittlung der Wärmebelastungsklassen ist in der Meteorologischen Zeitschrift veröffentlicht worden (Koppe und Jendritzky, 2005).

In **Abbildung 3.1** sind die Schwellenwerte für die einzelnen Wärmebelastungsstufen und die Gefühlte Temperatur um 12 Uhr UTC für Baden-Württemberg im Jahr 1984 dargestellt (12 Uhr Coordinated Universal Time). Der Verlauf der Schwellenwerte verdeutlicht, dass das Verfahren die kurzfristig erfolgende Anpassung des menschlichen Organismus an die thermische Umwelt berücksichtigt.

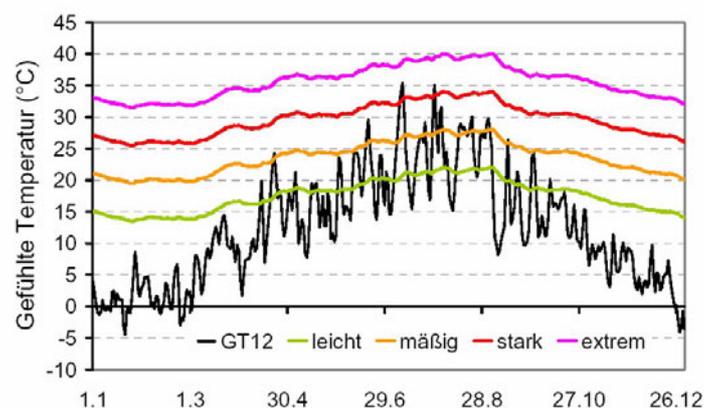


Abb. 3.1: Schwellenwerte für verschiedene Wärmebelastungsstufen (leicht, mäßig, stark, extrem) im Jahr 1984 in Baden-Württemberg. GT12: Gefühlte Temperatur um 12 Uhr UTC als Mittelwert aus den vier Stationen Karlsruhe, Konstanz, Freiburg und Stuttgart (Echterdingen)

Die Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung führt zu relativ niedrigen Schwellenwerten im Winter und den Übergangsjahreszeiten und zu höheren Schwellenwerten im Sommer. Eine Schwelle gilt dann als überschritten (unterschritten), wenn der Zweitages-

mittelwert der gefühlten Temperatur um 12 Uhr UTC für Wärmebelastung (6 Uhr UTC für Kältestress) aus den Tagen  $x$  und  $x + 1$  größer oder gleich (kleiner oder gleich) der Schwelle des Tages  $x$  ist. Durch diese Vorgehensweise werden nur Ereignisse berücksichtigt, welche länger als einen Tag andauern.

Um Aussagen über die Häufigkeit des Auftretens thermischer Belastung auf Landkreisebene treffen zu können, wurden die 254 Stationen den Landkreisen zugeordnet. Zusätzlich wurde jeder Station eine Höhenstufe zugewiesen, da davon ausgegangen werden kann, dass die thermische Belastung eine Höhenabhängigkeit aufweist. Die drei Höhenstufen sind H1 (bis 400 m), H2 (400-800 m) und H3 (über 800 m). Für jede Station wurde die Auftretenshäufigkeit aller thermischen Belastungsklassen berechnet. Um Aussagen auf Landkreisebene zu erhalten, wurden diese Häufigkeiten für alle Stationen in einem Landkreis in der jeweiligen Höhenlage gemittelt.

### 3.3.2 Sensitivität

#### 3.3.2.1 *Bestimmung der aktuellen Sensitivität auf Landesebene*

Zur Ermittlung der aktuellen Sensitivität lagen Mortalitätsdaten auf Tageswertbasis und nach Altersgruppen strukturiert für den Zeitraum vom 01.01.1968 bis zum 30.09.2003 für ganz Baden-Württemberg vor. Die zur Standardisierung der Mortalitätsdaten benötigten Bevölkerungsdaten stammen - wie die Mortalitätsdaten auch - vom Statistischen Landesamt Baden-Württemberg und lagen für die Jahre bis 2002 jährlich und für das Jahr 2003 vierteljährlich vor. Die Einwohnerzahl für jeden Tag des Jahres wurde zwischen diesen Daten linear interpoliert. Die Gesamtdaten wurden in zwei Altersklassen (über und unter 75-Jährige) unterteilt. Für diese Altersklassen lagen nur für die Jahre 1961, 1970, 1980, 2001 und 2003 Daten über den Anteil der über 75-Jährigen an der Gesamtbevölkerung vor. Zwischen diesen Zeitpunkten wurde ebenfalls linear interpoliert.

Um die Auswirkungen von besonderen Ereignissen wie z.B. Hitzewellen auf die Mortalität zu untersuchen, werden die für die entsprechende Periode beobachteten Werte der Mortalität mit den erwarteten Werten verglichen, damit die Zahl der hitzebedingten Sterbefälle ermittelt werden kann. Unter hitzebedingter Mortalität (Sensitivität) wird im Folgenden die Übersterblichkeit verstanden, welche statistisch als positive Abweichung vom Erwartungswert einer Wärmebelastung zugeordnet werden kann (*McMichael et al., 1996*).

Da Mortalitätsdaten grundsätzlich einen Jahresgang aufweisen (hohe Mortalität im Winter und niedrige Mortalität im Sommer), muss dieser bei der Abschätzung der Zeitreihe des Erwartungswertes berücksichtigt werden. Zudem ist bei längeren Zeitreihen von Mortalitätsdaten - sowohl absolut, als auch relativ gesehen, d.h. auf 100.000 Einwohner standardisiert - ein Trend zu erkennen. Zur Bestimmung des Erwartungswertes werden in vielen Untersuchungen Mittelwerte in verschiedenster Form herangezogen. So wird z.B. der Sommermittelwert oder der entsprechende Monatsmittelwert "erwartet". Oft wird dieser "Mittelwert" aus den Daten von nur wenigen (2-5) vorangegangenen Jahren berechnet. In der hier vorliegenden Studie wurde der Erwartungswert auf Basis eines Gaußfilters mit einer Länge von 365 Tagen, dessen charakteristische Filterfunktion mittels eines Restaurationsfaktors optimiert wurde, abgeschätzt (vgl. auch *Taubenheim, 1969*). Trends in den Mortalitätsdaten wurden durch die Methode der Erwartungswertbestimmung berücksichtigt und daher nicht separat entfernt.

Abbildung 3.2 zeigt exemplarisch die Mortalitätsrate und deren Erwartungswert für den Zeitraum 2002-2003 für Baden-Württemberg.

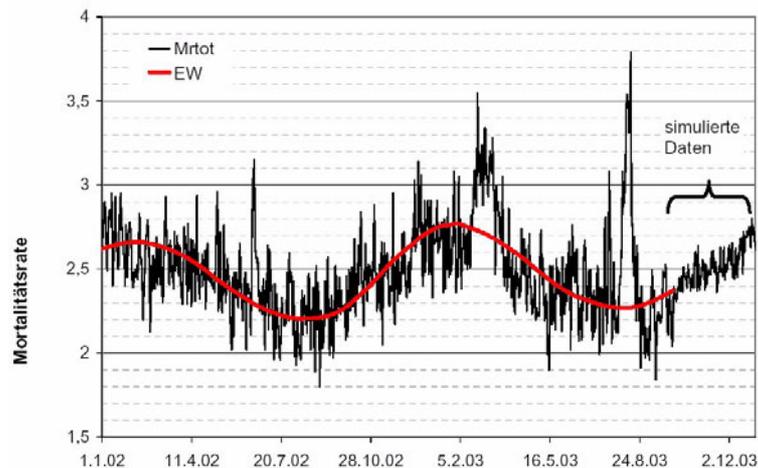


Abb. 3.2: Ermittlung des Erwartungswertes (EW) der Gesamtmortalitätsrate (Mrtot) in Baden-Württemberg pro 100.000 Einwohner für den Zeitraum 1.1.2002 bis 30.9.2003

Die Sensitivität einer Grundgesamtheit für eine bestimmte thermische Belastungsklasse zeigt sich in der Höhe der Abweichung der Mortalität vom Erwartungswert. Um Aussagen für den Mortalitätsdatensatz von Baden-Württemberg treffen zu können, war es nötig, die thermische Situation auf Landesebene zu bewerten. Dafür wurde ein Mittel aus den Stationen Karlsruhe, Konstanz, Freiburg und Stuttgart (Echterdingen) gewählt. Der Mittelwert dieser vier Stationen wird als repräsentativ für die Populationszentren des Landes angesehen. Zur Bewertung der Auswirkungen der thermischen Belastung auf die Gesamtmortalität ist eine gegebenenfalls vorhandene zeitliche Verschiebung zwischen Ursache (hier: thermische Belastung) und Wirkung (hier: Mortalität) zu berücksichtigen. Da diese Beziehung nie ganz tagesscharf sein kann, wurden die Mortalitätsdaten über 2 Tage gemittelt (geglättet) und der Belastungsklasse des ersten dieser beiden Tage zugeordnet.

### 3.3.2.2 Übertragung der aktuellen Sensitivität auf Kreisebene

Für das gesamte Bundesland Baden-Württemberg wurde für den Zeitraum 1968-2003 die Sensitivität der Bevölkerung über und unter 75 Jahren während thermischer Belastung bestimmt. Unter der Annahme, dass die Sensitivität in den einzelnen Kreisen nur von der Altersstruktur abhängig ist (d.h. Alter als integrierender Parameter), wurden die Sensitivitäten auf Basis der Information, welche auf Landesebene gefunden wurde, auf die einzelnen Stadt und Landkreise übertragen.

Die Sensitivität der Gesamtbevölkerung  $S_{ges}$  bezüglich der unterschiedlichen Stufen thermischen Stresses in den einzelnen Stadt- und Landkreisen kann folgendermaßen bestimmt werden:

$$S_{ges} = A_{\bar{u}75} * S_{\bar{u}75} + A_{u75} * S_{u75},$$

wobei  $A_{\bar{u}75}$  ( $A_{u75}$ ) der Anteil der über (unter) 75-Jährigen an der Bevölkerung ist und  $S_{\bar{u}75}$  ( $S_{u75}$ ) die altersspezifische Sensitivität der Altersklasse über (unter) 75 Jahren.

$S_{\bar{u}75}$  und  $S_{u75}$  sind dabei auf Landesebene bestimmt worden, während  $A_{\bar{u}75}$  und  $A_{u75}$  jeweils kreisspezifisch sind.

### **3.3.2.3 Abschätzung der Sensitivität vor 1968 und nach 2003 auf Kreisebene**

Die Abschätzung der Sensitivität vor und nach dem Zeitraum, für welchen Mortalitätsdaten vorhanden sind, erfolgt nur über die Altersstruktur der Bevölkerung, da die altersspezifische Sensitivität ( $S_{\bar{u}75}$  bzw.  $S_{u75}$ ) als zeitlich konstant angenommen wird. Es existieren Vorrassrechnungen der Gesamtbevölkerungszahlen und des Anteils der über 75-Jährigen an der Gesamtbevölkerung auf Landkreisebene bis 2020 und auf Landesebene bis 2050 (Stein, 2003; Cornelius, 2003).

Um Aussagen über die Bevölkerungsentwicklung für die Landkreise nach 2020 treffen zu können, wurde das Verhältnis der "über 75-Jährigen" zwischen jedem Kreis und dem Bundesland für die Zeitpunkte, an denen Vorrassrechnungen für beides existierten (2001, 2005, 2010, 2015, 2020), bestimmt. Anschließend wurde der lineare Trend dieses Verhältnisses bis zum Jahr 2050 extrapoliert. Somit war es möglich, aus diesem Verhältnis zu den Landesdaten aus der Bevölkerungsvorrassrechnung des Statistischen Landesamtes, Abschätzungen über den Anteil der über 75-Jährigen für die Jahre 2025, 2030, 2040 und 2050 auf Kreisebene zu machen. Ähnlich wurde für den Zeitraum vor 1961 verfahren.

In allen Gebieten nimmt der Anteil der über 75-Jährigen an der Bevölkerung bis 2050 stark zu. Der geringste Zuwachs in dieser Altersgruppe ist in den dicht besiedelten Gebieten der Verdichtungsräume zu erwarten, während für die Randzonen um die Verdichtungsräume starke Zuwachsraten prognostiziert werden (Stein, 2003).

### **3.3.2.4 Abschätzung der Mortalitätsrate vor 1968 und nach 2003 auf Landesebene**

Um Aussagen über die Anzahl hitzebedingter Todesfälle machen zu können, muss neben der Sensitivität auch die erwartete Mortalität bekannt sein, für die nur für den Zeitraum 1968-2003 statistische Daten zur Verfügung stehen. Innerhalb dieses Zeitraums ist der Erwartungswert aller monatlichen Mortalitätsraten gesunken. Dieser Rückgang des Erwartungswertes verlief nicht kontinuierlich. Bis Ende der 1980er war der Erwartungswert relativ konstant und sank anschließend ab. In den 1990ern pendelte er sich dann wieder auf ein relativ konstantes Niveau ein.

Um Abschätzungen über die Mortalitätsrate außerhalb des Zeitraumes 1968-2003 machen zu können, wurden zwei Methoden angewendet:

1. Zum einen wurde der Trend der vorhandenen Zeitreihe über die Zeitreihenenden fortgesetzt. Dabei wurde für die Abschätzung der Mortalitätsrate von 1951-1967 der Trend des Zeitraumes 1968-1988 und für die Abschätzung der Mortalitätsrate von 2004-2055 der Trend des Zeitraumes 1990-2003 fortgeschrieben. Beide Trends sind in allen monatlichen Mortalitätsraten negativ und im Winter etwas stärker als im Sommer.

2. Zum anderen wurde der Erwartungswert der Zeiträume vor und nach der vorhandenen Zeitreihe dem 5-Jahres-Mittelwert der Zeiträume 1968-1972 bzw. 1999-2003 gleichgesetzt. Diese Vorgehensweise ist insofern gerechtfertigt, da die Mortalitätsrate für die meisten Monate in den ersten und letzten fünf Jahren der vorhandenen Zeitreihe relativ konstant zu sein scheint.

### 3.3.3 Vulnerabilität

Die relative Vulnerabilität der Gesamtbevölkerung eines Kreises ergibt sich als Produkt der Auftretenshäufigkeit der einzelnen thermischen Belastungsklassen (Exposition) mit der jeweiligen Sensitivität der Gesamtbevölkerung. Die absolute Vulnerabilität der Gesamtbevölkerung eines Kreises erhält man als Produkt aus relativer Vulnerabilität und erwarteter Mortalitätsrate. Sie gibt die Anzahl der durch einen bestimmten Stress bedingten zusätzlichen - bezogen auf den Erwartungswert bei durchschnittlichen Witterungsverhältnissen - Todesfälle pro 100.000 Einwohnern an.

## 3.4 Ergebnisse

### 3.4.1 Exposition

Die thermische Belastung für Basis- und Zukunftsszenarium wurde über die Häufigkeit des Auftretens der einzelnen thermischen Belastungsklassen bestimmt. Im Folgenden werden die Klassen 2 bis 4 zu "Wärmebelastung" und die Klassen -2 bis -4 zu "Kältestress" zusammengefasst. In der Regel ist die Klasse -1 (leichter Kältestress) diejenige mit der stärksten Klassenbesetzung. Im Zukunftsszenarium nimmt die Anzahl der Tage mit extremem bis leichtem Kältestress in allen Kreisen gegenüber dem Basisszenarium ab, gleichzeitig erhöht sich die Anzahl der Tage mit leichter bis extremer Wärmebelastung. Bei der Anzahl der Tage im Komfortbereich sind keine systematischen Veränderungen zwischen Basis- und Zukunftsszenarium zu erkennen.

Sowohl für das Basis- als auch für das Zukunftsszenarium ist das Verhältnis der Anzahl der Tage pro Jahr mit Wärmebelastung zur Anzahl der Tage pro Jahr mit Kältestress in allen Kreisen mit Ausnahme des Landkreises Ulm (höhere Lagen) größer 1, d.h. es gibt insgesamt mehr Tage mit Wärmebelastung als mit Kältestress. Im Zukunftsszenarium verschiebt sich das Verhältnis zwischen der Anzahl der Tage mit Wärmebelastung und jenen mit Kältestress im Vergleich zum Basisszenarium zugunsten der Wärmebelastung.

Die Anzahl der Tage pro Jahr mit Wärmebelastung im Basis- und Zukunftsszenarium ist in [Abbildung 3.3](#) jeweils für alle drei Höhenklassen dargestellt.

Während im Basisszenarium in den unteren Höhenlagen (bis 400 m) nur im Südwesten und den Städten Heidelberg, Heilbronn und Baden-Baden mehr als 75 Tage mit mindestens mäßiger Wärmebelastung auftraten, wird diese Schwelle im Zukunftsszenarium in den entsprechenden Höhenlagen fast im gesamten Bundesland überschritten. Nur in den Landkreisen südöstlich von Stuttgart, dem Landkreis Calw und dem Hohenlohekreis liegt die Anzahl der Tage pro Jahr im Zukunftsszenarium mit 60 bis 75 Tagen etwas niedriger.

In mittleren Höhenlagen (400-800 m) ist sowohl im Basis- als auch im Zukunftsszenarium die Anzahl der Tage pro Jahr mit Wärmebelastung in der Regel deutlich niedriger als in den tieferen Lagen. Hier beträgt die Anzahl der Tage mit Wärmebelastung im Süden bzw. Südwesten des Landes für das Basisszenarium in der Regel mindestens 60 Tage pro Jahr. Im Raum Ulm sowie in den Landkreisen Calw, Freudenstadt, Tuttlingen und Rastatt liegt für das Zukunftsszenarium die Anzahl der Tage mit Wärmebelastung pro Jahr bei 30 bis 50. Für das Zukunftsszenarium werden für diese Landkreise 40 bis 55 Tage mit Wärmebelastung ermittelt. Vor allem im Süden und Nordosten des Landes

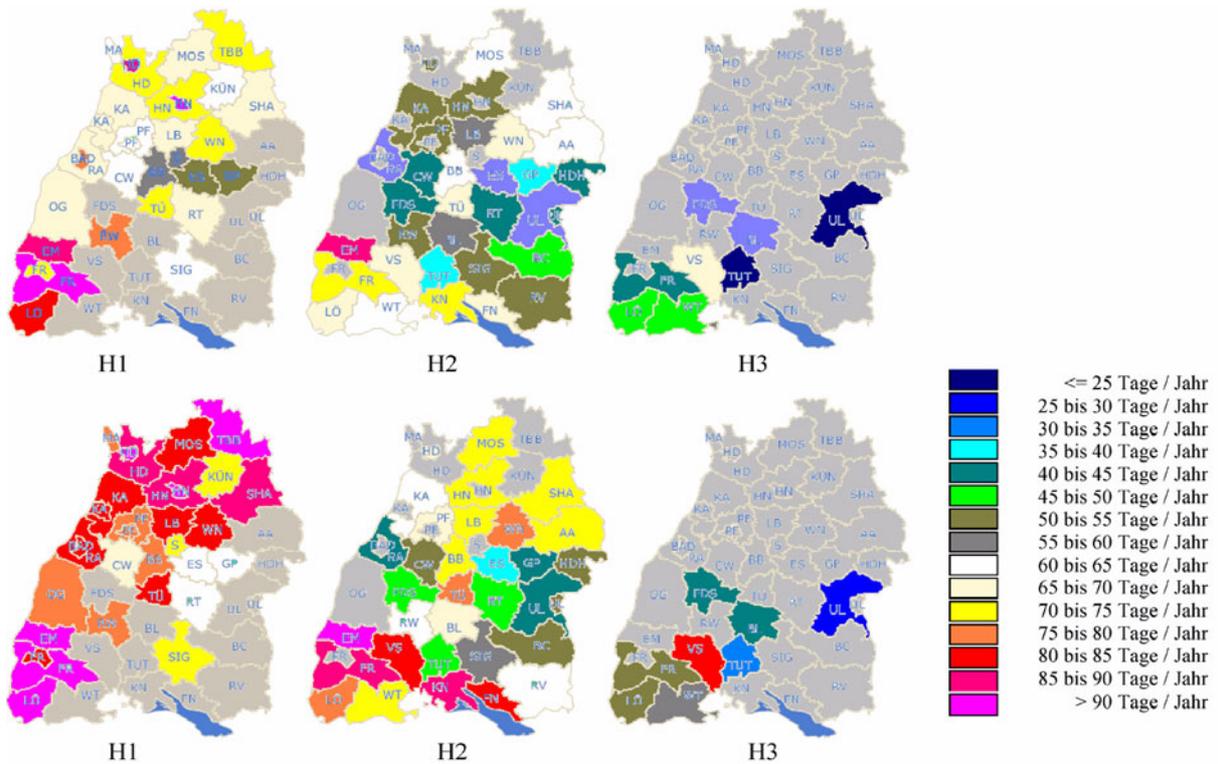


Abb. 3.3: Anzahl der Tage pro Jahr mit mäßiger bis extremer Wärmebelastung für Basisszenarium 1951-2000 (oben) und Zukunftsszenarium 2001-2055 (unten) für alle drei Höhenklassen (H1: 0-400 m; H2: 400- 800 m; H3: >= 800 m).

Baden-Württemberg liegt die Anzahl der Tage pro Jahr mit Wärmebelastung für das Zukunftsszenarium in der Höhenstufe 2 bei über 70.

Abbildung 3.4 zeigt die relative Änderung der Auftretenshäufigkeit von Wärmebelastung und Kältetestress im Zukunfts- gegenüber dem Basisszenarium.

Relativ zum Basisszenarium erhöht sich im gesamten Bundesland in allen Höhenstufen die Zahl der Tage mit mäßiger bis extremer Wärmebelastung um 5-30%. In den unteren und mittleren Höhenlagen kommt es vor allem im nördlichen Teil Baden-Württembergs und in den Landkreisen südlich von Ulm zu einer starken Zunahme (> 20%) der Anzahl der Tage mit Wärmebelastung. In den größeren Höhenlagen sind alle Landkreise mit Ausnahme von Lörrach von einem Anstieg der Häufigkeit der Wärmebelastung um mindestens 20% betroffen. Gleichzeitig verringert sich in einem Großteil der Landkreise die Anzahl der Tage mit mäßigem bis extremem Kältetestress.

Der Vergleich zwischen Basis- und Zukunftsszenarium zeigt, dass es zu einem deutlichen Anstieg der Anzahl der Tage mit Wärmebelastung und zu einem Rückgang der Anzahl der Tage mit Kältetestress kommen wird. Dabei fällt der Anstieg der Zahl der Tage mit Wärmebelastung relativ gesehen stärker aus als der Rückgang der Tage mit Kältetestress.

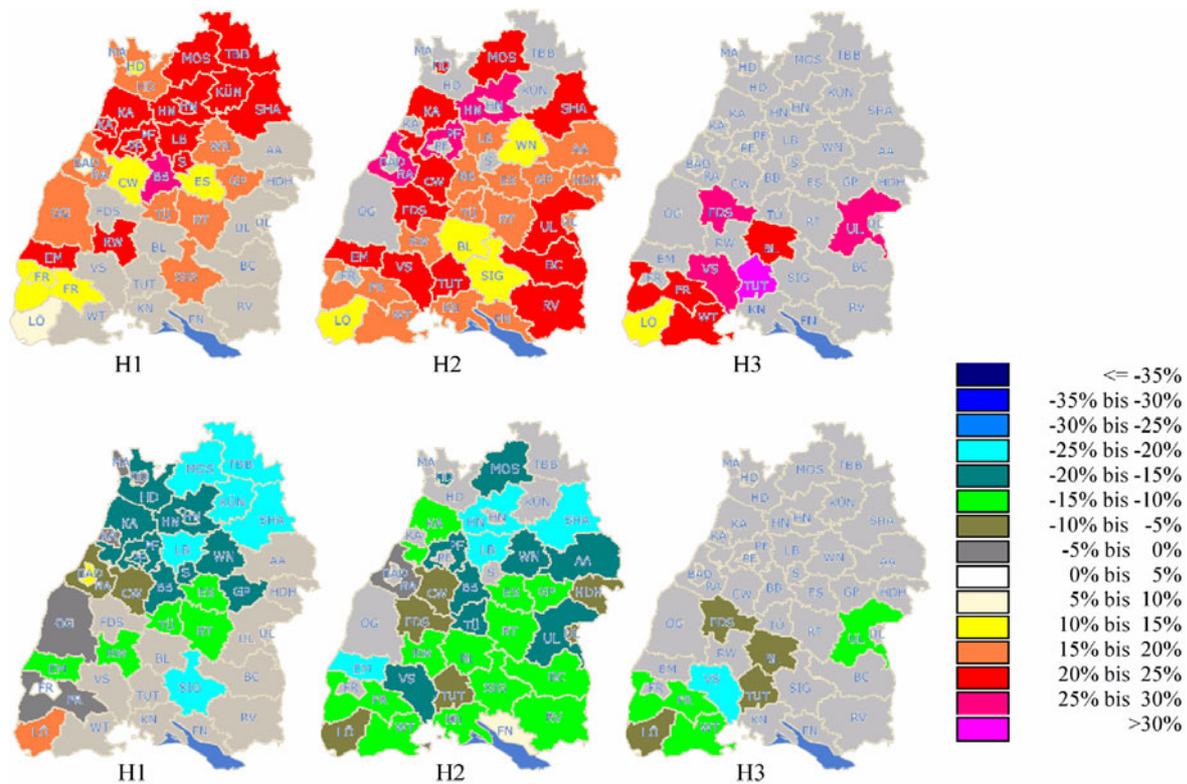


Abb. 3.4: Relative Änderung der Auftretenshäufigkeit von Tagen mit mäßiger bis extremer Wärmebelastung (oben) und Tagen mit mäßigem bis starkem Kältestress (unten) im Zukunftsszenarium 2001-2055 relativ zum Basisszenarium 1951-2000 für alle Höhenstufen (H1: 0-400 m; H2: 400-800 m; H3:  $\geq$  800 m).

### 3.4.2 Sensitivität

Die Sensitivität einer Grundgesamtheit für eine bestimmte thermische Belastungsstufe zeigt sich in der Höhe der Abweichung der Mortalität vom Erwartungswert während thermischer Belastung. Eine prozentuale Darstellung dieser Abweichung (Sensitivität) ermöglicht den Vergleich von Populationen mit unterschiedlichen Charakteristika wie z.B. Alter oder Geschlecht.

In **Abbildung 3.5** sind die Sensitivitäten für die einzelnen thermischen Belastungsklassen für zwei Altersgruppen (unter und über 75 Jahre) und die Gesamtbevölkerung dargestellt.

Die Sensitivitäten (mittlere Abweichungen der Mortalität vom Erwartungswert) unterscheiden sich in der Regel signifikant vom Erwartungswert (= 100%). Die geringsten Sensitivitäten treten während Komfortbedingungen auf. Hier übt der thermische Komfort einen günstigen Effekt auf die Mortalität aus und es kommt zu einer "Untersterblichkeit". Mit zunehmender Wärmebelastung erhöht sich die mittlere Abweichung der Mortalität vom Erwartungswert. Sterben bei leichter Wärmebelastung im Mittel ca. 1% mehr Menschen als erwartet, sind dies bei mäßiger bereits 6% und bei starker Wärmebelastung 14% mehr. Zudem weisen verschiedene Altersklassen unterschiedliche altersspezifische Sensitivitäten für thermische Belastung auf. Unterschiede zwischen den Altersklassen "unter 75 Jahre" und "über 75 Jahre" sind für die Klassen starke und mäßige

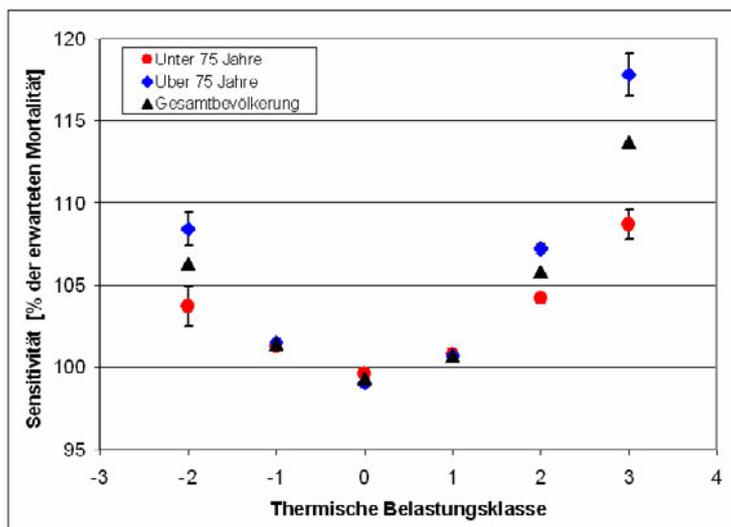


Abb. 3.5: Sensitivität (Mittelwert der Mortalität in Prozent des Erwartungswertes) für die einzelnen thermischen Belastungsklassen in Baden-Württemberg für den Zeitraum 1968-2003 getrennt für die Altersgruppen unter und über 75 Jahre und die Gesamtbevölkerung unter Berücksichtigung der jeweils optimalen Zeitverschiebungen. Die Balken stellen die Standardabweichung der Mittelwerte dar.

Wärmebelastung sowie mäßiger Kältestress signifikant ( $p = 0,05$ ), wenn die für die jeweilige Belastungsklasse optimale Zeitverschiebung zwischen thermischer Belastung und Mortalität gewählt wird (Zeitverschiebung: 5 Tage für die Belastungsklassen -2 und -1 bzw. 0 Tage für die Belastungsklassen 0 bis 3, vgl. *Koppe & Jendritzky, 2004*).

Da in der vorhandenen Zeitreihe die Belastungsklassen "extreme Wärmebelastung" sowie "starker und extremer Kältestress" nicht aufgetreten sind, werden für diese die gleichen Sensitivitäten wie in der nächstniedrigen Belastungsklasse angenommen. Dadurch werden die Belastungen durch extreme Wärme und Kälte bewusst konservativ unterschätzt.

### 3.4.3 Vulnerabilität

Wie bereits erwähnt, kann die relative Vulnerabilität einer Population als Produkt aus Häufigkeit des Auftretens einer Belastungsklasse und Sensitivität der Gesamtbevölkerung angesehen werden. Wird die Änderung der relativen Vulnerabilität im Vergleich zwischen Zukunfts- und Basisszenarium betrachtet, so erkennt man für die thermischen Belastungsstufen +2 bis +4 (mäßige bis extreme Wärmebelastung) in allen Landkreisen und allen Höhenlagen eine Zunahme der relativen Vulnerabilität um mindestens 20% (*Abbildung 3.6*). Am stärksten ist diese Zunahme in der unteren Höhenklasse der Kreise Karlsruhe, Heidelberg, Heilbronn sowie Pforzheim mit einem Anstieg der Vulnerabilität um ca. 50% ausgeprägt.

Da insgesamt mit einem Rückgang der Tage mit Kältestress zu rechnen ist, sollten zur Bewertung der Vulnerabilität der Bevölkerung durch thermische Belastungen alle Belastungsklassen herangezogen werden. Trotz der Abnahme der Anzahl der Tage mit Kältestress erhöht sich die relative Vulnerabilität für thermische Belastung im Zukunftsszenarium in allen Landkreisen um mindestens 10%, meist sogar um mehr als 20% (*Abbildung 3.7*).

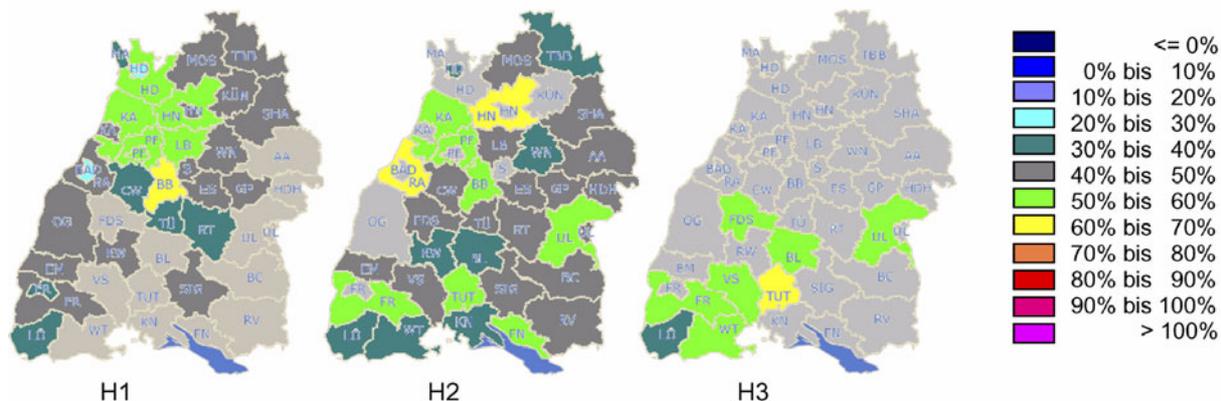


Abb. 3.6: Relative Änderung der relativen Vulnerabilität für mäßige bis extreme Wärmebelastung (+2 bis +4) im Zukunftsszenarium 2001-2055 relativ zum Basisszenarium 1951-2000 für die drei Höhenklassen (H1: 0-400 m; H2: 400-800 m; H3: ≥ 800 m) in den Kreisen Baden-Württembergs.

Um Aussagen über absolute Änderungen in der Mortalität machen zu können, muss die absolute Vulnerabilität aus der relativen Vulnerabilität durch Multiplikation mit der Mortalitätsrate berechnet werden. Diese absolute Vulnerabilität hat den Nachteil, dass Unsicherheiten, die durch die Abschätzung zukünftiger Mortalitätsraten entstehen, mit eingehen. Durch die unterschiedlichen Methoden, welche zur Ermittlung der mittleren monatlichen Mortalitätsraten in den entsprechenden Zeiträumen herangezogen wurden, kommt es zu Unterschieden in den absoluten Vulnerabilitäten (vgl. Kapitel 3.3.2.4).

Die auf Basis der Trendfortschreibung berechnete Änderung der absoluten Vulnerabilität zwischen Basis- und Zukunftsszenarium ist für Wärmebelastung (Kältestress) in der Regel geringer (höher) als die Variante, bei welcher angenommen wurde, dass die Mortalitätsrate vor und nach dem bekannten Zeitraum konstant bleibt.

Die Differenzen in den absoluten Verwundbarkeiten, welche sich zwischen Extrapolation der Mortalitätsrate auf Basis des Mittelwertes der letzten vorhandenen 5 Jahre und auf Basis der Trendfortschreibung ergeben, sind für das Basisszenarium in der Regel gering

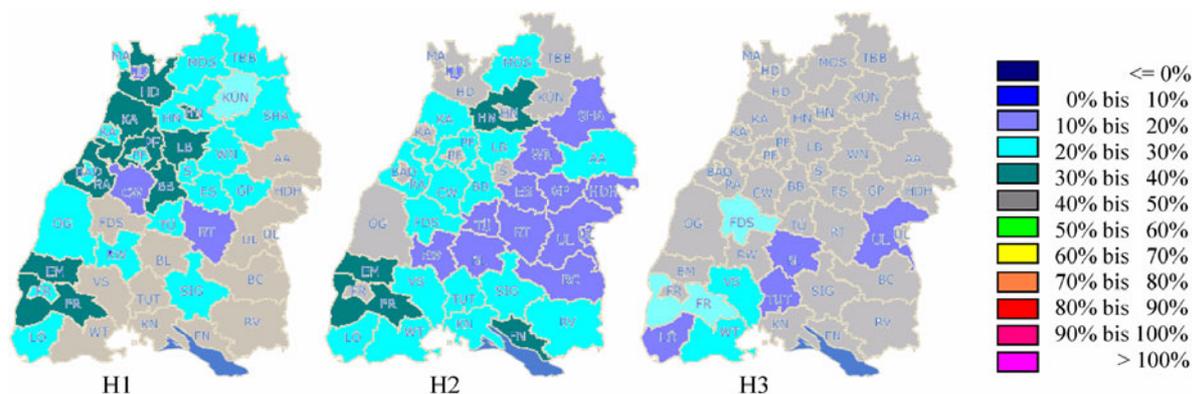
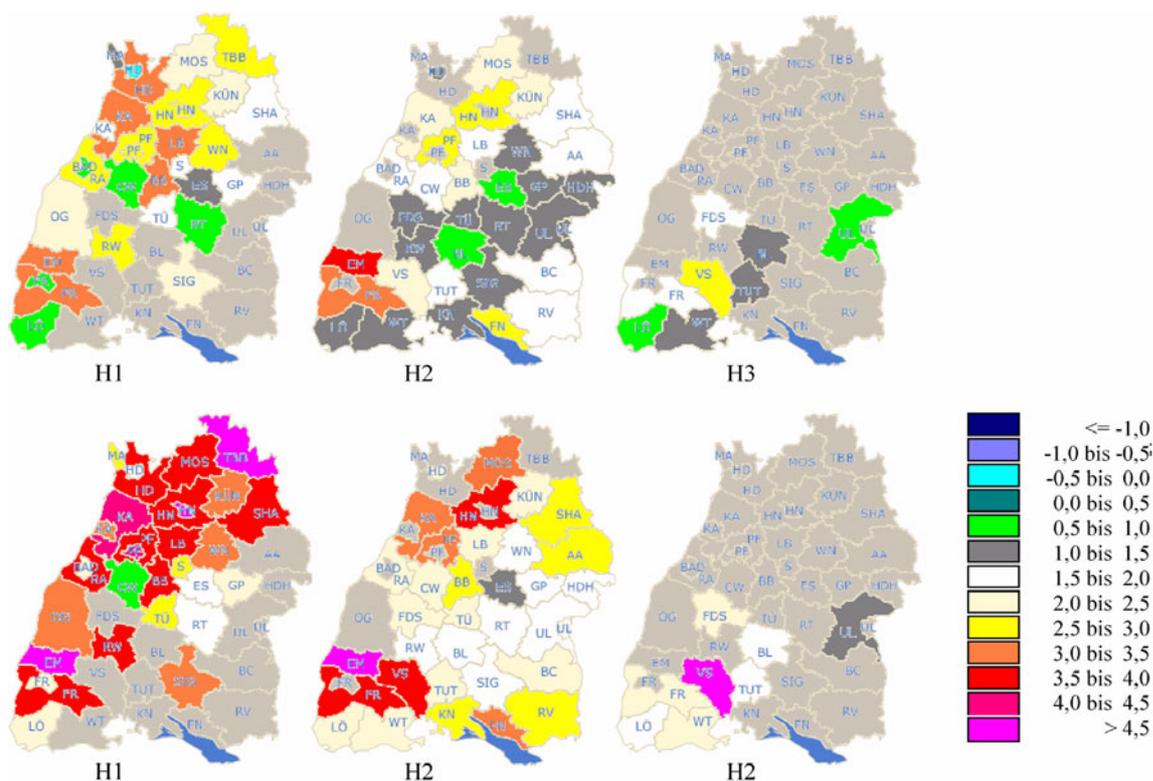


Abb. 3.7: Relative Änderung der relativen Vulnerabilität für alle Belastungsklassen im Zukunftsszenarium 2001-2055 relativ zum Basisszenarium 1951-2000 für die drei Höhenklassen (H1: 0-400 m; H2: 400-800 m; H3: ≥ 800 m) in den Kreisen Baden-Württembergs.

(je nach Kreis 0,01-0,03 pro 100.000 Einwohner und Jahr), da für 3/5 des Basis-szenariums die Mortalitätsraten bekannt waren. Die Differenzen für das Zukunftsszenarium liegen höher. Je nach Kreis betragen sie für Kältestress 0,07-0,15 pro 100.000 Einwohner und Jahr und für Wärmebelastung 0,2-0,38 pro 100.000 Einwohner und Jahr.

In **Abbildung 3.8** ist die Differenz der absoluten Vulnerabilität gegenüber Wärmebelastung (zusätzliche hitzebedingte Todesfälle) zwischen Basis- und Zukunftsszenarium für die beiden verschiedenen Methoden der Fortschreibung der Mortalitätsrate dargestellt.



*Abb. 3.8: Differenz der absoluten Vulnerabilität gegenüber Wärmebelastung (zusätzliche hitzebedingte Todesfälle) zwischen Basisszenarium 1951-2000 und Zukunftsszenarium 2001-2055 für zwei verschiedene Methoden der Fortschreibung der Mortalitätsrate (oben: Trendfortschreibung, unten: Mittelwert der letzten 5 vorhanden Jahre) und alle Höhenklassen (H1: 0-400 m; H2: 400-800 m; H3: >=800 m).*

Für Höhenklasse 1 ist im Mittel im Zukunftsszenarium mit 2,4 bis 3,6 Hitzetoten pro 100.000 Einwohnern und Jahr mehr zu rechnen als im Basisszenarium. Dies entspricht bei einer Bevölkerung von 11 Mio. ungefähr 260 bis 400 zusätzlichen Sterbefällen pro Jahr. Besonders betroffen sind die unteren Lagen der nördlichen Hälfte Baden-Württembergs, sowie die Landkreise Emmendingen und Freiburg. Für Höhenklasse 2 zeichnet sich ein ähnliches Muster ab. Insgesamt liegen die zusätzlichen Todesfälle im Mittel mit 1,6 bis 2,4 pro 100.000 Einwohner und Jahr jedoch deutlich unter den tiefer gelegenen Gebieten. In Höhenklasse 3 schließlich liegen die zusätzlichen Sterbefälle bei 1,6 bis 2,1 pro 100.000 Einwohner und Jahr.

Die dem Kältestress zuzurechnenden Sterbefälle liegen im Zukunftsszenarium durch den Rückgang der Anzahl der Tage mit Kältestress unter den für das Basisszenarium geschätzten Todesfallzahlen. Je nach Höhenstufe und Methode zur Extrapolation der Mortalitätsrate liegt der Rückgang der kältebedingten Sterblichkeit im Mittel bei 0,25 bis 0,72 pro 100.000 Einwohner und Jahr und beträgt somit nur einen Bruchteil der zusätzlichen hitzebedingten Sterbefälle.

### 3.5 Diskussion und Ausblick

In dieser Studie konnte gezeigt werden, dass auf Basis der vorgegebenen PIK-Szenarien die Häufigkeit der Tage mit Wärmebelastung im Zukunftsszenarium (2001-2055) in allen Lagen deutlich größer sein wird als im Basisszenarium (1951-2000). Gleichzeitig verringert sich in den meisten Kreisen die Zahl der Tage mit Kältestress. Absolut gesehen, ist die Zunahme der Tage mit Wärmebelastung jedoch stärker als die Abnahme der Tage mit Kältestress.

Durch die immer älter werdende Bevölkerung in Baden-Württemberg kann davon ausgegangen werden, dass sich die Sensitivität der Population für Wärme- und Kältestress erhöht. Entsprechend erhöht sich die Vulnerabilität der Bevölkerung für Wärmebelastung. Relativ kann landesweit von einer Zunahme der absoluten Vulnerabilität bezüglich Wärmebelastung von ca. 20% ausgegangen werden. In Baden-Württemberg ist für das Zukunftsszenarium mit einer Zunahme der Todesfälle während mäßiger bis extremer Wärmebelastung um 1,6 (höhere Lagen) bis 3,6 (tiefere Lagen) Sterbefällen pro 100.000 Einwohnern und Jahr im Vergleich zum Basisszenarium zu rechnen. Dies bedeutet bei einer Bevölkerungszahl von ca. 11 Millionen jährlich 180 bis 400 Todesfälle zusätzlich.

Diese große Spannweite zwischen den beiden Zahlen ergibt sich aus den unterschiedlichen Höhenlagen und aus den beiden unterschiedlichen Ansätzen zur Abschätzung der mittleren Mortalitätsraten. Die zusätzliche hitzebedingte Mortalität von 180 Sterbefällen pro Jahr im Zukunftsszenarium beruht auf der Extrapolation der Mortalitätsrate auf der Basis eines linearen Trends aus den Jahren 1990-2003. Da es jedoch unwahrscheinlich ist, dass die Mortalitätsrate in dem Maße weiter absinken wird, wie sie es im Zeitraum 1990-2003 tat, dürfte diese Methode zu einer Unterschätzung der zusätzlichen hitzebedingten Todesfälle führen. Die Abschätzung mit 400 zusätzlichen Sterbefällen pro Jahr beruht auf der Annahme, dass die Mortalitätsrate vor und nach dem bekannten Zeitraum genauso hoch ist, wie in den letzten 5 Jahren, für welche die Mortalitätsrate berechnet werden konnte. Mit zunehmenden medizinischen Fortschritt, der zu einer allgemeinen Verringerung der Mortalität führen könnte, dürfte dieser Ansatz die hitzebedingte Mortalität leicht überschätzen.

Diese Zahlen stellen trotzdem wahrscheinlich eher die Untergrenze für die zusätzliche hitzebedingte Mortalität dar, da aus dem Zeitraum 1968-2003 keine Informationen über die Sensitivität der Bevölkerung während extremer Wärmebelastung, welche im Zukunftsszenarium alle 2 Jahre einmal vorkommt, vorlagen. Daher wurde für extreme Wärmebelastung dieselbe Sensitivität wie für starke Wärmebelastung angenommen. Es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass die Sensitivität für extreme Wärmebelastung deutlich höher liegt.

Eine weitere Schwachstelle dieser Studie ist, dass mangels weiterer Informationen die Sensitivität der Bevölkerung alleine auf Basis der Altersstruktur abgeschätzt wurde. Diese Annahme ist sicherlich stark vereinfachend und sollte in Zukunft ergänzt werden.

Die Zunahme der Häufigkeit von Wärmebelastung bei gleichzeitiger Zunahme der Sensitivität der Bevölkerung macht jedoch auch in Baden-Württemberg Maßnahmen zur Reduktion der Vulnerabilität dringend notwendig. Solche Maßnahmen können kurzfristiger oder langfristiger Natur sein. Zu den kurzfristig wirksamen Anpassungsmaßnahmen gehört die Implementierung von gesundheitsbezogenen Hitzewarnsystemen, die mit lokal adjustierten Interventionsmaßnahmen des Gesundheitswesens gekoppelt sind (*Koppe et al., 2004*). Diese Hitze-Gesundheits-Warnsysteme haben zum einen eine Reduktion der Sensitivität und zum anderen eine Verringerung der thermischen Belastung durch Vermeidung entsprechender Exposition zum Ziel. Ab Sommer 2005 werden vom Deutschen Wetterdienst solche Hitzewarnungen routinemäßig auf Landkreisebene für ganz Deutschland herausgegeben. Langfristige Anpassungsmaßnahmen sind eine klimagerechte Stadtplanung (Reduktion des städtischen Wärmeinseleffektes) und klimagerechtes Gebäudedesign (*Koppe et al., 2004*). Letztere zielen primär auf eine Reduktion der Exposition.

Abschließend sollte angemerkt werden, dass neben den hier betrachteten Gesundheitsgefahren durch Wärmebelastung auch Infektionskrankheiten, z.B. Vektorkrankheiten wie Malaria oder Gelbfieber, zukünftig durch Klimaveränderungen stärkere Bedeutung erhalten könnten. Dieser Aspekt bedarf einer ergänzenden Untersuchung.

## 4 LANDWIRTSCHAFT, OBST- UND WEINBAU

### 4.1 Zusammenfassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft in Baden-Württemberg wurde exemplarisch für die Erträge von Mais und Weizen, die Gefährdung durch Schädlinge im Obstbau sowie die Reifebedingungen im Weinbau untersucht.

Für die Ertragssimulationen wurde das ökohydrologische Modellsystem SWIM genutzt. Ein wärmeres Klima wird unter den speziellen Bedingungen von Baden-Württemberg bei der postulierten Niederschlagsentwicklung in der Fläche zur Ausdehnung des Maisanbaus führen, da die Voraussetzungen für dessen Anbau sich weiter verbessern. Der in vielen Untersuchungsregionen zunehmende Trockenstress führt demgegenüber beim Weizen wahrscheinlich zu leichten Ertragseinbußen. Die hieraus resultierenden Einnahmeverluste könnten aber durchaus durch bessere Qualitäten in Folge einer verkürzten Kornfüllungsphase ausgeglichen werden.

In der Bodensee Region führt ein wärmeres Klima bei weitgehend gleich bleibender Höhe der Jahresniederschläge zu einem höheren Schaderregerdruck im Apfelanbau, wie am Beispiel des Apfelschorfs und des Apfelwicklers gezeigt werden konnte.

Die Infektionsgefährdung durch die Pilzkrankheit Apfelschorf wurde mit Hilfe eines Infektionsindex ermittelt, der unter anderem von der Blattflechte abhängt, die mit dem Modell TRAIN errechnet wurde. Bezüglich des Apfelschorfs steigert die Klimaerwärmung das Risiko von Primärinfektionen im Frühjahr.

Beim Insektenbefall durch den Apfelwickler wurden die phänologischen Eintrittstermine (Ei, Larve, Imago) mit einem Temperatursummenmodell simuliert. Beim Apfelwickler begünstigen die höheren Temperaturen das häufigere Auftreten von zwei Larvengenerationen pro Jahr.

Die im Zusammenhang mit der postulierten Klimaerwärmung simulierten Effekte unterstreichen den Stellenwert der regionalen Schaderregerüberwachung im Obstbau und die Notwendigkeit für die laufende Anpassung integrierter Bekämpfungsstrategien von Apfelwickler und Apfelschorf.

Beim Weinbau wurde ein Temperatursummenindex nach Huglin zur Beurteilung der klimatischen Entwicklung benutzt. Der in den 90er Jahren beobachtete Trend zu prinzipiell besseren Anbaubedingungen setzt sich in die Zukunft fort. Dies sollte in den nächsten Jahrzehnten die Bedingungen des Weinbaus und den Charakter der kultivierten und angebauten Weine nachhaltig beeinflussen. Es ist aber zu überlegen, inwieweit der zunehmenden Erwärmung im Weinbaugebiet Baden beim An- und Ausbau traditioneller Sorten durch konservative Maßnahmen (z.B. Züchtung spätreifender Weißweinsorten) Rechnung getragen werden kann. Für das Anbaugebiet Württemberg scheinen die in den nächsten Jahrzehnten zu erwartenden klimatisch bedingten Änderungen eher günstig zu sein, sie lassen die Kultivierung der bisher bevorzugten und einen zunehmenden Anbau anspruchsvollerer Sorten erwarten.

### 4.2 Einleitung

In Baden-Württemberg sind etwa 41% der Landesfläche landwirtschaftlich genutzt, davon sind 58% Ackerland und 39% Grünland. Der Anbau von Sonderkulturen, wie

Gemüse-, Obst- und Weinbau, umfasst dabei zwar nur ca. 4% der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche, diese haben aber wirtschaftlich einen hohen Stellenwert. So beträgt der wertmäßige Landesanteil an den in Deutschland produzierten Obstmengen nahezu 50%, bei einigen Obstarten (Pflaumen, Zwetschgen, Beerenobst) sogar 60%. Baden-Württemberg ist eines der stärksten weinbaulich geprägten Bundesländer in Deutschland mit der nach Rheinland-Pfalz zweitgrößten Rebfläche.

Baden-Württemberg gehört mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 9.5 °C und einer Vegetationsperiode von 170 Tagen in Deutschland zu den wärmsten Gebieten Deutschlands. Klimatisch sind insbesondere der Maisanbau, der Obstanbau (Bodensee) und der Weinbau begünstigt. Der Klimawandel verändert die Produktionsgrundlagen der landwirtschaftlichen Produktion durch Wirkungen auf die Flächenproduktivität, die Qualität der Erzeugnisse und den Schaderregerdruck. Alle Aspekte werden in der folgenden Darstellung exemplarisch für einen postulierten Klimawandel betrachtet. Die Auswirkungen auf das Ertragspotenzial von Kulturen mit unterschiedlichen Wärmeansprüchen werden für den Silomais und den Winterweizen simuliert. Die Folgen für die Qualität landwirtschaftlicher Produkte werden für den Wein untersucht. Die Auswirkungen eines wärmeren Klimas auf den Schaderregerdruck durch Insekten und Pilze werden für den Apfelwickler und den Apfelschorf analysiert.

### **4.3 Auswirkungen auf die Erträge von Winterweizen und Mais**

#### **4.3.1 Einleitung**

Die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion in Baden-Württemberg (BW) ist in Abhängigkeit von den genutzten Standorten und Kulturarten klimatisch entweder primär durch die Temperatur- oder die Wasserverhältnisse begrenzt. Die Auswirkungen eines möglichen Klimawandels auf beide Limitierungen können stellvertretend am Beispiel der Kulturarten Mais und Weizen betrachtet werden. Der Maisanbau ist in Mitteleuropa trotz erheblicher züchterischer Fortschritte immer noch durch seine Temperaturansprüche begrenzt. Dies drückt sich u.a. in dem Umstand aus, dass auf weiten Teilen der Anbaufläche sicher nur Silomais und kein Körnermais angebaut werden kann. Der Körnermais-Anbau hat in den letzten Jahren jedoch einen erheblichen Aufschwung erfahren, wobei die Anbauflächenentwicklung in BW besonders dynamisch verläuft. Der Weizenbau ist aufgrund seiner Wasseransprüche auf die besseren Standorte mit einer vergleichsweise hohen nutzbaren Feldkapazität beschränkt. In Simulationsexperimenten mit dem Modellsystem SWIM wird der Frage nachgegangen, ob es auf Grund des regionalen Klimawandels bis 2055, wie er durch das Szenarienmodell STAR postuliert wird, zu klimabedingten Veränderungen im Fruchtartenspektrum kommen kann. Die Ertragspotenziale von Silomais und Winterweizen werden als Indikator verwendet. Bei der Berechnung der Ertragspotenziale werden technologische und züchterische Anpassungsmöglichkeiten nicht berücksichtigt.

#### **4.3.2 Methode**

Für die Ertragssimulationen wurde das ökohydrologische Modellsystem SWIM (*Krysanova et al., 1999*) genutzt. Das Modul zur Ertragssimulation entspricht dem EPIC-Ansatz (*Williams et al., 1989*). Die Simulationen wurden zunächst auf die Teilregionen beschränkt, für welche eine Parametrisierung der Bodeneigenschaften aus Modellanwendungen in anderen Regionen Deutschlands vorlag. Die Teilregionen wurden für

die Modellstudie in sogenannte Hydrotupe klassifiziert, die bezüglich Klima, Boden und Landnutzung homogen sind. Die Ertragssimulationen wurden für einen Referenzzeitraum 1990-1999 und für die gesamte Szenarienperiode 2001-2055 vorgenommen. Die Darstellung konzentriert sich im Folgenden auf Ergebnisse der Periode 2046-2055. Bei den Ertragssimulationen wurde eine flächendeckende Nutzung in Selbstfolge unterstellt. Anbaupausen wurden durch Grünbrache überbrückt. Der CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt wurde nicht berücksichtigt.

### 4.3.3 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Simulationen sind in den Abbildungen ([Abbildung 4.1a bis c](#) und [Abbildung 4.2a bis c](#)) und den dazugehörigen Tabellen ([Tabelle 4.1](#) und [Tabelle 4.2](#)) dargestellt. Generell lässt sich für die Periode 1990-1999 feststellen, dass die simulierten Hydrotop-Erträge ([Abbildung 4.1b](#), [Abbildung 4.2b](#)) stärker streuen als die erhobenen Kreiserträge ([Abbildung 4.1a](#), [Abbildung 4.2a](#)). Eine unmittelbare Vergleichbarkeit der Abbildungen wird durch die eingeschränkte Standortbetrachtung und durch die innerhalb der Kreise bislang bestehende statistische Flächenanonymität bei den Nutzungsarten erschwert. Die Herstellung der Vergleichbarkeit und Verbesserung der Repräsentativität der Simulationen ist Gegenstand gegenwärtig noch laufender Arbeiten.

Im Vergleich zur Referenzperiode verändert sich das Ertragspotenzial beim Silomais kaum bei einer Klimaänderung nach STAR, wobei regionale Ertragsrückgänge im mittleren Bereich des Rheintales durch Ertragszuwächse im Süden und Nord-Osten ausgeglichen werden ([Abbildung 4.1c](#)). Der Winterweizenertrag geht demgegenüber im Mittel um 14% zurück mit den stärksten Ertragsrückgängen im mittleren Rheingraben und den geringsten Ertragsverlusten im Süden und Nord-Osten ([Abbildung 4.2c](#)). Dies bedeutet, dass die in der Vergangenheit schon beobachtete Ausweitung des Maisanbaus und hier insbesondere des Körnermaisbaus sich aus klimatischer Sicht weiter fortsetzen könnte. Interessant sind aus Ertragssicht hier insbesondere die Vorgebirgslagen und der nordöstliche Landesteil. Der Rückgang des Weizenertrages ist u.a. auf eine Verkürzung der Kornfüllungsphase zurückzuführen. Diese Verkürzung ermöglicht jedoch auch den Anbau qualitativ höherwertiger Backweizen, was letztlich die Möglichkeit schafft, ertragsbedingte Einnahmeverluste durch den Anbau besser vergüteter Qualitätsweizen zumindest teilweise zu kompensieren.

Der CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt wurde in diesen Simulationen generell nicht berücksichtigt. Dieser könnte in Abhängigkeit von der bis 2046 erreichten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration die beobachteten Ertragsverluste beim Winterweizen halbieren und beim Maisanbau sogar leichte Ertragsgewinne ermöglichen.

Die für Baden-Württemberg erzielten Ergebnisse entsprechen weitgehend den Erwartungen. In der Größenordnung liegen sie eher leicht unter den für Ostdeutschland ermittelten Effekten (*Gerstengarbe et al., 2003*). Die klimabedingte relative Vorzüglichkeit der lokalen Landwirtschaft gegenüber Wettbewerbern aus Ostdeutschland wird sich damit wahrscheinlich nicht verschlechtern.

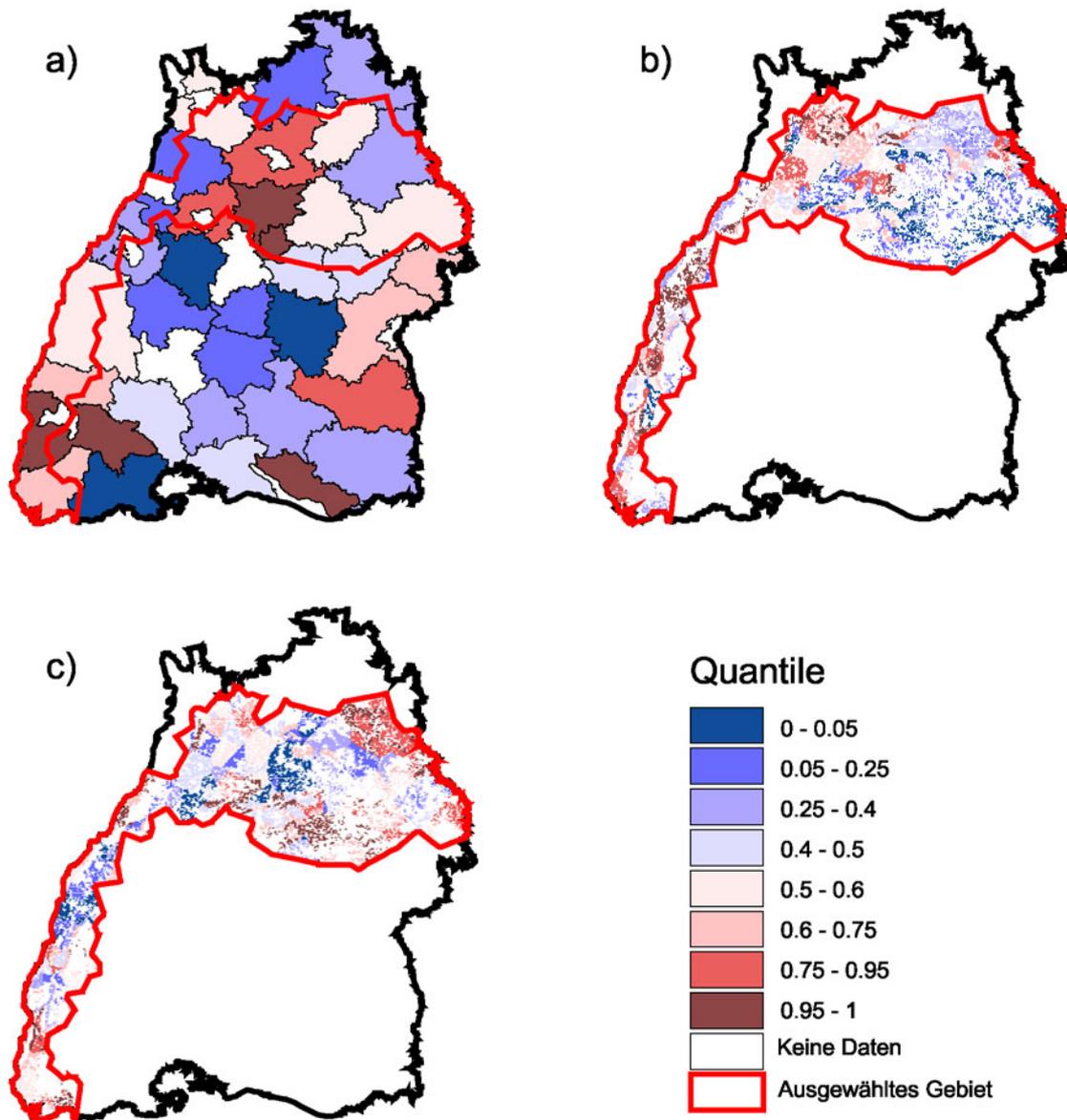


Abb. 4.1: Räumliche Verteilung der Silomaiserträge Baden-Württembergs abgestuft nach Quantilen (Tab. 4.1): arithmetische Mittel a) der erhobenen Kreiserträge 1990-1999 und b) der simulierten Hydrotoperträge 1990-1999 sowie c) der mittleren Ertragsdifferenzen zwischen den simulierten Hydrotoperträgen der Perioden 2046-2055 und 1990-1999.

Tab. 4.1: Quantile zur räumliche Verteilung der erhobenen mittleren Silomaiserträge für die Periode 1990-1999 über der Gesamtfläche Baden-Württembergs (Gesamt, Abb. 4.1a) und den in der Studie betrachteten Landesauschnitt (Teil, Abb. 4.1a), der simulierten Erträge auf den betrachteten Teilflächen für den gleichen Zeitraum (Abb. 4.1b) und der simulierten Ertragsdifferenzen zwischen den Perioden 2046-2055 und 1990-1999 (Abb. 4.1c)

	Quantile	erhoben		simuliert	
		Gesamt	Teil	1990-1999	Änderung
[dt/ha]					
MIN	0	414	431	182	-52
	0.05	429	440	297	-30
	0.25	445	457	386	-17
	0.4	455	463	425	-12
Median	0.5	460	464	452	-4
	0.6	464	469	476	4
	0.75	474	474	509	17
	0.95	496	481	585	23
MAX	1	514	492	668	49

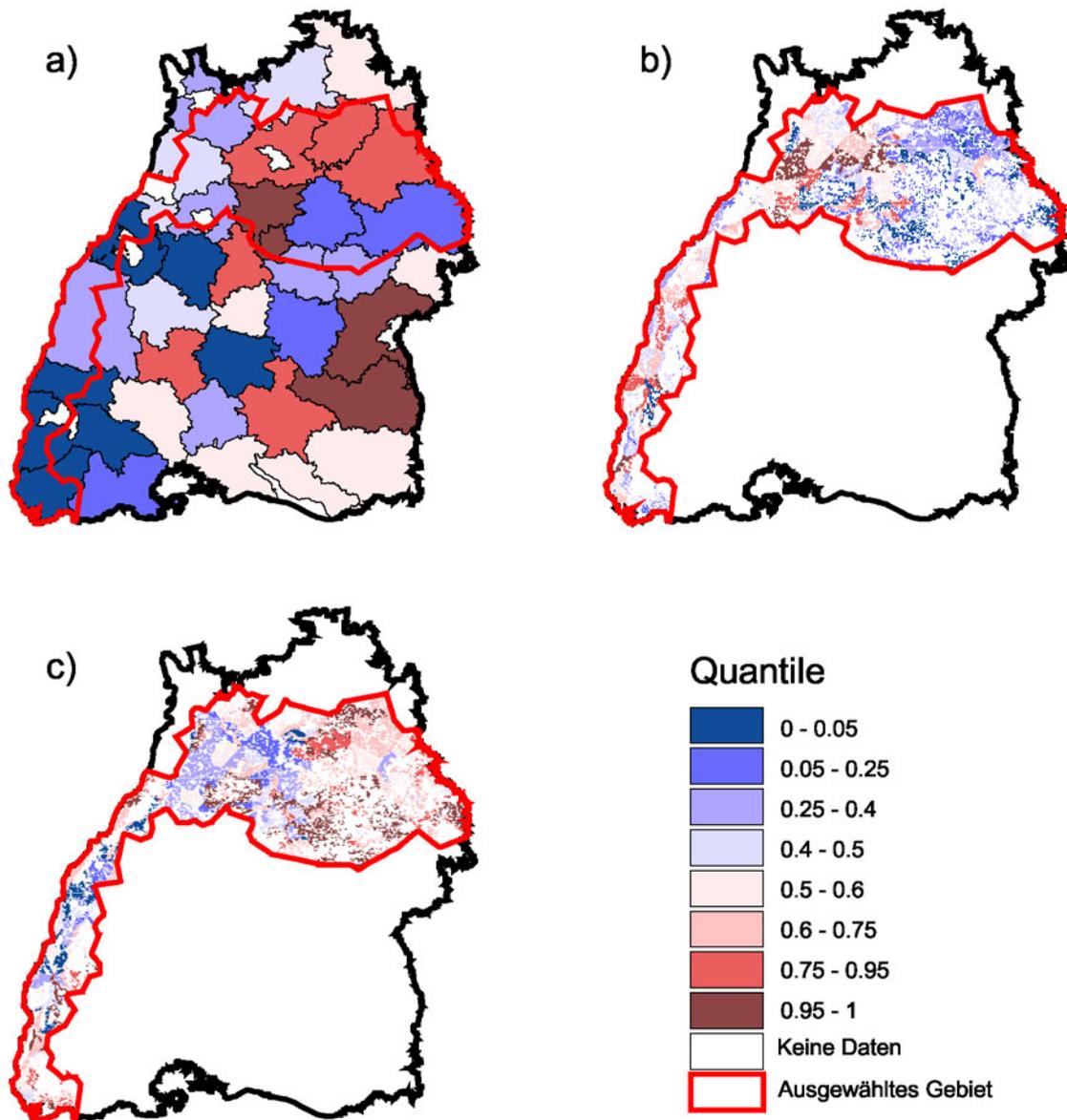


Abb. 4.2: Winterweizenerträge Baden-Württembergs abgestuft nach Quantilen (Tab. 4.2): arithmetische Mittel a) der erhobenen Kreisenerträge 1990-1999 und b) der simulierten Hydrotop-erträge 1990-1999 sowie c) der mittleren Ertragsdifferenzen zwischen den simulierten Hydrotoperträgen der Perioden 2046-2055 und 1990-1999.

Tab. 4.2: Quantile zur räumlichen Verteilung der erhobenen mittleren Winterweizenerträge für die Periode 1990-1999 über der Gesamtfläche Baden-Württembergs (Gesamt, Abb. 4.2a) und den in der Studie betrachteten Landesauschnitt (Teil, Abb. 4.2a), der simulierten Erträge auf den betrachteten Teilflächen für den gleichen Zeitraum (Abb. 4.2b) und der simulierten Ertragsdifferenzen zwischen den Perioden 2046-2055 und 1990-1999 (Abb. 4.2c)

	Quantile	erhoben		simuliert	
		Gesamt	Teil	1990-1999	Änderung
[dt/ha]					
MIN	0	52	55	25	-15
	0.05	56	55	40	-13
	0.25	60	60	55	-12
	0.4	61	61	60	-11
Median	0.5	64	62	63	-10
	0.6	65	62	66	-9
	0.75	67	63	72	-7
	0.95	74	68	80	-6
MAX	1	75	68	86	-2

#### 4.4 Obstbau: Gefährdungspotenzial durch Apfelschorf (*Venturia inaequalis*)

##### 4.4.1 Einleitung

Im Obstbau gehören Pilzkrankheiten zu den gefährlichsten und wirtschaftlich bedeutendsten parasitären Krankheitserregern. Der wichtigste unter ihnen ist der Apfelschorf (*V. inaequalis*), der zu hohen Qualitätseinbußen und Ertragsverlusten von bis zu 70% führen kann (Förschler et al., 2003). Der Apfelschorf ist grundsätzlich auf den Apfel (*Malus domestica*) und andere Malus-Arten beschränkt. Seine Entwicklung ist maßgeblich abhängig von feuchten Witterungsbedingungen, unter denen er im Frühjahr die Primärinfektionen und im Sommer die folgenschweren Sekundärinfektionen hervorrufen kann. Der Apfelschorf kommt in zwei Erscheinungsformen, der Hauptfruchtform (*Venturia inaequalis*) und der Nebenfruchtform (*Spilocaea pomi*) vor (siehe [Abbildung 4.3](#)). Die saprophytische (sich von totem organischen Material ernährende) Hauptfruchtform bildet während des Winters im Falllaub sexuelle Fruchtkörper aus und schleudert die heranreifen Askosporen an feuchten Frühjahrstagen, meist um die Mittagszeit, aus. Diese lösen am Apfel die ersten Infektionen aus. Nach 1-3 Wochen entstehen die ersten Schorflecken an den Blättern ("Frühschorf"), an denen dann die Konidien der Nebenfruchtform ausgebildet werden. Diese Konidien sind für die entscheidende Infektion, den "Spätschorf" verantwortlich. Sowohl für die Primär- als auch die Sekundärinfektion ist eine warme und feuchte Witterung von entscheidender Bedeutung. Für die Charakterisierung des Infektionsrisikos sind die Blattfeuchtedauer und die während der Blatt-nässe vorherrschenden Temperaturen die wichtigsten Gefährdungskriterien.

