

PIK Report

No. 106

PERSPEKTIVEN
DER KLIMAÄNDERUNG BIS 2050
FÜR DEN WEINBAU IN DEUTSCHLAND
(KLIMA 2050)

Schlußbericht zum FDW-Vorhaben:
Klima 2050

M. Stock, F. Badeck, F.-W. Gerstengarbe, D. Hoppmann,
T. Kartschall, H. Österle, P. C. Werner, M. Wodinski



POTSDAM INSTITUTE
FOR
CLIMATE IMPACT RESEARCH (PIK)



Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Forschungsrings des Deutschen Weinbaues unter dem Projektnamen Klima 2050 in den Jahren 2003 bis 2006 gefördert.

Autoren:

Dr. Manfred Stock (Projektsprecher)
Dr. Franz Badeck
Prof. Dr. Friedrich-Wilhelm Gerstengarbe
Dr. Thomas Kartschall
Dr. Hermann Österle
Prof. Dr. Peter C. Werner
Dipl.-Geogr. Martin Wodinski (Ansprechpartner)
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.
PF 60 12 03, D-14412 Potsdam
Tel.: +49-331-288-2582
Fax: +49-331-288-2695
E-mail: Martin.Wodinski@pik-potsdam.de

Dr. Dieter Hoppmann
vormals Deutscher Wetterdienst
Abteilung Agrarmeteorologie
Außenstelle Geisenheim
Kreuzweg 25
65366 Geisenheim

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

Regional climate scenarios for German viticultural areas for the time periods 1951-2000 (basis scenario derived from observation data) and 2001-2050 (future scenario) compiled for the A1B emissions scenario were developed using the regional statistic climate model STAR. Climatic developments were analysed for 11 meteorological variables and for special days.

Possible changes in the German viticulture were investigated using a thermal index (HUGLIN). A general tendency indicated a northbound shift of viticultural areas as well as an ascent to higher elevations.

Model-supported investigations of grapevine phenology were done by coupling the climate scenarios with a model for the phenology (for cv. Riesling). Model runs were used to evaluate changes in the three investigation areas. As a general tendency an acceleration of all phenological phases was noted.

Evaluation of climatic variables relevant to viticulture was performed for the individual phenological phases. The results indicated critical changes including, e.g., an increasing probability of the occurrence of tropical nights ($T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$) which would potentially endanger the character of the Riesling, and an increased probability of humid conditions during maturation, with the danger of higher pest load.

For the **development of adjustment strategies**, dialogue with experts from practice and research was suggested as means to identify possible measures and to evaluate remaining chances and risks, with a focus on individual cases.

An extension of the investigations to further viticulture regions is planned, paying special attention to changes in the complex system climate grapevine pests. The results of expert-led stakeholder dialogue will induce the development of adjustment strategies for specific viticulture regions.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Aufgabenstellung	13
2	Datenmaterial	16
3	Das regionale statistische Klimamodell STAR	18
3.1	Auswahl	18
3.2	Beschreibung des Modells STAR	19
3.2.1	Grundprinzip	20
3.2.2	Arbeitsschritte	20
3.3	Modellergebnisse	25
4	Validierung des Szenarienmodells	27
4.1	Daten und Validierungsparameter	27
4.2	Validierungsergebnisse	28
4.3	Schlussfolgerungen	31
5	Die großräumigen Klimaverhältnisse in Südwestdeutschland und ihre Veränderung bis 2050	32
5.1	Einleitende Bemerkungen	32
5.2	Lufttemperatur	36
5.3	Niederschlag	50
5.4	Relative Luftfeuchtigkeit	55
5.5	Wasserdampfdruck	58
5.6	Luftdruck	60
5.7	Globalstrahlung	62
5.8	Sonnenscheindauer	62
5.9	Bedeckungsgrad	66
5.10	Windgeschwindigkeit	68
6	Übersicht zur Klimaentwicklung	70
6.1	Verhältnisse im Basisszenarium 1951 bis 2000	70
6.2	Verhältnisse im Zukunftsszenarium 2001 bis 2055	73
6.3	Extreme und deren Veränderung	76
7	Klimatische Wasserbilanz	78
8	Die Untersuchungsgebiete	81
8.1	Mittlere Verhältnisse und Trends	83
8.2	Extreme und deren Veränderung	86

9	Reifeindex und Phänologie der Rebe	91
9.1	Huglin-Index	91
9.1.1	Berechnung des Huglin-Index	92
9.1.2	Ergebnisse	93
9.1.2.1	Rheingau	93
9.1.2.2	Pfalz	97
9.1.2.3	Württemberg	97
9.2	Phänologie	100
9.2.1	Das Phänologiemodell	100
9.2.1.1	Austrieb (AUS)	104
9.2.1.2	Blühbeginn (BLB)	105
9.2.1.3	Blühdauer bzw. Blühende (BLE)	105
9.2.1.4	Reifebeginn (REB)	106
9.2.1.5	Lesereife/Lesebeginn (LES)	107
9.2.2	Simulationsergebnisse zur Phänologie	108
9.2.2.1	Modell-Messwertvergleich	108
9.2.2.2	Modellergebnisse	109
9.2.2.3	Weinbaulich relevante Kenngrößen	115
10	Anpassungsstrategien	123
10.1	Übertragung regionaler Szenarien zum Klimawandel	124
10.2	Bewertung spezifischer Sensitivitäten	125
10.3	Klimatische Belastungen	125
10.4	Abschätzung potenzieller Auswirkungen	126
10.5	Analyse des vorhandenen Anpassungspotenzials	126
10.6	Bewertung von verbleibenden Risiken und Chancen	126
11	Zusammenfassung und Ausblick	128
	Literaturverzeichnis	130

Anlagen (CD mit ergänzenden Materialien)

Anhang I Klima von Südwestdeutschland

Anhang II Modell-Messwertvergleich

Anhang III Weinbaulich relevante Kenngrößen

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AUS	=	Austrieb
BASZ	=	Basisszenarium
Bewo	=	Bedeckungsgrad in Achten
BLB	=	Blühbeginn
BLE	=	Blühende
Dadr	=	Wasserdampfdruck
Ep	=	potenzielle Evapotranspiration
FAG	=	Forschungsanstalt Geisenheim
FDW	=	Forschungsring des Deutschen Weinbaues
Gstr	=	Globalstrahlung
IPCC	=	Intergovernmental Panel on Climate Change
LES	=	Lesebeginn (QbA)
Ludr	=	Luftdruck
Nied	=	Niederschlagssumme
REB	=	Reifebeginn
Relf	=	Relative Luftfeuchtigkeit
Sonn	=	Sonnenscheindauer
SWD	=	Südwestdeutschland
Tmax	=	Maximum der Lufttemperatur
Tmin	=	Minimum der Lufttemperatur
Tmit	=	Mitteltemperatur
Vp	=	Vegetationsperiode
ZUSZ	=	Zukunftsszenarium

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1 :	Schema des Modellaufbaus STAR	25
Abb. 2 :	Übersichtskarten zum Untersuchungsgebiet	35
Abb. 3 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Lufttemperatur in SWD..	40
Abb. 4 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Anzahl der Frosttage pro Jahr in SWD	41
Abb. 5 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung für den ersten Frosttag im Jahr in SWD.....	42
Abb. 6 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung für den letzten Frosttag im Jahr in SWD.....	43
Abb. 7 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Andauer der Frosttage in SWD.....	44
Abb. 8 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Anzahl der Sommertage pro Jahr in SWD	45
Abb. 9 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung für den erster Sommertag im Jahr in SWD	46
Abb. 10 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung für den letzten Sommertag im Jahr in SWD	47
Abb. 11 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Andauer der Sommertage pro Jahr in SWD	48
Abb. 12 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Kältesumme im Winter in SWD.....	49
Abb. 13 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Niederschlagssumme im Jahr in SWD	52
Abb. 14 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Niederschlagssumme im Winter in SWD	53
Abb. 15 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Niederschlagssumme im Sommer in SWD	54
Abb. 16 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung der relativen Luftfeuchte in SWD	57
Abb. 17 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung des Wasserdampfdrucks in SWD.....	59
Abb. 18 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung des Luftdrucks in SWD	61

Abb. 19 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Globalstrahlung in SWD	64
Abb. 20 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Sonnenscheindauer in SWD	65
Abb. 21 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung des Bedeckungsgrades in SWD	67
Abb. 22 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Windgeschwindigkeit in SWD.....	69
Abb. 23 :	Mittelwerte, Trends und Entwicklung der klimatischen Wasserbilanz in SWD	79
Abb. 24 :	Übersicht der ausgewählten Weinbaugebiete.....	82
Abb. 25 :	Veränderung des ersten und letzten Auftretens im Jahr ausgewählter Ereignistage an den Stationen Geisenheim, Landau und Heilbronn	90
Abb. 26 :	Zeitschnitte für die Entwicklung des Huglin-Index im Rheingau.....	94
Abb. 27 :	Zeitschnitte für die Entwicklung des Huglin-Index in der Pfalz.....	95
Abb. 28 :	Zeitschnitte für die Entwicklung des Huglin-Index in Württemberg	96
Abb. 29 :	Entwicklung des Huglin-Index an der Stationen Geisenheim, Landau i.d. Pfalz und Heilbronn.....	98
Abb. 30 :	Potenzielle Eintrittstermine und Dauer ausgewählter phänologischer Phasen an der Station Geisenheim	112
Abb. 31 :	Potenzielle Eintrittstermine und Dauer ausgewählter phänologischer Phasen an der Station Landau i. d. Pfalz	113
Abb. 32 :	Potenzielle Eintrittstermine und Dauer ausgewählter phänologischer Phasen an der Station Heilbronn.....	114
Abb. 33 :	Schema zur Entwicklung von Anpassungsstrategien	124

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Verifikationsergebnisse für die Bezugsstation Gschwend, Zeitraum 1951-2000	29
Tabelle 2: Vergleich der Ereignistage (mittlere Häufigkeit pro Jahr) für die Bezugsstation Gschwend, Zeitraum 1951-2000	29
Tabelle 3: Vergleich der Monatsmittelwerte und deren Streuungen für die Bezugsstation Gschwend, Zeitraum 1951-2000	30
Tabelle 4: Vergleich ausgewählter Kenngrößen für den Niederschlag an der Bezugsstation Gschwend, Zeitraum 1951-2000	31
Tabelle 5: Meteorologische Parameter und Ereignistage	33
Tabelle 6: Veränderung der mittleren Monatssummen des Niederschlags im ZUSZ (Differenz 2046/2055 – 1951/2000)	51
Tabelle 7: Jahresmittelwerte bzw. -summen von 11 meteorologischen Größen für die Hauptstationen im Basisszenarium.....	71
Tabelle 8: Trendwerte von 11 meteorologischen Größen für die Hauptstationen im Basisszenarium.....	72
Tabelle 9: Vergleich der mittleren Verhältnisse zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55.....	73
Tabelle 10: Jahresmittelwerte bzw. -summen von 11 meteorologischen Größen für die Hauptstationen im transienten Zukunftsszenarium	74
Tabelle 11: Trendwerte von 11 meteorologischen Größen für die Hauptstationen im transienten Zukunftsszenarium	75
Tabelle 12: Vergleich temperaturgebundener Ereignistage zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55.....	77
Tabelle 13: Vergleich weiterer Ereignistage zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55.....	77
Tabelle 14: Vergleich der mittleren Verhältnisse zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55 an der Station Geisenheim	83
Tabelle 15: Vergleich der mittleren Verhältnisse zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55 an der Station Landau.....	84
Tabelle 16: Vergleich der mittleren Verhältnisse zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55 an der Station Heilbronn	84

Tabelle 17: Veränderung der mittleren Monatssummen des Niederschlags im ZUSZ (2046/2055 – 1951/2000) an der Station Geisenheim	85
Tabelle 18: Veränderung der mittleren Monatssummen des Niederschlags im ZUSZ (2046/2055 – 1951/2000) an der Station Landau	85
Tabelle 19: Veränderung der mittleren Monatssummen des Niederschlags im ZUSZ (2046/2055 – 1951/2000) an der Station Heilbronn	85
Tabelle 20: Vergleich temperaturgebundener Ereignistage zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55 an der Station Geisenheim.....	86
Tabelle 21: Vergleich temperaturgebundener Ereignistage zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55 an der Station Landau.....	87
Tabelle 22: Vergleich temperaturgebundener Ereignistage zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55 an der Station Heilbronn	87
Tabelle 23: Vergleich weiterer Ereignistage zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55 an der Station Geisenheim	88
Tabelle 24: Vergleich weiterer Ereignistage zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55 an der Station Landau.....	89
Tabelle 25: Vergleich weiterer Ereignistage zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55 an der Station Heilbronn	89
Tabelle 26: Minimale klimatologische Anforderungen für Weinbaugebiete	91
Tabelle 27: Hugin-Indizes für wichtige Sorten	92
Tabelle 28: Beispiele für einen Umgang mit möglichen Folgen des Klimawandels im Weinbau.....	127

1 Aufgabenstellung

Zwischen qualitativ hochwertigen Weinen und dem für ihre Reife geeigneten Klima besteht eine enge Beziehung und bekanntermaßen spiegelt sich daher die Variabilität des Klimas bei herausragenden Lagen in den qualitativen Unterschieden verschiedener Jahrgänge wider. Daher verwundert es nicht, dass der derzeit sich beschleunigende Klimawandel bereits spürbare Auswirkungen im Weinbau zeitigt und sich Winzer besorgt fragen, wie sich die Veränderungen beim Klima und seinen Folgen zukünftig noch entwickeln werden. Diese Frage hat der Forschungsring des Deutschen Weinbaus aufgegriffen und das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung im Jahre 2003 beauftragt, die „Perspektiven der Klimaänderung bis 2050 für den Weinbau in Deutschland (Klima 2050)“ zu untersuchen.

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist es, dem Weinbau in Deutschland im Hinblick auf eine zu erwartende Klimaänderung geeignete Methoden zur Abwehr möglicher Risiken und zur Nutzung erkennbarer Chancen in die Hand zu geben. Dazu ist es notwendig, die wissenschaftlichen Grundlagen für die Abschätzung der Risiken und Chancen des Klimawandels für den Weinbau zu erarbeiten und zu vermitteln. Ein am PIK entwickeltes neues Verfahren zur Regionalisierung von Klimaänderungen hinsichtlich möglicher Auswirkungen wurde dabei für die Anwendung im Weinbau weiterentwickelt und eingesetzt. Die Ergebnisse sollen für die Fachberatung im Weinbau praxistauglich aufbereitet werden, z.B. in Form von Checklisten, die es Fachberatern mit entsprechendem wissenschaftlichen Hintergrund ermöglichen, im Einzelfall drohende Risiken oder nutzbare Chancen zu erkennen und langfristige Perspektiven für Sortenwahl und Bewirtschaftung aufzuzeigen.

Nicht allen denen die oben erwähnte enge Beziehung zwischen Wein und Klima bekannt ist, dürfte jedoch die Komplexität dieser Beziehung voll bewusst sein. Bodenbeschaffenheit, Orographie und unter anderem auch die lokalklimatischen Standortfaktoren schlagen sich in Erfahrungswerten für Sortenwahl und Bewirtschaftung nieder. Angesichts des Klimawandels, der mit dem Schlagwort von der globalen Erwärmung nicht adäquat erfasst wird, muss man sich fragen, ob diese

Erfahrungen weiterhin Bestand haben werden und wie der Weinbau diese an die sich dynamisch verändernden Umstände anpassen kann.

Grundsätzlich bringt eine allmähliche Erwärmung in Verbindung mit einem CO₂-Anstieg auch Chancen für den Weinbau in Deutschland mit sich. Zur Zeit des sogenannten Klimaoptimums im Mittelalter bis zum Beginn der „Kleinen Eiszeit“, gegen Ende des 16. Jahrhunderts, wurde in Deutschland sehr viel mehr Wein angebaut als heute, sogar bis an die Ostseeküste. Auch in England war der Weinbau damals weit verbreitet. Die Beobachtung, dass sich in den letzten Jahren die Anbaufläche von Wein in Südengland etwa verdreifacht hat, wird von Wissenschaftlern als einer unter vielen Indikatoren für die derzeitige Klimaveränderung angeführt (Palutikof, 2000). Auch die Zunahme der Rotweinproduktion in verschiedenen Anbaugebieten könnte ein solcher Indikator sein, bei dem allerdings auch wirtschaftliche Faktoren mitwirken. Zwischen 1960 und 2000 hat sich die Produktionsmenge roter AOC Weine im Bordelais versechsfacht (Jones, 2000). Nach dem Bericht des IPCC (IPCC 2001, Kapitel „Landwirtschaft in Europa“) sind für weite Teile Europas aufgrund des Klimawandels deutliche Ertragssteigerungen bis 2050 zu erwarten.

Leider gibt es Hinweise, dass sich die Klimaentwicklung nicht ganz so positiv entwickeln wird und sinnbildlich gesprochen Wasser in den Wein geschüttet werden könnte. Der erwartete Anstieg der langjährigen Jahresmitteltemperatur ist ein eher zweitrangiger Aspekt in Bezug auf die Vielfalt der tatsächlichen Auswirkungen. Von größerer Bedeutung sind vielmehr die innerjährlichen Verschiebungen im Verlauf von Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer und anderen Klimaparametern einerseits, sowie ihre große Variabilität andererseits. Hier sind bereits deutliche Trends erkennbar, deren weitere Entwicklung in der Zukunft im Projekt näher betrachtet wird. Austrieb, Blüte und Reife erscheinen früher im Jahr, die Winter werden überwiegend milder, was auch Schädlinge begünstigt. Es deutet sich außerdem an, dass regional sehr differenziert extreme Wettersituationen zunehmen. Dieser Aspekt wird im Projekt im Zusammenhang der Entwicklung so genannter Ereignistage untersucht, wie Sommertage, heiße Tage, Frosttage und Eistage. Für weitere Risiken im Weinbau sorgen aber auch Starkregenfälle, Hagelschlag, erhöhte UV-Strahlung, Hitze- und Dürreperioden, Nebel-

tage und heftige Stürme. Diese Extremereignisse lassen sich hinsichtlich ihrer zukünftigen Entwicklung nur sehr eingeschränkt mit den zur Verfügung stehenden Methoden abschätzen. Soweit es die Datenlage ermöglicht, werden hier qualitative Einschätzungen formuliert.

Das durchgeführte Projekt Klima2050 setzt sowohl bei der Ermittlung der zu erwartenden Risiken als auch möglicher Chancen der Klimaveränderung für den Weinbau neue Akzente, zum einen hinsichtlich der relativ hohen regionalen Auflösung und zum anderen durch Einbeziehung weiterer meteorologischer Größen. Neben der langjährigen Jahresmitteltemperatur sind z. B. der Niederschlag und seine Variabilität von Bedeutung für den Weinbau. Schwerpunkt der Arbeiten ist die Entwicklung des Klimas bis 2050 für drei ausgewählte Weinanbaugebiete im Zentrum Deutschlands. In Abstimmung mit dem Forschungsring des Deutschen Weinbaus wurden die Weinbauregionen Rheingau, Pfalz und Württemberg untersucht. Der ursprüngliche Antrag beschränkt sich auf zwei Regionen. Die Region Württemberg wurde ergänzt, da Ergebnisse aus dem Projekt KLARA (Stock et al., 2005) verwendet werden konnten, das im Auftrag des Landesamts für Umweltschutz Baden-Württemberg durchgeführt wurde.

Ein weitere Aufgabe des Projekts ist die Übertragung der Ergebnisse für den Praxisgebrauch. Dies erfolgte ansatzweise durch Befragung von Experten zur Rebphänologie und zum Weinbau. Damit lassen sich die im Projekt entwickelten Klimaszenarien in geeignete Checklisten für Fachberater, verständliche Zusatzinformationen und Handlungsanweisungen übertragen. Gegenüber einer so genannten Prognose eröffnen die Ergebnisse unserer Analyse daher prinzipiell auch das Potenzial, die Klimafolgen über die Wirkung geeigneter Vorsorgemaßnahmen positiv beeinflussen zu können. Ob Chancen erkannt und genutzt, Risiken dagegen vermieden werden, hängt wesentlich von der Wahrnehmung der Betroffenen im Weinbau und ihren vorausschauenden Entscheidungen ab, die wir mit den ermittelten Erkenntnissen hoffentlich erleichtert haben.

2 Datenmaterial

Grundlage für Szenarienrechnungen sind meteorologische Beobachtungsreihen über einen möglichst langen Zeitraum an möglichst vielen Stationen. Die entsprechenden Datensätze von 700 Stationen wurden vom Kooperationspartner Deutscher Wetterdienst zur Verfügung gestellt und decken weiträumig alle Untersuchungsgebiete ab. Von diesen Stationen sind 112 meteorologische Hauptstationen und 588 Niederschlagsstationen. Für die Hauptstationen lagen die Tageswerte der meteorologischen Größen Temperatur (Minimum, Mittel, Maximum), Niederschlag, relative Luftfeuchte, Luftdruck, Wasserdampfdruck, Sonnenscheindauer, Bedeckungsgrad, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit vor. Die Daten wurden auf Vollständigkeit und Homogenität geprüft. Fehlende Werte wurden unter Berücksichtigung der statistischen und klimatologischen Zusammenhänge zwischen den Stationen ergänzt. Festgestellte Inhomogenitäten nicht natürlichen Ursprungs wurden vorsichtig korrigiert (vgl. Österle, 2003).

Im Einzelnen erfolgten dabei folgende Bearbeitungsschritte:

- Für jedes Element Berechnung der Differenzen zwischen zu prüfender Station mit benachbarten Stationen
- Feststellung signifikanter Änderungen in den Differenzen
- Ursachenbestimmung anhand der Stationsgeschichte soweit als möglich
- Korrektur der Daten unter Berücksichtigung der Differenzwerte und der Entwicklungen an den Nachbarstationen
- Listung der nicht korrigierbaren Inhomogenitäten.

Danach wurden die für die Untersuchung notwendigen meteorologischen Größen mit Hilfe eines Interpolationsprogramms von den Haupt- auf die Niederschlagsstationen übertragen.

Durch die beschriebene vorsichtige Korrektur der Daten konnten Inhomogenitäten weitgehend beseitigt werden. Als Ergebnis stand ein vollständiger und homogener Datensatz, mit Tageswerten der folgenden meteorologischen Größen zur Verfügung:

- Tagesmaximum der Lufttemperatur (Tmax) [°C]
- Tagesmittel der Lufttemperatur (Tmit) [°C]
- Tagesminimum der Lufttemperatur (Tmin) [°C]
- Tagessumme des Niederschlags (Nied) [mm]
- Tagesmittel der relativen Luftfeuchte (Relf) [%]
- Tagesmittel des Luftdrucks (Ludr) [hPa]
- Tagesmittel des Wasserdampfdrucks (Dadr) [hPa]
- Tagessumme der Sonnenscheindauer (Sonn) [h]
- Tagesmittel des Bedeckungsgrads (Bewo) [-/8]
- Tagessumme der Globalstrahlung (Gstr) [J/cm²]
- Tagesmittel der Windgeschwindigkeit (Wind) [m/s]

Dieser Datensatz für den Zeitraum 1951 bis 2000 bildet das sogenannte Basis-szenarium (BASZ) und dient zur Kennzeichnung der mittleren klimatischen Verhältnisse in Südwestdeutschland und in den Untersuchungsgebieten.

3 Das regionale statistische Klimamodell STAR

3.1 Auswahl

Das Klimasystem der Erde stellt ein hochgradig nichtlineares System dar, mit der grundsätzlichen Folge, dass die zukünftige Entwicklung nicht oder nur sehr eingeschränkt vorhersagbar ist. Zur Abschätzung zukünftiger Klimaentwicklungen und deren Folgen werden daher Klimaszenarien benutzt, die unter der Annahme von konkreten Rahmenbedingungen über einen definierten Zeitraum, den sich einstellenden Klimazustand beschreiben. Art und Auswahl des Szenariums ist abhängig von den Änderungsgrößen, dem interessierenden Maßstab und der spezifischen Fragestellung. Werkzeuge zur Szenarienerstellung sind sowohl Klimamodelle als auch statistische Methoden, die auch gekoppelt eingesetzt werden.

Für die vorliegende Aufgabe ist die Beurteilung der Auswirkungen der erwarteten globalen Klimaänderungen im regionalen Maßstab erforderlich. Da globale Klimamodelle aus verschiedenen Gründen zur Zeit und in absehbarer Zukunft nicht in der Lage sind, für eine Region verwendbare Modellergebnisse meteorologischer Parameter zu liefern (IPCC, 2001, 2007), muss zur Abschätzung von Klimaentwicklungen in Weinbauregionen auf andere Möglichkeiten der Datenbereitstellung zurückgegriffen werden. Dabei darf die Konsistenz der Daten sowohl räumlich, zeitlich als auch zwischen den meteorologischen Größen nicht verletzt werden. Drei wesentliche Methoden zur Szenarientwicklung werden zur Zeit diskutiert:

Bei der ersten Methode wird ein regionales Klimamodell entwickelt, dass in ein globales Modell eingebettet ist und von diesem mit den notwendigen Randwerten versorgt wird (z. B. Machenhauer et al., 1996). Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der physikalischen Verknüpfung großskaliger und kleinskaliger Prozesse. Der Nachteil ist, dass Verknüpfungen und Prozesse zur Zeit noch nicht genau genug modelliert werden können und so zu Fehlern führen, die eine Weiterverwendung der Ergebnisse in der Regel begrenzen.

Die zweite Methode verwendet Klimamodellergebnisse, die über statistische Verfahren in kleinerskalige Bereiche transformiert werden (Zorita et al., 1993). Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass direkt auf die Klimamodellergebnisse zugegriffen wird, so dass eine physikalische Fehlerfortpflanzung wie bei der Kopplung von Klimamodellen entfällt. Ein Nachteil liegt darin, dass die Fehler des Klimamodells durch den statistischen Ansatz nicht beseitigt werden, sondern direkt in das Szenarium eingehen.

Die dritte Methode geht davon aus, dass großräumige, vom Klimamodell berechnete Änderungen bestimmter meteorologischer Größen in einer Region im Mittel als richtig angesehen werden können. Auf der Basis dieser Annahme werden langjährige Beobachtungsreihen mit entsprechenden statistischen Methoden so aufbereitet, dass sie diese Änderungen in Form eines Szenariums wiedergeben. Der Vorteil der Methode besteht darin, dass die vorhandenen Klimamodellfehler bei der Szenarienbildung auf ein Minimum reduziert werden, wobei die bereits angeführte Konsistenz erhalten bleibt. Von Nachteil ist der nicht mehr vorhandene physikalische Zusammenhang zwischen den Klimamodellergebnissen und denen des Szenariums.

Da die beiden erstgenannten Vorgehensweisen zum Zeitpunkt der Projektarbeiten noch keine oder nur eingeschränkt befriedigende Ergebnisse liefern, wurde auf der Basis der letztgenannten Methode das am PIK entwickelte regionale Szenarienmodell STAR an die Untersuchungsgebiete angepasst, für die Anwendung im Weinbau weiterentwickelt und zur Berechnung des Zukunftsszenariums (ZUSZ) eingesetzt.

3.2 Beschreibung des Modells STAR

Die nachfolgende Beschreibung des Modells folgt im wesentlichen den Ausführungen in Werner & Gerstengarbe (1997).

3.2.1 Grundprinzip

Basis des Szenarienaufbaus sind beobachtete Zeitreihen meteorologischer Größen. Entsprechend der Aufgabenstellung, das heißt, der Beantwortung der Frage welche Entwicklungstendenz welcher meteorologischen Größe untersucht werden soll, wird eine Bezugsgröße für die Untersuchungen ausgewählt. Berücksichtigt werden muss dabei, welche meteorologische Größe in ihrer tendenziellen Entwicklung vom globalen Klimamodell hinreichend genau reproduziert wird. (Sieht man zum Beispiel die großräumige Temperaturerhöhung in den nächsten Jahrzehnten als ein sicheres Ergebnis der Klimamodelle an, empfiehlt es sich, die Temperatur als Bezugsgröße auszuwählen.) Nach diesen Vorgaben wird der Bezugsgröße aus den Beobachtungen die vom Klimamodell vorgegebene Änderung aufgeprägt. Dies wird in der Regel ein Trend sein. Durch einen speziellen Algorithmus werden die anderen beobachteten meteorologischen Größen konsistent diesen Änderungen angepasst. Dabei wird darauf geachtet, dass deren statistische Grundeigenschaften und Zusammenhänge im wesentlichen erhalten bleiben.

3.2.2 Arbeitsschritte

a) Beschreibung des beobachteten Klimas

Statistisch konstante Kenngrößen

Da, wie bereits erwähnt, die statistischen Charakteristika des simulierten Klimas in der Region nicht wesentlich von denen des beobachteten abweichen sollen, müssen letztere in einem ersten Schritt bestimmt werden. Bei den Kenngrößen handelt es sich um den Mittelwert (in der Simulation zuzüglich der vorgegebenen Änderung), der Standardabweichung, der Erhaltungsneigung oder Persistenz, dem Jahresgang sowie der interannuellen Variabilität.

Eine detaillierte Beschreibung dieser Charakteristika ist hier nicht notwendig, da diese als allgemein bekannt vorausgesetzt werden. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass die Güte der Schätzung der Charakteristika wesentlich von

der Länge der Beobachtungsreihen (Stichprobenumfang) sowie deren Qualität abhängt.

Eine wichtige Rolle spielt außerdem die zeitliche Auflösung der vorhandenen Beobachtungsreihen, die entsprechend gewählt werden muss (z.B. Tageswerte).

Einbeziehung komplexer Zusammenhänge

Hat man eine Bezugsgröße festgelegt, so werden gleiche bzw. ähnliche Werte innerhalb der Beobachtungsreihe auftreten. Dabei können die Ursachen, die zu diesen Werten führen durchaus unterschiedlich sein. (Gleiche Tagesmitteltemperaturen können sowohl bei großer als auch kleiner Tagesamplitude auftreten.) Dies wiederum hat Auswirkungen auf die dazu parallel auftretenden anderen meteorologischen Größen. Um hier zu einer richtigen Erfassung dieser komplexen Zusammenhänge zu kommen, muss die Bezugsgröße durch mehrere sie beschreibende Parameter charakterisiert werden. Bei der angeführten Temperatur können dies das Tagesminimum, das Tagesmaximum, das Temperaturverhalten der Vortage (Erhaltungsneigung) und die Tagesamplitude sein. Müssen die jahreszeitlichen Variationen noch berücksichtigt werden, ist ein weiterer Parameter zur Beschreibung nötig, wie zum Beispiel die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer.

Nach Festlegung der die Bezugsgröße beschreibenden Parameter kann man diese mit Hilfe multivariater Verfahren exakt klassifizieren. In dem vorliegenden Modell wird dazu ein speziell dafür entwickeltes Cluster-Analyseverfahren verwendet (Gerstengarbe & Werner, 1997, 1999). Diese Methode ermöglicht es, die Werte der Bezugsgröße in statistisch signifikant voneinander getrennte Cluster einzuteilen bei gleichzeitig automatischer Bestimmung der optimalen Cluster-Anzahl. Dabei erfolgt die Clusterung nach einer vorgegebenen Elementauswahl, in diesem Fall nach der Zeiteinheit (z.B. Tag). Man erhält also eine Anzahl von Clustern, in denen jeweils eine bestimmte Menge von Elementen (Tage einer Zeitreihe) enthalten ist. Somit lassen sich jedem Element in einem Cluster die konkreten Werte der anderen meteorologischen Größen exakt zuordnen. Die weitere Verwendung der mit der Cluster-Analyse aus der Beobachtungsreihe gewonnenen Ergebnisse wird in Abschnitt d) erläutert.

b) Erstellung des simulierten Klimas

Bearbeitung der Bezugsgröße

Die Erstellung der simulierten Reihe der Bezugsgröße erfolgt in mehreren Schritten. Gegeben sind dazu die Tagesmittelwerte einer mehrjährigen Beobachtungsreihe.

1. Schritt

Berechnung der Jahresmittelwerte aus den Beobachtungen, Bestimmung der interannuellen Variabilität und Rangbestimmung. Die Rangbestimmung ist notwendig, um die Witterungscharakteristik der einzelnen Jahre besser erfassen zu können.

2. Schritt

Erzeugung einer simulierten Reihe der Jahresmittelwerte mit Hilfe eines Zufallszahlengenerators unter Berücksichtigung der statistischen Eigenschaften der Beobachtungsreihe und Rangbestimmung.

3. Schritt

Aufprägung der vorgegebenen Änderung (Trend) auf die simulierte Reihe.

4. Schritt

Bestimmung der Anomalien zwischen Tageswert und Jahresmittelwert für jedes Jahr der Beobachtungsreihe.

5. Schritt

Jedem simulierten Jahr werden entsprechend seines Ranges die entsprechenden Anomalien der Tageswerte zufällig zugeordnet. Dabei setzt sich jeder Tageswert zusammen aus Summe von Jahresmittelwert, dem Wert der Änderung und dem Anomaliewert.

6. Schritt

Da der Erhalt der statistischen Charakteristika eine wichtige Randbedingung darstellt wird die simulierte Reihe entsprechend überprüft und gegebenenfalls korrigiert.

7. Schritt

Um im folgenden auf die Beobachtungsgrößen zurückgreifen zu können, werden die gleichen, die Bezugsgröße beschreibenden Parameter für die simulierte Reihe bestimmt.

c) Verknüpfung von beobachtetem und simuliertem Klima

Mit Abarbeitung des 6. Schrittes aus Abschnitt b) ist **eine** Simulation der Bezugsgröße vollständig abgeschlossen. Dieser Bezugsgröße müssen nun die anderen meteorologischen Größen zugeordnet werden. Dazu werden die im 7. Schritt berechneten Parameterkombinationen verwendet. Jede dieser Parameterkombinationen lässt sich in eines der berechneten Cluster der Beobachtungsreihe (s. Abschnitt a)) mit Hilfe des Abstandes von Mahalanobis (Weber, 1980) einordnen. Danach wird ein Element (Tag) aus diesem Cluster "bedingt zufällig" ausgewählt. Dadurch können die anderen meteorologischen Größen unter Wahrung der Konsistenz dem jeweiligen Tag in der simulierten Reihe zugeordnet werden. "Bedingt zufällig" bedeutet dabei, dass zur Sicherung der Erhaltungseigenschaft der jeweilig davorliegende Tag bei der Auswahl berücksichtigt wird.

Behandelt werden muss jetzt noch die Situation, dass aufgrund der vorgegebenen Änderung (Trend) Werte in der simulierten Reihe der Bezugsgröße auftreten, die außerhalb des Wertebereichs der Beobachtungsreihe liegen. In diesem Fall wird angenommen, dass die Werte der anderen meteorologischen Größen ihren beobachteten Wertebereich nicht verlassen. Dieses Vorgehen ist berechtigt, da Voruntersuchungen gezeigt haben, dass in diesem Fall der Fehler deutlich geringer ist als bei einer nicht gesicherten Extrapolation dieser Größen. Damit ist es möglich, die zuzuordnenden Elemente entsprechend der geschilderten Vorgehensweise aus den den extremen Bereich beschreibenden Clustern zu entnehmen. Man erhält für eine Station ein vollständig simuliertes Klima, das durch die vorgegebenen meteorologischen Größen charakterisiert ist.

Zur Beschreibung der räumlichen Struktur des Klimas sind in der Regel mehr als nur eine Station notwendig. Sind mehrere Stationen (Beobachtungsreihen) vorhanden, muss bei der Erstellung des simulierten Klimas die beobachtete räumli-

che Struktur erhalten bleiben. Um dies zu gewährleisten wird wie folgt vorgegangen:

Bei der Beschreibung regionaler Klimaänderungen kann man davon ausgehen, dass das Untersuchungsgebiet im großräumigen Maßstab ein einheitliches Klimagebiet darstellt. Aus diesem Grund wird in einem ersten Schritt eine Bezugsstation ausgewählt, die die mittleren klimatischen Verhältnisse dieser Region am besten widerspiegelt. Für diese Station wird das simulierte Klima wie oben beschrieben erstellt. Da aufgrund dieser Vorgehensweise genau bekannt ist, welches Element (Tag) der Beobachtungsreihe an welcher Stelle der simulierten Reihe eingesetzt wurde, kann man für jede weitere Beobachtungsreihe eine entsprechende simulierte Reihe erzeugen. Dabei bleibt die räumliche Konsistenz aufgrund der vorgegebenen Annahmen erhalten.

d) Erzeugung einer ausreichend großen Stichprobe von Szenarien

Wie unter c) bereits erwähnt, wurde mit dem Algorithmus bisher nur eine Realisierung berechnet. Um eine Wahrscheinlichkeitsaussage zur Sicherheit des Eintretens der simulierten Klimaänderungen zu treffen, müssen entsprechend viele Realisierungen erzeugt werden. Dies wird erreicht, indem man mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation eine in der zeitlichen Abfolge zufällig erzeugter Realisierungen berechnet. Das heißt, dass die unter b) angegebenen Arbeitsschritte 2-7 sowie der Arbeitsschritt c) für jede Realisierung neu berechnet werden. In Abb. 1 ist die Grundstruktur des Modellaufbaus dargestellt.

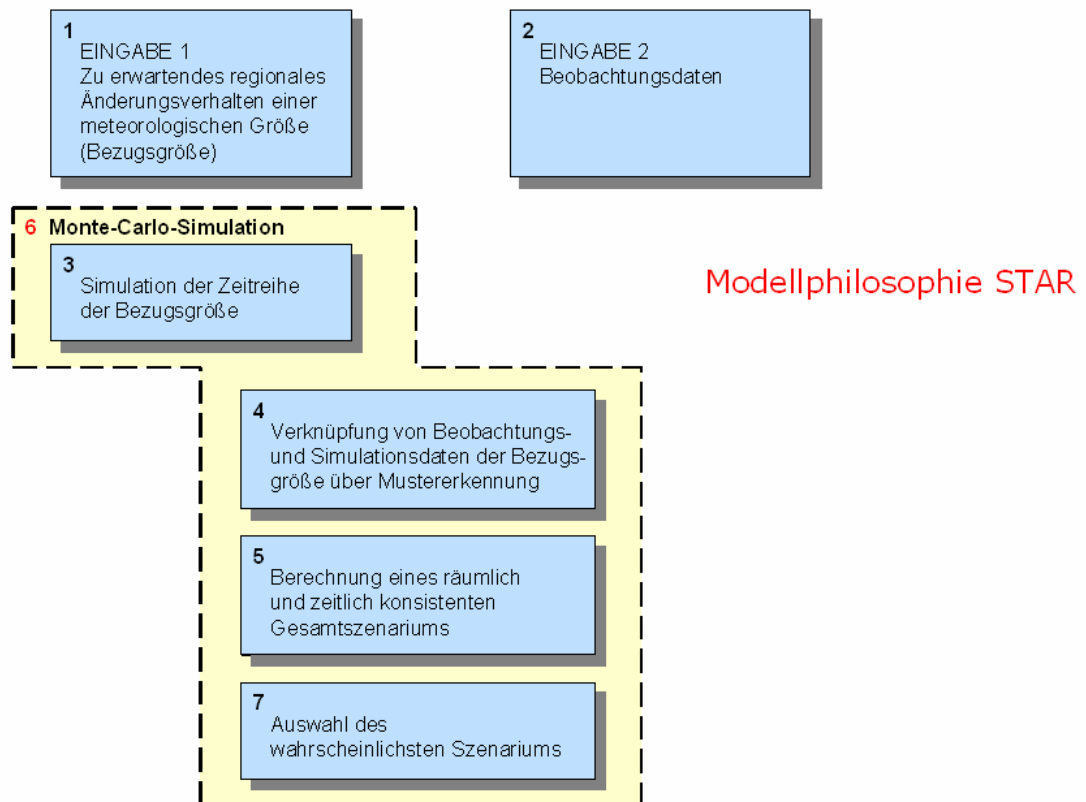


Abb. 1: Schema des Modellaufbaus STAR

3.3 Modellergebnisse

Das Zukunftsszenarium wird als sogenanntes transientes Szenarium berechnet. Darunter versteht man die Bestimmung der klimatischen Entwicklung über einen definierten Zeitraum, in diesem Fall von 2001 bis 2055, basierend auf der Änderung einer ausgewählten meteorologischen Größe (Lufttemperatur) innerhalb dies Zeitraums. Entsprechend der Modellphilosophie wurde die zukünftige Temperaturentwicklung aus den Ergebnissen des globalen Klimamodells ECHAM4/OPYC3 des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg (MPI) berechnet und für die Szenarientwicklung vorgegeben. Dem Klimamodelllauf liegt das A1B-CO₂- Emissionsszenarium zugrunde, das eine relativ moderate

Temperaturerhöhung zur Folge hat (IPPC, 2001). Für den Szenarienzeitraum von 2001 bis 2055 ergaben sich folgende Trendwerte:

- 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.

Im Ergebnis steht ein Datensatz auf Tageswertbasis für den Zeitraum 2001 bis 2055 als Zukunftsszenarium (ZUSZ) zur Verfügung. Da die Szenarienwerte kontinuierlich über den gesamten Zeitraum erstellt wurden (transienter Simulationslauf) ist es möglich mittlere Verhältnisse zu jedem beliebigen Zeitpunkt abzuschätzen. Um die Veränderungen gegen Ende des Simulationszeitraums im Vergleich zum Bezugszeitraum zu charakterisieren werden als entsprechender Mittelungszeitraum die Jahre von 2046 bis 2055 zugrunde gelegt.

4 Validierung des Szenarienmodells

4.1 Daten und Validierungsparameter

Da das Szenarium mit einer erweiterten Modellvariante von STAR berechnet wurde, erfolgte zunächst eine Validierung für die Bezugsstation Gschwend. Für diese Station lagen bereits Szenarien und Validierungsergebnisse vor, die im Rahmen des Projekts KLIWA erstellt wurden. Zur Prüfung des Szenarienmodells wurde eine Simulation für den Beobachtungszeitraum 1951-2000 erzeugt und die Ergebnisse mit den tatsächlich beobachteten Werten verglichen.

Folgende meteorologische Größen standen zur Verfügung:

Meteorologische Größen (Tageswerte 1951-2000):

- Lufttemperatur - Tmax, Tmit, Tmin
- Niederschlag
- Relative Luftfeuchte
- Luftdruck
- Wasserdampfdruck
- Sonnenscheindauer
- Bedeckungsgrad
- Globalstrahlung
- Windgeschwindigkeit

Als Validierungsparameter waren vorgegeben:

- Niederschlag
 - mittlerer Monatswert
 - Standardabweichung
 - Monatsmaximum (höchster Tageswert)
 - Anzahl der Tage < 1mm /Tag je Monat
 - Anzahl der Tage \geq 25mm/Tag je Monat
- Temperatur
 - Monatsmittelwerte
 - Standardabweichungen
 - Eistage
 - Frosttage
 - Sommertage
 - heiße Tage
- Alle anderen Parameter
 - Monatsmittelwerte
 - Standardabweichung

Für den Vergleich von beobachtetem und simulierten Reihen wurden folgende statistischen Tests verwendet:

χ^2 -Test

Verteilungen der Mittelwerte, Standardabweichungen und des 90%-Quantils für die Tageswerte und Dauerstufen

Kolmogorov-Smirnov-Test

Verteilungen der Mittelwerte, Standardabweichungen und des 90%-Quantils für die Tageswerte und Dauerstufen

t-Test

Monatsmittelwerte

F-Test

Standardabweichung der Monatswerte

Spearman-Test

Trends

4.2 Validierungsergebnisse

Bei der Validierung wurde untersucht, in wieweit sich beobachtete und simulierte Reihe hinsichtlich der Mittelwerte, Standardabweichungen und Trends aller meteorologischen Größen voneinander unterscheiden.

Die Ergebnisse für die Jahreswerte sind für die Station Gschwend in Tabelle 1 zusammengefasst. Zwischen den Trends der beobachteten und simulierten Zeitreihen bestehen nur bei den drei meteorologischen Größen Luftdruck, Bedeckungsgrad und Windgeschwindigkeit signifikante Unterschiede. Bei den für die Klimafolgen in der Regel wichtigeren Größen Lufttemperatur und Niederschlag ist das nicht der Fall.

Eine weiteres Charakteristikum zur Beschreibung von Zeitreihen ist die Häufigkeit der Überschreitung bzw. Unterschreitung von Schwellenwerten, oft als Ereignistag bezeichnet. In der Tabelle 2 ist der Vergleich zwischen Beobachtung und Simulation für die Häufigkeit von auf die Lufttemperatur bezogenen Ereignistagen dargestellt:

Tabelle 1: Verifikationsergebnisse für die Bezugsstation Gschwend, Zeitraum 1951-2000

Meteor. Größe	Mittelwert		Standardabweichung		Trend		
	beobachtet	simuliert	beobachtet	simuliert	beobachtet	simuliert	Test b - s
Tmax	12.6	12.6	0.86	0.89	1.34	1.31	0
Tmit	8.0	8.0	0.79	0.81	1.35	1.25	0
Tmin	3.7	3.7	0.81	0.86	1.58	1.52	0
Nied	1040.2	1042.1	171.03	166.48	116.47	116.94	0
Relf	80.6	81.1	1.83	1.73	-0.64	0.28	0
Ludr	958.1	957.6	1.16	1.10	0.86	0.00	1
Dadr.	9.7	9.8	0.39	0.34	0.14	0.39	0
Sonn.	4.7	4.8	0.35	0.31	-0.28	-0.18	0
Bewo	5.1	5.0	0.33	0.30	0.37	0.10	5
Gstr	1032.1	1026.4	39.34	40.08	-58.36	-69.55	0
Wind	1.7	1.8	0.21	0.20	-0.10	0.05	5

(0 = kein signifikanter Unterschied; 5 = signifikanter Unterschied mit 5% Irrtumswahrscheinlichkeit; 1 = signifikanter Unterschied mit 1% Irrtumswahrscheinlichkeit)

Tabelle 2: Vergleich der Ereignistage (mittlere Häufigkeit pro Jahr) für die Bezugsstation Gschwend, Zeitraum 1951-2000

Ereignistag		Beobachtung	Simulation
Eistag	$T_{max} < 0.0^{\circ} C$	26.5	26.3
Frosttag	$T_{min} < 0.0^{\circ} C$	107.9	109.4
Sommertag	$T_{max} \geq 25.0^{\circ} C$	29.2	29.3
Heißer Tag	$T_{max} \geq 30.0^{\circ} C$	3.6	3.7

Bei der Auswertung der Ereignistage zeigt sich, dass der Fehler bei der Simulation der Eistage 0.8% beträgt, bei den Frosttagen 1.4%, bei den Sommertagen 0.3% und bei den heißen Tagen 2.8%. Damit sind die Simulationsfehler für die Ereignistage sowohl bezüglich ihres absoluten als auch relativen Wertes vernachlässigbar.