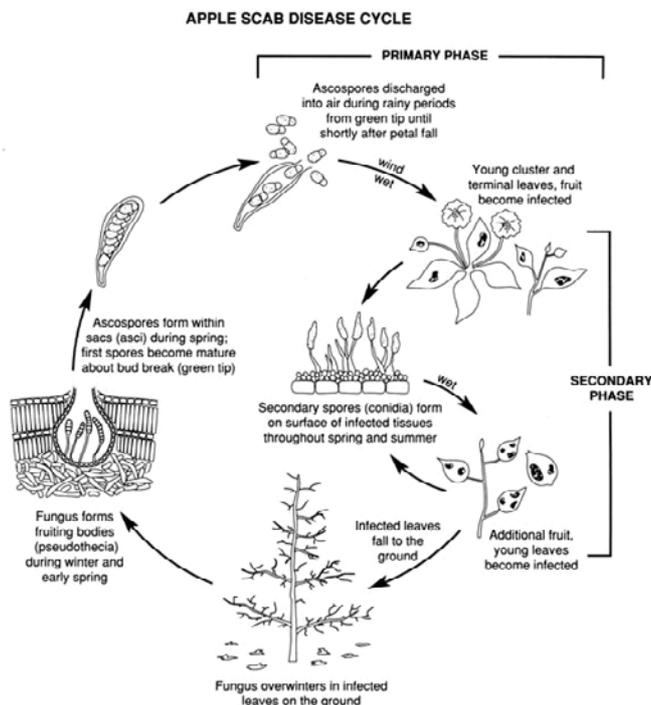


Abb. 4.3: Generationszyklus vom Apfelschorf (*V. inaequalis* und *S. pomi*),  
 Quelle: [http://plantclinic.cornell.edu/FactSheets/apple\\_scab\\_factsheets/app](http://plantclinic.cornell.edu/FactSheets/apple_scab_factsheets/app). provided by  
 Wayne Wilcox, Cornell University, NYSAES, Geneva, NY

#### 4.4.2 Methoden

Zur Charakterisierung der täglichen Infektionsgefährdung wurde ein Infektionsindex definiert, der den relativen, täglichen Füllungsgrad des Interzeptionsspeichers als Maß für die Blattfeuchtedauer und den Mindestanteil [%] eines 24 h Blatttages (BFD<sub>24</sub>), der für eine Infektion durchgehend befeuchtet sein müsste, ins Verhältnis zueinander setzt:

$$\text{Infektionsindex} = \frac{\text{Täglicher Füllungsgrad des Interzeptionsspeichers [\%]}}{\text{BFD}_{24}[\%]}$$

Die klimatischen Voraussetzungen für eine Apfelschorfinfektion gelten bei Indexwerten  $\geq 1$  als erfüllt.

Für die Charakterisierung des monatlichen Infektionsgeschehens wurden die täglichen Indexwerte-Werte  $\geq 1$  monatsweise aufsummiert.

Die graduelle LAI-abhängige, tägliche Füllung des Interzeptionsspeichers in Folge des gefallenen Niederschlags und der stattgefundenen Entleerung des Speichers durch Evapotranspiration wurde mit dem Modellsystem TRAIN (Menzel, 1999) berechnet. Taubildung als Quelle von Blattnässe konnte bei der Simulation mit TRAIN nicht berücksichtig

sichtigt werden. Da diese aber gewöhnlich für eine Infektion mit Askosporen nicht ausreichend ist (Rossi et al., 2001), konnte dieser Faktor vernachlässigt werden.

Der BFD<sub>24</sub> ergibt sich aus der für eine Infektion notwendigen Blattfeuchtedauer (BFD, [h]) in Prozent eines 24 h Blatttages und wird nach MIN(BFD/24\*100,100) ermittelt.

Die BFD wurde mit folgenden Funktionen aus der Temperatur (T, [°C]) berechnet:

Für den niedrigen Temperaturbereich 2-8 °C (Stensvand et al., 1997):

Askosporen:  $BFD = 46.9 - 6.72T + 0.317T^2$

Konidien:  $BFD = 41.5 - 4.17T + 0.111T^2$

Für den mittleren bis hohen Temperaturbereich 10-26 °C (MacHardy & Gadoury, 1989):

Askosporen:  $BFD = 86.3749 - 18.0034T + 1.5703T^2 - 0.062T^3 + (9.198E-04)T^4$

Konidien:  $BFD = 58.8899 - 11.7951T + 1.0244T^2 - 0.0403T^3 + (5.969E-04)T^4$

Die BFD-Funktionen basieren auf den Überarbeitungen der klassischen Infektionstabelle nach Mills (Mills & La Plante, 1951) durch MacHardy & Gadoury (1989) und Stensvand et al. (1997). Die Auswirkung der Temperatur auf die BFD ist für ausgewählte Temperaturen unter Nutzung der obigen Funktionen in [Tabelle 4.3](#) veranschaulicht.

Tab. 4.3: Auszug aus der Schorfinfektionstabelle nach MacHardy & Gadoury (1989) und Stensvand (1997) mit den bei unterschiedlichen Temperaturen mindestens notwendigen Blattfeuchtedauern (BFD) für eine Infektion durch Askosporen und Konidien

Temperatur (°C)	BFD [h]	
	Askosporen	Konidien
1	40.5	37.4
6	18	20.5
11	9	9.5
16	6.1	9
21	6	7.8
26	11.3	14

Da die Primärinfektionen durch Askosporen und die Sekundärinfektionen durch Konidien sich jeweils auf die Zeiträume (März) April-Mai bzw. Juni-August beschränken, erfolgt die BFD Berechnung für die erste Zeitspanne nach den für die Ascosporenfektion oben angegebenen Funktionen, während für die zweite Zeitspanne die der Konidieninfektion zugeordneten Funktionen verwendet werden. Generell wird davon ausgegangen, dass die für eine Sekundärinfektion im Sommer notwendige Primärinfektion im Frühjahr erfolgt ist.

Die Charakterisierung des Infektionsrisikos mit Hilfe des oben eingeführten Infektionsindex erfolgte für vier Standorte in der Gegend des Bodensees: Überlingen, Immenstaad, Konstanz und Bodman. Einem Gebiet, das sich durch eine sehr hohe Obstanbaudichte auszeichnet ([Abbildung 4.4](#)). Die meteorologischen Tagesdaten für

1951-2000 wurden vom DWD bereitgestellt. Die meteorologischen Tagesszenarien für 2001-2055 wurden durch das regionale Klimamodell STAR (Gerstengarbe & Werner, 2005) bereitgestellt.

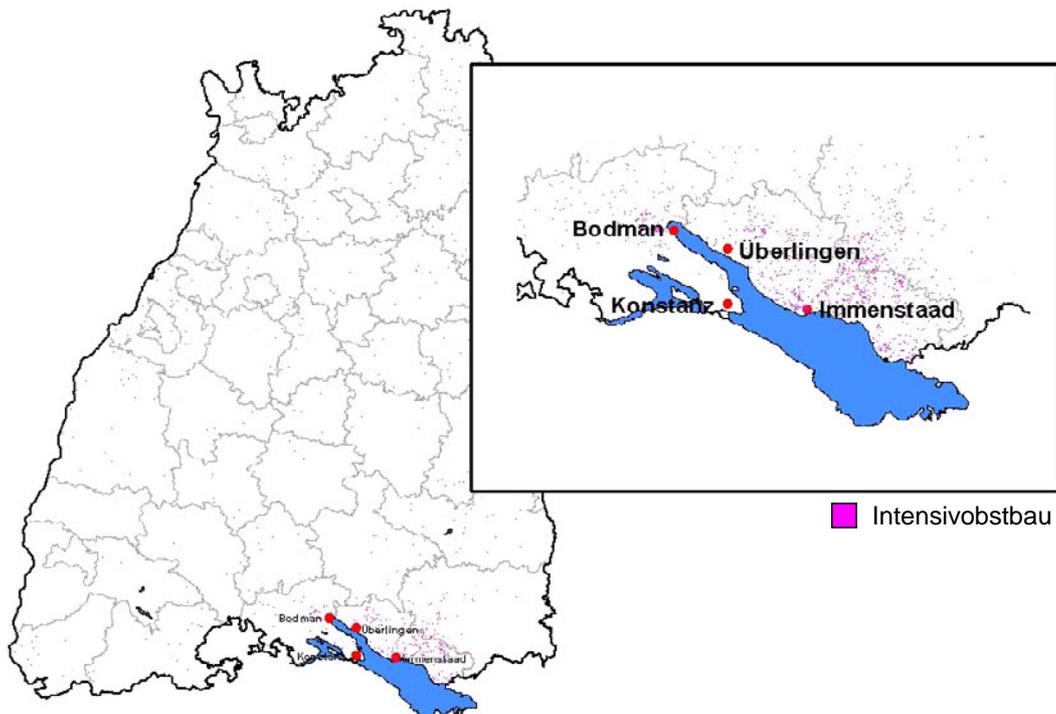


Abb. 4.4: Intensivobstbauflächen (pinkfarbene Punkte) in Baden-Württemberg mit der deutlich erkennbaren Anbaukonzentration am Bodensee und die vier zur Berechnung verwendeten Stationen

#### 4.4.3 Ergebnisse und Diskussion

Entscheidend für die Ergebnisse ist der durch das Szenarienmodell STAR postulierte Grad an Klimaveränderungen. In den betrachteten Monaten (März bis August) steigen die Temperaturen um durchschnittlich  $1.11 \pm 0.06^\circ\text{C}$  (Tabelle 4.4). Der Niederschlag nimmt im April, Juli und August ab, in den Monaten März, Mai und Juni dagegen zu (Tabelle 4.4). Im Mittel ( $+0.02 \pm 0.18$  mm (Schwankungsbereich:  $-0.2$  bis  $+0.3$  mm)) gleichen sich Niederschlagsrückgänge und -zunahmen weitgehend aus.

Nach den simulierten Indexwerten für das monatliche Infektionsrisiko ist mit einem Anstieg der Infektionsgefahr im Frühjahr zu rechnen. Die Wahrscheinlichkeit für Primärinfektionen (April bis Mai) und frühe Sekundärinfektionen (Juni) wird vermutlich zunehmen. Die klimatischen Voraussetzungen für Sekundärinfektionen (Juni bis August) werden sich dagegen etwas verschlechtern (Abbildung 4.5, Abbildung 4.6a-f).

Tab. 4.4: Monats-Mittelwerte der Temperatur (T [°C]) und mittlere Monatssummen des Niederschlags (N [mm]) an 4 Stationen der Bodensee-Region (Überlingen, Immenstaad, Konstanz und Bodman) für die Klimaperiode 1951-2000, die Szenarienperiode 2001-2055 und die Differenzen zwischen beiden

Monat		1951-2000	2001-2055	Differenzen
März	T [°C]	4.6	5.6	1.1
	N [mm]	1.6	1.8	0.3
April	T	8.2	9.3	1.1
	N	2.1	2.1	-0.1
Mai	T	12.8	14.1	1.2
	N	2.8	2.9	0.1
Juni	T	16.0	17.1	1.1
	N	3.5	3.6	0.1
Juli	T	18.1	19.1	1.1
	N	3.4	3.3	-0.1
August	T	17.4	18.6	1.1
	N	3.1	2.8	-0.2

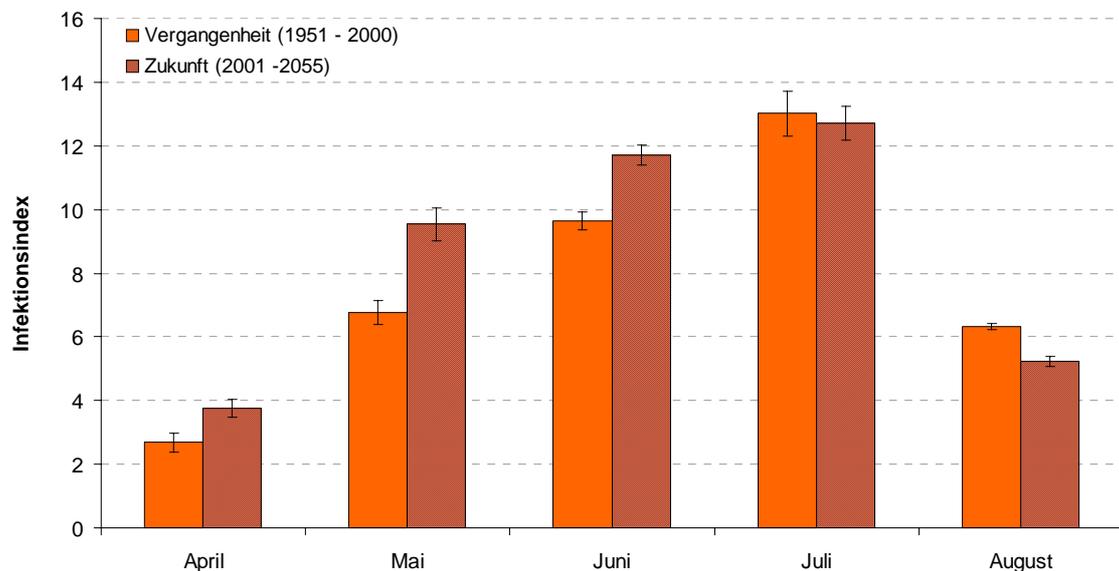


Abb. 4.5: Mittlere Monatssummen des täglichen Infektionsindex für den Apfelschorf (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung von 4 Bodensee-Stationen) in der rezenten Klimaperiode 1951-2000 und der Szenarienperiode 2001-2055

Vergangenheit

Zukunft

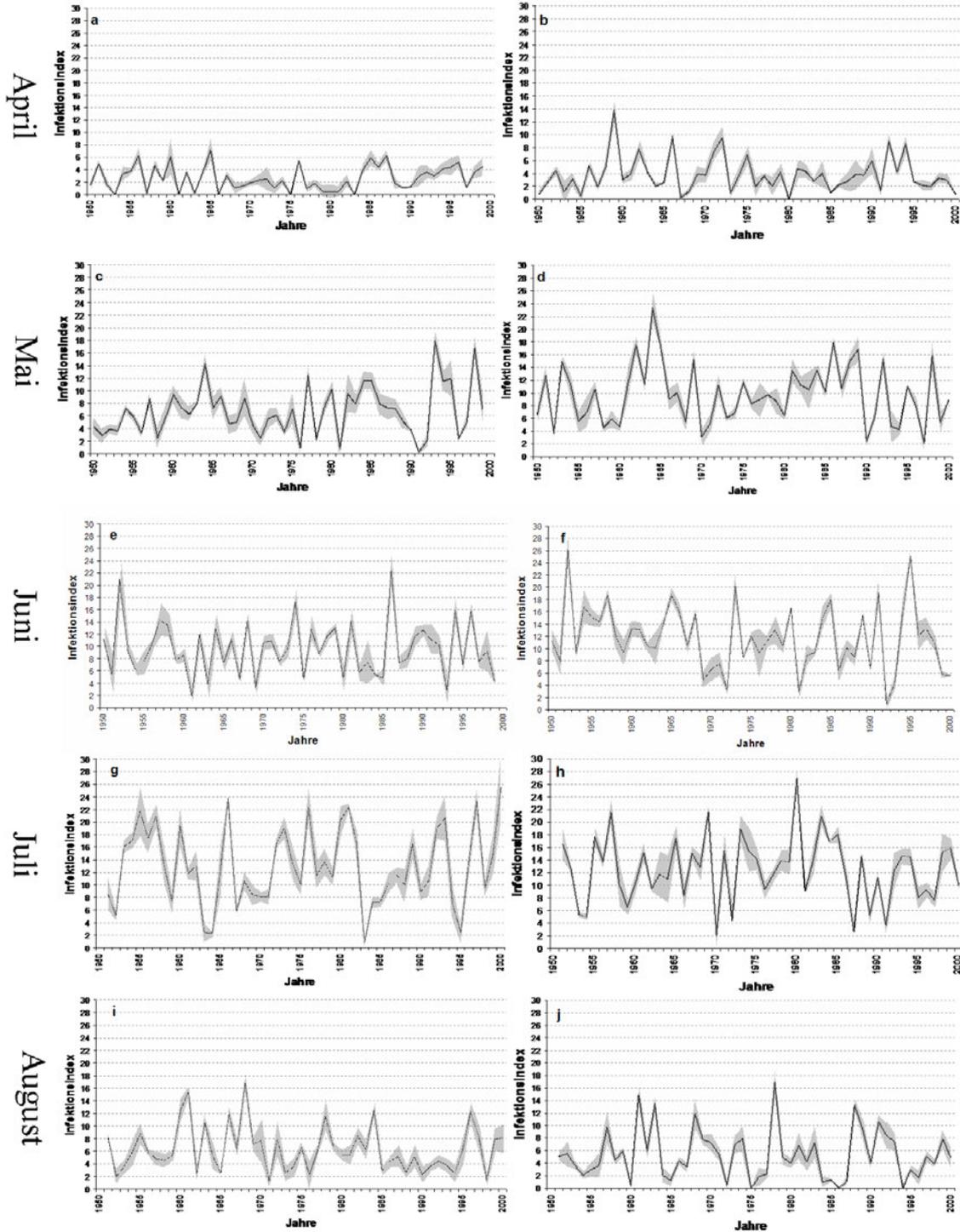


Abb. 4.6: Monatssummen des täglichen Infektionsindex von 1951-2000 sowie 2001-2055 für die Monate April, Mai und Juni (Mittelwerte als durchgezogene Linie und  $\pm$  Standardabweichungen als grauer Flächenbereich bezüglich der 4 Bodensee-Stationen: Überlingen, Immenstaad, Konstanz und Bodman)

Nach dem STAR-Szenarium wird das Risiko für Infektionen mit Apfelschorf in Baden-Württemberg in den nächsten Jahrzehnten in den Monaten April bis Juni (2001-2055) deutlich gegenüber der Vergleichsperiode (1951-2000) steigen (Abbildung 4.5). Während im April 1951-2000 in neun Jahren klimatisch kein Potenzial (Infektionsindex = 0) für eine Infektion durch Askosporen vorhanden ist, kommen 2001-2055 nur noch drei Jahre mit dem Infektionsindex 0 vor (Abbildung 4.6a-b). Das Infektionsmaximum liegt 1951-2000 bei 7 möglichen Infektionsperioden und steigt 2001-2055 auf 14 an (Abbildung 4.6a-b). Die Mittelwerte steigen von 2.7 auf 3.8 (Abbildung 4.5).

Im Mai steigen die Maxima von 18 auf 23 mögliche Infektionsperioden und die Mittelwerte von 6.8 auf 9.5 (Abbildung 4.5) an. Auch die detaillierte Darstellung in [Abbildung 4.6c](#) und [Abbildung 4.6d](#) zeigt diese Entwicklung. Es fällt auf, dass im Zukunftsszenarium alle Jahre ein Infektionsrisiko von mindestens zwei Infektionsperioden aufweisen. Die potentiellen Infektionshäufigkeiten nehmen auch im Juni noch etwas zu, ab Juli zeigt sich jedoch eine Tendenz zur abnehmenden Infektionsgefahr.

Im Vergleich der simulierten Schorfinfektionen mit nachgewiesenen Infektionen der Biologischen Bundesanstalt Dossenheim, konnten festgestellt werden, dass ein Anstieg der Schorfgefährdung von März bis Mai tendenziell realistisch wiedergegeben wird. Allerdings wird die Anzahl an möglichen Schorfinfektionen bei den Simulationen im Monat Mai etwas überschätzt. Diese Unterschiede können durch verschiedene Faktoren begünstigt werden. Dazu zählt zum einen die große räumliche Distanz zwischen dem Simulationsraum Bodensee und der Biologischen Bundesanstalt Dossenheim bei Heidelberg. Zum anderen wurden bisher die Auswirkungen verschiedener Faktoren wie die Askosporenreife, die Bedingungen für den Askosporenflug, sowie der Vorjahreseinfluss nicht berücksichtigt, die die Anzahl möglicher Infektionen beschränken würden.

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass die Aussagen, die wir mit den Simulationen treffen können, sich ausschließlich auf klimatische Prädispositionen beziehen. Wechselwirkungen mit anderen Krankheitserregern und Methoden zur phytosanitären Vorsorge können nicht berücksichtigt werden. Ferner liegt es in der Natur der gewählten Vorgehensweise, dass das Verhalten der Obstbauern (Vorsorge im Vorjahr, Maßnahmen zur Verhinderung von Primärinfektionen) nicht wirksam wird.

Die Index-Modellierung weist grundsätzlich auf eine höhere Gefährdung des Apfelbaus in Baden-Württemberg durch *V. inaequalis* bei einem Klimawandel nach STAR hin. Die Voraussetzungen für die günstigen abiotischen Entwicklungsbedingungen von *V. inaequalis* basieren dabei vor allem auf dem Anstieg der Temperaturen. Dabei ist der Anstieg der Infektionspotenziale im Frühjahr für die Schorfbekämpfung von entscheidender Bedeutung. In dieser Phase findet die Infektion durch Askosporen statt. Der wirtschaftliche Schaden der Primärinfektion ist zwar zu vernachlässigen, die biologische Funktion dieser Infektion ist dagegen sehr bedeutsam. Denn die für den Ernteertrag bedeutendere Sekundärinfektion kann nur stattfinden, wenn ihr im Frühjahr eine Primärinfektion vorausgegangen ist. Daher beschränken sich die Bekämpfungsmaßnahmen größtenteils auf die Primärinfektion von März bis Mai. Findet im Frühjahr also eine Infektion durch Askosporen statt, ist die Wahrscheinlichkeit, dass im Sommer eine Sekundärinfektion einsetzt sehr hoch. Wärmere und trockenere Sommer können dies wahrscheinlich nur bedingt ausgleichen.

Die Konstellation aus steigenden Temperaturen und weitgehend gleichbleibenden Niederschlägen kann und wird vermutlich nicht nur für den Apfelschorf günstigere Bedin-

gungen schaffen, sondern auch einer Reihe anderer Pilzkrankheiten im Pflanzenbau in ihrer Entwicklung nützen. Die Kosten-Belastung der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion durch Pilzinfektionen wird damit voraussichtlich zunehmen. Im ökologischen Anbau ist mit einer Verschiebung der Eignungsgebiete zu rechnen.

#### 4.5 Obstbau: Auswirkungen auf die Generationsfolge des Apfelwicklers (*Cydia pomonella*)

##### 4.5.1 Einleitung

Ein zentraler Aspekt des zukünftigen Klimawandels wird die Veränderung der Temperaturen sein. Welchen Einfluss diese veränderten Temperaturen in den kommenden Jahrzehnten auf Schadinsekten im Obstbau haben werden, wurde exemplarisch für das Befallsrisiko durch den Apfelwickler *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera, Tortricidae) modelliert und simuliert. Der Apfelwickler stellt einen der wichtigsten Schädlinge im Kernobstbau dar. Er ist weltweit verbreitet und verursacht vor allem im Apfel- und Birnenanbau, aber auch lokal an Quitte, Pflaume, Aprikose und Walnuss erhebliche Schäden. Durch den Fraß seiner Larven können große Teile der Ernte zerstört werden.

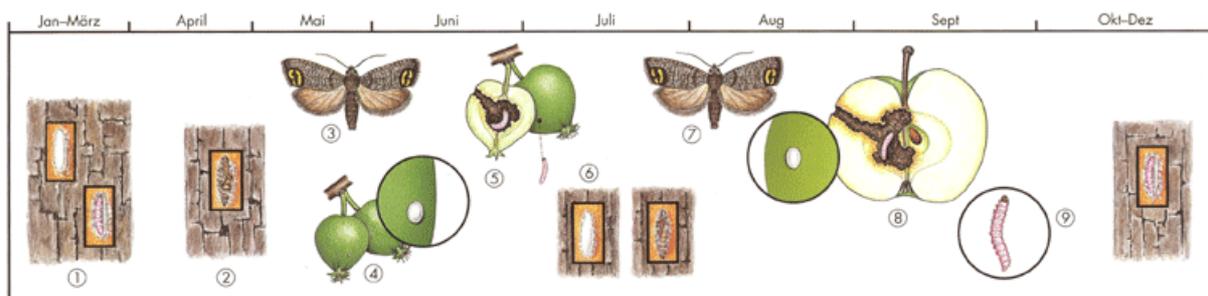


Abb. 4.7: Entwicklungszyklus des Apfelwicklers (*C. pomonella*)

Quelle: <http://www.temmen.de/illus/apfel.htm>

Apfelwickler überwintern als Larve (L<sub>5</sub>-Stadium) in einem Gespinnst unter den Borkenschuppen (Abbildung 4.7: 1). Sie verpuppen sich im April (2) und häuten sich je nach Witterungslage ab Anfang Mai zum Imago (3). Einige Wochen später erfolgt die Befruchtung des Weibchens und die Ablage der Eier auf der Frucht (4). Die Larven schlüpfen (L<sub>1</sub>-Stadium) und fressen sich im Laufe ihrer Entwicklung (L<sub>1</sub> bis L<sub>5</sub>-Stadium) durch die Frucht (5). Nach 4 Wochen verlassen sie den Apfel und spinnen sich wiederum zum Überwintern ein (L<sub>5</sub>-Stadium) (6). Die geschädigten Früchte werden vorzeitig abgeworfen und können vom Baum durch die Verringerung des natürlichen Juni-Fruchtfalls wieder ausgeglichen werden. Partiiell kommt beim Apfelwickler die Ausbildung einer zweiten Generation vor (7-9). Der Anteil an Individuen, die sich abermals verpuppen, liegt in warmen Jahren besonders hoch. Die Ernte nimmt infolge eines Befalls durch diese Generation einen deutlich höheren Schaden, da sich die Larven in die bereits reifenden Früchte einbohren (8). Infolge der zukünftig steigenden Temperaturen kann es zu einer Verfrühung der Entwicklung der Schadorganismen kommen. Damit würde die Wahrscheinlichkeit der Etablierung einer zweiten Generationen sowie die Entstehung einer dritten Generation steigen. In Südeuropa liegt der Anteil an Individuen, die zweite Generationen ausbilden, besonders hoch, hier kommt es sogar zu drei, in sehr warmen Regionen der Erde sogar zu vier Generationen (z.B. im Iran) des Apfelwicklers (Blago, 1992). Ob in

Deutschland die Entwicklungen hin zu stärkeren zweiten und womöglich auch dritten Generationen zu erwarten ist, soll in dieser Studie geklärt werden.

#### 4.5.2 Methoden

Grundlage des Modells ist die Berechnung der Temperatursummen, die für das Auftreten der verschiedenen phänologischen Stadien notwendig sind. Die Entwicklung von ektothermen Tieren, wie den Insekten, ist maßgeblich von der Außentemperatur abhängig. Bei höheren Temperaturen bis 30 °C läuft die Entwicklung in der Regel schneller ab, als dies bei niedrigeren Temperaturen der Fall wäre.

Die Simulationen erfolgten für vier Standorte am Bodensee (Kapitel 4.4.2, Abbildung 4.4). Die meteorologischen Tagesdaten für 1951-2000 wurden vom DWD bereitgestellt. Die meteorologischen Tagesszenarien für 2001-2055 wurden von dem regionalen Klimamodell STAR (Gerstengarbe & Werner, 2005) übernommen.

Die Simulation der phänologischen Eintrittstermine erfolgte in Anlehnung an das Temperatursummenmodell von Gottwald (1996), Tabelle 4.5. Die effektiven täglichen Temperatursummen wurden unter Nutzung der triangularen Interpolationsmethode von Sevacherian, V., V. M. Stern & A. J. Mueller (1977) kalkuliert. Als untere und obere Grenzwerte für die Temperaturwirksamkeit wurden nach Durchsicht der Literatur (vgl. Gottwald, 1996) 10 und 31 °C angesetzt. Eine entwicklungsverzögernde Wirkung sehr hoher Temperaturen (>31 °C) wurde nicht berücksichtigt.

Tab. 4.5: Temperatursummen phänologischer Ereignisse nach Gottwald (1996)

Phänologische Ereignisse	Temperatursummen (Gradtage (dd))
vorjährige Generation	
Flugbeginn	115
1. Generation	
Eiablage	238
Larvenschlupf	314
Flugbeginn	539
2. Generation	
Eiablage	680
Larvenschlupf	774

Die Aufsummierung der effektiven Temperatursummen erfolgte beginnend mit dem 1. Januar. Für die Simulation der phänologischen Ereignisse wurden die von Gottwald ermittelten Gradtage (dd), die zur Eiablage, dem Larvenschlupf und der Entstehung der Imagines notwendig sind, herangezogen. Für die Berechnung der Eintrittstermine einer möglichen dritten Generation wurden die für die zweite Generation angegebenen Temperaturanforderungen auf die dritte Generation übertragen. Eine mögliche Verlängerung oder Verkürzung der Entwicklungsintervalle zum Imago der zweiten Generation und sämtlicher Stadien der dritten Generationen des Apfelwicklers erscheint grundsätzlich möglich, musste aber hier ignoriert werden. Ein späterer Modellabgleich mit Forschungseinrichtungen aus Südeuropa erscheint in diesem Zusammenhang empfehlenswert.

### 4.5.3 Ergebnisse und Diskussion

Zur partiellen Validierung des Modells sind in [Abbildung 4.8](#) das simulierte Erstauftreten der Apfelwickler-Falter und die durch das Kompetenzzentrum Bodensee (KOB Bavendorf) mit Falterfallen festgestellten Erstflüge gegenübergestellt. Der mittlere erste Flugtermin im Zeitraum 1988-2000 ist in der Simulation der 11. Mai und in den Beobachtungsdaten der 14. Mai. Die jährlichen Schwankungen der Eintrittstermine werden in den Simulationen gut wiedergegeben. Größere absolute Abweichungen zwischen simulierten und beobachteten Eintrittsterminen gibt es allerdings zu Beginn der Periode 1988-2000 ([Abbildung 4.8](#)).

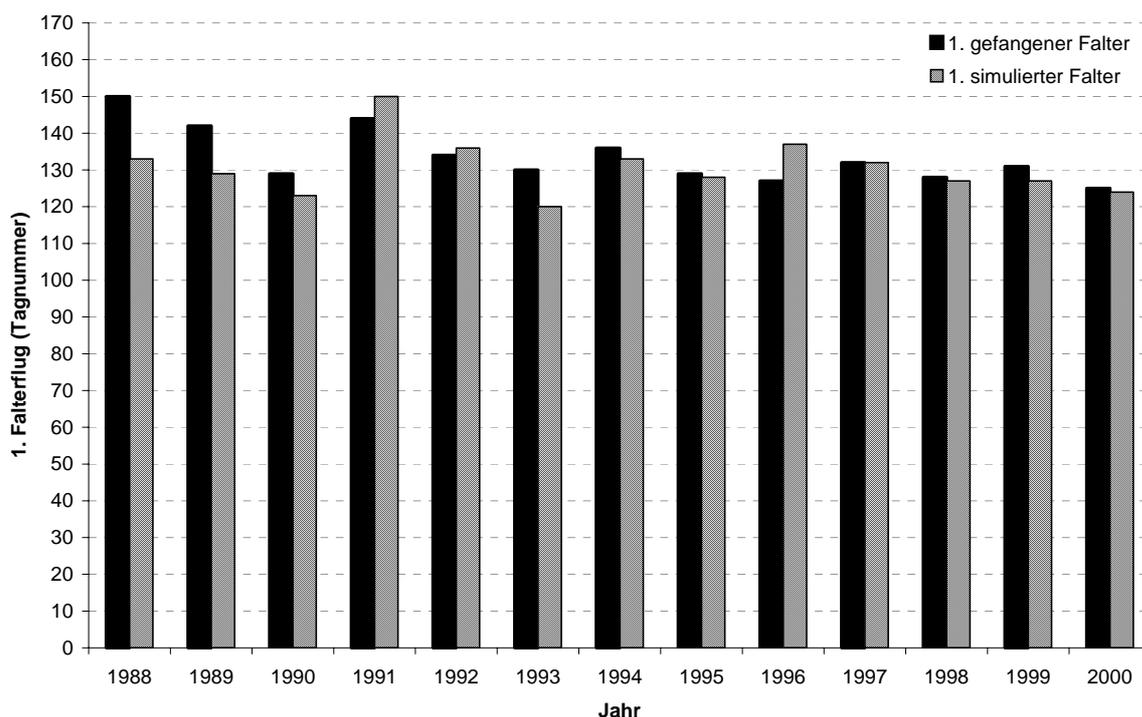


Abb. 4.8: Vergleich der Fallenfänge des ersten Falters (M. Trautmann, KOB Bavendorf, erster Falter aus 10 Beobachtungsstationen am Bodensee) mit den Simulationsergebnissen (erster Falter aus 4 Simulationsstationen am Bodensee).

Die für den Betrachtungszeitraum insgesamt durchgeführten Simulationen ([Abbildung 4.9](#)) zeigen, dass eine temperaturbedingte Verfrühung aller Entwicklungsstadien von *C. pomonella* sehr wahrscheinlich ist. In der Konsequenz kann dies zu größeren Anteilen von Faltern führen, die zweite Generationen bilden. Die Anzahl der Jahre in denen sogar günstige klimatische Bedingungen für phänologische Stadien der dritten Generationen vorhanden sind, steigt im Zukunftsszenarium deutlich an ([Abbildung 4.9](#)). Die Verfrühung der Stadien liegt im Bereich von 11 bis 20 Tagen (Mittelwert: 14.4 ( $\pm 3$ )).

Der relative Anteil der klimatisch prädispositionierten Jahre, in der die Tiere der zweiten Generation sich bis zum Larvalstadium, also bis zum Schädling, entwickeln, liegt sowohl im Zukunftsszenarium als auch unter rezenten Klimabedingungen bei ca. 100% (siehe [Abbildung 4.10](#), [Tabelle 4.6](#)). Demnach besteht in fast allen Jahren des betrachteten Zeitraums die Möglichkeit für die Entwicklung zweiter Generationen.

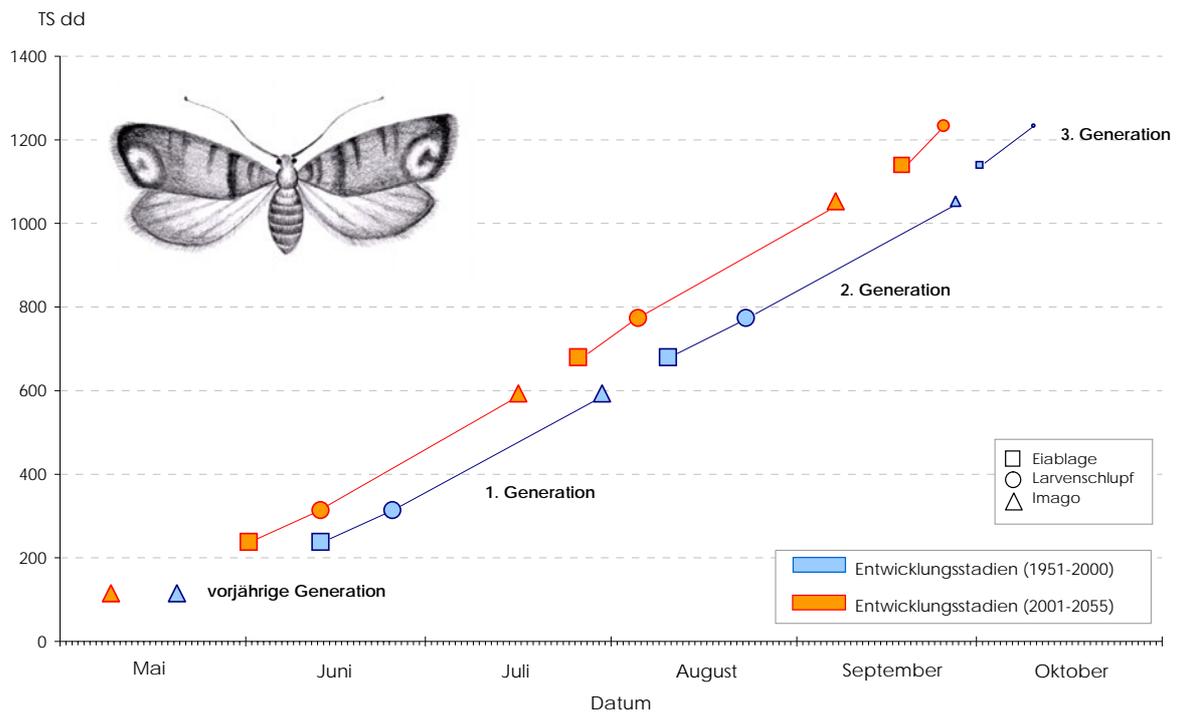


Abb. 4.9: Veränderung der Generationsentwicklung beim Apfelwickler (*C. pomonella*) im Gebiet Bodensee (Symbolgröße entspricht der Häufigkeit der klimatisch günstigen Jahre für die Entwicklung des phänologischen Stadiums)

Der prozentuale Anteil der klimatisch prädispositionierten Jahre kann als generationenbezogene Auftrittswahrscheinlichkeit interpretiert werden. Es ist nicht mit einer Auftrittshäufigkeit zu verwechseln. Mit anderen Worten: daraus ergibt sich keine Aussage über das quantitative Verhältnis von aufeinanderfolgenden Generationen.

Die Temperatur-Voraussetzungen für den Larvenschlupf einer 3. Generation des Apfelwicklers sind bei den Simulationen der rezenten Klimaverhältnisse nur in 17% der Jahre erfüllt. Dagegen steigt der Anteil an klimatisch günstigen Jahren für den Larvenschlupf dritter Generationen im Zukunftsszenarium deutlich auf 68% an (Tabelle 4.6, Abbildung 4.10). Da die Überwinterung des Apfelwicklers generell nur als eingespinnene Larve (L<sub>5</sub>-Stadium) stattfinden kann, wäre eine erneute Verpuppung der zweiten Generation zum Imago nur dann sinnvoll, wenn die Folgegeneration (3. Generation) gute Chancen hat, den Zyklus bis zum L<sub>5</sub>-Stadium zu vollziehen. Es ist deshalb wahrscheinlich, dass nicht die für die Entwicklung der Imagines sondern die für die Entwicklung der L<sub>5</sub>-Larven notwendigen Temperatursummen von Bedeutung sind. Unter rezenten Klimabedingungen sind diese Voraussetzungen für die Entwicklung von L<sub>5</sub>-Larven nicht gegeben, was das gegenwärtige Ausbleiben dritter Generationen in der Region erklären würde.

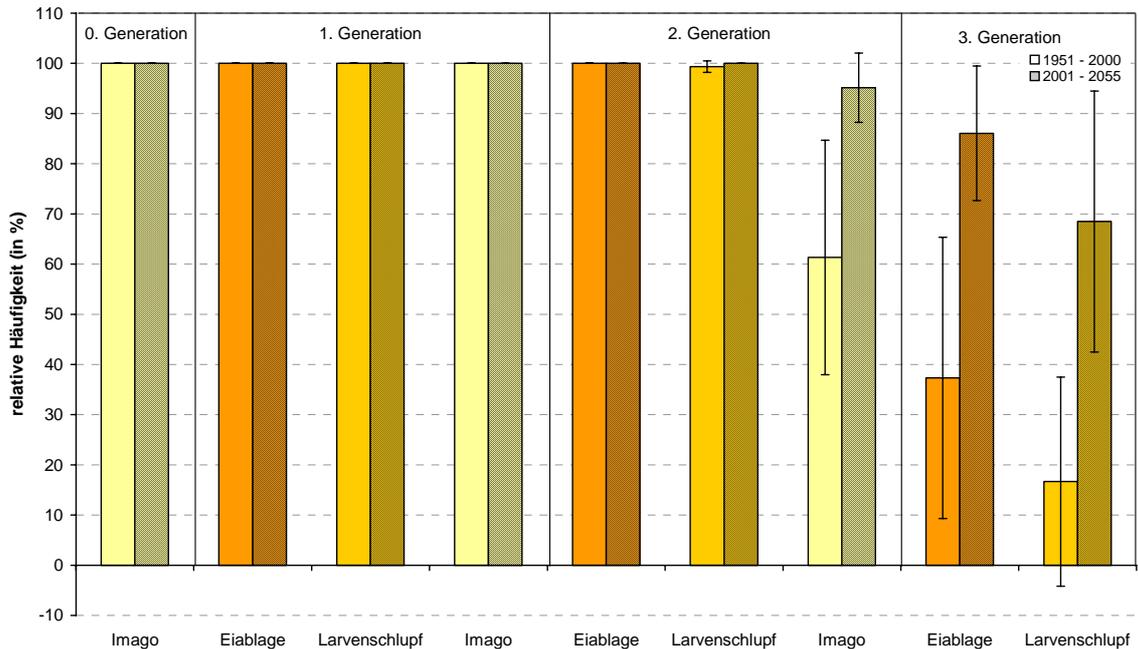


Abb. 4.10: Anzahl der Jahre, in denen für die phänologischen Ereignisse Eiablage, Larvenschlupf und Imago günstige klimatische Voraussetzungen vorliegen. Gegeneinander gestellt sind die Simulationsergebnisse für die Vergangenheit (1951-2000) und die Zukunft (2001-2055)

Tab. 4.6: Häufigkeit der auftretenden phänologischen Ereignisse und Generationen des Apfelwicklers, Angaben in Anzahl und relativer Häufigkeit der betroffenen Jahre

Generation	Entwicklungsstadium	1951-2000		2001-2055	
		Anzahl der Jahre (Mittelwerte, n = 4)	%	Anzahl der Jahre (Mittelwerte, n = 4)	%
vorjähr. Generation	Imago	50	100	55	100
1. Generation	Eiablage	50	100	55	100
	Larvenschlupf	50	100	55	100
	Imago	50	100	55	100
2. Generation	Eiablage	50	100	55	100
	Larvenschlupf	49.75 (± 0.5)	99	55	100
	Imago	28.25 (± 10.7)	61	52 (± 3.2)	95
3. Generation	Eiablage	15.25 (± 13.3)	37	46.25 (± 6.4)	86
	Larvenschlupf	12.5 (± 10.6)	17	35 (± 12.8)	68

Für den Szenariumszeitraum ist in der dritten Generation eine Entwicklung bis zur L<sub>1</sub>-Larve mit günstigen Temperaturverhältnissen in 68% der Jahre deutlich wahrscheinlicher. Allerdings ist dieses Niveau immer noch nicht ausreichend um L<sub>5</sub>-Larven mit einer

Wahrscheinlichkeit von mehr als 50% zu entwickeln. Es kann demnach zwar mit einer zunehmenden Wahrscheinlichkeit für das Auftreten dritter Generationen gerechnet werden, diese wird aber auch bei dem postulierten Temperaturanstieg nur sporadisch zu beobachten sein.

Insgesamt geben die durchgeführten Simulationsergebnisse Hinweise auf eine Veränderung in der Populationsentwicklung von *C. pomonella*. Höhere Temperaturen begünstigen die Entwicklung zweiter Generationen des Apfelwicklers und damit den Aufbau einer individuenstärkeren Gesamtpopulation. Die Bekämpfungsnotwendigkeit durch Maßnahmen des integrierten Pflanzenschutzes wird sich damit erhöhen.

## 4.6 Weinbau

### 4.6.1 Einleitung

Baden-Württemberg hat etwa 27.000 ha Rebflächen. Davon liegen rund 15.900 ha in Baden, dem südlichsten und klimatisch günstigstem Weinanbaugebiet in Deutschland. Weinbaubereiche in Baden sind: Bergstraße, Bodensee, Breisgau, Kaiserstuhl, Kraichgau, Markgräflerland, Ortenau, Tauberfranken sowie Tuniberg. Angebaut werden die folgenden Rebsorten: Grauburgunder, Ruländer, Müller-Thurgau, Bacchus, Gutedel, Kerner, Klingelberger, Scheurebe, Muskateller, Nobling, Riesling, Weißburgunder, Spätburgunder, Gewürztraminer und Badisch Rotgold (Rotling).

Das zweite Weinanbaugebiet Württemberg hat etwa 11.500 ha und erstreckt sich zwischen dem nördlichen Bereich Kocher-Jagst-Tauber in Franken entlang dem Neckartal über Heilbronn und Stuttgart bis Reutlingen sowie einem kleinen Bereich am Bodensee. Im Jahre 2002 erreichte der "Württemberg" einen Anteil von 12% an der deutschen Weinerzeugung. Der Wein aus Württemberg ist berühmt für seine Rotweinlagen. Die häufigsten Rebsorten sind Trollinger und Riesling.

Obwohl Weinreben überall zwischen Tropen und Polarkreis wachsen, werden gute Weine nur in einem relativ engen Klimagürtel produziert, der auf der nördlichen Hemisphäre etwa zwischen dem 40 und 50 Breitengrad liegt. Zu heiße und zu kalte Klimate sind der Qualität von Wein gleichermaßen abträglich. Der Weinbau hat folgende klimatische Anforderungen: Die Dauer der Vegetationsperiode zwischen Austrieb und Abwerfen der Blätter liegt zwischen 180 und 250 Tagen. Die mittlere Lufttemperatur liegt zwischen 9 und 21 °C, im Winter bei 0 °C und im Sommer bei 20 °C. Für Weißweine ist der Bereich des Jahresmittels der Lufttemperatur von 9,5-11,5 °C optimal, Rotweine brauchen es etwas wärmer, zwischen 10,5-13 °C. Die Sonne sollte mindestens 1.500-1.600 Stunden pro Jahr scheinen (optimal sind 1.800-2.000 h/a). Beim Niederschlag sind etwa 480 mm/a günstig, zuviel ist eher schädlich (maximal ca. 700 mm/a). Vor diesem Hintergrund kann der Klimawandel zu positiven, aber auch negativen Auswirkungen auf den Weinbau führen, abhängig von Lage, Rebsorte und Weinbergmanagement. Die Untersuchungen, die auch in einem Projekt des Forschungsrings des Deutschen Weinbaus durchgeführt werden, haben das Ziel, geeignete Strategien für Winzer im Umgang mit den regionalen Besonderheiten der Klimaänderung zu entwickeln.

#### 4.6.2 Methode

Die Daten zur Verbreitung des Weinbaus in Baden-Württemberg und der Anbauverhältnisse für Rot- und Weißweinsorten im Jahre 2003 wurden vom Statistischen Landesamt Baden-Württemberg (2004) bezogen (siehe [Abbildung 4.11](#)).

Die Untersuchungen der Auswirkungen des Klimawandels auf den Weinbau in Baden-Württemberg konzentrieren sich auf exemplarische Studien zur Anbauwürdigkeit verschiedener Rebsorten mittels des Huglin-Index (*Huglin, 1978; 1986*). Der Huglin-Index ist eine Wärmesumme über Tagesmittel und Tagesmaximumwerte der Lufttemperatur im Zeitraum April bis September (siehe Glossar). Dieser Index kann als ein Indikator für Anbauwürdigkeit und Qualität verschiedener Rebsorten herangezogen werden (siehe [Tabelle 4.7](#)). Dabei repräsentieren höhere Werte die Anbauwürdigkeit für stärker wärme-liebende Reben und schließen im Allgemeinen Rebsorten niedrigeren Wärmebedarfs mit ein.

*Tab. 4.7: Zuordnung ausgewählter Rebsorten zum Wärmesummenindex H nach Huglin (Huglin 1978, 1986).*

Huglin-Index H	Ausgewählte anbauwürdige Rebsorten
$H \leq 1500$	kein Anbau empfohlen
$1500 < H \leq 1600$	Müller-Thurgau
$1600 < H \leq 1700$	Pino blanc, Gamay noir
$1700 < H \leq 1800$	Riesling, Chardonnay, Sylvaner, Sauvignon blanc, Pinot noir
$1800 < H \leq 1900$	Cabernet franc, Spätburgunder
$1900 < H \leq 2000$	Chenin blanc, Cabernet Sauvignon, Merlot
$2000 < H$	Ugni blanc, Grenache, Syrah, Carrignan, Aramon

Zur Berechnung der flächendeckenden Indizes wurden die Temperaturen aus Basis-szenarium (1951-2000 AD) und Zukunftsszenarium (2001-2055) herangezogen. Die so berechneten Indizes beschreiben die mittleren regionalen Temperatursummen und sind nicht identisch mit den lokalen, im spezifischen Weinberg herrschenden Verhältnissen, die durch das dortige Mikroklima im Allgemeinen günstiger sind.

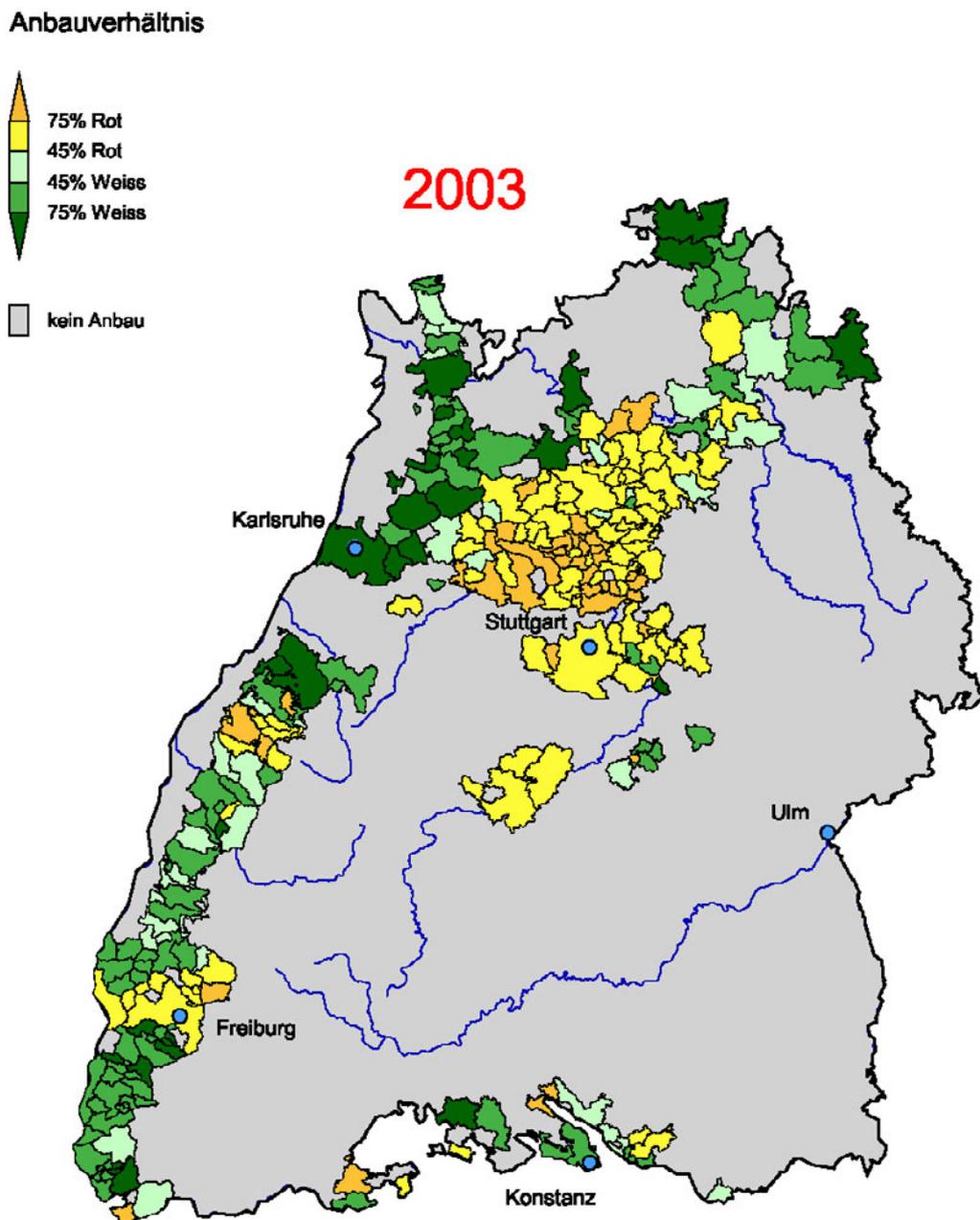


Abb. 4.11: Rebflächen in Baden-Württemberg 2003 nach der Belegenheit in den Weinbau-  
gemeinden (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2004)

### 4.6.3 Ergebnisse und Diskussion

In [Abbildung 4.12](#), [Abbildung 4.13](#) und [Abbildung 4.14](#) sind die 10-jährigen gleitenden Mittel des Huglin-Index der Dekaden 1961-1970, 1991-2000 und 2021-2030 dargestellt. Für die 60er Jahre zeigen die Indizes nur marginale Anbaumöglichkeiten entlang des Oberrheins und in Württemberg ([Abbildung 4.12](#)), im Wesentlichen beschränkt auf die niedrigsten zwei Klassen aus [Tabelle 4.7](#) mit einem eng begrenzten höherwertigen Gebiet im Bereich des Kaiserstuhls. Als bereits deutlich sichtbare Auswirkungen der Erwärmung während der 90er Jahre haben sich diese Gebiete ausgeweitet ([Abbildung 4.13](#): Nord- und Ostausbreitung, Aufstieg in höhere Lagen) und es wird der Anbau immer anspruchsvollerer Sorten möglich (bereits 5 Klassen mit deutlich wachsenden Flächenanteilen). Diese regionalen, aus dem Basisszenarium für die vergangenen Jahrzehnte ermittelten Verhältnisse müssen mit den lokalen, lagespezifischen Erfahrungswerten verglichen werden, um die Konsequenzen der zukünftig zu erwartenden Entwicklung abschätzen zu können.

Interessant erscheint dazu der Vergleich der unabhängig berechneten Huglin-Indizes für das Jahr 2000 ([Abbildung 4.13](#)) mit den realen Anbauverhältnissen zwischen Rot- und Weißweinsorten des Jahres 2003 ([Abbildung 4.11](#)). Die potentiellen Weinanbauggebiete werden von der räumlichen Verteilung der Huglin-Indizes wiedergegeben und sind in guter Übereinstimmung mit den realen Anbaugebieten auf Gemeindeebene. Allerdings unterscheiden sich die aus den unterschiedlichen Temperaturbedingungen zu erwartenden Verhältnisse zwischen Rot- und Weißweinanbau von der Realität. Erwartet würde ein höherer Rotweinanteil entlang des Rheins und dagegen ein höherer Weißweinanteil in Württemberg, es ist aber eher umgekehrt. Die oben genannten lokalen klimatologischen und lagespezifischen Besonderheiten können dies nicht erklären. Wesentlich ist hier die Tradition. Entlang des gesamten Rheins ziehen sich in Deutschland die traditionellen Weißweinanbaugebiete hin (Müller-Thurgau, Grauburgunder und "Deutscher Riesling"). Hier vertrauen die Winzer dem traditionellen An- und Ausbau sowie dem bisherigen Marktverhalten, auch wenn die klimatologischen Bedingungen einen zunehmenden Rotweinanteil möglich machen. Die Dominanz von Rotwein im Württembergischen entspricht ebenfalls der dort gewachsenen Tradition. Dabei werden landeseigene Sorten (z.B. die bekannten Sorten Trollinger, Lemberger und Schwarzriesling) bevorzugt kultiviert (*Johnson, 2002*).

Der in den 90er Jahren beobachtete Trend der Erwärmung setzt sich im 21. Jahrhundert fort (siehe [Abbildung 4.14](#)) und sollte damit in den nächsten Jahrzehnten die Bedingungen des Weinbaus in diesen Anbaugebieten und den Charakter der dort kultivierten und angebauten Weine nachhaltig beeinflussen. Es ist zu überlegen, inwieweit einer zunehmenden Erwärmung im badischen Weinbauggebiet An- und Ausbau traditioneller Sorten durch konservative Maßnahmen (z.B. Züchtung spätreifender Weißweinsorten) Rechnung getragen werden kann. Für das Anbaugebiet Württemberg scheinen die in den nächsten Jahrzehnten zu erwartenden klimatisch bedingten Änderungen eher vorteilhaft, sie lassen die Kultivierung der bisher bevorzugten und einen zunehmenden Anbau anspruchsvollerer Sorten erwarten.

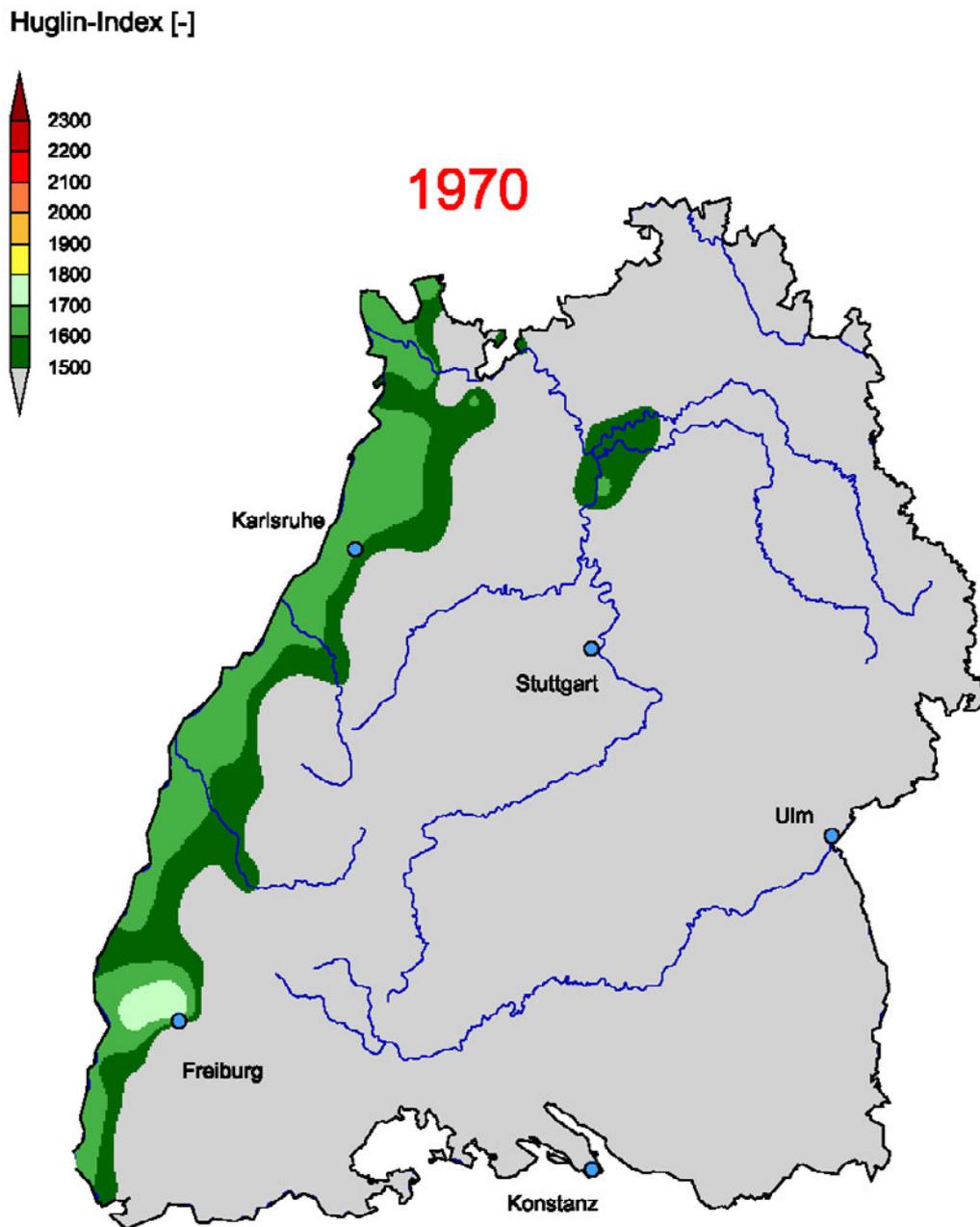


Abb. 4.12: Huglin-Index für Baden-Württemberg - zehnjähriger gleitender Mittelwert für die Dekade 1961-1970.

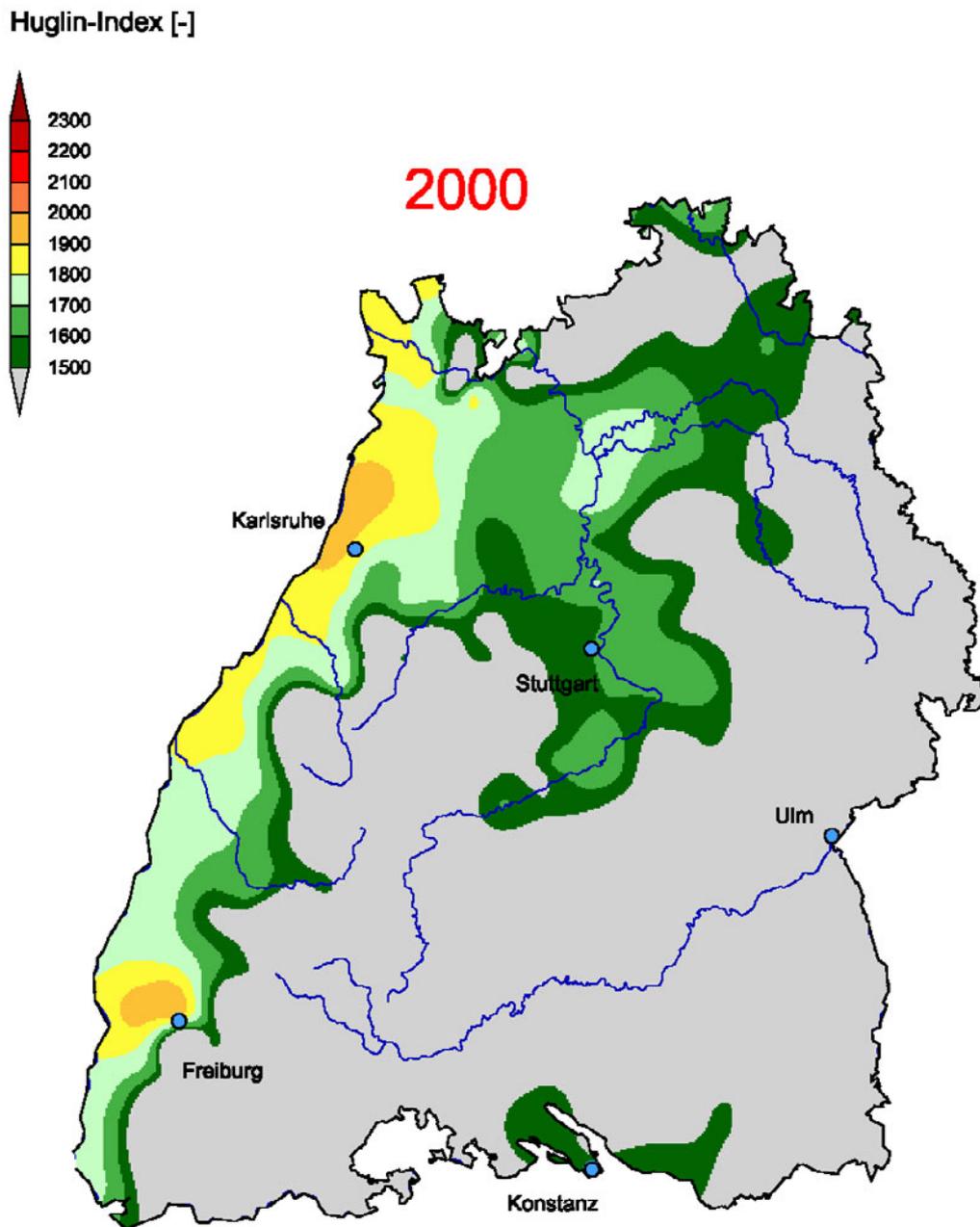


Abb. 4.13: Huglin-Index für Baden-Württemberg - zehnjähriger gleitender Mittelwert für die Dekade 1991-2000 AD

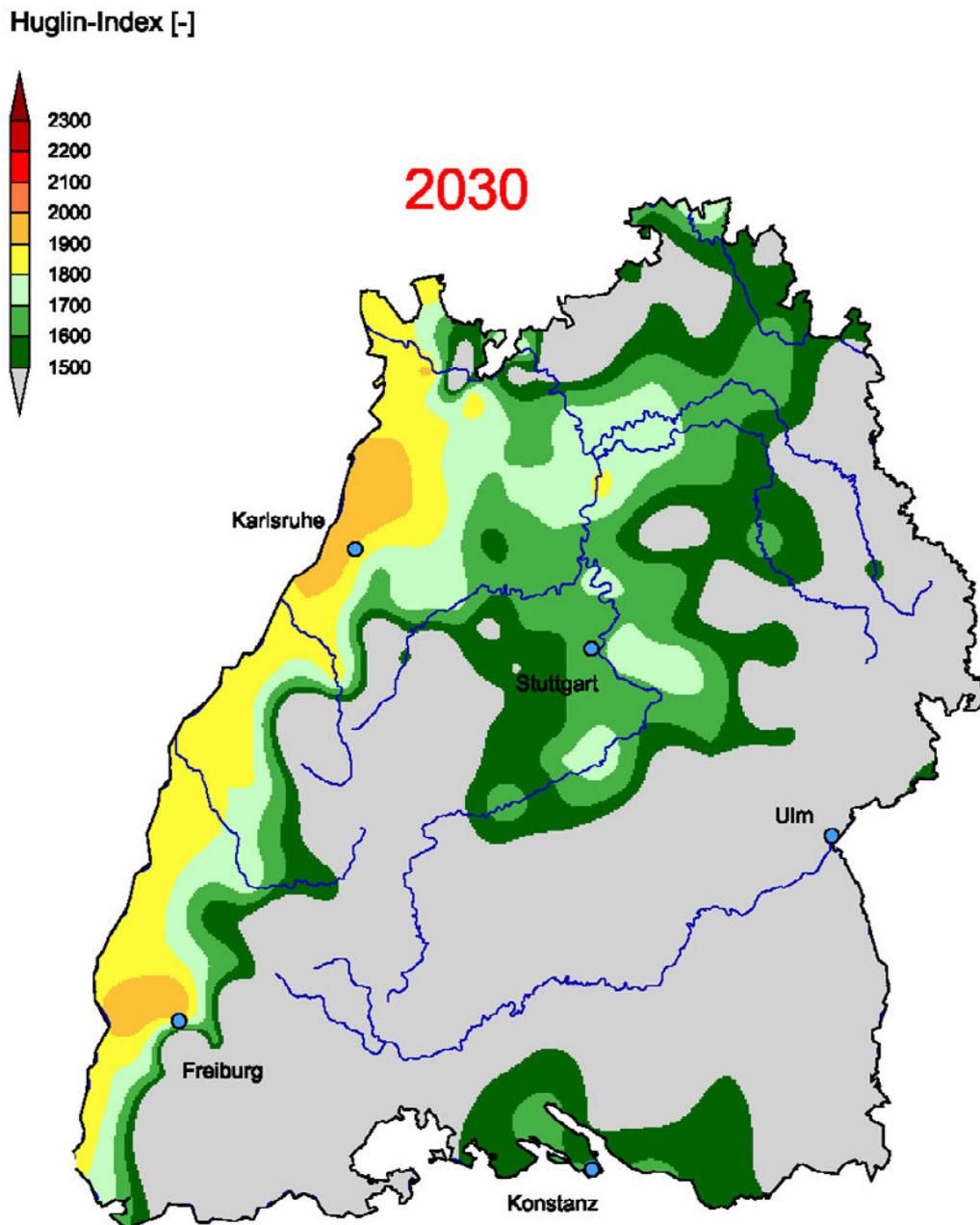


Abb. 4.14: Huglin-Index für Baden-Württemberg - zehnjähriger gleitender Mittelwert für die Dekade 2021-2030 AD

## 4.7 Ausblick

Die Ertragssimulationen für Weizen und Mais blieben aus pragmatischen Gründen zunächst auf ausgewählte Standorte beschränkt und haben den Effekt erhöhter atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen nicht implizit berücksichtigt. Eine Ausdehnung der Simulationen auf das gesamte Land bei impliziter Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Effektes ist vorgesehen.

Das Apfelschorf-Index-Modell sollte mit Daten aus der Bodenseeregion abgeglichen werden, die für diese Simulationsstudie nicht zur Verfügung standen. Eine Erweiterung des Modells um Module für die Askosporenreife und das Wetterlagen abhängige Flugverhalten der Sporen wäre zu überprüfen.

Um die Genauigkeit der Apfelwickler-Simulationen insbesondere bezüglich des zeitlichen Einsetzens und der Auftretswahrscheinlichkeit zweiter und dritter Generationen zu verbessern, sollte die Validierung der Entwicklungsintervalle für diese beiden Generationen mit Erfahrungswerten aus Österreich, Italien und Spanien fortgesetzt werden. Mögliche Wechselwirkungen mit der Phänologie des Apfelbaumes könnten in weiteren Untersuchungen noch genauer betrachtet werden. Thematisiert werden sollte dabei ein klimatisch bedingter, früherer Blüh- und Erntebeginn, mit dem die Pflanze der Generationsentwicklung des Schädling entgegen wirken könnte. Weitere biologische Mechanismen der endo- und exogenen Steuerung der Generationsentwicklung durch genetische Prädispositionen und biochemische Signale sind nicht auszuschließen und sollten in die weiterführende Untersuchungen mit einfließen.

Beim Weinbau ist daran zu denken, die Untersuchungen zum Temperatursummenindex lagenspezifischer aufzulösen. Dies sollte durch die Einbeziehung weiterer klimatischer Faktoren wie klimatische Wasserbilanz oder Blattfeuchte ergänzt werden, um in den im Rahmen des Projekts des Forschungsrings des Deutschen Weinbaus geplanten Dialogen mit Winzern und Weinbauexperten sinnvolle Anpassungsmaßnahmen einzugrenzen. Dabei ist auch der wahrscheinlich zunehmende Schaderregerdruck ähnlich wie beim Obstbau zu berücksichtigen.

## 5 FORSTSEKTOR

### 5.1 Zusammenfassung

Die hier vorgestellten Modellstudien zur Klimasensitivität dienen der Untersuchung einzelner Elemente der potenziellen Auswirkungen des klimatischen Wandels auf die Produktivität der Wälder in Baden-Württemberg. Mit Hilfe des Waldwachstumsmodells 4C wurden Simulationen für hypothetische Waldbestände unterschiedlichen Alters (Buche, Eiche, Fichte, Kiefer) unter den Klimaszenarien durchgeführt. Das untersuchte Zukunftsszenarium hat geringe Auswirkungen auf die Produktivität der untersuchten Waldbestände. Bedingt durch die auch im Zukunftsszenarium noch relativ hohen Niederschläge ist nicht zu erwarten, dass die Wälder regelmäßig unter Trockenstress geraten. Insgesamt ist die erwartete Produktivität der baden-württembergischen Wälder unter dem hier verwendeten Zukunftsszenarium bis zur Mitte des kommenden Jahrhunderts eher durch leicht positive Trends gekennzeichnet.

Neben Änderungen in Niederschlagsmenge und -saisonalität wirken Temperaturänderungen vermittelt über die Vegetationsperiodenlänge und den Verdunstungsanspruch der Atmosphäre auf den Wasserhaushalt. An den beiden untersuchten Intensivmessstellen (Level II Programm) führen die klimatischen Bedingungen (Klimadaten der FVA) des Extremjahres 2003 ähnlich wie 1997 zu einem Rückgang der Versickerung, ohne dass der pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat komplett ausgeschöpft wird. Damit ist die aktuelle Evapotranspiration vom Niederschlagsrückgang nicht beeinflusst.

Eine bisher schon beobachtete Auswirkung der Klimaerwärmung ist das frühere Eintreten phänologischer Phasen im Frühjahr. Unter den humiden klimatischen Bedingungen in Baden-Württemberg kann eine vollständige Umsetzung des Potenzials höherer Produktivität infolge früheren Blattaustriebs erwartet werden. Die Jahresproduktion steigt pro Tag früheren Austriebs um 0.5 bis 1% an.

Zu erwartende Änderungen im Waldbrandgeschehen aufgrund der klimatischen Waldbrandgefahr wurden quantifiziert. Die klimatische Waldbrandgefahr erhöht sich nur leicht in den Regionen Baden-Württembergs, die von einem Rückgang des Niederschlags betroffen sind (Südosten).

### 5.2 Einleitung

Die Arbeiten zur Klimasensitivität des Forstsektors wurden mit der FVA (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Prof. von Wilpert) abgestimmt und als Ergänzung zu den dort laufenden Forschungsarbeiten konzipiert.

Bezüglich der Level II Standorte (Beobachtungsflächen des EU Programms: The Intensive Monitoring of European Forest Ecosystems) wurde ein Datenaustausch vorgenommen. Die FVA stellte Daten zur Initialisierung von Rechnungen an den Beobachtungsstandorten und am Standort erhobene Klimadaten bereit. Auf Grundlage dieser Daten wurden an zwei gut untersuchten Standorten Analysen des Wasserhaushalts durchgeführt, um die Beziehungen zwischen den Wasserhaushaltskomponenten und den klimatischen Bedingungen darzustellen. Von besonderem Interesse für die Produktivität der Wälder ist die Wasserverfügbarkeit im Sommer, insbesondere im Extremsummer 2003.

Weiterhin wurden das Basis- und Zukunftsszenarium genutzt, um Untersuchungen zu Produktivität, Trockenstress und Waldbrandgefährdung durchzuführen. Im Vordergrund stand die Frage, wie sich die Produktivität der vier Hauptbaumarten unter einem erwarteten Klimawandel ändert.

Um die Auswirkungen von Klimaänderungen auf Wasserhaushalt und Waldwachstum zu beschreiben, wurde am PIK das Waldwachstumsmodell 4C entwickelt, das erfolgreich im Rahmen anderer Studien eingesetzt wurde (Lasch et al., 2002; Lasch et al., 2005). Daher ist dieses Modell geeignet, zur Beantwortung der hier aufgeworfenen Fragestellungen beizutragen.

### 5.3 Das Simulationsmodell 4C

#### 5.3.1 Einführung

Das Simulationsmodell 4C (**FORESEE - FORESt Ecosystems in a changing Environment**) beschreibt die Wachstumsdynamik von Waldbeständen, die entweder auf Basis von simulierter natürlicher Regeneration oder ausgehend von einem durch eine Forstinventur definierten Anfangszustand aufwachsen (Schaber et al., 1999; Suckow et al., 2001). Die Baumindividuen einer Art, die gleiches Alter und identische Baumdimensionen besitzen, sind in Kohorten zusammengefasst. Produktion und Wachstum werden für jede Kohorte berechnet. Die Konkurrenz der Kohorten um Licht, Wasser und Nährstoffe beeinflusst ihr Wachstum, ihre Mortalität und die Verjüngung im Bestand. Die Positionen der Individuen der Kohorten im Bestand sind nicht bekannt; es wird angenommen, dass die Bäume gleichmäßig auf der Bestandesfläche verteilt sind. Der Kronenraum des Bestandes ist in 0.5 m hohe Schichten eingeteilt.

#### 5.3.2 Wasser- und Nährstoffbilanzierung

Abbildung 5.1 beschreibt das prinzipielle Zusammenwirken der Teilmodelle zur Vegetations- und Bodendynamik in 4C.

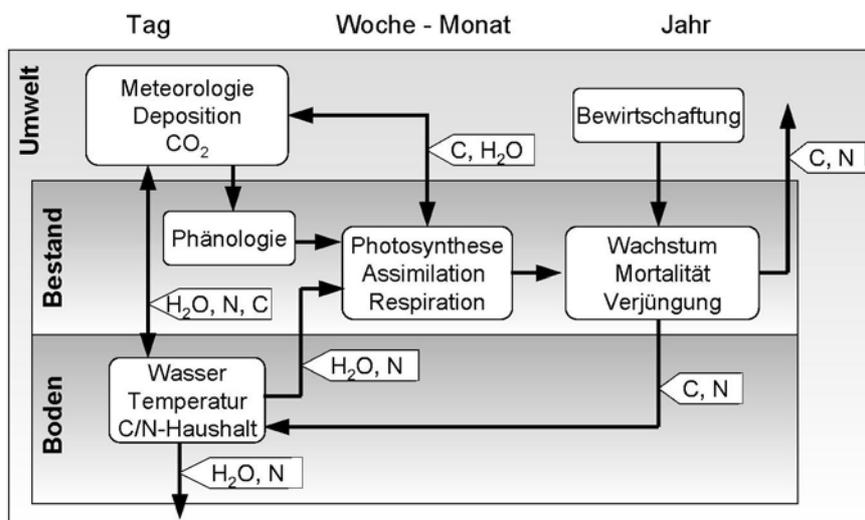


Abb. 5.1: Modellschema 4C

Das Wasser- und Nährstoffangebot wird in Abhängigkeit von Boden, Bestand und Wetter bilanziert (Grote et al., 1999). Nach Bilanzierung von Bestandesniederschlag und Wasserentzug wird der Bodenwasserhaushalt mit einem Versickerungsmodell berechnet (Glugla, 1969; Koitzsch, 1977), auf dessen Grundlage dann die aktuelle Bodentemperatur bestimmt wird. Bodenfeuchte und Bodentemperatur steuern die Umsatzgeschwindigkeit der Streu und der organischen Bodensubstanz und damit die Nährstoffverfügbarkeit (Grote & Suckow, 1998; Kartschall et al., 1990; Moorhead et al., 1996). Durch die jährliche Bilanzierung des Streufalls und die Zufuhr zum Bodenkompartment wird der Nährstoffkreislauf im System Pflanze - Boden geschlossen. Zusätzlichen Eintrag erhält das System durch Deposition, Verluste treten durch Auswaschung auf.

### 5.3.3 Assimilation und Allokation

Die photosynthetische Nettoassimilationsleistung wird nach einem Ansatz von Haxeltine & Prentice (1996) als Funktion von absorbiertem photosynthetisch aktiver Strahlung, Lufttemperatur sowie Bodenwasser- und Nährstoffverfügbarkeit berechnet. Die Produktion der einzelnen Kohorten ist artenspezifisch und abhängig vom Anteil der Kohorte an der vom Bestand absorbierten Strahlung. Aus der jährlichen Bruttoassimilationsleistung wird nach Abzug der Respiration das Wachstum der Kompartimente Feinwurzeln, Stamm, Blattwerk, sowie Äste und Grobwurzeln berechnet. Die Allokationskoeffizienten für die einzelnen Kompartimente werden dabei so bestimmt, dass sie einem vorgeschriebenen Verhältnis des Querschnitts der leitenden Gewebe im Holz zu den zu versorgenden Blattmassen und einer ausgewogenen Leistung des Aufnahmevermögens der Feinwurzeln und der Produktionskapazität der Blätter entsprechen (functional balance and pipe model theory, siehe z.B. Mäkelä, 1986). Zusätzlich gehen in die Bestimmung der Allokationskoeffizienten eine Höhenwachstumsfunktion ein, die vom relativen Lichtgenuss und dem Blattmassenzuwachs abhängig ist, sowie die zu ersetzenden Streuproduktionsflüsse. Die Kronenansatzhöhe wächst, wenn die Nettoproduktion der untersten Kronenschicht negativ wird. Damit sind die Baumdimensionen Höhe, Brusthöhendurchmesser und Kronenansatzhöhe im Modell berechenbar.

### 5.3.4 Phänologie

Das Modell enthält ein Modul zur Simulation des Blattaustriebstags der Buche, das mit dem phänologischen Datensatz des Deutschen Wetterdienstes parametrisiert wurde (Schaber & Badeck, 2003). Der Blattwurf wird anhand eines festen durchschnittlichen Datums bestimmt. Für die Laubbaumarten wurden die erforderlichen Parameter an Daten des DWD angepasst. Für die immergrünen Baumarten werden gegenwärtig im Modell noch keine phänologischen Stadien unterschieden.

### 5.3.5 Mortalität

Die Mortalität der Individuen innerhalb der Kohorten wird aus der Kohlenstoffbilanz bestimmt (stressbedingte Mortalität) oder nach einer vorgegebenen altersbedingten Mortalitätsrate. Beide Ansätze können auch kombiniert werden. Stressbedingte Mortalität tritt auf, wenn die Kohlenstoffbilanz über einen bestimmten Zeitraum negativ wird und daher z.B. die Blattmasse der Individuen einer Kohorte eines Jahres geringer ist als die des Vorjahres. Sie führt damit zur Verringerung der Individuenzahl bzw. zum vollständigen

Absterben der Kohorte. Die intrinsische artenspezifische Mortalität wird über ein maximales Alter der Baumart definiert (Botkin & Nisbet, 1992).

### 5.3.6 Regeneration und Management

Auf Bestandesebene können Verjüngungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen simuliert werden (Lasch et al., 2005). Die Verjüngung beschreibt das Aufwachsen von gepflanzten Setzlingen oder von Sämlingen, die jährlich in Abhängigkeit von Umweltbedingungen im Bestand aufkeimen können, in die Baumschicht.

Das Modell erlaubt die Simulation einer Vielzahl von Bewirtschaftungsvarianten, die durch die Kombination verschiedener implementierter Methoden möglich sind. Ein Bewirtschaftungsplan steuert die verschiedenen Eingriffe. In Abhängigkeit von der Bestandeshöhe werden Jungwuchspflege, Läuterung und Jungbestandespflege simuliert. Für die anschließenden Bestandeseingriffe kann Hoch- oder Niederdurchforstung gewählt werden. Die Durchforstung wird durch Durchforstungsstärke und Durchforstungsintervall beschrieben. Zur Ernte des Bestandes, gesteuert über die Umtriebszeit, ermöglicht das Modell den Kahlschlag mit anschließender Neuanpflanzung oder natürlicher Verjüngung oder einen Schirmschlag, ebenfalls kombiniert mit einer Unterpflanzung. Für die Pflanzung kann eine Artenspezifikation und Pflanzdichte vorgegeben werden. Die Generierung von Mischbeständen ist möglich. Der Bewirtschaftungsplan erlaubt damit auch langfristige Simulationen über mehrere Umtriebszeiten.

### 5.3.7 Parameter, Initialisierung und Triebkräfte

Die Artenzusammensetzung und die Bestandesstruktur können auf der Basis von Inventurdaten initialisiert werden. Die Kohorten werden dann entsprechend der gemessenen Verteilungen von Brusthöhendurchmesser sowie, falls vorhanden, Baumhöhe und Kronenansatzhöhe definiert. Weiterhin werden zur Initialisierung Daten zu Bodenstruktur, Kohlenstoff- und Stickstoffgehalten benötigt. Die Modellparameter für den Boden werden, soweit sie nicht explizit bestimmt wurden, über die Textur zugeordnet; alle anderen Parameter, im Prinzip immer artenabhängig, werden aus der Literatur bestimmt.

Als treibende klimatische Größen werden Tagesmittel bzw. -summen der Temperatur, des Niederschlags, der Luftfeuchte und der Strahlung benötigt, die wahlweise aus Messreihen eingelesen oder aus Monatswerten mit Hilfe eines Wettergenerators hergeleitet werden können. Außerdem wird eine Zeitreihe der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration und der Stickstoff-Deposition vorgegeben.

Das Modell liegt in einer ersten, hier umrissenen Ausbaustufe vor und wird an langen Zeitreihen von Dauerbeobachtungsflächen hinsichtlich der Bestandesdynamik getestet (Mäkelä et al., 2000; Schaber et al., 1999). Es ist gegenwärtig für die Baumarten Buche (*Fagus sylvatica* L.), Fichte (*Picea abies* L.), Kiefer (*Pinus sylvestris* L.), Eiche (*Quercus robur* L.) und Birke (*Betula pendula* Roth) parametrisiert.

Einzelne Komponenten des Waldwachstumsmodells 4C wurden für mehrere Baumarten an verschiedenen Standorten (v.a. an Level II Standorten in Brandenburg, Sachsen und Thüringen) validiert. Weiterführende Validierungen an Standorten in Baden-Württemberg konnten nicht durchgeführt werden, da die erforderlichen Daten (z.B. Bodenwassergehalt bzw. Tensionen, Bodentemperatur, N- und C-Gehalte, Streufallmessungen) noch

nicht zur Verfügung standen. Dies ist Gegenstand weiterer Zusammenarbeit mit der FVA.

## 5.4 Produktivität unter Klimawandel

### 5.4.1 Wasserhaushalt an ausgewählten Standorten

#### 5.4.1.1 Fragestellung

Auf der Grundlage der im Rahmen des von der EU getragenen Programms "Forstliches Umweltmonitoring" (Level II) erhobenen Datensätze lassen sich unter Nutzung eines Simulationsmodells einzelne Wasserhaushaltskomponenten detailliert untersuchen. Die Klimavariabilität in dem durch die Messdaten vorgegebenen Untersuchungszeitraum 1996-2003 ist auf Grund des trockenen Sommers 2003 geeignet, die Reaktion der Wasserhaushaltskomponenten auf klimatische Faktoren zu analysieren. Da Trockenstress je nach Dauer und Intensität die Produktivität der Waldbestände negativ beeinflusst, ist der verfügbare Bodenwassergehalt als Indikator für Trockenstressperioden von besonderem Interesse.

#### 5.4.1.2 Methode

Das Waldwachstumsmodell 4C beschreibt als Voraussetzung für die Simulation der Bestandesentwicklung den Wasserhaushalt im Waldbestand. Die potentielle Evapotranspiration wird im Modell nach *Priestley & Taylor (1972)* bestimmt und daraus für jede einzelne Baumkohorte ein Transpirationsbedarf abgeleitet. Der Bodenwasserhaushalt wird wie oben beschrieben mit einem Versickerungsmodell berechnet.

Für die Simulationen an den jeweiligen Standorten wird das Modell 4C mit den Informationen bezüglich Boden und Bestand initialisiert, wobei die Inventuren alle im Jahr 2000 durchgeführt wurden. Die am Standort von der FVA erhobenen Klimadaten dienen als Triebkräfte für das Modell und sind unterschiedlich lang. In dieser Studie wird der Simulationszeitraum 1996-2003 analysiert. [Tabelle 5.1](#) gibt einen Überblick über die hier untersuchten Level II Standorte.

Tab. 5.1: Übersicht über untersuchte Level II Standorte

	Heidelberg	Ochsenhausen
Plot-Nummer	802	808
Höhe über NN [m]	505	657
durchschnittliche Jahrestemperatur [°C] 1996-2003	7.2	8.4
Jahresniederschlag [mm] 1996-2003	1093	1171
Baumart	Fichte	überwiegend Fichte
Bodentyp	Podsol-Braunerde	Parabraunerde
nutzbare Feldkapazität bis 1 m [mm]	146	182
Blattflächenindex	5.9	5.8

### 5.4.1.3 Resultate

Die beiden Standorte Heidelberg und Ochsenhausen unterscheiden sich deutlich in ihren klimatischen Bedingungen (vgl. [Tabelle 5.1](#)). Obwohl die beiden Fichtenbestände vergleichbar sind und die Interzeption an beiden Standorten ähnlich hoch ist, spiegeln sich die klimatisch bedingten Unterschiede in der Tiefensickerung in 1m Tiefe wieder ([Abbildung 5.2](#)). Abgesehen vom Jahr 2002, in dem in Ochsenhausen 1588 mm Niederschlag fielen und demzufolge auch eine hohe Sickerrate auftrat, liegen die Sickerwasserausträge in 1 m Tiefe in Ochsenhausen unter denen von Heidelberg. Das liegt vor allem an der höheren Verdunstung, die auf die höhere Temperatur zurückzuführen ist.

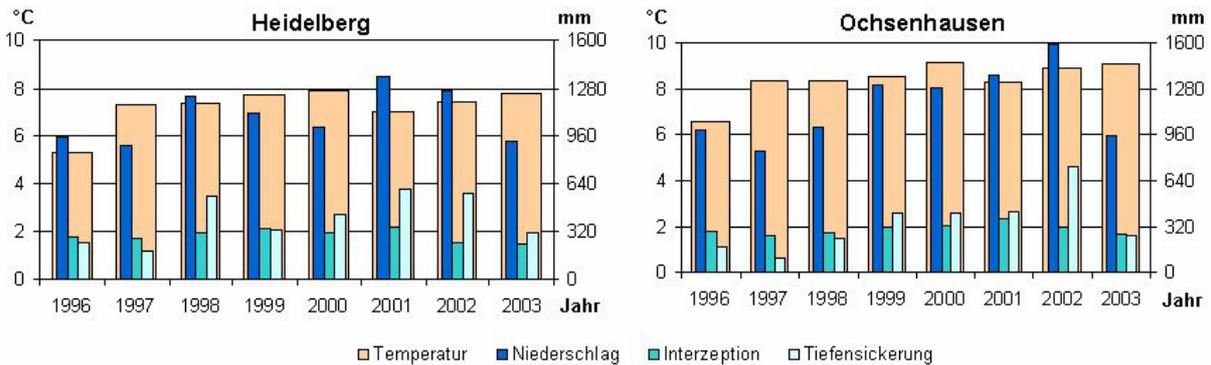


Abb. 5.2: Jahressummen des Niederschlags, der Interzeption und der Versickerung in 1 m Tiefe sowie Jahresmittel der Lufttemperatur für Heidelberg und Ochsenhausen, 1996-2003

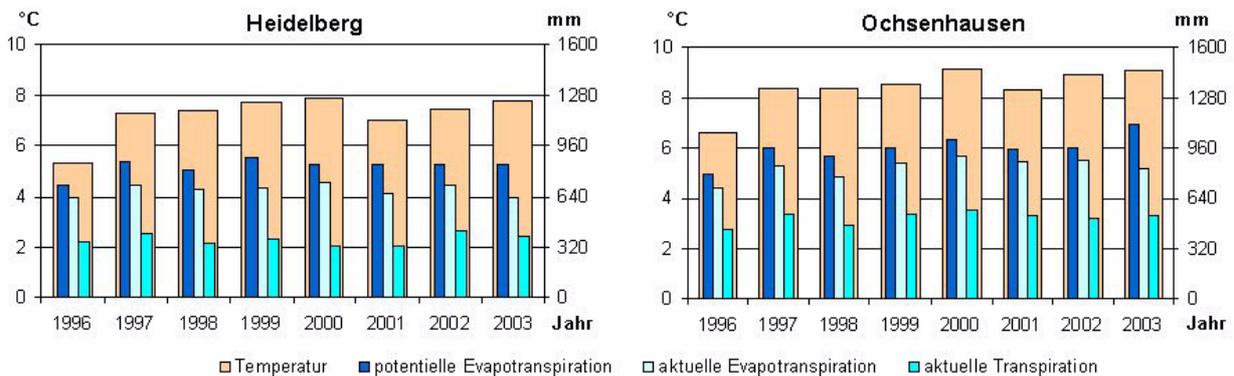


Abb. 5.3: Jahressummen der potentiellen und aktuellen Evapotranspiration, der aktuellen Transpiration sowie Jahresmittel der Lufttemperatur für Heidelberg und Ochsenhausen, 1996-2003

Aus [Abbildung 5.3](#) ist zu erkennen, dass die potentielle Evapotranspiration zwar von der Lufttemperatur abhängig ist, die dadurch gesteuerte aktuelle Evapotranspiration aber nur noch in geringem Maß vom Niederschlag abhängt. Noch deutlicher wird das in [Abbildung 5.4](#), wo die aktuelle Evapotranspiration über den Niederschlag aufgetragen wurde. Bedingt durch die hohen Niederschläge steht an beiden Standorten ausreichend

Wasser zur Verfügung (Abbildung 5.5), um insbesondere die Transpirationsansprüche zu befriedigen. Im Gegensatz dazu geht die Versickerung mit abnehmendem Niederschlag zurück, so dass in den Jahren 1997 und 2003 mit den niedrigsten Niederschlägen im Beobachtungszeitraum auch die geringsten Sickerwasserausträge in 1 m Tiefe zu verzeichnen sind (Abbildung 5.2).

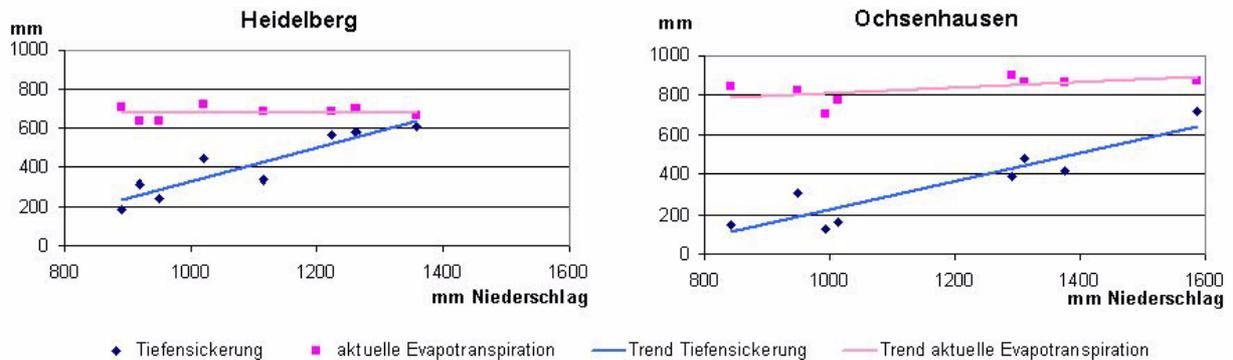


Abb. 5.4: Abhängigkeit der Versickerung und der aktuellen Evapotranspiration vom Niederschlag für Heidelberg und Ochsenhausen

Der pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt in Abbildung 5.5 zeigt die erwartete Dynamik mit Ausschöpfungsphasen im Sommer und den Auffüllphasen im Herbst/Winter. Auch in den Sommermonaten wird der Wasservorrat in den obersten 45 cm nie vollständig ausgeschöpft, so dass noch eine Reserve vorhanden ist und man annehmen kann, dass auch Niederschläge unter 800 mm pro Jahr vom Wald ohne Wasserstress verkräftet werden können. Die relativ geringen Niederschläge 2003 und deren Verteilung führen aber in Ochsenhausen dazu, dass der Bodenwasserspeicher nur langsam wieder aufgefüllt wird und ähnlich wie 1997 zum Jahresende noch nicht so weit wie in anderen Jahren gefüllt ist.

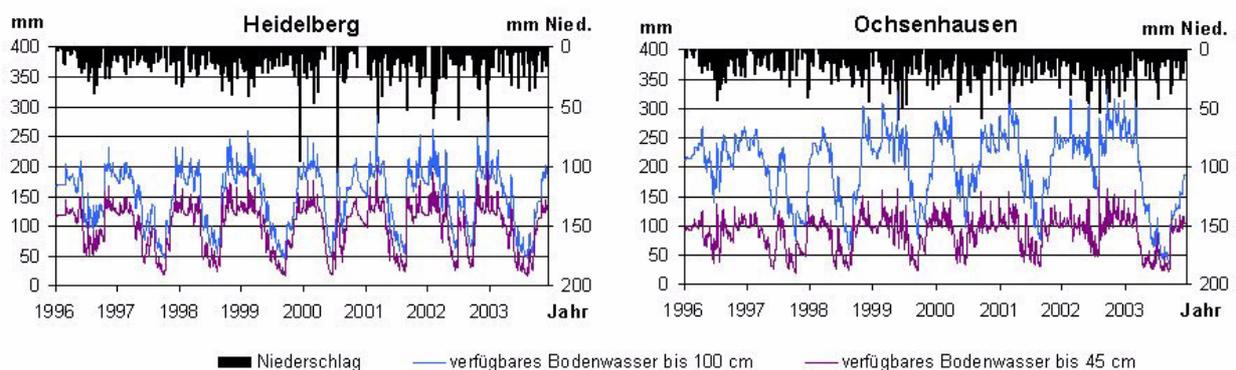


Abb. 5.5: Verfügbares Bodenwasser in 45 cm und 1 m Tiefe sowie Niederschlag für Heidelberg und Ochsenhausen, 1996-2003

Deutlich ist in Heidelberg die Wirkung von längeren niederschlagsfreien Zeiträumen im Jahr 2000 mit einem starken Abfall des Bodenwassergehalts bis 1 m Tiefe und dem sprunghaften Anstieg bei Starkregen zu erkennen. Das zeigt, dass bei der Beurteilung

der Wasserverfügbarkeit die saisonale Verteilung der Niederschläge eine wichtige Rolle spielt.

Im Unterschied zu Heidelberg hat der pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt in Ochsenhausen in 45 cm Tiefe eine geringere Dynamik, wobei auch das Niveau des Bodenwasservorrats geringer ist. Auf Grund der höheren nutzbaren Feldkapazität bis 1 m Tiefe ist aber der Bodenwasservorrat im Winter höher und bietet so die Voraussetzung für eine höhere Transpirationsleistung.

## **5.4.2 Produktivität und Vegetationsperiodenlänge**

### **5.4.2.1 Fragestellung**

Anknüpfend an die Beobachtung, dass ein früherer Blattaustrieb im Frühjahr in Deutschland und vergleichbaren Gebieten mit temperierten Wäldern zu einem Zugewinn an Tagen mit hoher Sonneneinstrahlung führt, wurde postuliert, dass Zugewinne in der Größenordnung von 0.5 bis 1% der Jahresproduktion pro Tag früheren Austriebs zu erwarten sind (*Kramer, 1995; White et al., 1999; Leinonen & Kramer, 2002; Schaber, 2002*). Auch Messungen der interannuellen Variation des Nettoökosystemaustauschflusses in laubabwerfenden borealen Wäldern im Frühjahr wurden zur Unterstützung dieser Hypothese herangezogen (*Black et al., 1996*). Die Relevanz des Frühjahrsaustriebs wurde allerdings auf Basis anderer empirischer Untersuchungen auch in Frage gestellt (*White et al., 2003*). Unsere Hypothese ist, dass der Austriebseffekt unter nicht wasserlimitierten Bedingungen zum Tragen kommt, während er in wasserlimitierten Waldsystemen fast verschwindet.

### **5.4.2.2 Methode**

Mit dem Modell 4C wurden Simulationsstudien durchgeführt, um den Einfluss des Blattaustriebsdatums von laubabwerfenden Baumarten auf die Produktivität zu analysieren. Jeweils drei Standorte in Baden-Württemberg (Wilhelmsfeld, Mudau-Schlossau, Oberried-St. W.) und in Brandenburg (zum Vergleich in einem stärker kontinental geprägten Klima, Potsdam, Cottbus, Lindenberg) wurden untersucht. Als Triebkräfte wurden Wetterzeitreihen nach dem Basisszenarium (1951-2000) und dem Zukunftsszenarium (wie in anderen Berichtsteilen beschrieben) für Baden-Württemberg sowie nach den analogen Szenarien für Brandenburg (*Gerstengarbe et al., 2003*) eingesetzt. Simuliert wurde der Gasaustausch für einen Buchenbestand, für den Bestandesstruktur und Biomassekompartimente in jedem Jahr gleich gehalten wurden, um die Wechselwirkungen mit Bestandeswachstum und Populationsdynamik auszuschließen.

### **5.4.2.3 Resultate**

Die simulierte Nettoproduktion für den Zeitraum 1951-2000 zeigte eine deutlich unterschiedliche Korrelation mit dem Austriebsdatum in Baden-Württemberg und Brandenburg (siehe [Tabelle 5.2](#), [Abbildung 5.6](#)). Die Änderung der jährlichen Nettoprimärproduktion je Tag Änderung im Austrieb war mit Werten zwischen 201 und 214 kg Trockenmasse pro Hektar in Baden-Württemberg deutlich höher als in Brandenburg (55 bis 113 kg TM / ha). Auch die durch den Phänologieeffekt erklärte Fraktion der totalen Varianz in der Jahresproduktion war an den baden-württembergischen Standorten deutlich höher (36 bis 42%) als an den brandenburgischen (3 bis 11%).

Tab. 5.2: Nettoprimärproduktion in Abhängigkeit vom Austriebtag

	Änderung der Produktion pro Tag späterem Austrieb (kg DM ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> ) d <sup>-1</sup>	Bestimmtheitsmaß
<b>Baden-Württemberg</b>		
Mudau-Schlossau	-214	0.41
Wilhelmsfeld	-203	0.36
Oberried-St. W.	-201	0.42
<b>Brandenburg</b>		
Potsdam	-55	0.03
Cottbus	-107	0.08
Lindenberg	-113	0.11

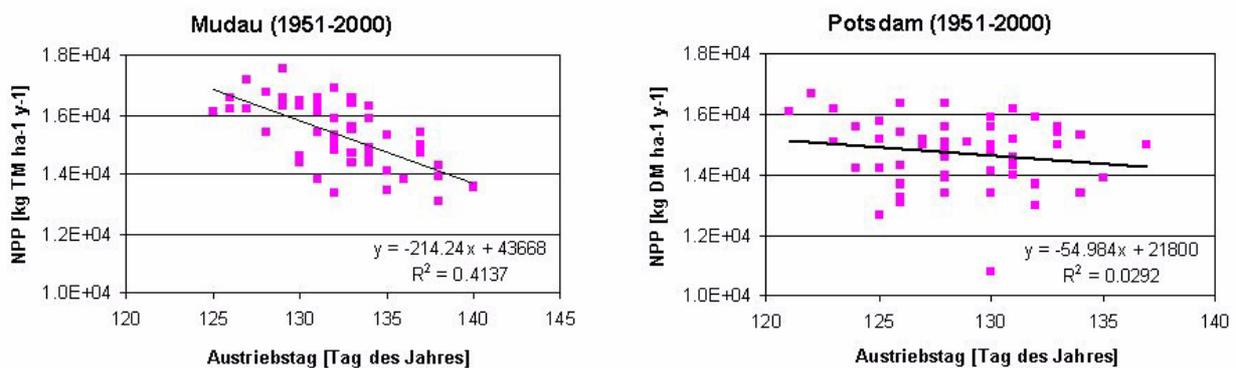


Abb. 5.6: Nettoprimärproduktion in Abhängigkeit vom Austriebtag (1951-2000)

Eine Kompensation des Zugewinnes infolge früheren Austriebs durch früheres Eintreten der Reduktion der Photosynthese unter limitierender Wasserverfügbarkeit ist somit wahrscheinlich die Ursache der unterschiedlich starken Korrelation zwischen Produktion und Phänologie des Blattaustriebs in Baden-Württemberg und Brandenburg. Um diesen Zusammenhang zu bestätigen, wurde die Wasserspeicherkapazität des zur Simulation am Standort Mudau verwendeten Bodens sukzessive verringert. Die Korrelation zwischen Austriebtag und Produktion nimmt dann monoton ab.

Um die Ursachen der Variation in der Nettoprimärproduktion (NPP) noch weiter einzugrenzen, wurde die Änderung der Nettoprimärproduktion in zwei Abschnitten der Vegetationsperiode getrennt berechnet. Der erste Abschnitt (Periode 1) umfasst die Periode zwischen dem mittleren Austriebtag (für die Jahre 1951-2000) am Standort und dem Austriebtag im konkreten Jahr. Der zweite Abschnitt (Periode 2) umfasst den Rest der Vegetationsperiode bis zum Ende der photosynthetischen Aktivität. Die prozentuale Änderung der Jahres-NPP infolge früheren oder späteren Austriebtags und infolge unterschiedlicher Produktion innerhalb des zweiten Abschnitts der Vegetationsperiode

wurde relativ zur Jahres-NPP für die Simulation mit mittlerem Austriebstag bestimmt. In Cottbus wie auch in Wilhelmsfeld (Abbildung 5.7) resultierten ähnlich große Änderungen pro Tag früheren oder späteren Austriebs (zwischen 0.5% und 1%). Während jedoch für Wilhelmsfeld im zweiten Abschnitt der Vegetationsperiode nur minimale Variationen der NPP errechnet wurden, die nicht mit dem Austriebstag korrelieren, ergab sich für Cottbus eine deutliche Abnahme der NPP mit früherem Austriebstag. Dieses Ergebnis bestätigt die Hypothese der reduzierten Wasserverfügbarkeit bei früherer Absenkung der Bodenwasserressourcen infolge früheren Blattaustriebs an trockenen Standorten.

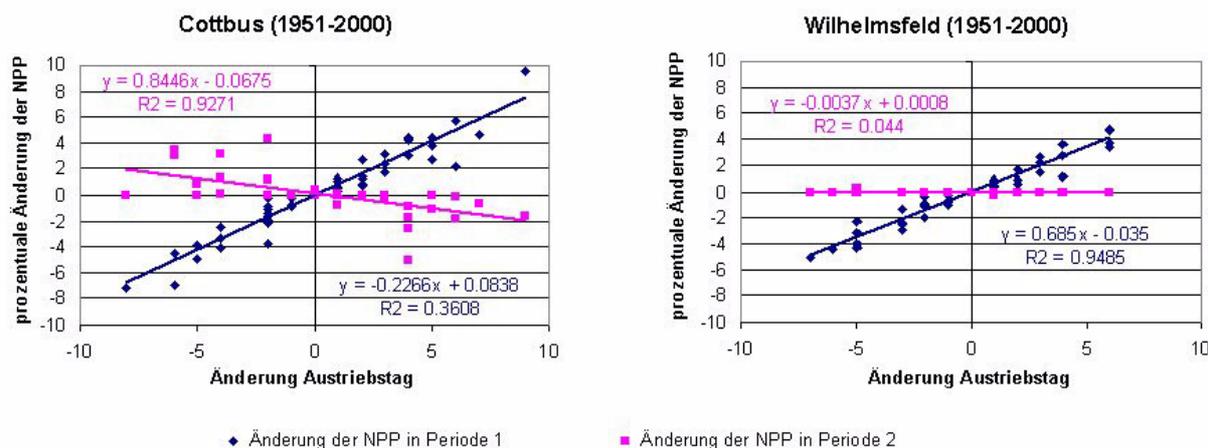


Abb. 5.7: Prozentuale Änderung der Nettoprimärproduktion (NPP) mit dem Austriebstag relativ zur Produktion im gleichen Jahr bei mittlerem Austriebstag. Positive Differenzen des Austriebs-tags = früherer Austrieb, negative = späterer Austrieb  
 Periode 1: aktueller Austriebstag bis mittlerer Austriebstag  
 Periode 2: restlicher Abschnitt bis zum Ende der Vegetationsperiode

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass unter den humiden klimatischen Bedingungen in Baden-Württemberg eine vollständige Umsetzung des Potenzials höherer Produktivität infolge früheren Blattaustriebs erwartet werden kann. Die Jahresproduktion steigt um zwischen 0.5 und 1% pro Tag früheren Austriebs an. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieser Effekt schon in die Zuwachsgewinne der letzten Jahrzehnte eingegangen ist, bei allgemeinem Trend zu zunehmend früherem Blattaustrieb (siehe Ergebnisse des KLIWA-Projektes, Abschlussbericht 2002) und bei weiterer Klimaerwärmung auch in den nächsten Jahrzehnten zu verzeichnen sein wird.

### 5.4.3 Wachstumstrends

#### 5.4.3.1 Fragestellung

Zur Abschätzung von Wachstumstrends der wichtigsten Baumarten unter Klimawandel in Baden-Württemberg wurde in Zusammenarbeit mit Jeanette Meyer vom EFI (European Forest Institute, Joensuu, Finnland) eine Modellstudie an den Standorten der Klimastationen durchgeführt. Es sollte untersucht werden, wie sich die Produktivität der vier Hauptbaumarten unter einem erwarteten Klimawandel entwickelt.

### 5.4.3.2 Methode

Für die Untersuchungen wurden die Baumarten Fichte, Buche, Kiefer, Eiche gewählt. Unter Verwendung von Ertragstafeln wurden 12 Forstbestände für die Simulation mit 4C erzeugt (siehe [Tabelle 5.3](#)). Die Auswahl dieser Bestände erfolgte in Anlehnung an die Altersklassenverteilung der Forstbestände in Baden-Württemberg von 1990 (nach Daten am EFI).

Tab. 5.3: Modellbestände für 4C-Simulationen in Baden-Württemberg

Nummer	Baumart	Alter
1	Fichte	20
2	Fichte	35
3	Fichte	45
4	Fichte	60
5	Fichte	80
6	Kiefer	50
7	Kiefer	80
8	Buche	40
9	Buche	60
10	Buche	90
11	Eiche	50
12	Eiche	100

Der am häufigsten vorkommende Bodentyp in Baden-Württemberg ist Braunerde - Terra fusca, der entsprechend dem Referenzprofil der Wald-BÜK 1000 (*Daten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR, Hannover, 2004*) parametrisiert wurde.

Mit diesem Bodentyp wurden für jeden der zwölf generierten Forstbestände an allen Klimastationen Simulationen mit dem Basisszenarium 1951-2000 (Basisszenarium) und dem Zukunftsszenarium 2001-2050 über 50 Jahre durchgeführt.

Für jeden Bestand an jeder Klimastation wurden nach der Simulation unter den beiden Klimaszenarien ein Produktivitätsindex berechnet, indem das langjährige Mittel der simulierten Nettoprimärproduktion (NPP) unter dem Zukunftsszenarium durch die mittlere NPP unter dem Basisszenarium dividiert wurde.

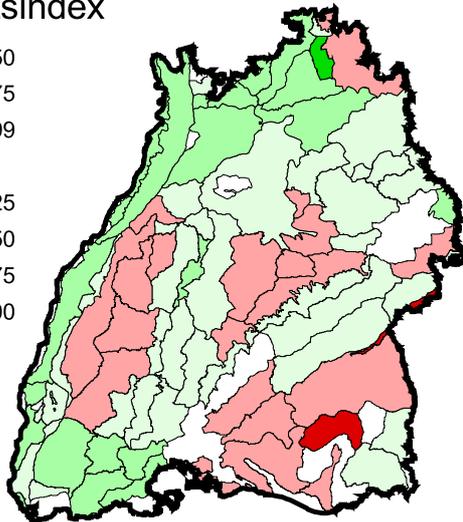
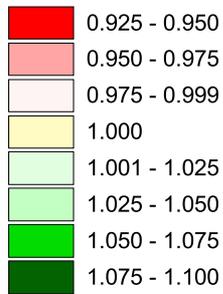
Weiterhin wurde an jeder Klimastation für jeweils einen Fichten-, Buchen- und Kiefernbestand ein jährlicher Trockenstressindex berechnet, der aus Wasserangebot und Wasserbedarf, gewichtet mit der Produktivität (NPP) des Bestandes ermittelt wird. Liegt kein Trockenstress vor, ist der Wert des Index 1, maximaler Trockenstress wird durch Null angezeigt.

### 5.4.3.3 Resultate

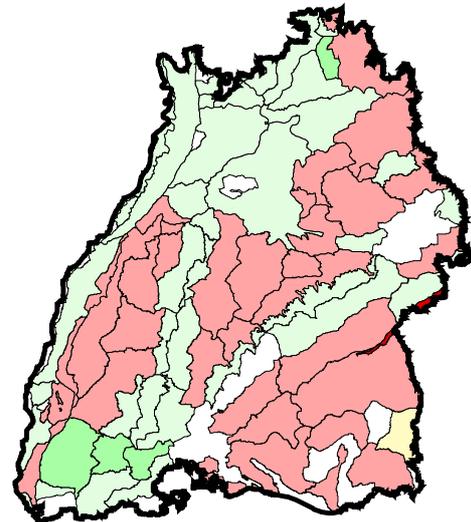
Im Folgenden wird der oben definierte Produktivitätsindex für vier Modellbestände (Fichte - 4, Kiefer - 7, Buche - 10, Eiche - 12, siehe [Tabelle 5.3](#)) flächendeckend für forst-

liche Wuchsgebiete dargestellt. Dazu wurden alle Daten an den Standorten der Klimastationen, die in einem Wuchsgebiet liegen, gemittelt (siehe [Abbildung 5.8](#)).

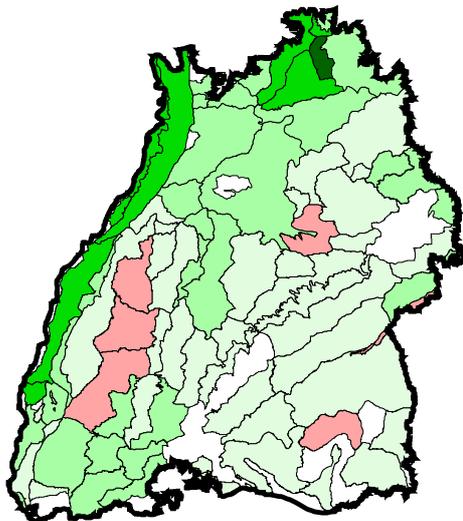
Produktivitätsindex



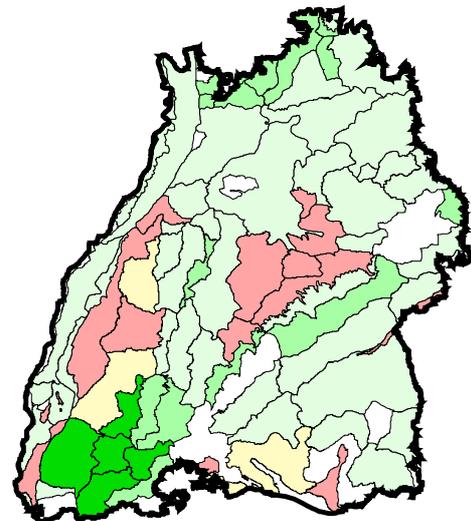
Fichte



Buche



Kiefer



Eiche

Abb. 5.8: Produktivitätsindex für Fichte, Buche, Kiefer und Eiche

Der Produktivitätsindex zeigt an, dass sich unter dem Zukunftsszenarium die Produktivität für Kiefer in fast allen Wuchsgebieten leicht verbessert. Für die Fichte verbessern sich die Produktivität vor allem im Westen und Nordwesten Baden-Württembergs, während sie im Südosten leicht zurückgeht. Eiche zeigt im Südwesten und Nordwesten leichte Produktivitätsgewinne und im Gebiet des Schwarzwalds kaum Veränderungen

der Produktivität. Für Buche können die geringsten positiven Veränderungen der Produktivität festgestellt werden, insbesondere im Südosten treten leichte Rückgänge auf.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Zukunftsszenarium vorwiegend positive Auswirkungen auf die Produktivität der untersuchten Baumarten hat, unter der Annahme, dass an allen Standorten der gleiche Bodentyp vorherrscht. Die Reaktionen der vier Baumarten sind nur geringfügig verschieden. Im Südosten Baden-Württembergs, wo es zu Rückgängen im Niederschlag unter dem Zukunftsszenarium kommt (siehe [Kapitel 2 Klima](#)), kann es zu leichten Einbußen der Produktivität für alle Baumarten, insbesondere aber Buche und Fichte, kommen.

Der berechnete Trockenstressindex wurde an allen Stationen über den Gesamtzeitraum von jeweils 50 Jahren gemittelt. In [Tabelle 5.4](#) sind die Mittelwerte, Minima und Maxima über alle 245 Stationen angegeben. Der Trockenstress ist unter heutigem Klima im Mittel sehr gering (0.94-0.96). Für Buchenbestände gibt es offensichtlich an einigen Standorten klimatische Bedingungen, unter denen der Trockenstress unter heutigem Klima etwas höhere Werte annimmt (z. B. Pforzheim: 0.82, Mergentheim: 0.85).

Unter dem Zukunftsszenarium nimmt der Trockenstress für die drei Baumarten leicht ab, d.h. die guten klimatischen Wachstumsbedingungen verbessern sich noch im Mittel über alle Stationen.

Tab. 5.4: Mittlerer Trockenstressindex über 245 Standorte

	1951-2000			2001-2050		
	Mittel	Min.	Max.	Mittel	Min.	Max.
<b>Fichte</b>	0.95	0.86	1.00	0.96	0.88	1.00
<b>Buche</b>	0.94	0.82	0.99	0.95	0.88	0.99
<b>Kiefer</b>	0.96	0.89	1.00	0.98	0.92	1.00

## 5.5 Waldbrand

### 5.5.1 Fragestellung

Baden-Württemberg hat im Vergleich zu anderen Bundesländern wie zum Beispiel Brandenburg, eine geringe jährliche Anzahl von Waldbränden, die hauptsächlich durch anthropogene Ursachen hervorgerufen werden. Dennoch stellte sich die Frage, ob unter einer zukünftigen Klimaerwärmung die klimatische Waldbrandgefahr zunimmt und wie sie sich regional ausprägt.

### 5.5.2 Methode

Zur Charakterisierung von Waldbrandgefahrensituationen wurden Waldbrandindizes entwickelt. Der Index M-68 nach Käse (1969) wird vom Deutschen Wetterdienst genutzt zur täglichen Abschätzung der Waldbrandgefahr. Er wurde für diese Untersuchungen mit einer Modifikation nach Flemming (1994) verwendet, die die Korrekturfaktoren in Abhängigkeit von Luftfeuchte und Phänologie einschließt. Mit diesen Verfahren werden tägliche

Waldbrandkennziffern im Waldwachstumsmodell 4C errechnet, denen dann die Waldbrandwarnstufen 1 bis 5 zugeordnet werden. Es wird ein Mittel der Waldbrandwarnstufen für den Zeitraum April bis September errechnet und dieser Mittelwert als Jahresindex der klimatischen Waldbrandgefährdung verwendet.

### 5.5.3 Resultate

Der klassifizierte und über alle 245 Stationen gemittelte Waldbrandindex M-68 für den Zeitraum 1951-2050 (Basisszenarium und Zukunftsszenarium), siehe [Abbildung 5.9](#), zeigt nur einen sehr geringen Anstieg der klimatischen Waldbrandgefahr. Für die Jahre 1992 bis 2000 lag die Anzahl der Waldbrände pro Jahr zwischen 15 und 119 mit einer Gesamtbrandfläche von 2.3 bis 42.6 ha (BLE). In diesem Zeitraum wurde zwischen dem Waldbrandindex und der Anzahl der Waldbrände nur eine Korrelation von  $r = 0.41$  berechnet.

Die interannuelle Variabilität in der klimatischen Waldbrandgefahr in Baden-Württemberg ist weitgehend durch die Variation in den anthropogenen Zündungshäufigkeiten bestimmt.

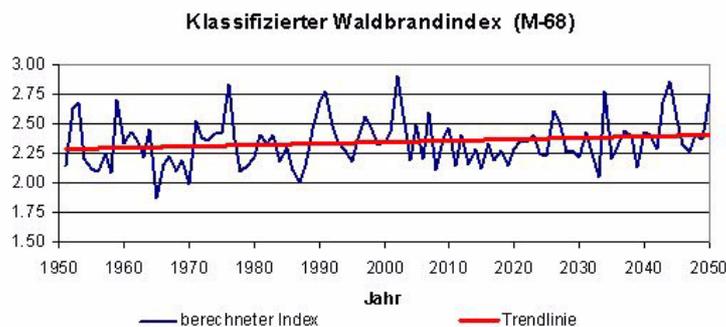


Abb. 5.9: Trend des klimatischen Waldbrandindex in Baden-Württemberg von 1951 bis 2050

Die räumliche Differenzierung in der Ausprägung der klimatischen Waldbrandgefahr ([Abbildung 5.10](#)) zeigt, dass es im Lee des Schwarzwalds zu einem leichten Anstieg der klimatischen Waldbrandgefahr unter dem Zukunftsszenarium kommt, im Norden und Westen eher zu einem Rückgang.

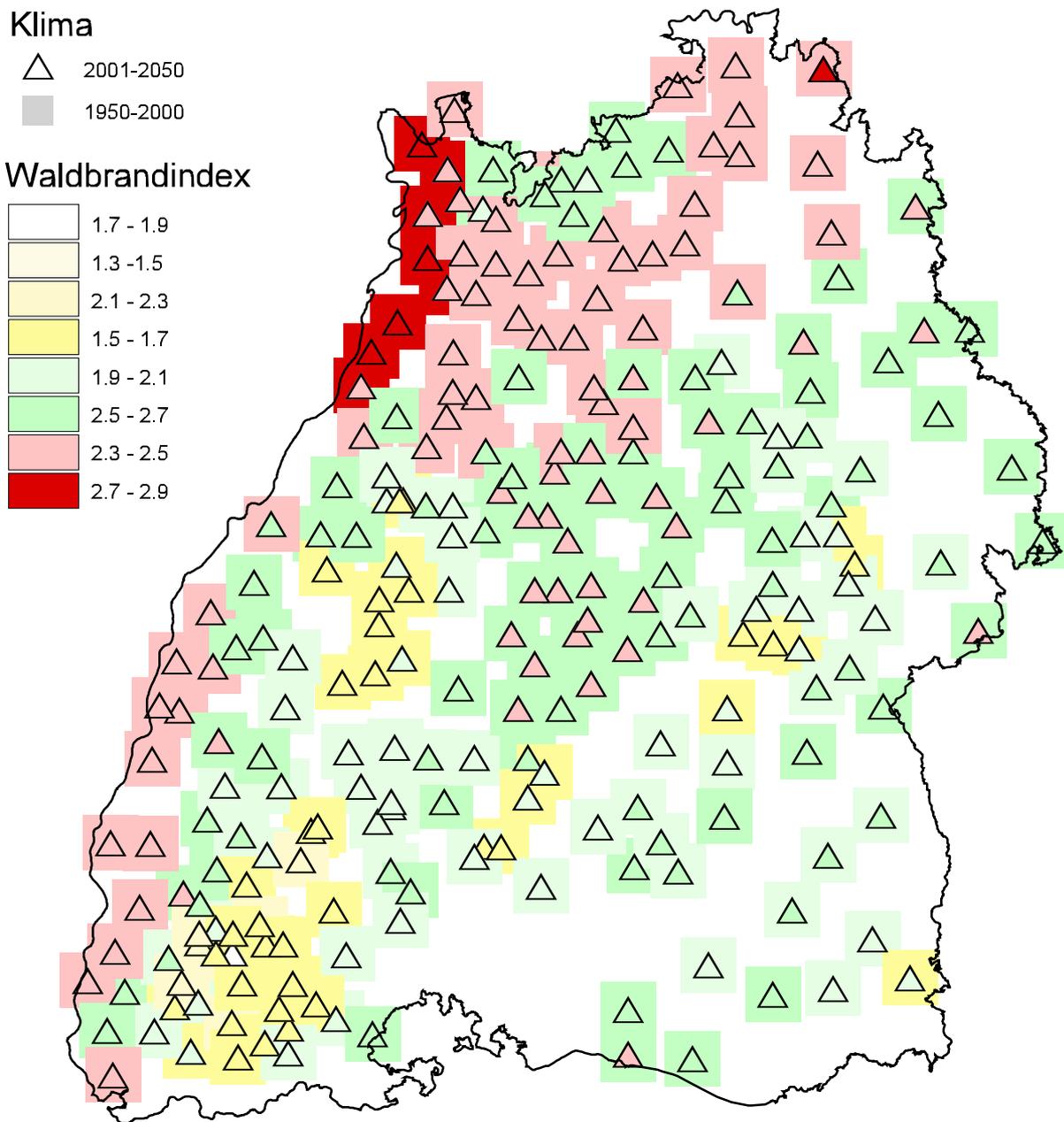


Abb. 5.10: Waldbrandwarnstufen an den Klimastationen in Baden-Württemberg unter heutigem Klima (Quadrate) und dem Zukunftsszenarium (Dreiecke)

## 5.6 Ausblick

Die vorgestellten Arbeiten zeigen einen Produktivitätsgewinn für Waldbestände in Baden-Württemberg unter dem angenommenen Klimawandel. Dies ist auf das in weiten Landesteilen humide Klima zurückzuführen, das auch unter dem Zukunftsszenarium bis zur Mitte des Jahrhunderts keine qualitative Änderung erfährt. Die Temperaturerhöhung führt dann zu verlängerter Vegetationszeit und geringerer Temperaturlimitation in höheren Lagen - ein Trend, der gleichläufig ist mit der stimulierenden Wirkung erhöhter atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentration bei fortgesetztem Nährstoffeintrag in die Ökosysteme. Diese generelle Tendenz muss durch weitere Arbeiten näher analysiert werden, wenn für einzelne Bestände Aussagen getroffen werden sollen und die Sensitivität gegenüber möglichen anderen Klimawandeltrends (siehe z.B. das von *Rennenberg et al. (2004)* vorgestellte Szenarium) erfasst werden soll. Die verfügbare Bodenwasserkapazität und die Variation der klimatischen Bedingungen mit Hangneigung und Exposition spielen hier eine wichtige Rolle. Zur Regionalisierung der Dynamik des Bodenwassers auf unterschiedlichen Substraten wurden Arbeiten bei der FVA Baden-Württemberg durchgeführt (siehe Anhang). Modellstudien für höhere räumliche Auflösung werden in dem Maße realisierbar, in dem die Erarbeitung der hochauflösenden Datenbasis zu Bestockung und Böden voranschreitet. Dies ermöglicht auch die Ausweisung von gegenüber dem Klimawandel sensitiven Waldstandorten. Ein weiteres zu bearbeitendes Gebiet umfasst die Störungsanfälligkeit in Extremjahren.

Der Waldumbau unter Klimawandel wirft weitere Fragen auf, die bei entsprechender Datenlage modellgestützt untersucht werden können. Das betrifft Fragen des Stoffhaushaltes, der Baumartenwahl in Mischbeständen und der Bewirtschaftung. Ergänzende Untersuchungen zur Änderung der Phänologie unter Klimawandel in Baden-Württemberg sind im anschließend folgenden Nachtrag zu finden.

## 5.7 Nachtrag

### 5.7.1 Methode

Die Landnutzungskarte für Baden-Württemberg wurde mit der Bodenkarte Wald-BÜK 1000 (BGR, Hannover, 2004) und den Stationen der Klimaszenarien (über Thiessenpolygone) verschnitten. Jeder Laub- und Nadelwaldfläche wurde der Bodentyp in der Verschneidung zugeordnet, der am häufigsten unter dieser Landnutzung im entsprechenden Thiessenpolygon auftritt. Der Kombination Boden-Klima-Waldtyp (402 Flächen) wurden verschiedene Bestandestypen zugeordnet. Dabei wurden je zwei Bestandesalter gewählt, die nach Altersklassenverteilung in Baden-Württemberg (BWI Daten in der EFISCEN Datenbank) am häufigsten vorkommen (siehe [Tabelle 5.5](#)).

Tab. 5.5: Häufig vorkommende Bestandestypen

	Baumart	Alter	
<b>Laubwald</b>	Buche	40	90
	Eiche	50	100
<b>Nadelwald</b>	Fichte	35	80
	Kiefer	50	80

Die resultierenden Rechnungen stehen somit nicht für ein Mittel über alle lokalen Kombinationen aus Klima, Böden und Bestockung, da der häufigste Bodentyp und keine Interpolation des Klimas im Gelände verwendet wurde, sowie keine Information über die aktuelle Bestockung zugrunde liegt. Stattdessen werden eher idealtypische Bestände für die klimatischen Bedingungen an den Stationen untersucht. Die Simulation erfolgte für jede Fläche mit dem Basisszenarium und dem Zukunftsszenarium. Für jede Baumart wurden die Ergebnisse der zwei unterschiedlichen Altersinitialisierungen gemittelt.

Aus den Simulationsrechnungen wurde die Änderung des Blattaustriebstags berechnet als Differenz der mittleren Blattaustriebstage in den beiden Klimaszenarien.

$$D_v = \bar{d}_{BA,bs} - \bar{d}_{BA,zs}$$

$\bar{d}_{BA,bs}$  - mittlerer Austriebstag unter dem Basisszenarium,

$\bar{d}_{BA,zs}$  - mittlerer Austriebstag unter dem Zukunftsszenarium.

Differenzen größer Null zeigen somit ein früheres Eintreten des Blattaustriebs im Zukunftsszenarium an.

### 5.7.2 Ergebnisse

Für die Eiche wurde ein früheres Eintreten des Blattaustriebs um 6 Tage (min. 2 Tage, max. 12 Tage), für die Buche um 3 Tage (min. 2 Tage, max. 6 Tage) im Mittel über alle Laubwaldflächen berechnet. Die [Abbildung 5.11](#) zeigt die räumliche Variante der Ände-

zung des Blattaustriebstags, die geringste Verfrühung ist vor allem im Westen und Norden Baden-Württembergs festzustellen, die größte Verfrühung vor allem im östlichen Teil des Landes.

Abbildung 5.11 (rechts) zeigt die deutlich stärkere Tendenz zu früherem Blattaustrieb der Eiche im Vergleich zur Buche. Ebenso ist hier eine sehr deutliche räumliche Differenzierung zwischen dem westlichen Landesteil (Verschiebung um 2-4 Tage nach vorn) und dem Norden und Osten (Verschiebung um bis zu 12 Tage) sichtbar.

Die Projektion der Effekte der klimatischen Erwärmung mit Hilfe eines phänologischen Modells zeigt, dass eine Fortsetzung des Trends zu früherem Blattaustrieb zu erwarten ist und Eiche stärker reagiert als Buche. Diese Differenz zwischen den Arten ist auf die stärkere Tageslängenkomponente im Buchenaustriebsmodell zurückzuführen. Im Ergebnis würden das Ergrünen der Eichen- und Buchenwälder zeitlich näher zusammenrücken.

Wie die Untersuchungen im Kapitel 5.4.2.3 zeigten, ist die Verlängerung der Vegetationsperiode für Buche und Eiche durch früheren Blattaustrieb mit einem Gewinn an Produktivität verbunden. Dies ist eine der Komponenten, welche die Produktivitätsänderungen bestimmen.

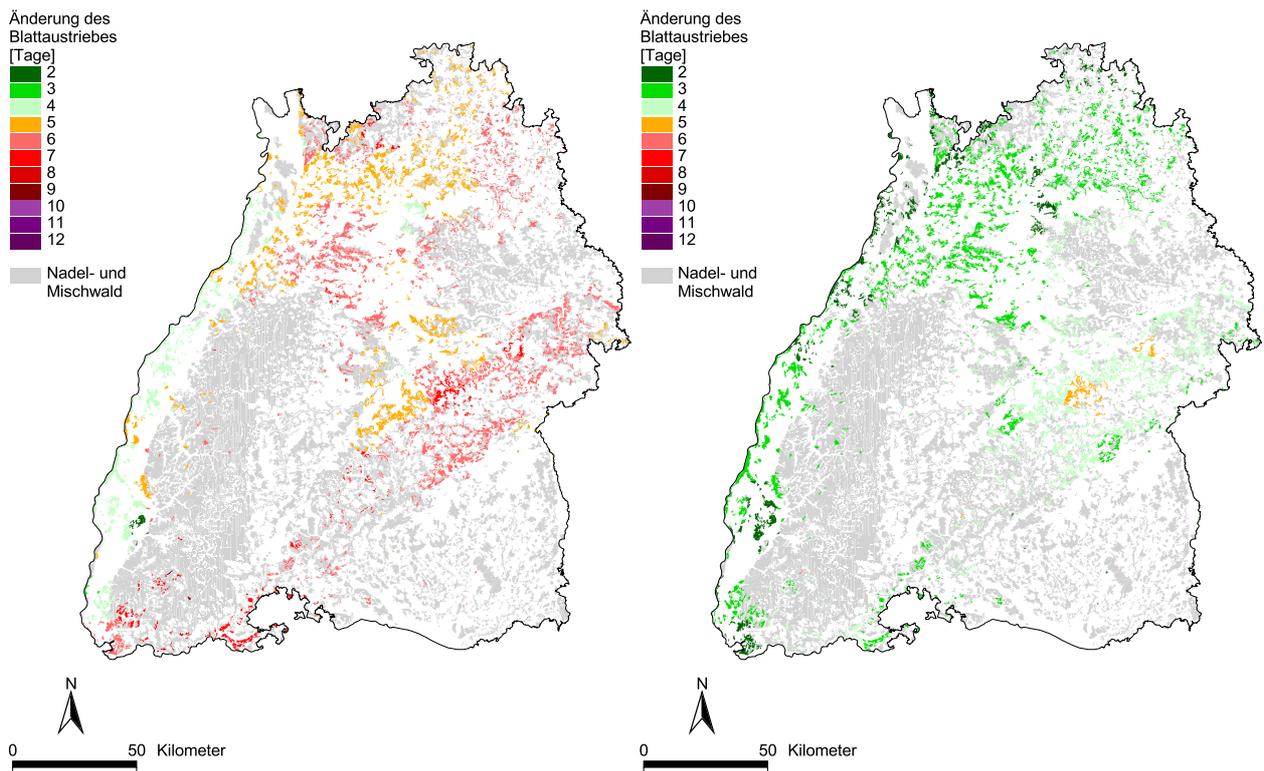


Abb. 5.11: Verschiebung des Blattaustriebs der Eiche (links) und Buche (rechts) auf den Laubwaldflächen (Nadel- und Mischwaldflächen grau dargestellt)

## 6 TOURISMUS

### 6.1 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden erste Ansätze zur Quantifizierung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf den Sommertourismus in Baden-Württemberg dargestellt. Zunächst wurden die sommertouristischen Aktivitäten identifiziert und deren regionale Schwerpunkte in Baden-Württemberg erfasst. Exemplarisch wurden dann die Bereiche "Badetourismus am Bodensee" und "Wandertourismus im Schwarzwald" ausgewählt, um Methoden zur Untersuchung des Einflusses möglicher Klimaveränderungen beispielhaft zu entwickeln.

Das methodische Vorgehen erfolgt in beiden Bereichen in zwei Schritten. Im ersten Schritt wurden anhand von empirischem Datenmaterial tourismusrelevante Klimaparameter ermittelt. Im Fall "Badetourismus am Bodensee", d.h. der freizeitorientierten Nutzung von Frei- und Seebädern, waren dies die tägliche Maximaltemperatur, der Bewölkungsgrad und die tägliche Sonnenscheindauer. Die empirische Ermittlung von Schwellwerten für diese drei Klimaparameter führte zur Definition eines "potentiellen Badetages". Beim "Wandertourismus im Schwarzwald" zeigten sich als wanderrelevante Klimaparameter die tägliche Maximaltemperatur, die relative Feuchte und vor allem die tägliche Sonnenscheindauer. Die Definition eines "potentiellen Wandertages" war hier jedoch aufgrund der mageren empirischen Datenbasis und der statistisch uneindeutigeren Beziehung zwischen Wanderaktivität und Wetterverhältnissen nicht möglich.

Im zweiten Schritt wurde die mögliche zukünftige Entwicklung dieser Klimaparameter (Zukunftsszenarium) mit dem in der Vergangenheit beobachteten Verlauf (Basisszenarium) verglichen. Dabei zeigte sich erwartungsgemäß, dass sich hinsichtlich der baderelevanten Klimaparameter in der Bodensee-Region im Zukunftsszenarium höhere tägliche Maximaltemperaturen und besonders während der Sommersaison längere tägliche Sonnenscheindauern ergeben. Für den südlichen Schwarzwald zeichnet sich im Zukunftsszenarium ebenfalls ein statistisch signifikanter Trend zu höheren täglichen Maximaltemperaturen und längeren täglichen Sonnenscheindauern ab.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in der Bodensee-Region für das Zukunftsszenarium mit einer Zunahme der "potentiellen Badetage" und zusätzlich mit einer Verlängerung der Badesaison zu rechnen ist. Ebenso treten im südlichen Schwarzwald im Zukunftsszenarium öfter Tage mit für den Wandertourismus günstigen Wetterverhältnissen auf - allerdings unter größeren methodischen Unsicherheiten als im Fall der "potentiellen Badetage". Im Unterschied zum Wintertourismus wird für den Sommertourismus in Baden-Württemberg eine positive klimatische Entwicklung prognostiziert. Dies entspricht zwar grundsätzlich den Erwartungen, die hier vorgestellten Methoden zeigen darüber hinaus Ansätze für eine Quantifizierung der Zusammenhänge, die im Hinblick auf die wirtschaftliche Ertragsentwicklung wichtig ist.

## 6.2 Einführung

Auf dem deutschen Tourismusmarkt nimmt das Bundesland Baden-Württemberg mit über 38 Millionen Übernachtungen im Jahr 2002 eine Spitzenstellung ein - lediglich Bayern verzeichnet noch höhere Übernachtungszahlen. Insgesamt entfallen auf Baden-Württemberg über 12% aller Übernachtungen in Deutschland<sup>2</sup>. Dem hohen Stellenwert der Tourismusbranche Baden-Württembergs entsprechend bietet dieser Wirtschaftszweig etwa 200.000 Arbeits- und 8.000 Ausbildungsplätze. Rund 5% des Bruttoinlandproduktes werden in diesem Wirtschaftszweig erwirtschaftet (*Staatsministerium Baden-Württemberg, 2004*).

Da der Tourismus als wirtschaftlich bedeutende Branche stärker noch als manch anderer Wirtschaftszweig witterungsbedingten Einflüssen unterliegt, ist es von Interesse, die möglichen Einflüsse des Klimawandels auf den Tourismus in Baden-Württemberg zu analysieren. Dabei erscheint es sinnvoll, diese Analyse auf die regionalen touristischen Schwerpunkte zu konzentrieren und zwischen den dort vorherrschenden touristischen Aktivitäten zu differenzieren.