Des Weiteren wurde das Verhalten der Simulationsergebnisse im Jahresverlauf untersucht. Dazu wurden die Monatswerte von Beobachtung und Simulation miteinander verglichen. Tabelle 3 zeigt die Testergebnisse.

Tabelle 3: Vergleich der Monatsmittelwerte und deren Streuungen für die Bezugsstation Gschwend, Zeitraum 1951-2000

Meteor. Größe	Monat											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tmax	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tmit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tmin	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nied	- / 1	-	-	-	- / 1	-	-	-	-	-	-	- / 5
Relf	-	-	-	-	-	-	-	-	- / 5	-	-	-
Ludr	- / 1	- / 1	- / 1	-	-	-	-	-	-	- / 5	- / 1	- / 1
Dadr	5 / 1	1 / 1	1 / -	- / 5	-	-	-	-	- / 1	5 / 5	-	5 / 1
Sonn	-	-	-	-	- / 5	-	-	-	-	-	-	- / 5
Bewo	5 / -	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5 / 5
Gstr	- / 1	- / 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	- / 1
Wind	- / 1	5 / -	-	-	-	1 / -	-	5 / -	5 / 5	5 / -	-	- / 1

(- = kein signifikanter Unterschied; 5 = signifikanter Unterschied mit 5% Irrtumswahrscheinlichkeit; 1 = signifikanter Unterschied mit 1% Irrtumswahrscheinlichkeit; Mittelwert / Streuung)

Signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten gibt es nur in einigen Monaten für die Größen Wasserdampfdruck, Bedeckung und Wind. Für die Streuung gilt diese Aussage für alle Größen außer der Temperatur. Das Winterhalbjahr ist stärker als das Sommerhalbjahr von signifikanten Unterschieden betroffen.

Außerdem wurde eine Untersuchung zu den Monatswerten des Niederschlags vorgenommen. In Tabelle 4 sind sowohl die beobachteten als auch simulierten Monatssummen, deren Standardabweichungen, das 90%-Quantil, die maximale Tagessumme im Monat sowie Ereignistage angegeben.

Die Tabelle zeigt, dass bis auf die Standardabweichung, bei der das Modell STAR eine leichte Tendenz zur Unterschätzung hat, die anderen Größen dagegen einen Fehler aufweisen, der in den meisten Monaten deutlich unter 10% liegt.

Tabelle 4: Vergleich ausgewählter Kenngrößen für den Niederschlag an der Bezugsstation Gschwend, Zeitraum 1951-2000

Parameter		Monat											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Monatssumme	Beob.	89.5	83.4	81.8	72.0	87.4	104.6	93.6	92.1	71.7	79.7	85.1	99.4
	Sim.	87.4	107.0	81.9	72.9	83.1	104.3	97.6	86.9	60.0	76.4	91.6	93.0
Standard-abweichung	Beob.	50.5	58.1	51.1	36.6	42.8	42.9	44.0	40.4	34.7	57.0	49.3	58.0
	Sim.	32.6	57.5	41.7	32.0	28.5	42.6	44.1	33.3	32.3	47.5	48.5	40.8
90%-Quantil	Beob.	161.9	141.5	140.5	102.4	144.8	149.9	141.9	138.0	116.2	143.8	149.3	171.0
	Sim.	122.0	165.8	129.7	111.3	113.5	143.0	140.8	125.9	88.7	134.8	146.8	136.0
Max. Tages-Summe	Beob.	45.0	58.7	67.5	42.7	41.9	82.9	44.0	65.2	39.6	72.3	52.2	59.1
	Sim.	48.2	57.8	52.5	42.8	34.0	83.2	44.3	65.3	52.8	67.4	72.6	59.2
Anz. Tage < 1mm	Beob.	18.1	16.5	19.2	18.5	18.8	17.6	19.6	19.9	20.7	21.0	18.6	17.7
	Sim.	17.6	14.9	19.4	18.2	19.4	17.2	18.8	20.0	22.2	20.7	17.3	16.9
Anz. Tage ≥ 25 mm	Beob.	0.3	0.4	0.3	0.2	0.4	0.7	0.5	0.5	0.2	0.4	0.3	0.5
	Sim.	0.2	0.7	0.4	0.2	0.4	0.6	0.6	0.4	0.2	0.3	0.2	0.3

4.3 Schlussfolgerungen

Die Validierungsrechnungen haben gezeigt, dass es möglich ist mit dem verwendeten Szenarienmodell realitätsnahe Simulationen durchzuführen, wobei folgende Kriterien zu beachten sind:

- Verwendung homogener meteorologischer Datenreihen.
- Bei der Simulation der zukünftigen Entwicklung sollten möglichst viele Realisierungen berechnet werden, um die möglichen Extreme dieser Entwicklung besser abschätzen zu können.

Da von der Annahme ausgegangen wird, dass sich die statistischen Randbedingungen des Beobachtungszeitraumes nicht wesentlich von denen des Simulationszeitraumes unterscheiden und sich damit der Modellansatz nicht ändert, können Simulationsergebnisse für zukünftige Klimaszenarien von gleicher Genauigkeit wie in der Validierung nachgewiesen erwartet werden.

5 Die großräumigen Klimaverhältnisse in Südwestdeutschland und ihre Veränderung bis 2050

5.1 Einleitende Bemerkungen

Als Ergebnis der Datenaufbereitung und der Szenarienberechnung stehen vollständige Datensätze mit den Tageswerten der meteorologischen Größen Maximum der Lufttemperatur, mittlere Lufttemperatur, Minimum der Lufttemperatur, Niederschlagssumme, relative Luftfeuchte, Dampfdruck, Luftdruck, Sonnenscheindauer, Bedeckungsgrad, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit für den Basiszeitraum 1951 bis 2000 und für den Zukunftszeitraum 2001 bis 2055 an 700 Stationen zur Verfügung. Damit sind alle Weinbaugebiete im Südwesten von Deutschland abgedeckt. Für die vorliegende Untersuchung wurde zur Charakterisierung der großräumigen Klimaverhältnisse in Südwestdeutschland ein entsprechender Ausschnitt ausgewählt, der weite Bereiche von Rheinland-Pfalz, Hessen, Baden-Württemberg und Bayern umfasst und damit die vorgegebenen Weinbaugebiete Rheingau und Pfalz (vgl. Abb. 2). Ergänzend wurde der Bereich um Weinsberg (Weinbaugebiet Württemberg) berücksichtigt. Die Hauptorte Geisenheim, Siebeldingen und Weinsberg, für die zusätzliche Daten zur Auswertung genutzt werden, sind zur Orientierung aufgenommen. Die Darstellung der naturräumlichen Einheiten und des Reliefs erleichtert die Interpretation der Daten. Bei den Analysen für diesen Ausschnitt sind 339 Stationen berücksichtigt worden. Zusätzlich zu Mittelwert und Trend der meteorologischen Größen, wurde zur Charakterisierung der mittleren klimatischen Verhältnisse der Untersuchungsgebiete weitere Kenngrößen ausgewertet, die sich durch Über- bzw. Unterschreitung von Schwellenwerten ergeben.

Alle oben genannten meteorologischen Größen, inklusive der in Tabelle 5 genannten Kenngrößen, liegen in entsprechender kartographischer Umsetzung vor. Bei Tagesmitteltemperatur, Niederschlagssumme und klimatischer Wasserbilanz erfolgte eine Umsetzungen der Jahreswerte durch Jahreszeiten- bzw. Monatswerte.

Mit der Möglichkeit für eine schnelle stationsgebundene Auswertung der bereits abgelaufenen Veränderungen und der möglichen zukünftigen Klimaverhältnisse für einen beliebigen „point of interest“ können wissenschaftliche Grundlagen zum Umgang mit möglichen Chancen und Risiken für den Weinbau bereitgestellt werden.

Da die Verhältnisse in Einzeljahren stark schwanken können und um die Veränderungen zwischen Zukunfts- und Basisszenarium zu verdeutlichen, wurden diese Auswertungen für den Gesamtzeitraum des Basisszenariums und für die letzten 10 Jahre des Zukunftsszenariums durchgeführt. Als Änderung der Verhältnisse werden die Differenzen zwischen diesen beiden Zeiträumen genutzt.

Tabelle 5: Meteorologische Parameter und Ereignistage

Meteorologischer Parameter	Grenzwert	Auswertung und kartographische Umsetzung
Lufttemperatur		
Maximum der Lufttemperatur	-	Mittelwert, Trend
Heiße Tage	$T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$	Anzahl, Andauer, erstes und letztes Auftreten im Jahr
Sommertage	$T_{max} \geq 25^{\circ}\text{C}$	Anzahl, Andauer, erstes und letztes Auftreten im Jahr
Tropennächte	$T_{min} \geq 20^{\circ}\text{C}$	Anzahl, Einzelauswertung an Referenzstandorten
Eistage	$T_{max} < 0^{\circ}\text{C}$	Anzahl, Andauer, erstes und letztes Auftreten im Jahr
Frosttage	$T_{min} < 0^{\circ}\text{C}$	Anzahl, Andauer, erstes und letztes Auftreten im Jahr
Eistage	$T_{max} < 0^{\circ}\text{C}$	Anzahl, Andauer, erstes und letztes Auftreten im Jahr
Niederschlag		
Tage ohne Niederschlag	$\text{Nied} < 0,1\text{mm}$	Anzahl und Andauer
Tage mit hohem Niederschlag	$\text{Nied} \geq 10\text{mm}$	Anzahl und Andauer
Feuchte Tage	$\text{Relf} > 90\%$	Anzahl und Andauer
Trockene Tage	$\text{Relf} < 50\%$	Anzahl und Andauer
Tage mit hohem Dampfdruck	$\text{Dadr} \geq 15\text{ hPa}$	Anzahl und Andauer
Strahlung		
Tage ohne Sonnenschein	$\text{Sonn} < 0,2\text{h}$	Anzahl und Andauer
Tage mit viel Sonne	$\text{Sonn} \geq 90\%$	Anzahl und Andauer
Tage ohne Bewölkung	$\text{Bewo} < 0,3/8$	Anzahl und Andauer
Tage mit Bewölkung	$\text{Bewo} = 8/8$	Anzahl und Andauer

Kartenaufbau und -nutzung

Die kartographische Darstellung erfolgt in standardisierter Form. Jeder meteorologische Parameter wird flächenhaft dargestellt, als Mittelwert über den Gesamtzeitraum des Basisszenariums, als Mittelwert der letzten 10 Jahre im Zukunftsszenarium und als Differenz dieser Mittelwerte. Die Legenden sind so gewählt, dass die in BASZ und ZUSZ auftretenden Klassen gleich dargestellt sind, d.h. die Karten können direkt miteinander verglichen werden und geben über ihren Farbeindruck eine unmittelbare Information über die auftretenden Veränderungen. Zusätzlich erfolgt eine Darstellung des Trends der jeweiligen Größe für den Gesamtzeitraum des Basisszenariums als Isolinienbild (Linien gleichen Trends). Die Abstände der Linien (Äquidistanz) ist angegeben und so gewählt, dass die Flächendarstellung möglichst wenig gestört wird, aber zusammenhängende Gebiete mit positiven oder negativen Trend noch gut erkannt werden können. Zur Unterstützung der Lesbarkeit wurde - wenn möglich - eine ausgezeichnete Isolinie oder Isolinienbereich farblich hervorgehoben. Damit können die bereits abgelaufenen Veränderungen beurteilt werden. Die Lage der in die Szenarienbildung eingegangenen Stationen ist in allen Karten angegeben. Zusätzlich gibt die Größe und Art der Stationssignatur eine Information über die statistische Sicherheit der Trendaussage für das Basisszenarium.

Die flächenhaften Darstellungen sind Ergebnis eines nicht-statistischen Interpolationsverfahrens (räumliche Spline-Interpolation). Dabei werden intuitiv und unabhängig von der Beobachtungsvariablen Annahmen über die Art des räumlichen Zusammenhangs gemacht. Je nach Beobachtungsvariable kann dieser Zusammenhang in der Realität aber sehr unterschiedlich sein. Ist beispielsweise die Niederschlagssumme über einen Zeitraum mehr von Schauerniederschlägen großer Intensität geprägt, ist eine räumlich stärkere Strukturierung zu erwarten als in einem Zeitraum mit einem größeren Anteil an flächig verbreiteten, gleichmäßigen Dauerniederschlägen. Trotzdem wurde die nicht-statistische Interpolation bevorzugt, damit alle Karten einheitlich gebildet und vergleichbaren Informationsgehalt haben. Bei der Nutzung der Karten ist das zu berücksichtigen, insbe-

sondere in Gebieten mit einem hohen Gradienten sind einzelne Artefakte nicht immer zu vermeiden.

Maßgebend bei der Nutzung der Karten sind die Informationen die an den Stationen ausgewiesen werden, strenggenommen gelten die gemachten Aussagen auch ausschließlich für diese Punkte. D. h. der Nutzer sollte sich die in der Nähe zum interessierenden Gebiet gelegenen Stationen heraussuchen, die gefragten Informationen herausgreifen und mit bekannten Relationen (z. B. „wärmer als in“, „ausgeglicener als bei“, „höhere Niederschläge als bei“ usw. auf das interessierende Gebiet übertragen. Eine Interpolation zwischen den angegebenen Stationen ist nur bei bekannten Zusammenhängen sinnvoll.

Zur Erleichterung der Kartennutzung ist eine Folie beigelegt, auf der das Gewässernetz und die Grenzen der naturräumlichen Einheiten dargestellt sind.

Übersichtskarten

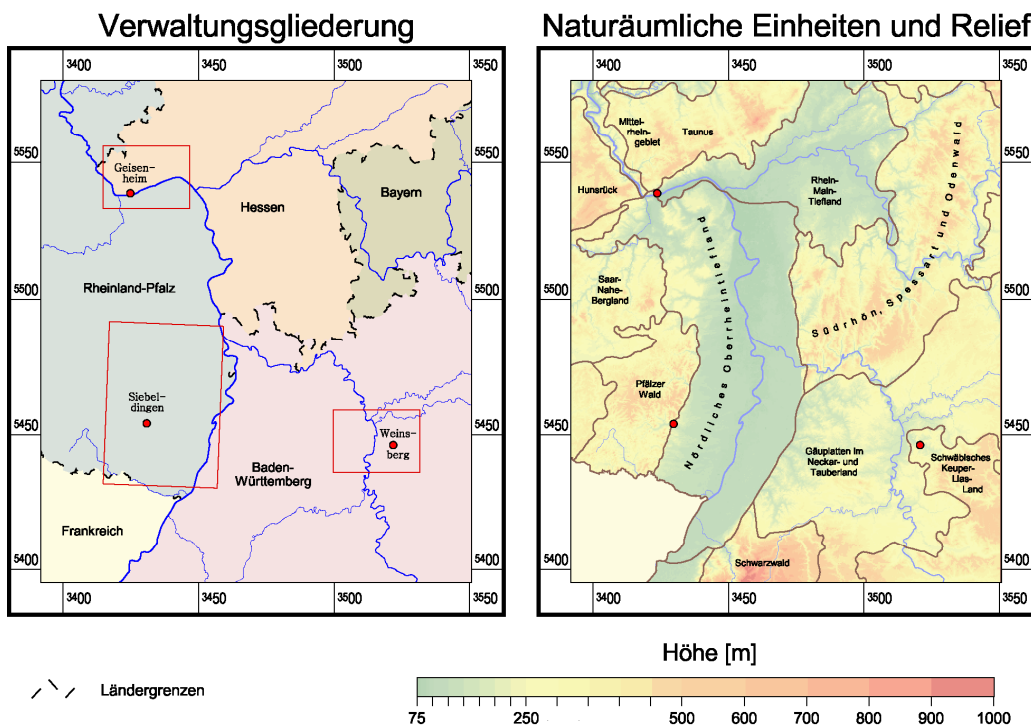


Abb. 2: Übersichtskarten zum Untersuchungsgebiet

5.2 Lufttemperatur

In Abb. 3 ist die räumliche Struktur der Temperaturverteilung in SWD für wiedergegeben. Höhenabhängig werden im Basisszenarium die Gunsträume im nördlichen Oberrheintiefland, Mittelrheingebiet und Rhein-Main-Tiefland mit dem Rheingau ausgewiesen. Mit deutlich tieferen Temperaturen zeigen sich die Strukturen des Hunsrück, Taunus, Haardt (Pfälzer Wald) im Norden und Westen, Odenwald und Spessart im Osten und die Ausläufer des Schwarzwalds und die Löwensteiner Berge (Schwäbisches-Keuper-Lias-Land) im Süden bzw. Südosten des Kartenausschnitts. Bei einer tendenziellen Zunahme nach Süden, sind die ausgewiesenen Trends durchweg positiv (zwischen 0,6 und 1,4 K) und statistisch mit mindestens 95% gesichert. Ähnliche Ergebnisse zeigen sich auch bei Tagesminimum und –maximum der Lufttemperatur, wobei die Spanne der auftretenden Werte größer wird und die Änderungen beim Trend der Tagesminimumtemperatur mit 0,8 bis 1,8 K besonders groß sind im Vergleich zu 0,3 bis 1,5 K beim Maximum. Zukunftsszenarium und Differenzenkarte zeigen, bei im wesentlichen gleichen Gunsträumen, eine Zunahme der Temperatur von 9,3 auf im Mittel 10,8 °C. Die Differenzen nehmen nach Süden zu, wobei der deutlichste Gewinn zwischen dem Ostfuß der Haardt Richtung Osten über den Kraichgau bis in das Neckarbecken auftritt, was gut mit den bereits beobachteten Trends für die Lufttemperatur übereinstimmt. Die Verhältnisse für Maximum und Minimum der Lufttemperatur sind im Anhang I (A1, A2) dargestellt.

Die Auswertung der Temperaturänderungen zwischen ZUSZ und BASZ (2046/2055 – 1951/2000) auf Monatsbasis zeigt deutliche innerjährliche Differenzierungen. Überdurchschnittliche Zunahmen weisen die Monate Juni, September, Oktober und November auf. Die maximale Zunahme liegt im Oktober bei einem Mittel von 2.2 K. Eine zusammenfassende Kartendarstellung findet sich im Anhang I (A28).

Mit der zu beobachtenden Erwärmung im Untersuchungsgebiet sind gravierende Veränderungen im Auftreten und der Charakteristik der temperaturgebundenen Ereignistage festzustellen. Beispielhaft sind die Frosttage und die Sommertage dargestellt, dazu die Kältesumme im Winter. Die Karten zu den Themen Eistage und heiße Tage finden sich im Anhang I.

Frosttage (Abb. 4, Abb. 5, Abb. 6, Abb. 7)

Im BASZ liegt die Anzahl der Frosttage im Mittel zwischen 44 und 126 Tage pro Jahr. Mit der bereits beobachteten Temperaturzunahme im BASZ sinkt deren Zahl im Mittel um 22 Tage. Dieser Rückgang wird im Bereich zwischen südlichem Pfälzer Wald und Neckarbecken mit mehr als 30 Tagen weit übertroffen. Das ZUSZ zeigt für das gesamte Untersuchungsgebiet einen weiteren Rückgang um 6 bis 41 Tage. Die Abnahme ist in der Regel dort stärker, wo größere Ausgangswerte vorliegen (also in höher gelegenen Bereichen), dazu kommt von Nord nach Süd eine tendenzielle Erhöhung der Differenzwerte. Die geringsten Abnahmen finden sich im westlichen Rhein-Main-Tiefland. Mit der Abnahme der Frosttage geht eine Verspätung des ersten Frosts einher. Der Termin verschiebt sich im BASZ um durchschnittlich 13 Tage zum Jahresende. Während der Bereich zwischen Pfälzer Wald und dem Kraichgau wieder besonders profitiert, treten im Taunus sogar Verfrühungen auf. Das ZUSZ weist fast durchgängig für das gesamte Untersuchungsgebiet weitere Verspätungen um etwa 10 Tage und im mittleren Oberrheintiefland um bis zu 24 Tage aus. Das Auftreten des letzten Frostes verfrüht sich im BASZ deutlich, im Mittel um 14 Tage und bis zu maximal 30 Tage. Diese Entwicklung wird im ZUSZ deutlich differenzierter fortgesetzt. Das Gebietsmittel weist eine geringfügige weitere Verfrühung um 1-2 Tage aus, aber insbesondere Taunus und westliches Rhein-Main-Tiefland zeigen Verspätungen, während das gesamte südöstliche Untersuchungsgebiet mit bis zu 14 Tagen deutliche weitere Verfrühungen zeigt. Insgesamt ergibt sich damit für das gesamte Untersuchungsgebiet eine Verminderung der Frosttageanzahl bei Verkürzung der „Saison“, also der Zeit in der Frost auftreten kann. Damit verbunden ist ein weiterer deutlicher Rückgang der Andauern der Frostperioden um durchschnittlich 1.2 Tage. Im BASZ wird bereits bei einer durchschnittlichen Andauer von 4.2 Tagen, ein Rückgang von 0.8 Tagen ausgewiesen.

Eistage (Anhang I A7, A8, A9, A10)

Die Eistage zeigen ein ähnliches Verhalten wie die Frosttage. Im BASZ liegt die Anzahl im Mittel bei 18 Tagen und geht durchschnittlich um 8 Tage zurück. Die geringsten Abnahmen finden sich im Nordwesten des Ausschnitts (Mittelrheingebiet) und im mittleren Bereich des nördlichen Oberrheintieflands, die deutlichsten

Abnahmen treten in den höher gelegenen Gebieten mit den höchsten Werten der Eistageanzahl auf. Für das ZUSZ wird eine weitere Abnahme etwa in der gleichen Größenordnung ausgewiesen, wobei die höheren Lagen, als auch die südlichen tieferen Lagen profitieren. Die Veränderung des ersten Auftretens im Jahr ist im BASZ allerdings uneinheitlicher als bei den Frosttagen. Es werden deutlich mehr Bereiche mit Verfrühungen ausgewiesen, besonders im Nordwesten (Mittelrheingebiet, Rheingau), bzw. in den nördlichen und südlichen Teilen des nördlichen Oberrheintieflands. In der Folge liegt der Mittelwert des Trends bei -2.2 Tagen. Für das ZUSZ werden fast ausschließlich deutliche Verschiebungen um bis zu 42 Tage und durchschnittlich um 19 Tage zum Jahresende ausgewiesen. Dagegen ergeben sich für den letzten Eistag im BASZ fast durchweg Verfrühungen um im Mittel 16 Tage, während das ZUSZ besonders für das südöstlichen Bereich und das östliche Rhein-Main-Tiefland weitere Verfrühungen, aber sonst – besonders im Taunus - deutliche Verspätungen ausweist. Das Mittel der ausgewiesenen Veränderungen liegt bei +5 Tagen. Die Andauer der Eistage geht von 2.8 auf 2.1 Tage im ZUSZ weiter deutlich zurück.