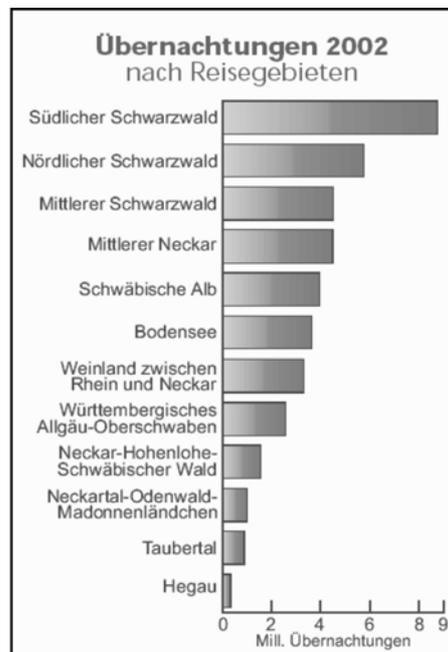


Abb. 6.1: Übernachtungen in Baden-Württemberg nach Reisegebieten im Jahr 2002 (*Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2003a*).

Bezüglich der regionalen Verteilung des Tourismus ist festzustellen, dass sich die Übernachtungen in Baden-Württemberg insgesamt auf 12 Gebiete konzentrieren. [Abbildung 6.1](#) zeigt diese Reisegebiete im Überblick. Deutlich wird die Bedeutung des Schwarzwalds für den Tourismus, auf diese Region entfallen allein etwa 50% aller Übernachtungen. Die hohen Übernachtungszahlen der Region des Mittleren Neckars können der

2. Datengrundlage bilden hier die Übernachtungszahlen der etwa 7000 Beherbergungsbetriebe in Baden-Württemberg mit mehr als 9 Betten, dagegen werden die Betriebe des sogenannten *grauen Beherbergungsmarktes* mit weniger als 9 Betten von der amtlichen Statistik nicht erfasst.

wachsenden Bedeutung des Städtetourismus für Baden-Württemberg zugeschrieben werden (*Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2003a*).

Da die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Wintertourismus in einer früheren Studie (*Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, 2005*) schon ausführlich untersucht wurden, beschränkt sich die vorliegende Untersuchung auf den Sommertourismus. Dazu wird zunächst neben der regionalen auch die saisonale Verteilung der Touristen erfasst, um die sommertouristischen Schwerpunktregionen zu identifizieren. In [Abbildung 6.2](#) ist die räumliche Verteilung der relativen Differenz von Sommer- gegenüber Winterübernachtungszahlen für das Jahr 2002/2003 dargestellt. Die Schwerpunkts-

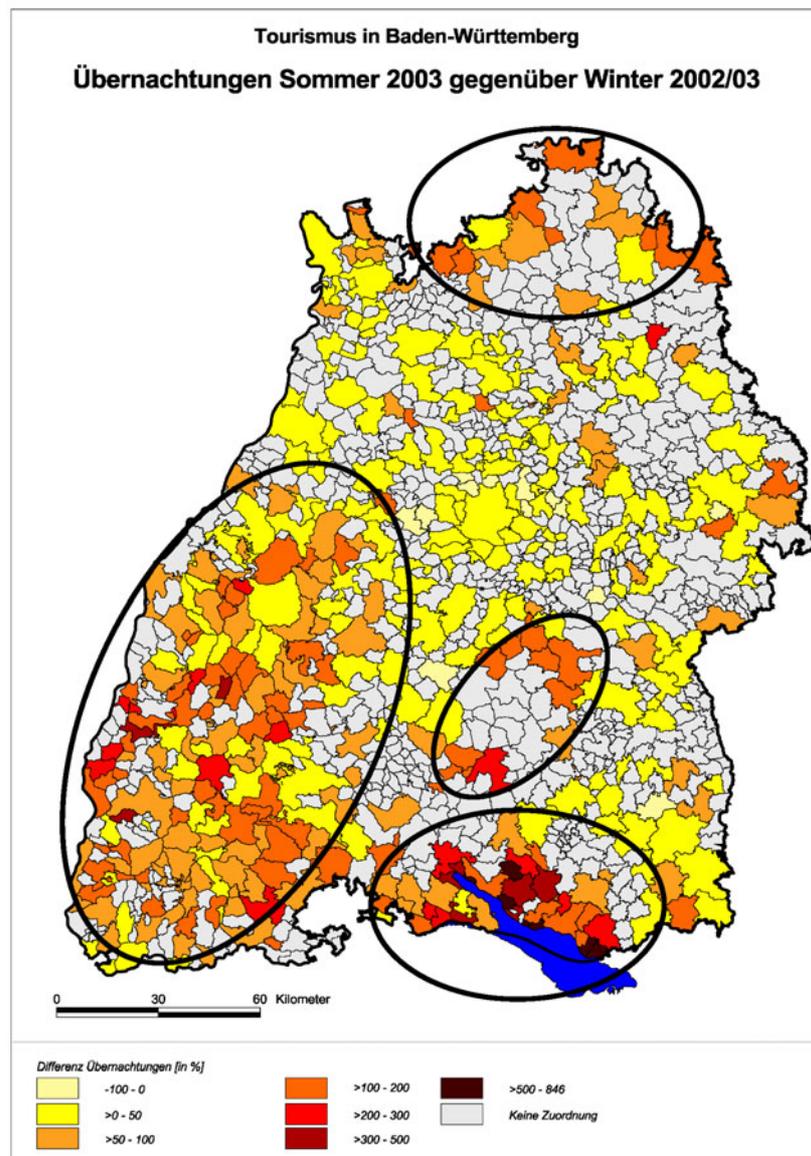


Abb. 6.2: Schwerpunktregionen des Sommertourismus in Baden-Württemberg, abgeleitet aus der relativen Differenz von Sommer- gegenüber Winterübernachtungen für das Jahr 2002/2003; Sommerhalbjahr Mai-Oktober 2003 (*Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2004*) und Winterhalbjahr: November 2002-April 2003 (*Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2003c*).

regionen des Baden-Württembergischen Sommertourismus sind demnach: die Bodensee-Region, der Schwarzwald, die Schwäbische Alb und das Taubertal. In zahlreichen Gemeinden dieser Gebiete liegen die Übernachtungszahlen des Sommers deutlich höher als die des Winters (zum Teil bis zu achtmal so hoch).

Im Folgenden werden für zwei dieser Regionen, die Bodensee-Region und den Schwarzwald, die Folgen möglicher Klimaänderungen für sommertouristische Belange beispielhaft abgeschätzt. Dazu wird jeweils eine charakteristische sommertouristische Aktivität für die Beispielregion ausgewählt, um für diese Aktivität mögliche Veränderungen in den - für ihre Ausübung entscheidenden - klimatologischen Rahmenbedingungen zu ermitteln. So beschäftigt sich [Kapitel 6.3](#) mit dem "Badetourismus am Bodensee" und [Kapitel 6.4](#) mit dem "Wandertourismus im Schwarzwald". Es wird jeweils analysiert, wie sich die für diese Aktivitäten "benötigten" klimatischen Randbedingungen in Zukunft ändern könnten.

### **6.3 Badetourismus am Bodensee**

Als eine charakteristische sommertouristische Aktivität in der Bodensee-Region steht die freizeitorientierte Nutzung von Frei- und Seebädern im Mittelpunkt der Untersuchung. Zunächst wird in [Kapitel 6.3.1](#) das methodische Vorgehen erläutert, die Ergebnisse finden sich anschließend in [Kapitel 6.3.2](#).

#### **6.3.1 Untersuchungsmethode: Definition eines potentiellen Badetages**

Zur Abschätzung der möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Badetourismus werden klimatische Schwellenwerte für die Nutzung von Frei- und Seebädern empirisch ermittelt, um einen "potentiellen Badetag" zu definieren. Von den verschiedenen täglichen Klimaparametern erweisen sich in der Analyse die Maximaltemperatur, der mittlere Bewölkungsgrad und die Sonnenscheindauer als bedeutsam.

Zur Ermittlung von klimatischen Schwellenwerten wurden die Besucherzahlen eines Freibads auf der bayerischen Seite des Bodensees und eines Freibads in Konstanz mit klimatischen Messwerten korreliert. Dabei konnten die täglichen Besucherzahlen von sechs Jahren (jeweils die Sommersaison) ausgewertet werden. Das Freibad in Konstanz stellte dabei die Besucherzahlen aus den Jahren 1999 und 2000 (insgesamt 174 Tage), das Bad der bayerischen Gemeinde aus den Jahren 2000 bis 2004 (insgesamt 660 Tage) zur Verfügung<sup>3</sup>. Während im Konstanzer Bad nur die täglichen Besucherzahlen registriert wurden, erfasste der zuständige Schwimmmeister des bayerischen Bads ferner über Jahre hinweg handschriftlich dreimal täglich die Lufttemperatur (9 Uhr, 12 Uhr und 17 Uhr) sowie meist zweimal täglich die aktuelle Witterung. Nach Überführung dieses Materials in digitale Form war es somit möglich, die Besucherzahlen des bayerischen Bads direkt mit den vor Ort notierten Temperatur- und Witterungsbedingungen zu korrelieren und somit klimatische Schwellenwerte empirisch basierend abzuleiten. Für das Konstanzer Bad konnte für die Korrelation von Besucherzahlen und Klimaparametern auf die meteorologischen Messdaten der Klimastation Konstanz zurückgegriffen werden.

[Abbildung 6.3](#) zeigt ein Histogramm der Besucherzahlen des bayerischen Bads. An 240 von 660 Tagen wies das Bad relativ niedrige Besuchszahlen (<100) auf, im Durchschnitt

3. Aus Datenschutzgründen werden die beiden Bäder im Verlauf dieser Studie als das "Konstanzer Bad" bzw. als das "bayerische Bad" bezeichnet.

wurden 383 Besucher pro Tag verzeichnet. Nach Aussage des Betreibers ist das Bad ab etwa 600 Besuchern "sehr gut besucht", bei 1500 "mehr als ausgelastet".

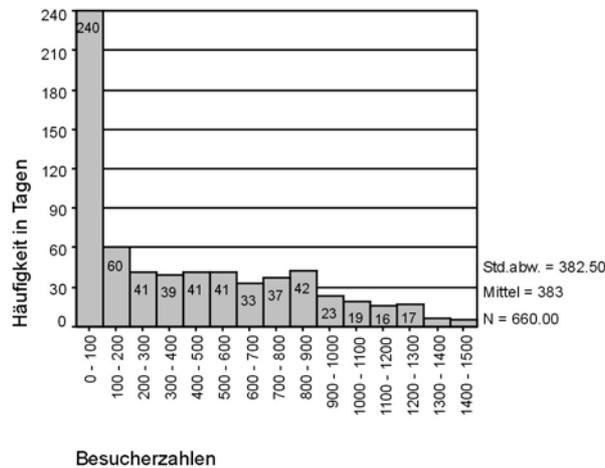


Abb. 6.3: Häufigkeitsverteilung registrierter Besucherzahlen im bayerischer Bad während der Sommersaisons 2000-2004.

### 6.3.1.1 Schwellenwert für die tägliche Maximaltemperatur

In [Abbildung 6.4](#) sind die Histogramme der um 9 Uhr, 12 Uhr und 17 Uhr vom Schwimmmeister registrierten Temperaturen dargestellt. Im Mittel wurden um 9 Uhr 18 °C, um 12 Uhr 20 °C und um 17 Uhr 22 °C gemessen. Die Maximaltemperaturen von 31 °C wurden in einigen 17-Uhr-Messungen registriert.

Korrelationsanalysen zwischen den drei Temperaturmessungen und den jeweils täglich registrierten Besucherzahlen zeigen die beste Korrelation zwischen den 17-Uhr-Temperaturen und den Besucherzahlen. Wegen des nicht-linearen Zusammenhangs der zu korrelierenden Variablen und um Ausreißerwerte nicht zu stark zu gewichten, wurde eine Rangkorrelation nach Spearman anstelle einer linearen Regression durchgeführt. So kann mit einem Spearman-Korrelationskoeffizienten von 0,88 eine hohe Korrelation ermittelt werden. Mit Werten von 0,65 (9 Uhr) und 0,75 (12 Uhr) weisen die beiden früheren Temperaturmessungen einen niedrigeren Korrelationskoeffizienten auf. Alle drei Korrelationen sind statistisch signifikant ( $p = 0,01$ ).

Im Folgenden wird daher ein Schwellenwert für Badetage auf der Basis der Daten der 17-Uhr-Temperatur hergeleitet. [Abbildung 6.5](#) zeigt die mittleren täglichen Besucherzahlen<sup>4</sup> in Abhängigkeit von der 17-Uhr-Temperatur. Während die Besucherzahlen bei Temperaturen unter 16 °C auf sehr niedrigem Niveau liegen, nehmen sie mit steigenden Temperaturen stetig zu bis bei 30 °C schließlich das Optimum erreicht ist. Die Festlegung des Temperatur-Schwellenwerts für einen "potentiellen Badetag" erfolgt nun über

4. Aus Gründen der Einfachheit wurde diese Mittelung zur Glättung des Temperatur-Besucherzahl-Zusammenhangs durchgeführt. Eine detailliertere Analyse dürfte die Varianz der Besucherzahlen bei jeweils festen Temperaturen nicht vernachlässigen.

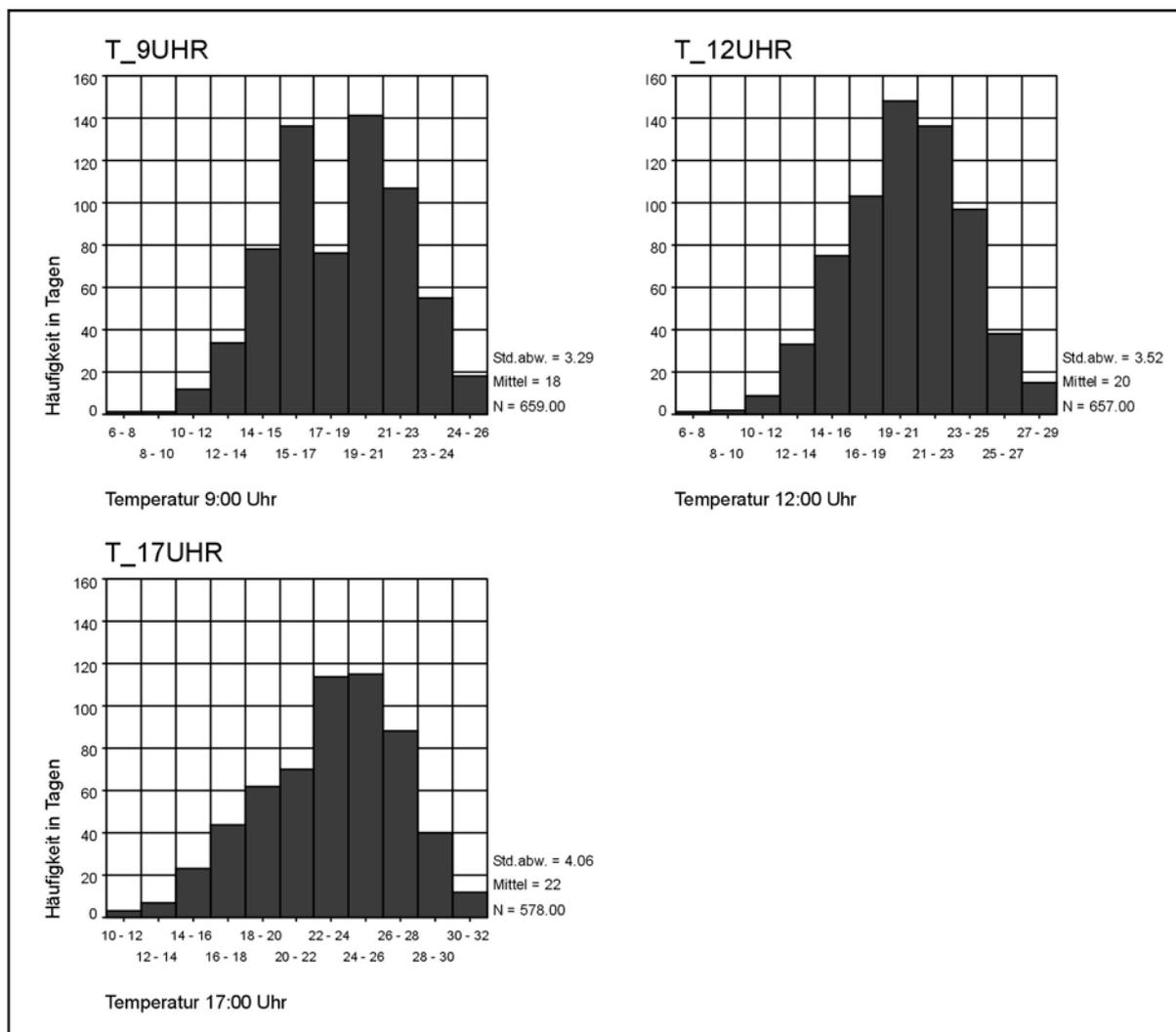


Abb. 6.4: Häufigkeitsverteilung der täglich jeweils um 9 Uhr, 12 Uhr und 17 Uhr aufgezeichneten Lufttemperaturen im bayerischen Bad während der Sommersaisons 2000-2004.

den Besucherzahl-Schwellenwert von 600 Besuchern, da ab dieser Menge das bayerische Bad nach Aussage des Betreibers als gut bis sehr gut gefüllt bezeichnet wurde<sup>5</sup>.

Aus [Abbildung 6.5](#) lässt sich ablesen, dass diese Besucherzahl einer 17-Uhr-Temperatur von 25 °C entspricht.

Zur Übertragung der 17-Uhr-Temperatur des bayerischen Bads auf die Klimaparameter der baden-württembergischen Bodensee-Region wurden die 17-Uhr-Temperaturen des bayerischen Bads mit dem Mittel der täglichen Maximaltemperatur aus den vier nächstgelegenen Bodenseestationen (vgl. [Abbildung 6.6](#)) verglichen.

Aus [Abbildung 6.7](#) lässt sich entnehmen, dass der Mittelwert der täglichen Maximaltemperatur der vier Bodensee-Stationen in der Regel etwas kleiner ist als die 17-Uhr-Temperatur des bayerischen Bads. Mit Hilfe einer linearen Regression ( $R^2 = 0,87$ ) lässt

5. Dieser Besucherzahl-Schwellenwert ist natürlich nicht frei von subjektiven Wertungen und kann durch weiteres empirisches Material zur Diskussion gestellt werden.

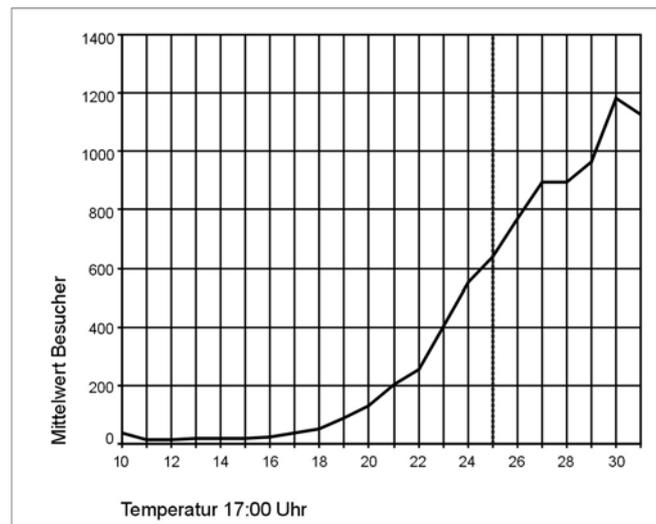


Abb. 6.5: Mittlere tägliche Besucherzahlen in Abhängigkeit von der 17-Uhr-Temperatur im bayerischen Bad während der Sommersaisons 2000-2004.

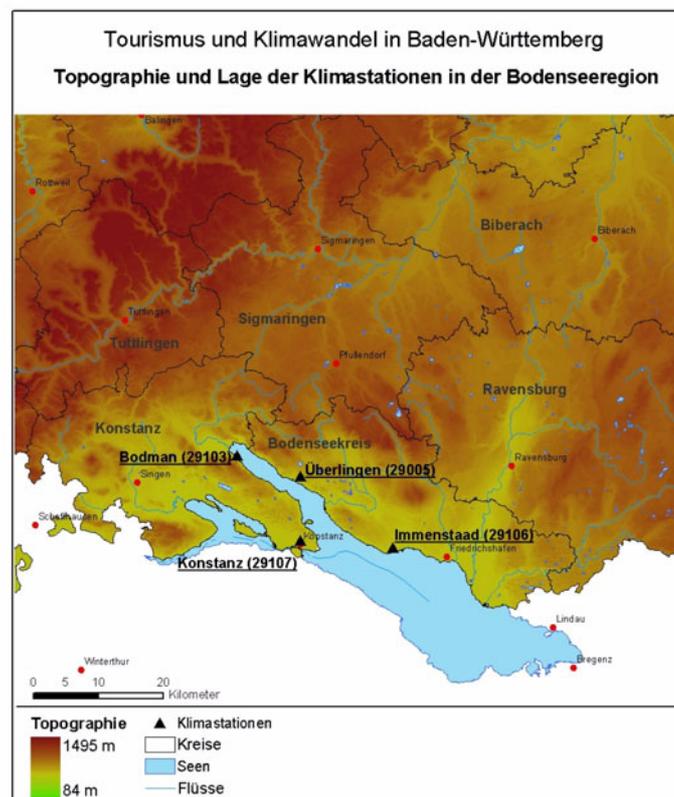


Abb. 6.6: Lage der vier Klimastationen im Bodenseegebiet. Datengrundlage: Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (2001) und Klimagruppe PIK.

sich einer 17-Uhr-Temperatur im bayerischen Bad von 25 °C eine tägliche Maximaltemperatur von etwa 22°C in der baden-württembergischen Bodensee-Region zuordnen.

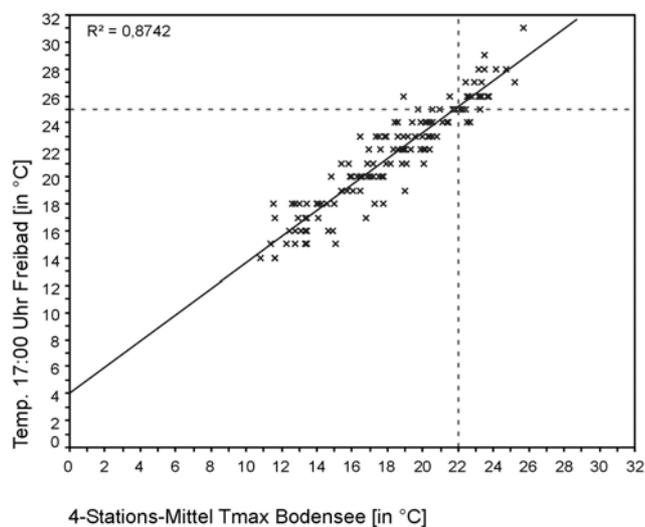


Abb. 6.7: Zusammenhang zwischen der 17-Uhr-Temperatur des bayerischen Bads und dem Mittelwert der täglichen Maximaltemperaturen ( $T_{max}$ ) der vier nächstgelegenen Bodenseesta-tionen in Baden-Württemberg während der Sommersaisons 2000-2004. Die gestrichelten Linien verdeutlichen, dass sich mit Hilfe der Regressionsgerade der 17-Uhr-Temperatur von 25 °C eine mittlere tägliche Maximaltemperatur von etwa 22 °C zuordnen lässt.

Aus den täglichen Besucherzahlen des Konstanzer Bads für die Jahre 1999 und 2000 lässt sich auf ähnliche Weise ein Temperatur-Schwellenwert für einen potentiellen Bade-tag ableiten. Insgesamt liegen hier für 174 geöffnete Tage die täglichen Besucherzahlen vor, im Mittel zählte das Bad an den geöffneten Tagen 322 Besucher pro Tag<sup>6</sup>. Da in diesem Freibad keine Temperaturen aufgezeichnet wurden, wurden die täglichen Besucherzahlen mit der täglichen Maximaltemperatur ( $T_{max}$ ) der Station Konstanz korreliert. Mit einem Spearman-Korrelationskoeffizienten von 0,75 ist der Zusammenhang nicht so deutlich wie bei dem bayerischen Bad, aber dennoch statistisch signifikant. Wie die [Abbildung 6.8](#) (links) zeigt, gibt eine gewöhnliche lineare Regressionsgerade den Zusammenhang zwischen Besucherzahlen und täglicher Maximaltemperatur - vor allem unterhalb von 24 °C - nur unzureichend wieder. Besser gelingt dies mit einer gewichteten Regressionsglättung nach Lowess ([Abbildung 6.8](#), rechts). Der Übergang von relativ niedrig ansteigenden hin zu sehr schnell steigenden Besucherzahlen ab etwa 24 °C wird durch diese Funktion besser wiedergegeben. Für diesen Datensatz ergibt sich somit ein Schwellenwert der täglichen Maximaltemperatur von 24 °C: bei höheren Temperaturen nehmen die Besucherzahlen schnell zu, während sie bei niedrigeren Temperaturen nur langsam ansteigen.

Aus den beiden Temperatur-Schwellenwerten des bayerischen Bads (22 °C) und des Konstanzer Bads (24 °C) wird zum Zwecke der Generalisierung der Definition eines Badetages das arithmetische Mittel gebildet. Für die tägliche Maximaltemperatur ergibt sich so ein Schwellenwert von 23 °C.

6. Im Gegensatz zum bayerischen Bad hatte das Konstanzer Bad bei ungünstiger Witterung geschlossen, so dass während der Sommersaisons 1999 und 2000 insgesamt 133 Tage ohne Besucher verzeichnet wurden.

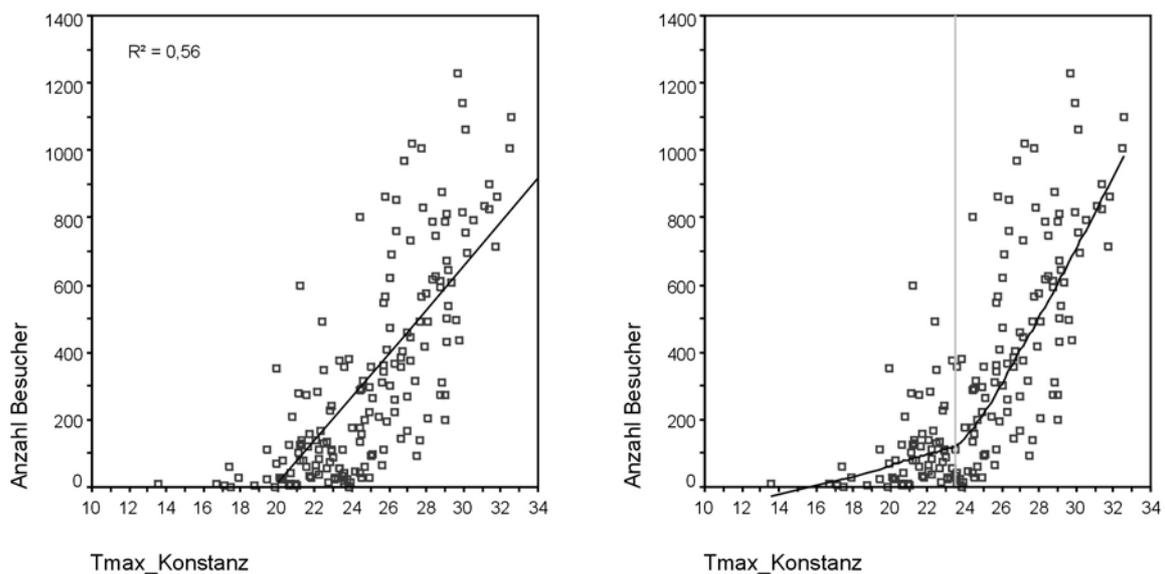


Abb. 6.8: Zusammenhang zwischen der täglichen Besucherzahl des Konstanzer Bads und der an der Station Konstanz registrierten täglichen Maximaltemperatur während der beiden Sommersaisons 1999 und 2000: lineare Regression (links) und gewichtete Regressionsglättung nach Lowess (rechts).

### 6.3.1.2 Schwellenwert für den mittleren Bewölkungsgrad

Aufgrund der Aufzeichnungen aus dem bayerischen Bad - es wurde zweimal täglich die Witterung notiert - lassen sich neben der Temperatur auch Aussagen hinsichtlich witterungsbedingter Besucherpräferenzen treffen. [Abbildung 6.9](#) zeigt die mittleren täglichen Besucherzahlen für das bayerische Bad in Abhängigkeit von der 17-Uhr-Temperatur bei vier verschiedenen Witterungstypen.

Aus [Abbildung 6.9](#) kann man entnehmen, dass bei "sonniger" und "leicht bewölkt" Witterung auch bei relativ niedrigen 17-Uhr-Temperaturen (unter dem 17-Uhr-Temperatur-Schwellenwert von 25 °C) deutlich mehr Besucher registriert wurden als bei "stark bewölkt" oder "regnerischer" Witterung. Unter letztgenannten Umständen kann eine hohe Auslastung des Bades vor allem dann erreicht werden, wenn es sich um plötzlich auftretende (Gewitter-)Schauer im späteren Tagesverlauf handelt. Bezüglich der Witterung zeigen die Besucherzahlen des bayerischen Bads also die Präferenz von sonnigen beziehungsweise leicht bewölkten Tagen. Zur Festlegung eines klimatologischen Schwellenwertes kann das subjektiv aufgezeichnete Datum "Witterungstyp" in den verfügbaren Klimaparameter "Bewölkungsgrad" übersetzt werden: Tage mit "sonniger" oder "leicht bewölkt" Witterung entsprechen Tagen mit einem mittleren Bewölkungsgrad von kleiner 3 Achtel (meteorologisch: "leicht bewölkt").

### 6.3.1.3 Schwellenwert für die tägliche Sonnenscheindauer

Da die vorliegenden Daten der Basis- und Zukunftsszenarien *tägliche* Daten beinhalten, ist zu beachten, dass aufgrund der 24-stündigen Messperiode auch die nächtlichen Werte in das Mittel der Bewölkung eingehen, was die Zuverlässigkeit des Klimaparameters mittlerer Bewölkungsgrad beeinträchtigen kann. Deshalb wird mit der täglichen Sonnenscheindauer ein dritter Klimaparameter für die Definition eines potentiellen Bade-

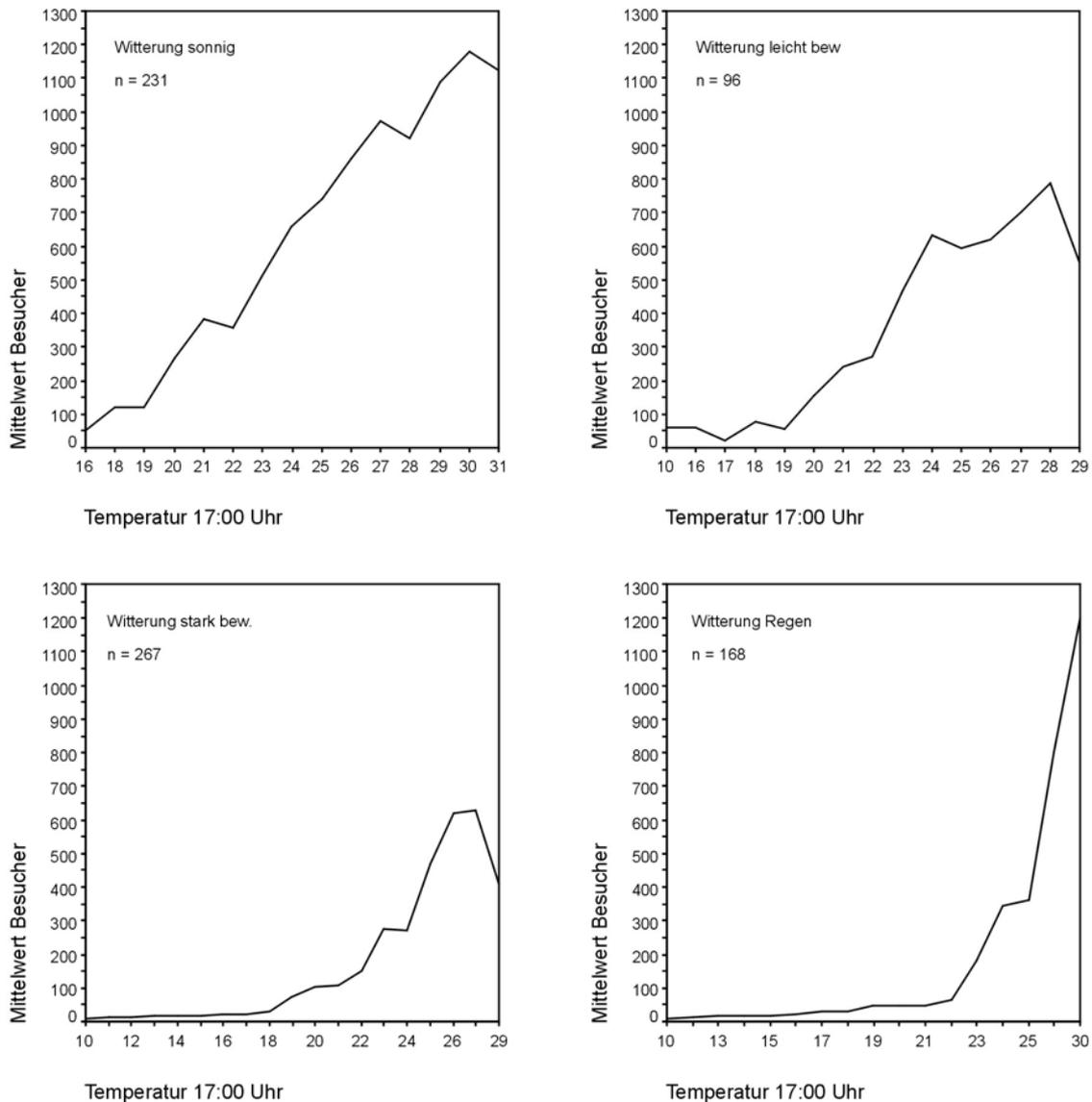


Abb. 6.9: Mittlere tägliche Besucherzahlen für das bayerische Bad in Abhängigkeit von der 17-Uhr-Temperatur für vier verschiedene Witterungstypen während der Sommersaisons 2000-2004. Witterungstyp "sonnig" bedeutet, dass beide Witterungswerte des jeweiligen Tages "sonnig" sind. Bei den übrigen Witterungstypen war ausreichend, dass einer der beiden Witterungswerte dem jeweiligen Witterungstyp entsprach.

tages hinzugenommen. Der Schwellenwert für die tägliche Sonnenscheindauer wird hier als 9 Stunden angenommen (zum Vergleich: das langjährige Julimittel für die Bodensee-Region liegt bei 7,6 Stunden). Dieser hypothetische Schwellenwert erfordert jedoch noch eine zusätzliche empirische Überprüfung.

### 6.3.1.4 Definition: potentieller Badetag

Zusammenfassend lässt sich ein potentieller Badetag auf der Basis von drei Schwellenwerten wie folgt definieren: die tägliche Maximaltemperatur muss größer als 23 °C sein,

der mittlere Bewölkungsgrad kleiner als  $\frac{3}{8}$  sein und die tägliche Sonnenscheindauer muss mindestens 9 Stunden betragen.

Die Definition enthält auch subjektive Einschätzungen und dient als Arbeitshypothese für diese Untersuchung. Zu den ermittelten Schwellenwerten erscheint eine zusätzliche empirische Überprüfung mit mehr Datenmaterial erforderlich. Es ist jedoch anzunehmen, dass die grundsätzliche Tendenz der folgenden klimatischen Analyse hinsichtlich des Auftretens potentieller Badetage nur marginal von der hier getroffenen Wahl der Schwellenwerte abhängt.

Des Weiteren soll angemerkt werden, dass den Analysen ein sogenannter "Modell-Tourist" zugrunde liegt, dem immer freie Auswahl zwischen sämtlichen Freizeitaktivitäten unterstellt wird. In diesem Sinne geht der "Modell-Tourist" schwimmen, wenn entsprechende klimatische Bedingungen herrschen, und andere Aktivitäten treten dann in den Hintergrund. Die Unsicherheit der Entscheidungsfindung des "realen" Touristen ist also nicht berücksichtigt worden, was sprachlich im Wort "potentieller" Badetag ausgedrückt ist.

### 6.3.2 Ergebnisse

Um eine mögliche Veränderung des Auftretens potentieller Badetage unter Klimawandel abzuschätzen, werden die täglichen Klimadaten aus dem Basisszenarium (betrachteter Zeitraum: 1971-2000) und aus dem Zukunftsszenarium (betrachteter Zeitraum: 2026-2055) verwendet. Für beide Zeiträume werden die einzelnen potentiellen Badetage bestimmt und deren statistische Eigenschaften hinsichtlich Häufigkeit und saisonaler Verteilung miteinander verglichen.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt generell für alle vier in [Abbildung 6.6](#) eingezeichneten Klimastationen der Bodensee-Region: Bodman, Überlingen, Konstanz und Immenstaad. [Abbildung 6.10](#) zeigt die Zunahme potentieller Badetage an jeder der vier Stationen im Zukunftszeitraum (2026-2055) gegenüber dem Referenzzeitraum (1971-2000).

Die stärkste Zunahme verzeichnet die Station Überlingen: Verglichen mit dem Referenzzeitraum treten im Zukunftszeitraum durchschnittlich 4,8 potentielle Badetage mehr pro Jahr auf. Insgesamt nehmen die potentiellen Badetage zukünftig an allen Stationen um durchschnittlich ca. 4 Tage pro Jahr zu. Diese Zunahme spiegelt sich auch in den Extrema der jährlichen Anzahl von potentiellen Badetagen wider. Im Minimum weisen die Stationen im Zukunftszeitraum einen Wert von 13 Tagen pro Jahr (an der Station Konstanz), im Maximum von 50 Tagen pro Jahr auf (an der Station Immenstaad). Im Referenzzeitraum betrug das Minimum noch 8 Tage pro Jahr (Bodman im Jahr 1972), das Maximum 43 Tage pro Jahr (Immenstaad im Jahr 2000).

Da sich [Abbildung 6.10](#) auf die absoluten Häufigkeiten potenzieller Badetage pro Jahr beschränkt, soll im Folgenden zusätzlich deren innerjährliche Verteilung differenzierter untersucht werden. Dazu ist in [Abbildung 6.11](#) die Länge der Badesaison (Anzahl der Tage zwischen dem ersten und letzten registrierten potentiellen Badetag eines Jahres) für die vier Klimastationen jeweils gemittelt über den Referenzzeitraum und den Zukunftszeitraum dargestellt.

Insgesamt wird für alle Stationen deutlich, dass sich die erhöhte Anzahl von potentiellen Badetagen im Zukunftszeitraum auch in jeweils deutlich erhöhten Saisonlängen äußert.

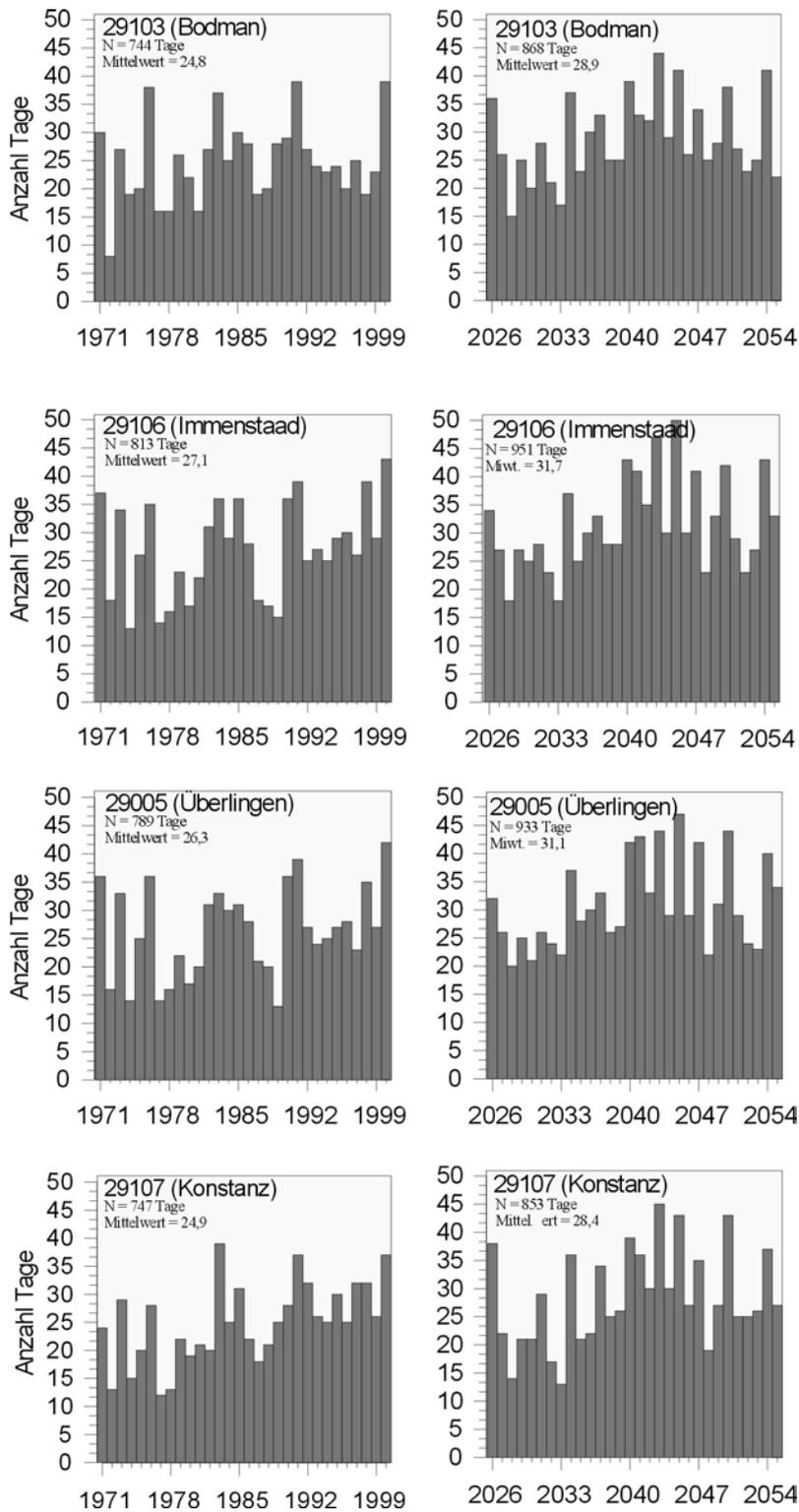


Abb. 6.10: Jährliche Häufigkeit von potenziellen Badetagen an den vier Stationen der Bodensee-Region im Referenzzeitraum (1971-2000) und im Zukunftszeitraum (2026-2055).

So treten im 30-jährigen Mittel des Zukunftszeitraums die ersten potentiellen Badetage je nach Station 14 bis 21 Tage früher und die letzten potentiellen Badetage 17 bis 28 Tage

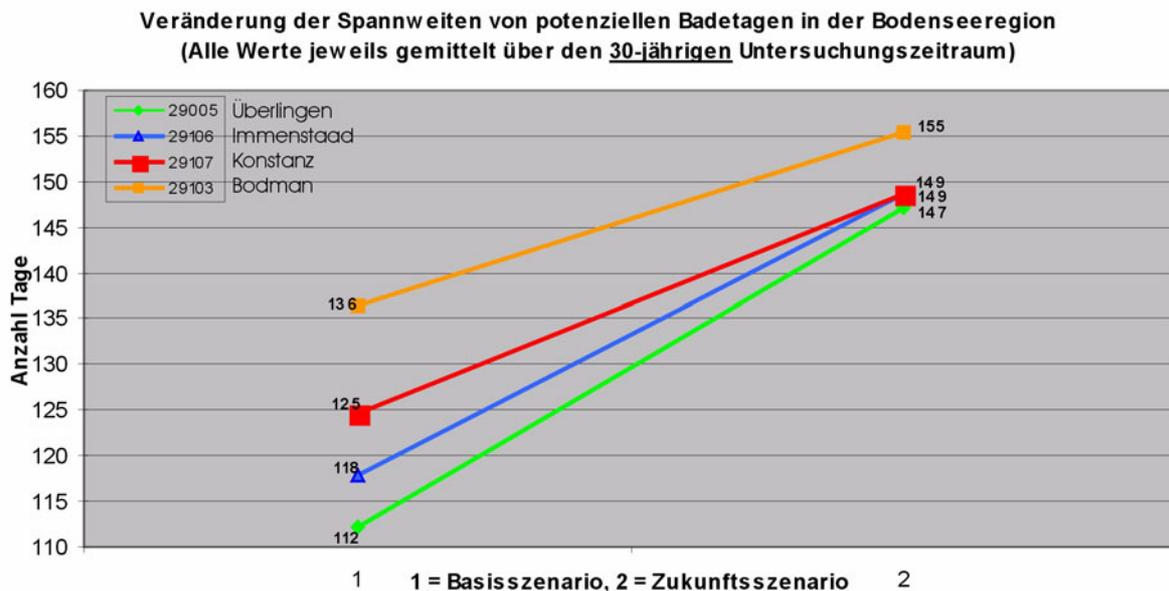


Abb. 6.11: Veränderung der Länge der Badesaison für die vier Stationen der Bodensee-Region. Die Werte (Länge der Badesaison, erster potentieller Badetag, letzter potentieller Badetag) sind dabei jeweils über den 30-jährigen Referenz- bzw. Zukunftszeitraum gemittelt.

später auf als im Referenzzeitraum. Die Saisonlänge wächst dabei je nach Station von 112 bis 136 Tagen auf 147 bis 155 Tage an.

Nach diesen Darstellungen von 30-jährigen Mittelwerten sind in [Abbildung 6.12](#) für die vier Klimastationen die Saisonlängen und die Lage der vier Quartile für die einzelnen Jahre des Referenz- und des Zukunftszeitraums dargestellt. Anhand dieser Darstellungen lassen sich innerjährliche Verteilungen von potentiellen Badetagen und deren jährliche Abfolge gut erkennen.

In [Abbildung 6.12](#) zeigt ein erster Vergleich zwischen Referenzzeitraum und Zukunftszeitraum, dass sowohl die Saisonlängen als auch die Ausdehnung der mittleren beiden Quartile (graue Rechtecke) bei allen Stationen im Mittel zunehmen. Interessant ist dabei die teilweise erhebliche interannuelle Variation von Lage und Länge der potentiellen Badesaisons bzw. der mittleren beiden Quartile. Hier könnten weitergehende statistische Analysen (z.B. interannuelle zeitliche Autokorrelationsfunktionen) Aufschluss geben über die Ähnlichkeit bzw. Unähnlichkeit hinsichtlich von Lage und Länge aufeinander folgender Badesaisons. Diese Informationen dürften auch für die Tourismusbranche von wirtschaftlichem Interesse sein, da es eine Rolle spielt, ob in Zukunft eher mit einer Abfolge "extremer Badesaisons" (d.h. günstiger und ungünstiger) oder mit stetig günstiger werdenden Badebedingungen zu rechnen ist. Ähnliches gilt für die Variabilität der Lage von Beginn und Ende zukünftiger Badesaisons.

#### 6.4 Wandertourismus im Schwarzwald

In diesem Unterkapitel werden Untersuchungen zum Wandern als einer weiteren typischen sommertouristischen Aktivität für den südlichen Schwarzwald durchgeführt. In [Kapitel 6.4.1](#) wird das methodische Vorgehen erläutert, die Ergebnisse finden sich anschließend in [Kapitel 6.4.2](#).

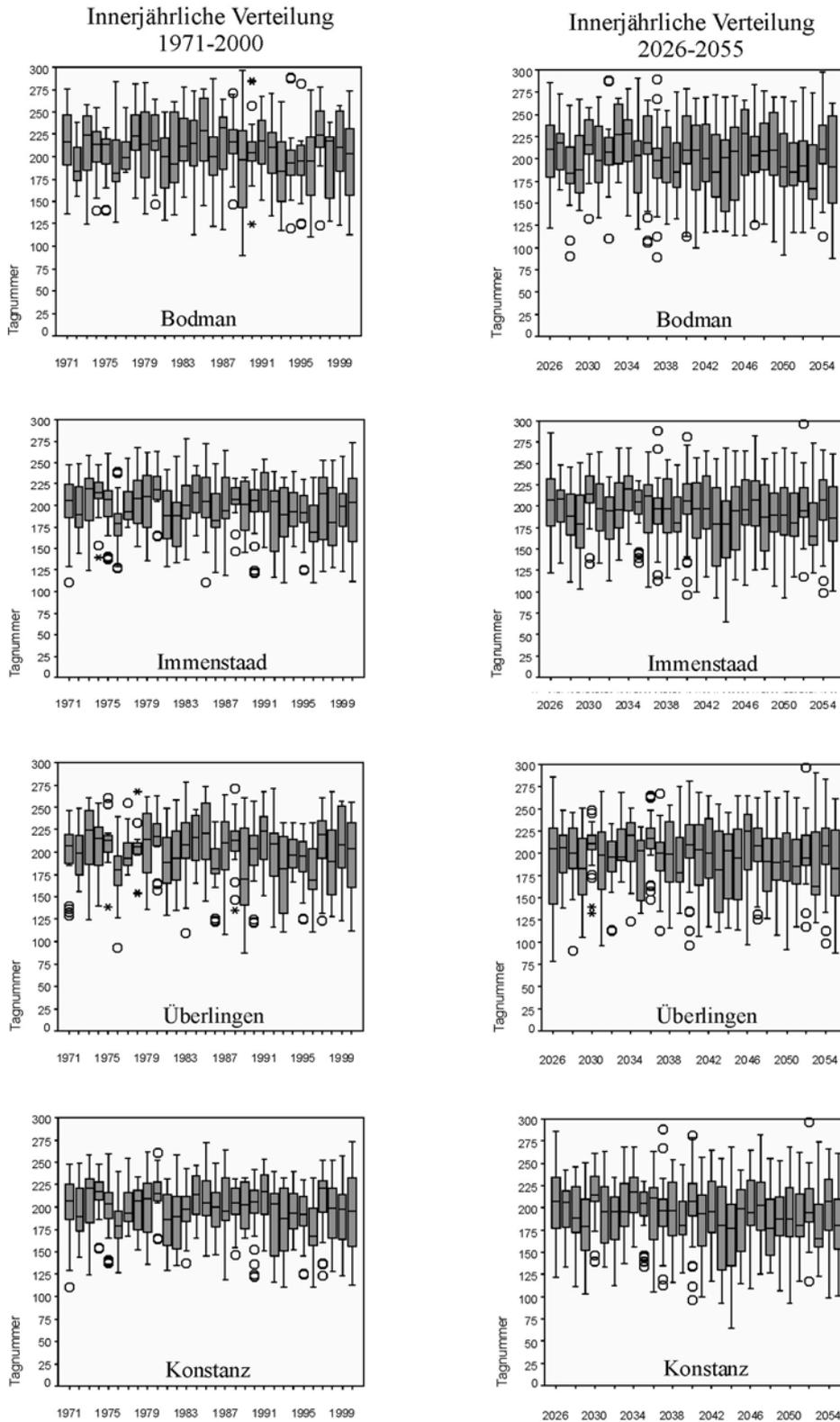


Abb. 6.12: Saisonlänge (schwarze Linien) und Lage der vier Quartile (graue Rechtecke: innere beiden Quartile, unterteilt durch den Median als kleine waagerechte Linie) für alle Jahre des Referenzzeitraums (1971-2000) und des Zukunftszeitraums (2026-2055) für die vier Stationen der Bodensee-Region. Ausreißerwerte sind gegebenenfalls durch Kreise (mehr als 1,5 Rechtecklängen außerhalb) und Sterne (mehr als 3 Rechtecklängen außerhalb) angezeigt.

### 6.4.1 Methode: Ermittlung wanderrelevanter Klimaparameter

Zunächst galt es auch hier diejenigen Klimaparameter zu ermitteln, die - aus Sicht der Akteure - für die klimatischen Wanderbedingungen von größter Bedeutung sind. Die Ermittlung dieser "wanderrelevanten" Klimaparameter erfolgte durch die Korrelation von statistisch erfassten Wanderaufkommen mit gleichzeitig in räumlicher Nähe dazu gemessenen Klimaparametern.

Die Datenerhebung zum Wanderaufkommen stellte sich als schwierig heraus. Letztendlich wurden die Daten zweier Erhebungen als Grundlage für die weiteren Untersuchungen herangezogen: zum einen Fahrgastzahlen spezieller Busse der SüdbadenBus GmbH im südlichen Schwarzwald (Freizeitbus Hinterzarten, WanderBus Wutachschlucht), zum anderen elektronische Besucherzählungen in der Wutachschlucht. Sowohl die Gegend um Hinterzarten als auch die Wutachschlucht sind beliebte Ausflugsregionen und zentrale Regionen des Wandertourismus im südlichen Schwarzwald.

Abbildung 6.13 zeigt die Lage von Hinterzarten und Wutachschlucht im südlichen Schwarzwald und die Lage der beiden nächstgelegenen Klimastationen (Hinterzarten, Löffingen), deren meteorologische Messdaten für die Korrelationsanalyse zwischen Wanderaufkommen und Wetterverhältnissen (siehe unten) verwendet wurden.

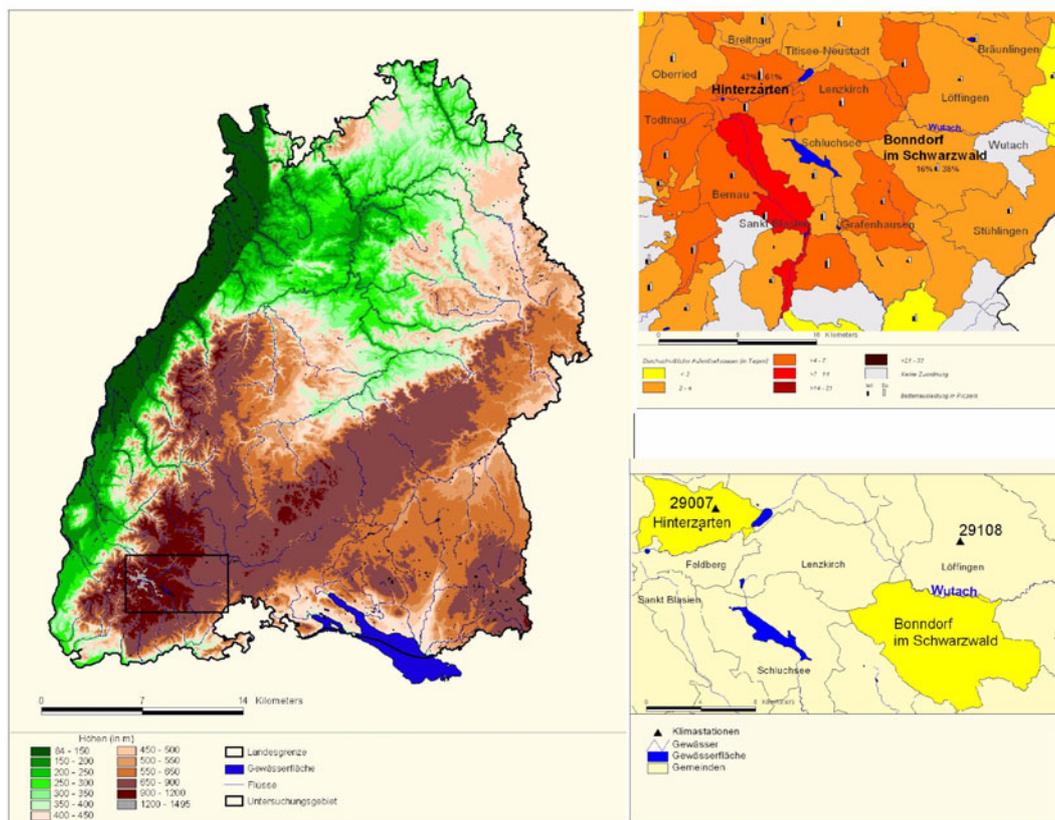


Abb. 6.13: Lage der Gemeinden Hinterzarten und Bonndorf (Wutachschlucht) sowie der verwendeten Klimastationen Hinterzarten (29007) und Löffingen (29108). Datengrundlage: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2001).

Zu den Daten der SüdbadenBus GmbH ist anzumerken, dass nicht direkt die Wanderer sondern lediglich tägliche Fahrgastzahlen der Sommersaisons 2000 und 2003 erfasst wurden<sup>7</sup>. Aufgrund des speziellen Angebots der Busse kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Mehrheit dieser Passagiere die Busse vorherrschend zur Naherholung und Wanderaktivitäten im weiteren Sinn nutzt.

In [Abbildung 6.14](#) ist das Histogramm und die Verteilung nach Wochentagen der täglichen Fahrgastzahlen des Freizeitbus Hinterzarten für die Sommersaison 2000 dargestellt. An 180 Tagen wurden insgesamt 5541 Karten verkauft, da viele Feiertage auf einen Donnerstag fielen, weist dieser Tag mit durchschnittlich 38 verkauften Tickets unter den Wochentagen den höchsten Wert auf, Spitzenreiter war der Himmelfahrts-Donnerstag mit insgesamt 119 verkauften Fahrkarten.

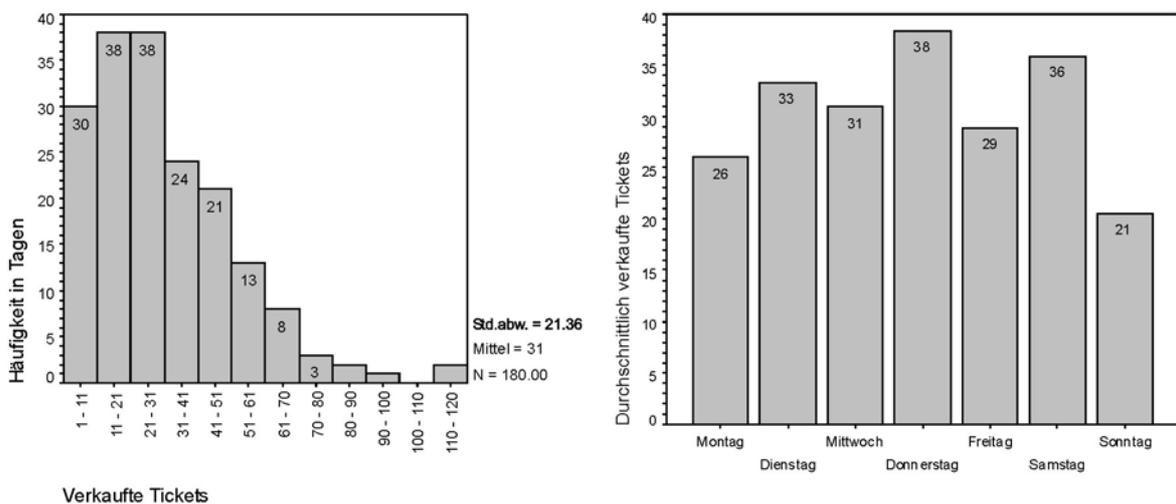


Abb. 6.14: Häufigkeitsverteilung registrierter Fahrkartenverkäufe im Freizeitbus Hinterzarten (links) sowie Auflistung der Ticketverkäufe nach Wochentagen (rechts) für die Sommersaison 2000.

[Abbildung 6.15](#) enthält dieselbe Darstellung für den WanderBus Wutachschlucht für die Sommersaison 2000. Dort gab es 57 Tage mit Fahrkartenverkäufen und insgesamt 1189 verkauften Karten. Im Mittel wurden 21 Fahrkarten pro Tag verkauft, auch hier wurden mit durchschnittlich 61 Stück die meisten Fahrgäste donnerstags registriert, das Maximum fällt wiederum auf den Himmelfahrts-Donnerstag mit 94 Tickets.

Die elektronischen Besucherzählungen in der Wutachschlucht werden von der Ortsgruppe Bonndorf des Schwarzwaldvereins durchgeführt. Gelegen auf einem Abschnitt des "Querweg Freiburg-Bodensee" stellt die Wutachschlucht ein attraktives Ausflugsziel dar. Im Jahre 1997 wurde hier eine Zählstelle installiert, bei deren Passierung jeder Wanderer unbemerkt einen Kontakt und somit einen Zählimpuls auslöst (Zapf, 1998). Aufgrund der so einfach wie möglich gehaltenen Konstruktion dieser Zählstelle ist es jedoch weder rekonstruierbar, in welche Richtung der Wanderer die Stelle passiert hat, noch wie

7. Leider können in den folgenden Auswertungen nur die Fahrgastzahlen der Sommersaison 2000 mit gemessenen Klimaparametern korreliert werden, da die Auswertungen für 2003 wegen der Aufbereitung der Messdaten der Klimastationen Hinterzarten und Löffingen zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen sind.

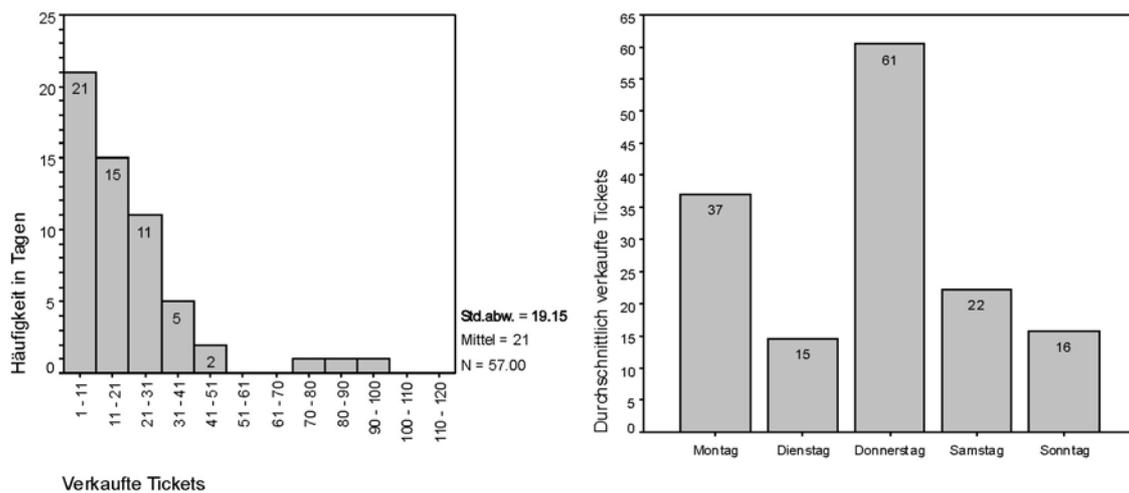


Abb. 6.15: Häufigkeitsverteilung registrierter Fahrkartenverkäufe im Wanderbus Wutachschlucht (links) sowie Auflistung der Ticketverkäufe nach Wochentagen (rechts) für die Sommersaison 2000.

diese Daten zeitlich zu separieren sind - der Zähler summiert jeden Kontakt auf. Daher ist es leider nicht möglich, die Rohdaten ausgewählter Tage, Monate oder Jahre zu beziehen. Die einzige Quelle sind somit die vom Schwarzwaldverein publizierten zusammenfassenden Auswertungen dieser Zählungen (Zapf, 1998; 2003; 2004). Die für die folgenden Untersuchungen notwendigen Tageswerte des Wandereraufkommens fanden sich lediglich für einige ausgewählte Tage der Sommersaison 1997 in Zapf (1998), alle anderen Publikationen verwiesen lediglich auf die Daten ausgewählter Monate.

Abbildung 6.16 enthält die elektronisch registrierten Besucherzahlen in der Wutachschlucht an ausgewählten Tagen der Sommersaison 1997, erweitert um die subjektive Charakterisierung der vorherrschenden Witterung durch den Autor (Zapf, 1998). Es wird wie zu erwarten deutlich, dass bei sonnig-warmem Wetter die meisten Besucher registriert wurden und deutlich weniger, wenn die Witterung als kühl oder gar mit Dauerregen charakterisiert wurde.

Im Folgenden werden nun Korrelationsanalysen zwischen den registrierten Wandereraufkommen (Fahrgäste/Besucherzählung) und den an den jeweiligen Tagen gemessenen 11 verfügbaren meteorologischen Parametern der beiden jeweils nächstgelegenen Klimastationen (Hinterzarten, Löffingen) durchgeführt werden, um die wanderrelevanten Klimaparameter zu identifizieren.

Tabelle 6.1 zeigt die Korrelationskoeffizienten zwischen dem Wandereraufkommen und den 11 meteorologischen Parametern für die drei untersuchten Datensätze: Hinterzarten (Fahrgastzahlen Freizeitbus Hinterzarten; Klimastation Hinterzarten) mit insgesamt 180 Tagen, Wutachschlucht I (Fahrgastzahlen WanderBus Wutachschlucht; Klimastation Löffingen) mit insgesamt 57 Tagen und Wutachschlucht II (elektronische Besucherzählung Wutachschlucht; Klimastation Löffingen) mit lediglich 8 ausgewerteten Tagen.

In Tabelle 6.1 sind die drei betragsmäßig größten Korrelationskoeffizienten pro Datensatz jeweils grau hinterlegt, falls sie statistisch signifikant sind ( $p < 0,05$ ). Für die weitere

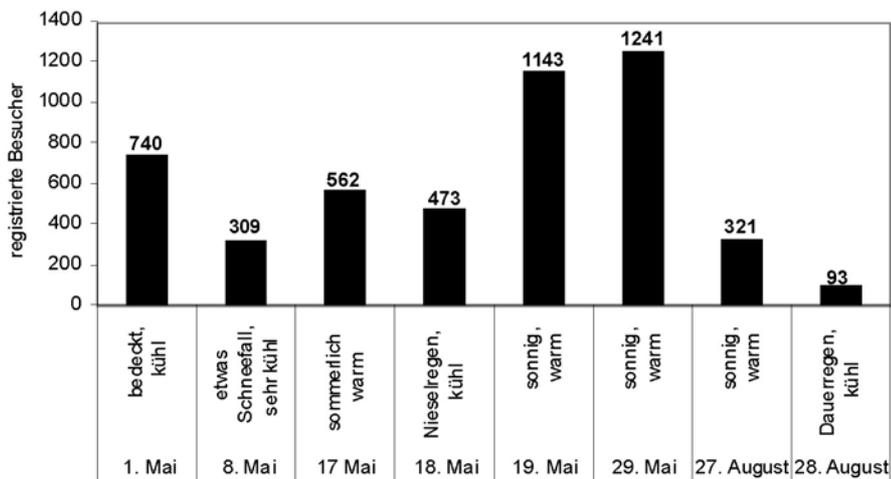


Abb. 6.16: Anzahl elektronisch registrierter Besucher in der Wutachschlucht an ausgewählten Tagen der Sommersaison 1997 und subjektive Charakterisierung der vorherrschenden Witterung durch den Autor (Zapf, 1998).

Analyse wurden - basierend auf diesen drei betragsmäßig größten Korrelationskoeffizienten der drei Datensätze - für jede der beiden Klimastationen jeweils die zwei wichtigsten wanderrelevanten Klimaparameter identifiziert. Diese sind in [Tabelle 6.1](#) schwarz eingerahmt. Für die Station Hinterzarten (Datensatz Hinterzarten) sind die beiden wichtigsten wanderrelevanten Klimaparameter die tägliche Maximaltemperatur und die tägliche Sonnenscheindauer, die beide eine positive Korrelation mit dem Wandereraufkommen aufweisen. Für die Station Löffingen (Datensätze Wutachschlucht I und II) sind die beiden wichtigsten wanderrelevanten Klimaparameter die relative Feuchte und die tägliche Sonnenscheindauer, wobei ersterer negativ und letzterer positiv mit dem Wandereraufkommen korreliert ist.

Tab. 6.1: Korrelationskoeffizienten zwischen dem Wandereraufkommen und den 11 verfügbaren meteorologischen Parametern für die drei Datensätze Hinterzarten (180 Tage), Wutachschlucht I (57 Tage) und Wutachschlucht II (8 Tage); weitere Erläuterungen im Text, für die Abkürzungen der meteorologischen Parameter siehe [Kapitel 2](#).

	Tage	TMAX	TMIT	TMIN	NIED	RELF	LUDR	DADR	SONN	BEWO	STRA	WIND
Hinterzarten (Station 29007)												
Korrelationskoef.	1	0.43	0.34	0.02	-0.30	-0.20	0.27	0.15	0.39	-0.35	0.31	-0.22
Sig.niv. p (2-seitig)	.	0.00	0.00	0.81	0.00	0.01	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
Wutachschlucht I (Station 29108)												
Korrelationskoef.	1	0.23	0.21	-0.02	-0.16	-0.30	0.08	0.10	0.30	-0.21	0.26	-0.06
Sig.niv. p (2-seitig)	.	0.09	0.12	0.90	0.23	0.02	0.54	0.45	0.02	0.11	0.05	0.65
Wutachschlucht II (Station 29108)												
Korrelationskoef.	1	0.21	0.05	-0.33	-0.49	-0.88	0.76	-0.31	0.79	-0.60	0.83	0.14
Sig.niv. p (2-seitig)	.	0.61	0.91	0.42	0.22	0.00	0.03	0.46	0.02	0.12	0.01	0.73

Die statistischen Zusammenhänge zwischen Wandereraufkommen und den beiden jeweils wichtigsten Klimaparametern werden im Folgenden für die drei Datensätze genauer untersucht. **Abbildung 6.17** zeigt die einzelnen Datenpunkte und die Regressionsgerade für die beiden Klimaparameter tägliche Sonnenscheindauer und relative Feuchte in Abhängigkeit der Fahrgastzahlen für den Datensatz Hinterzarten. Der Zusammenhang zwischen Fahrgastzahlen und den beiden Klimaparametern ist zwar statistisch signifikant, aber die Streuung ist relativ groß.

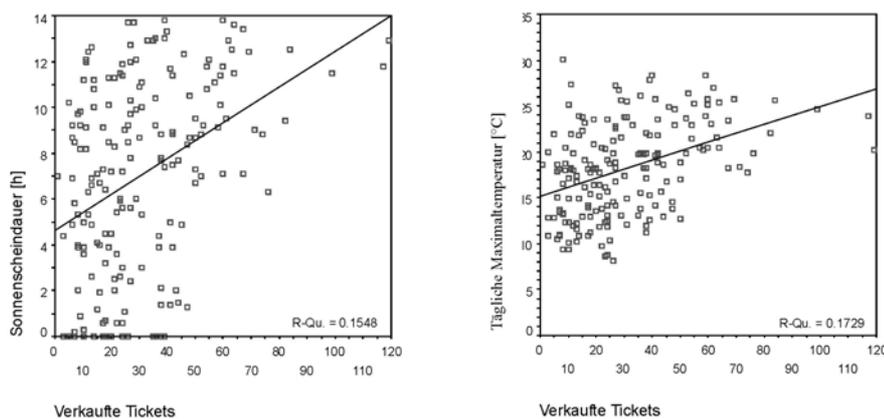


Abb. 6.17: Zusammenhang zwischen den beiden Klimaparametern tägliche Sonnenscheindauer (links) und tägliche Maximaltemperatur (rechts) und den Fahrgastzahlen samt Regressionsgerade für den Datensatz Hinterzarten (Sommersaison 2000, insgesamt 180 Tage).

In **Abbildung 6.18** ist dieselbe Darstellung für den Datensatz Wutachschlucht I verwendet. Auch hier ergibt sich aus dem visuellen Eindruck, dass der Zusammenhang zwischen Fahrgastzahlen und den beiden Klimaparametern tägliche Sonnenscheindauer und relative Feuchte sehr unscharf ist. Insbesondere ist zu erkennen, dass die drei Tage mit sehr hohen Fahrgastzahlen (in der Abbildung eingekreist) die Lage und Steigung der

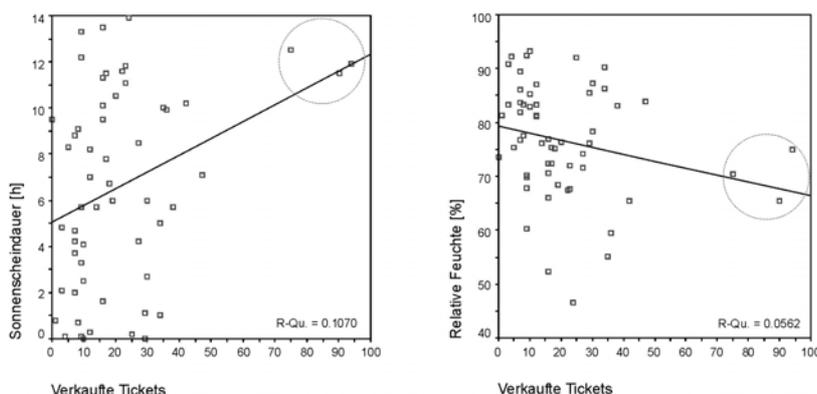


Abb. 6.18: Zusammenhang zwischen den beiden Klimaparametern tägliche Sonnenscheindauer (links) und relative Feuchte (rechts) und den Fahrgastzahlen samt Regressionsgerade für den Datensatz Wutachschlucht I (Sommersaison 2000, insgesamt 57 Tage).

Regressionsgerade stark beeinflussen. Werden die drei Tage von der Regressionsanalyse ausgeschlossen, sinken Regressionskoeffizient und statistische Signifikanz erheblich.

Abbildung 6.19 zeigt den Zusammenhang zwischen den Besucherzahlen und den beiden Klimaparametern tägliche Sonnenscheindauer und relative Feuchte für den Datensatz Wutachschlucht II. Hier erscheinen die Zusammenhänge deutlicher: je größer die tägliche Sonnenscheindauer und je kleiner die relative Feuchte, umso mehr registrierte Besucher. Allerdings ist dieser Zusammenhang wegen der geringen Zahl der Datenpunkte (8 Tage der Sommersaison 1997) nicht sehr belastbar.

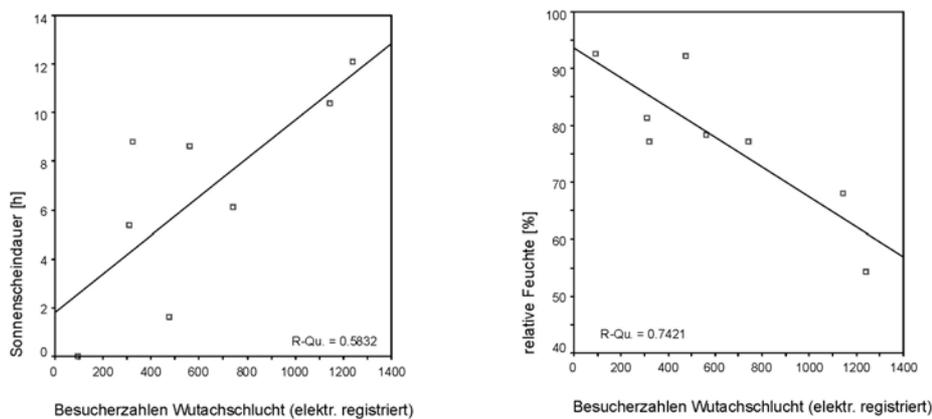


Abb. 6.19: Zusammenhang zwischen den beiden Klimaparametern tägliche Sonnenscheindauer (links) und relative Feuchte (rechts) und den registrierten Besucherzahlen samt Regressionsgerade für den Datensatz Wutachschlucht II (Sommersaison 1997, insgesamt 8 Tage).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich - ausgehend von den durchgeführten Analysen der vorliegenden drei Datensätze - folgende meteorologischen Größen als wanderrelevante Klimaparameter identifizieren lassen: die tägliche Maximaltemperatur (positive Korrelation), die relative Feuchte (negative Korrelation) und vor allem die tägliche Sonnenscheindauer (positive Korrelation).

Diese Korrelationen sind zwar bei allen drei Datensätzen statistisch signifikant ( $p < 0,05$ ), jedoch konnte [Abbildung 6.17](#) bis [Abbildung 6.19](#) entnommen werden, dass die Streuung in den einzelnen Regressionen erheblich ist und zudem die Größe des Datensatzes gerade bei den deutlichsten Zusammenhängen sehr klein ist. Darüber hinaus sind Schwellenwerte für einzelne wanderrelevante Klimaparameter - ähnlich wie bei der Definition des potentiellen Badetages in [Kapitel 6.3](#) - aus keinem der drei Datensätze statistisch ableitbar. Auf die Definition eines potentiellen Wandertages wird daher an dieser Stelle verzichtet.

Möglicherweise können jedoch ausgehend von einer breiteren Datenbasis und eventuell mit Hilfe der Methode der multiplen Regressionsanalyse (bei der der Einfluss der einzelnen Klimaparameter nicht separat, sondern im Zusammenwirken untersucht wird) in einer zukünftigen Untersuchung doch noch Hinweise auf klimatische Schwellenwerte erhalten werden. Andererseits könnte sich bei der Auswertung der vorhandenen Daten bereits angedeutet haben, dass die Freizeitaktivität Wandern deutlich schwieriger an

konkrete Witterungsbedingungen zu knüpfen ist als das bei der freizeitorientierten Nutzung von Frei- und Seebädern der Fall war. Zu groß sind beim Wandern zum einen die individuellen Anpassungsmöglichkeiten durch Faktoren wie Kleidung und Schuhwerk und zu verschieden sind zum anderen die subjektiven klimatischen Präferenzen. Beispielsweise schrecken Niederschläge die einen in ihrer Wanderabsicht nicht ab, während andere wiederum eine trockene Witterung und Sonnenschein vorziehen. Dass letzteres auf die Mehrheit der Wanderer zutrifft, lässt sich aus den vorliegenden Daten zumindest der Tendenz nach erkennen.

#### 6.4.2 Ergebnisse

Eine mögliche Veränderung der drei wanderrelevanten Klimaparameter tägliche Maximaltemperatur, relative Feuchte und tägliche Sonnenscheindauer unter Klimawandel wird mit Hilfe der täglichen Klimadaten aus dem Basisszenarium (betrachteter Zeitraum: 1971-2000) und aus dem Zukunftsszenarium (betrachteter Zeitraum: 2026-2055) untersucht. Dazu werden der Trend der Jahresmittelwerte und der mittlere jahreszeitliche Verlauf der drei wanderrelevanten Klimaparameter für beide Zeiträume (Referenzzeitraum und Zukunftszeitraum) miteinander verglichen.

Zunächst wurden die drei wanderrelevanten Klimaparameter auf Trends ihrer Jahresmittelwerte untersucht. [Abbildung 6.20](#) zeigt die Jahresmittelwerte von täglicher Sonnenscheindauer und relativer Feuchte an der Station Löffingen in der Region Wutachschlucht (obere Hälfte) und täglicher Sonnenscheindauer und täglicher Maximaltemperatur an der Station Hinterzarten (untere Hälfte) jeweils für den Referenzzeitraum (linke Hälfte) und den Zukunftszeitraum (rechte Hälfte). Zusätzlich sind die Regressionsgeraden eingezeichnet sowie der Spearman-Korrelationskoeffizient und dessen Signifikanz angegeben.

Aus [Abbildung 6.20](#) wird ersichtlich, dass statistisch signifikante Trend-Aussagen innerhalb der beiden 30-jährigen Untersuchungszeiträume nur sehr eingeschränkt möglich sind. Für den Zukunftszeitraum ist lediglich eine leichte Zunahme der Sonnenscheindauer an der Station Löffingen statistisch signifikant ( $p = 0,05$ ). Für den Referenzzeitraum weist der Verlauf der täglichen Maximaltemperatur an der Station Hinterzarten einen signifikanten Trend auf ( $p = 0,001$ ). Betrachtet man zusammenfassend für beide Stationen die vier Trends im Zukunftszeitraum (rechte Hälfte in [Abbildung 6.20](#)), so lässt sich erkennen, dass tägliche Sonnenscheindauer und tägliche Maximaltemperatur zunehmen, während die relative Feuchte abnimmt - allerdings meist ohne statistische Signifikanz. Es kann also zurückhaltend und vorsichtig formuliert werden, dass die zukünftige Entwicklung dieser drei wanderrelevanten Klimaparameter - unter Berücksichtigung ihrer in [Kapitel 6.4.1](#) empirisch ermittelten Korrelationen mit dem Wandereraufkommen - durchweg eher günstigere Witterungsbedingungen für den Wandertourismus erwarten lassen.

Im Weiteren wird nun der jahreszeitliche Verlauf der drei wanderrelevanten Klimaparameter einer genaueren Untersuchung hinsichtlich möglicher Veränderungen unter Klimawandel unterzogen, um diese auf mögliche saisonale Verschiebungen oder Anomalien hin zu prüfen. Für die Station Hinterzarten ist in [Abbildung 6.21](#) der mittlere jahreszeitliche Verlauf der beiden wanderrelevanten Klimaparameter tägliche Maximaltemperatur und tägliche Sonnenscheindauer für Referenzzeitraum (1971-2000) und Zukunftszeitraum (2026-2055) dargestellt.

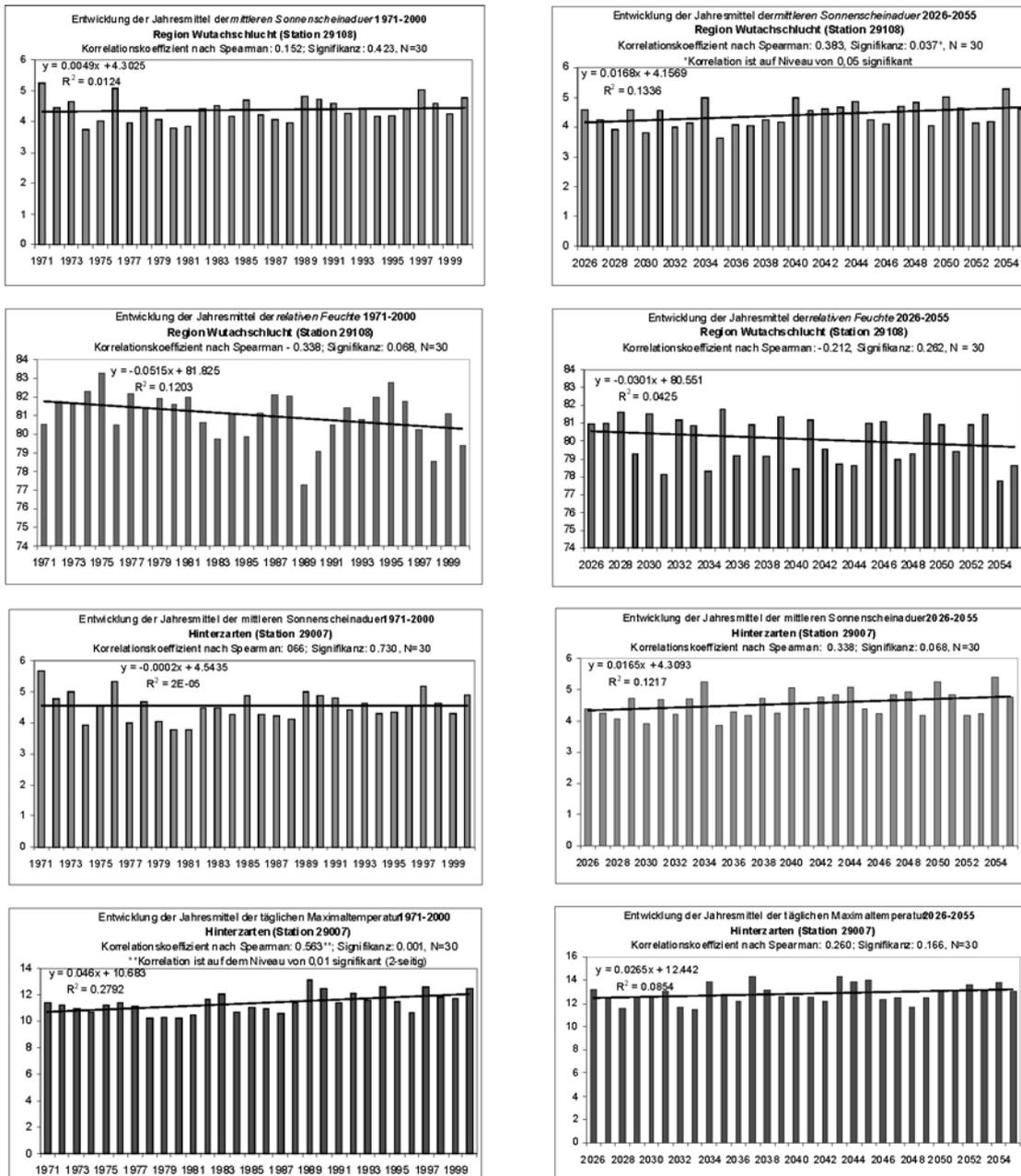


Abb. 6.20: Jahresmittelwerte von täglicher Sonnenscheindauer und relativer Feuchte an der Station Löffingen (29108) (obere Hälfte) und täglicher Sonnenscheindauer und täglicher Maximaltemperatur an der Station Hinterzarten (29007) (untere Hälfte) jeweils für den Referenzzeitraum (1971-2000) (linke Hälfte) und den Zukunftszeitraum (2026-2055) (rechte Hälfte). Zusätzlich sind jeweils die Regressionsgeraden eingezeichnet sowie der Spearman-Korrelationskoeffizient und dessen Signifikanz angegeben.

Deutliche zukünftige Zunahmen im Vergleich zum Referenzzeitraum lässt die tägliche Maximaltemperatur erwarten (Abbildung 6.21, unten links). Während der Sommersaison wird die tägliche Maximaltemperatur - bis auf jeweils kurze Zeiträume Anfang August, Ende August und Ende Oktober - im 30-jährigen Mittel um mindestens 1 °C zunehmen. Bezüglich dem jahreszeitlichen Verlauf der täglichen Sonnenscheindauer lassen sich in den Differenzen der 30-jährigen Mittel aus Referenz- und Zukunftszeitraum keine eindeutigen Tendenzen erkennen. Am hervorstechendsten ist die Zunahme der mittleren

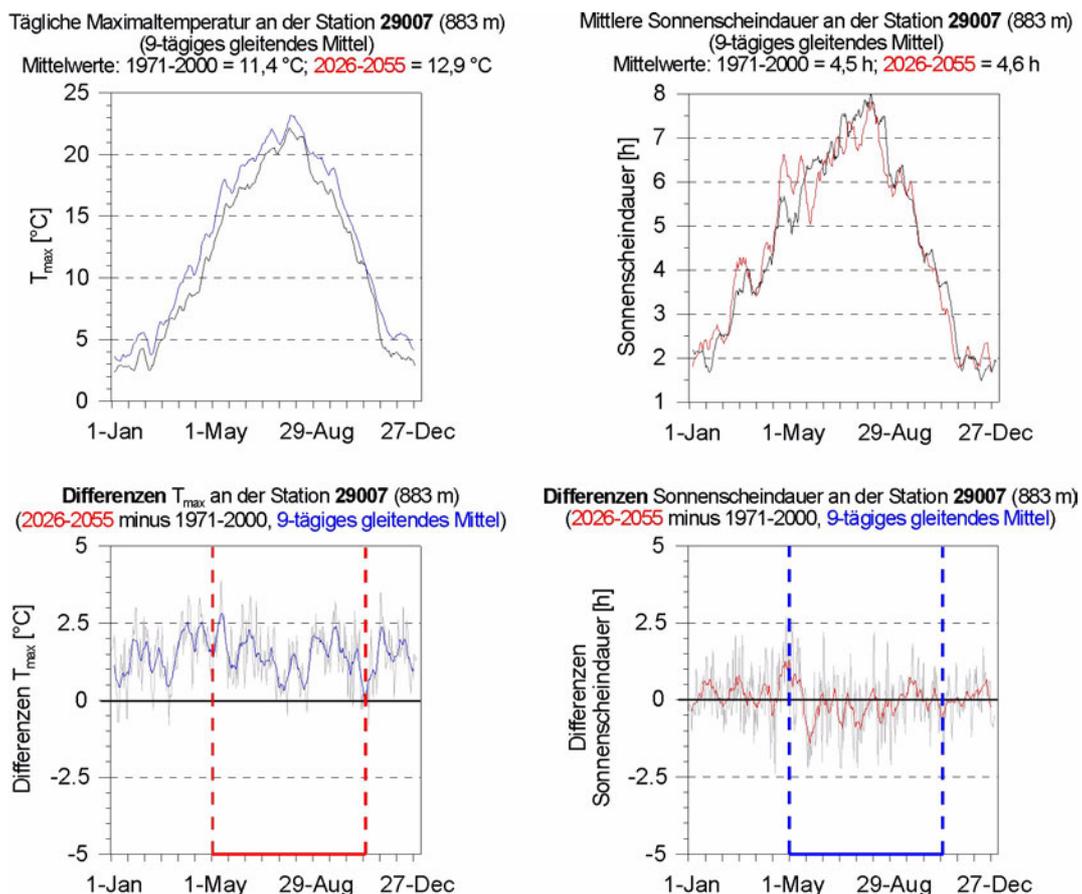


Abb. 6.21: Mittlerer jahreszeitlicher Verlauf (9-tägiges gleitendes Mittel aus dem 30-jährigen Mittelwert von Tagesdaten) von täglicher Maximaltemperatur und täglicher Sonnenscheindauer an der Station Hinterzarten (29007) in Referenzzeitraum (1971-2000) und Zukunftszeitraum (2026-2055) (obere beiden Diagramme) sowie Differenz zwischen Referenz- und Zukunftszeitraum (untere Diagramme).

täglichen Sonnenscheindauer von Mitte April bis Mitte Mai um bis zu 1,5 Stunden, während von Mitte Mai bis Anfang Juni mit einer Abnahme um bis zu 1 Stunde zu rechnen ist (Abbildung 6.21, unten rechts).

Für die Station Löffingen ist in [Abbildung 6.22](#) der mittlere jahreszeitliche Verlauf der beiden wanderrelevanten Klimaparameter relative Feuchte und tägliche Sonnenscheindauer für Referenzzeitraum (1971-2000) und Zukunftszeitraum (2026-2055) dargestellt.

Es wird deutlich, dass für das Zukunftsszenarium von einer insgesamt niedrigeren relativen Feuchte ausgegangen werden kann ([Abbildung 6.22](#), unten links). Während der Sommersaison zeigt sich jedoch zwischen Mitte Mai und Mitte Juni eine Zunahme des 30-jährigen Mittels der relativen Feuchte. Hinsichtlich des jahreszeitlichen Verlaufs der täglichen Sonnenscheindauer ([Abbildung 6.22](#), unten rechts) sind - ähnlich wie bei der Station Hinterzarten - kaum systematische Veränderungen zwischen Referenz- und Zukunftszeitraum zu erkennen. Beim Vergleich der beiden 30-jährigen Mittel treten die auffälligsten Veränderungen zwischen Mitte April und Mitte Mai (Zunahme um bis zu 1,5 Stunden) und zwischen Mitte Mai und Anfang Juni (Abnahme um bis zu 1,5 Stunden) auf.

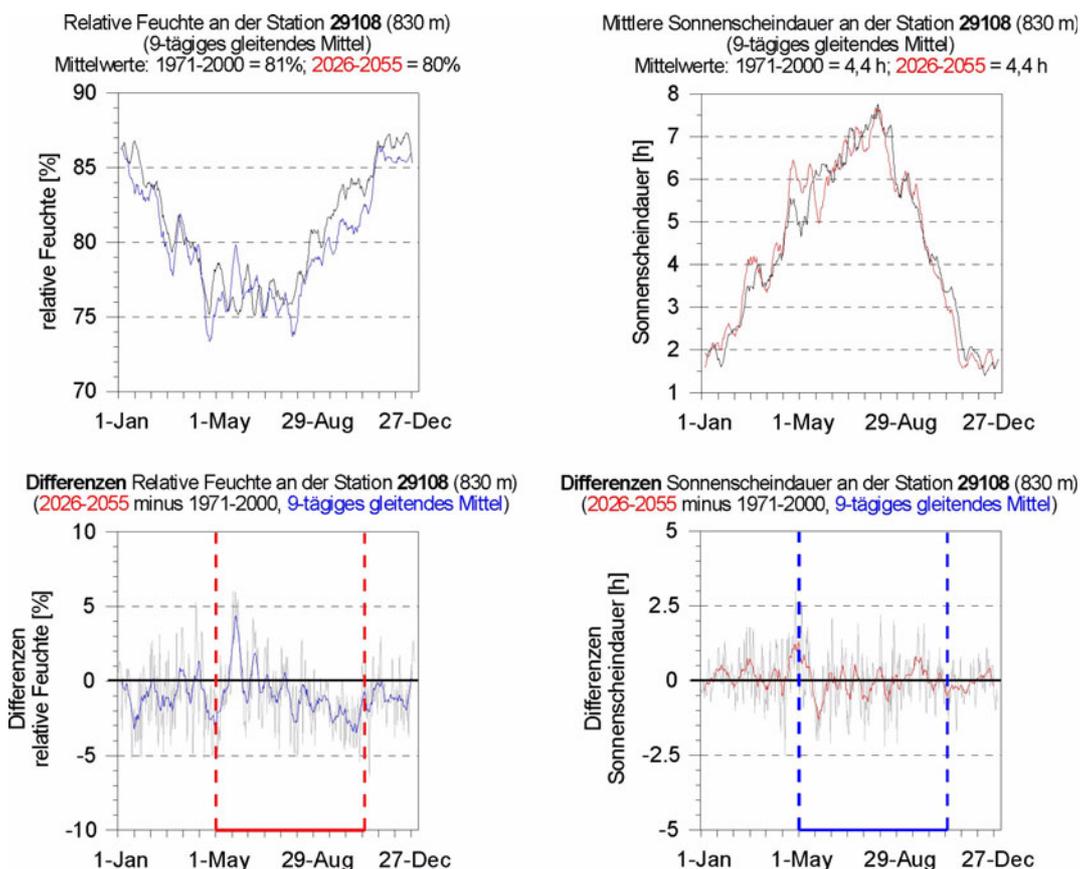


Abb. 6.22: Mittlerer jahreszeitlicher Verlauf (9-tägiges gleitendes Mittel aus dem 30-jährigen Mittelwert von Tagesdaten) von relativer Feuchte und täglicher Sonnenscheindauer an der Station Löffingen (29108) in Referenzzeitraum (1971-2000) und Zukunftszeitraum (2026-2055) (obere beiden Diagramme) sowie Differenz zwischen Referenz- und Zukunftszeitraum (untere Diagramme).

Im Falle von täglicher Maximaltemperatur und relativer Feuchte sind die Ergebnisse des Vergleichs der 30-jährigen Mittel des jahreszeitlichen Verlaufs der wanderrelevanten Klimaparameter mit den vorhergehenden Trendanalysen in Einklang. Sie stützen somit Hinweise auf eine zukünftige Verbesserung der Witterungsbedingungen für den Wandertourismus.

### 6.5 Ausblick

In diesem Ausblick sollen einige Problembereiche angesprochen werden, die in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt wurden bzw. noch einer eingehenderen Untersuchung bedürfen. Sie könnten Gegenstand einer nachfolgenden Studie zum Thema Klimawandel und Sommertourismus in Baden-Württemberg sein.

(1) Die Bestimmung tourismusrelevanter Klimaparameter und zugehöriger Schwellenwerte für sommertouristische Aktivitäten sollte durch die statistische Auswertung von weiterem empirischen Datenmaterial (das teilweise inzwischen vorliegt) und unter Verwendung zusätzlicher statistischer Analysemethoden (z. B. multiple Regressionsanalyse) weiter objektiviert und verbessert werden.

(2) Die Analyse der Veränderung der statistischen Eigenschaften tourismusrelevanter Klimaparameter unter Klimawandel kann deutlich erweitert werden. Insbesondere die intersaisonale Abfolge von für sommertouristische Aktivitäten "günstigen" und "ungünstigen" Jahren wäre hier für die Tourismusbranche von Interesse. Methodisch bieten sich dazu Autokorrelationsanalysen an, im Falle des Badetourismus könnten z.B. Lage und Länge der Badesaison auf ihre intersaisonale Autokorrelation hin untersucht werden.

(3) Zur tiefergehenden Abschätzung der Sensitivität des Tourismussektors in Baden-Württemberg gegenüber Klimawandel können zum einen weitere typische Aktivitäten in den sommertouristischen Schwerpunktregionen identifiziert und untersucht werden. Zum anderen könnten Informationen zum sogenannten grauen Beherbergungsmarkt (Betriebe mit weniger als 9 Betten) und zum Campingtourismus die Lage der sommertouristischen Schwerpunktregionen - das sind gleichzeitig die in diesem Zusammenhang sensitivsten Regionen - modifizieren. Besonders der Campingtourismus ist vermutlich in hohem Maße klimaabhängig und bietet zudem Anlass zur Untersuchung spezifisch campingtouristischer Aktivitäten (z.B. könnte ein "potentieller Grillabend" durch Schwellenwerte von Klimaparametern definiert und die Veränderung seines Auftretens unter Klimawandel untersucht werden).

(4) Schließlich sollte auch darauf eingegangen werden, wie die Akteure im Tourismussektor auf den möglichen Klimawandel reagieren können (Adaptation). Als mögliche Anpassungsmaßnahme kommt z.B. die Ausrichtung des touristischen Angebots auf ganzjährige und wetterunabhängige Aktivitäten in Frage. Ein Trend in diese Richtung zeichnet sich bereits ab (z.B. Wellness-Bereich) - auch um der natürlichen Klimavariabilität zu begegnen. In diesem Zusammenhang sind u.a. die ökonomischen, sozialen und kulturellen Bedingungen zu untersuchen, unter denen solche Umstrukturierungen möglich sind, d.h. die Einschätzung der sogenannten "adaptive capacity".



## 7 NATURSCHUTZ

### 7.1 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden Ergebnisse zu den Auswirkungen der Klimaveränderungen im Verlauf der letzten 30 Jahre auf Zug- und Brutverhalten sowie auf Artenzusammensetzung und Verbreitungsgebiete von Vögeln in Südwestdeutschland dargestellt. Diese Daten sind exemplarische Indikatoren für die Auswirkungen auf Ökosysteme. Eine ausführliche Darstellung findet sich in Anhang 7.

Die Analyse einer langjährigen Beobachtungsreihe (1970-2003) der Erstankunftszeiten von 17 Zugvogelarten an 13 verschiedenen Orten in Südwestdeutschland ergab, dass sich die Ankunft um durchschnittlich 3 bis 5 Tage pro zehn Jahre verfrühte. Frühere Ankunftsdaten wurden nicht nur bei Kurz-, sondern auch bei Langstreckenziehern festgestellt, allerdings nicht im gleichen Ausmaß. Es wird vermutet, dass die frühere Ankunft darauf zurückzuführen ist, dass sich die Überwinterungsgebiete vieler Arten nach Norden verschoben haben. Das steht in Einklang mit der allgemeinen Tendenz, dass Langstreckenzieher (südlich der Sahara) zu Kurzstreckenziehern (Mittelmeerraum) und Kurzstreckenzieher zu Standvögeln werden. Der Wegflug im Spätsommer verzögert sich bei 9 von 19 getesteten Arten des langjährigen Datensatzes (1972-2003) der Fangstation Mettnau am Bodensee, nur bei zwei Arten wurde eine frühere Ankunft festgestellt. Verspätungen im Herbst sind demnach die deutlich häufiger anzutreffende Verhaltensänderung, allerdings konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen Lang- und Kurzstreckenziehern beobachtet werden.

Zur Untersuchung der Veränderung des Brutverhaltens wurden brutbiologische Daten der Vogelwarte Radolfzell (1971-2002) für vier Arten statistisch ausgewertet. Während bei zwei Arten (Amsel, Hausrotschwanz) kein zeitlicher Trend beobachtet wurde, konnte bei Blaumeise und Halsbandschnäpper ein früherer Legebeginn (ca. 3 Tage in zehn Jahren) festgestellt werden. Beim Halsbandschnäpper wurde eine höhere Gelegegröße und ein höherer Schlüpfertag beobachtet. Der zeitlich frühere Beginn des Brütens wirkt sich also positiv aus. Allerdings ist ein früherer Brutbeginn nicht ohne Risiko, da im Frühjahr auch kurzzeitig ungünstige Witterungsverhältnisse auftreten können und möglicherweise noch nicht genug Nahrung vorhanden ist.

Die Auswirkung der Klimaerwärmung auf die Artenzusammensetzung und -verbreitung wurde anhand der Brutvogel-Rasterkartierungen der Ornithologischen Arbeitsgemeinschaft Bodensee untersucht. Die Bestandsveränderungen zwischen 1980 und 2000 wurden zu Zugverhalten, Bruthabitat und Nord-Südverbreitung der Arten in Beziehung gesetzt. Letztere wurde als Mittelpunkt zwischen Nord- und Südgrenze der Areale in Europa berechnet. Wie auch bei früheren Auswertungen hat sich gezeigt, dass die Bestandsrückgänge vor allem bei Langstreckenziehern und Vögeln des Offenlandes besonders stark ausfielen. Erstmals wurde festgestellt, dass die Bestandsveränderungen unabhängig von Zugverhalten und Bruthabitat auch von der Nord-Südverbreitung abhängen. Südlich verbreitete Arten nahmen zu, während nördlich verbreitete nicht so stark abgenommen haben, wie ursprünglich vermutet. Die Ergebnisse machen deutlich, dass sich Vogelmenschen aufgrund der Klimaerwärmung stark verändern werden und deshalb ein "konservierender" Naturschutz in Zukunft kaum noch möglich sein wird.

Das Verhalten von Vögeln ist aufgrund ihrer hohen Mobilität ein empfindlicher Indikator für die Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme. Auf der Basis der gesammel-

ten Daten erscheinen weitere Untersuchungen zum bisherigen Verhalten von Ökosystemen allgemein und möglichen zukünftigen Entwicklungen sinnvoll.

## 7.2 Einführung

Während des vergangenen Jahrhunderts hat sich das globale Klima um 0.6° erwärmt und die Erkenntnis wächst, dass Klimaveränderungen Ökosysteme stark beeinflussen (Walther et al., 2002). Die Veränderungen sind vor allem in den letzten Jahrzehnten festzustellen und betreffen alle ökologische Ebenen: Populationen, Arten, Ökosysteme. Diese Veränderungen haben folglich auch Konsequenzen für den Naturschutz. Klimaveränderungen können zu Änderungen der Phänologie, Verschiebungen von geografischen Arealen und dem Aussterben kleiner und isolierter Populationen führen. Neue Arten wandern ein, vorhandene Arten verschwinden. Davon sind auch Schutzbemühungen um Arten und Lebensräume betroffen.

Um die Effekte der Klimaveränderungen auf Ökosysteme untersuchen zu können, werden experimentelle Ansätze ebenso gewählt wie theoretische Modelle. Daneben bleibt die Analyse langfristiger Beobachtungsreihen ein wichtiges Instrumentarium, um langfristige Trends und Muster erkennen zu können.

Im Folgenden werden die Auswirkungen des Klimawandels während der letzten 30 Jahre exemplarisch am Beispiel von Vögeln untersucht. Dazu wurden keine eigenen Experimente oder Feldbeobachtungen durchgeführt, sondern bereits vorhandene langfristige Beobachtungsreihen aus Südwestdeutschland im Hinblick auf Klimaveränderungen ausgewertet.

Die durchgeführten Analysen beziehen sich auf das Zugverhalten häufiger Brutvogelarten (Kapitel 7.3), auf das Brutverhalten ausgewählter Arten (Kapitel 7.4) und auf Veränderungen von Artenzusammensetzung und Verbreitungsgebieten von Brutvögeln (Kapitel 7.5). Ausgehend von diesen Ergebnissen werden in Kapitel 7.6 die Folgen der Klimaveränderungen für die Vogelwelt diskutiert und einige sich daraus ergebende Konsequenzen für den Naturschutz dargestellt.

## 7.3 Veränderungen im Zugverhalten häufiger Brutvogelarten

Infolge der globalen Erwärmung und der damit veränderten regionalen Klimalage ist in den letzten Jahrzehnten ein deutlicher Temperaturanstieg erkennbar, was u.a. zu Veränderungen in der Phänologie des Zugverhaltens von Vögeln führt. Dabei kommt es häufig zu einer Verfrühung der Ankunftsdaten im Frühjahr (vgl. Lehikoinen et al., 2004), während bezüglich der Durchzugszeiten während des Wegzugs im Herbst meist weniger eindeutige Trendaussagen gemacht werden können.

Das Zugverhalten an sich wird weitgehend durch die Tageslängen gesteuert, die zeitliche "Feinabstimmung" erfolgt jedoch vielfach über die Temperatur (Coppack & Pulido, 2004). Berthold et al. (1990) haben zudem gezeigt, dass sich das endogene Zugprogramm durch Selektion in wenigen Generationen verändern kann. Der Selektionsvorteil liegt dabei klar auf der Hand: die Reduzierung langer, energieaufwändiger und risikoreicher Zugstrecken. Die milder gewordenen Winter in Europa haben hier beispielsweise erfolgreiche Überwinterungen in größerer Zahl ermöglicht. Das gilt besonders für Kurz-, aber auch für manche Langstreckenzieher. Solche Populationen kommen im Frühjahr zeitiger in Mitteleuropa an und haben dadurch Vorteile gegenüber Spätziehern.

### 7.3.1 Erstankunftszeiten im Frühjahr

Frühere Ankunftsdaten wurden schon aus den verschiedensten Regionen von Europa und Nordamerika nachgewiesen (*Lehikoinen et al., 2004*). Der Schwerpunkt bisheriger Studien lag jedoch in Skandinavien und England, in Regionen mit einem deutlich atlantisch geprägten Klima. Aus Süddeutschland liegen nur wenige Untersuchungen vor, obwohl ausreichend Datenmaterial vorhanden ist. In der vorliegenden Analyse werden Beobachtungsreihen einzelner Feld-Ornithologen aus Baden-Württemberg ausgewertet, die seit über 30 Jahren immer im selben Gebiet beobachtet haben.

#### 7.3.1.1 Methode

Um die langfristigen Trends der Ankünfte häufiger Brutvogelarten zu untersuchen, wurden die Beobachtungsreihen von 14 Feld-Ornithologen an 13 verschiedenen Orten zu den Erstankünften von insgesamt 17 häufigen Brutvogelarten im Zeitraum 1970-2003 herangezogen (insgesamt 104 Beobachtungsreihen). Bei der Auswahl der Beobachtungsreihen wurde u.a. darauf geachtet, dass die Beobachter in diesem Zeitraum keinen Wohnortwechsel vorgenommen haben und die Beobachtungsreihen möglichst lückenlos sind. Die Beobachtungsorte sind weit gestreut und stammen aus verschiedenen Landes-teilen.

Getestet wurde für jede einzelne Beobachtungsreihe, ob sich die Ankünfte zwischen 1970 und 2003 verschoben haben. Zur Trendanalyse wurden zwei statistische Verfahren verwendet:

(1) Regressionsanalyse: Mit einer einfachen Regressionsanalyse wurde getestet, ob die Steigung der Regressionsgeraden signifikant von Null verschieden war. Die Steigung der Geraden ist gut interpretierbar. Sie gibt wieder, um wie viele Tage sich die Ankunft durchschnittlich verfrüht (negative Werte) oder verspätet hat (positive Werte). Eine Steigung von -0.100 bedeutet also, dass sich die Ankünfte um durchschnittliche 0,1 Tage pro Jahr verfrüht haben. Die Berechnung der Regressionsgeraden wird jedoch stark von Extremwerten beeinflusst, so dass "Ausreißer" ins Gewicht fallen.

(2) Differenz der Mediane: Um Extremwerte weniger zu gewichten, wurde zusätzlich der U-Test nach Mann-Whitney benutzt (*Zar, 1999*). Hierzu wurde die Beobachtungsperiode in eine frühe (1970-1986) und eine späte Periode (1987-2003) unterteilt und mit Hilfe des U-Tests getestet, ob diese von einander verschieden waren. Da dieser Test auf Rangzahlen und nicht auf den tatsächlich festgestellten Daten beruht, ist er wenig anfällig gegenüber "Ausreißern".

Um darüber hinaus Unterschiede zwischen Lang- und Kurzstreckenziehern zu analysieren, wurden jeweils die Steigungen der Regressionsgeraden bzw. die Differenz der Mediane aller Arten miteinander verglichen. Als Langstreckenzieher galten Schwarzmilan, Kuckuck, Mauersegler, Rauch- und Mehlschwalbe, Nachtigall, Gartenrotschwanz, Teichrohrsänger, Klapper- und Gartengrasmücke, Fitis und Grauschnäpper, als Kurzstreckenzieher Ringeltaube, Hausrotschwanz, Singdrossel, Mönchsgrasmücke und Zilpzalp. Mit einer hierarchischen Varianzanalyse wurde geprüft, ob sich die Steigung der Regressionsgeraden bzw. die Differenz der Mediane zwischen Lang- und Kurzstreckenziehern unterscheidet.

### 7.3.1.2 Ergebnisse

Als ein repräsentatives Beispiel sind in [Abbildung 7.1](#) die Erstankünfte im Zeitraum 1970-2003 (samt Regressionsgerade) für die Mehlschwalbe für zwei verschiedene Standorte dargestellt. Man erkennt deutlich die regionale Variabilität der Erstankünfte: durchschnittlich wurde die Mehlschwalbe in Tübingen etwa 20 Tage früher beobachtet als in Stutensee.

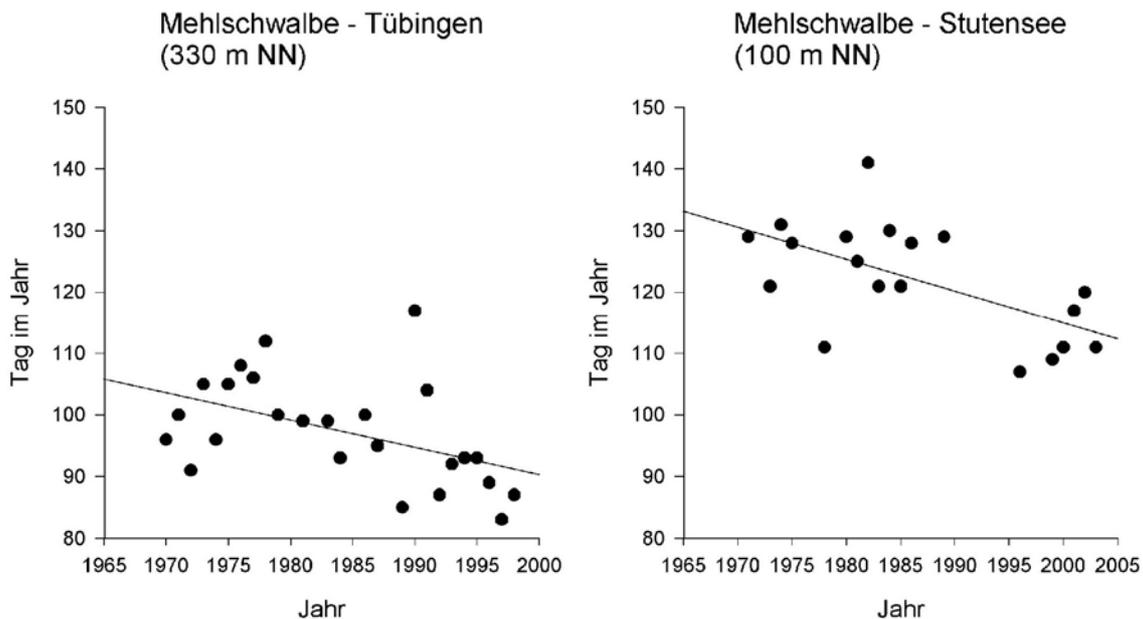


Abb. 7.1: Erstankünfte im Zeitraum 1970-2003 für die Mehlschwalbe an den Standorten Tübingen (links) und Stutensee (rechts).

Die gesamten Ergebnisse der Regressionsanalyse sind in [Tabelle 7.1](#) zusammengestellt. Für 96 der 104 Beobachtungsreihen ergab sich eine frühere Ankunft (negative Steigung der Regressionsgeraden) und nur für 8 eine spätere Ankunft (positive Steigung der Regressionsgeraden). Insgesamt war die Steigung bei 58 Beobachtungsreihen signifikant negativ ( $p = 0,05$ ) während sie nur bei einer signifikant positiv war (Nachtigall, Remstal). Die durchschnittliche Steigung aller Beobachtungsreihen lag bei  $-0,33$ , d.h. eine frühere Ankunft um ca. 3 Tage in 10 Jahren.

Die Analyse der Differenz der Mediane führte zu sehr ähnlichen Ergebnissen wie die Regressionsanalyse. Die Differenz der Erstankunftsdaten zwischen 1970-1986 und 1987-2003 war bei 93 Beobachtungen negativ (frühere Erstankunft) und nur bei 7 positiv. In vier Fällen waren die Mediane exakt gleich. Der U-Test ergab, dass in 67 Fällen die Mediane der zwei Zeiträume signifikant verschieden waren. Dabei wurde immer eine frühere Erstankunft im späteren Zeitraum festgestellt. Die durchschnittliche Differenz (Mittelwert) der Mediane von allen Beobachtungsreihen lag bei  $-5,5$  Tagen.

Tab. 7.1: Vorzeichen des Trends der Erstankunftszeiten im Zeitraum 1970-2003 von 17 Brutvogelarten an 13 Standorten. Symbole: -/+ bedeutet signifikant ( $p = 0,05$ ) frühere/spätere Erstankunftszeiten, Trends in Klammern sind nicht signifikant. Standorte: Stutensee/Karlsruhe (Stu), Ellwangen (Ell), Remstal (Rem), Göppingen (Göp), Gingen/Fils (Gin), Tübingen (Tüb), Eningen/Reutlingen (Eni), St. Georgen (Geo), Sigmaringen (Sig), Bad Buchau (Buc), Radolfzell (Rad), Konstanz (Kon), Lindau (Lin).

	Stu	Ell	Rem	Göp	Gin	Tüb	Eni	Geo	Sig	Buc	Rad	Kon	Lin
Schwarzmilan						-			-	-	-		
Ringeltaube			(-)			(-)	-	-					-
Kuckuck	(-)		-			(+)				-			
Mauersegler	(-)		(-)		-			-	-	-	-	-	(-)
Rauchschwalbe	(+)		-		(-)	(-)		-	-	-	-		(-)
Mehlschwalbe	-		(-)		-	-		-		-	(-)		(-)
Nachtigall	(-)		+			(-)					(-)		
Hausrotschwanz	-		-	(-)	-	-	-	-		(-)	-		-
Gartenrotschwanz			-	(-)	(-)			(-)					
Singdrossel					(-)		(-)						(-)
Teichrohrsänger			(-)							-	-	(-)	
Klappergrasmücke	(-)		(-)		(+)			(-)					(-)
Gartengrasmücke	-		(+)		-			-					
Mönchsgrasmücke	-	-	-	-	-	-	(-)	-		-	-		-
Zilpzalp	(-)		-		-	-	-	-		(-)			-
Fitis	(-)		(-)		(+)	(-)		(-)		(-)	(-)		(+)
Grauschnäpper			-		(-)			(+)					(-)

Betrachtet man beide Methoden zusammen, so ergibt sich, dass bei fast allen Arten mindestens zwei Beobachtungsreihen signifikant frühere Erstankünfte aufwiesen. Lediglich bei Nachtigall, Gartenrotschwanz, Singdrossel, Fitis und Grauschnäpper wurden keine oder nur bei einer Beobachtungsreihe signifikant frühere Erstankünfte festgestellt.

Beide Maße für die veränderten Ankunftszeiten (Steigung der Regressionsgeraden und Differenz der Mediane) zeigten, dass die Verfrühung bei den Kurzstreckenziehern signifikant stärker ausgeprägt ist als bei den Langstreckenziehern.

### 7.3.1.3 Diskussion

Aus Süddeutschland liegen bisher nur wenige Untersuchungen über die Veränderungen des Zugverhaltens im Frühjahr vor. Beispielsweise konnte *Boschert (2004)* für den Großen Brachvogel zeigen, dass sich die Mittelwerte der Ankunftsdaten vom 1. März (1977-1989) auf den 25. Februar (1990-2003) verschoben haben. *Lehikoinen et al. (2004)* haben in einem Übersichtsartikel über bisher publizierte Beobachtungsreihen eine durchschnittliche frühere Ankunft von 0,37 Tagen pro Jahr festgestellt. Das entspricht erstaunlich gut dem hier festgestellten Wert von 0,33 Tagen pro Jahr.

Generell gibt es drei Möglichkeiten, wie es Vögel schaffen, früher im Brutgebiet anzukommen:

- Das Überwinterungsareal hat sich in Richtung Brutgebiet verschoben (*Fiedler im Druck*), wofür es etliche Beispiele gibt (s.o.),
- Die Zuggeschwindigkeit hat zugenommen (z.B. Zunahme des Südwest-Winde),
- Der Zug beginnt früher.

Natürlich schließen sich die Ursachen nicht aus. Allein durch Untersuchung von lokalen Ankunftsdaten kann nicht zwischen ihnen differenziert werden. Erschwerend kommt hinzu, dass es kaum Angaben über den Abzug im Überwinterungsgebiet gibt.

Eine frühere Ankunft ist keineswegs nur bei Kurzstreckenziehern zu beobachten, sondern auch bei Langstreckenziehern wie Mauersegler, Rauch- und Mehlschwalbe. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch *Lehikoinen et al. (2004)*. Es wird aber deutlich, dass die Verfrühung der Erstankünfte bei Kurzstreckenziehern deutlich stärker ausfällt als bei Langstreckenziehern. Dies könnte damit erklärt werden, dass die Steuerung beim Langstreckenflug deutlich stärker endogen erfolgt als beim Kurzstreckenflug (*Berthold, 1996*). Dennoch ist erstaunlich, dass die Effekte bei den Langstreckenziehern so deutlich ausfielen, da das Winterareal von Transsahara-Ziehern in deutlich von Mitteleuropa verschiedenen Klimazonen liegt. Allerdings überwintern inzwischen einzelne Populationen dieser Arten nördlich der Sahara (Weißstorch, Rauch- und Mehlschwalbe).

Bei Kurzstreckenziehern wird deutlich, dass einzelne Arten bereits im Brutgebiet überwintern. Einzelbeobachtungen aus dem hier untersuchten Datenmaterial machen dies deutlich. Januar-Nachweise wurden bei Ringeltaube, Hausrotschwanz, Singdrossel, Mönchsgrasmücke und Zilpzalp registriert. Sie wurden jedoch bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt. Eine genauere Untersuchung bzw. gute Dokumentation der wahrscheinlich steigenden Zahl von Überwinterungsversuchen von Kurzstreckenziehern steht noch aus.

### 7.3.2 Wegzugszeiten und Verweildauer im Spätsommer

In jüngerer Zeit wurden für zahlreiche standardisiert betriebene Vogelberingungsstationen in Mitteleuropa Änderungen in den jährlichen Fangmustern beschrieben (vgl. *Fiedler, 2003*). Während die Durchzugszeiten im Frühjahr mit wenigen Ausnahmen generell dazu tendieren, sich unter der derzeitigen Klimaerwärmung nach vorne zu verschieben, sind Durchzugszeiten während des Wegzuges je nach Art und Station entweder vor- oder zurückverschoben oder über viele Jahre hinweg unverändert. Es stellen sich also folgende Fragen:

- Führen die höheren Temperaturen zu einem früheren Wegzug, da die Zugvögel bereits früher im Jahr das Rastgebiet verlassen?
- Verringert sich die Aufenthaltsdauer der Rastvögel?
- Sind die genannten Effekte besonders ausgeprägt bei Lang- im Vergleich zu Kurzstreckenziehern?

### 7.3.2.1 Methode

Die hier dargestellte Analyse wurde an Daten der Beringungsstation Mettnau (Radolfzell am Bodensee, Südwestdeutschland) aus den Jahren 1972-2003 durchgeführt. Auf dieser Station werden in 52 Stellnetzen zu je 7 m unter standardisierten Bedingungen zwischen 30. Juni und 6. November jeden Jahres rastende Kleinvögel gefangen. Diese Rast kann nur bis zum darauffolgenden Abend oder aber mehrere Tage dauern. Durch Wiederfänge bereits markierter Individuen lassen sich minimale Rastdauern erfassen. Weitere Details zur Methode und Fragestellung siehe *Berthold & Schlenker (1975)*.

Für jede der 19 untersuchten Kleinvogelarten wurde anhand der Pentadensummen für die Fangsaison die Durchzugszeit definiert und die früher liegenden Fänge, die eindeutig auf lokale Brutvögel und deren Nachwuchs zurückzuführen sind, wurden eliminiert. Die Definition der Durchzugszeit ist in [Abbildung 7.2](#) exemplarisch für den Fitis dargestellt. Es wurden nur Daten von Vögeln verwendet, die während der definierten Durchzugszeit gefangen wurden.

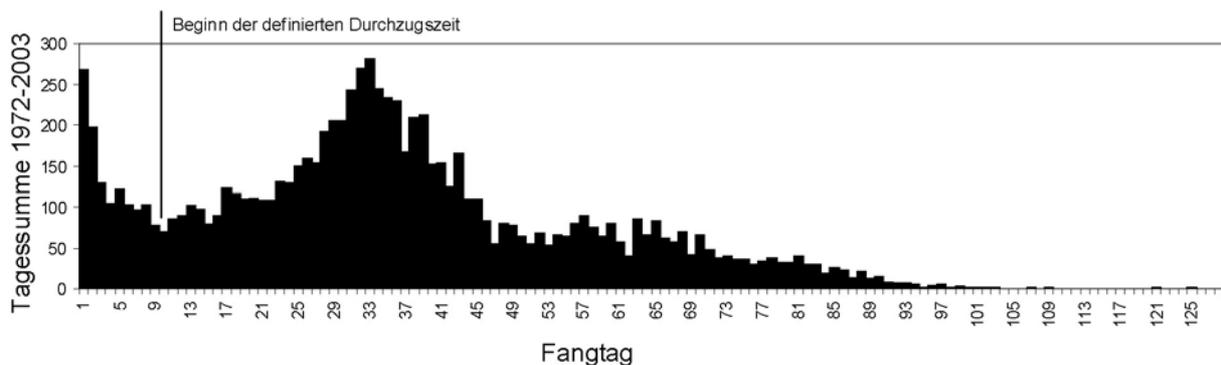


Abb. 7.2: Tagessummen 1972-2003 des Fitis auf der Halbinsel Mettnau mit dem Beginn der definierten Durchzugszeit (Tag 1 = 30. Juni).

**Lage der Perzentile:** Für jedes Jahr mit  $n > 10$  wurde der Tag der Fangsaison berechnet, an dem 5%, 20%, 50%, 80% und 95% der Jahresfangsummen der jeweiligen Art erreicht wurden (Tag 1 = 30. Juni). Die Trends der Lage dieser fünf Perzentile über den Zeitraum 1972-2003 wurden mittels linearer Regression bestimmt.

Mit einigen Ausnahmen mussten Daten von Alt- und Jungvögeln gemeinsam analysiert werden, da der Anteil altersbestimmter Fänglinge zwischen 1972 und 2003 um ein Vielfaches zunahm und zu Beginn der Arbeit auf der Mettnau mangels verfügbarer Literatur und Erfahrung sehr gering war. Der Anteil nicht diesjähriger Vögel liegt ohnehin nur je nach Art im Bereich zwischen 3% und 10% aller Fänglinge.

**Rastdauer:** Die Analyse der Rastdauern erfolgte in Form einer Berechnung der minimalen Verweildauer. Diese beschreibt den zeitlichen Abstand zwischen dem ersten Fang eines Individuums und seinem letzten Fang innerhalb desselben Jahres. Diese Methode lässt allerdings mögliche Änderungen der Wiederfangwahrscheinlichkeit außer Acht und ist daher relativ grob.

### 7.3.2.2 Ergebnisse

Lage der Perzentile: In [Abbildung 7.3](#) sind die Trends der Lage der fünf Perzentile im Zeitraum 1972-2003 exemplarisch für die Dorngrasmücke und die Gartengrasmücke dargestellt. Bei der Dorngrasmücke sind alle fünf Perzentile nach hinten verschoben (davon vier signifikant), während bei der Gartengrasmücke vier Perzentile nach vorne verschoben sind (davon zwei signifikant).

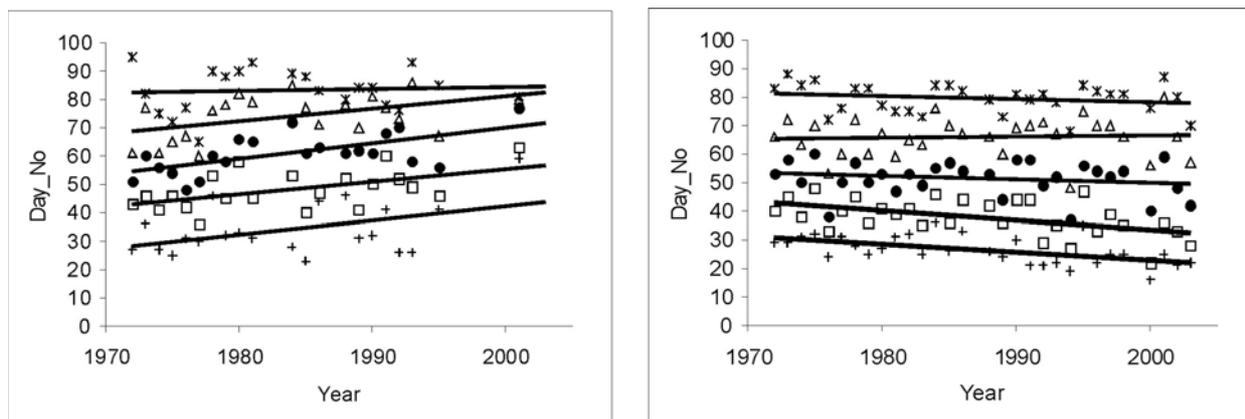


Abb. 7.3: Trends der Lage der Perzentile (5%: +; 20%: Quadrat; 50%: Kreis; 80%: Dreieck; 95%: Stern) beim Herbstzug (samt Regressionsgeraden) für die Dorngrasmücke (links) und die Gartengrasmücke (rechts) auf der Halbinsel Mettnau im Zeitraum 1972-2003 (Tag 1 = 30. Juni).

[Tabelle 7.2](#) fasst die statistisch signifikanten Verschiebungen (in Tagen pro 10-Jahres-Zeitraum) für alle untersuchten 19 Kleinvogelarten zusammen.

Von 19 untersuchten Singvogelarten zeigten 9 Arten komplette oder teilweise Verschiebungen der Durchzugsmuster nach hinten und bei 8 Arten konnten auf dem 95%-Signifikanzniveau keine zeitlichen Verschiebungen festgestellt werden. Bei 2 Arten wurde eine Verschiebung eines Teiles des Durchzugsmusters nach vorne gefunden, was zusätzlich auch für den auf der Mettnau stark ausgeprägten "Vorzug-Gipfel" bei der Mönchsgrasmücke der Fall war. Auffällig ist, dass beide Arten mit teilweise verfrühter Durchzugszeit zu den Langstreckenziehern zählen (Gartengrasmücke, Grauschnäpper). Andererseits befinden sich jedoch auch unter den verspäteten Arten mit den beiden Rohrsängerarten, Feldschwirl, Fitis und Grasmücken Langstreckenzieher.

Zur Frage, ob langstreckenziehende Arten (Winterquartiere südlich der Sahara) und kurzstreckenziehende Arten (Winterquartiere im Mittelmeerraum) sich in den beobachtbaren Änderungen der Durchzugszeiten voneinander unterscheiden, wurden die auf dem 10%-Signifikanzniveau abgesicherten Trends ausgewertet. Aus den Trends der Lage der einzelnen Perzentile (5%, 20%, 50%, 80%, 95%) wurden hierzu Mittelwerte pro Art gebildet und dann artweise den beiden Gruppen "Langstreckenzieher" und "Kurzstreckenzieher" zugeordnet. Unterschiede bei Änderungen von Langstreckenziehern gegenüber Kurzstreckenziehern treten dabei nicht zutage mit Ausnahme der schon oben genannten Tatsache, dass die beiden Arten mit deutlichen Verfrühungen im Durchzug zu den Langstreckenziehern zählen.

Tab. 7.2: Statistisch signifikante Trends der Lage der Perzentile beim Herbstzug auf der Halbinsel Mettnau im Zeitraum 1972-2003 (Angabe der Verschiebung in Tagen pro 10-Jahreszeitraum).

Art	5%-Perz.	20%-Perz.	50%-Perz.	80%-Perz.	95%-Perz.
Drosselrohrsänger	-	-	-	-	-
Schilfrohrsänger	+ 2,4	+ 3,3	+ 5,5	-	-
Teichrohrsänger alle	-	-	-	-	-
Teichrohrsänger Altvögel	-	-	-	-	-
Teichrohrs. Jungvögel	-	-	+ 3,7	+ 2,9	+ 4,3
Rohrammer	-	-	-	-	-
Rotkehlchen alle	-	-	-	-	-
Rotkehlchen Altvögel	-	-	+ 6,6	+ 7,5	+ 4,8
Rotkehlchen Jungvögel	-	-	-	-	+ 6,1
Feldschwirl	+ 4,2	+ 9,8	+ 7,7	+ 5,5	+ 5,1
Grauschnäpper	-	- 8,2	-	-	-
Hausrotschwanz	-	-	-	-	-
Gartenrotschwanz	-	-	-	-	-
Zilpzalp	-	-	-	-	-
Fitis	+ 2,7	-	+ 5,1	+ 6,9	+ 4,2
Heckenbraunelle	-	-	-	-	-
Mönchsgrasm. Zugzeit	-	-	-	-	-
Mönchsgr. Vorzugzeit	- 0,8	- 1,6	- 2,1	-	-
Gartengrasmücke	- 2,9	- 3,4	-	-	-
Dorngrasmücke	+ 5,0	+ 4,5	+ 5,5	+ 4,4	-
Klappergrasmücke alle	-	+ 4,5	+ 5,2	+ 4,8	+ 2,8
Klappergrasm. 1. Zeitraum	-	-	-	-	-
Klappergrasm. 2. Zeitraum	+ 2,2	+ 2,2	+ 2,6	+ 3,6	+ 2,1
Zaunkönig	-	-	-	-	-
Amsel	-	+ 2,9	+ 3,5	+ 2,5	-
Singdrossel	+ 5,6	+ 2,8	+ 3,9	+ 2,8	+ 3,8

Rastdauer: Lediglich bei den beiden Arten mit dem größten Stichprobenumfang (Rotkehlchen, Teichrohrsänger) sind in einem Vergleich der mittleren minimalen Verweildauern signifikante Unterschiede zwischen den Jahren 1972-1985 und 1986-2003 nachweisbar. Demnach wäre die mittlere minimale Rastdauer beim Rotkehlchen um einen Tag zurückgegangen und hätte sich beim Teichrohrsänger um einen Tag verlängert. Bei allen anderen Arten ergaben sich keine Hinweise auf veränderte Rastdauern. Inwieweit die Ergebnisse bei Rotkehlchen und Teichrohrsänger eine biologische Grundlage haben, wird derzeit mit der wesentlich aufwändigeren Fang-Wiederfang-Statistik (Hochachka & Fiedler, in Vorbereitung) überprüft.

## 7.4 Veränderungen der Brutbiologie ausgewählter Arten

Bei etlichen Vogelarten kann aufgrund von Klimaveränderungen bereits ein früherer Brutbeginn beobachtet werden (*Crick & Sparks, 1999; Dunn, 2004*). Da auch die Insekten als ektotherme Organismen in ihrem Schlupfzeitpunkt und ihren Aktivitäten stark von höheren Temperaturen profitieren, führt dies zu einer früheren maximalen Nahrungsvfügbarkeit. Dies könnte bewirken, dass infolge der Klimaerwärmung ein früherer Brutbeginn langfristig Vorteile hat. Ebenso ist es denkbar, dass ein verfrühter Brutbeginn zu einem verlängerten Brutfenster führt und damit die Möglichkeit für Mehrfach- oder Ersatzbruten erweitert und so zu einem höheren Fortpflanzungserfolg führt. Umgekehrt können aber auch Wirkungsketten entkoppelt werden, z.B. wenn es einem Langstreckenzieher nicht gelingt, seine Ankunftszeit so nach vorne zu verschieben, dass er der Verfrühung des maximalen Insektenangebotes folgen kann.

Wie auch im Fall der Erstankunftsdaten von Zugvögeln gibt es kaum Informationen aus Süddeutschland über zeitliche Veränderungen des Legebeginns und durchschnittliche Gelegegröße oder Schlüpferfolg. *Reyher (2004)* hat beim Feldsperling zwar keine signifikanten Unterschiede der Gelegegröße zwischen den einzelnen Jahren festgestellt. Der Schlüpferfolg ging jedoch drastisch zurück. Ob dies aber mit einer Klimaerwärmung oder aber mit der Verschlechterung der Habitatqualität zusammenhängt, bleibt unklar.

Um den Einfluss der Klimaveränderung auf die Brutbiologie einzelner Arten untersuchen zu können, sind Langzeitbeobachtungen notwendig. Dazu wurde die brutbiologische Datensammlung der Vogelwarte Radolfzell auszugsweise elektronisch erfasst und das Datenmaterial analysiert. Es wird der Frage nachgegangen, ob ein früherer Brutbeginn festgestellt werden kann und wie sich Gelegegröße und Schlüpferfolg im Zeitraum 1971-2002 verändert haben.

### 7.4.1 Methode

Die brutbiologischen Daten der Vogelwarte Radolfzell wurden im Rahmen brutbiologischer Freilanduntersuchungen gesammelt und auf sogenannten "Nestkarten" festgehalten. Die Datenreihen der vier Arten Blaumeise, Halsbandschnäpper, Amsel und Hausrotschwanz waren genügend lang und vollständig und konnten für den Zeitraum 1971-2002 hinsichtlich des Trends von Legebeginn (erstes Ei im Nest), Gelegegröße und Schlüpferfolg (Zahl der geschlüpften Jungvögel) ausgewertet werden. Den Datenreihen liegen Aufzeichnungen von insgesamt sieben ehrenamtlichen Mitarbeitern der Vogelwarte Radolfzell im Raum Reutlingen, in der westlichen Bodensee-Region und im Raum Mannheim zugrunde. Zur Berechnung des zeitlichen Trends wurde eine lineare Regression mit Kovarianzanalyse durchgeführt.

### 7.4.2 Ergebnisse

[Abbildung 7.4](#) zeigt Legebeginn, Gelegegröße und Schlüpferfolg im Zeitraum 1974-2002 exemplarisch für den Halsbandschnäpper. Der Legebeginn ist statistisch signifikant nach vorne verschoben, eine lineare Regression ergibt, dass die Vögel pro Jahr rund 0,3 Tage früher Eier legen bzw. brüten. Die Gelegegröße und der Schlüpferfolg weisen einen steigenden Trend auf, wobei nur letzterer statistisch signifikant ist.

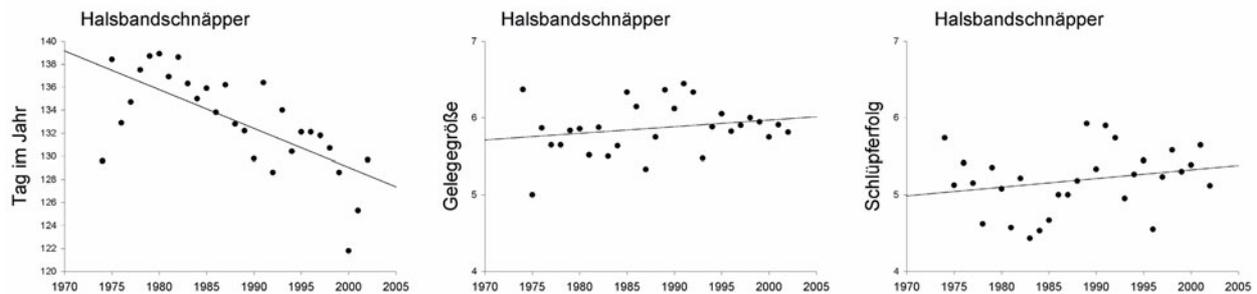


Abb. 7.4: Legebeginn (links), Gelegegröße (Mitte) und Schlüpfertag (rechts) für den Halsbandschnäpper im Zeitraum 1974-2002 im Raum Reutlingen samt Regressionsgeraden.

Bei der Blaumeise wurde ebenfalls ein signifikant früherer Legebeginn gefunden (0,3 Tage pro Jahr). Dies hatte aber offensichtlich keine signifikante Auswirkung auf Gelegegröße und Schlüpfertag ( $p > 0.05$ ).

Bei Amsel und Hausrotschwanz konnte bei keiner der untersuchten Variablen ein signifikanter zeitlicher Trend festgestellt werden.

### 7.4.3 Diskussion

Bei zwei der vier untersuchten Arten wurde ein früherer Legebeginn festgestellt. Das ist in Übereinstimmung mit Untersuchungen aus Großbritannien, wo 53% der 57 untersuchten Arten einen Langzeittrend aufwiesen (Crick & Sparks, 1999; Dunn, 2004). Es gibt jedoch auch Gegenbeispiele. Visser *et al.* (1998) haben gezeigt, dass bei der Kohlmeise kein früherer Legebeginn festgestellt wurde. In einer umfangreichen Studie über Blau- und Kohlmeisen in sechs Ländern wurde nur in fünf der 13 Populationen der Blaumeise und drei der 11 Populationen der Kohlmeise ein signifikant früherer Legebeginn festgestellt (Visser *et al.*, 2003). In unserer Untersuchung konnte für die Blaumeise klar eine Verfrühung des Legebeginns festgestellt werden. Dies hatte jedoch keinen Effekt auf Gelegegröße und Schlüpfertag. Beim Halsbandschnäpper konnte eine Verfrühung des Legebeginns und eine Zunahme zumindest des Schlüpfertages festgestellt werden. Da ein früherer Legebeginn beim Halsbandschnäpper aufgrund des "Kalendereffektes" (photoperiodischer Effekt) zu einem größeren Gelege führt (Lack, 1968), könnte damit der marginal signifikante Anstieg der Gelegegröße erklärt werden. Einen Zusammenhang zwischen Brutbeginn und Gelegegröße hat bereits Hölzinger (1997) beim Halsbandschnäpper in Baden-Württemberg gefunden. Deutlicher als der Anstieg der Gelegegröße war die Zunahme des Schlüpfertages. Allerdings bleibt unklar, ob der Brutertag des Halsbandschnäppers insgesamt zunimmt.