Kältesumme im Winter (Abb. 12)

Der Betrag der Kältesumme verringert sich im Lauf des Beobachtungszeitraums deutlich um im Mittel 64 K. Diese Entwicklung setzt sich im ZUSZ bei etwas geringeren Beträgen zwischen 7 und 80 K weiter fort. Die Änderungsbeträge sind immer dort am stärksten, wo die höchsten Ausgangswerte auftreten und steigen nach Süden hin an.

Sommertage (Abb. 8, Abb. 9, Abb. 10, Abb. 11)

Bei bekannten Gunsträumen zeigt sich im BASZ flächendeckend eine Zunahme der Sommertage im Mittel um 15 Tage auf 36 Tage, wobei die größte Änderung mit mehr als 20 Tagen im südlichen Bereich des nördlichen Oberrheintieflands auftritt. Die mittlere Andauer von 2.7 Tagen hat deutlich um 0.9 Tage zugenommen. Der Termin des ersten Sommertags zeigt sich im Mittel kaum verändert. Bei insgesamt eher geringer gesicherten Trends zeigten sich im Taunus und im südlichen Kartenausschnitt Verfrühungen, in den zentralen Bereichen und im östlichen Rhein-Main-Tiefland Verspätungen. Der Termin des letzten Sommer-

tags zeigt im südlichen Bereich des nördlichen Oberrheintieflands deutliche Verspätungen. Das ZUSZ zeigt durchweg eine weitere kräftige Zunahme der Anzahl der Sommertage um weitere 7 bis 24 Tage, das entspricht im Mittel fast einer 50%igen Zunahme. Die Andauern zeigen sich nur gering verändert mit Verminderungen in Richtung NO und Erhöhungen in Richtung SO. Der erste Sommertag tritt durchschnittlich 13 Tage früher auf, der letzte Sommertag zeigt sich im Mittel für den gesamten Ausschnitt noch deutlicher verspätet um 21 Tage.

Heiße Tage (Anhang I A3, A4, A5 und A6)

Die Verhältnisse bei den heißen Tagen sind denen bei den Sommertagen tendenziell ähnlich. Die Anzahl liegt im BASZ bei durchschnittlich 6 Tagen und nimmt besonders im südlichen Bereich des nördlichen Oberrheintieflands zu. Die Andauern nehmen fast durchweg zu. Der erste heiße Tag tritt im Mittel allerdings 31 Tage später auf. Diese Verspätungen im BASZ zeigen sich fast im gesamten Kartenausschnitt, bis auf Verfrühungen im Mittelrheingebiet und im nördlichen Oberrheintiefland. Das letzte Auftreten verschob sich um 47 Tage im Mittel noch stärker zum Jahresende hin, so dass der Zeitraum in dem heiße Tage auftreten können sich insgesamt schon verlängert hat. Das ZUSZ weist eine deutlich höhere Zahl von heißen Tagen aus, im Mittel wird die Anzahl mit 14 Tagen mehr als verdoppelt. Die Andauer steigt deutlich und die Saison verlängert sich extrem sowohl durch Verfrühung des ersten Eintretens, als auch die Verspätung des letzten heißen Tags im Jahr um jeweils etwa 25 Tage.

Jahresmittel der Lufttemperatur

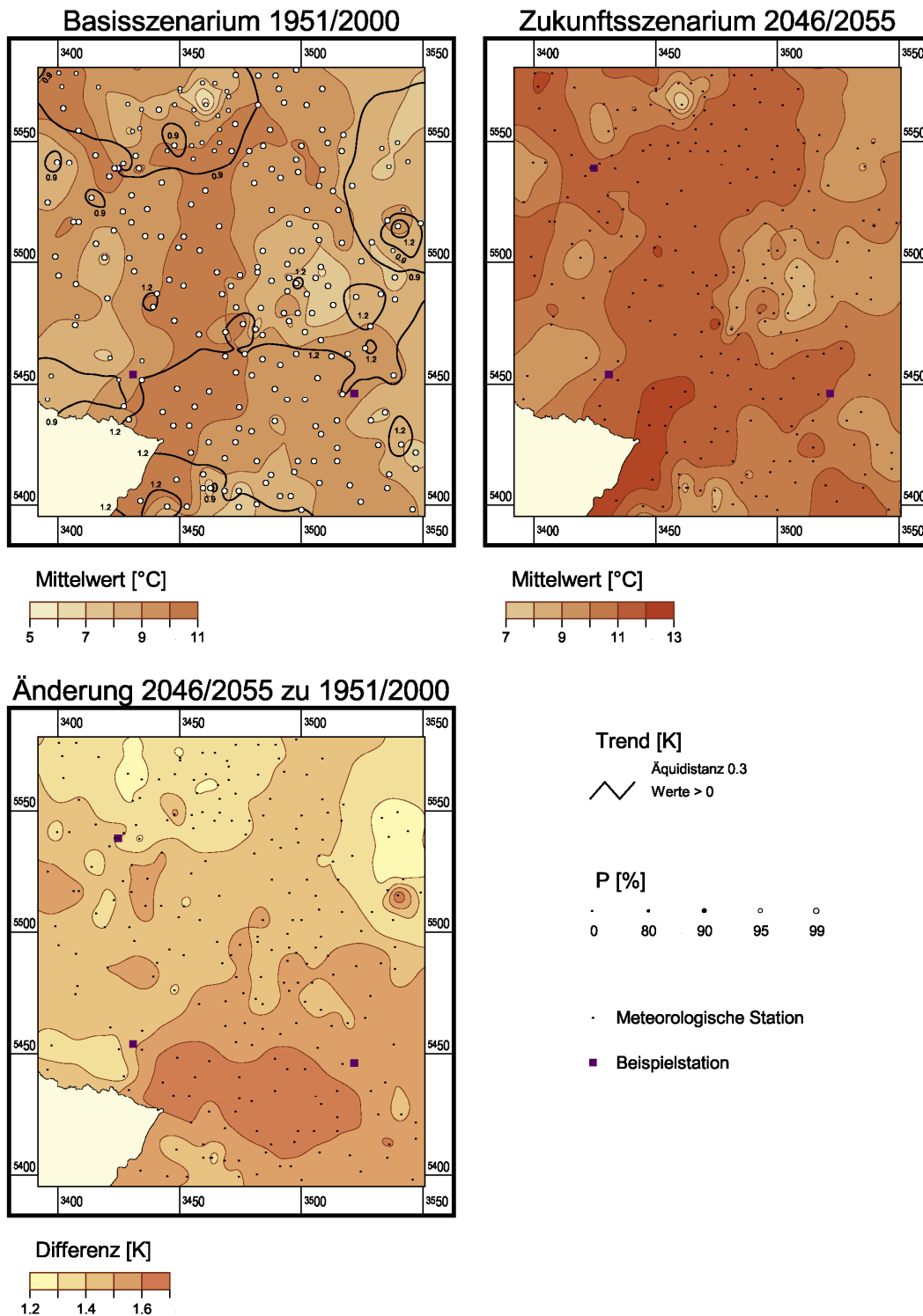


Abb. 3: Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Lufttemperatur in SWD

Anzahl der Frosttage

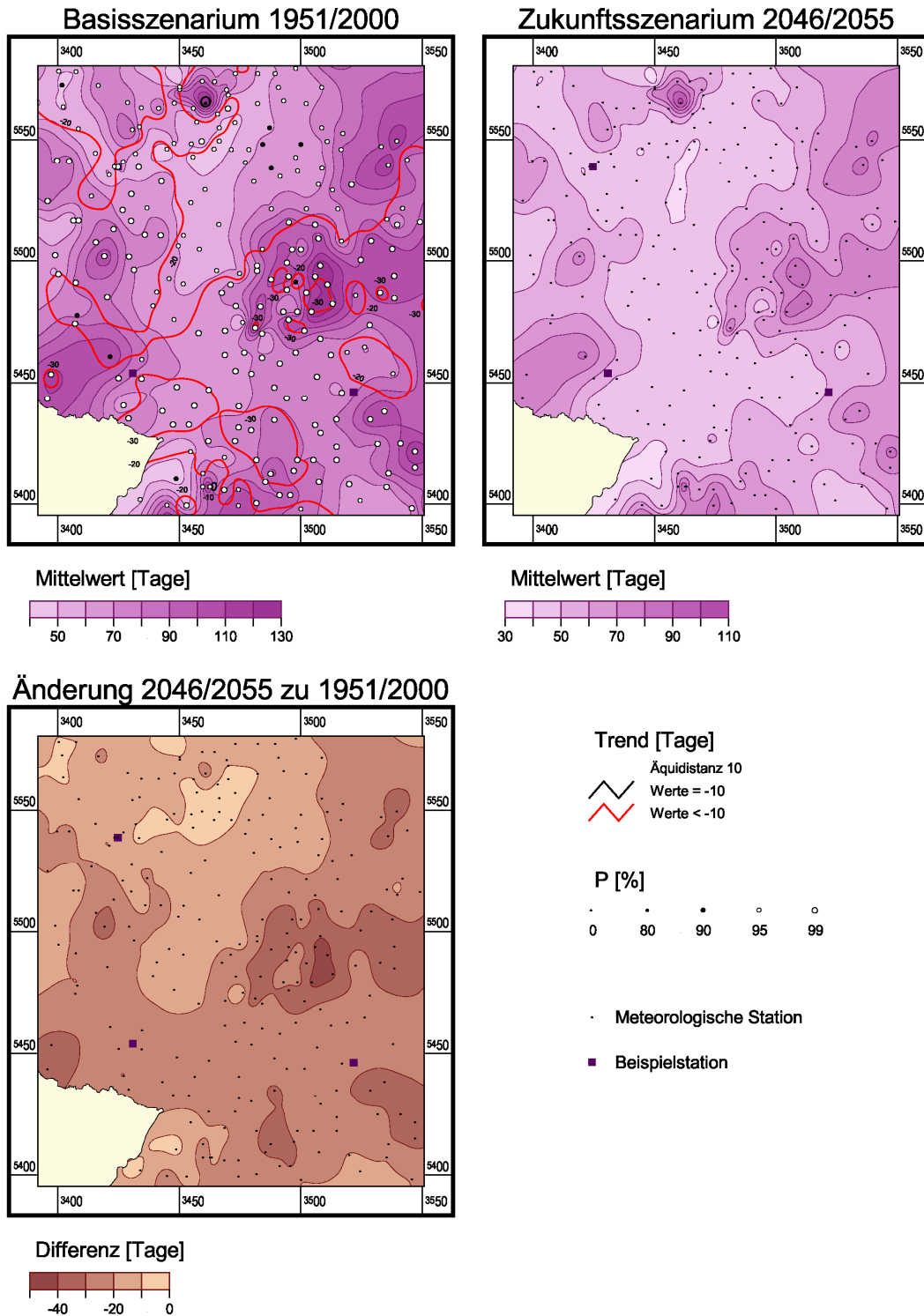


Abb. 4: Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Anzahl der Frosttage pro Jahr in SWD

Erster Frosttag im Jahr, Eintrittstermin

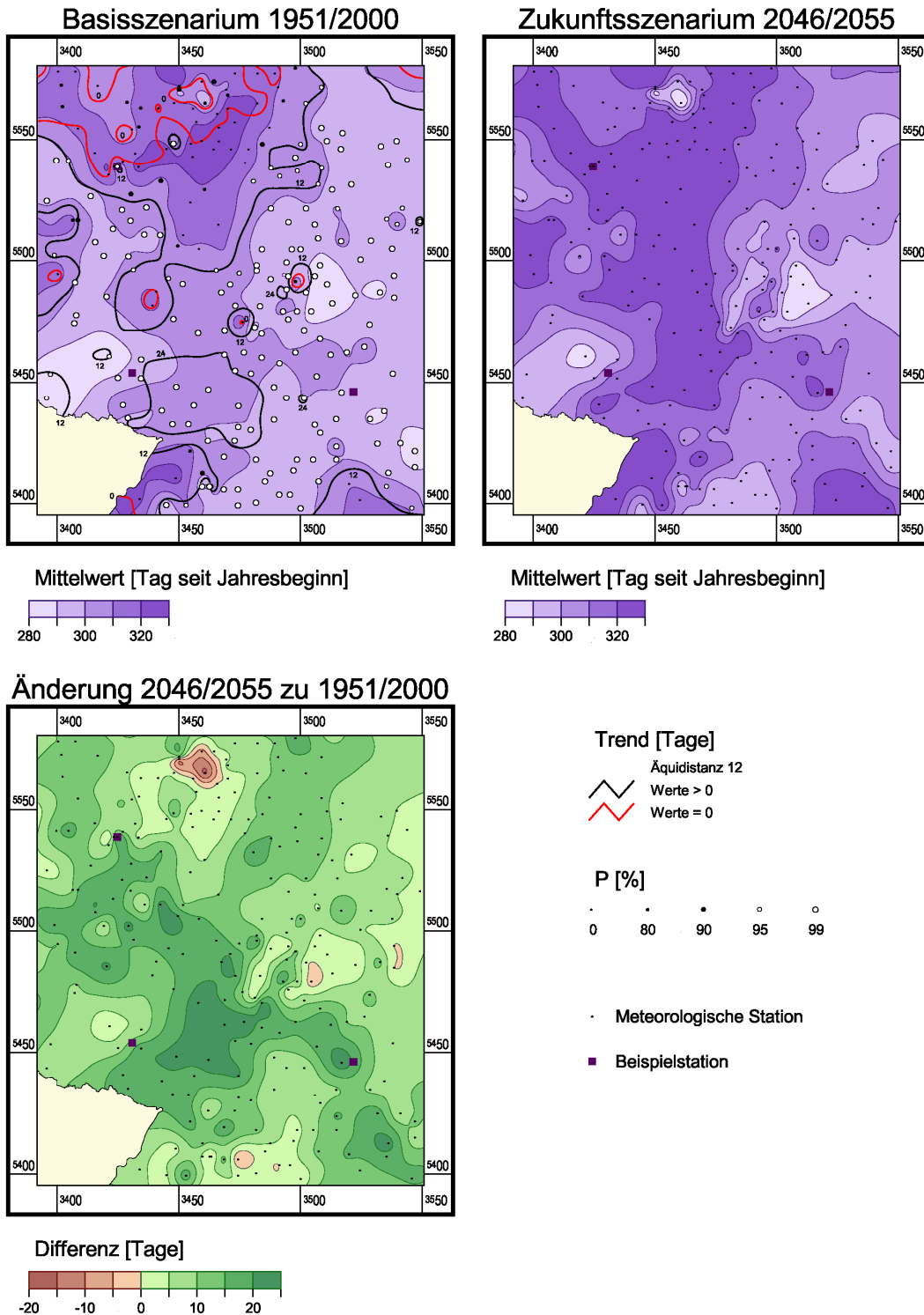


Abb. 5: Mittelwerte, Trends und Entwicklung für den ersten Frosttag im Jahr in SWD

Letzter Frosttag im Jahr, Eintrittstermin

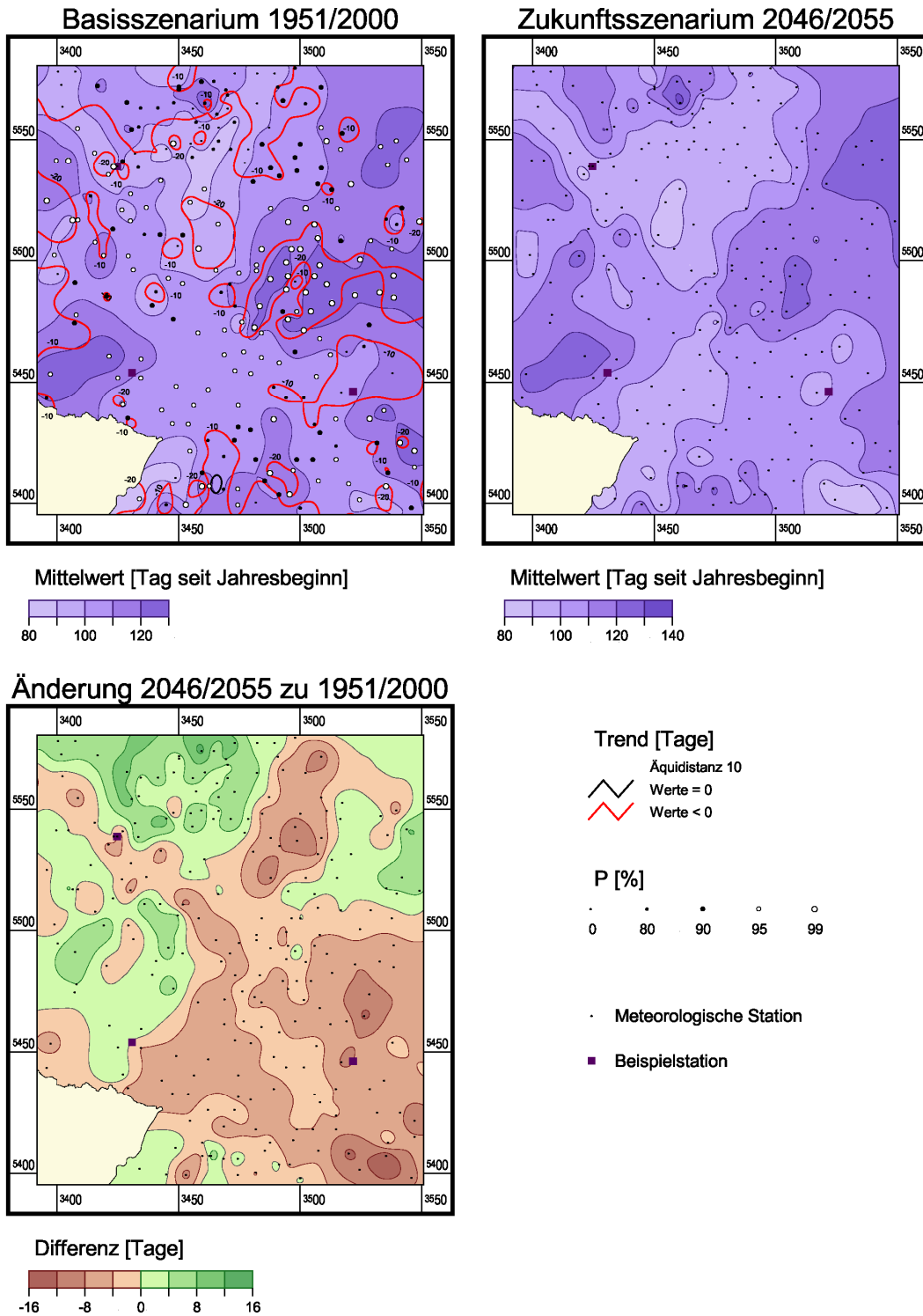


Abb. 6: Mittelwerte, Trends und Entwicklung für den letzten Frosttag im Jahr in SWD

Andauer der Frosttage

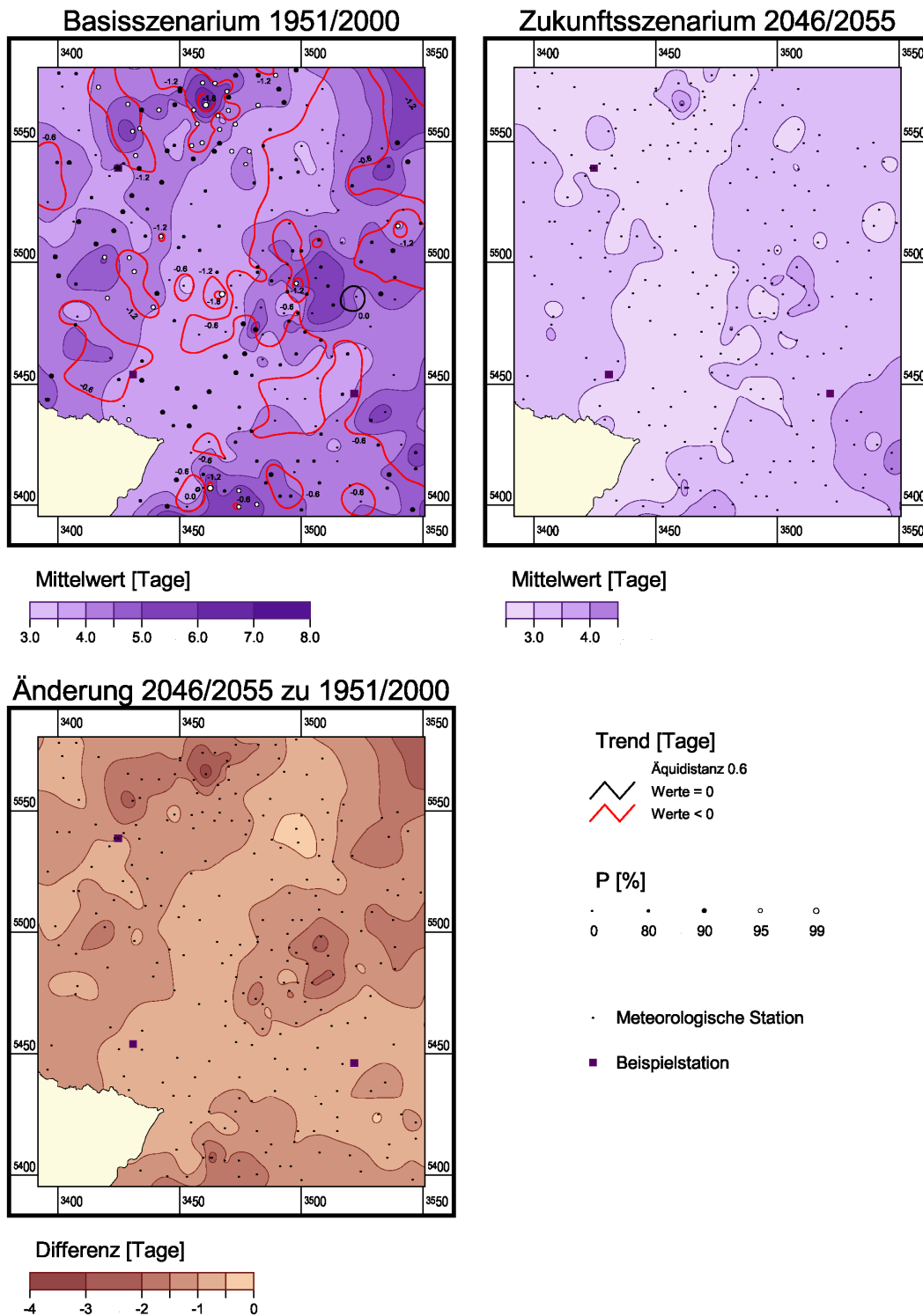


Abb. 7: Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Andauer der Frosttage in SWD