Eine Verfrühung des Legebeginns muss nicht notwendigerweise mit einer früheren Ankunft im Brutgebiet verbunden sein, zumal bei Langstreckenziehern wie dem Halsbandschnäpper. Die Ergebnisse in Kapitel 7.3.1 zeigen aber, dass auch Langstreckenzieher eine frühere Ankunft aufweisen. Aus den dort generierten Daten gibt es auch eine Beobachtungsreihe zum Halsbandschnäpper, die deutlich zeigt, dass auch diese Art eine signifikant frühere Erstankunft aufwies.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es derzeit keinen Hinweis auf negative Effekte der Klimaerwärmung auf die Brutbiologie der vier untersuchten Arten gibt. Allerdings muss eingeschränkt werden, dass der Bruterfolg nicht untersucht wurde.

## 7.5 Veränderungen der Artenzusammensetzung und Verschiebung der Verbreitungsgebiete von Brutvögeln

In den letzten Jahren wurde in Baden-Württemberg vermehrt die Einwanderung und Neuansiedlung südlich verbreiteter Vogelarten festgestellt. So nahm der Brutbestand der Kolbenente in unserem Raum deutlich zu (*Bauer & Boschert, 2002*). Die anhaltende Ausbreitung des Orpheusspötters führte 2002 zum ersten Brutnachweis am Bodensee (*Werner, 2002*). Am Kaiserstuhl und in der Schwarzwald-Vorbergzone hat der Bienenfresser im Bestand deutlich zugenommen (*Rupp & Saumer, 1996*), und es mehren sich Brutzeitvorkommen südlicher Arten wie Schlangenadler, Zwergohreule oder Orpheusgrasmücke. Es erscheint daher naheliegend, diese Arealerweiterung nach Norden mit der erfolgten Klimaerwärmung zu erklären. Verstärkt wird dies durch die Tatsache, dass bei etlichen Arten mit nordischer Verbreitung ein starker Bestandsrückgang festgestellt wurde, beispielsweise bei Fitis, Bekassine und Großem Brachvogel (*Bauer & Boschert, 2002; Heine et al., 1999*). Allerdings ist unklar, inwieweit diese Rückgänge wirklich indirekt auf Klimaveränderungen oder direkt auf Habitatveränderungen zurückzuführen sind. Abgesehen von einzelnen Beispielen gibt es erstaunlicherweise nur wenige Untersuchungen darüber, wie sich Bestandsveränderungen bei nördlich und südlich verbreiteten Arten in ganzen Vogelgemeinschaften unterscheiden. Im Folgenden soll untersucht werden, ob sich Arten mit südlichem und nördlichem Verbreitungsschwerpunkt in den Bestandstrends am Bodensee unterscheiden.

### 7.5.1 Methode

Zur Analyse der Bestandstrends werden die Daten der Rasterkartierung der Ornithologischen Arbeitsgemeinschaft Bodensee aus den Jahren 1980-1981 und 2000-2003 miteinander verglichen. Kartiert wurde jeweils die Häufigkeit von 159 Brutvogelarten im Zeitraum von März bis Juni in 303 Rasterquadraten (2 x 2 km) in einem 1212 km<sup>2</sup> großen Gebiet in Deutschland, Österreich und der Schweiz (*Schuster et al., 1983; Bauer & Heine, 1992; Bauer et al., in Vorb.*).

Klassifikation der Arten: Soll der Effekt der Klimaveränderungen auf den Bestand untersucht werden, müssen die Faktoren Bruthabitat und Zugverhalten in den statistischen Analysen ebenfalls berücksichtigt werden, da beide Faktoren auch einen großen Einfluss auf Bestandsänderungen haben können. Es ist dann möglich, die Bestandsveränderungen um die Effekte von Bruthabitat und Zugverhalten zu "korrigieren". Dazu wurden alle 159 Brutvogelarten nach Bruthabitat, Zugverhalten und Nord-Süd-Verbreitung klassifiziert.

- Beim Bruthabitat wurden vier Kategorien unterschieden: Feuchtgebiete (Wasserfläche, Ufer, Röhrichte), Offene Landschaft (Äcker, Grünland, Obstplantagen und Hecken), Wälder (inkl. Kahlschläge) und Siedlungsgebiet (Städte, Dörfer, Parkanlagen).
- Beim Zugverhalten wurde zwischen Standvögeln, Kurzstreckenziehern (Überwinterungsgebiet im Mittelmeergebiet) und Langstreckenziehern (Überwinterungsgebiet südlich der Sahara) unterschieden.
- Der Verbreitungsschwerpunkt (Nord-Süd-Verbreitung) wurde auf Basis des EBCC Atlas der europäischen Brutvögel (*Hagemeyer & Blair, 1997*) als Mittelwert der nördlichen und südlichen Verbreitungsgrenze berechnet. Im Gegensatz zu Bruthabitat

und Zugverhalten handelt es sich hier nicht um einen diskreten Faktor, sondern um eine Variable.

**Bestandsveränderung:** Für jede Art wurden drei Werte zur Schätzung der Häufigkeit bestimmt. Als Regionale Abundanz wird die durchschnittliche Anzahl von Brutpaaren im Bodenseegebiet verstanden (gemittelt über alle Rasterquadrate). Die Größe des Verbreitungsgebiets am Bodensee wird definiert als Anzahl besetzter Rasterquadrate. Lokale Abundanz wird bestimmt als die durchschnittliche Anzahl Brutpaare pro Rasterquadrat, in dem die jeweilige Art vorkommt. Veränderungen der Brutbestände von einer Census-Periode zur nächsten werden häufig in Prozent angegeben. Dies hat jedoch den Nachteil, dass es sich um einen asymmetrischen Parameter handelt. Während der maximale Rückgang bei -1 liegt, kann die Zunahme  $\gg +1$  sein. Daher wurde hier eine andere Methode verwendet: Die Veränderung der lokalen Abundanz (RA) erfolgte nach der Gleichung  $[RA\ 2000 - RA\ 1980] / [(RA\ 1980 - RA\ 2000)/2]$ . Entsprechend wurden auch die Veränderungen in der Größe des Verbreitungsgebiets am Bodensee und der lokalen Abundanz berechnet.

**Statistische Auswertung:** Unterschiede zwischen den Artengruppen wurden mit Hilfe von Varianzanalysen auf Signifikanz getestet. Die Varianzanalyse-Tabelle wurde mit der Regressionsmethode berechnet (*McCullagh & Nelder, 1989*), d.h. einzelne Terme wurden sequentiell angepasst. Zuerst wurde der Faktor "Zugverhalten", anschließend der Faktor "Bruthabitat" und schließlich die Variable "Nord-Süd-Verbreitung" getestet. Dargestellt werden daher in [Abbildung 7.5](#) (siehe unten) die Residuen der Bestandsveränderung, d.h. es handelt sich um die Abweichungen der jeweiligen Mittelwerte von den Faktoren "Zugverhalten" und "Bruthabitat". Dargestellt sind also der Zusammenhang zwischen Bestandsveränderung und Nord-Südverbreitung, wenn um die Faktoren "Bruthabitat" und "Zugverhalten" korrigiert wurde.

### 7.5.2 Ergebnisse

Es wurden meist hoch signifikante Unterschiede zwischen den Vertretern der verschiedenen Artengruppen gefunden. Besonders starke Rückgänge wurden bei Langstreckenziehern beobachtet, Kurzstreckenzieher und Standvögel hatten dagegen überwiegend zugenommen. Das festgestellte Muster war mehr oder weniger ähnlich für regionale Abundanz, lokale Abundanz und Arealgröße am Bodensee.

Ebenso deutlich unterschieden sich die Artengruppen bezüglich ihres Bruthabitats. Die Arten des Offenlands wiesen dramatische Rückgänge auf, während die Arten der Feuchtgebiete und der urbanen Lebensräume zunahmen. Die Brutvogelarten in Wäldern zeigten kaum Populationsveränderungen. Während die regionale Abundanz und die Arealgröße am Bodensee leicht zunahmen, war die Veränderung der lokalen Abundanz leicht negativ.

[Abbildung 7.5](#) zeigt, dass es einen Zusammenhang zwischen Bestandsveränderungen und Nord-Süd-Verbreitung gibt, der hoch signifikant ist. Arten, die eher südlich verbreitet sind (Punkte links oben), nehmen zu, während die Abnahme der nördlich verbreiteten Arten nicht so deutlich ausfällt (Punkte rechts unten).

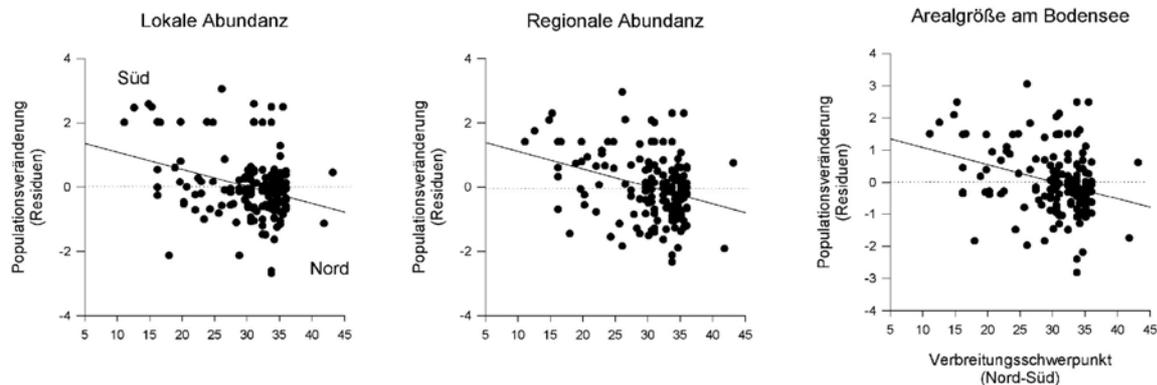


Abb. 7.5: Populationsveränderung der Brutvogelarten (links: lokale Abundanz, Mitte: regionale Abundanz, rechts: Arealgröße) am Bodensee 1980-2000 in Abhängigkeit von der Nord-Südverbreitung der Arten in Europa samt Regressionsgeraden. Dargestellt sind die residualen Populationsveränderungen, nachdem um die Faktoren Zugverhalten und Bruthabitat korrigiert wurde (Erläuterung in Kapitel 7.5.1).

### 7.5.3 Diskussion

Die Auswertung der Rasterkartierung der Brutvogelarten am Bodensee 1980-2000 hat gezeigt, dass der bereits früher festgestellte Rückgang besonders der Langstreckenzieher und der Arten des Offenlands immer noch festzustellen ist. Die hier vorgenommene Auswertung hat zudem gezeigt, dass vor allem südlich verbreitete Arten zugenommen hatten, während eher nördlich verbreitete Arten keinen einheitlichen Trend zeigten. Die Zunahme der südlich verbreiteten Arten ist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus Großbritannien (Thomas & Lennon, 1999), wo eine Ausbreitung etlicher Arten nach Norden festgestellt wurde. Allerdings erfolgt die Untersuchung mit anderen Methode und auf einer größeren geografischen Skala. Zudem wurden Arten direkt an der Arealgrenze untersucht, während hier nur Bestandsveränderungen innerhalb einer mitteleuropäischen Landschaft untersucht wurden. In Frankreich hingegen wurde festgestellt, dass vor allem die nördlich verbreiteten Arten stark abgenommen haben (Jiguet & Delattre, 2004).

Im Bodenseegebiet wurde auch bei anderen Tiergruppen von einer Zunahme südlich verbreiteter Arten berichtet. Knötzsch (2002) dokumentierte die Einwanderung südeuropäischer Libellenarten im Naturschutzgebiet "Eriskircher Ried"; Fiedler (2002) berichtet über erste Funde der mediterranen Weißrandfledermaus in Konstanz.

Insgesamt wird deutlich, dass mit zunehmender Klimaerwärmung weitere Verschiebungen der Arealgrenzen und der Artenzusammensetzungen zu erwarten sind. Eine europaweite Modellierung von potenziellen Arealverschiebungen belegt dies deutlich (Huntly, 2004). Die hier festgestellten Arealverschiebungen haben weitreichende Folgen für den Naturschutz, da ein konservierender Schutz bestimmter Vogelgemeinschaften in Zukunft kaum mehr möglich sein wird oder nur noch mit sehr hohem Aufwand zu bewerkstelligen sein wird. Die Naturschutzstrategien müssen sich folglich ebenfalls an den Klimawandel anpassen.

## 7.6 Ausblick: Folgen von Klimaveränderungen für Vogelwelt und Naturschutz

Zwar bleiben noch viele Fragen offen, doch zeigt diese Studie in Übereinstimmung mit einer Vielzahl von Fachpublikationen, dass die Klimaveränderung einen deutlichen Einfluss auf die Vogelwelt hat. Einige der hieraus entstehenden Konsequenzen für die zukünftige Entwicklung sollen nachfolgend diskutiert werden.

### 7.6.1 Erstankünfte

Bezüglich der Erstankunftsdaten wird deutlich, dass viele Vogelarten bereits auf die Klimaerwärmung reagiert haben - unabhängig davon, ob es sich um Lang- oder Kurzstreckenzieher handelt (vgl. [Kapitel 7.3.1](#)). Diese frühere Ankunft ermöglicht auch einen früheren Beginn der Brut. Allerdings ist dies auch nicht ohne Risiko. Treten gelegentlich Frühjahre mit extrem schlechter Witterung auf, könnten einzelne Jahre sehr negative Entwicklungen auf die Populationsdynamik haben.

Die klassische Unterscheidung von Lang- und Kurzstreckenzieher wird aufgeweicht. Zahlreiche ehemalige Langstreckenzieher überwintern bereits im Mittelmeergebiet (z.B. Schwalben etc.). Viele Kurzstreckenzieher hingegen dürften sich zu Standvögeln verwandeln, was innerhalb weniger Generationen möglich ist (*Berthold et al., 1990*).

### 7.6.2 Herbstzug

Deutliche Veränderungen wurden auch beim Wegzug im Herbst beobachtet. Auf der Fangstation "Halbinsel Mettnau" der Vogelwarte Radolfzell zogen neun von 19 Arten später ab (vgl. [Kapitel 7.3.2](#)). Bereits *Gatter (1992)* konnte bei 68% der untersuchten Singvogelarten einen späteren Durchzug am Randecker Maar (Schwäbische Alb) beobachten. Es ist daher anzunehmen, dass dies zu einer längeren Verweildauer im Brutgebiet führt und somit den Bruterfolg der Arten erhöhen kann, weil das Zeitfenster für das Brutgeschäft verlängert ist.

### 7.6.3 Brutbeginn

Es ist damit zu rechnen, dass der Legebeginn bei vielen Arten sich nach vorne verschieben wird, wie dies für Blaumeise und Halsbandschnäpper gezeigt wurde (vgl. [Kapitel 7.4](#)). Viele Vogelarten reagieren offensichtlich flexibel auf die höheren Temperaturen im Frühjahr und beginnen früher zu brüten. Ob dadurch eine Bedrohung für bestimmte Arten besteht, wie von manchen Autoren befürchtet (z.B. *Both & Visser, 2001*), bleibt unklar. In dieser Studie wurde gezeigt, dass die Gelegegröße beim Halsbandschnäpper sogar steigt. Der Brutbeginn von Vögeln wird weitgehend von der Tageslänge bestimmt, die "Feinjustierung" erfolgt dann durch die Temperatur im Frühjahr. Kurzfristig können Vögel daher gut auf Klimaveränderungen reagieren. Langfristig stellt sich die Frage, ob ein noch früherer Brutbeginn möglich ist, da sich die Tageslänge ja nicht verändert. Durch mikroevolutionäre Vorgänge könnten jedoch Vögel mit veränderter "innerer Uhr" selektioniert werden. Entscheidend wird sein, ob Brutphänologie und Phänologie der Nahrungsverfügbarkeit weitgehend übereinstimmen. Bereits frühere Studien haben gezeigt, dass der Brutbeginn an die maximale Nahrungsverfügbarkeit angepasst ist (*Coppack & Pulido, 2004*). Leider gibt es kaum Untersuchungen darüber, ob sich das Nahrungsangebot in Menge und Phänologie verändert hat.

#### 7.6.4 Wintergäste

Obwohl in dieser Studie nicht untersucht, gilt es als sicher, dass sich das Spektrum der Arten, die in Südwestdeutschland überwintern, verschieben wird. Viele Kurzstreckenzieher werden sich zu Standvögeln wandeln. Ob diese neuen Wintergäste bezüglich Ressourcen zu den bereits vorkommenden Standvögeln in Konkurrenz stehen werden, ist noch völlig unbekannt. Es scheint aber nicht sehr wahrscheinlich.

Auch Veränderungen bei der Nahrungsverfügbarkeit im Winter wurden beobachtet. *Schuster et al. (2002)* konnten zeigen, dass die für Feldmäuse typischen Vierjahreszyklen im Bodenseegebiet zum Erliegen gekommen sind und die Tiere nur noch geringe Individuendichten aufwiesen. Das hat natürlich Auswirkungen auf alle Prädatoren.

#### 7.6.5 Arealverschiebungen

Manche Ökologen befürchten, dass Langstreckenzieher künftig fast völlig aus Mitteleuropa verschwinden werden. Wie in [Kapitel 7.5](#) gezeigt, ist diese Vogelgruppe besonders stark vom Rückgang betroffen. Obwohl dies seit langem bekannt ist, sind die Gründe hierfür nicht endgültig geklärt. Allerdings dürften die Klimaveränderungen auch zu Veränderungen in den Überwinterungsgebieten führen. Einzelne Populationen von Langstreckenziehern (Transsahara-Zieher) überwintern jetzt schon nördlich der Sahara. Sie werden also quasi zu Kurzstreckenziehern. Außerdem ermöglichen die höheren Temperaturen in Mitteleuropa manchen bisher auf Südeuropa beschränkten "südlichen" Arten eine Arealausweitung nach Norden.

Wie zu vermuten war, werden in Südwestdeutschland vermehrt südlich verbreitete Arten zunehmen. Die Abnahme der nördlich verbreiteten Arten erfolgt nicht so deutlich wie ursprünglich vermutet. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass diese Vögel derzeit noch in höheren Lagen brüten. Es ist aber damit zu rechnen, dass dies nur vorübergehend der Fall sein wird. Nördlich verbreitete Arten dürften etliche Anpassungen an das Leben unter kälteren Bedingungen aufweisen, die sich evolutionär nur langsam verändern, zumal die Klimaerwärmung auch recht schnell erfolgt. Langfristig dürfte der Temperaturanstieg dazu führen, dass die nördlich verbreiteten Arten in Baden-Württemberg zurückgehen, wie dies schon in Frankreich beobachtet wurde (*Jiguet & Delattre, 2004*).

Die Klimaveränderungen dürften auch dazu führen, dass Neubürger (Neozoen) verstärkt auftreten können, da deren Wintersterblichkeit zurückgeht. Spektakulärstes Beispiel hierfür sind die Brutvorkommen von Papageien in Baden-Württemberg (Halsbandsittich im Raum Mannheim/Heidelberg und Gelbkopf-Amazone in Stuttgart).

#### 7.6.6 Arealverschiebung und Mobilität

Viele der genannten Ergebnisse machen deutlich, dass Vögel sehr schnell und teilweise flexibel auf Klimaveränderungen reagieren können. Allerdings handelt es sich bei Vögeln wie bei den meisten anderen bisher auf Klimaeffekte untersuchten Gruppen (z.B. Schmetterlinge, Libellen und Heuschrecken) um sehr mobile Organismengruppen. Vögel dürften aber keineswegs repräsentativ für alle Tier- und Pflanzengruppen sein. Artengruppen, die sich nur langsam ausbreiten können - wie etwa viele Pflanzenarten, Schnecken oder bestimmte Käferarten - dürften von den Klimaveränderungen daher

noch stärker betroffen sein als Vögel. Bei ihnen kann eine Arealverschiebung nicht so schnell erfolgen.

### 7.6.7 Artenrückgang und Klimaschutz

Es ist unbestritten, dass es bei Fortschreiten der Klimaveränderung etliche "Gewinner" unter den Tier- und Pflanzenarten geben wird; es wird aber auch "Verlierer" geben. Besonders Arten, die als Glazialrelikte gedeutet werden, dürften stark zurückgehen. Unter den Vogelarten ist anzunehmen, dass die montanen Arten in den Mittelgebirgen (Schwarzwald, Schwäbische Alb) verschwinden werden. *Harrison et al. (2003)* modellierten die Arealverschiebungen ausgewählter Arten in Großbritannien. Sie sagen beispielsweise voraus, dass das Auerhuhn fast völlig verschwinden wird. Es ist zu befürchten, dass gegen den Rückgang montaner Arten wenig getan werden kann. Die Frage, ob es dadurch zu einem Verlust der Artenvielfalt in Baden-Württemberg kommt, oder ob die Verluste durch Neuansiedlung südlich verbreiteter Arten "ausgeglichen" werden, lässt sich derzeit noch nicht beantworten. Die meisten negativen Veränderungen infolge der Klimaveränderungen dürften durch einen "Reparatur-Naturschutz" nur in wenigen Fällen und bei hohem Aufwand kompensiert werden können. Auch dies belegt die absolute Notwendigkeit eines umfangreichen Klimaschutzes.

### 7.6.8 Habitatfragmentierung und Arealveränderungen

Wandern südlich verbreitete Arten in Mitteleuropa ein, so müssen auch Wanderwege vorhanden sein. Selbst bei Vögeln weisen längst nicht alle Arten eine große Pionierfreudigkeit auf (*Harrison et al., 2003*). Eine starke Fragmentierung der Landschaft durch Habitatverlust, Verkehrsinfrastruktur und Versiegelung könnte das Einwandern wenig mobiler Arten erschweren oder gar unmöglich machen. Als Folge würde die Artenvielfalt in Baden-Württemberg zurückgehen, da andere Arten lokal aussterben werden. Zudem könnte dies auch zu einer Gefährdung submediterraner Arten führen, wenn Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse sich im ursprünglichen Verbreitungsgebiet so verändern, dass die Arten nur überleben, wenn sie nach Norden ausweichen können. Dies kann aber nur erfolgen, wenn ausreichend Lebensräume in einer nicht weiter fragmentierten Landschaft vorhanden sind.

Natürlich brauchen auch südlich verbreitete Arten Habitate, die nicht intensiv genutzt werden. Großflächige zusammenhängende und extensiv genutzte Lebensräume sind daher u.a. nötig, sollen sich südlich verbreitete Arten in Südwestdeutschland ansiedeln können. Natura 2000 scheint hierfür das geeignete Instrument zu sein.

### 7.6.9 Resümee

Das beobachtete Verhalten von Vögeln ist aufgrund ihrer hohen Mobilität ein empfindlicher Indikator für die Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme. Ansätze für zukünftige Entwicklungen im Klimawandel konnten aufgezeigt werden, bedürfen aber noch der vertieften Untersuchung. Aufgrund der mit der Mobilität verbundenen Flexibilität und hohem Anpassungspotenzial ist die Vogelwelt allerdings nicht repräsentativ für Ökosysteme allgemein und dies erfordert daher ebenfalls ergänzende Untersuchungen zur Reaktion sich langsam ausbreitender Arten (viele Pflanzenarten; Schnecken). Vögel sind allerdings auch hier beteiligt, beispielsweise bei der Ausbreitung von Samen über größere Entfernungen. Auf der Basis der gesammelten Daten erscheinen weitere Unter-

suchungen zum bisherigen Verhalten von Ökosystemen allgemein und möglichen zukünftigen Entwicklungen daher sinnvoll.

## 8 SCHIFFFAHRT UND ENERGIEERZEUGUNG

### 8.1 Zusammenfassung

Mit Hilfe des hydrologischen Modells LARSIM und drei unterschiedlich im Projekt KLIWA ermittelten regionalen Klimaszenarien (Modelle GROWEL, REMO und STAR) werden die derzeitigen und künftig infolge des Klimawandels zu erwartenden Bedingungen für Schifffahrt und Wasserkraftnutzung am Neckar dargestellt. Zunächst wird die Modellgüte von LARSIM anhand des Vergleichs zwischen Messwerten des Durchflusses und entsprechenden Simulationen für den Referenzzeitraum 1971-2000 geprüft. Das hydrologische Modell wird hierbei von gemessenen Klimagrößen angetrieben. Anschließend werden die Übereinstimmungen zwischen den Messwerten des Durchflusses und den Simulationen mit LARSIM untersucht, wobei in diesem Fall die Klimagrößen für das hydrologische Modell von den sogenannten Basisszenarien der drei Klimamodelle bereitgestellt werden, die sich ebenfalls auf den Referenzzeitraum beziehen. Schließlich wird LARSIM von den Zukunftsszenarien des Zeitraumes 2021-2050 der drei Klimamodelle angetrieben.

Die Untersuchungen führen zu folgenden Ergebnissen:

- Das hydrologische Modell LARSIM gibt die Abflussbedingungen des Neckars gut wieder
- Mit Hilfe von LARSIM und den Basisszenarien von GROWEL und STAR werden die aktuellen Durchflussbedingungen am Neckar (Pegel Rockenau) im Allgemeinen gut reproduziert, jedoch bestehen Unsicherheiten im Hochwasserbereich bei beiden Ansätzen
- Die Basisszenarien mit dem REMO-Ansatz sind sehr unsicher, u.a. wegen des nur kurzen Zeitraumes, für den entsprechende Simulationsdaten von REMO zur Verfügung stehen. Daher erlauben die REMO-Zukunftsszenarien keine abschließenden Aussagen zur künftigen Abflussentwicklung am Neckar
- Die Zukunftsszenarien mit dem STAR-Ansatz wurden aus KLIWA übernommen und ergeben nur geringe Änderungen der Durchflussbedingungen, die allesamt im Bereich der Modellunsicherheiten liegen. (-> Methode)
- Mit den GROWEL-Szenarien ergeben sich deutliche Anstiege der mittleren Abflüsse und teilweise auch der Hochwasserbedingungen, wobei dort die Unsicherheiten aber hoch sind
- Die Abflüsse bleiben im Sommer im Rahmen der Unsicherheit gleich oder nehmen nur leicht ab, im Winter nehmen sie deutlich zu. Für die zukünftige Wasserkraftnutzung am Neckar ergeben sich aus den Simulationen keine Einschränkungen im Szenarienzeitraum 2021-2050
- Mit den bisherigen STAR-Szenarien ergeben sich kaum Änderungen der Schiffbarkeit des Neckars gegenüber dem Ist-Zustand. Aus den GROWEL-Szenarien lässt sich eine künftig häufigere Einschränkung der Schifffahrt auf dem Neckar (häufigere Überschreitung der maximalen schiffbaren Wasserstände am Pegel Rockenau) folgern.

## 8.2 Einführung

Der schiffsgebundene Güterverkehr auf der ca. 200 km langen Neckarwasserstraße und die öffentlichen Häfen in Mannheim, Heilbronn, Stuttgart und Plochingen stellen einen erheblichen Standorts- und Wirtschaftsfaktor für Baden-Württemberg dar. Hinzu kommt die Personenschifffahrt (Ausflugsverkehr) und der Betrieb von 28 Wasserkraftwerken entlang des Neckars zwischen Mannheim und Plochingen. Da der schiffbare Teil des Neckars staugeregelt ist, muss die Schifffahrt auf dem Neckar unter heutigen Bedingungen überwiegend nur im Hochwasserfall Einschränkungen hinnehmen. Beide Wirtschaftszweige, Schifffahrt und Wasserkraft, sind von einer ausreichenden, nicht größeren Schwankungen unterworfenen Wasserführung abhängig. Die Zunahme von Winterniederschlägen sowie die trockeneren Sommer - Entwicklungen, die bereits über die letzten Jahrzehnte hinweg aufgetreten sind, und die sich aller Voraussicht nach auch in Zukunft fortsetzen und verstärken - können zu unausgeglicheneren Wasserständen und damit einem eingeschränkten Schifffahrts- und Kraftwerksbetrieb führen.

## 8.3 Methode

Die Untersuchungen befassen sich schwerpunktmäßig mit der Schifffahrt und der Energieerzeugung durch Wasserkraftanlagen am Neckar. Für diesbezügliche Auswertungen werden simulierte Zeitreihen täglicher Durchflüsse verwendet, mit denen Untersuchungen zur Entwicklung mittlerer Abflüsse sowie von Überschreitungsdauern in Bezug auf kritische Durchflüsse vorgenommen werden. Die simulierten Zeitreihen wurden mit dem hydrologischen Modell LARSIM (*Large Area Runoff Simulation Model*) (Bremicker, 2000) im Rahmen des Projektes KLIWA erzeugt und für diese Studie zur Verfügung gestellt. Sie untergliedern sich in zwei Perioden:

- Den sogenannten Referenzzeitraum (1971-2000), für den Messungen an Pegeln vorliegen, die zur Verifizierung der Modellresultate genutzt werden können
- Den Szenarienzeitraum 2021-2050.

Für die Szenarien wurde LARSIM mit Daten von regionalisierten Klimasimulationen angetrieben, die im Rahmen des KLIWA-Projektes für die Gebiete von Baden-Württemberg und Bayern entwickelt wurden. Dabei kamen mehrere Klimamodelle mit dynamischen bzw. statistischen Downscalingverfahren zum Einsatz. Im Rahmen des KLARA-Projektes wurden die STAR-Szenarien für eine deutlich höhere Zahl an Stationen neu berechnet, diese Daten konnten bei der hydrologischen Modellierung in dieser Studie jedoch keine Berücksichtigung finden. Es ist davon auszugehen, dass sich damit die Abflussszenarien gegenüber den bisherigen Berechnungen ändern.

Zur Definition kritischer Durchflüsse wird folgendermaßen verfahren: Für die Einstellung der Schifffahrt im Hochwasserfall wurden für das Unterwasser jeder Schleuse am Neckar sogenannte Höchste Schiffbare Wasserstände (HSW) festgelegt. Da die Simulationsergebnisse von LARSIM nur als Durchflüsse und lediglich für wenige Neckarpegel vorliegen, müssten die HSW's für diese Untersuchung in entsprechende Durchflüsse umgerechnet werden. Nach Besprechungen mit den Wasser- und Schifffahrtsämtern Heidelberg und Stuttgart stellte sich jedoch heraus, dass dies nur für den Pegel Rockenau möglich ist, der sich in Schleusennähe befindet. Daher beschränken sich die nachfolgenden Auswertungen für den Schifffahrtssektor auf diesen Pegel.

Die 28 Wasserkraftanlagen entlang des Neckars befinden sich an den 27 Staustufen. Jede Anlage verfügt über mehrere Turbinen. Deren Leistung ist proportional zum Durchfluss und zur Fallhöhe. Durch Dauerstau im Oberwasser der Staustufen sind die Fallhöhen im Normalfall konstant; sie bewegen sich zwischen 2,6 m (Heidelberg) und 10,5 m (Feudenheim). Die variablen Durchflüsse können jedoch die Turbinenleistungen und damit die Stromproduktion begrenzen. Bei Hochwasser bestehen hierbei - von Extremhochwässern abgesehen, die hier nicht weiter betrachtet werden sollen - keine Begrenzungen. Wenn die maximale Schluckhöhe einer Turbine erreicht ist, fällt das überschüssige Wasser über das Wehr der Anlage. Bei Niedrigwasser kann es jedoch vorkommen, dass mangels Wasser einzelne Turbinen abgeschaltet werden müssen. Da die entsprechenden Niedrigwasserabflüsse nicht bekannt sind (die EnBW, die die meisten Wasserkraftanlagen am Neckar betreibt, hat trotz mehrfacher Nachfrage keine Informationen bereitgestellt), werden für diese Untersuchung lediglich die mittleren Abflüsse als Hilfs-Kenngrößen hinzugezogen.

## 8.4 Ergebnisse

### 8.4.1 Modellvalidierung

Zunächst soll überprüft werden, wie die mit LARSIM simulierte Tageswerte der Durchflüsse mit den aus Messungen abgeleiteten Werten übereinstimmen. In der [Abbildung 8.1](#) sind für den Pegel Rockenau die entsprechenden Wertepaare im Zeitraum 1971-2000 dargestellt. Es zeigt sich, dass das Modell im Hochwasserbereich die Durchflüsse unterschätzt, im Allgemeinen jedoch von einer guten Übereinstimmung mit den Messwerten ausgegangen werden kann. Neben dem Vergleich diskreter Werte interessiert insbesondere auch die Fähigkeit des Modells, mittlere Abflussbedingungen - also Mittelwerte verschiedener Abflusskennwerte über längere Zeiträume - zu reproduzieren.

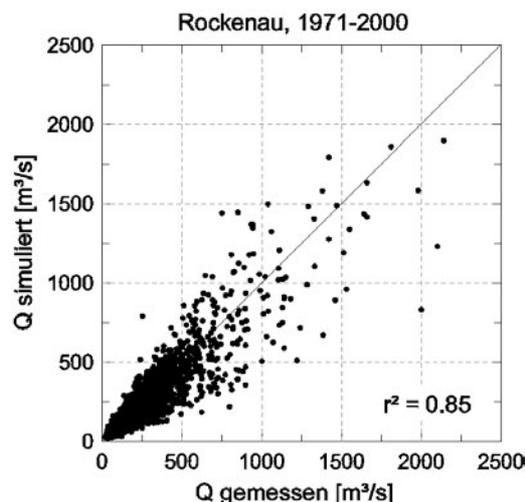


Abb. 8.1: Vergleich gemessener und mittels LARSIM simulierter Tageswerte des Durchflusses  $Q$  am Pegel Rockenau / Neckar im Zeitraum 1971-2000.

In der [Abbildung 8.2](#) ist hierzu ein Vergleich der mittleren Tageswerte des Durchflusses im Zeitraum 1971-2000 dargestellt. Im Gegensatz zur [Abbildung 8.1](#) werden hier die 365 Tageswerte gemittelt über den 30-Jahres-Zeitraum, gegenübergestellt.

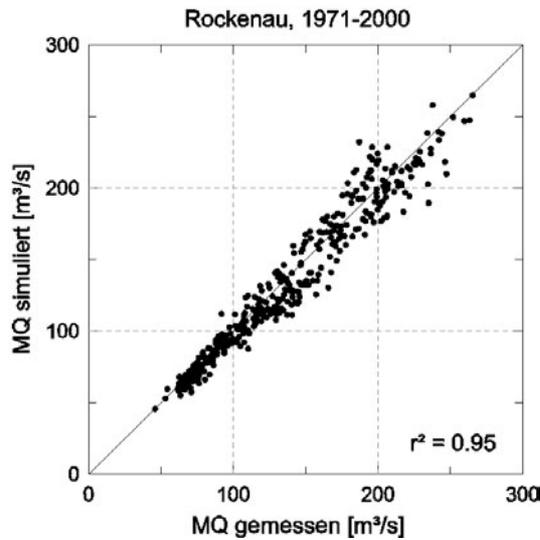


Abb. 8.2: Vergleich 30-jähriger Mittel (1971-2000) von Tageswerten des Durchflusses MQ am Pegel Rockenau / Neckar. Gegenübergestellt sind die aus Messungen bzw. Simulationen abgeleiteten Wertepaare.

Die Darstellung zeigt die in diesem Fall hervorragende Übereinstimmung der aus Messungen und Simulationen abgeleiteten Mittelwerte. Dies bestätigt auch [Abbildung 8.3](#), die die mittleren Winterabflüsse (mittlere Abflüsse, bestimmt aus Mittelung der Tageswerte im Zeitraum November, Dezember und Januar für die Winter 1971/72 bis 1999/2000), abgeleitet aus Messungen bzw. Simulationen darstellt. Diese Beispiele sollen genügen, um die gute Eignung des LARSIM-Modells für die Simulation der Abflussverhältnisse des Neckars zu bestätigen.

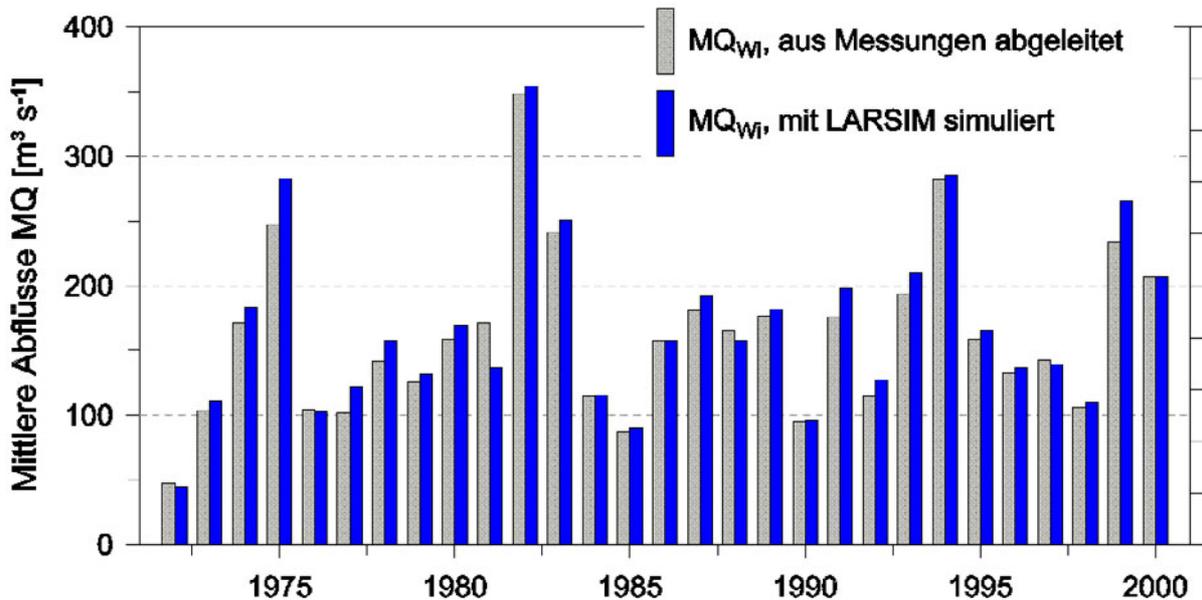


Abb. 8.3: Vergleich mittlerer Winterabflüsse  $MQ_{wi}$  (jeweils November, Dezember, Januar), bezogen auf den Pegel Rockenau / Neckar. Die für die Darstellung genutzten Daten wurden aus Messungen bzw. aus Simulationen mit LARSIM im Zeitraum 1971/72 bis 1999/2000 abgeleitet.

### 8.4.2 Anwendung von Klimaszenarien

In dieser Studie werden die Ergebnisse aus insgesamt drei regionalen Klimaszenarien verwendet. Dabei handelt es sich um die gleichen Szenarien, die bereits im KLIWA-Projekt zur Anwendung kamen:

- Zwei Verfahren des statistischen Downscalings, STAR und GROWEL
- Eine Methode des dynamischen Downscalings, REMO.

Die von LARSIM unter Verwendung der unterschiedlichen Klimaszenarien simulierten Abflussdaten werden zunächst hinsichtlich der Entwicklung der mittleren täglichen Durchflüsse untersucht. In der [Abbildung 8.4](#) sind die mittleren Jahrgänge des Durchflusses am Pegel Rockenau / Neckar auf Basis mittlerer täglicher Durchflüsse für den Referenzzeitraum (Ist-Zustand) dargestellt. Bei den Klimaszenarien wird in diesem Zusammenhang auch von Basiszenarien gesprochen. Diese beziehen sich im Falle der Verfahren STAR und GROWEL auf den dreißigjährigen Zeitraum 1971-2000, weshalb in der [Abbildung 8.4](#) der direkt aus Messungen abgeleitete Jahrgang (dicke, schwarze Kurve) ebenfalls diesen Zeitraum umfasst. Lediglich das Basiszenarium der Methode REMO deckt nur den für Vergleichszwecke sehr kurzen Zeitraum 1991-1999 ab.

[Abbildung 8.4](#) verdeutlicht, dass die mit LARSIM unter Verwendung der Basiszenarien von STAR und GROWEL simulierten, mittleren Jahrgänge der Durchflüsse am Pegel

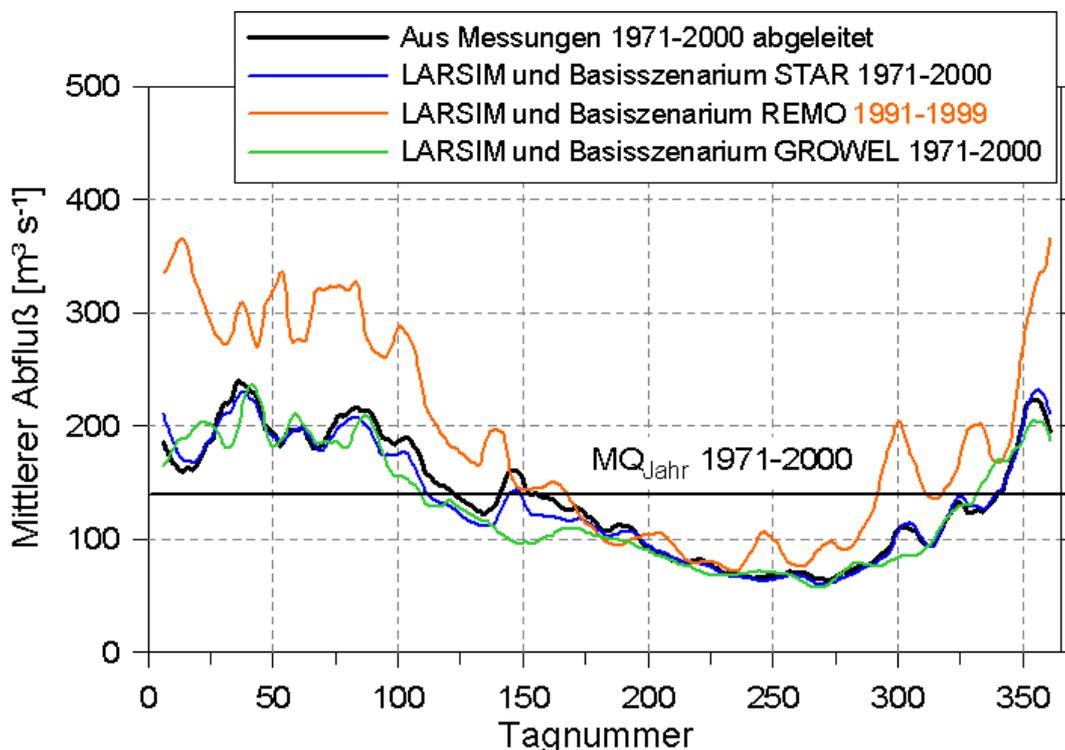


Abb. 8.4: Vergleich mittlerer Jahrgänge des Durchflusses in Rockenau / Neckar, abgeleitet aus Messungen (schwarze Kurve) und aus der Simulation mit LARSIM und Klimagrößen der Basiszenarien aus STAR (blaue Kurve), REMO (rote Kurve) und GROWEL (grüne Kurve). Die Gerade markiert den mittleren Jahresabfluß  $MQ_{\text{Jahr}}$  der Jahre 1971-2000 am Pegel Rockenau / Neckar.

Rockenau / Neckar sehr gut mit den aus Messungen abgeleiteten Werten übereinstimmen. Insgesamt ist die Modellgüte unter Verwendung der Klimadaten aus dem STAR-Ansatz am besten. Hierzu muss jedoch angemerkt werden, dass beim Basis-szenarium in STAR die gemessenen Klimagrößen aus dem zugrundeliegenden Klimamessnetz unverändert übernommen werden. Das heißt, dass die (geringen) Abweichungen zwischen den aus Messungen bestimmten und mit LARSIM / STAR simulierten Ganglinien zu einem Teil durch die Unsicherheiten des hydrologischen Modells LARSIM zustande kommen, zu einem weiteren Teil durch Daten- und Interpolationsfehler bzw. die eingeschränkte räumliche Repräsentativität des Klimamessnetzes.

Dagegen muss die Übereinstimmung des Basis-szenariums aus LARSIM / REMO mit den aus Messungen abgeleiteten Werten als ungenügend bezeichnet werden. Es fällt in der [Abbildung 8.4](#) insbesondere die deutliche Überschätzung der mittleren täglichen Durchflüsse in den Herbst-, Winter- und Frühjahrsmonaten ins Auge. Hier macht sich u.a. der nur kurze Zeitraum der REMO-Basis-szenarien bemerkbar. Dies reicht jedoch nicht aus, um die mangelnde Übereinstimmung zu erklären.

In der darauffolgenden [Abbildung 8.5](#) sind die Simulationsergebnisse von LARSIM unter Verwendung der drei Zukunftsszenarien für den dreißigjährigen Zeitraum 2021-2050 dargestellt. Wie der Vergleich mit den aus Messungen im Referenzzeitraum 1971-2000 abgeleiteten Werten zeigt, ist bei allen Szenarien eine mehr oder weniger deutlich aus-

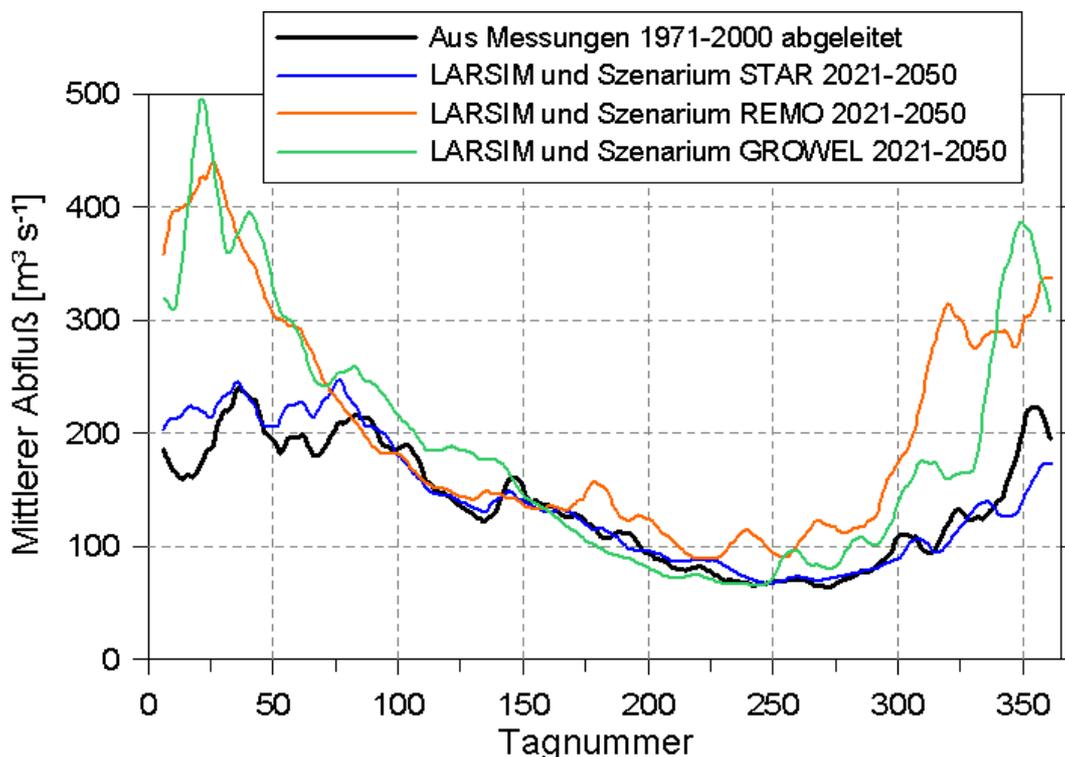


Abb. 8.5: Vergleich mittlerer Jahrgänge des Durchflusses in Rockenau / Neckar, abgeleitet aus Messungen 1971-2000 (schwarze Kurve) und aus der Simulation mit LARSIM und Klimagrößen der Zukunftsszenarien 2021-2050 aus STAR (blaue Kurve), REMO (rote Kurve) und GROWEL (grüne Kurve).

geprägte Zunahme der mittleren täglichen Durchflüsse in den Wintermonaten, bis hinein in das Frühjahr festzustellen, während sich in den Sommermonaten kaum Veränderungen zeigen. Auf Basis des STAR-Ansatzes resultieren im Szenarienzeitraum aber selbst in den Wintermonaten derart geringfügige Änderungen in den mittleren Tagesabflüssen, dass diese im Rahmen der Modell- bzw. Datenunsicherheit als nicht signifikant eingestuft werden müssen. Die Datenunsicherheit wird hier durch die Standardabweichungen der aus Messungen abgeleiteten, diskreten Tageswerte des Referenzzeitraumes definiert, ist aus Übersichtsgründen in der [Abbildung 8.5](#) jedoch nicht dargestellt. Dagegen zeigen die Szenarien auf Basis von GROWEL und REMO deutlich erhöhte, winterliche Abflussbedingungen. In Bezug auf REMO ist jedoch zu berücksichtigen, dass bereits die Basisszenarien für die Wintermonate deutlich über den aus Messungen bestimmten Daten liegen (vgl. [Abbildung 8.4](#)).

Da alle Szenarien mehr oder weniger deutliche Anstiege der mittleren Abflussverhältnisse anzeigen, werden aus dieser Auswertung für die Wasserkraftnutzung am Neckar keine künftigen Einschränkungen erkennbar.

Die nächste Untersuchung behandelt die sogenannten Überschreitungsdauern am Pegel Rockenau / Neckar. Für vorgegebene Durchflüsse werden hier die mittleren Dauern in Tagen pro Jahr (Dauerlinien) angegeben während derer diese Grenzwerte überschritten werden. Dies ist insbesondere für die Schifffahrt von Relevanz, für die die bereits angesprochenen, schleusenspezifischen Höchsten Schiffbaren Wasserstände

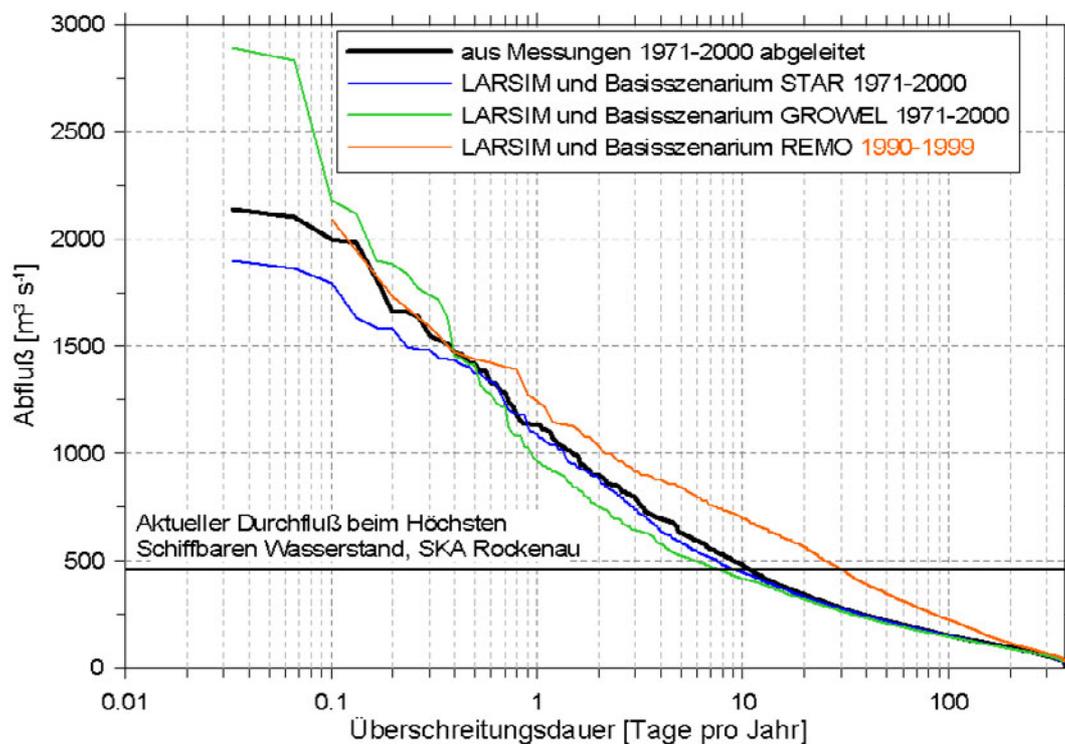


Abb. 8.6: Dauerlinien für den Pegel Rockenau / Neckar im Referenzzeitraum: Mittlere Überschreitungsdauern in Tagen pro Jahr für spezifische Durchflüsse, bestimmt aus Messungen (schwarze Kurve) sowie aus der Anwendung von LARSIM mit Basisszenarien aus STAR (blaue Kurve), GROWEL (grüne Kurve) und REMO (rote Kurve).

(HSW) definiert wurden. Je häufiger die HSW's bzw. die zugehörigen Durchflüsse im Mittel pro Jahr überschritten werden, umso häufiger muss auch die Schifffahrt eingestellt werden. Die Untersuchungen beschränken sich auch hier auf den Pegel Rockenau / Neckar.

[Abbildung 8.6](#) gibt die Dauerlinien für den Referenzzeitraum bzw. die Basisszenarien wieder. Es zeigt sich, dass die beiden Ansätze GROWEL und STAR im Bereich großer bzw. seltener Hochwässer deutlich von der aus Messungen abgeleiteten Kurve abweichen. So überschätzt GROWEL die Bedingungen in diesem Bereich, während sie von STAR unterschätzt werden. Dagegen zeigen beide Ansätze gute Übereinstimmungen mit der aus Messungen bestimmten Kurve im Bereich mittlerer Hochwässer sowie mittlerer Durchflüsse. Auch bezüglich der mittleren Überschreitungsdauer des HSW's in Rockenau (ca. 10 Tage pro Jahr bei einem zugehörigen Durchfluss von knapp 500 m<sup>3</sup>/s) ergeben sich gute Übereinstimmungen. Dagegen weicht die aus den REMO-Basisszenarien bestimmte Kurve gerade im Bereich niedriger und mittlerer Abflüsse von der Referenzkurve deutlich ab. Aufgrund des nur knapp zehnjährigen Auswertzeitraums der REMO-Basisszenarien lassen sich für große Hochwässer keine Aussagen zu Überschreitungsdauern treffen.

Schließlich zeigt [Abbildung 8.7](#) die Gegenüberstellung der aus Messungen im Referenzzeitraum 1971-2000 abgeleiteten Dauerlinie bzw. die mit LARSIM und den Zukunftsszenarien (Jahre 2021-2050) simulierten Dauerlinien für den Pegel Rockenau / Neckar. Ähnlich wie bei den Szenarien der mittleren täglichen Abflüsse (vgl. [Abbildung 8.5](#)) zeigt sich hier für die Zukunftsprojektionen von GROWEL und REMO eine deutliche Zunahme der Überschreitungsdauern bei allen betrachteten Durchfluss-Niveaus. So lässt sich aus den Messungen 1971-2000 eine mittlere Überschreitungsdauer für den HSW - äquivalenten Durchfluss am Pegel Rockenau / Neckar von ca. 6 Tagen pro Jahr ableiten. Für die Zukunftsszenarien mit GROWEL und REMO würden sich die mittleren Überschreitungsdauern auf etwa 15 Tage pro Jahr erhöhen, entsprechend häufig wäre die Schifffahrt unter diesen Bedingungen eingeschränkt. Wie auch bei der Auswertung für [Abbildung 8.5](#) muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass im Falle von REMO bereits Überschätzungen für den Referenzzeitraum vorliegen (vgl. [Abbildung 8.6](#)), so dass die Aussagekraft der entsprechenden Zukunftsszenarien stark eingeschränkt ist.

Ferner zeigt [Abbildung 8.7](#) auch, dass das auf Basis von STAR erzeugte Zukunftsszenarium im Gegensatz zu den beiden anderen Szenarien geringere Überschreitungsdauern prognostiziert. Demnach würde der dem heutigen HSW entsprechende Durchfluss in Rockenau zukünftig im Mittel nur noch an vier anstelle von sechs Tagen pro Jahr überschritten, die Schifffahrt wäre also weniger häufig eingeschränkt. In diesem Zusammenhang muss jedoch nochmals auf die Modellunsicherheiten hingewiesen werden.

Ferner ist anzumerken, dass im Rahmen des KLARA-Projektes die STAR-Szenarien für eine deutlich höhere Zahl an Stationen in Baden-Württemberg neu berechnet wurden, diese Daten konnten bei der hydrologischen Modellierung in dieser Studie jedoch keine Berücksichtigung finden. Es ist davon auszugehen, dass sich damit die Abflussszenarien gegenüber den bisherigen Berechnungen ändern.

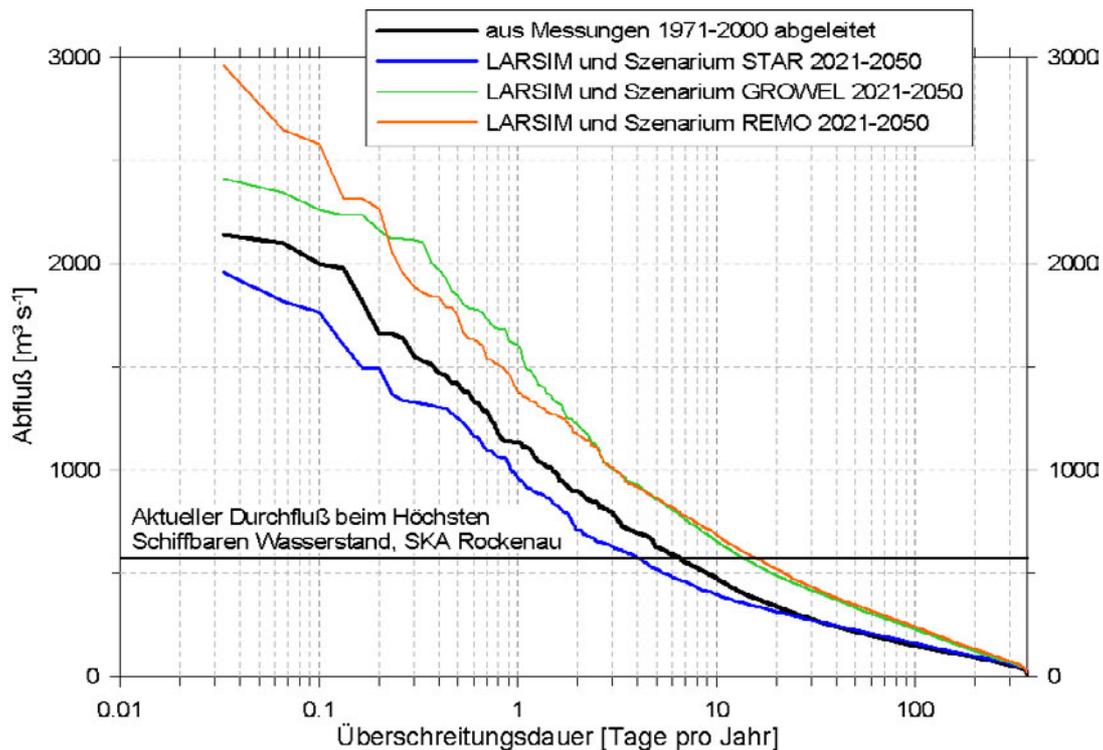


Abb. 8.7: Dauerlinien für den Pegel Rockenau / Neckar: Mittlere Überschreitungsdauern in Tagen pro Jahr für spezifische Durchflüsse, bestimmt aus Messungen im Referenzzeitraum 1971-2000 (schwarze Kurve) sowie aus der Anwendung von LARSIM mit Zukunftsszenarien des Zeitraumes 2021-2050 aus STAR (blaue Kurve), GROWEL (grüne Kurve) und REMO (rote Kurve).

### 8.4.3 Ausblick

Dieses Kapitel fasst die Ergebnisse der einjährigen KLARA-Studie im Themenbereich Schifffahrt und Wasserkraftnutzung am Neckar zusammen. Die Auswertungen bezüglich Schifffahrt mussten auf den Pegel Rockenau / Neckar beschränkt werden, da sich nur dort eine eindeutige Beziehung zwischen (Höchstem Schiffbarem) Wasserstand und Durchfluss herstellen ließ. Aufgrund unzureichender Grundlageninformationen (mangelnde Kooperationsbereitschaft der Kraftwerksbetreiber) lassen sich nur wenige Aussagen zur möglichen, zukünftigen Entwicklung im Bereich der Wasserkraftnutzung am Neckar treffen. Daher sind weitergehende Untersuchungen zu diesen Themenbereichen einem Nachfolgeprojekt vorbehalten.

Ebenfalls sollten die während des KLARA-Projektes erstellten, detaillierteren Szenarien mit dem STAR-Ansatz künftig in die hydrologische Modellierung mit LARSIM überführt werden. Es hat sich gezeigt, dass die Modell-Unsicherheiten (hydrologisches Modell und Szenarienmodelle) nur unsichere Aussagen zur künftigen Abflussentwicklung im Neckar zulassen. Künftig sollte dem Thema Unsicherheit daher in Zusammenhang mit dem Klimawandel mehr Aufmerksamkeit geschenkt und der Versuch einer Quantifizierung bzw. verbesserten Abschätzung von Unsicherheit unternommen werden.



## 9 METEOROLOGISCHE EREIGNISSE MIT GROSSEM SCHADENSPOTENZIAL

### 9.1 Zusammenfassung

Untersucht werden die Entstehungsbedingungen für extreme meteorologische Ereignisse wie schwere Gewitter, Hagelschlag und Winterstürme, die ein großes Schadenspotenzial haben (siehe auch Anhang 9). Die Auswertung der täglichen Wetterstations-Daten für den Zeitraum 1949-2000 in Baden-Württemberg ergab, dass die Gewittertätigkeit an den meisten Stationen im betrachteten Zeitraum zugenommen hat. Dabei zeigen sich hohe jährliche Variabilitäten, denen längerfristige Perioden mit einer Zu- oder Abnahme überlagert sind. An den meisten Stationen zeigt sich eine Zunahme zwischen zwei und acht jährlichen Gewittertagen im gesamten Zeitraum. Das Mittel über alle Stationen im gesamten Zeitraum zeigt eine signifikante Zunahme der beobachteten Gewitterereignisse.

Aus dem Vertikalprofil von täglichen Radiosondenmessungen an der Station Stuttgart im Zeitraum 1971-2003 wurden verschiedene Konvektionsindizes berechnet, die allerdings zunächst keine Aussage über tatsächlich eingetretene Ereignisse zulassen. Als entscheidender Konvektionsindex wird hier die CAPE betrachtet, welche die zum Antrieb der Konvektion vorhandene Energie der Atmosphäre wiedergibt. Für die CAPE wie auch für einige andere Indizes wurde für verschiedene Schwellenwerte ein signifikanter Anstieg im Zeitraum 1971-2003 beobachtet, andere Indizes hingegen zeigten keinen bzw. sogar einen negativen Trend. Zusammenfassend ergibt sich aus den Analysen kein einheitliches Bild einer Zu- oder Abnahme des Gewitterpotenzials in der Atmosphäre. Aufgrund des sehr starken Anstiegs der CAPE kann jedoch der vorsichtige Schluss gezogen werden, dass sich die atmosphärischen Bedingungen dahingehend geändert haben, dass das Potenzial für Gewitter und für schwere Gewitter im betrachteten Zeitraum zugenommen hat.

Beim Vergleich zwischen tatsächlich eingetretenen schweren Hagelereignissen (Daten des Karlsruher Doppler-Radars, 1996-2003) und verschiedenen berechneten Konvektionsindizes (Radiosondenaufstiege Stuttgart, 1996-2003) zeigt sich eine gute Übereinstimmung beider Datensätze. Es ist also möglich, aus den Konvektionsindizes Rückschlüsse auf tatsächlich eingetretene starke konvektive Ereignisse zu ziehen.

Um die Lücke zwischen Punktmessungen und flächendeckenden Messungen weiter zu schließen, wurden Schadendaten der SV Sparkassen Versicherung bezüglich Hagelschlag für den Zeitraum 1986-2004 analysiert. Sowohl die Anzahl der Schadenmeldungen als auch die Schadenssummen, jeweils korrigiert um die jährliche Veränderung der Vertragszahlen, zeigten trotz starker jährlicher Schwankungen eine nahezu dramatische Zunahme in den vergangenen 20 Jahren. Annähernd dasselbe Bild ergab sich für die Anzahl der Hageltage pro Jahr, die aus den Schadendaten für Baden-Württemberg rekonstruiert wurden.

Eine Analyse der historischen Winterstürme ergab, dass von den neun schwersten Stürmen der vergangenen 200 Jahre in Baden-Württemberg allein sechs in die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts fallen. Die Auswertung der Messdaten von verschiedenen SYNOP-Stationen ergab eine Zunahme der Böengeschwindigkeit an Flachlandstationen, während dies an Bergstationen nicht zu erkennen war.

Auch für einige Großwetterlagen, die im Zusammenhang mit meteorologischen Ereignissen mit großem Schadenspotenzial stehen, zeigen sich signifikante Veränderungen seit 1971. So ist die beobachtete Zunahme der Andauer der "Westlage zyklonal" im Winter als sehr kritisch sowohl für schwere Winterstürme (Sturm Lothar) als auch für Hochwasserereignisse mit großem Schadenspotenzial anzusehen.

## **9.2 Einführung**

Nach dem derzeitigen Stand der Klimaforschung hat sich das globale Klima in Zeiträumen von Jahrzehnten bis Jahrhunderten tief greifend gewandelt. Die Frage, ob und inwieweit sich damit auch Schwere und Häufigkeit von extremen Naturereignissen verändert haben, ist hingegen noch nicht abschließend geklärt. Darüber hinaus ist nahezu unbekannt, wie sich Klimaänderungen und Extremereignisse auf lokaler Ebene, wie beispielsweise in Baden-Württemberg, auswirken. Vor allem bedingt durch die schweren Ereignisse der letzten Jahre wie die Winterstürme Lothar und Anatol 1999 oder das Jahrhunderthochwasser an der Elbe 2002 ist der Themenkomplex Klimaänderung und Naturkatastrophen stark in den Blickpunkt der Öffentlichkeit geraten. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Erfahrung, dass durch extreme Ereignisse unmittelbar die Lebensgrundlage vieler Menschen nachhaltig beeinträchtigt und sogar dauerhaft zerstört werden kann. Betroffen sind dabei allerdings nicht nur die Teile der Bevölkerung, die unmittelbar in besonders gefährdeten Flussniederungen oder an Flachküsten siedeln, sondern ganze Wirtschaftszweige wie die Landwirtschaft, Verkehrs- und Transportunternehmen sowie die Versicherungswirtschaft. Bedingt durch den starken Zuwachs an materiellen Werten in dicht besiedelten Regionen kann der ökonomische Schaden durch Naturkatastrophen außerordentlich hoch sein. Orkan Lothar beispielsweise verursachte in Europa Schäden in Höhe von 11.5 Mrd. Euro. Angesichts der hohen Zahl an Sturm- und Hochwasserschäden in den vergangenen 10 bis 20 Jahren wird von vielen Versicherungen bereits das Erreichen der Grenze der Versicherbarkeit proklamiert, insbesondere im Fall von Hochwasser.

Im Mittelpunkt des Vorhabens steht die Analyse der Auftretenswahrscheinlichkeit meteorologisch bedingter Extremereignisse, die zu einer großen und unmittelbaren Gefahr für Menschen und ihre materiellen Werte werden können. Dabei konzentrieren sich die Untersuchungen auf die Häufigkeit von Winterstürmen, Gewitterstürmen und Hagelschlag in Baden-Württemberg während der vergangenen 30 bis 50 Jahre. Großräumige Starkniederschläge, die in der Folge zu Hochwasserereignissen in großen Einzugsgebieten führen können, wurden bereits in dem Programm KLIWA der Bundesländer Bayern und Baden-Württemberg behandelt (*KLIWA, 2000; KLIWA, 2002*).

Von allen meteorologischen Extremereignisse weisen schwere Winterstürme das höchste Gefahrenpotenzial für Mitteleuropa auf (*Münchener Rück, 1999*). In den vergangenen beiden Jahrzehnten wurde dies vor allem durch die Sturmserien mit Vivian und Wiebke im Jahr 1990 und Anatol, Lothar und Martin im Jahr 1999 eindrücklich dokumentiert. Aufgrund ihrer großskaligen Ausdehnung sind Winterstürme durch Messdaten sehr gut erfasst und können daher auf direktem Weg statistisch ausgewertet werden.

Im Gegensatz dazu weisen Gewitterstürme und Hagelschlag eine sehr starke lokale Begrenzung in der Größenordnung von mehreren Kilometern auf und sind deshalb schwieriger zu registrieren. Ziel dieses Vorhabens ist die Analyse des Auftretens von

Gewitterstürmen und Hagelschlag in Baden-Württemberg basierend auf langjährigen Messreihen

- der Anzahl der jährlichen Gewittertage,
- der atmosphärischen Bedingungen als Voraussetzung für die Entstehung von hochreichender Konvektion, ausgedrückt durch verschiedene Konvektionsindizes,
- der Schadensereignisse und Schadenssummen an Gebäuden.

Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, ob in den vergangenen Jahrzehnten systematische Veränderungen in der Auftretenshäufigkeit der betrachteten Extremereignisse bzw. der großräumigen atmosphärischen Bedingungen als mögliche Folge eines anthropogenen Treibhauseffektes (*IPCC, 2001*) erkennbar sind.

### 9.3 Gewitter- und Hagelereignisse

#### 9.3.1 Methode

##### 9.3.1.1 Bestimmung der Häufigkeit von Gewittertagen und Hagelereignissen

Die Häufigkeit von Gewitterereignissen wurde aus langjährigen Messreihen von 13 synoptischen Beobachtungsstationen (SYNOP) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Baden-Württemberg für den Zeitraum 1949-2000 bestimmt. Die mit einem Gewitter verbundenen Wettererscheinungen werden für alle Stationen sechsmal täglich in Form eines zweistelligen Codes notiert. Ein Gewittertag wurde dabei so definiert, dass mindestens eine Gewittermeldung im Zeitraum von 24 Stunden erfolgt sein muss.

Hagelereignisse sind eine weitere Form von extremen Wetterereignissen, meist als Teil eines Gewitterereignisses. Es konnten hierzu die flächendeckenden Schadendaten der SV Sparkassen Versicherung für den Zeitraum 1986-2004 ausgewertet werden.

##### 9.3.1.2 Berechnung von Konvektionsindizes

Aus den täglichen Radiosondenaufstiegen an der Station Stuttgart-Schnarrenberg im Zeitraum 1971-2003 wurden aus den Vertikalprofilen der gemessenen meteorologischen Parameter verschiedene Konvektionsindizes berechnet. Die wesentlichen meteorologischen Parameter sind hierbei Lufttemperatur und Luftfeuchte. Bei der Entstehung von Gewittern können zwei Prozesse unterschieden werden. Zum einen muss zunächst Energie aufgebracht werden, um Luftpakete in eine gewisse Höhe zu bringen, ab der dann Konvektion einsetzen und sich ein Gewitter überhaupt entwickeln kann. Zum anderen ist entscheidend, wie viel atmosphärische Energie ab dem Einsetzen der Konvektion für die Entwicklung eines Gewitters vorhanden ist. Die beiden wichtigsten Konvektionsindizes sind CIN und CAPE, sie erfassen jeweils einen dieser beiden Prozesse:

- Die **CIN** (Convective Inhibition) ist ein direktes Maß für die Energie, die benötigt wird, damit es zur Auslösung von Konvektion kommt. Sie muss aufgebracht werden, damit sich Gewitter überhaupt erst entwickeln können. Für verschiedene Wertebereiche der CIN ergeben sich folgende Abschätzungen:

CIN < 15 J/kg:	Entwicklung von Schönwetter-Cumuli
15 J/kg < CIN < 50 J/kg:	mögliche Entwicklung einiger kräftiger Gewitterzellen
50 J/kg < CIN < 150 J/kg:	mögliche Entwicklung einiger Felder mit starken Gewittern

CIN > 200 J/kg: Stabilität zu hoch, keine Gewitter

Bei schwacher Inversion oder geringer Stabilität ist die CIN klein und es können sich nur Schönwetter-Cumuli bilden. In einem mittleren Bereich von CIN-Werten können Gewitter entstehen. Sind die Luftmassen zu stabil geschichtet, so ist die benötigte Energie zu hoch und es kann sich keine Konvektion ausbilden.

- Die **CAPE** (Convective Available Potential Energy) ist ein direktes Maß für die zur Verfügung stehende Energie im Fall von Konvektion. Für die Wertebereiche der CAPE lassen sich folgende Abschätzungen abgeben:

CAPE < 1000 J/kg: schwache Konvektion

1000 J/kg < CAPE < 2500 J/kg: moderate Konvektion

CAPE > 2500 J/kg: starke Konvektion

Je größer also die CAPE, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich Gewitter bzw. schwere Gewitterstürme bilden.

Um zu prüfen, ob mit Hilfe der Konvektionsindizes Rückschlüsse auf tatsächlich eingetretene starke konvektive Ereignisse gezogen werden können, wurden sie für den Zeitraum 1996-2003 mit den täglichen Messdaten des Karlsruher Niederschlagsradars verglichen. Die Radardaten erlauben eine nahezu lückenlose und flächendeckende Dokumentation schwerer Hagelereignisse im Umkreis von 120 km um den Radarstandort Forschungszentrum Karlsruhe.

## 9.3.2 Ergebnisse

### 9.3.2.1 Häufigkeit von Gewittertagen

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass an den meisten Stationen die Anzahl der Gewittertage im betrachteten Zeitraum 1949-2000 zugenommen hat. Dabei zeigen sich starke kurzfristige Schwankungen, welche zum Teil aus der selektiven Beobachtung an einzelnen Stationen resultieren. Überlagert sind diese Schwankungen an fast allen Stationen von einer Zu- oder Abnahme über mehrere Jahre hinweg.

[Abbildung 9.1](#) zeigt summarisch die über alle Stationen gemittelte Anzahl der Gewittertage für den gesamten Beobachtungszeitraum 1949-2000 in Baden-Württemberg.

Man erkennt, dass die Anzahl der Gewittertage eine hohe jährliche Variabilität aufweist. Die lineare Regression ergibt im gesamten Zeitraum eine Zunahme der Gewittertage von 12 auf 15,5 Tage. Als Trend ergibt sich damit im Mittel eine Zunahme von ca. 0,7 Gewittertagen innerhalb von 10 Jahren. Die Berechnung der 95%-Konfidenzintervalle bestätigt die Steigung der Ausgleichsgerade und damit die signifikante Zunahme der Gewitteraktivität für den Zeitraum 1949-2000 in Baden-Württemberg. Es sei aber darauf hingewiesen, dass die Beobachtung konvektiver Ereignisse an einzelnen Stationen sehr selektiv ist und daher nur mit Vorsicht auf die Fläche übertragen werden kann.

### 9.3.2.2 Veränderungen der Konvektionsindizes

Exemplarisch ist in [Abbildung 9.2](#) die jährliche Anzahl von Tagen mit hohem Gewitterpotenzial basierend auf Radiosondenmessungen an der Station Stuttgart für den Zeitraum 1971-2003 dargestellt.

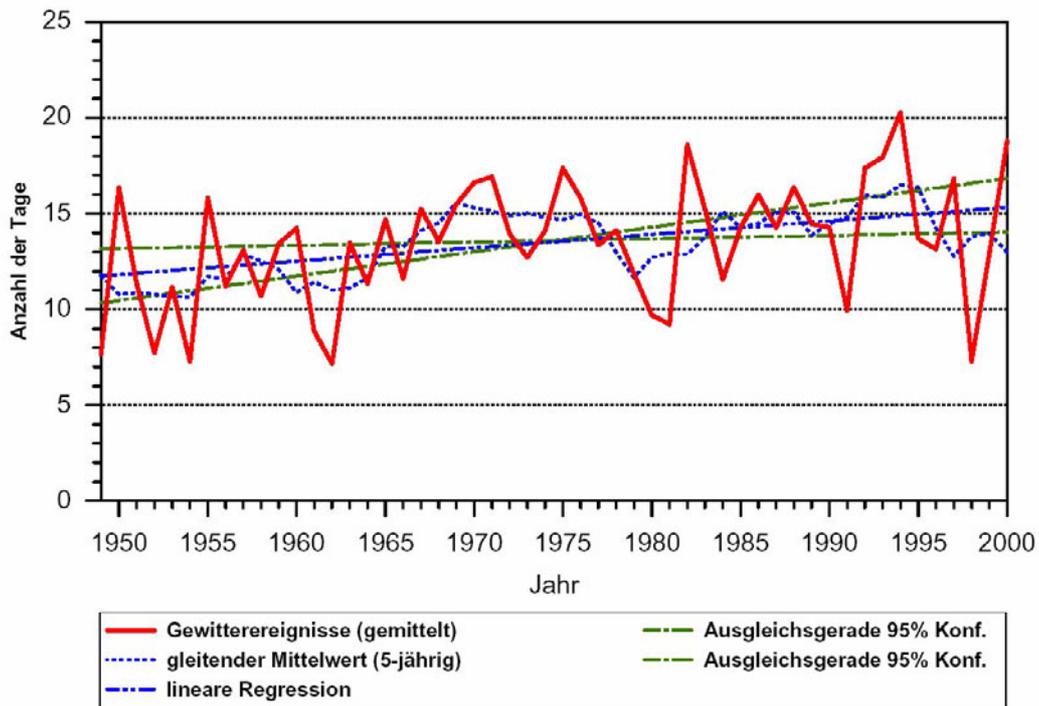


Abb. 9.1: Jährliche Anzahl der Gewittertage für den Zeitraum 1949-2000 als Mittelwert von 13 SYNOP-Stationen in Baden-Württemberg (rot). Zusätzlich sind der gleitende 5-Jahres-Mittelwert (blau gepunktet) und die lineare Regressionsgerade (blau) samt der beiden zugehörigen 95%-Konfidenz-Geraden (grün) eingezeichnet.

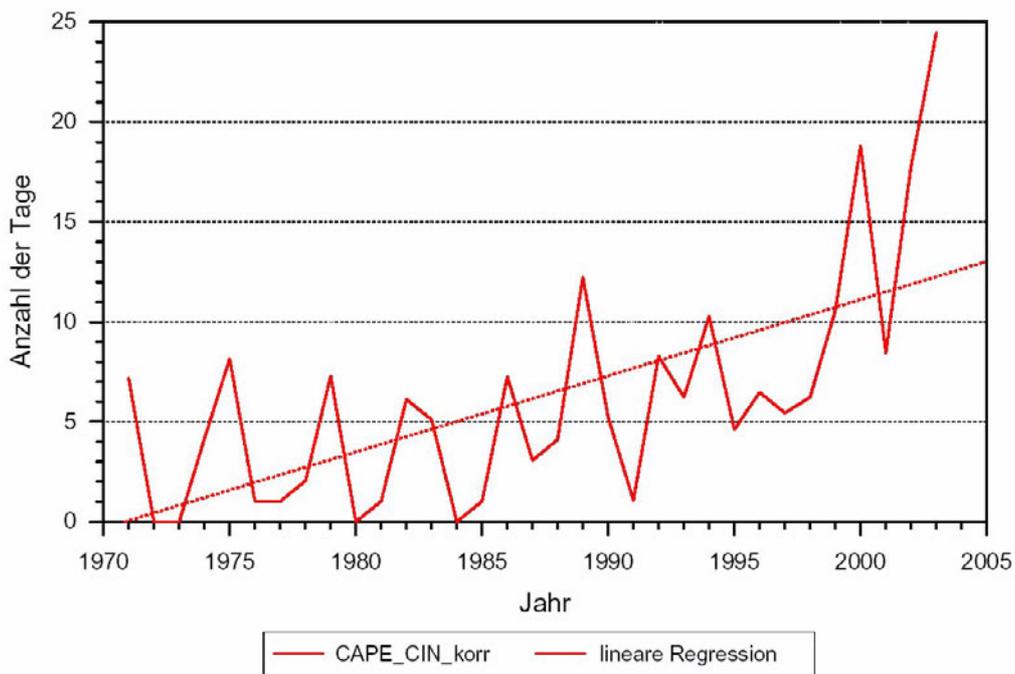


Abb. 9.2: Jährliche Anzahl von Tagen mit hohem Gewitterpotenzial (CAPE-Werte über 1000 J/kg und gleichzeitig CIN-Werte zwischen 15 und 150 J/kg) basierend auf den Radiosondenmessungen an der Station Stuttgart im Zeitraum 1971-2003 samt linearer Regressionsgerade.

Ein hohes Gewitterpotenzial wurde dabei über die beiden Konvektionsindizes CAPE und CIN definiert: CAPE muss über 1000 J/kg liegen, während gleichzeitig CIN zwischen 15 und 150 J/kg liegen muss. Die Anzahl der Tage mit hohem Gewitterpotenzial ist großen interannuellen Schwankungen unterworfen, die Regressionsgerade lässt jedoch einen deutlichen Anstieg im Zeitraum 1971-2003 erkennen.

Die Bestimmung des Gewitterpotenzials über andere Konvektionsindizes führt zu ähnlich positiven Trends. Es gibt allerdings auch Konvektionsindizes, die eine Stagnation bzw. sogar Abnahme der Tage mit hohem Gewitterpotenzial im untersuchten Zeitraum nahe legen. Aufgrund der großen Bedeutung von CAPE und CIN kann jedoch der vorsichtige Schluss gezogen werden, dass sich die atmosphärischen Bedingungen dahingehend geändert haben, dass das Potenzial für Gewitter und für schwere Gewitter im Zeitraum 1971-2003 zugenommen hat.

Ein Vergleich zwischen verschiedenen Konvektionsindizes (Radiosondenaufstiege Stuttgart, 1996-2003) und tatsächlich eingetretenen schweren Hagelereignissen (Daten des Karlsruher Doppler-Radars, 1996-2003) zeigt zudem eine gute Übereinstimmung beider Datensätze. Es ist also möglich, aus den Konvektionsindizes Rückschlüsse auf tatsächlich eingetretene starke konvektive Ereignisse zu ziehen.

### **9.3.2.3 Hagelereignisse**

Die Schadendaten der SV Sparkassen Versicherung für den Zeitraum 1986-2004 liefern flächendeckende Informationen über die mit extremen Wetterereignissen verbundenen Schäden an privaten und gewerblichen Gebäuden. Die folgenden Untersuchungen konzentrieren sich auf Tage mit Hagelschäden.

Gewichtet man die Anzahl aller gemeldeten Einzelschäden mit der Anzahl der bestehenden Verträge pro Jahr, berechnet sich daraus die Schadenfrequenz. Dieses Maß sagt aus, welcher Anteil an Gebäuden pro Jahr von einem Schadenereignis betroffen ist. Damit kann die Schadenfrequenz als Maß für die Gefährdungslage in einem Gebiet interpretiert werden. [Abbildung 9.3](#) zeigt die mittlere Schadenfrequenz pro Jahr durch Hagelschlag für die 3-stelligen Postleitzahlbereiche in Baden-Württemberg als Mittel zwischen 1986 und 2004. Dabei zeigt sich ein räumlich sehr differenziertes Muster der Gefährdungslage. Relativ gesehen kommt es am häufigsten im äußersten Nordwesten nördlich von Karlsruhe (Plz 749, 767 und 687) sowie im Süden von Baden-Württemberg (780 = Villingen-Schwenningen und 782 = Singen) zu Hagelschlag. In Villingen-Schwenningen ist die Schadenfrequenz vor allem von einem einzelnen schweren Hagelereignis am 24.06.2002 bestimmt, in Singen von zwei Ereignissen am 19.06.2002 und 08.07.2004. Die höchste Schadenfrequenz weist der Plz-Bezirk 767 mit den Gemeinden Kraichtal, Dettenheim, Hambruecken und Kronau mit einem Wert von  $1,42^{-3}$  auf. Das heißt im Mittel ist hier jedes Jahr eines von ca. 700 Gebäuden betroffen. Ebenfalls stärker betroffen ist die Region nördlich von Stuttgart, das Breisgau sowie die Gegend um Ulm und Friedrichshafen. Gering dagegen fällt die Schadenfrequenz fast im gesamten Schwarzwald aus. Hier muss allerdings berücksichtigt werden, dass durch die geringe Siedlungsdichte eine Verschiebung der Frequenz erfolgen kann. Am geringsten ist die Schadenfrequenz im Plz-Bezirk 978 (Wertheim) mit  $1,37^{-5}$ , d.h. zwei Größenordnungen geringer im Vergleich zum Maximum.

Betrachtet man den mittleren Schadensatz, d.h. Schadensumme im Verhältnis zur Versicherungssumme pro Jahr bei anschließender Mittelung über den gesamten Zeitraum,

ergibt sich ein ähnliches Bild mit höchsten Werten in den angesprochenen Plz-Bezirken. Dabei zeigt sich auch, dass die beiden Schadenmaße gut miteinander korreliert sind ( $r = 0.89$ ).

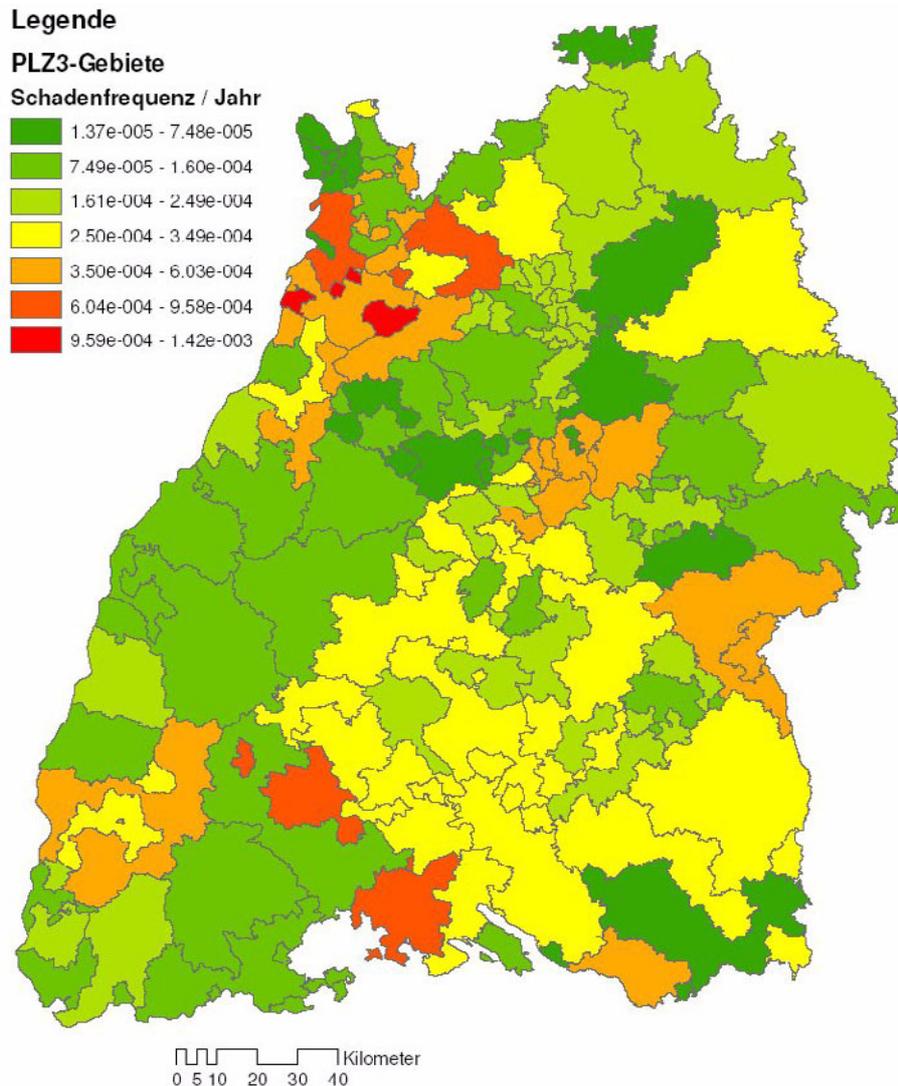


Abb. 9.3: Mittlerer jährlicher Schadensatz (Verhältnis von Schadenssumme zu Versicherungssumme als Mittel zwischen 1986 und 2004) durch Hagel für 3-stellige Postleitzahlbereiche in Baden-Württemberg nach Daten der SV Versicherung.

Interessant ist nun die Untersuchung des zeitlichen Verlaufs dieser Schadensmaße. Dabei zeigt sich, dass sowohl die Anzahl der Schadenmeldungen als auch die Schadenssumme, jeweils korrigiert um die jährliche Veränderung der Vertragszahlen, trotz starker jährlicher Schwankungen im Zeitraum 1986-2004 zugenommen haben. Zur exemplarischen Darstellung dieses Trends wurden dazu ausgehend von der Anzahl der Schadenmeldungen Hageltage bezüglich bestimmter Schwellwerte, d.h. bei Überschreitung einer bestimmten Anzahl der Schadenmeldungen in ganz Baden-Württemberg, definiert. [Abbildung 9.4](#) zeigt die Anzahl der Hageltage pro Jahr in Baden-Württemberg für den Zeitraum 1986-2004.

In **Abbildung 9.4** treten die Jahre 1994 und 2002/2003 mit Maxima in der Anzahl der Hageltage deutlich hervor. Bei den Trendgeraden über den gesamten Zeitraum kann vor allem bei den niedrigen Schwellenwerten von 10 bzw. 20 Meldungen eine starke Zunahme beobachtet werden. Für die beiden hohen Schwellenwerte von 50 bzw. 100 Meldungen hingegen zeigt sich zwar bis 1994 eine Zunahme, danach bleibt die Anzahl der so definierten Hageltage jedoch annähernd konstant. Ein Rückschluss darauf, dass vor allem die Anzahl der kleineren Ereignisse zugenommen haben könnte während extreme Ereignisse konstant geblieben sind, kann daraus allerdings nicht gezogen werden. Bei dieser Betrachtung ist die Anzahl der Meldungen sehr stark von der Besiedlungsdichte in dem vom Hagelschlag betroffenen Gebiet abhängig. Je nachdem, welches Gebiet von einem Hagelereignis betroffen ist, wird der Schwellwert überschritten und der Tag als Hageltag definiert oder nicht. Für die Beantwortung dieser Fragen sind weitere Analysen notwendig, bei der die Gebietsfläche der einzelnen Plz-Bereiche mit berücksichtigt werden muss.

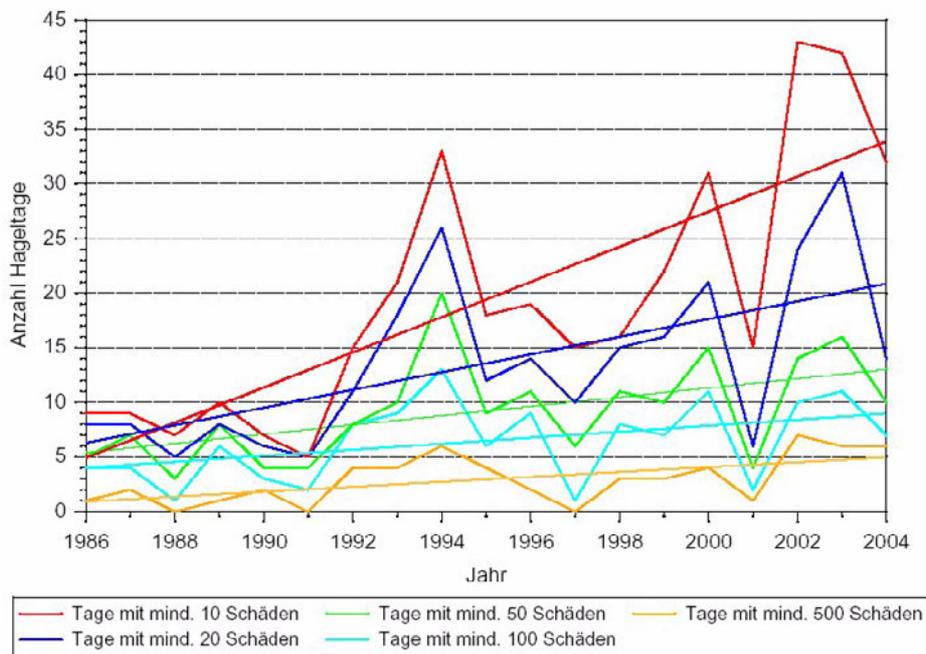


Abb. 9.4: Anzahl der Hageltage pro Jahr in Baden-Württemberg für den Zeitraum 1986-2004 für verschiedene Schwellenwerte nach Daten der SV Versicherung. Hageltage wurden dabei definiert durch die Überschreitung verschiedener Schwellenwerte an Schadenmeldungen.

### 9.4 Starkwindereignisse

Seit 1970 zeigt sich in Deutschland der Trend, dass Naturkatastrophen zunehmen. Dies gilt sowohl für die Häufigkeit einzelner Ereignisse als auch für die Schäden, die sie verursachen. Von den insgesamt 580 Ereignissen von 1970 bis 2003 nehmen die Stürme in jeder Hinsicht den Spitzenplatz ein: Sie waren die häufigsten Ereignisse (65%), forderten die meisten Todesopfer (71%) und hinterließen die höchsten volkswirtschaftlichen Schäden (*Münchener Rück, 2005*). Grund dafür ist vor allem die große räumliche Ausdehnung des Windfeldes von bis zu 1000 km. Als großskalige Phänomene können Winterstürme gut an einzelnen Messstationen erfasst werden. Schwere Winterstürme mit

Orkanstärke treten in Baden-Württemberg verhältnismäßig selten auf. Um Aussagen über die Variabilität ihres Auftretens sowie Änderung von Intensität und Häufigkeit ableiten zu können, muss daher auf möglichst lange Zeitreihen zurückgegriffen werden.

### 9.4.1 Methode

Um den Zeitraum der letzten 200 Jahre abzudecken, wurde das Auftreten von Winterstürmen - neben der Analyse von Messdaten - auch aus meist deskriptiven historischen Daten rekonstruiert. Quellen hierfür waren u.a. Jahrbücher, Stadtchroniken und Geschichtsblätter (*Kottmeier et al., 2004*). Für weitergehende Untersuchungen zur gegenwärtigen Entwicklung wurden Daten der SYNOP-Stationen des DWD in Baden-Württemberg herangezogen. Alternativ zur Auswertung solcher Messdaten können auch Veränderungen der dazu gehörenden Großwetterlagen Hinweise auf ein sich änderndes Risiko von Extremwetterereignissen liefern.

### 9.4.2 Ergebnisse zur Sturmentwicklung

Insgesamt zeigten die historischen Quellen, dass die Sturmhäufigkeit in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts noch deutlich höher war als in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Betrachtet man allerdings nur die neun schwersten Stürme der letzten 200 Jahre so fällt auf, dass sich allein sechs dieser Stürme in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts ereignet haben. Dies ist ein Hinweis auf eine Zunahme von extremen Sturmereignissen. Ein eindeutiger Trend über den gesamten Zeitraum lässt sich daraus jedoch nicht ableiten. Aus den zehn höchsten an den SYNOP-Stationen gemessenen Tagesmaxima der Böengeschwindigkeiten in den Wintermonaten wurden einzelne Jahresmittel gebildet, die in [Abbildung 9.5](#) exemplarisch für die Stationen Karlsruhe und Feldberg für den Zeitraum 1952-2002 dargestellt sind.

An den Talstationen wie der Station Karlsruhe zeigt sich eine markante Zunahme der Böengeschwindigkeit. Die eingezeichnete lineare Ausgleichsgerade steigt von einem mittleren Wert von 18,8 m/s im Jahr 1952 auf 23,6 m/s in 2002 an. Der starken jährlichen Variabilität der Daten überlagert sind außerdem Schwankungen mit einer Periode von jeweils 5-10 Jahren, wie anhand des eingezeichneten 5-jährigen gleitenden Mittelwerts zu sehen ist.

An den Bergstationen wie der Station Feldberg kann dieser ausgeprägte Trend dagegen nicht beobachtet werden. Hier wird sogar eine leichte Abnahme der Geschwindigkeiten über den gesamten Zeitraum beobachtet, die sich insbesondere aus dem starken Rückgang in den 1990ern ergibt. Die Schwankungen mit einer Periode von jeweils 5-10 Jahren treten hier schwächer hervor als an der Station Karlsruhe.

Bestätigt wird dieser höhenabhängig unterschiedliche Trend der Starkwindgeschwindigkeit durch Analysen des Vertikalprofils an der Radiosondenstation Stuttgart-Schnarrenberg. Dort wurde in einer Höhe von 200 bzw. 515 m über Grund innerhalb der letzten 28 Jahre eine ausgeprägte Zunahme der Windgeschwindigkeit beobachtet, in einer Höhe von 1700 m ist hingegen kein Trend zu erkennen.

Die Ursache für diese gegenläufigen Trends kann hier nicht abschließend geklärt werden, als eine Möglichkeit kommt jedoch die veränderte Schichtungsstabilität der Atmosphäre während Starkwindereignissen in Betracht.

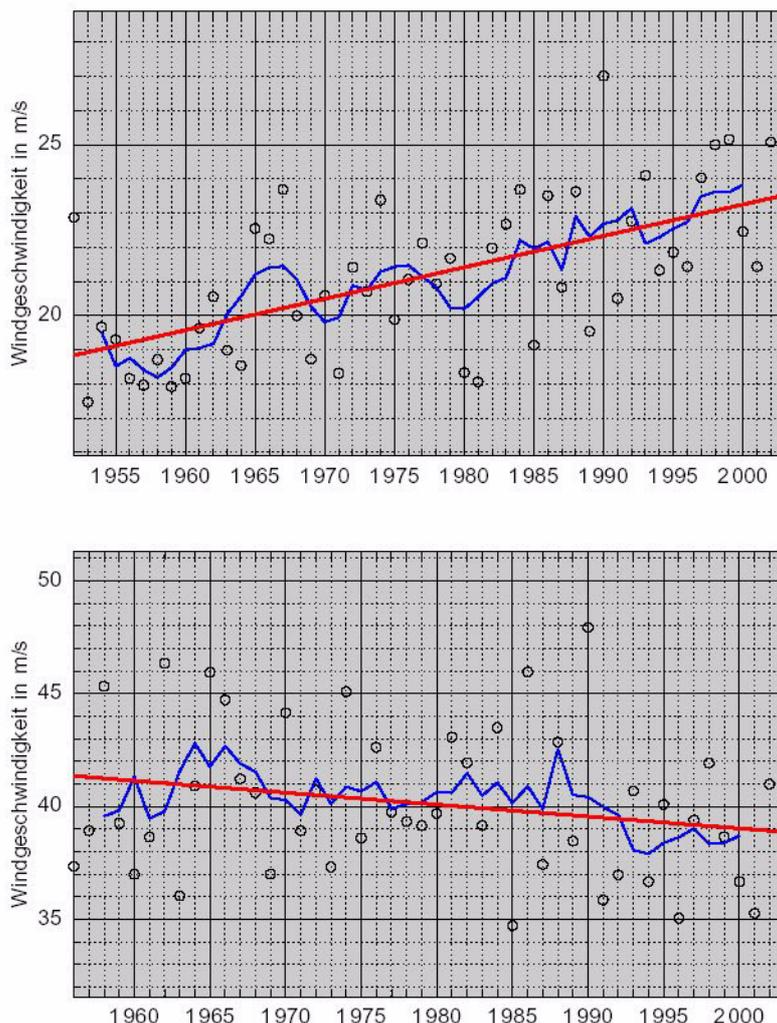


Abb. 9.5: Zeitreihe der höchsten Böengeschwindigkeiten (Jahresmittel der zehn höchsten Tagesmaxima) an den SYNOP-Stationen Karlsruhe (oben) und Feldberg (unten) für den Zeitraum 1952-2002 jeweils mit 5-jährigem gleitendem Mittel (blau) und linearer Ausgleichsgerade (rot).

### 9.4.3 Veränderungen der Großwetterlagen

Hinsichtlich der Entwicklung von Extremwetterereignissen beobachtet man in den letzten dreißig Jahren bei einigen ursächlich damit verbundenen Großwetterlagen signifikante Veränderungen, die mit dem Klimawandel in Zusammenhang gebracht werden. Für bestimmte Westwindwetterlagen in Europa (Westlage zyklonal), konnte eine signifikante Zunahme der Andauer seit den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts gezeigt werden (Fraedrich et al., 2001). Dies ist in [Abbildung 9.6](#) deutlich zu erkennen, wobei die beiden Achsen die unterschiedliche zeitliche Dimension von Klima (x-Achse: 100 Jahre) und Wetter (y-Achse: 2 bis 4 Tage) wiedergeben. Diese Großwetterlagen im Winter sind häufig mit extremen lokalen Niederschlägen oder heftigen Stürmen verbunden, z.B. der Lawinenkatastrophe von Galtür, Anfang 1999, oder dem Sturm Lothar, Ende 1999.

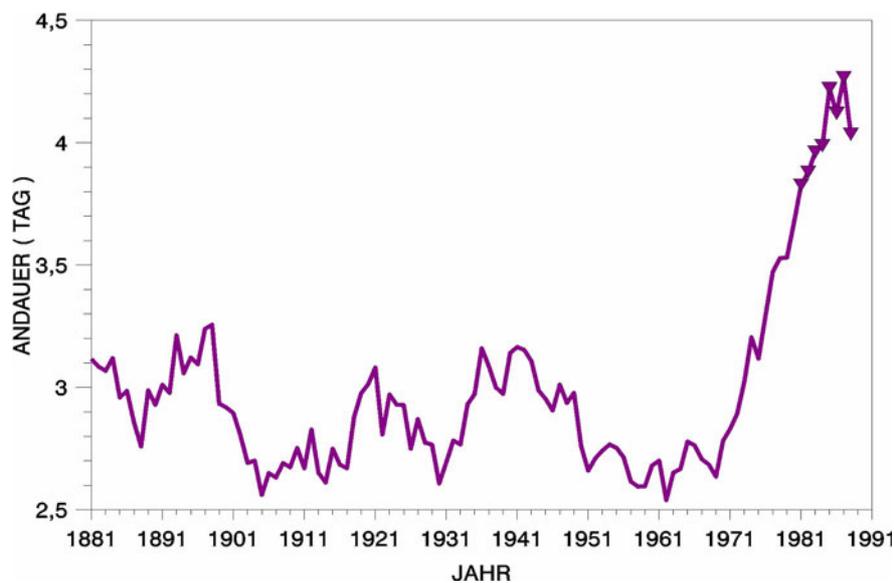


Abb. 9.6: Ergebnis einer statistischen Analyse von winterlichen Westwind-Wetterlagen in Europa für den Zeitraum 1881 bis 1991 (Fraedrich et al., 2001). Die Andauer in Tagen ist im zehnjährigen Mittel angegeben. Seit etwa 1970 nimmt sie signifikant zu. Diese Großwetterlagen sind auch mit Extremereignissen wie Starkregen und Stürmen verbunden, z.B. dem Sturm ‚Lothar‘ (26.12.1999).

Die "Westlage zyklonal" wurde im Rahmen des Projekts KLIWA auch als relevant für die Hochwasserentwicklung identifiziert. Die kombinierte Auswertung der Hochwasser und Wetterlagen in verschiedenen Regionen Baden-Württembergs zeigt, dass nahezu alle extremen Hochwasser an großen Gewässern durch langandauernde Perioden (6-23 Tage) der Wetterlage im Winter (Dez.-Feb.) und den hieraus resultierenden ergiebigen Niederschlägen ausgelöst wurden. Für die Hochwasserbildung an größeren Gewässern Baden-Württembergs muß die "Westlage zyklonal" daher als äußerst "kritische" Wetterlage angesehen werden (Caspary, 2004).

## 9.5 Ausblick

Insgesamt kann aus den bisherigen Arbeiten der vorsichtige Schluss gezogen werden, dass es in den vergangenen Jahrzehnten in Baden-Württemberg einerseits zu einer Zunahme an Gewitterereignissen gekommen ist, andererseits diese aufgrund der höheren verfügbaren Energie auch in ihrer Schwere zugenommen haben. Dieses vorläufige Ergebnis muss allerdings durch weitere Arbeiten bestätigt werden. Für systematische Untersuchungen sollten dazu zusätzliche flächendeckende Daten herangezogen werden. Hierzu bieten sich sowohl Blitzdaten als auch Volumendatensätze des IMK-Niederschlagsradars an. Weiterhin könnte eine weitere Analyse der Schadendaten der SV-Gebäudeversicherung Aufschluss über die regionale Verteilung und Häufigkeit schwerer Gewitterstürme liefern.

Die zukünftige Entwicklung meteorologischer Ereignisse wie Winterstürme, Gewitter und Hagel ist nicht ohne weiteres aus den gefundenen Trends zu projizieren. Zwar spricht manches dafür, dass man auch in Zukunft eher mit einer Zu- denn mit einer Abnahme zu rechnen hat, doch braucht man Simulationen mit Klimamodellen hoher regionaler bis

lokaler Auflösung, um die Auswirkungen der Klimaänderung auf veränderte Zirkulationsmuster und Konvektionsbedingungen zu erfassen.

Die erzielten Ergebnisse liefern trotz verbliebener Unsicherheiten erste Hinweise auf notwendige Anpassungsstrategien für schon derzeit betroffene Sektoren und Gebiete.

## LITERATUR

- Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg (1999): Arbeitsbericht
- Baden-Württembergischer Industrie- und Handelskammertag (2003): IHK-Freizeitbarometer Baden-Württemberg 2003: Die Entwicklung in den Freizeiteinrichtungen in den Jahren 2001/02. Federführung Tourismus, Stuttgart
- Bauer, H.-G., Heine, G. (1992): Die Entwicklung der Brutvogelbestände am Bodensee: Vergleich halbquantitativer Rasterkartierungen 1980/81 und 1990/91. J. Orn., 133, 1-22
- Bauer, H.-G., Boschert, M. (2002): Bestandstrends einiger Brutvogelarten Baden-Württembergs. Ökol. Vögel, 24, 221-245
- Berthold, P., Schlenker, R. (1975): Das "Mettnau-Reit-Ilmlitz-Programm" - ein langfristiges Vogelfangprogramm der Vogelwarte Radolfzell mit vielfältiger Fragestellung. Die Vogelwarte, 28, 97-123
- Berthold, P., Mohr, G., Querner, U. (1990): Steuerung und potentielle Evolutionsgeschwindigkeit des obligaten Teilziehverhaltens: Ergebnisse eines Zweiweg-Selektionsexperiment mit der Mönchsgrasmücke (*Sylvia atricapilla*). J. Orn., 131, 33-45
- Berthold, P. (1996): Vogelzug. Wissenschaftl. Buchgesellschaft, Darmstadt
- Berz, G., Siebert, A. (2004): Welt der Naturgefahren. CD-ROM, Münchener Rückversicherung, 2004
- Black, T. A., Denhartog, G., Neumann, H. H., Blanken, P. D., Yang, P. C., Russell, C., Nestic, Z., Lee, X., Chen, S. G., Staebler, R., Novak, M. D. (1996): Annual Cycles of Water Vapour and Carbon Dioxide Fluxes in and Above a Boreal Aspen Forest. Global Change Biology, 2, 219-229
- Blago, N. (1992): Euro-Bugoff, ein Prognosemodell für die biologische und integrierte Bekämpfung des Apfelwicklers *Cydia pomonella* L. in Europa. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen
- Boschert, M. (2004): Der Große Brachvogel (*Numenius arquata* [Linnaeus 1758]) am badischen Oberrhein – Wissenschaftliche Grundlagen für einen umfassenden und nachhaltigen Schutz. Unveröffentlichte Dissertation, Universität Tübingen
- Both, C., Visser, M. E. (2001): Adjustment to climate change is constrained by arrival date in a long-distance migrant bird. Nature, 411, 296-298
- Botkin, D. B., Nisbet, R. A. (1992): Forest response to climatic change: effects of parameter estimation and choice of weather pattern on the reliability of projections. Climatic Change, 20, 87-111
- Bremicker, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg, 119 S.
- Caspary, H. J. (2004): Zunahme "kritischer" Wetterlagen als Ursache für Entstehung extremer Hochwasser in Südwestdeutschland. 2. KLIWA-Symposium, Würzburg 2004
- Coppack, T., Pulido, F. (2004): Photoperiodic response and the adaptability of avian life cycles to environmental change. In: A. P. Møller, W. Fiedler, P. Berthold (eds.): Effects of climate change on birds. Academic Press. (im Druck)
- Cornelius, I. (2003): Zur Bevölkerungsentwicklung in Baden-Württemberg bis zum Jahr 2050. In: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Statistisch-prognostischer Bericht 2003. Stuttgart, S. 69-88
- Crick, H. Q. P., Sparks, T. H. (1999): Climate change related to egg-laying trends. Nature, 399, 423-424
- Deutscher Wetterdienst (2001): Witterungsreport: Daten. Geschäftsfeld Klima- und Umweltberatung, Jahrgang 3, Offenbach
- Dunn, P. (2004): Breeding dates and reproductive performance. In: A.P. Møller, W. Fiedler, P. Berthold (eds.): Effects of climate change on birds. Academic Press. (im Druck)
- Fanger, P. O. (1970): Thermal Comfort. McGraw-Hill, New York

- Fiedler, W. (2002): Ein Neubürger in Süddeutschland: Die Weißrandfledermaus. *Naturschutz zwischen Donau und Bodensee*, 1, 35-36
- Fiedler, W. (2003): Recent Changes in Migratory Behaviour of Birds. In: Berthold, P., Gwinner, E. & Sonnenschein, E. (Ed.): *Avian Migration*. Springer, Berlin, 21-38
- Fiedler, W., Bairlein, F., Köppen, U. (2004): Using large-scale data from ringed birds for the investigation of effects of climate change on migrating birds: pitfalls and prospects. In: A.P. Møller, W. Fiedler, P. Berthold (eds.): *Effects of climate change on birds*. Academic Press. (Im Druck)
- Flemming, G. (1994): *Wald Wasser Klima - Einführung in die Forstmeteorologie*. 3. Aufl., Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin. 136 S.
- Förschler, A., Portz, C., Schmitz-Eiberger, M., Steiner, U., Noga, G. (2003): Minderung von pilzlichem Pathogenbefall im organischen Obstbau durch Zufuhr von Antioxidantien. *Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL*, 113
- Fraedrich, K., Gerstengarbe, F.-W., Werner, P. C. (2001): Climate shift during the last century. *Climatic Change*, 50, 405-417
- Gagge, A. P., Fobelets, A. P., Berglund, P. E. (1986): A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHREA, Trans. Vol. 92*, 709-731
- Gatter, W. (1992): Zugzeiten und Zugmuster im Herbst: Einfluß des Treibhauseffektes auf den Vogelzug? *J. Orn.*, 133, 427-436
- Gerstengarbe, F.-W., Badeck, F., Hattermann, F., Krysanova, V., Lahmer, W., Lasch, P., Stock, M., Suckow, F., Wechsung, F., Werner, P. C. (2003): Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. *PIK-Report, Nr. 83, ISSN 1436-0179*
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P. C. (2005): Simulationsergebnisse des regionalen Klimamodells STAR. In: Wechsung, F., Becker, A., Gräfe, P., *GLOWA-ELBE I - Integrierte Analyse der Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet*. *PIK-Report, No. 95, ISSN 1436-0179*, 100-106
- Glugla, G. (1969): Berechnungsverfahren zur Ermittlung des aktuellen Wassergehaltes und Gravitationswasserabflusses im Boden. *Albrecht-Thaer-Archiv*, 13, 371-376
- Gottwald, R. (1996): Prognose der Phänologie wichtiger Schadorganismen im Apfelbau mit Hilfe von Temperatursummen (Phenology-forecasting of important harmful organisms in apple orchards with the help of temperature sums). *Gesunde Pflanzen*, 48. Jahrg., 4
- Grote, R., Suckow, F. (1998): Integrating dynamic morphological properties into forest growth modeling. I. Effects on water balance and gas exchange. *Forest Ecology and Management*, 112, 101-119
- Grote, R., Suckow, F., Bellmann, K. (1999): Modelling of carbon-, nitrogen-, and water balances in pine stands under changing air pollution and deposition. In: R.F. Hüttl and K. Bellmann (eds), *Changes of Atmospheric Chemistry and Effects on Forest Ecosystems. A Roof Experiment Without Roof. Nutrients in Ecosystems*. Kluwer, Dordrecht, 251-281
- Hagemeijer, W. J. M., Blair, M. J. (eds.) (1997): *The EBCC atlas of European breeding birds*. T & A D Poyser, London
- Harrison, P. A., Vanhinsbergh, D. P., Fuller, R. J., Berry, M. (2003): Modelling climate change impacts on the distribution of breeding birds in Britain and Ireland. *J. Nat. Conserv.*, 11, 31-42
- Haße, C. (2004): personal communication
- Havenith, G., Luttikholt, V. G. M., Vrijkotte, T. G. M. (1995): The relative influence of body characteristics on humid heat stress response. *European Journal of Applied Physiology*, Vol. 70, 270-279
- Haxeltine, A., Prentice, I. C. (1996): BIOME3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability and competition among plant functional types. *Global Biogeochemical Cycles*, 10(4), 693-709
- Heine, G., Jacoby, H., Leuzinger, H., Stark, H. (1999): Die Vögel des Bodenseegebietes. *Ornithol. Jh. Bad.-Württemberg*, 14/15, 1-847

- Hölzinger, J. (1997): Die Vögel Baden-Württembergs. Bd. 3.1., Singvögel 1, Ulmer, Stuttgart
- Huglin, P. (1978): Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermique d'un milieu viticole. C.R. Acad. Agric., 1117-1126
- Huglin, P. (1986): Biologie et ecologie de la vigne. Ed. Payot Lausanne, Paris, Jones, G.V. and Davis, R.E.
- Huntly, B. (2004): Climate change and birds. – Vortrag 6<sup>th</sup> International Conference of the European Bird Census Council (EBCC): "Bird Numbers 2004 - Monitoring in a Changing Europe"; September 2004, Kayseri, Turkey
- IPCC (2001): Climate change 2000: Summary for policy makers. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- IPCC (2001): Climate change 2001: The scientific basis. J. T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden and D. Xiaosu (Hrsg.), Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Jendritzky, G., Sönning, G. W., Swantes, H. J. (1979): Ein objektives Bewertungsverfahren zur Beschreibung des thermischen Milieus in der Stadt- und Landschaftsplanung ("Klima-Michel-Modell"). Beitr. Akad. F. Raumforschung u. Landesplanung, 28, 85 S.
- Jendritzky, G. (1990): Bioklimatische Bewertungsgrundlage der Räume am Beispiel von mesoskaligen Bioklimakarten. In: Methodik zur räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen: Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell. Akademie für Raumforschung und Landesplanung, 114, 7-69
- Jiguet, F., Delattre, M. (2004): Common birds facing climate change: species and community dynamics at range edges. Vortragskurzfassung 6<sup>th</sup> International Conference of the European Bird Census Council (EBCC): "Bird Numbers 2004 - Monitoring in a Changing Europe". September 2004, Kayseri, Turkey
- Johnson, H., Robinson, J. (2002): Der Weinatlas. Gräfe und Unzer, 352 S.
- Kartschall, T., Döring, P., Suckow, F. (1990): Simulation of Nitrogen, Water and Temperature Dynamics in Soil. Syst. Anal. Model. Simul., 7(6), 33-40
- Käse, H. (1969): Ein Vorschlag für eine Methode zur Bestimmung und Vorhersage der Waldbrandgefährdung mit Hilfe komplexer Kennziffern. Abhandlungen des meteorologischen Dienstes der Deutschen Demokratischen Republik, 94, Berlin, 98 S.
- Kaspar, C. (1996): Die Tourismuslehre im Grundriss. 5. Aufl., P. Haupt, Bern
- KLIWA (2000): Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. KLIWA-Symposium, 29.–30. Nov. 2000, Karlsruhe
- KLIWA (2002): KLIWA Statusbericht 2001. Arbeitskreis KLIWA - Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft
- Knötzsch, G. (2002): Das Auftreten mediterraner Libellenarten im Eriskircher Ried. Naturschutz zwischen Donau und Bodensee, 1, 37-42
- Koitzsch, R. (1977): Schätzung der Bodenfeuchte aus meteorologischen Daten, Boden- und Pflanzenparametern mit einem Mehrschichtmodell. Z. f. Meteor., 27(5), 302-306
- Koppe, C., Jendritzky, G. (2004): Auswirkungen der Hitzewelle 2003 auf die Gesundheit. In: Klimastatusbericht 2003: 152-162, <http://www.ksb.dwd.de>
- Koppe, C., Kovats, S., Jendritzky, G., Menne, B. et al. (2004): Heat-waves: risks and responses. World Health Organization, Regional Office for Europe, Health and Global Environmental Change, Series No. 2., Kopenhagen, Denmark. 123 Seiten
- Koppe, C., Jendritzky, G. (2005): Inclusion of short-term adaptation to thermal stresses in a heat load warning procedure. Met. Zeitschrift, Vol. 14, No. 2, 271-278
- Kottmeier, C., Kunz, M., Hofherr, T., Schmoeckel, J. (2004): Wettergefahren in Südwestdeutschland. Fridericiana, Zeitschrift der Universität Karlsruhe (TH) 42, 33-47
- Kovats, S., Ebi, K. L., Menne, B. et al. (2004): Methods of assessing human health vulnerability and public health adaptation to climate change. World Health Organization, Regional Office for Europe, Health and Global Environmental Change, Series No. 1, Kopenhagen, Denmark. 111 Seiten.

- Kramer, K. (1995): Modeling Comparison to Evaluate the Importance of Phenology for the Effects of Climate-Change on Growth of Temperate-Zone Deciduous Trees. *Climate Research*, 5, 119-130
- Krysanova, V., Wechsung, F., Becker, A., Poschenrieder, W., Gräfe, J. (1999): Mesoscale ecohydrological modeling to analyze regional effects of climate change. *Environmental Modeling & Assessment*, 4, 259-271
- Lack, D. (1968): *Ecological adaptations for breeding in birds*. Methuen, London
- Lasch, P., Badeck, F.-W., Lindner, M., Suckow, F. (2002): Sensitivity of simulated forest growth to changes in climate and atmospheric CO<sub>2</sub>. *Forstwiss. Centralblatt*, 121, Supplement 1, 155-171
- Lasch, P., Badeck, F.-W., Suckow, F., Lindner, M., Mohr, P. (2005): Model-based analysis of management alternatives at stand and regional level in Brandenburg (Germany). *Forest Ecology and Management*, 207, (1-2), 59
- Lehikoinen, E., Sparks, Th., Zalakevicius, M. (2004): Arrival and departure dates. In: A.P. Møller, W. Fiedler, P. Berthold (eds.): *Effects of climate change on birds*, Academic Press. (im Druck)
- Leinonen, I., Kramer, K. (2002): Applications of phenological models to predict the future carbon sequestration potential of boreal forests. *Climatic Change*, 55, 99-113
- MacHardy, W. E., Gadoury, D. M. (1989): A Revision of Mills's Criteria for Predict Apple Scab Infection Periods. *Phytopathology*, 79, pp. 304-310
- Mäkelä, A. (1986): Implications of the pipe model theory on dry matter partitioning and height growth trees. *Journal of Theoretical Biology*, 123, 103-120
- Mäkelä, A., Sievänen, R., Lindner, M., Lasch, P. (2000): Application of volume growth and survival graphs in the evaluation of four process-based forest growth models. *Tree Physiology*, 20, 347-355
- McCullagh, P., Nelder, J. A. (1989): *Generalized linear models*. Chapman and Hall, London
- McMichael, A. J., Haines, A., Slooff, R., Kovats, R. S. (1996): *Climate change and human health: an assessment by a task group on behalf of the World Health Organization, the World Meteorological Organization and the United Nations Environment Programme*. WHO, Geneva
- Menzel, L. (1999): Flächenhafte Modellierungen der Evapotranspiration mit TRAIN. PIK-Report, 54
- Mills, W. D., La Plante, A. A. (1951): Diseases and insects in the orchard. *Cornell Ext. Bull.*, 711, p 100
- Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (2001): *Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg*. 1. Auflage, analoge und digitale Ausgabe
- Moorhead, D. L., Sinsabuagh, R. L., Linkins, A. E., Reynolds, J. F. (1996): Decomposition processes: modelling approaches and applications. *The Science of the Total Environment*, 183, 137-149
- Münchener Rück (1999): *Naturkatastrophen in Deutschland*. Eigenverlag, München
- Münchener Rück (2005): *Topics Geo - Jahresrückblick Naturkatastrophen 2004*. Eigenverlag, München
- Parsons, K. C. (2003): *Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance*. 2. Ausgabe, London, Taylor & Francis
- Priestley, C. H. B., Taylor, R. J. (1972): On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly weather review*, 100, 81-92
- Rennenberg, V. H., Seiler, W., Matyssek, R., Gessler, A., Kreuzwieser, J. (2004): European beech (*Fagus sylvatica* L.) - a forest tree without future in the south of Central Europe? *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 175, 210-224
- Reyher, H. (2004): Zur Brutbiologie und Siedlungsdichte des Feldsperlings (*Passer montanus*) im mittleren Vorland der Schwäbischen Alb. *Vogelwarte*, 42, 203-212
- Rossi, V., Pont, I., Marinelli, M., Giosue, S., Bugani, R. (2001): Environmental Factors Influencing the Dispersal of *Venturia inaequalis* Ascospores in the Orchard Air. *Phytopathology*, 149, pp.11-19
- Rupp, J., Saumer, F. (1996): Die Wiederbesiedlung des Kaiserstuhls durch den Bienenfresser (*Merops apiaster*). *Naturschutz südl. Oberrhein*, 1, 83-92

- Santos, F. D., Forbes, K., Moita, R. (Hrsg) (2002): Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures (SIAM Project). Gradiva, Lissabon. 454 S.
- Schaber, J., Badeck, F.-W., Lasch, P. (1999): Ein Modell der Sukzessionsdynamik europäischer Wälder - Forest Ecosystems in a changing Environment (4C). In: Deutscher Verband forstlicher Versuchsanstalten - Sektion forstliche Biometrie und Informatik, 11. Jahrestagung und Internationale biometrische Gesellschaft, Deutsche Region, Arbeitsgruppe Ökologie, Herbstkolloquium (ed. D. R. Pelz, O. Rau and J. Saborowski), 212-217
- Schaber, J. (2002): Phenology in Germany in the 20th century: methods, analyses and models. PIK-Report, 78, PIK, Potsdam, 145 S.
- Schaber, J., Badeck, F.-W. (2003): Physiology-based phenology models for forest tree species in Germany. International Journal of Biometeorology, 47, 193-201
- Schröter, D., Acosta-Michlik, L., Arnell, A. W., Araújo, M. B., Badeck, F., Bakker, M., Bondeau, A., Bugmann, H., Carter, T., de la Vega-Leinert, A. C., Erhard, M., Espiñeira, G. Z., Ewert, F., Fritsch, U., Friedlingstein, P., Glendining, M., Gracia, C. A., Hickler, T., House, J., Hulme, M., Klein, R. J. T., Krukenberg, B., Lavorel, S., Leemans, R., Lindner, M., Liski, J., Metzger, M. J., Meyer, J., Mitchell, T., Mohren, F., Morales, P., Moreno, J. M., Reginster, I., Reidsma, Rounsevell, M. P., Pluimers, J., Prentice, I. C., Pussinen, A., Sánchez, A., Sabaté, S., Sitch, S., Smith, B., Smith, J., Smith, P., Sykes, M. T., Thonicke, K., Thuiller, W., Tuck, G., van der Werf, G., Vayreda, J., Wattenbach, M., Wilson, D. W., Woodward, F. I., Zaehle, S., Zierl, B., Zudin, S., Cramer, W. (2004): Advanced Terrestrial Ecosystem Analysis and Modelling, ATEAM. Final report 2004, [www.pik-potsdam.de/ateam](http://www.pik-potsdam.de/ateam)
- Schultz, H. R. (2000): Climate Change and viticulture: A European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects. Austr. J. of Grape and Wine Research 2000, 6, 2-12
- Schuster, S., Blum, V., Jacoby, H., Knötzsch, G., Leuzinger, H., Schneider, M., Seitz, E., Willi P. (1983): Die Vögel des Bodenseegebietes. Ornithologische Arbeitsgemeinschaft Bodensee, Konstanz
- Schuster, S., Schilhansl, Peintinger, M. (2002): Langfristige Dynamik der Winterbestände von Mäusebusard *Buteo buteo* und Turmfalke *Falco tinnunculus* im Bodenseegebiet und Donaumoos. Vogelwelt, 123, 117-124
- Sevacherian, V., Stern, V. M., Mueller, A. J. (1977): Heat accumulation for timing Lygus control pressures in a safflower-cotton complex. Journal of Economic Entomology, 70399-402
- Staatsministerium Baden-Württemberg (2004): <http://www.baden-wuerttemberg.de/land/reisen/>
- Staiger, H., Bucher, K., Jendritzky, G. (1997): Gefühlte Temperatur. Die physiologisch gerechte Bewertung von Wärmebelastung und Kältestress beim Aufenthalt im Freien in der Maßzahl Grad Celsius. Annalen der Meteorologie, Vol. 33, 100-107
- Statistisches Bundesamt (2000): Statistik Regional: Daten und Informationen der statistischen Ämter des Bundes und der Länder. EasyStat. CD-ROM, Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2004): <http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/>
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2003a): Statistik Aktuell: Tourismus in Baden-Württemberg. Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2003b): Statistische Berichte Baden-Württemberg: Beherbergung im Kalenderjahr 2002. Artikel-Nr. 3547 02003, 03.04.2003, Stuttgart
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2003c): Statistische Berichte Baden-Württemberg: Beherbergung im Reiseverkehr Baden-Württembergs im Winterhalbjahr 2002/2003. Artikel-Nr. 3547 03001, 02.10.2003, Stuttgart
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2004): Statistische Berichte. C I 5-j Bestockte Rebflächen und Rebsorten 2003 (G), 12 S.
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2004): Statistische Berichte Baden-Württemberg: Beherbergung im Reiseverkehr Baden-Württembergs im Sommerhalbjahr 2003. Artikel-Nr. 3547 03003, 05.02.2004, Stuttgart

- Stein, U. (2003): Voraussichtliche Bevölkerungsentwicklung in den Stadt- und Landkreisen Baden-Württembergs bis 2020. In: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Statistisch-prognostischer Bericht 2003. Stuttgart, S. 89-119
- Stensvand, A., Gadoury, D. M., Amundsen, T., Semb, L., Seem, R. C. (1997): Ascospore Release and Infection of Apple Leaves by Conidia and Ascospores of *Venturia inaequalis* at Low Temperatures. *Phytopathology*, 87, pp. 1046-1053
- Stock, M. (2003): Klimafolgenforschung - Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Gesellschaft: 1. Problemstellung und Grundlagen. UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox., S. 251-261, UWSF 15 (4)
- Stock, M., Badeck, F., Gerstengarbe, F.-W. (2004): Gesamtübersicht und Stand der Arbeiten "Auswirkungen des Klimawandels auf Landwirtschaft, Tourismus, Schifffahrt und Energiewirtschaft". Vortrag auf dem 1. Symposium zum Verbundprojekt "Klimawandel – Auswirkungen, Risiken, Anpassung", Stuttgart, Juli 2004
- Stock, M. (2004): Klimafolgenforschung - Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Gesellschaft: 2. Fallstudien. UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox., S. 115-124, UWSF 16 (2)
- Stock, M. (2004): Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft. Tagungsband zur ATV-DVWK Bundestagung, 11 S., Würzburg, Sept. 2004
- Stock, M., Gerstengarbe, F.-W., Kartschall, T., Werner, P. C. (2005): Reliability of Climate Change Impact Assessments for Viticulture. 12 pp, *Acta Horticulturae*, 2005 (submitted for publication)
- Suckow, F., Badeck, F.-W., Lasch, P., Schaber, J. (2001): Nutzung von Level-II-Beobachtungen für Test und Anwendungen des Sukzessionsmodells FORESEE. *Beitr. Forstwirtsch. u. Landsch.ökol.*, 35(2), 84-87
- Taubenheim, J. (1969): Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten. In: Buchheim, W., Fanslau, G., Hiller, W., Menzel, H. (Hrsg): *Geographische Monographien*, Band 5, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Pertig K.-G., Leipzig, 386 S.
- Thomas, C. D., Lennon, J. J. (1999): Birds extend their ranges northwards. *Nature*, 399, 213
- VDI (1998): Environmental Meteorology – Methods for the human biometeorological evaluation of climate and air quality for urban and regional planning on the regional level. Part I: Climate. VDI Richtlinien 3787/2, VDI DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b, Beuth Verlag, Düsseldorf
- Vetter, E. (2004): Persönliches Gespräch. 6. Mai 2004, Freudenstadt
- Visser, M. E., van Noordwijk, A. J., Tinbergen, J. M., Lessels, C. M. (1998): Warmer springs lead to mistimed reproduction in great tits (*Parus major*). *Proc. R. Soc.*, London, B, 265, 1867-1870
- Visser, M. E., Adriaansen, F., van Balen, J. H., Blondel, J., Dhondt, A. A., van Dongen, S., du Feu, C., Ivankina, E. V., Kerimov, A. B., de Laet, J., Matthysen, E., McCleery, R., Orell, M., Thomson, D. L. (2003): Variable responses to large-scale climate change in European *Parus* populations. *Proc. R. Soc.*, London, Vol. 270, No. 1513, pp265, 367-372
- Walther, G. H. et al. (2002): Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416, 389-395
- Wenzel, V. (2004): Integrierte Bewertung der Verwundbarkeit des Berliner Wasserhaushalts. Kapitel 13 des Berichts zum GLOWA-Elbe Projekt, Potsdam 2004
- Werner, P. C., Gerstengarbe, F.-W. (1997): A proposal for the development of climate scenarios. *Clim. Res.*, 8, 171-182
- Werner, S. (2002): Erster Brutnachweis des Orpheusspötters für das Bodenseegebiet. *Naturschutz zwischen Donau und Bodensee*, 1, 27-29
- White, M. A., Running, S. W., Thornton, P. E. (1999): The impact of growing-season length variability on carbon assimilation and evapotranspiration over 88 years in the eastern US deciduous forest. *International Journal of Biometeorology*, 42, 139-145
- White, M. A., Nemani, A. R. (2003): Canopy duration has little influence on annual carbon storage in the deciduous broad leaf forest. *Global Change Biology*, 9, 967-972

- Williams, J. R., Jones, C. A., Kiniry, J. R., Spanel, D. A. (1989): The EPIC crop growth model. Transactions of the ASAE, 32, 497-511
- Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (Hg.) (2005): Nachhaltige Entwicklung des Schneesports und des Wintersporttourismus in Baden-Württemberg. Ein Leitfaden für Politik, Sport, Kommunen und touristische Leistungsträger, [www.wm.baden-wuerttemberg.de](http://www.wm.baden-wuerttemberg.de)
- Zapf, F. (1998): Elektronische Besucherzählung im Wanderparadies Wutachschlucht. Der Schwarzwald, Heft IV, 153-155
- Zapf, F. (2003): Es gibt kein schlechtes Wetter. Der Schwarzwald, Heft I
- Zapf, F. (2004): Ortsgruppe Bonndorf zählte auch 2003 die Besucher in der Wutachschlucht. Der Schwarzwald, Heft I
- Zar, J. H. (1999): Biostatistical Analysis. 4<sup>th</sup> ed., Prentice Hall, London



## GLOSSAR

Bei einigen Begriffen wurden Auszüge aus einem Glossar der Münchener Rückversicherung verwendet (*Berz 2004*).

4C

**FORESt** Ecosystems in a changing Environment (FORESEE), Modell des Waldwachstums

Abfluss

Der Teil des gefallenen Niederschlags, der in Bächen und Flüssen (sowie unterirdisch) abfließt. Abfluss ist ein Wasservolumen pro Zeiteinheit; er wird in Kubikmetern pro Sekunde ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) angegeben. Der Gesamtabfluss setzt sich zusammen aus dem Oberflächenabfluss, dem unterirdischen Zwischenabfluss und dem grundwassergespeisten Basisabfluss. Oberflächen- und Zwischenabfluss werden als Direktabfluss zusammengefasst.

Anpassung

Das *Anpassungspotenzial* einer Region bzw. eines Wirtschaftssektors bezüglich Klimaänderung stellt eine entscheidende Größe für eine fundierte Einschätzung der *Verwundbarkeit* dar. Darunter versteht man die Fähigkeit der Gesellschaft zur Planung, Vorbereitung, Unterstützung und Implementierung von Handlungsmaßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel.

Beherbergungsangebot

Die Möglichkeit zur Übernachtung in Fremdenzimmern, Gasthöfen und verschiedenen Einrichtungen des Hotelgewerbes bilden das Beherbergungsangebot. Nicht eingeschlossen sind Ferienwohnungen- und Häuser. Die Anzahl der Fremdenbetten, die von Beherbergungsbetrieben sowie von Privatvermietern in diesen Einrichtungen angeboten werden, bilden die Beherbergungskapazität. Getrennt davon werden Stellplätze auf Campingplätzen erhoben. (Nach: "Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland, CD Freizeit und Tourismus" )

Belastung

Die Einwirkungen der klimatischen Veränderungen auf ein exponiertes System (Bauwerk, Anlage, Staat, Unternehmen etc.) können extreme Belastungen durch Wärme, Kälte, Niederschlag, Sturm, Hochwasser etc. mit sich bringen.

Bettenauslastung

Die Bettenauslastung stellt den prozentualen Anteil der tatsächlichen Übernachtungen an den möglichen Übernachtungen (Betten mal Kalendertage) dar. Bei der Berechnung der Auslastung der angebotenen Betten muss allerdings berücksichtigt werden, dass die nachgewiesenen angebotenen Betten nicht unbedingt an jedem Tag des Berichtszeitraums (z.B. wegen Betriebsferien, Ruhetag o. Ä.) zur Verfügung stehen. (Nach: Statistische Baden-Württemberg, Handel und Gastgewerbe; Artikel-Nr.: 3552 03001; 19.4.2004)

CAPE

Convective Available Potential Energy: Konvektionsindex (siehe dort), der ein direktes Maß für die zur Verfügung stehende atmosphärische Energie im Fall von Konvektion ist. Sie ist ein Maß für die mögliche Schwere eines Gewitters.

CIN

Convective Inhibition: Konvektionsindex (siehe dort), der ein direktes Maß für die Energie ist, die benötigt wird, damit es zur Auslösung von Konvektion kommt. Sie muss aufgebracht werden, damit sich Gewitter überhaupt erst entwickeln können.

Cluster-Analyse

Statistisches Verfahren zur Einteilung mehrparametrischer Elemente in Gruppen (Cluster) ähnlicher Charakteristik

Dauerlinie

Graphische Darstellung des Zeitraumes währenddessen ein bestimmter Wert einer Variablen, z. B. Wasserstand oder Abfluss, zeitlich unabhängig voneinander erreicht oder überschritten wird

Eintrittswahrscheinlichkeit

Wahrscheinlichkeit, mit der ein Ereignis einer bestimmten Stärke (Belastung) in einem vorgegebenen Zeitraum eintritt. Dieser Zeitraum ist z. B. bei hydrometeorologischen Ereignissen in

der Regel ein Jahr (siehe Jährlichkeit). Im Bereich Naturereignisse geht es meistens darum, ob ein bestimmter Wert überschritten wird, bei dem nicht mehr vollständig beherrschbare Systemzustände und folglich Schäden auftreten. Hier verwendet man im Allgemeinen den Begriff Überschreitungswahrscheinlichkeit.

Exposition  
siehe Belastung

### Extremereignis

Als extrem werden in diesem Bericht meteorologische Ereignisse bezeichnet, die markant von einem Durchschnittswert oder Trend abweichen und deshalb außerordentlich sind. Extremereignisse können negative Konsequenzen für den Menschen und die Umwelt haben, wenn Gesellschafts- oder Umweltsysteme darauf nicht eingestellt sind. Beispiele: Wintersturm, Gewittersturm, Hitzeperiode, Starkregen, Sturzflut (siehe auch Naturgefahren).

### Fremdenverkehrsintensität

Index der Fremdübernachtungen pro 1000 Einwohner der Wohnbevölkerung. (Nach: "Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland, CD Freizeit und Tourismus" )

### FVA

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

### Gefährdung

Potenzielle Belastung. Die von einer Naturgefahr ausgehende Bedrohung oder deren Eintrittswahrscheinlichkeit oder Überschreitungswahrscheinlichkeit. Die Gefährdung ist unabhängig von Personen oder Objekten, die betroffen werden können.

### Gefühlte Temperatur

Die gefühlte Temperatur ist als die Temperatur einer Standardumgebung definiert, in welcher das Wärme- bzw. Kälteempfinden des menschlichen Organismus den aktuellen Bedingungen entspricht. In ihre Berechnung gehen zusätzlich zur Lufttemperatur noch weitere meteorologische Parameter wie z.B. Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte ein. Über Schwellenwerte der gefühlten Temperatur werden insgesamt neun verschiedene thermische Belastungsklassen (von extremem Kältestress bis extreme Wärmebelastung) definiert. Wärmebelastung und Kältestress sind bei zunehmender Abweichung vom gewohnten Komfort eine Belastung für Herz, Kreislauf und die peripheren Gefäße.