Anzahl der Sommertage

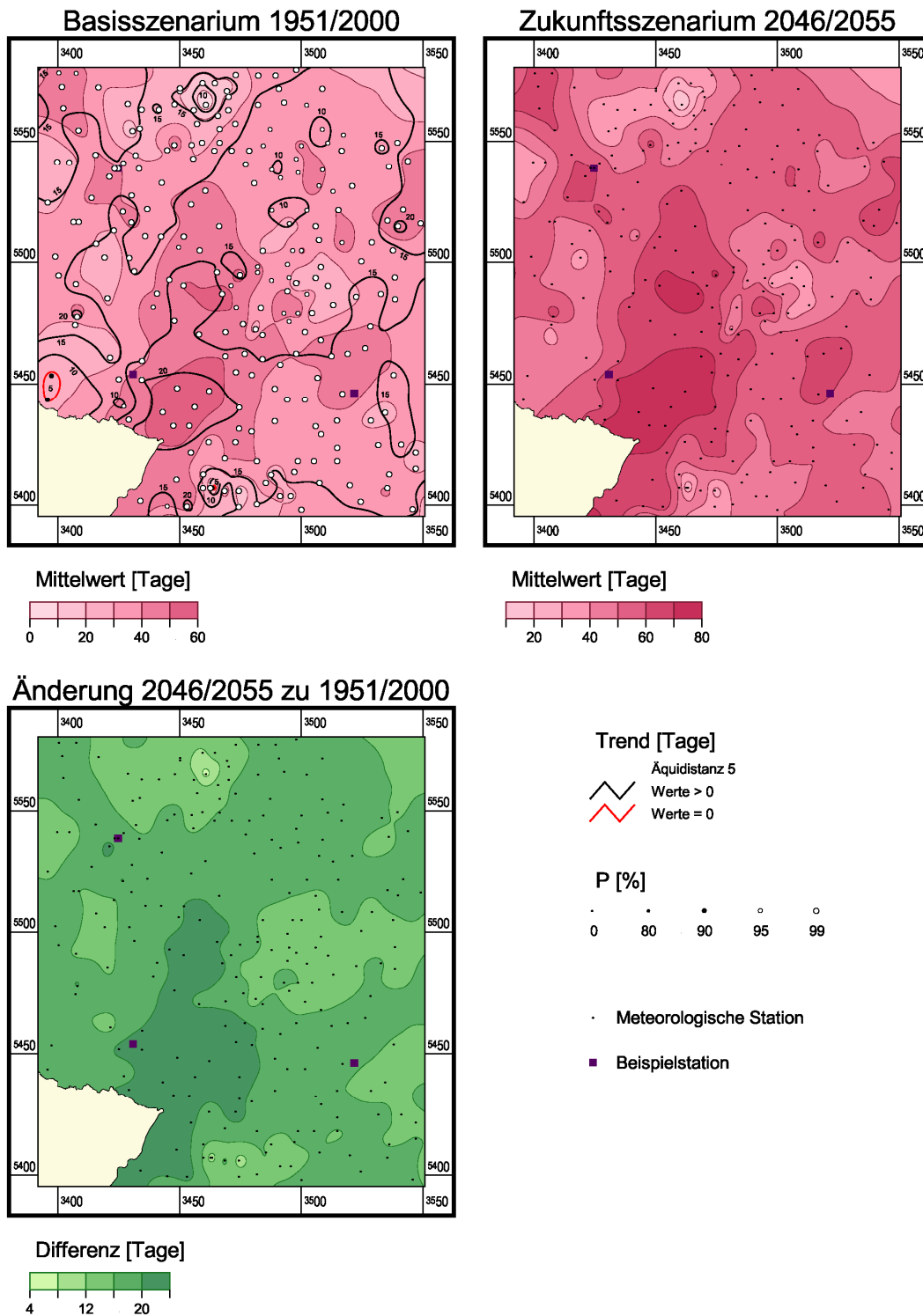


Abb. 8: Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Anzahl der Sommertage pro Jahr in SWD

Erster Sommertag im Jahr, Eintrittstermin

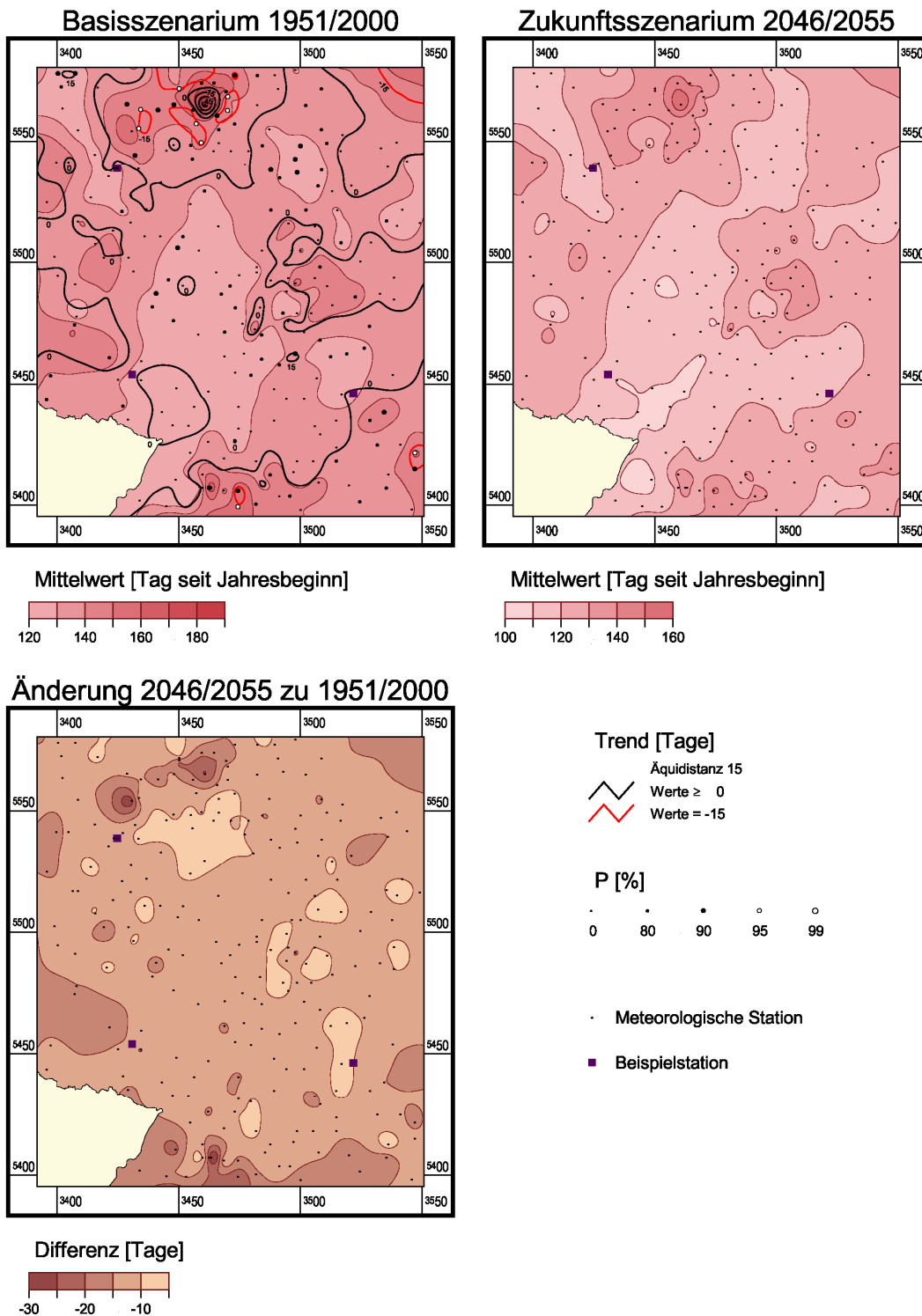


Abb. 9: Mittelwerte, Trends und Entwicklung für den erster Sommertag im Jahr in SWD

Letzter Sommertag im Jahr, Eintrittstermin

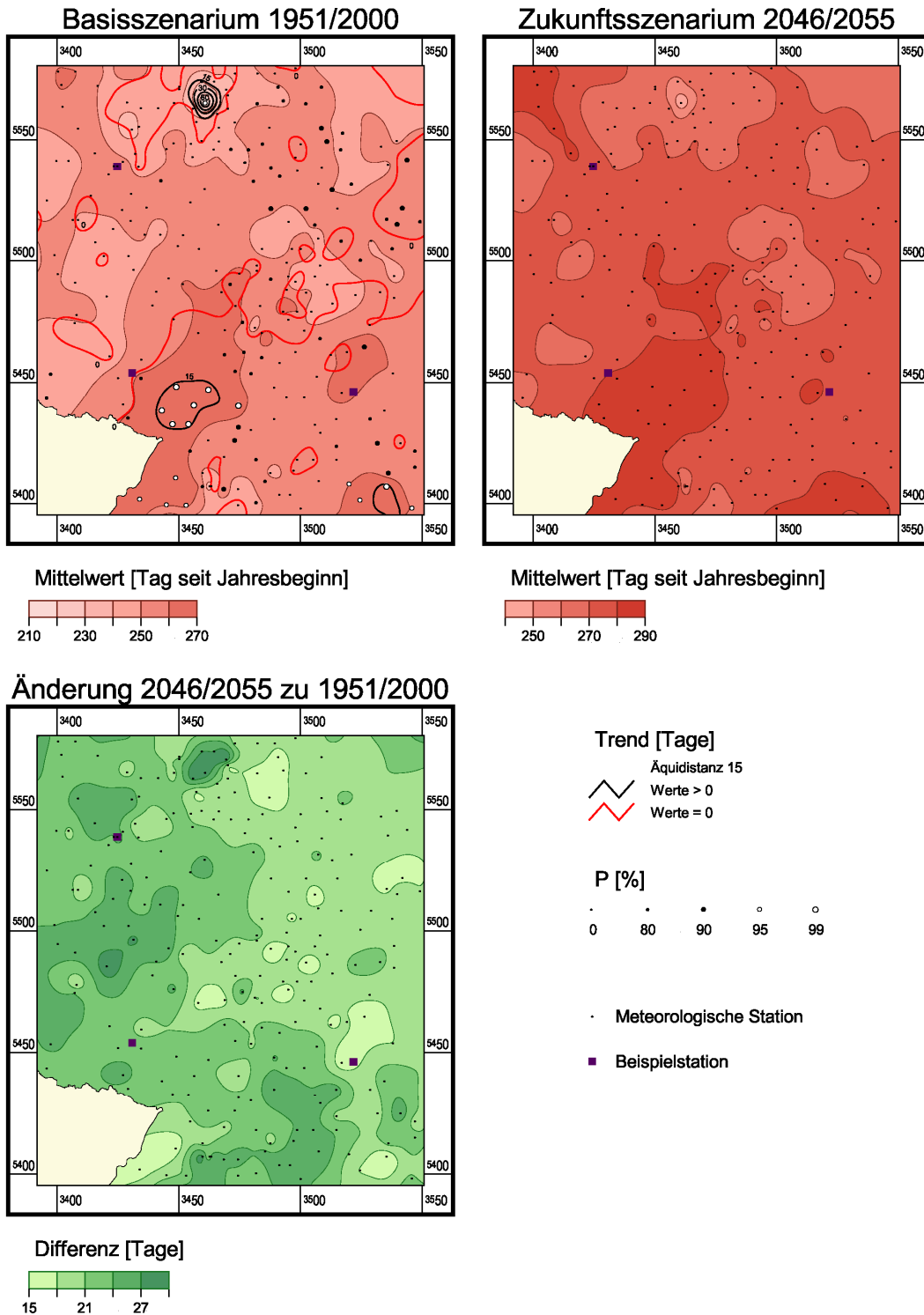


Abb. 10: Mittelwerte, Trends und Entwicklung für den letzten Sommertag im Jahr in SWD

Andauer der Sommertage

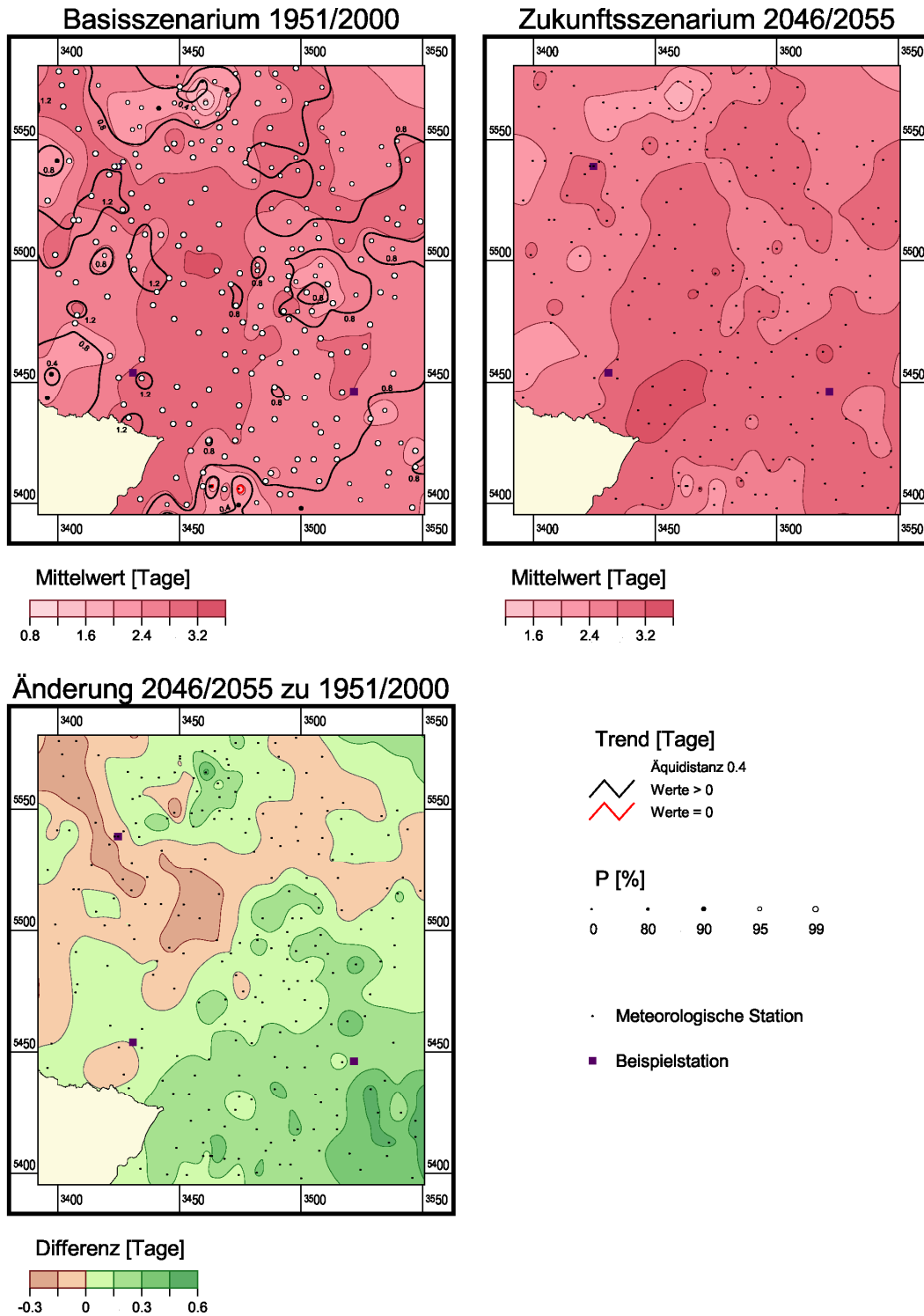


Abb. 11: Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Andauer der Sommertage pro Jahr in SWD

Kältesumme

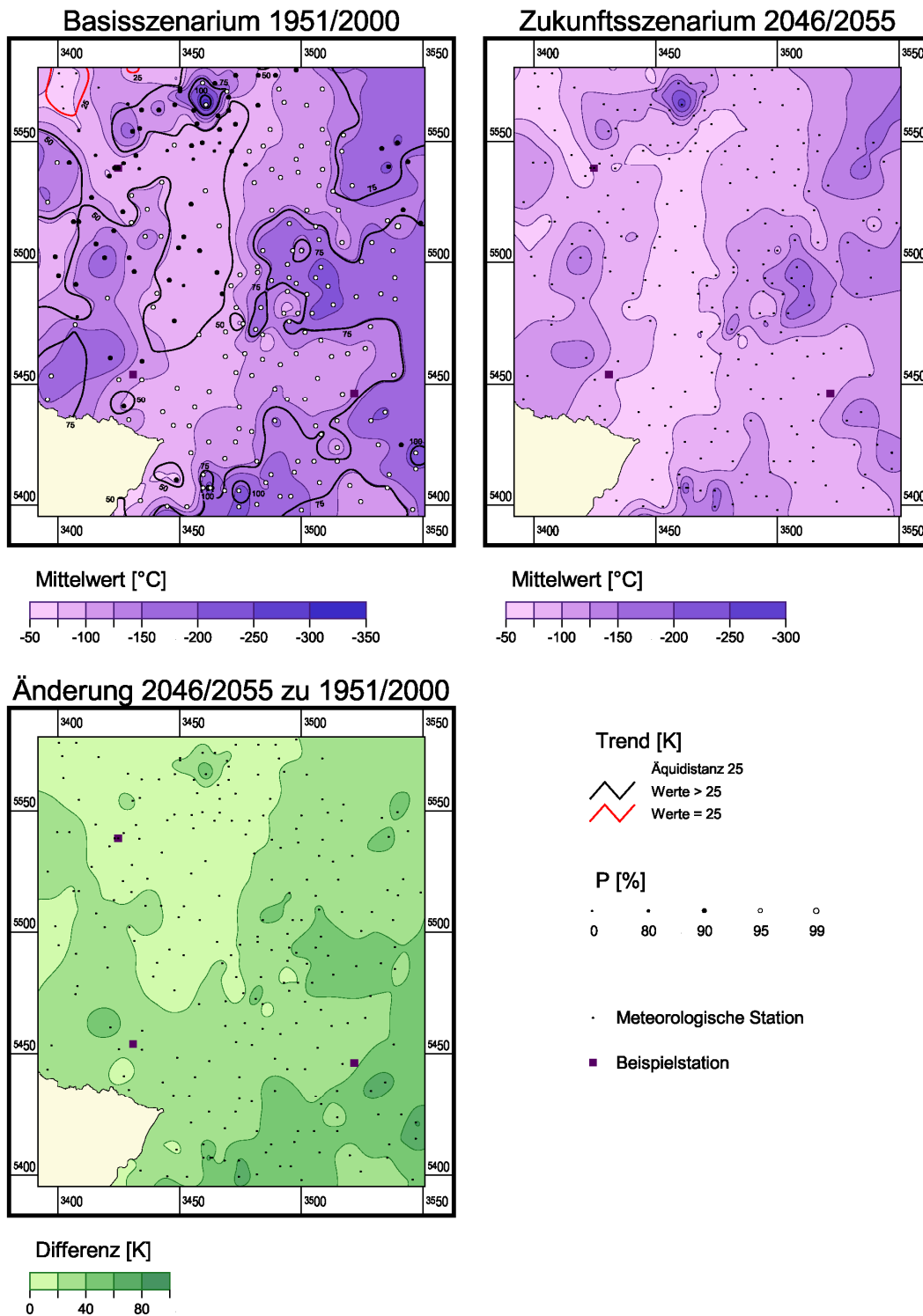


Abb. 12: Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Kältesumme im Winter in SWD

5.3 Niederschlag

Die räumliche Verteilung des Jahresniederschlagssumme (vgl. Abb. 13) zeigt eine starke Beziehung zur Orographie mit den höchsten Niederschlägen im Luv der Mittelgebirge bzw. in den Gebirgen selbst. Fast im gesamten Untersuchungsgebiet hat die Niederschlagssumme im BASZ zugenommen, im Mittel um 64 mm und bis zu annähernd 200 mm an den nördlichen Ausläufern des Schwarzwalds. Diese Zunahme ist jahreszeitlich deutlich differenziert (vgl. Abb. 14 und Abb. 15), während für den Winter fast durchweg eine Zunahme im Mittel um 29 mm zu beobachten war, nimmt die Niederschlagssumme im Sommer fast überall ab (durchschnittlich um 39 mm). Das ZUSZ weist bei insgesamt höheren Jahressummen deutlich mehr Gebiete mit einer Abnahme der Niederschläge im Vergleich zum BASZ aus, besonders im NW und SO des Kartenausschnitts. Aber im Mittel ergibt sich eine weitere Zunahme um 23 mm, wobei im Winter fast durchweg eine Zunahme mit nach Süden steigenden Werten ausgewiesen wird, das Mittel der Zunahme liegt bei 21 mm. Für den Sommer zeigt sich im Mittel nur noch eine Verringerung um 4 mm, die jedoch räumlich stark differiert. Starke Abnahmen zeigen sich im NW und SO, während insbesondere der Odenwald, aber auch Bereiche des Saar-Nahe-Berglands, Pfälzer Walds und Spessarts Erhöhungen zeigen. Insgesamt nähern sich die Werte für Sommer- und Winterniederschläge an und die Sommerniederschlagsmengen liegen nur noch geringfügig über den Winterniederschlägen.

Eine Differenzierung der Veränderungen auf Monatsbasis zeigt weitere saisonale und regionale Charakteristika. Die Zunahme der Winterniederschläge ist vor allem auf die Zunahme in den Monaten Januar und Februar zurückzuführen, während im Dezember, besonders im Norden des Ausschnitts, sogar eine deutliche Abnahme auftritt. Im Sommer fällt der Monat Juli durch eine weitere Zunahme auf. Die entsprechende Kartendarstellung findet sich wieder in Anhang I (A29). Eine Zusammenstellung der monatlichen absoluten und prozentualen Veränderung zum Ende des Szenarienzeitraums bezogen auf die Werte im BASZ findet sich in der folgenden Tabelle 6.

Tabelle 6: Veränderung der mittleren Monatssummen des Niederschlags im ZUSZ (Differenz 2046/2055 – 1951/2000)

Niederschlag	Monat											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Änderung in mm	13.1	14.7	11.1	-9.0	4.9	-6.4	4.8	-5.1	-7.9	2.7	0.3	-7.1
Änderung in %	21.8	26.8	19.8	-16.2	7.6	-7.3	7.0	-7.2	-12.5	4.6	-0.1	-9.7

Tage mit Niederschlag ≤ 0.1 mm (Anhang I A11, A12)

Die Tage ohne bzw. sehr geringem Niederschlag sind in ihrer tendenziellen Entwicklung räumlich stark strukturiert. Starke Abnahmen finden sich gebietsweise im Hunsrück, Taunus, Spessart und Odenwald, eine Zunahme vor allem im mittleren Bereich des nördlichen Oberrheintieflands. Im Mittel zeigte sich eine Abnahme von 12 Tagen. Das ZUSZ zeigt bei Erhaltung der starken Strukturierung eine Trendumkehr und weist im Mittel eine Zunahme um 9 Tage aus. Die Andauer lag im BASZ bei durchschnittlich 3.5 Tagen und das Änderungsverhalten ähnelt erwartungsgemäß dem Muster der Anzahl der Tage, im Mittel wurde eine Änderung um gerade -0.1 Tage festgestellt. Für das ZUSZ ist ein stärkerer Rückgang der Andauer um 0.6 Tage auf im Mittel 3.0 Tage zu verzeichnen. Der Rückgang ist für das gesamte Untersuchungsgebiet festzustellen.

Tage mit Niederschlag ≥ 10 mm (Anhang I A13)

Die Anzahl der Tage mit starkem Niederschlag lag im BASZ bei durchschnittlich 22 Tagen mit besonders hohen Werten im Odenwald und im nördlichen Schwarzwald. Die durchgehende Tendenz zur Zunahme lag im Mittel bei 1.6 Tagen. Im ZUSZ wird bei etwas größerer Spanne der auftretenden Werte eine geringe weitere Zunahme um im Mittel 0.5 Tage ausgewiesen. Der Mittelwert bleibt dadurch praktisch unverändert. Räumlich findet sich wieder eine starke Differenzierung mit Zunahmen in einem breiten Band von SW (Pfälzisch-Saarländisches-Stufenland) nach NO (Spessart) und Abnahmen vor allem im Taunus und Rhein-Main-Tiefland.

Jahressumme des Niederschlags

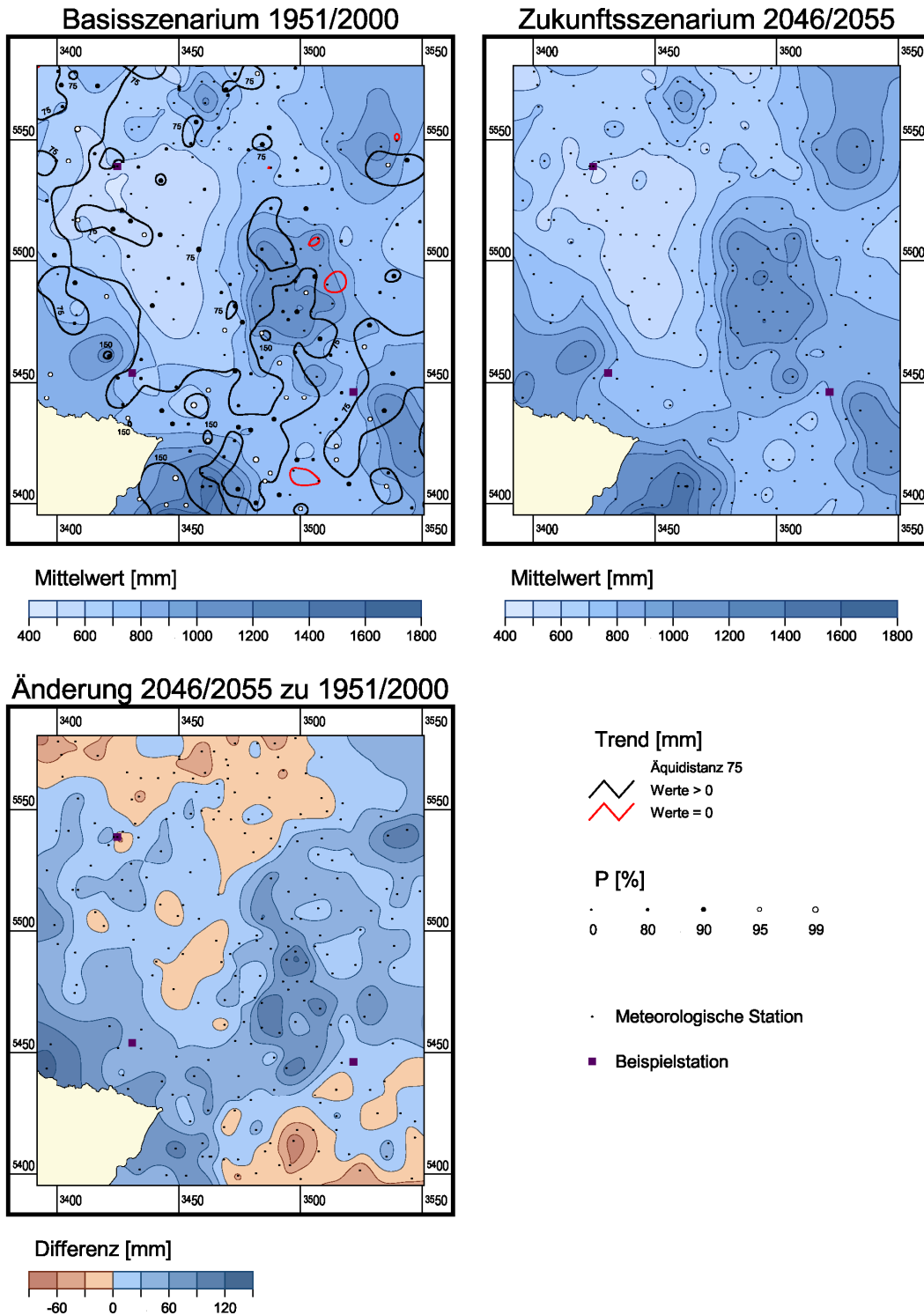


Abb. 13: Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Niederschlagssumme im Jahr in SWD

Wintersumme des Niederschlags

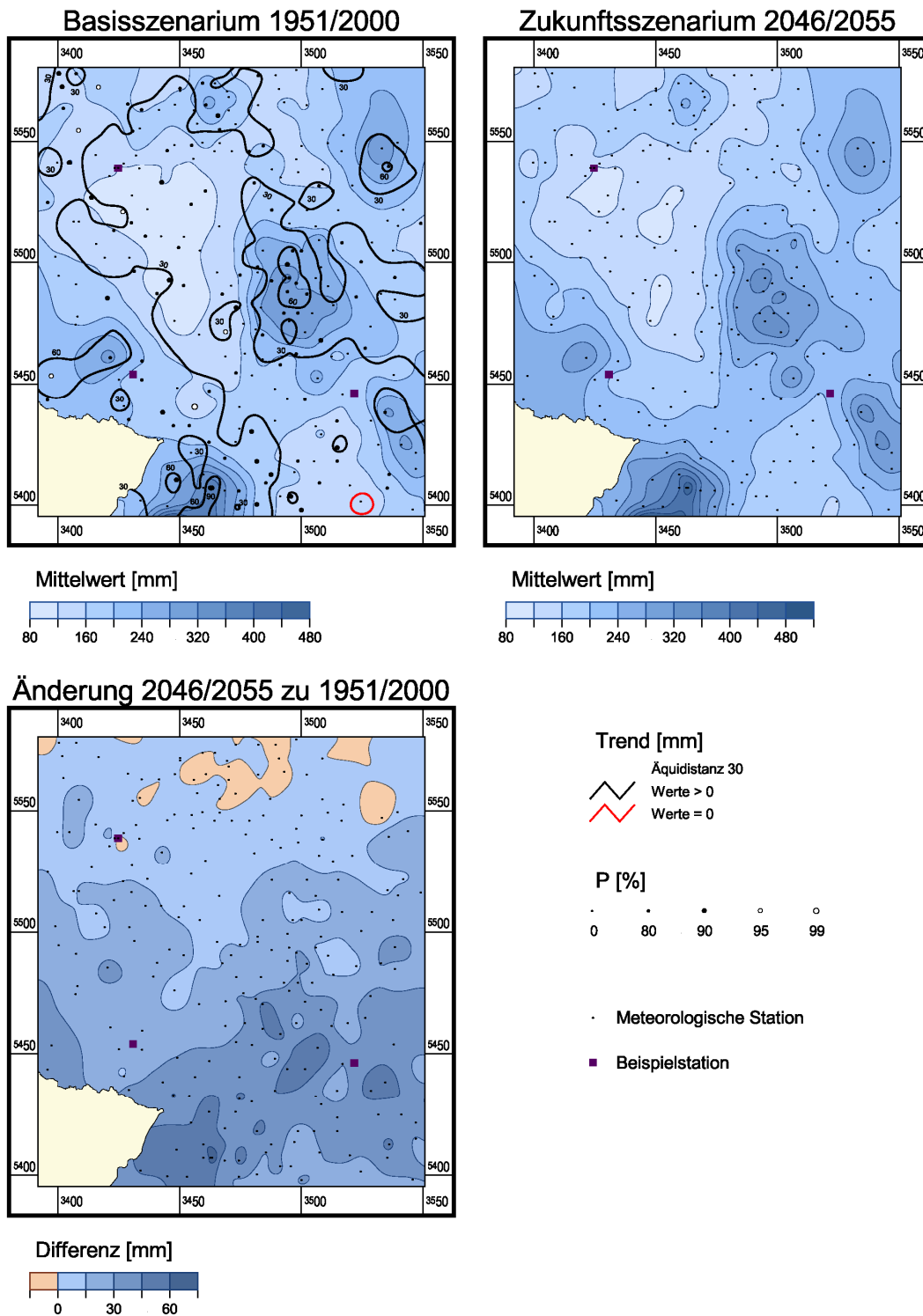


Abb. 14: Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Niederschlagssumme im Winter in SWD

Sommersumme des Niederschlags

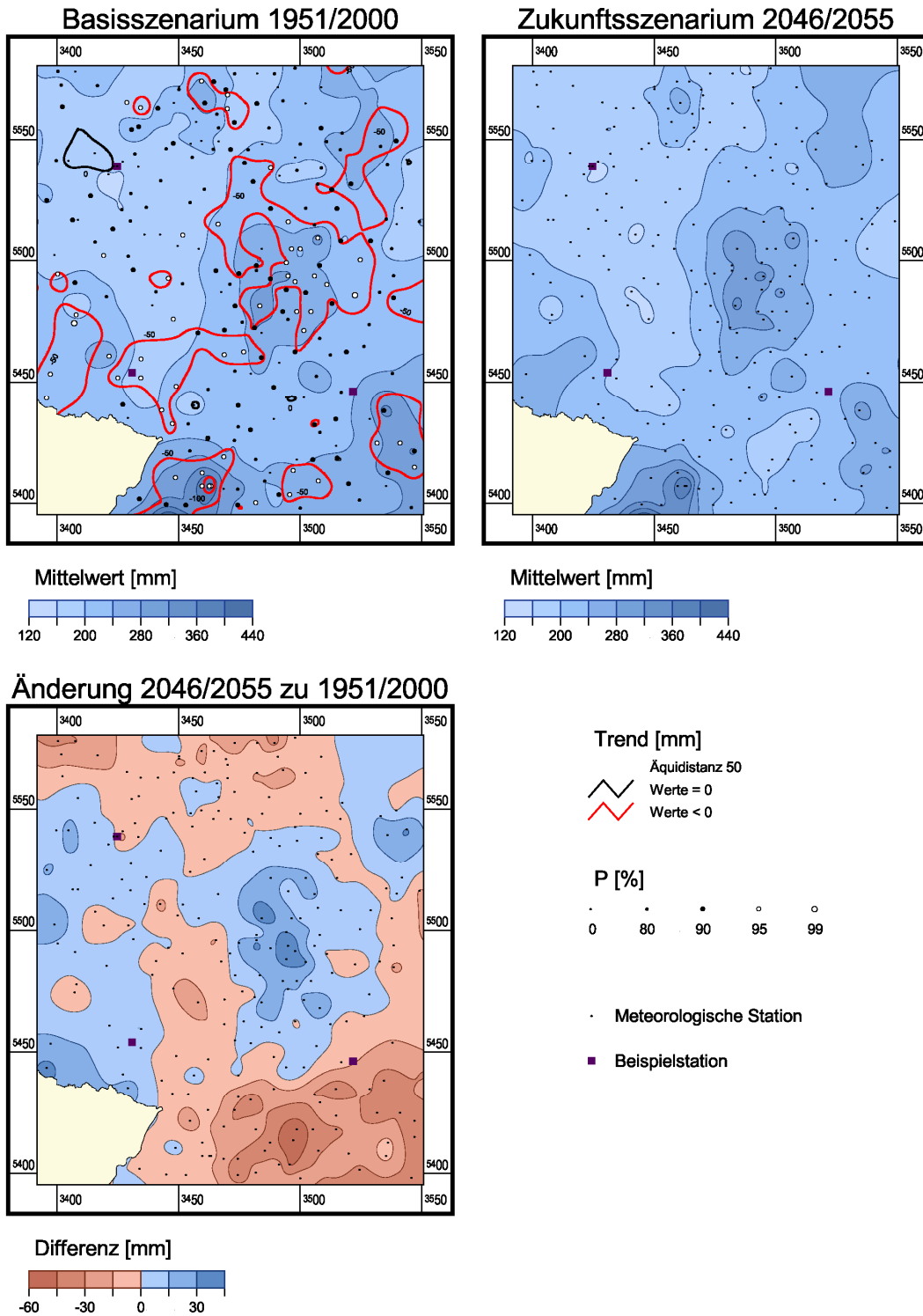


Abb. 15: Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Niederschlagssumme im Sommer in SWD

5.4 Relative Luftfeuchtigkeit

Im BASZ liegt das Jahresmittel der relativen Luftfeuchte in Untersuchungsgebiet je nach Region zwischen 72% und fast 88% (vgl. Abb. 16). Als Gebiete mit hohen Werten tritt die Mittelgebirgsschwelle mit Hunsrück und Taunus deutlich hervor, aber auch nach SW im Pfälzer Wald, im nördlichen Schwarzwald und nach SO und NO (Löwensteiner Berge, Rhön) treten wieder höhere Werte auf. Niedrige Werte finden sich im östlichen Rhein-Main-Tiefland. Bis auf diesen Bereich ist der Trend fast durchweg negativ und in weiten Bereichen des Ausschnitts, vor allem im Odenwald, nördlichem Oberrheintiefland und Kraichgau, stärker als – 2%-Punkte und statistisch mit mindestens 95% gesichert.

Diese Entwicklung setzt sich im ZUSZ weniger stark fort, wobei die größten Abnahmen im Nordwesten und Süden zu finden sind und auch Gebiete mit einer Zunahme der Luftfeuchte ausgewiesen werden, neben dem Rhein-Main-Tiefland vor allem im südlichen Saar-Nahe-Bergland und im mittleren Bereich des Pfälzer Walds.

Tage mit einer relativen Luftfeuchte < 50% (Anhang I A14, A15)

Die Anzahl der trockenen Tage liegt im BASZ zwischen 2 und 18 Tagen mit Schwerpunkten im östlichen Rhein-Main-Tiefland, nördlichen Pfälzer Wald und im Nordwesten des Ausschnitts. Bis auf den südlichen Pfälzer Wald und den Spessart, mit wenig gesicherten negativen Trends, werden besonders in den rheinnahen Bereichen des nördlichen Oberrheintieflands, im nördlichen Pfälzer Wald, im südlichen Odenwald, Kraichgau und Neckarbecken mit mindestens 95% gesicherte Trends von mehr als 5 Tagen ausgewiesen. Im Nordwesten tritt mit mehr als 10 Tagen die größte Steigerung auf. Die Zunahme der Anzahl der trockenen Tage ist im wesentlichen auf die Sommermonate beschränkt. Mit der Zunahme im BASZ ist auch die Andauer der trockenen Tage um etwa 0.5 Tage angestiegen.

Im ZUSZ erhöht sich die Anzahl der trockenen Tage im Mittel leicht von 6.3 auf 7.7 Tage, wobei die Zugewinne im Südwesten am deutlichsten ausfallen. Im Mittel verändert sich die Andauer praktisch nicht, allerdings verringert sich in den

nördlich gelegenen Gunsträumen die Andauer, während nach Süden hin der beobachtete Trend fortgesetzt wird und die Andauer weiter zunimmt.

Tage mit einer relativen Luftfeuchte $\geq 90\%$ (Anhang I A16, A17)

Die Verteilung der Anzahl der feuchten Tage ähnelt stark den Mustern der relativen Luftfeuchte selbst. Die Werte umfassen mit 9 bis 210 Tage eine große Spanne, wobei insbesondere der hohe Taunus mit mehr als 180 feuchten Tagen heraussticht. Niedrige Werte finden sich im Lee des Taunus und in einem breiten Band bis in das Neckarbecken. Hier werden mit Trends von mehr als 30 Tagen große Zunahmen ausgewiesen. Die stärkste Abnahme findet sich im südlichen Pfälzer Wald.

Das ZUSZ weist fast durchwegs eine Abnahme der feuchten Tage aus, im Mittel um etwa 6 auf dann noch 47 Tage aus, mit Schwerpunkten im gesamten Süden und im Nordwesten des Ausschnitts. Die Änderung des Andauerverhaltens folgt diesem Muster und weist fast überall eine Verringerung aus. Die stärkste Abnahme findet sich im Bereich des hohen Taunus.

Jahresmittel der relativen Luftfeuchte

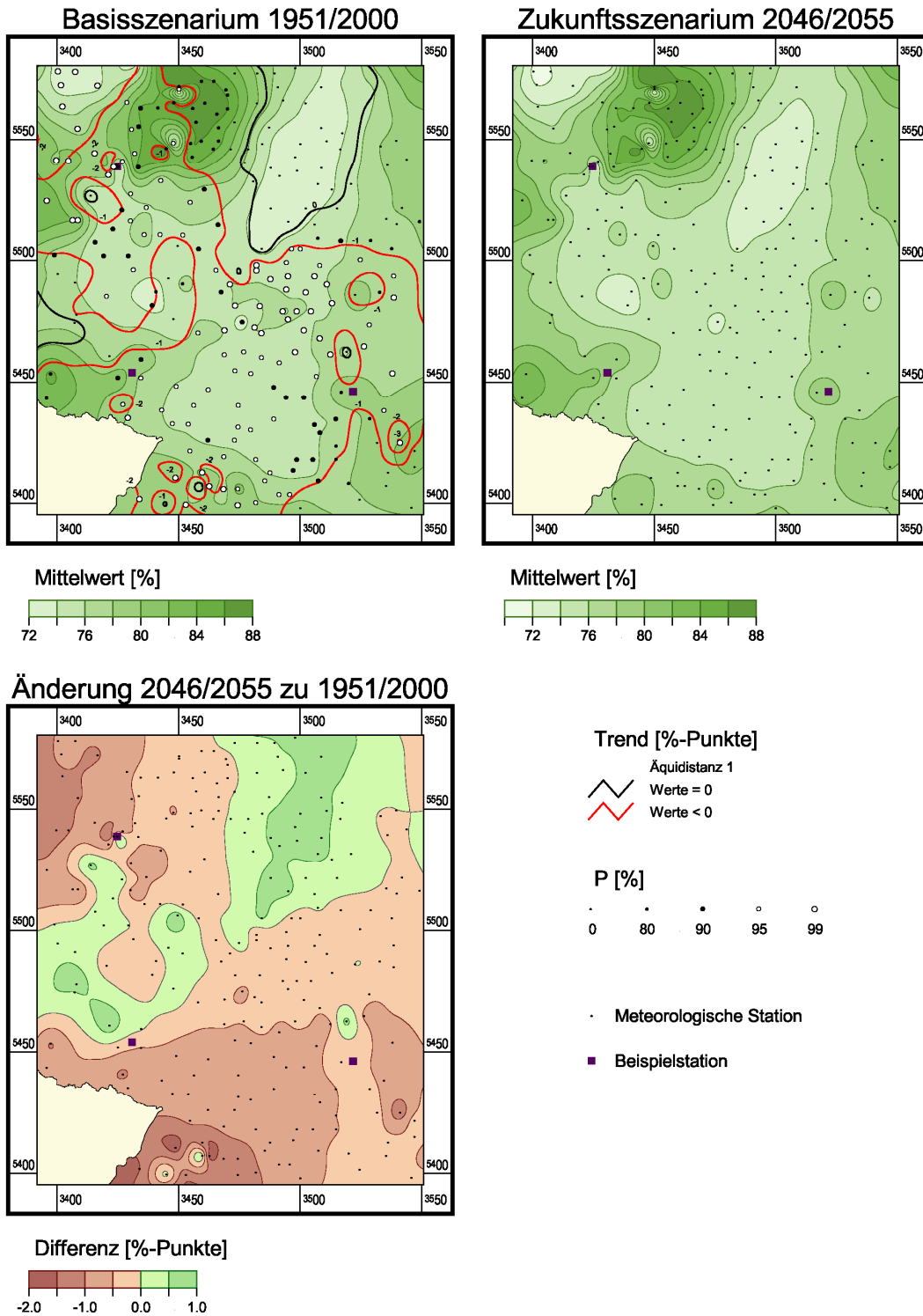


Abb. 16: Mittelwerte, Trends und Entwicklung der relativen Luftfeuchte in SWD

5.5 Wasserdampfdruck

Die räumliche Verteilung des Wasserdampfdrucks (Abb. 17) ist eng an die der Temperatur gebunden, höhere Werte treten im Rheintal und hier besonders im südlichen Bereich des Ausschnitts auf, die niedrigsten Werte finden sich im hohen Taunus. Eine Zunahme im BASZ wird fast für das gesamte Untersuchungsgebiet ausgewiesen. Signifikante Werte mit einem Trend zwischen 0.4 und 0.6 hPa werden aber sowohl für den südlichen Bereich des nördlichen Oberrheintieflands, als auch für den hohen Taunus gezeigt, hier allerdings mit etwas niedrigeren Werten über 0.4 hPa. Das ZUSZ schreibt diese Entwicklung mit einer fast flächendeckenden Zunahme fort, in etwa in der Größenordnung der bereits beobachteten Trends, im Mittel liegt die Zunahme bei mehr als 0.2 hPa und erreicht annähernd 0.5 hPa.

Tage mit Wasserdampfdruck ≥ 15.0 hPa (Anhang I A18, A19)

Die Verteilung der Anzahl und Andauer der Tage mit hohem Wasserdampfdruck ist der Verteilung der Jahresmittel sehr ähnlich, auch zum Teil bezüglich der Trends. Wieder finden sich höhere Werte mit mehr als 50 Tagen in einem breiten südlich gelegenen Band vom Pfälzer Wald bis in den Raum um Heilbronn und die niedrigsten Werte im hohen Taunus. Im östlichen Spessart und zentral im nördlichen Oberrheintiefland werden Gebiete mit einem positiven signifikanten Trend von etwa 12 Tagen ausgewiesen. Die Andauern steigen mit der höheren Anzahl an. Diese Verhältnisse werden im ZUSZ deutlich modifiziert fortgesetzt. Das stärkste Änderungspotenzial wird im südlich gelegenen Band ausgewiesen mit einer weiteren Zunahme um 6 bis 8 Tage, während im östlichen Spessart die Anzahl zurückgeht. Bei den Andauern wird für den gesamten Ausschnitt ein deutlich verringertes Niveau ausgewiesen, das Mittel sinkt von 2.8 um fast 1 Tag.