### Gewittersturm

Gewitter gehen oft mit starken Windböen einher. Vor allem in Gewittern, die sich an einer vorrückenden Kaltfront entwickeln, stürzt die Kaltluft aus mehreren Kilometer Höhe zur Erdoberfläche herunter. An der Grenzfläche zwischen Warm- und Kaltluft kommt es zu plötzlichen starken Windstößen, die Orkanstärke erreichen können. Die herabstürzende Kaltluft schießt zungenförmig unter die Warmluft und bildet die typische Böenlinie. Die stärksten Stürme, die in Verbindung mit Gewittern auftreten können, sind Tornados. (siehe auch Wintersturm)

### globale Erwärmung

Zum Höhepunkt der letzten Eiszeit vor etwa 18.000 Jahren lag die mittlere Temperatur der Erdoberfläche 6-8 °C unter der heutigen Mitteltemperatur. Mit dem Ende der Eiszeit vor etwa 15.000 Jahren erfolgte eine rasche Erwärmung auf etwa 16 °C. Seit dem Höhepunkt der gegenwärtigen Zwischenwarmzeit vor etwa 6.000 Jahren nahm die mittlere Temperatur (mit Schwankungen von bis 1 °C) allmählich auf den heutigen Wert von 15 °C ab. Ähnliche Klimaänderungen fanden innerhalb der letzten 2,3 Millionen Jahre - des quartären Eiszeitalters - häufig statt. Seit Beginn weltweiter meteorologischer Aufzeichnungen um 1860 hat die globale Mitteltemperatur um 0,5-0,7 °C zugenommen. Das IPCC rechnet mit einem Anstieg der globalen Mitteltemperatur um 1,5-5,8 °C bis zum Jahr 2100. (siehe Klimawandel).

### HSW

Höchster Schiffbarer Wasserstand:

Der für bestimmte Pegel und Strecken festgelegte höchste Wasserstand, bei dessen Überschreitung die Schifffahrt eingestellt werden muss.

**Huglin-Index**

Der Huglin-Index (*Huglin 1978, 1986*) ist als eine Wärmesumme über Tagesmittel und Tagesmaximumwerte der Lufttemperatur im Zeitraum April bis September definiert:

$$H: = \sum_{t=01apr}^{30sep} K(x_{Lat}) \cdot \frac{(T_{avg}(t) - 10 \text{ }^{\circ}\text{C}) + (T_{max}(t) - 10 \text{ }^{\circ}\text{C})}{2}$$

mit

$x_{Lat}$  Geographische Breite [ $^{\circ}\text{NB}$  oder  $^{\circ}\text{SB}$ ]

$K(x_{Lat})$  Breitengradabhängiger Korrekturfaktor [ $\div$ ] folgender Form:

$$K(x_{Lat}): = \begin{cases} 1.02 & |x_{Lat}| \leq 40^{\circ} \\ 1.02 + 0.04 \cdot \frac{x_{Lat} - 40^{\circ}}{10^{\circ}} & 40^{\circ} < |x_{Lat}| < 50^{\circ} \\ 1.06 & |x_{Lat}| \geq 50^{\circ} \end{cases}$$

$T_{avg}(t)$  Tagesmittel der Lufttemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{max}(t)$  Tagesmaximum der Lufttemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]

**Hotellerie**

Die für die Bettenkapazitäten vorgenommene Untergliederung nach Betriebsarten folgt der offiziellen Klassifikation der Wirtschaftszweige in der amtlichen Statistik. Unter dem Begriff Hotellerie werden hier die Betriebsarten Hotels, Gasthöfe, Pensionen und Hotels garnis zusammengefasst. Diesen Betriebsarten ist gemeinsam, dass sie zur Übernachtung die hotelüblichen Dienstleistungen wie Reinigen und Aufräumen der Gästezimmer erbringen und dass sie in der Regel Speisen (zumindest Frühstück) und Getränke abgeben. (Nach: "Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland, CD Freizeit und Tourismus")

**Interannuell**

Jahresübergreifend

**IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)**

Das IPCC wurde 1988 von der World Meteorological Organisation (WMO) und dem United Nations Environment Programme (UNEP) gegründet. Aufgabe des IPCC ist die Bewertung wissenschaftlicher, technischer und sozioökonomischer Informationen, die für das Verständnis und die Risiken einer vom Menschen verursachten Klimaänderung relevant sind. Das IPCC führt weder eigene Forschung noch Messungen durch, sondern stützt sein Urteil auf veröffentlichte wissenschaftliche Literatur. Das mehrere tausend Wissenschaftler umfassende Gremium hat 3 Arbeitsgruppen, die alle ca. 5 Jahre einen Statusbericht erstellen. Der letzte Bericht ist im Jahr 2001 erschienen.

**Jährlichkeit**

Wiederkehrperiode. Wiederkehrintervall. Kehrwert der Eintrittswahrscheinlichkeit. Die Jährlichkeit bezeichnet den durchschnittlichen Abstand von Ereignissen einer bestimmten Stärke. So tritt ein 10-jährliches Hochwasserereignis in 100 Jahren etwa 10-mal auf. Der Abstand zwischen zwei 10-jährlichen Ereignissen kann aber stark variieren. Diese rein statistische Kenngröße sagt also nichts über den tatsächlichen zeitlichen Abstand zwischen zwei Ereignissen aus. Auch beschreibt sie einen stationären Zustand, d.h., die zugrunde liegenden Bedingungen werden als konstant angenommen. Diese Voraussetzung ist i. Allg. über längere Zeiträume nicht gegeben, da sich verschiedene Randbedingungen (z.B. Klima) im Laufe der Zeit ändern.

**Klimawandel**

Neuzeitliche Klimaveränderung im Kontext eines generellen Globalen Wandels, der verschiedene, anthropogen verursachte Veränderungen der Umwelt- und Lebensbedingungen in verschiedenen Gebieten der Erde umfasst. Neben den Emissionen von Treibhausgasen spielen Änderungen der Landnutzung beim Klimawandel eine Rolle. (siehe auch: globale Erwärmung, Treibhauseffekt)

### KLIWA-Projekt

KLIWaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft - Forschungsprojekt des Deutschen Wetterdienstes und den Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder Baden-Württemberg und Bayern

### Kohorte

Zusammenfassung mehrerer Individuen, die bezüglich bestimmter Merkmale (u.a.: Art, Höhe, Brusthöhendurchmesser, Kronenlänge) gleich sind

### Konfidenzintervall

Mit einem Konfidenzintervall kann man die Lage eines (aus Messdaten geschätzten) wahren Parameters mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit abschätzen. Am wahrscheinlichsten liegt der wahre Parameter in der Mitte des Konfidenzintervalls. Üblicherweise liegt der wahre Parameter mit einer Wahrscheinlichkeit von 67% innerhalb des Konfidenzintervalls.

### Konvektionsindex

Meteorologischer Index zur Beschreibung des Potenzials der Atmosphäre für Gewitter (Konvektion). Die beiden wesentlichen Parameter für die Berechnung eines Konvektionsindex sind das Vertikalprofil von Lufttemperatur und Luftfeuchte.

### Kurzreise

Reise, die mit Übernachtung an einem fremden Ort verbunden ist und bis maximal 4 Tage dauert. Die Zahl der Kurzreisen in Form von Geschäftsreisen oder Zweit- und Dritturlaub nimmt ständig zu; einen hohen Anteil an Kurzreisen nehmen Städtereisen ein. (Nach: "Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland, CD Freizeit und Tourismus" )

### Level II-Standorte

Standorte des ICP Waldmonitoringprogramms: The Intensive Monitoring of European Forest Ecosystems (Level II)

### Mittlerer Abfluss

(siehe auch Abfluss)

Arithmetisches Mittel der (stündlichen, täglichen, ...) Abflüsse über einen vorgegebenen Zeitraum, z.B. ein Jahr

### Morbidität (Krankheitsrate)

Häufigkeit einer Erkrankung unter 1.000 beobachteten Personen in einem bestimmten Zeitraum. Unter hitzebedingter Morbidität wird die aufgrund einer Wärmebelastung positive Abweichung von der erwarteten Morbidität verstanden.

### Mortalität (Sterberate)

Anteil der Individuen, die in einem bestimmten Zeitraum (meist 1 Jahr) bezogen auf 1.000 Individuen sterben. Unter hitzebedingter Mortalität wird die Übersterblichkeit verstanden, welche statistisch als positive Abweichung von der erwarteten Mortalität einer Wärmebelastung zugeordnet werden kann.

### Multivariate Statistik

Methoden zur statistischen Analyse mehrdimensionaler Grundgesamtheiten

### Naturgefahr

Naturereignis, das zu einer Bedrohung von Menschen, Umwelt, Sachwerten und Einkünften führen kann. Die wichtigsten Naturgefahren sind: Erdbeben, Vulkanausbruch, Massenbewegung (u.a. Hangrutsch, Mure, Lahar, Lawine), Erdsenkung, Sturm (u.a. tropischer Wirbelsturm, außertropischer Wintersturm, Tornado, Sandsturm, Blizzard), Blitzschlag, Starkniederschlag (z.B. Starkregen, Schneefall, Hagel), Hochwasser (u.a. Flussüberschwemmung, Sturzflut, Sturmflut, Tsunami), Frost, Dürre, Waldbrand, Krankheitserreger, Schädlinge.

### NPP

Nettoprimärproduktion = Bruttophotosynthese minus pflanzliche Respiration = Summe der Zuwächse und Streuproduktion innerhalb einer Referenzperiode (i.d.R. 1 Jahr)

### Phänologie

Lehre von im Jahreszeitenrhythmus wiederkehrenden biologischen Ereignissen (wie Blattaustrieb, Blühbeginn, Blattabwurf)

**Produktivitätsindex**

für Wälder: langjähriges Mittel der NPP im Klimaszenarium dividiert durch das langjährige Mittel der NPP im Basisszenarium

**Quantil**

Für eine Wahrscheinlichkeitsverteilung bestimmt man das p%-Quantil (oder auch p-tes Perzentil) als denjenigen Wert des Ereignisraumes so, dass p% der Beobachtungen bzw. der Grundgesamtheit kleiner als das p%-Quantil sind. Ein Spezialfall sind die drei Quartile, die als 25%-, 50%- und 75%-Quantile definiert sind.

**Reisegebiete**

Bei den Reisegebieten handelt es sich um nichtadministrative Raumeinheiten die von den statistischen Landesämtern in Zusammenarbeit mit den Wirtschaftsministerien und den Tourismusverbänden der Länder gebildet werden. Ihre Grenzen lehnen sich im Wesentlichen an die Zuständigkeitsbereiche der regionalen Fremdenverkehrsverbände sowie an naturräumliche Gegebenheiten an. (Nach: "Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland, CD Freizeit und Tourismus" )

**Schadenpotenzial**

Das Volumen eines möglichen Schadens. Es wird bestimmt durch die Größe des betroffenen Bereichs, die Gefährdung (potenzielle Belastung) und die Schadenanfälligkeit (Sensitivität).

**Sensitivität**

Empfindlichkeit eines Systems (Bauwerk, Anlage, Staat, Unternehmen etc.) in Bezug auf klimatische Belastungen oder andere Naturgefahren infolge ungünstiger sozioökonomischer Faktoren.

**Signifikanzniveau**

Das Signifikanzniveau gibt in der Testtheorie die im vorhinein festzulegende Irrtumswahrscheinlichkeit an. Ein Signifikanzniveau von beispielsweise 0.05 bedeutet, dass man ein Ergebnis als signifikant akzeptiert, welches rein zufällig nur in 5% aller Stichprobenziehungen auftreten würde.

**SRES-Szenarien**

Die früheren IPCC-Berichten zugrundeliegenden Szenarien wurden ab 1996 gründlich überarbeitet. Das Ergebnis sind 40 neue sogenannte SRES-Szenarien (nach: Second Report on Emission Szenarios), die die möglichen Entwicklungen im 21. Jahrhundert in den Bereichen Bevölkerungswachstum, ökonomische und soziale Entwicklung, technologische Veränderungen, Ressourcen-Verbrauch und Umweltmanagement differenzierter als bisher berücksichtigen. Die 40 Szenarien werden in die vier Hauptgruppen A1, A2, B1 und B2 unterteilt. Das hier zugrundegelegte A1-Szenarium beschreibt eine zukünftige Welt mit sehr starkem Wirtschaftswachstum, einer Weltbevölkerung, die in der Mitte des 21. Jahrhunderts ihr Maximum erreicht und danach abnimmt, und einer schnellen Einführung neuer und effizienterer Technologien. Die Welt wird zunehmend globaler, d.h. regionale Unterschiede bei den Einkommen, in kultureller und sozialer Hinsicht und in der technologischen Entwicklung gleichen sich weitgehend aus.

**Standardabweichung**

Maß für die Streuung von Meßwerten um einen Mittelwert.

**Starkregen**

Niederschlag mit hoher Niederschlagsintensität. Bei kurzzeitigem Starkregen liegt die Mindestmenge des Niederschlags bei 1 mm pro Minute. Bei unbewachsenem Boden führen Starkregen zur Bodenerosion. Starkregen können Überschwemmungen und Sturzfluten verursachen.

**Stationarität**

Hier: Keine signifikanten zeitlichen Änderungen in den statistischen Größen

**SYNOP-Stationen**

Weltweites Netz von Wetterstationen, die standardisiert und zeitsynchron mehrmals täglich bestimmte meteorologische Parameter aufzeichnen.

### Szenarium

Unter einem Szenarium versteht man die Wiedergabe zeitlicher und/oder räumlicher charakteristischer Zustände eines Systems auf der Basis definierter Ausgangsbedingungen sowie mehrerer dieses System beschreibender Parameter. Bei Klimaszenarien braucht man validierte Datensätze des regionalen Klimas im erforderlichen raum-zeitlichen Maßstab für die notwendigen meteorologischen Parameter, um die Folgen möglicher Klimaänderungen abschätzen zu können.

### Thermische Belastungsklasse

siehe Gefühlte Temperatur.

### Tourismus

Unter Tourismus verstehen wir die Gesamtheit der Beziehungen und Erscheinungen, die sich aus der Ortsveränderung und dem Aufenthalt von Personen ergeben, für die der Aufenthalt weder hauptsächlich noch dauernder Wohn- noch Arbeitsort ist (*Kaspar, 1996*)

### Transient

Eine im mathematischen Sinn monotone Entwicklung ohne relative Maxima oder Minima, transient bedeutet auch "instationär", d.h. nicht stationär (siehe Stationarität)

### Treibhauseffekt

Erwärmungseffekt in der Atmosphäre, ähnlich der Wirkung eines Gewächshauses. Die sichtbare kurzwellige Sonneneinstrahlung dringt relativ ungehindert durch die Atmosphäre bis auf die Erde. Die erwärmte Erde strahlt im langwelligen Bereich (Infrarot) aus. In der Atmosphäre vorhandene Spurenstoffe, v.a. Wasserdampf und Kohlendioxid, absorbieren diese Strahlung und senden langwellige Strahlung zur Erdoberfläche zurück, die sich dadurch zusätzlich erwärmt. Man unterscheidet zwischen dem natürlichen Treibhauseffekt und dem anthropogenen (menschgemachten) Treibhauseffekt.

### Trockenstressindex

für Wälder: Wasserangebot dividiert durch Wasserbedarf gewichtet mit der potenziellen, nicht-wasserlimitierten NPP

### Überschreitungswahrscheinlichkeit

Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmter Wert (z.B. Abfluss, Niederschlagshöhe, Windgeschwindigkeit) in einem beliebigen Jahr überschritten wird. Beispiel: Einem hundertjährigen Ereignis ist in jedem Jahr eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von 1% zugeordnet.

### Validierung

Bestätigung eines Sachverhalts häufig unter Verwendung statistischer Verfahren

### Verwundbarkeit

auch Vulnerabilität oder Verletzlichkeit. Möglicher Schaden bei Eintritt eines Ereignisses bzw. Anfälligkeit eines Systems (Bauwerk, Anlage, Staat, Unternehmen etc.) gegen äußere schädliche Einwirkungen, wie z.B. Extremereignisse. Die Verwundbarkeit eines Systems hängt von seiner Sensitivität, der auftretenden Belastung und den in bezug auf denkbare Auswirkungen vorgenommenen Anpassungen ab.

### Vulnerabilität

siehe Verwundbarkeit

### Wald-BÜK 1000

Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1 : 1 000 000 (*Daten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR, Hannover 2004*)

### Wintersturm (Außertropischer Sturm)

Stürme lassen sich nach ihrer Entstehung und räumlichen Ausdehnung im Wesentlichen in vier Kategorien unterteilen:

- Tropischer Wirbelsturm (Hurrikan, Taifun, Zyklon)
- Außertropischer Sturm (Wintersturm)
- Tornado
- Sonstige Stürme (Monsunsturm, Gewittersturm, Hagelsturm, Sandsturm, Schneesturm / Blizzard, Eissturm, Feuersturm)

Außertropische Stürme können Schäden in einer ähnlichen Größenordnung wie tropische Wirbelstürme verursachen. So lagen die wirtschaftlichen Gesamtschäden aus einer Serie von Winterstürmen über Europa 1990 bei rund 25 Mrd. US\$ (in Werten von 1990). Knapp die Hälfte davon war auch versichert. Im Dezember 1999 belasteten die Orkane Lothar und Martin, die sich vor allem über Frankreich, Deutschland und der Schweiz ausstobten, die Assekuranz mit über 5 Mrd. US\$ (in Werten von 1999).

**Zimmerauslastung**

Durchschnittliche Auslastung der Gästezimmer: Rechnerischer Wert, der die prozentuale Belegung der Gästezimmer im Berichtszeitraum ausdrückt. Die durchschnittliche Auslastung der angebotenen Gästezimmer wird ermittelt durch Division der im Berichtszeitraum belegten Gästezimmer durch das Produkt aus der Zahl der angebotenen Gästezimmer und den im Berichtszeitraum geöffneten Tagen. (Nach: Statistische Berichte Baden-Württemberg, Handel und Gastgewerbe; Artikel-Nr.: 3552 03001; 19.4.2004)



## TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1.1: Identifizierter Forschungsbedarf in verschiedenen Sektoren gemäß Analyseraster (UVM-BW 2003, siehe Anhang 1). Die im vorliegenden Bericht aufgegriffenen Fragestellungen sind fett markiert. ....	7
Tab. 1.2: Matrix zur integrierten Bewertung von sektoral abgeleiteten Einflussfaktoren, Zielgrößen und Indikatoren der Verwundbarkeit. Es handelt sich um einzelne Beispiele aus KLARA, KLIWA und anderen Projekten, aber nicht um eine vollständige Betrachtung. 13	
Tab. 2.1: Jahresmittelwerte - summen für das transiente Szenarium .....	35
Tab. 2.2: Trends der Jahresmittelwerte - summen für das transiente Szenarium, grau = gesicherte Trends mit mindestens 90% stat. Sicherheit .....	36
Tab. 2.3: Vergleich der mittleren Verhältnisse zwischen Basisszenarium und Szenarium 2046/55 .....	45
Tab. 3.1: Thermische Belastungsklassen auf der Basis einer Gefühlten Temperatur, die die physiologische Beanspruchung des menschlichen Organismus berücksichtigt (verändert nach VDI, 1998).....	51
Tab. 4.1: Quantile zur räumliche Verteilung der erhobenen mittleren Silomaiserträge für die Periode 1990-1999 über der Gesamtfläche Baden-Württembergs (Gesamt, Abb. 4.1a) und den in der Studie betrachteten Landesausschnitt (Teil, Abb. 4.1a), der simulierten Erträge auf den betrachteten Teilflächen für den gleichen Zeitraum (Abb. 4.1b) und der simulierten Ertragsdifferenzen zwischen den Perioden 2046-2055 und 1990-1999 (Abb. 4.1c) .....	67
Tab. 4.2: Quantile zur räumlichen Verteilung der erhobenen mittleren Winterweizenerträge für die Periode 1990-1999 über der Gesamtfläche Baden-Württembergs (Gesamt, Abb. 4.2a) und den in der Studie betrachteten Landesausschnitt (Teil, Abb. 4.2a), der simulierten Erträge auf den betrachteten Teilflächen für den gleichen Zeitraum (Abb. 4.2b) und der simulierten Ertragsdifferenzen zwischen den Perioden 2046-2055 und 1990-1999 (Abb. 4.2c) .....	69
Tab. 4.3: Auszug aus der Schorfinfektionstabelle nach MacHardy & Gadoury (1989) und Stensvand (1997) mit den bei unterschiedlichen Temperaturen mindestens notwendigen Blattfeuchtedauern (BFD) für eine Infektion durch Askosporen und Konidien .....	71
Tab. 4.4: Monats-Mittelwerte der Temperatur (T [°C]) und mittlere Monatssummen des Niederschlags (N [mm]) an 4 Stationen der Bodensee-Region (Überlingen, Immenstaad, Konstanz und Bodman) für die Klimaperiode 1951-2000, die Szenarienperiode 2001-2055 und die Differenzen zwischen beiden. ....	73
Tab. 4.5: Temperatursummen phänologischer Ereignisse nach Gottwald (1996) .....	77
Tab. 4.6: Häufigkeit der auftretenden phänologischen Ereignisse und Generationen des Apfelwicklers, Angaben in Anzahl und relativer Häufigkeit der betroffenen Jahre .....	80
Tab. 4.7: Zuordnung ausgewählter Rebsorten zum Wärmesummenindex H nach Huglin (Huglin 1978, 1986).....	82
Tab. 5.1: Übersicht über untersuchte Level II Standorte .....	93

Tab. 5.2: Nettoprimärproduktion in Abhängigkeit vom Austriebstag .....97

Tab. 5.3: Modellbestände für 4C-Simulationen in Baden-Württemberg. ....99

Tab. 5.4: Mittlerer Trockenstressindex über 245 Standorte .....101

Tab. 5.5: Häufig vorkommende Bestandestypen .....105

Tab. 6.1: Korrelationskoeffizienten zwischen dem Wandereraufkommen und den 11 verfügbaren meteorologischen Parametern für die drei Datensätze Hinterzarten (180 Tage), Wutachschlucht I (57 Tage) und Wutachschlucht II (8 Tage); weitere Erläuterungen im Text, für die Abkürzungen der meteorologischen Parameter siehe [Kapitel 2](#). ....124

Tab. 7.1: Vorzeichen des Trends der Erstankunftszeiten im Zeitraum 1970-2003 von 17 Brutvogelarten an 13 Standorten. Symbole: -/+ bedeutet signifikant ( $p = 0,05$ ) frühere/spätere Erstankunftszeiten, Trends in Klammern sind nicht signifikant. Standorte: Stuten-see/Karlsruhe (Stu), Ellwangen (Ell), Remstal (Rem), Göppingen (Göp), Gingen/Fils (Gin), Tübingen (Tüb), Eningen/Reutlingen (Eni), St. Georgen (Geo), Sigmaringen (Sig), Bad Buchau (Buc), Radolfzell (Rad), Konstanz (Kon), Lindau (Lin). ....137

Tab. 7.2: Statistisch signifikante Trends der Lage der Perzentile beim Herbstzug auf der Halbinsel Mettnau im Zeitraum 1972-2003 (Angabe der Verschiebung in Tagen pro 10-Jahreszeitraum).. ....141

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Abb. 1.1: Topographische Karte Baden-Württembergs mit naturräumlichen Einheiten (graue Linien) und Landkreisen (blaugraue Linien) .....6

Abb. 1.2: Bestandteile einer Analyse der sektoral spezifizierten und regional differenzierten Verwundbarkeit im Klimawandel mit Beispielen für Indikatoren in bezug auf das Gesundheitsrisiko bei Hitzewellen. Andere Arten der Verwundbarkeit z.B. bezüglich landwirtschaftlicher Erträge oder Überschwemmungen lassen sich nach den gleichen Aspekten mit entsprechend anderen Indikatoren untersuchen. ....9

Abb. 1.3: Verteilung der Bevölkerungsdichte im Land als Beispiel für den Datenzugang zum Interaktiven Kartenverzeichnis des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg (<http://www.statistik-bw.de/intermaktiv/>). ....11

Abb. 1.4: unten: Einordnung der Auswirkungen von belastenden Klimaänderungen auf ein System S0 (schwarze Kurve). Die Reaktion auf die Belastung kann vorhanden, aber unerheblich sein (grünblauer Bereich), deutlich spürbar (gelb) oder kritisch (orange). Im ersten Fall liegt die Belastung knapp über einem kritischen Schwellwert während sie im dritten Fall in der Nähe eines kritischen Grenzwertes liegt. Der kritische Zustand kann zu teilweisem oder kompletten Versagen führen. Oben: dieselbe Belastung infolge Klimaänderung kann für ein angepasstes System S+ (grüne Kurve) unerheblich, für ein verwundbares S- (rote Kurve) aber kritisch sein. ....12

Abb. 1.5: Konzept für die Zusammensetzung eines allgemeinen Anpassungsfähigkeits-Index aus den Indikatoren verschiedener Bereiche (modifiziert nach Schröter et al., 2004). ....15

Abb. 1.6: Einschätzung der Wichtigkeit von elf Risiken und zwei Chancen auf einer Skala von "sehr wichtig" bis "unwichtig" für den Sektor Forstwirtschaft in Baden-Württemberg. Dieser exemplarischen Darstellung liegen allerdings nur die Angaben eines einzigen befragten Entscheidungsträgers zugrunde (modifiziert nach Haße, 2004). ....16

Abb. 1.7: Einschätzung des Planungsstatus von fünf verschiedenen Anpassungsmaßnahmen auf einer Skala von "noch nicht angedacht" bis "bereits umgesetzt" im Sektor Forstwirtschaft in Baden-Württemberg. Dieser exemplarischen Darstellung liegen allerdings nur die Angaben eines einzigen befragten Entscheidungsträgers zugrunde (modifiziert nach Haße, 2004). ....17

Abb. 1.8: Einschätzung der Wichtigkeit von drei ausgewählten Risiken auf einer Skala von "sehr wichtig" bis "unwichtig" für den Sektor Forstwirtschaft in allen Bundesländern (modifiziert nach Haße, 2004). ....17

Abb. 2.1: Schema der Modelltypen .....23

Abb. 2.2: Jahresmittel der Lufttemperatur, 1951-2000 .....27

Abb. 2.3: Mittlere Anzahl der Frosttage pro Jahr, 1951-2000 .....28

Abb. 2.4: Mittlere Anzahl der Sommertage pro Jahr, 1951-2000 .....29

Abb. 2.5: Mittlere Jahressumme des Niederschlags, 1951-2000 .....31

Abb. 2.6: Mittlere Wintersumme des Niederschlags, 1951-2000 .....32

Abb. 2.7: Mittlere Sommersumme des Niederschlags, 1951-2000 .....33

Abb. 2.8: Differenzen der Jahressumme des Niederschlags 2046/2055-1951/2000 . . 39

Abb. 2.9: Differenzen der Sommersumme des Niederschlags 2046/2055-1951/2000 .40

Abb. 2.10: Differenzen der Wintersumme des Niederschlags 2046/2055-1951/2000 .41

Abb. 2.11: Differenzen der mittleren Anzahl der Frosttage, 2046/2055-1951/2000 . . .43

Abb. 2.12: Differenzen der mittleren Anzahl der Sommertage, 2046/2055-1951/2000 .44

Abb. 3.1: Schwellenwerte für verschiedene Wärmebelastungsstufen (leicht, mäßig, stark, extrem) im Jahr 1984 in Baden-Württemberg. GT12: Gefühlte Temperatur um 12 Uhr UTC als Mittelwert aus den vier Stationen Karlsruhe, Konstanz, Freiburg und Stuttgart (Echterdingen) . . . . .51

Abb. 3.2: Ermittlung des Erwartungswertes (EW) der Gesamtmortalitätsrate (Mrtot) in Baden-Württemberg pro 100.000 Einwohner für den Zeitraum 1.1.2002 bis 30.9.2003 . .53

Abb. 3.3: Anzahl der Tage pro Jahr mit mäßiger bis extremer Wärmebelastung für Basis-szenarium 1951-2000 (oben) und Zukunftsszenarium 2001-2055 (unten) für alle drei Höhenklassen (H1: 0-400 m; H2: 400- 800 m; H3: >= 800 m). . . . .56

Abb. 3.4: Relative Änderung der Auftretenshäufigkeit von Tagen mit mäßiger bis extremer Wärmebelastung (oben) und Tagen mit mäßigem bis starkem Kältestress (unten) im Zukunftsszenarium 2001-2055 relativ zum Basisszenarium 1951-2000 für alle Höhenstufen (H1: 0-400 m; H2: 400-800 m; H3: >= 800 m). . . . .57

Abb. 3.5: Sensitivität (Mittelwert der Mortalität in Prozent des Erwartungswertes) für die einzelnen thermischen Belastungsklassen in Baden-Württemberg für den Zeitraum 1968-2003 getrennt für die Altersgruppen unter und über 75 Jahre und die Gesamtbevölkerung unter Berücksichtigung der jeweils optimalen Zeitverschiebungen. Die Balken stellen die Standardabweichung der Mittelwerte dar. . . . .58

Abb. 3.6: Relative Änderung der relativen Vulnerabilität für mäßige bis extreme Wärmebelastung (+2 bis +4) im Zukunftsszenarium 2001-2055 relativ zum Basisszenarium 1951-2000 für die drei Höhenklassen (H1: 0-400 m; H2: 400-800 m; H3: >= 800 m) in den Kreisen Baden-Württembergs. . . . .59

Abb. 3.7: Relative Änderung der relativen Vulnerabilität für alle Belastungsklassen im Zukunftsszenarium 2001-2055 relativ zum Basisszenarium 1951-2000 für die drei Höhenklassen (H1: 0-400 m; H2: 400-800 m; H3: >=800 m) in den Kreisen Baden-Württembergs. . . . .59

Abb. 3.8: Differenz der absoluten Vulnerabilität gegenüber Wärmebelastung (zusätzliche hitzebedingte Todesfälle) zwischen Basisszenarium 1951-2000 und Zukunftsszenarium 2001-2055 für zwei verschiedene Methoden der Fortschreibung der Mortalitätsrate (oben: Trendfortschreibung, unten: Mittelwert der letzten 5 vorhanden Jahre) und alle Höhenklassen (H1: 0-400 m; H2: 400-800 m; H3: >=800 m). . . . .60

Abb. 4.1: Räumliche Verteilung der Silomaiserträge Baden-Württembergs abgestuft nach Quantilen (Tab. 4.1): arithmetische Mittel a) der erhobenen Kreiserträge 1990-1999 und b) der simulierten Hydrotoperträge 1990-1999 sowie c) der mittleren Ertragsdifferenzen zwischen den simulierten Hydrotoperträgen der Perioden 2046-2055 und 1990-1999. 66

Abb. 4.2: Winterweizenerträge Baden-Württembergs abgestuft nach Quantilen (Tab. 4.2): arithmetische Mittel a) der erhobenen Kreisenerträge 1990-1999 und b) der simulierten Hydrotoperträge 1990-1999 sowie c) der mittleren Ertragsdifferenzen zwischen den simulierten Hydrotoperträgen der Perioden 2046-2055 und 1990-1999. . . . . 68

Abb. 4.3: Generationszyklus vom Apfelschorf (*V. inaequalis* und *S. pomi*),  
Quelle: [http://plantclinic.cornell.edu/FactSheets/apple\\_scab\\_factsheets/app](http://plantclinic.cornell.edu/FactSheets/apple_scab_factsheets/app). provided by Wayne Wilcox, Cornell University, NYSAES, Geneva, NY . . . . . 70

Abb. 4.4: Intensivobstbauflächen (pinkfarbene Punkte) in Baden-Württemberg mit der deutlich erkennbaren Anbaukonzentration am Bodensee und die vier zur Berechnung verwendeten Stationen . . . . . 72

Abb. 4.5: Mittlere Monatssummen des täglichen Infektionsindex für den Apfelschorf (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung von 4 Bodensee-Stationen) in der rezenten Klimaperiode 1951-2000 und der Szenarienperiode 2001-2055 . . . . . 73

Abb. 4.6: Monatssummen des täglichen Infektionsindex von 1951-2000 sowie 2001-2055 für die Monate April, Mai und Juni (Mittelwerte als durchgezogene Linie und  $\pm$  Standardabweichungen als grauer Flächenbereich bezüglich der 4 Bodensee-Stationen: Überlingen, Immenstaad, Konstanz und Bodman) . . . . . 74

Abb. 4.7: Entwicklungszyklus des Apfelwicklers (*C. pomonella*)  
Quelle: <http://www.temmen.de/illus/apfel.htm> . . . . . 76

Abb. 4.8: Vergleich der Fallenfänge des ersten Falters (*M. Trautmann*, KOB Bavendorf, erster Falter aus 10 Beobachtungsstationen am Bodensee) mit den Simulationsergebnissen (erster Falter aus 4 Simulationsstationen am Bodensee). . . . . 78

Abb. 4.9: Veränderung der Generationsentwicklung beim Apfelwickler (*C. pomonella*) im Gebiet Bodensee (Symbolgröße entspricht der Häufigkeit der klimatisch günstigen Jahre für die Entwicklung des phänologischen Stadiums) . . . . . 79

Abb. 4.10: Anzahl der Jahre, in denen für die phänologischen Ereignisse Eiablage, Larvenschlupf und Imago günstige klimatische Voraussetzungen vorliegen. Gegeneinander gestellt sind die Simulationsergebnisse für die Vergangenheit (1951-2000) und die Zukunft (2001-2055) . . . . . 80

Abb. 4.11: Rebflächen in Baden-Württemberg 2003 nach der Belegenheit in den Weinbaugemeinden (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2004) . . . . . 83

Abb. 4.12: Huglin-Index für Baden-Württemberg - zehnjähriger gleitender Mittelwert für die Dekade 1961-1970. . . . . 85

Abb. 4.13: Huglin-Index für Baden-Württemberg - zehnjähriger gleitender Mittelwert für die Dekade 1991-2000 AD . . . . . 86

Abb. 4.14: Huglin-Index für Baden-Württemberg - zehnjähriger gleitender Mittelwert für die Dekade 2021-2030 AD . . . . . 87

Abb. 5.1: Modellschema 4C . . . . . 90

Abb. 5.2: Jahressummen des Niederschlags, der Interzeption und der Versickerung in 1 m Tiefe sowie Jahresmittel der Lufttemperatur für Heidelberg und Ochsenhausen, 1996-2003 . . . . . 94

Abb. 5.3: Jahressummen der potentiellen und aktuellen Evapotranspiration, der aktuellen Transpiration sowie Jahresmittel der Lufttemperatur für Heidelberg und Ochsenhausen, 1996-2003 .....	94
Abb. 5.4: Abhängigkeit der Versickerung und der aktuellen Evapotranspiration vom Niederschlag für Heidelberg und Ochsenhausen .....	95
Abb. 5.5: Verfügbares Bodenwasser in 45 cm und 1 m Tiefe sowie Niederschlag für Heidelberg und Ochsenhausen, 1996-2003 .....	95
Abb. 5.6: Nettoprimärproduktion in Abhängigkeit vom Austriebstag (1951-2000) . . . .	97
Abb. 5.7: Prozentuale Änderung der Nettoprimärproduktion (NPP) mit dem Austriebstag relativ zur Produktion im gleichen Jahr bei mittlerem Austriebstag. Positive Differenzen des Austriebstags = früherer Austrieb, negative = späterer Austrieb Periode 1: aktueller Austriebstag bis mittlerer Austriebstag Periode 2: restlicher Abschnitt bis zum Ende der Vegetationsperiode .....	98
Abb. 5.8: Produktivitätsindex für Fichte, Buche, Kiefer und Eiche .....	100
Abb. 5.9: Trend des klimatischen Waldbrandindex in Baden-Württemberg von 1951 bis 2050 .....	102
Abb. 5.10: Waldbrandwarnstufen an den Klimastationen in Baden-Württemberg unter heutigem Klima (Quadrate) und dem Zukunftsszenarium (Dreiecke) .....	103
Abb. 5.11: Verschiebung des Blattaustriebs der Eiche (links) und Buche (rechts) auf den Laubwaldflächen (Nadel- und Mischwaldflächen grau dargestellt) .....	106
Abb. 6.1: Übernachtungen in Baden-Württemberg nach Reisegebieten im Jahr 2002 (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2003a). .....	108
Abb. 6.2: Schwerpunktregionen des Sommertourismus in Baden-Württemberg, abgeleitet aus der relativen Differenz von Sommer- gegenüber Winterübernachtungen für das Jahr 2002/2003; Sommerhalbjahr Mai-Oktober 2003 (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2004) und Winterhalbjahr: November 2002-April 2003 (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2003c). .....	109
Abb. 6.3: Häufigkeitsverteilung registrierter Besucherzahlen im bayerischer Bad während der Sommersaisons 2000-2004. ....	111
Abb. 6.4: Häufigkeitsverteilung der täglich jeweils um 9 Uhr, 12 Uhr und 17 Uhr aufgezeichneten Lufttemperaturen im bayerischen Bad während der Sommersaisons 2000-2004. ....	112
Abb. 6.5: Mittlere tägliche Besucherzahlen in Abhängigkeit von der 17-Uhr-Temperatur im bayerischen Bad während der Sommersaisons 2000-2004. ....	113
Abb. 6.6: Lage der vier Klimastationen im Bodenseegebiet. Datengrundlage: Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (2001) und Klimagruppe PIK. ....	113
Abb. 6.7: Zusammenhang zwischen der 17-Uhr-Temperatur des bayerischen Bads und dem Mittelwert der täglichen Maximaltemperaturen (Tmax) der vier nächstgelegenen Bodenseestationen in Baden-Württemberg während der Sommersaisons 2000-2004. Die gestrichelten Linien verdeutlichen, dass sich mit Hilfe der Regressionsgerade der 17-Uhr-	

Temperatur von 25 °C eine mittlere tägliche Maximaltemperatur von etwa 22 °C zuordnen lässt. . . . . 114

Abb. 6.8: Zusammenhang zwischen der täglichen Besucherzahl des Konstanzer Bads und der an der Station Konstanz registrierten täglichen Maximaltemperatur während der beiden Sommersaisons 1999 und 2000: lineare Regression (links) und gewichtete Regressionsglättung nach Lowess (rechts). . . . . 115

Abb. 6.9: Mittlere tägliche Besucherzahlen für das bayerische Bad in Abhängigkeit von der 17-Uhr-Temperatur für vier verschiedene Witterungstypen während der Sommersaisons 2000-2004. Witterungstyp "sonnig" bedeutet, dass beide Witterungswerte des jeweiligen Tages "sonnig" sind. Bei den übrigen Witterungstypen war ausreichend, dass einer der beiden Witterungswerte dem jeweiligen Witterungstyp entsprach. . . . . 116

Abb. 6.10: Jährliche Häufigkeit von potenziellen Badetagen an den vier Stationen der Bodensee-Region im Referenzzeitraum (1971-2000) und im Zukunftszeitraum (2026-2055). 118

Abb. 6.11: Veränderung der Länge der Badesaison für die vier Stationen der Bodensee-Region. Die Werte (Länge der Badesaison, erster potentieller Badetag, letzter potentieller Badetag) sind dabei jeweils über den 30-jährigen Referenz- bzw. Zukunftszeitraum gemittelt. . . . . 119

Abb. 6.12: Saisonlänge (schwarze Linien) und Lage der vier Quartile (graue Rechtecke: innere beiden Quartile, unterteilt durch den Median als kleine waagerechte Linie) für alle Jahre des Referenzzeitraums (1971-2000) und des Zukunftszeitraums (2026-2055) für die vier Stationen der Bodensee-Region. Ausreißerwerte sind gegebenenfalls durch Kreise (mehr als 1,5 Rechtecklängen außerhalb) und Sterne (mehr als 3 Rechtecklängen außerhalb) angezeigt. . . . . 120

Abb. 6.13: Lage der Gemeinden Hinterzarten und Bonndorf (Wutachschlucht) sowie der verwendeten Klimastationen Hinterzarten (29007) und Löffingen (29108). Datengrundlage: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2001). . . . . 121

Abb. 6.14: Häufigkeitsverteilung registrierter Fahrkartenverkäufe im Freizeitbus Hinterzarten (links) sowie Auflistung der Ticketverkäufe nach Wochentagen (rechts) für die Sommersaison 2000. . . . . 122

Abb. 6.15: Häufigkeitsverteilung registrierter Fahrkartenverkäufe im Wanderbus Wutachschlucht (links) sowie Auflistung der Ticketverkäufe nach Wochentagen (rechts) für die Sommersaison 2000. . . . . 123

Abb. 6.16: Anzahl elektronisch registrierter Besucher in der Wutachschlucht an ausgewählten Tagen der Sommersaison 1997 und subjektive Charakterisierung der vorherrschenden Witterung durch den Autor (Zapf, 1998). . . . . 124

Abb. 6.17: Zusammenhang zwischen den beiden Klimaparametern tägliche Sonnenscheindauer (links) und tägliche Maximaltemperatur (rechts) und den Fahrgastzahlen samt Regressionsgerade für den Datensatz Hinterzarten (Sommersaison 2000, insgesamt 180 Tage). . . . . 125

Abb. 6.18: Zusammenhang zwischen den beiden Klimaparametern tägliche Sonnenscheindauer (links) und relative Feuchte (rechts) und den Fahrgastzahlen samt Regres-

sionsgerade für den Datensatz Wutachschlucht I (Sommersaison 2000, insgesamt 57 Tage). . . . . 125

Abb. 6.19: Zusammenhang zwischen den beiden Klimaparametern tägliche Sonnenscheindauer (links) und relative Feuchte (rechts) und den registrierten Besucherzahlen samt Regressionsgerade für den Datensatz Wutachschlucht II (Sommersaison 1997, insgesamt 8 Tage). . . . . 126

Abb. 6.20: Jahresmittelwerte von täglicher Sonnenscheindauer und relativer Feuchte an der Station Löffingen (29108) (obere Hälfte) und täglicher Sonnenscheindauer und täglicher Maximaltemperatur an der Station Hinterzarten (29007) (untere Hälfte) jeweils für den Referenzzeitraum (1971-2000) (linke Hälfte) und den Zukunftszeitraum (2026-2055) (rechte Hälfte). Zusätzlich sind jeweils die Regressionsgeraden eingezeichnet sowie der Spearman-Korrelationskoeffizient und dessen Signifikanz angegeben. . . . . 128

Abb. 6.21: Mittlerer jahreszeitlicher Verlauf (9-tägiges gleitendes Mittel aus dem 30-jährigen Mittelwert von Tagesdaten) von täglicher Maximaltemperatur und täglicher Sonnenscheindauer an der Station Hinterzarten (29007) in Referenzzeitraum (1971-2000) und Zukunftszeitraum (2026-2055) (obere beiden Diagramme) sowie Differenz zwischen Referenz- und Zukunftszeitraum (untere Diagramme). . . . . 129

Abb. 6.22: Mittlerer jahreszeitlicher Verlauf (9-tägiges gleitendes Mittel aus dem 30-jährigen Mittelwert von Tagesdaten) von relativer Feuchte und täglicher Sonnenscheindauer an der Station Löffingen (29108) in Referenzzeitraum (1971-2000) und Zukunftszeitraum (2026-2055) (obere beiden Diagramme) sowie Differenz zwischen Referenz- und Zukunftszeitraum (untere Diagramme). . . . . 130

Abb. 7.1: Erstankünfte im Zeitraum 1970-2003 für die Mehlschwalbe an den Standorten Tübingen (links) und Stutensee (rechts). . . . . 136

Abb. 7.2: Tagessummen 1972-2003 des Fitis auf der Halbinsel Mettnau mit dem Beginn der definierten Durchzugszeit (Tag 1 = 30. Juni). . . . . 139

Abb. 7.3: Trends der Lage der Perzentile (5%: +; 20%: Quadrat; 50%: Kreis; 80%: Dreieck; 95%: Stern) beim Herbstzug (samt Regressionsgeraden) für die Dorngrasmücke (links) und die Gartengrasmücke (rechts) auf der Halbinsel Mettnau im Zeitraum 1972-2003 (Tag 1 = 30. Juni). . . . . 140

Abb. 7.4: Legebeginn (links), Gelegegröße (Mitte) und Schlüpfertag (rechts) für den Halsbandschnäpper im Zeitraum 1974-2002 im Raum Reutlingen samt Regressionsgeraden. 143

Abb. 7.5: Populationsveränderung der Brutvogelarten (links: lokale Abundanz, Mitte: regionale Abundanz, rechts: Arealgröße) am Bodensee 1980-2000 in Abhängigkeit von der Nord-Südverbreitung der Arten in Europa samt Regressionsgeraden. Dargestellt sind die residualen Populationsveränderungen, nachdem um die Faktoren Zugverhalten und Bruthabitat korrigiert wurde (Erläuterung in [Kapitel 7.5.1](#)). . . . . 146

Abb. 8.1: Vergleich gemessener und mittels LARSIM simulierter Tageswerte des Durchflusses Q am Pegel Rockenau / Neckar im Zeitraum 1971-2000. . . . . 153

Abb. 8.2: Vergleich 30-jähriger Mittel (1971-2000) von Tageswerten des Durchflusses MQ am Pegel Rockenau / Neckar. Gegenübergestellt sind die aus Messungen bzw. Simulationen abgeleiteten Wertepaare. . . . . 154

Abb. 8.3: Vergleich mittlerer Winterabflüsse MQwi (jeweils November, Dezember, Januar), bezogen auf den Pegel Rockenau / Neckar. Die für die Darstellung genutzten Daten wurden aus Messungen bzw. aus Simulationen mit LARSIM im Zeitraum 1971/72 bis 1999/2000 abgeleitet. . . . . 154

Abb. 8.4: Vergleich mittlerer Jahresgänge des Durchflusses in Rockenau / Neckar, abgeleitet aus Messungen (schwarze Kurve) und aus der Simulation mit LARSIM und Klimagrößen der Basiszenarien aus STAR (blaue Kurve), REMO (rote Kurve) und GROWEL (grüne Kurve). Die Gerade markiert den mittleren Jahresabfluss MQ der Jahre 1971-2000 am Pegel Rockenau / Neckar. . . . . 155

Abb. 8.5: Vergleich mittlerer Jahresgänge des Durchflusses in Rockenau / Neckar, abgeleitet aus Messungen 1971-2000 (schwarze Kurve) und aus der Simulation mit LARSIM und Klimagrößen der Zukunftsszenarien 2021-2050 aus STAR (blaue Kurve), REMO (rote Kurve) und GROWEL (grüne Kurve). . . . . 156

Abb. 8.6: Dauerlinien für den Pegel Rockenau / Neckar im Referenzzeitraum: Mittlere Überschreitungsdauern in Tagen pro Jahr für spezifische Durchflüsse, bestimmt aus Messungen (schwarze Kurve) sowie aus der Anwendung von LARSIM mit Basisszenarien aus STAR (blaue Kurve), GROWEL (grüne Kurve) und REMO (rote Kurve). . . . . 157

Abb. 8.7: Dauerlinien für den Pegel Rockenau / Neckar: Mittlere Überschreitungsdauern in Tagen pro Jahr für spezifische Durchflüsse, bestimmt aus Messungen im Referenzzeitraum 1971-2000 (schwarze Kurve) sowie aus der Anwendung von LARSIM mit Zukunftsszenarien des Zeitraumes 2021-2050 aus STAR (blaue Kurve), GROWEL (grüne Kurve) und REMO (rote Kurve). . . . . 159

Abb. 9.1: Jährliche Anzahl der Gewittertage für den Zeitraum 1949-2000 als Mittelwert von 13 SYNOP-Stationen in Baden-Württemberg (rot). Zusätzlich sind der gleitende 5-Jahres-Mittelwert (blau gepunktet) und die lineare Regressionsgerade (blau) samt der beiden zugehörigen 95%-Konfidenz-Geraden (grün) eingezeichnet. . . . . 165

Abb. 9.2: Jährliche Anzahl von Tagen mit hohem Gewitterpotenzial (CAPE-Werte über 1000 J/kg und gleichzeitig CIN-Werte zwischen 15 und 150 J/kg) basierend auf den Radiosondenmessungen an der Station Stuttgart im Zeitraum 1971-2003 samt linearer Regressionsgerade. . . . . 165

Abb. 9.3: Mittlerer jährlicher Schadensatz (Verhältnis von Schadensumme zu Versicherungssumme als Mittel zwischen 1986 und 2004) durch Hagel für 3-stellige Postleitzahlbereiche in Baden-Württemberg nach Daten der SV Versicherung. . . . . 167

Abb. 9.4: Anzahl der Hageltage pro Jahr in Baden-Württemberg für den Zeitraum 1986-2004 für verschiedene Schwellwerte nach Daten der SV Versicherung. Hageltage wurden dabei definiert durch die Überschreitung verschiedener Schwellwerte an Schadenmeldungen. . . . . 168

Abb. 9.5: Zeitreihe der höchsten Böengeschwindigkeiten (Jahresmittel der zehn höchsten Tagesmaxima) an den SYNOP-Stationen Karlsruhe (oben) und Feldberg (unten) für den Zeitraum 1952-2002 jeweils mit 5-jährigem gleitenden Mittel (blau) und linearer Ausgleichsgerade (rot). . . . . 170

Abb. 9.6: Ergebnis einer statistischen Analyse von winterlichen Westwind-Wetterlagen in Europa für den Zeitraum 1881 bis 1991 (Fraedrich et al., 2001). Die Andauer in Tagen ist

im zehnjährigen Mittel angegeben. Seit etwa 1970 nimmt sie signifikant zu. Diese Großwetterlagen sind auch mit Extremereignissen wie Starkregen und Stürmen verbunden, z.B. dem Sturm ‚Lothar‘ (26.12.1999). .....171

## HINWEISE ZUM ANHANG

Folgende Anhänge, deren jeweiliger Inhalt sich entsprechend der Nummerierung auf die einzelnen Kapitel des Berichts bezieht, sind als PDF-Dokumente auf einer CD-ROM der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) verfügbar:

### Anhang 1a

"KLARA - Analyseraster", LfU Baden-Württemberg, 15.09.2003  
(anhang1a\_analyseraster.pdf = 52 Seiten)

### Anhang 1b

"KLARA - Hintergrundpapier", LfU Baden-Württemberg, 15.09.2003  
(anhang1b\_hintergrundpapier.pdf = 32 Seiten)

### Anhang 2

"Ergänzende Daten zu Klima und Klimaentwicklung Baden-Württembergs", PIK, Dezember 2005  
(anhang2\_klima.pdf = 112 Seiten)

### Anhang 3

"Analyse der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Mortalität in Baden-Württemberg auf Basis der PIK-Szenarien", DWD Freiburg, Dezember 2004  
(anhang3\_gesundheit.pdf = 112 Seiten)

### Anhang 5

"Dynamik des Bodenwassers auf unterschiedlichen Substraten: Durchführung von Regionalisierungsarbeiten", FVA Baden-Württemberg, Dezember 2004  
(anhang5\_forst.pdf = 35 Seiten)

### Anhang 6

"Zusätzliche Daten zum Tourismus in Baden-Württemberg", PIK, Juni 2005  
(anhang6\_tourismus = 6 Seiten)

### Anhang 7

"Auswirkung veränderter Klimafaktoren auf Verbreitung, Zug- und Brutverhalten von Vögeln in Südwestdeutschland", Vogelwarte Radolfzell, Oktober 2004  
(anhang7\_naturschutz.pdf = 84 Seiten)

### Anhang 9

"Studie zur Häufigkeit und Intensität meteorologischer Ereignisse mit großem Schadenpotential in Baden-Württemberg", IMK, Universität Karlsruhe, Juni 2005  
(anhang9\_extreme.pdf = 63 Seiten)



PIK Report-Reference:

- No. 1 3. Deutsche Klimatagung, Potsdam 11.-14. April 1994  
Tagungsband der Vorträge und Poster (April 1994)
- No. 2 Extremer Nordsommer '92  
Meteorologische Ausprägung, Wirkungen auf naturnahe und vom Menschen beeinflusste Ökosysteme, gesellschaftliche Perzeption und situationsbezogene politisch-administrative bzw. individuelle Maßnahmen (Vol. 1 - Vol. 4)  
H.-J. Schellnhuber, W. Enke, M. Flechsig (Mai 1994)
- No. 3 Using Plant Functional Types in a Global Vegetation Model  
W. Cramer (September 1994)
- No. 4 Interannual variability of Central European climate parameters and their relation to the large-scale circulation  
P. C. Werner (Oktober 1994)
- No. 5 Coupling Global Models of Vegetation Structure and Ecosystem Processes - An Example from Arctic and Boreal Ecosystems  
M. Plöchl, W. Cramer (Oktober 1994)
- No. 6 The use of a European forest model in North America: A study of ecosystem response to climate gradients  
H. Bugmann, A. Solomon (Mai 1995)
- No. 7 A comparison of forest gap models: Model structure and behaviour  
H. Bugmann, Y. Xiaodong, M. T. Sykes, Ph. Martin, M. Lindner, P. V. Desanker, S. G. Cumming (Mai 1995)
- No. 8 Simulating forest dynamics in complex topography using gridded climatic data  
H. Bugmann, A. Fischlin (Mai 1995)
- No. 9 Application of two forest succession models at sites in Northeast Germany  
P. Lasch, M. Lindner (Juni 1995)
- No. 10 Application of a forest succession model to a continentality gradient through Central Europe  
M. Lindner, P. Lasch, W. Cramer (Juni 1995)
- No. 11 Possible Impacts of global warming on tundra and boreal forest ecosystems - Comparison of some biogeochemical models  
M. Plöchl, W. Cramer (Juni 1995)
- No. 12 Wirkung von Klimaveränderungen auf Waldökosysteme  
P. Lasch, M. Lindner (August 1995)
- No. 13 MOSES - Modellierung und Simulation ökologischer Systeme - Eine Sprachbeschreibung mit Anwendungsbeispielen  
V. Wenzel, M. Kücken, M. Flechsig (Dezember 1995)
- No. 14 TOYS - Materials to the Brandenburg biosphere model / GAIA  
Part 1 - Simple models of the "Climate + Biosphere" system  
Yu. Svirezhev (ed.), A. Block, W. v. Bloh, V. Brovkin, A. Ganopolski, V. Petoukhov, V. Razzhevaikin (Januar 1996)
- No. 15 Änderung von Hochwassercharakteristiken im Zusammenhang mit Klimaänderungen - Stand der Forschung  
A. Bronstert (April 1996)
- No. 16 Entwicklung eines Instruments zur Unterstützung der klimapolitischen Entscheidungsfindung  
M. Leimbach (Mai 1996)
- No. 17 Hochwasser in Deutschland unter Aspekten globaler Veränderungen - Bericht über das DFG-Rundgespräch am 9. Oktober 1995 in Potsdam  
A. Bronstert (ed.) (Juni 1996)
- No. 18 Integrated modelling of hydrology and water quality in mesoscale watersheds  
V. Krysanova, D.-I. Müller-Wohlfeil, A. Becker (Juli 1996)
- No. 19 Identification of vulnerable subregions in the Elbe drainage basin under global change impact  
V. Krysanova, D.-I. Müller-Wohlfeil, W. Cramer, A. Becker (Juli 1996)
- No. 20 Simulation of soil moisture patterns using a topography-based model at different scales  
D.-I. Müller-Wohlfeil, W. Lahmer, W. Cramer, V. Krysanova (Juli 1996)
- No. 21 International relations and global climate change  
D. Sprinz, U. Luterbacher (1st ed. July, 2nd ed. December 1996)
- No. 22 Modelling the possible impact of climate change on broad-scale vegetation structure - examples from Northern Europe  
W. Cramer (August 1996)

- No. 23 A method to estimate the statistical security for cluster separation  
F.-W. Gerstengarbe, P.C. Werner (Oktober 1996)
- No. 24 Improving the behaviour of forest gap models along drought gradients  
H. Bugmann, W. Cramer (Januar 1997)
- No. 25 The development of climate scenarios  
P.C. Werner, F.-W. Gerstengarbe (Januar 1997)
- No. 26 On the Influence of Southern Hemisphere Winds on North Atlantic Deep Water Flow  
S. Rahmstorf, M. H. England (Januar 1977)
- No. 27 Integrated systems analysis at PIK: A brief epistemology  
A. Bronstert, V. Brovkin, M. Krol, M. Lüdeke, G. Petschel-Held, Yu. Svirezhev, V. Wenzel (März 1997)
- No. 28 Implementing carbon mitigation measures in the forestry sector - A review  
M. Lindner (Mai 1997)
- No. 29 Implementation of a Parallel Version of a Regional Climate Model  
M. Kücken, U. Schättler (Oktober 1997)
- No. 30 Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Overview and key results  
W. Cramer, D. W. Kicklighter, A. Bondeau, B. Moore III, G. Churkina, A. Ruimy, A. Schloss, participants of "Potsdam '95" (Oktober 1997)
- No. 31 Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Analysis of the seasonal behaviour of NPP, LAI, FPAR along climatic gradients across ecotones  
A. Bondeau, J. Kaduk, D. W. Kicklighter, participants of "Potsdam '95" (Oktober 1997)
- No. 32 Evaluation of the physiologically-based forest growth model FORSANA  
R. Grote, M. Erhard, F. Suckow (November 1997)
- No. 33 Modelling the Global Carbon Cycle for the Past and Future Evolution of the Earth System  
S. Franck, K. Kossacki, Ch. Bounama (Dezember 1997)
- No. 34 Simulation of the global bio-geophysical interactions during the Last Glacial Maximum  
C. Kubatzki, M. Claussen (Januar 1998)
- No. 35 CLIMBER-2: A climate system model of intermediate complexity. Part I: Model description and performance for present climate  
V. Petoukhov, A. Ganopolski, V. Brovkin, M. Claussen, A. Eliseev, C. Kubatzki, S. Rahmstorf (Februar 1998)
- No. 36 Geocybernetics: Controlling a rather complex dynamical system under uncertainty  
H.-J. Schellnhuber, J. Kropp (Februar 1998)
- No. 37 Untersuchung der Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf Weizenbestände des Free-Air Carbondioxid Enrichment (FACE) - Experimentes Maricopa (USA)  
T. Kartschall, S. Grossman, P. Michaelis, F. Wechsung, J. Gräfe, K. Waloszczyk, G. Wechsung, E. Blum, M. Blum (Februar 1998)
- No. 38 Die Berücksichtigung natürlicher Störungen in der Vegetationsdynamik verschiedener Klimagebiete  
K. Thonicke (Februar 1998)
- No. 39 Decadal Variability of the Thermohaline Ocean Circulation  
S. Rahmstorf (März 1998)
- No. 40 SANA-Project results and PIK contributions  
K. Bellmann, M. Erhard, M. Flechsig, R. Grote, F. Suckow (März 1998)
- No. 41 Umwelt und Sicherheit: Die Rolle von Umweltschwellenwerten in der empirisch-quantitativen Modellierung  
D. F. Sprinz (März 1998)
- No. 42 Reversing Course: Germany's Response to the Challenge of Transboundary Air Pollution  
D. F. Sprinz, A. Wahl (März 1998)
- No. 43 Modellierung des Wasser- und Stofftransportes in großen Einzugsgebieten. Zusammenstellung der Beiträge des Workshops am 15. Dezember 1997 in Potsdam  
A. Bronstert, V. Krysanova, A. Schröder, A. Becker, H.-R. Bork (eds.) (April 1998)
- No. 44 Capabilities and Limitations of Physically Based Hydrological Modelling on the Hillslope Scale  
A. Bronstert (April 1998)
- No. 45 Sensitivity Analysis of a Forest Gap Model Concerning Current and Future Climate Variability  
P. Lasch, F. Suckow, G. Bürger, M. Lindner (Juli 1998)
- No. 46 Wirkung von Klimaveränderungen in mitteleuropäischen Wirtschaftswäldern  
M. Lindner (Juli 1998)
- No. 47 SPRINT-S: A Parallelization Tool for Experiments with Simulation Models  
M. Flechsig (Juli 1998)

- No. 48 The Odra/Oder Flood in Summer 1997: Proceedings of the European Expert Meeting in Potsdam, 18 May 1998  
A. Bronstert, A. Ghazi, J. Hladny, Z. Kundzewicz, L. Menzel (eds.) (September 1998)
- No. 49 Struktur, Aufbau und statistische Programmbibliothek der meteorologischen Datenbank am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung  
H. Österle, J. Glauer, M. Denhard (Januar 1999)
- No. 50 The complete non-hierarchical cluster analysis  
F.-W. Gerstengarbe, P. C. Werner (Januar 1999)
- No. 51 Struktur der Amplitudengleichung des Klimas  
A. Hauschild (April 1999)
- No. 52 Measuring the Effectiveness of International Environmental Regimes  
C. Helm, D. F. Sprinz (Mai 1999)
- No. 53 Untersuchung der Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen innerhalb des Free-Air Carbon Dioxide Enrichment-Experimentes: Ableitung allgemeiner Modelllösungen  
T. Kartschall, J. Gräfe, P. Michaelis, K. Waloszczyk, S. Grossman-Clarke (Juni 1999)
- No. 54 Flächenhafte Modellierung der Evapotranspiration mit TRAIN  
L. Menzel (August 1999)
- No. 55 Dry atmosphere asymptotics  
N. Botta, R. Klein, A. Almgren (September 1999)
- No. 56 Wachstum von Kiefern-Ökosystemen in Abhängigkeit von Klima und Stoffeintrag - Eine regionale Fallstudie auf Landschaftsebene  
M. Erhard (Dezember 1999)
- No. 57 Response of a River Catchment to Climatic Change: Application of Expanded Downscaling to Northern Germany  
D.-I. Müller-Wohlfel, G. Bürger, W. Lahmer (Januar 2000)
- No. 58 Der "Index of Sustainable Economic Welfare" und die Neuen Bundesländer in der Übergangsphase  
V. Wenzel, N. Herrmann (Februar 2000)
- No. 59 Weather Impacts on Natural, Social and Economic Systems (WISE, ENV4-CT97-0448)  
German report  
M. Flechsig, K. Gerlinger, N. Herrmann, R. J. T. Klein, M. Schneider, H. Sterr, H.-J. Schellnhuber (Mai 2000)
- No. 60 The Need for De-Aliasing in a Chebyshev Pseudo-Spectral Method  
M. Uhlmann (Juni 2000)
- No. 61 National and Regional Climate Change Impact Assessments in the Forestry Sector - Workshop Summary and Abstracts of Oral and Poster Presentations  
M. Lindner (ed.) (Juli 2000)
- No. 62 Bewertung ausgewählter Waldfunktionen unter Klimaänderung in Brandenburg  
A. Wenzel (August 2000)
- No. 63 Eine Methode zur Validierung von Klimamodellen für die Klimawirkungsforschung hinsichtlich der Wiedergabe extremer Ereignisse  
U. Böhm (September 2000)
- No. 64 Die Wirkung von erhöhten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf die Transpiration eines Weizenbestandes unter Berücksichtigung von Wasser- und Stickstofflimitierung  
S. Grossman-Clarke (September 2000)
- No. 65 European Conference on Advances in Flood Research, Proceedings, (Vol. 1 - Vol. 2)  
A. Bronstert, Ch. Bismuth, L. Menzel (eds.) (November 2000)
- No. 66 The Rising Tide of Green Unilateralism in World Trade Law - Options for Reconciling the Emerging North-South Conflict  
F. Biermann (Dezember 2000)
- No. 67 Coupling Distributed Fortran Applications Using C++ Wrappers and the CORBA Sequence Type  
T. Slawig (Dezember 2000)
- No. 68 A Parallel Algorithm for the Discrete Orthogonal Wavelet Transform  
M. Uhlmann (Dezember 2000)
- No. 69 SWIM (Soil and Water Integrated Model), User Manual  
V. Krysanova, F. Wechsung, J. Arnold, R. Srinivasan, J. Williams (Dezember 2000)
- No. 70 Stakeholder Successes in Global Environmental Management, Report of Workshop, Potsdam, 8 December 2000  
M. Welp (ed.) (April 2001)

- No. 71 GIS-gestützte Analyse globaler Muster anthropogener Waldschädigung - Eine sektorale Anwendung des Syndromkonzepts  
M. Cassel-Gintz (Juni 2001)
- No. 72 Wavelets Based on Legendre Polynomials  
J. Fröhlich, M. Uhlmann (Juli 2001)
- No. 73 Der Einfluß der Landnutzung auf Verdunstung und Grundwasserneubildung - Modellierungen und Folgerungen für das Einzugsgebiet des Glan  
D. Reichert (Juli 2001)
- No. 74 Weltumweltpolitik - Global Change als Herausforderung für die deutsche Politikwissenschaft  
F. Biermann, K. Dingwerth (Dezember 2001)
- No. 75 Angewandte Statistik - PIK-Weiterbildungsseminar 2000/2001  
F.-W. Gerstengarbe (Hrsg.) (März 2002)
- No. 76 Zur Klimatologie der Station Jena  
B. Orłowsky (September 2002)
- No. 77 Large-Scale Hydrological Modelling in the Semi-Arid North-East of Brazil  
A. Güntner (September 2002)
- No. 78 Phenology in Germany in the 20th Century: Methods, Analyses and Models  
J. Schaber (November 2002)
- No. 79 Modelling of Global Vegetation Diversity Pattern  
I. Venevskaia, S. Venevsky (Dezember 2002)
- No. 80 Proceedings of the 2001 Berlin Conference on the Human Dimensions of Global Environmental Change "Global Environmental Change and the Nation State"  
F. Biermann, R. Brohm, K. Dingwerth (eds.) (Dezember 2002)
- No. 81 POTSDAM - A Set of Atmosphere Statistical-Dynamical Models: Theoretical Background  
V. Petoukhov, A. Ganopolski, M. Claussen (März 2003)
- No. 82 Simulation der Siedlungsflächenentwicklung als Teil des Globalen Wandels und ihr Einfluß auf den Wasserhaushalt im Großraum Berlin  
B. Ströbl, V. Wenzel, B. Pfützner (April 2003)
- No. 83 Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven  
F.-W. Gerstengarbe, F. Badeck, F. Hattermann, V. Krysanova, W. Lahmer, P. Lasch, M. Stock, F. Suckow, F. Wechsung, P. C. Werner (Juni 2003)
- No. 84 Well Balanced Finite Volume Methods for Nearly Hydrostatic Flows  
N. Botta, R. Klein, S. Langenberg, S. Lützenkirchen (August 2003)
- No. 85 Orts- und zeitdiskrete Ermittlung der Sickerwassermenge im Land Brandenburg auf der Basis flächendeckender Wasserhaushaltsberechnungen  
W. Lahmer, B. Pfützner (September 2003)
- No. 86 A Note on Domains of Discourse - Logical Know-How for Integrated Environmental Modelling, Version of October 15, 2003  
C. C. Jaeger (Oktober 2003)
- No. 87 Hochwasserrisiko im mittleren Neckarraum - Charakterisierung unter Berücksichtigung regionaler Klimaszenarien sowie dessen Wahrnehmung durch befragte Anwohner  
M. Wolff (Dezember 2003)
- No. 88 Abflußentwicklung in Teileinzugsgebieten des Rheins - Simulationen für den Ist-Zustand und für Klimaszenarien  
D. Schwandt (April 2004)
- No. 89 Regionale Integrierte Modellierung der Auswirkungen von Klimaänderungen am Beispiel des semi-ariden Nordostens von Brasilien  
A. Jaeger (April 2004)
- No. 90 Lebensstile und globaler Energieverbrauch - Analyse und Strategieansätze zu einer nachhaltigen Energiestruktur  
F. Reusswig, K. Gerlinger, O. Edenhofer (Juli 2004)
- No. 91 Conceptual Frameworks of Adaptation to Climate Change and their Applicability to Human Health  
H.-M. Füssel, R. J. T. Klein (August 2004)
- No. 92 Double Impact - The Climate Blockbuster 'The Day After Tomorrow' and its Impact on the German Cinema Public  
F. Reusswig, J. Schwarzkopf, P. Polenz (Oktober 2004)
- No. 93 How Much Warming are we Committed to and How Much Can be Avoided?  
B. Hare, M. Meinshausen (Oktober 2004)

- No. 94 Urbanised Territories as a Specific Component of the Global Carbon Cycle  
A. Svirejeva-Hopkins, H.-J. Schellnhuber (Januar 2005)
- No. 95 GLOWA-Elbe I - Integrierte Analyse der Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser,  
Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet  
F. Wechsung, A. Becker, P. Gräfe (Hrsg.) (April 2005)
- No. 96 The Time Scales of the Climate-Economy Feedback and the Climatic Cost of Growth  
S. Hallegatte (April 2005)
- No. 97 A New Projection Method for the Zero Froude Number Shallow Water Equations  
S. Vater (Juni 2005)
- No. 98 Table of EMICs - Earth System Models of Intermediate Complexity  
M. Claussen (ed.) (Juli 2005)
- No. 99 KLARA - Klimawandel - Auswirkungen, Risiken, Anpassung  
M. Stock (Hrsg.) (Juli 2005)