Jahresmittel des Dampfdrucks

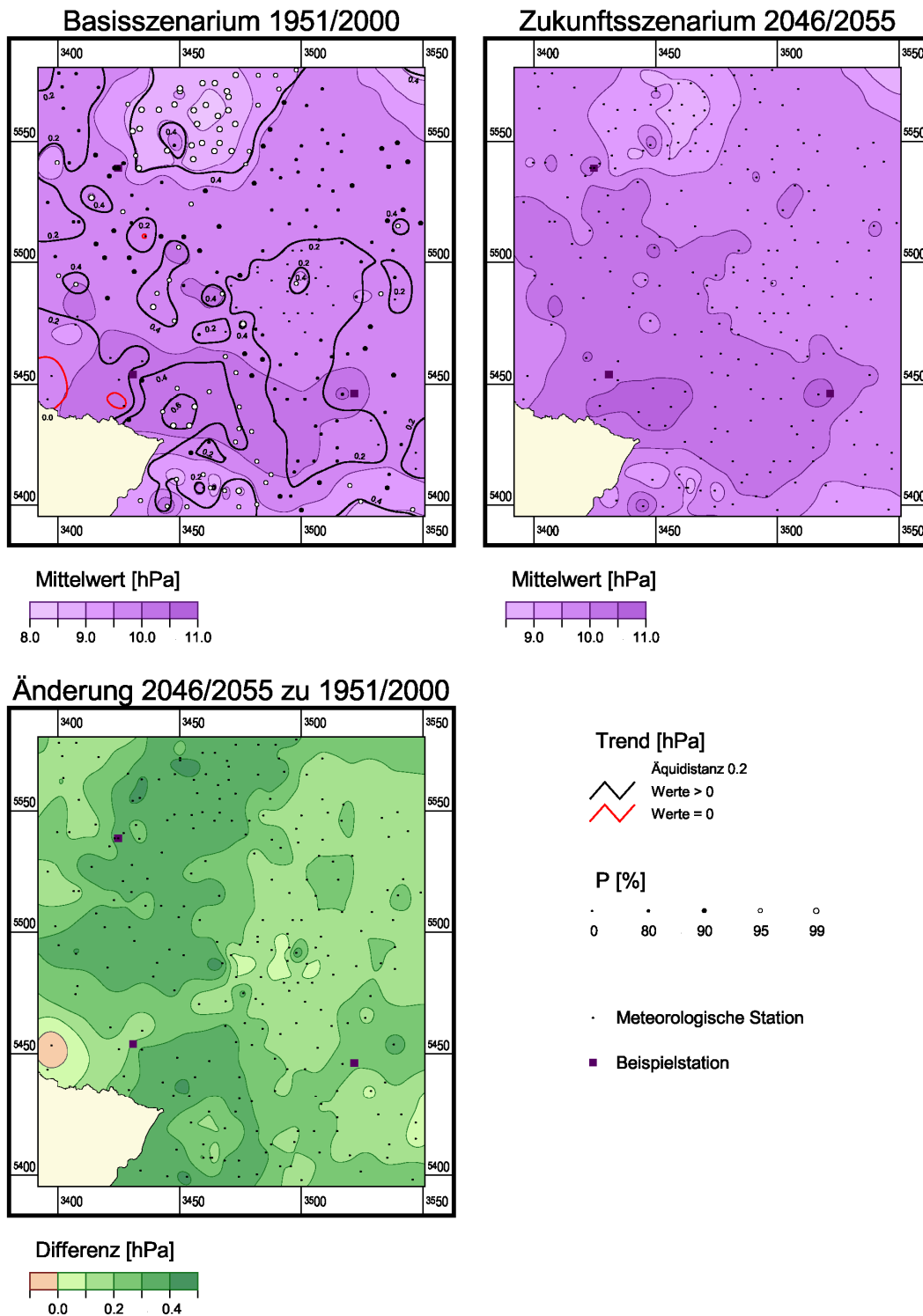


Abb. 17: Mittelwerte, Trends und Entwicklung des Wasserdampfdrucks in SWD

5.6 Luftdruck

Die räumliche Verteilung des Luftdrucks (Abb. 18) folgt der Topographie des Landes, mit ansteigender Höhe nimmt der Luftdruck ab. Bemerkenswert ist eine flächendeckender Trend zur Erhöhung des Luftdrucks im BASZ, im Mittel um 0.9 hPa und nach Süden mit tendenziell höheren Werten bis fast 1.5 hPa. Dieses Charakteristikum des Luftdrucks gilt ganz ähnlich für Gesamteuropa mit - vor allem im Winter - deutlicher Luftdruckerhöhung im Mittelmeergebiet und einer Abnahme über Skandinavien, was zu häufigeren Westwetterlagen und damit milderer und feuchteren Wintern sowie wahrscheinlich mehr Stürmen führt.

Diese Entwicklung setzt sich im ZUSZ mindestens in der gleichen Größenordnung fort, auch hier ist die Zunahme nach Süden tendenziell etwas höher, im Westen des Ausschnitts eher geringer.

Jahresmittel des Luftdrucks

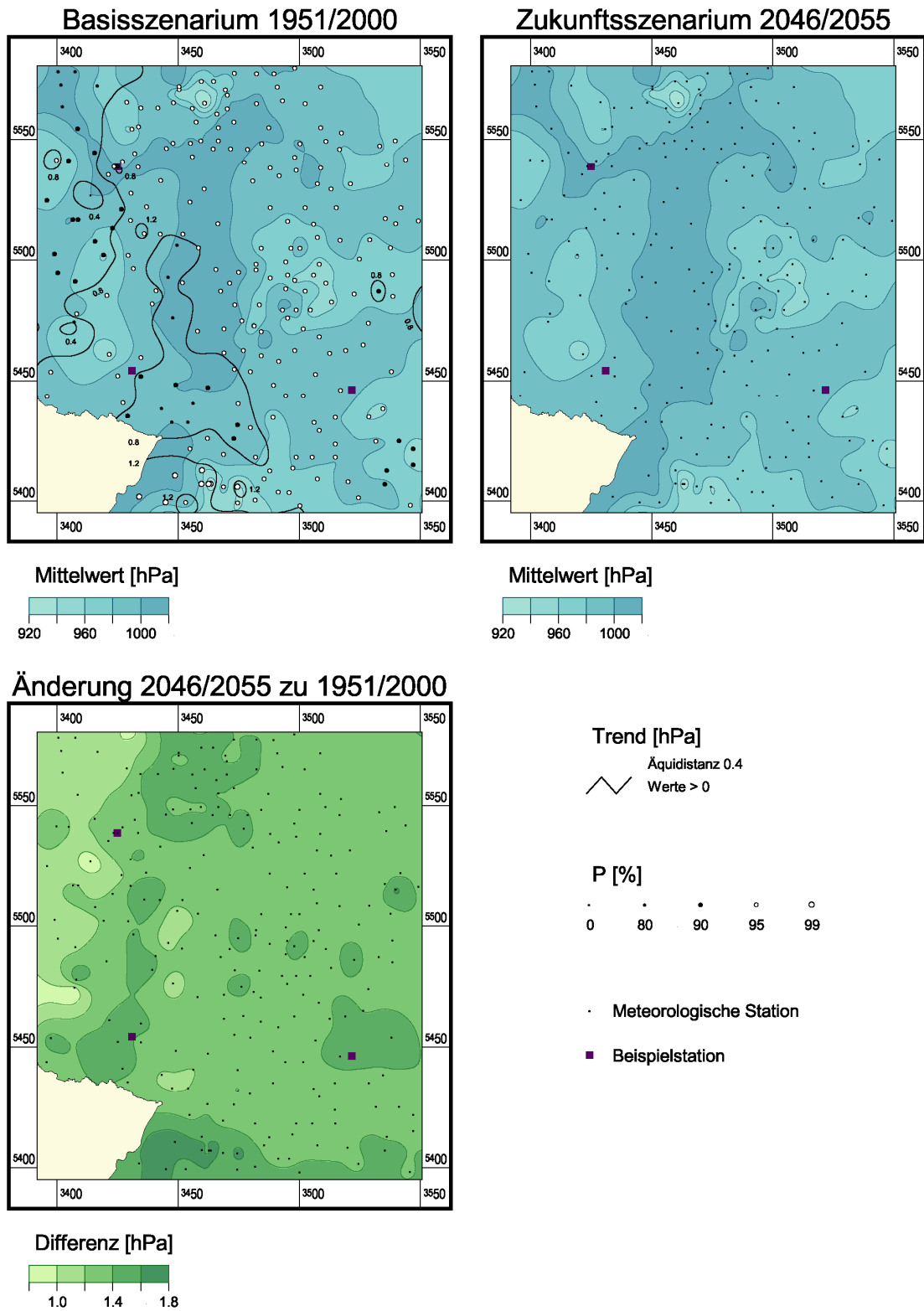


Abb. 18: Mittelwerte, Trends und Entwicklung des Luftdrucks in SWD

5.7 Globalstrahlung

Die räumliche Verteilung der Globalstrahlung im BASZ gibt die orographische Gliederung im Untersuchungsgebiet nur bedingt wieder (vgl. Abb. 19). Allerdings zeigt der südliche und mittlere Teil des Untersuchungsgebiets höhere Durchschnittswerte als der Norden. Generell ist ein schwacher Rückgang der Globalstrahlung im Mittel um 23 J/cm^2 zu beobachten, insbesondere nach Süden und Osten wird der Rückgang deutlicher. Im Gegensatz dazu steigt die Globalstrahlung im östlichen Saar-Nahe-Bergland an. Das ZUSZ schreibt die allgemeine Tendenz zur Abnahme weiter fort, im Mittel beträgt der Rückgang 64 J/cm^2 , wobei der Schwerpunkt in den östlichen Bereichen des Ausschnitts liegt.

5.8 Sonnenscheindauer

Wie die Abb. 20 zeigt, sind die Unterschiede in der Sonnenscheindauer nicht sehr ausgeprägt. Im Mittel werden knapp 4.5 h ausgewiesen mit nach Süden tendenziell etwas höheren Werten. Gunsträume sind der südliche Bereich des nördlichen Oberrheintieflands und der südliche Odenwald. Das BASZ gibt durchwegs eine leichte negative Trendentwicklung an mit einem erhöhten Rückgang in den genannten Gunsträumen. Das ZUSZ schreibt diese Entwicklung fort, wobei der leichte weitere Rückgang nach Norden etwas höhere Werte annimmt. Dies korrespondiert insgesamt gut mit den Entwicklungen bei der Globalstrahlung.

Tage mit Sonnenscheindauer < 0.2 h (Anhang I A20, A21)

Besonders viele Tage mit wenig Sonnenschein finden sich im hohen Taunus und im südlichen Odenwald. Starke Veränderungen mit einem negativen Trend im BASZ werden für den Rheingau, über das nördliche Oberrheintiefland bis zum östlichen Spessart angegeben, mit einem Rückgang der gebietweise mehr als 30 Tage beträgt. Das Andauerverhalten ändert sich entsprechend. Das ZUSZ weist dagegen mit wenig Ausnahmen eine Erhöhung der Zahl der Tage mit wenig Sonnenschein aus, die im Mittel fast 10 Tage beträgt und verstärkt in einem Band vom südlichen Bereich des nördlichen Oberrheintieflands über den Oden-

wald weiter nach Osten verläuft. In diesem Bereich erhöht sich auch die Andauern geringfügig, während sonst ausschließlich ein weiterer Rückgang auftritt.

Tage mit Sonnenscheindauer $\geq 90\%$ (Anhang I A22, A23)

Die räumliche Verteilung der Anzahl der Tage mit mehr als 90% der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer folgt den Mustern beim Jahresmittel der Sonnenscheindauer. Gunsträume sind der südliche Bereich des nördlichen Oberrheintieflands und der südliche Odenwald. Während im Mittel etwa 15 Tage auftreten, erreichen die Werte hier oft das Doppelte. Allerdings nimmt die Anzahl in diesen Gebieten im BASZ auch besonders stark ab. Der Rückgang beträgt im Mittel 5 Tage und wächst hier auf 10 bis 30 Tage. Das mittlere Andauerverhalten zeigt ähnliche räumliche Strukturen und nimmt ebenfalls tendenziell ab. Das ZUSZ schreibt die Abnahme bei Anzahl und Andauer der sonnenreichen Tage auf etwas niedrigerem Niveau fort. Dabei werden in Gebieten, die im BASZ nur geringe Werte aufweisen sogar Zunahmen auftreten.

Jahresmittel der Globalstrahlung

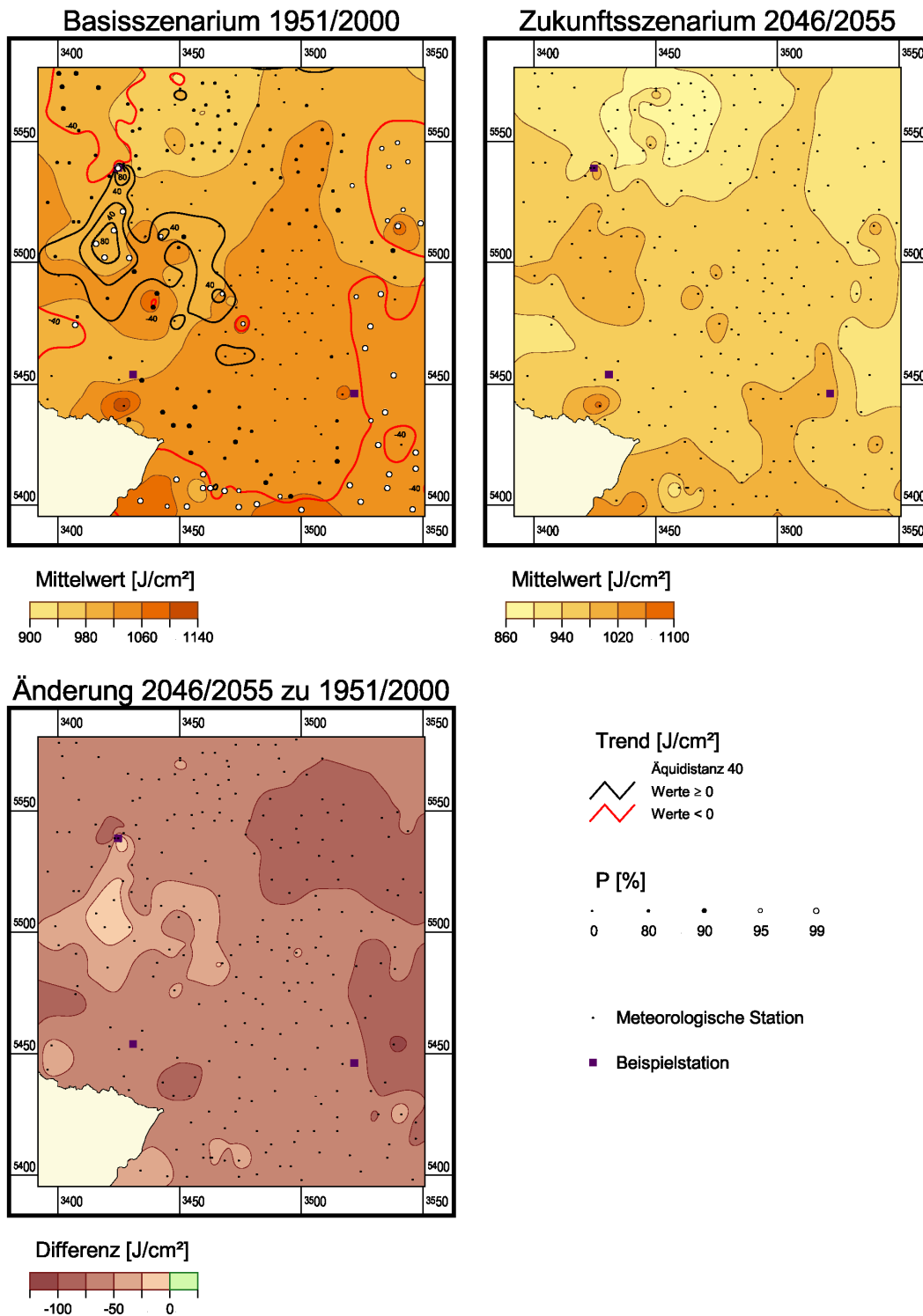


Abb. 19: Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Globalstrahlung in SWD

Jahresmittel der Sonnenscheindauer

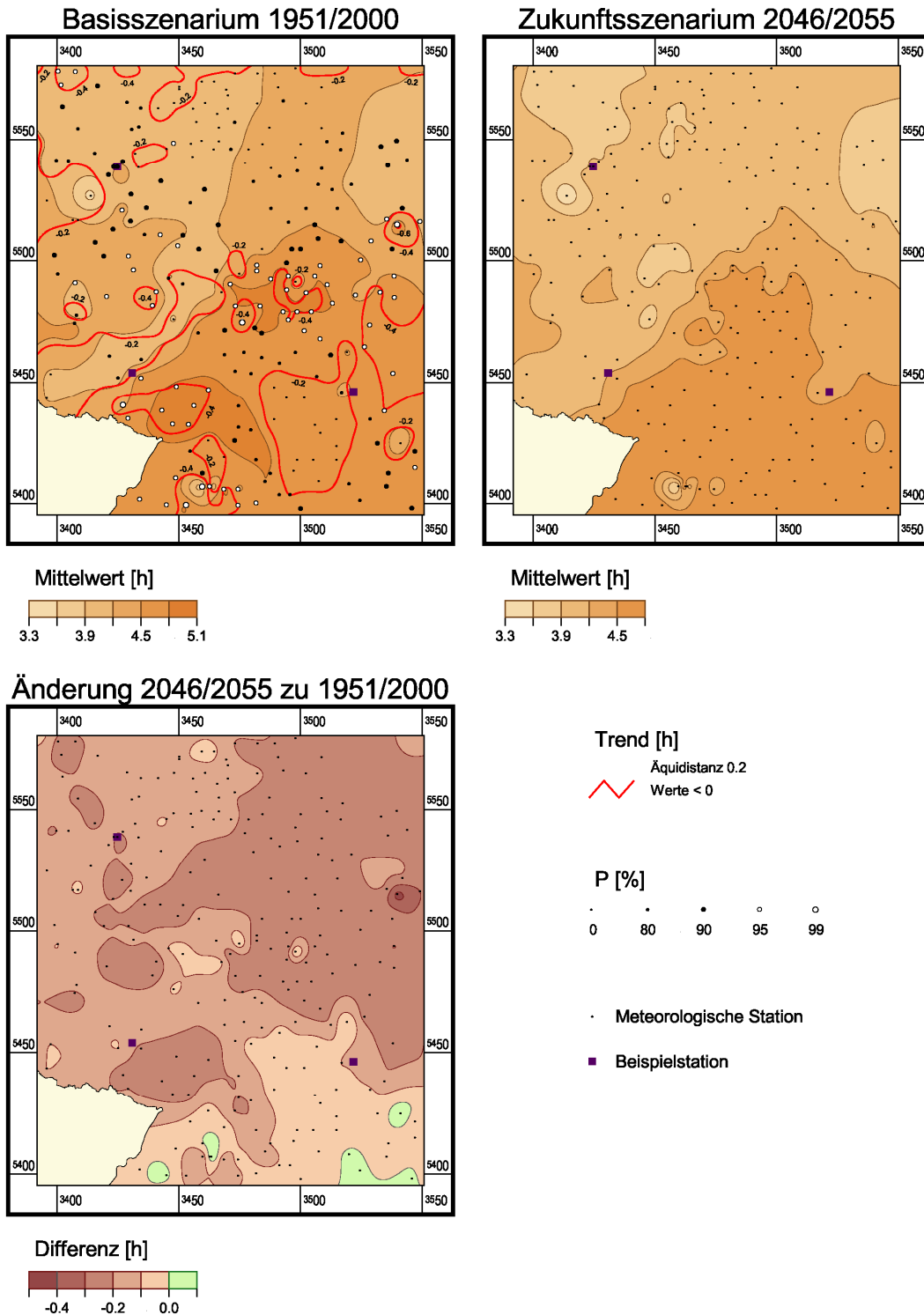


Abb. 20: Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Sonnenscheindauer in SWD

5.9 Bedeckungsgrad

Die räumliche Verteilung des Bedeckungsgrades ist für Untersuchungsgebiet wenig strukturiert (Abb. 21). Von Norden nach Süden nimmt der Bedeckungsgrad ab. Der Trend weist geringe Abnahmen im östlichen Bereich des Rhein-Main-Tieflands und dem Spessart aus, ansonsten ist der Trend i.d.R. positiv, Schwerpunkte sind der Südosten und im Saar-Nahe-Bergland und dem angrenzenden Oberrheintiefland. Insgesamt sind die Änderungen im BASZ gering. Das ZUSZ zeigt geringe Zu- und Abnahmen. Eine weitere Zunahme tritt dort auf, wo bereits im BASZ positive Trends ausgewiesen wurden, eine leichte Abnahme findet sich im Südwesten des Untersuchungsgebiets, im Rhein-Main-Tiefland und im Taunus. Im Mittel sind der Trend im BASZ und die ausgewiesenen Änderungen im ZUSZ vernachlässigbar gering.

Tage mit einem Bedeckungsgrad = 8 Achtel (Anhang I A24, A25)

Die Anzahl der Tage mit starker Bewölkung sind kleinräumig stärker strukturiert. Schwerpunkte mit hohen Werten finden sich im Hunsrück und Taunus, im östlichen Rhein-Main-Tiefland und um den Odenwald. Schwerpunkte für Änderungen im BASZ sind vor allem der Spessart mit Abnahmen von mehr als 20 Tagen und zentrale Bereiche im Taunus und Rheingau mit Zunahmen von mehr als 20 Tagen. Entsprechend reagiert das Andauerverhalten. Das ZUSZ zeigt eine Zunahme im Mittel um 8 Tage auf dann 53 Tage. Im Gegensatz dazu zeigt sich im Rheingau eine deutliche Abnahme. Auch im Andauerverhalten zeigt sich hier der stärkste Rückgang.

Tage mit einem Bedeckungsgrad < 0.3 Achtel (Anhang I A26, A27)

Viele Tage ohne oder mit wenig Bewölkung und einer Zunahme im BASZ finden sich im Taunus und im Rhein-Main-Tiefland. Ansonsten dominiert bei unterschiedlichem Ausgangsniveau ein negativer Trend, der im Mittel bei -4 Tagen liegt. Das ZUSZ weist eine Zunahme in Anzahl und Andauer im südlichen Bereich des Ausschnitts aus, im östlichen Taunus eine Abnahme der Anzahl bei geringeren Andauern. Im Mittel weist das ZUSZ eine Zunahme um etwa 2 Tage aus.

Jahresmittel des Bedeckungsgrades

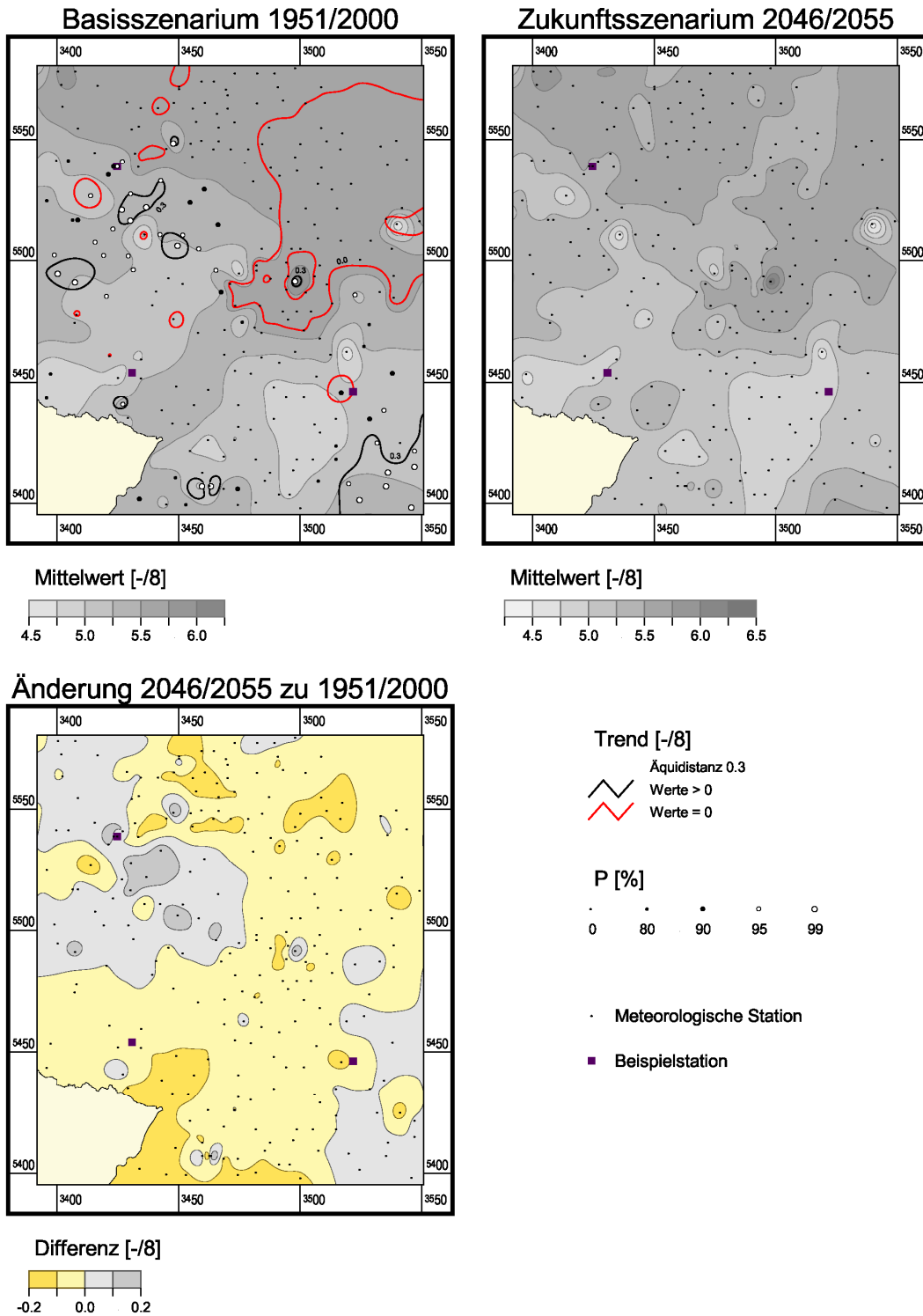


Abb. 21: Mittelwerte, Trends und Entwicklung des Bedeckungsgrades in SWD

5.10 Windgeschwindigkeit

Die räumliche Verteilung der Windgeschwindigkeit ist nur wenig aussagekräftig. Prinzipiell erwartet man für die Mittelgebirgsregionen die größten Windgeschwindigkeiten. Diese finden sich auch ansatzweise im hohen Taunus und der Südrhön, beide auch mit einer leichten Zunahme im BASZ. Andere Mittelgebirge zeigen nur geringe Windgeschwindigkeiten, während tiefere Lagen auch hohe Geschwindigkeiten aufweisen (vgl. Abb. 22). Ursache dafür kann die jeweilige Exposition des Windmessgerätes an den Stationen sein.

Bis auf die genannten Ausnahmen wird im BASZ eine leichte Abnahme der Geschwindigkeit ausgewiesen. Diese Verhältnisse werden im ZUSZ in der gleichen Größenordnung fortgeschrieben.

Jahresmittel der Windgeschwindigkeit

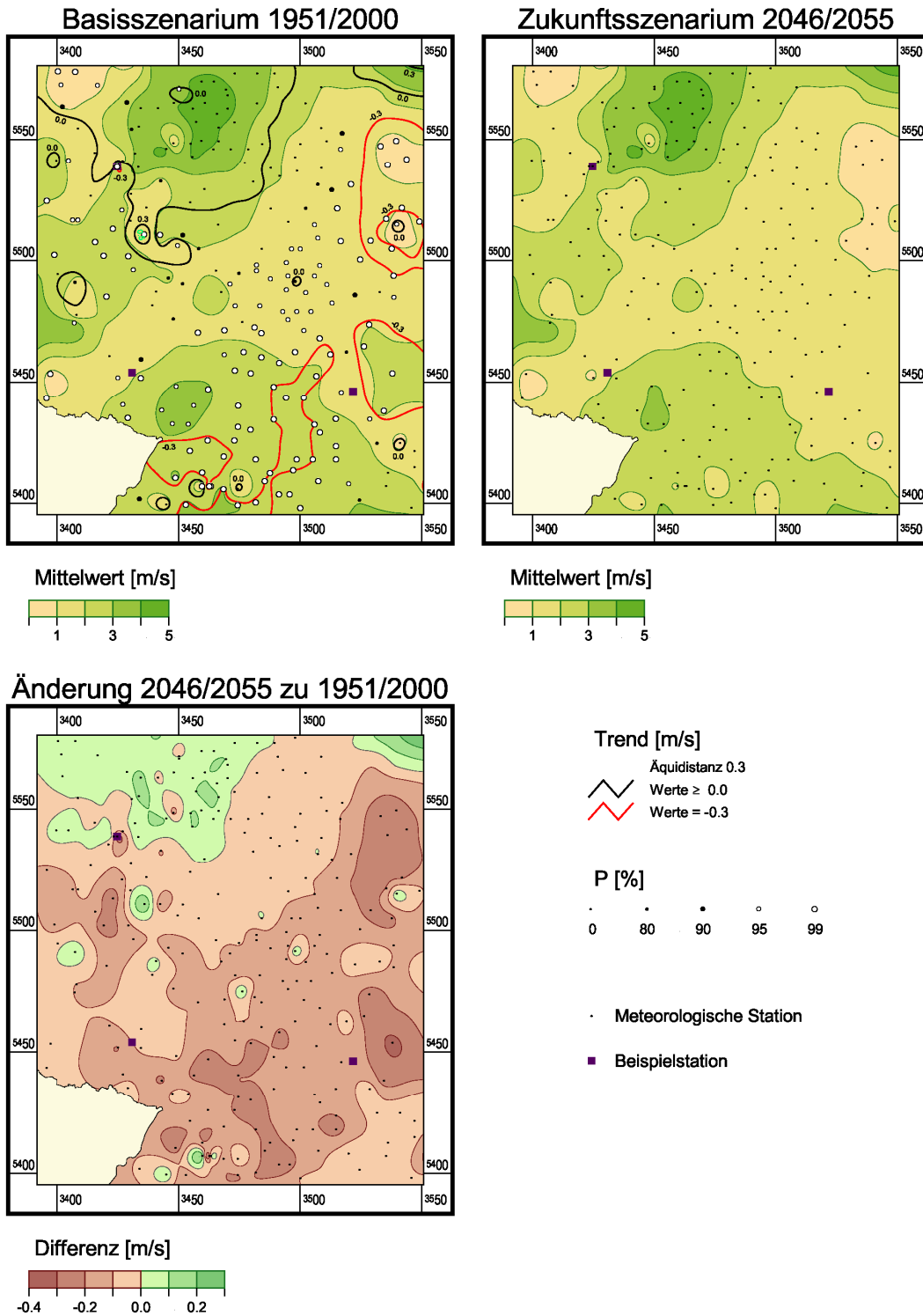


Abb. 22: Mittelwerte, Trends und Entwicklung der Windgeschwindigkeit in SWD

6 Übersicht zur Klimaentwicklung

6.1 Verhältnisse im Basisszenarium 1951 bis 2000

Einen Überblick über die mittleren Verhältnisse der untersuchten meteorologischen Größen an den Klimastationen im betrachteten Ausschnitt gibt die nachfolgende Tabelle 7. In Tabelle 8 werden die Trends für diesen Zeitraum mitgeteilt. Es kann festgehalten werden, dass es im Zeitraum 1951 bis 2000 zu einer Temperaturerhöhung gekommen ist, die deutlich über dem mittleren globalen Temperaturanstieg liegt. Je nach Region beträgt die Zunahme zwischen 0.7 und 1.4 K. Gleichzeitig kann bis auf wenige Ausnahmen eine Niederschlagszunahme beobachtet werden. Sie liegt im Mittel für das Gesamtgebiet bei 64 mm im Jahr. Bei einem Gebietsmittel von 778 mm entspricht dies einer Zunahme von 8.2 %. Dabei ist zu beachten, dass die Winter milder und niederschlagsreicher (+15.7 %), während die Sommer ebenfalls wärmer aber in großen Teilen trockener (-17.6 %) geworden sind. Damit verbunden ist eine Abnahme der wintertypischen und die Zunahme der sommertypischen Ereignistage.

Während bei der Feuchte eine leichte Abnahme zu beobachten ist (-1.1 %-Punkte), nehmen der Luftdruck (0.9 hPa) und der Wasserdampfdruck (0.3 hPa) zu. Die Globalstrahlung nimmt in den meisten Fällen ab, im Mittel um etwa 23 J/cm². Dazu passt die Abnahme der Sonnenscheindauer (-0.3 h) bei geringer Zunahme der Bewölkung (+0.1 -/8). Der Wind (-0.1 m/s) ändert sich nur unwesentlich.

Die wesentlichen Änderungen sind:

- Temperaturanstieg im Jahresmittel je nach Region bis zu 1.4 K
- Rückgang der Frosttage im Mittel um 22 Tage pro Jahr
- Zunahme der Sommertage im Mittel um 15 Tage pro Jahr
- Niederschlagszunahme in der Jahressumme um 64 mm.
- Zunahme der Starkniederschlagstage um bis zu 10 Tage pro Jahr

Tabelle 7: Jahresmittelwerte bzw. -summen von 11 meteorologischen Größen für die Hauptstationen im Basisszenarium

Station	Tmax °C	Tmit °C	Tmin °C	Nied mm	Relf %	Ludr hPa	Dadr hPa	Sonne h	Bewo -/8	Gstr J/cm ²	Wind m/s
Koblenz	15.1	10.7	6.7	622.5	72.6	1004.8	9.6	4.0	5.8	993.0	0.7
Lohr	13.9	8.9	4.6	772.9	78.6	995.9	9.6	4.0	5.6	997.6	0.8
Kahl/Main	13.9	10.1	6.1	692.4	72.0	1000.7	9.8	4.4	5.6	1024.9	1.9
Kl. Feldberg Ts.	9.0	5.8	3.1	1016.5	87.6	921.8	8.4	4.0	5.7	942.2	4.5
Wiesbaden	14.3	9.9	6.2	632.6	75.4	997.8	9.9	4.1	5.3	1009.7	1.6
Waldems	12.1	8.3	4.7	762.6	77.2	958.9	9.1	4.1	5.6	992.5	3.6
Geisenheim	14.2	10.0	6.1	537.5	74.0	1001.3	9.7	4.3	5.4	1002.6	2.8
Simmern	12.4	8.5	5.0	623.9	79.7	963.5	9.2	4.2	5.2	1019.2	2.9
Roxheim	14.1	9.7	5.1	527.6	74.5	999.5	9.5	3.5	5.0	1010.9	1.8
Kaiserslautern	14.0	9.5	5.3	691.5	77.3	982.8	10.3	4.1	5.1	1003.1	1.5
Pirmasens	12.9	8.1	3.5	890.5	84.3	982.9	10.0	4.2	4.8	1004.7	0.8
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
Gschwend	14.4	9.5	5.3	1067.3	80.3	958.8	9.7	4.7	5.1	951.0	1.7
Karlsruhe	16.8	12.1	7.9	786.2	75.2	1000.0	10.6	4.7	5.3	955.8	3.1
Mannheim	16.6	11.8	7.4	652.4	74.6	1005.3	10.4	4.2	8.3	995.4	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
Beerfeld	11.8	8.1	5.0	1001.5	x	958.2	9.1	4.3	6.2	1025.1	1.9
Wertheim	14.2	9.4	5.3	663.3	77.5	998.0	9.9	4.6	4.6	1078.2	0.6
Alzey	13.4	9.4	5.5	548.3	77.5	989.0	9.9	4.4	4.7	1060.8	1.4
Bergzabern	14.1	10.0	6.1	804.4	78.6	990.7	10.4	4.5	5.3	1127.1	2.6
Baden-Baden	15.8	10.8	6.1	1293.6	79.8	987.1	10.8	4.7	5.1	1028.5	1.8
Worms	14.7	10.5	6.6	587.1	75.6	1004.4	10.3	4.2	5.2	1040.2	1.4
Heidelberg	16.2	12.2	8.4	738.0	72.4	1003.9	10.2	4.4	5.0	1014.0	1.5
Herrenalb	15.1	10.0	6.1	1460.9	77.6	973.0	9.8	3.8	5.0	923.9	1.9
Schömberg	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

Tabelle 8: Trendwerte von 11 meteorologischen Größen für die Hauptstationen im Basisszenarium

Station	Tmax K	Tmit K	Tmin K	Nied mm	Relf %-P.	Ludr hPa	Dadr hPa	Sonne h	Bewo -/8	Gstr J/cm ²	Wind m/s
Koblenz	0.3	0.7	1.0	71.1	-2.6	0.7	0.2	-0.4	0.1	-47.0	0.2
Lohr	1.2	0.7	1.2	96.9	-0.7	1.0	0.3	-0.3	-0.0	-45.6	-0.5
Kahl/Main	1.3	1.1	1.2	25.8	0.7	0.9	0.3	-0.2	-0.0	-26.5	-0.0
Kl. Feldberg Ts.	1.0	0.7	0.9	48.6	-0.9	1.0	0.5	-0.2	0.1	-35.0	0.1
Wiesbaden	0.9	1.1	1.3	50.6	-1.9	1.1	0.2	-0.3	0.3	-18.7	0.0
Waldems	0.9	0.7	1.1	68.4	-1.3	1.0	0.6	-0.1	0.1	9.3	-0.2
Geisenheim	0.8	0.9	1.4	10.6	-1.2	0.8	0.3	-0.3	0.3	107.2	-0.3
Simmern	0.9	0.8	1.1	73.4	-2.3	0.9	0.3	-0.2	0.2	-31.7	0.1
Roxheim	0.8	0.9	1.0	50.3	0.3	0.1	0.5	-0.1	-0.2	-26.6	-0.0
Kaiserslautern	1.1	1.0	0.9	47.2	-0.9	1.1	0.2	-0.2	-0.0	-26.1	-0.1
Pirmasens	1.1	0.8	1.5	135.5	-1.6	1.1	-0.1	-0.1	0.1	-10.3	-0.2
Eberbach/Neckar	0.7	1.1	1.7	113.9	-1.6	0.9	0.1	-0.4	-0.0	-9.7	-0.2
Eppingen	1.4	1.4	1.8	115.0	-1.3	0.9	0.2	-0.1	0.1	-16.3	-0.3
Gschwend	1.3	1.4	1.6	116.5	-0.6	0.9	0.1	-0.3	0.4	-58.4	-0.1
Karlsruhe	1.3	1.4	1.8	92.9	-1.7	0.5	0.6	-0.5	0.1	-32.1	-0.3
Mannheim	1.0	1.0	1.3	60.8	-1.6	0.9	0.5	-0.1	0.2	50.7	-0.1
Öhringen	1.3	1.2	1.3	85.5	-2.0	1.1	0.4	-0.5	0.2	-78.9	-0.6
Beerfeld	1.2	1.2	1.0	94.9	x	1.1	0.4	-0.1	0.4	-19.2	0.1
Wertheim	1.5	1.4	1.3	62.4	-0.6	1.2	0.5	-0.6	0.0	-64.3	0.1
Alzey	1.2	1.2	1.2	95.0	-1.8	1.3	-0.0	-0.2	-0.0	-15.6	0.5
Bergzabern	0.6	0.9	1.3	61.3	-2.3	1.0	-0.0	-0.5	0.4	-21.6	-0.2
Baden-Baden	1.1	1.4	0.9	165.1	0.1	1.4	0.4	-0.4	0.0	-46.4	0.1
Worms	0.9	1.1	1.0	30.4	-0.3	0.5	0.5	-0.3	0.5	-32.1	0.2
Heidelberg	1.1	1.3	1.2	61.4	-1.3	1.1	0.4	-0.5	0.2	-55.9	0.0
Herrenalb	0.9	1.2	1.2	98.1	0.3	1.4	0.2	-0.6	0.4	-75.3	0.2
Schömberg	0.9	1.2	1.3	110.1	-1.8	1.3	0.5	-0.3	0.2	-38.9	0.0
Heilbronn	1.0	1.2	1.3	39.1	-1.1	1.2	0.3	-0.2	-0.1	-19.0	-0.2
Buchen	1.5	1.3	1.1	11.4	-0.9	1.2	0.1	-0.4	0.3	-52.2	-0.1
Neudena	1.2	1.2	1.2	16.0	0.3	1.2	0.3	-0.1	0.1	-18.4	-0.1
Murrhardt	1.2	1.1	1.6	13.7	-3.1	0.9	0.3	-0.1	0.0	-5.1	0.0
Dobel	1.1	0.9	0.8	82.6	x	1.4	0.2	-0.1	0.5	-13.3	-0.2

grau = gesicherte Trends mit mindestens 90% statistischer Sicherheit

6.2 Verhältnisse im Zukunftsszenarium 2001 bis 2055

Die im Basisszenarium beschriebenen Entwicklungen setzen sich in unterschiedlicher Ausprägung weiter fort. Als Folge der berechneten Temperaturänderungen ergeben sich für die letzten 10 Jahre des Zukunftsszenariums im Vergleich zum Basisszenarium bedeutende Änderungen (vgl. Tabelle 9):

Die Temperatur liegt im Mittel um 1.5 K höher, daher verringert sich die Anzahl der kalten Ereignistage weiter, die der warmen wird weiter erhöht. Die Niederschlagssumme nimmt mit sich abschwächenden Tendenz weiter zu. Im Sommer geht der Änderungsbetrag deutlich zurück, während im Winter weiterhin Zunahmen ausgewiesen werden. Wie der Luftdruck erhöht sich der Wasserdampfdruck weiter, wird jedoch durch die Temperaturerhöhung überkompensiert und in der Folge sinkt die relative Luftfeuchte. Möglicherweise im Zusammenhang mit einer Erhöhung der Westwindwetterlagen setzt sich die Verringerung der Globalstrahlung verstärkt fort. Passend dazu sinkt auch die Sonnenscheindauer weiter ab, allerdings bei praktisch unveränderten Werten für den Bedeckungsgrad. Die unterschiedlichen Entwicklungen in den einzelnen Regionen sind vielfach durch das Relief geprägt.

Tabelle 9: Vergleich der mittleren Verhältnisse zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55

Met. Größe		Mittelwert BASZ	Mittel Trend BASZ	Mittelwert 2046/55	Differenz zum BASZ
Tmax	°C	13.5	1.1	15.2	1.7
Tmit	°C	9.3	1.1	10.7	1.5
Tmin	°C	5.4	1.4	6.8	1.4
Niederschlag	mm	778.2	64.1	800.8	22.6
Rel. Luftfeuchte	%	77.5	-1.1	77.2	-0.3
Luftdruck	hPa	986.5	0.9	987.8	1.4
Wasserdampfdruck	hPa	9.6	0.3	9.9	0.2
Sonnenscheindauer	h	4.4	-0.3	4.3	-0.2
Bedeckungsgrad	-/8	5.4	0.1	5.4	-0.0
Globalstrahlung	J/cm ²	1016.7	-22.8	953.0	-63.8
Windgeschwindigkeit	m/s	2.2	-0.1	2.1	-0.1

In der Tabelle 10 und der Tabelle 11 sind für alle meteorologischen Größen die Mittelwerte für den Zeitraum 2046 bis 2055 sowie die Trends über den Gesamtzeitraum 2001 bis 2055 und deren statistische Sicherung für die im Untersuchungsgebiet liegenden meteorologischen Hauptstationen angegeben.

Tabelle 10: Jahresmittelwerte bzw. -summen von 11 meteorologischen Größen für die Hauptstationen im transienten Zukunftsszenarium

Station	Tmax °C	Tmit °C	Tmin °C	Nied mm	Relf %	Ludr hPa	Dadr hPa	Sonn h	Bewo -/8	Gstr J/cm ²	Wind m/s
Koblenz	16.0	11.6	7.7	644.7	71.3	1005.7	9.8	3.7	5.8	938.6	0.7
Lohr	15.2	9.9	5.8	882.7	78.4	997.0	9.9	3.8	5.6	944.1	0.6
Kahl/Main	15.3	11.3	7.2	728.3	72.6	1001.8	10.1	4.2	5.5	973.9	1.9
Kl. Feldberg Ts.	10.3	6.8	4.0	1037.6	87.1	923.1	8.8	3.9	5.7	896.1	4.6
Wiesbaden	15.5	11.1	7.4	681.8	74.7	999.0	10.2	3.9	5.5	972.4	1.5
Waldems	13.3	9.3	5.7	792.2	76.6	960.1	9.6	4.0	5.6	971.7	3.6
Geisenheim	15.4	11.1	7.3	543.5	73.8	1002.3	10.0	4.1	5.5	1032.5	2.6
Simmern	13.6	9.6	6.1	679.0	78.5	964.6	9.5	4.0	5.3	972.7	3.0
Roxheim	15.3	10.8	6.2	568.3	74.9	1000.2	9.9	3.4	4.9	970.7	1.8
Kaiserslautern	15.3	10.7	6.3	748.7	77.1	984.0	10.5	4.0	5.1	964.1	1.5
Pirmasens	14.2	9.2	4.8	1015.2	83.5	984.1	10.0	4.1	4.8	975.9	0.8
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
Gschwend	14.4	9.5	5.3	1067.3	80.3	958.8	9.7	4.7	5.1	951.0	1.7
Karlsruhe	16.8	12.1	7.9	786.2	75.2	1000.0	10.6	4.7	5.3	955.8	3.1
Mannheim	16.6	11.8	7.4	652.4	74.6	1005.3	10.4	4.2	8.3	995.4	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
Beerfeld	13.2	9.4	6.0	1125.9	78.1	959.6	9.5	4.2	6.4	994.4	1.9
Wertheim	15.7	10.7	6.5	726.2	77.4	999.4	10.1	4.2	4.6	1013.8	0.6
Alzey	14.8	10.6	6.6	609.7	76.7	990.4	10.1	4.3	4.7	1022.3	1.7
Bergzabern	15.2	11.1	7.4	866.3	77.4	991.9	10.6	4.2	5.4	1086.6	2.5
Baden-Baden	15.8	10.8	6.1	1293.6	79.8	987.1	10.8	4.7	5.1	1028.5	1.8
Worms	15.9	11.7	7.6	612.4	75.9	1005.3	10.7	3.9	5.4	992.0	1.4
Heidelberg	16.2	12.2	8.4	738.0	72.4	1003.9	10.2	4.4	5.0	1014.0	1.5
Herrenalb	15.1	10.0	6.1	1460.9	77.6	973.0	9.8	3.8	5.0	923.9	1.9
Schömborg	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

Tabelle 11: Trendwerte von 11 meteorologischen Größen für die Hauptstationen im transienten Zukunftsszenarium

Station	Tmax K	Tmit K	Tmin K	Nied mm	Relf %-P.	Ludr hPa	Dadr hPa	Sonne h	Bewo -/8	Gstr J/cm ²	Wind m/s
Koblenz	1.3	1.2	1.2	-15.2	0.1	-0.3	0.2	-0.1	-0.1	-61.4	0.0
Lohr	1.3	1.2	1.2	117.8	0.4	-0.0	0.1	-0.1	0.0	-61.0	-0.0
Kahl/Main	1.3	1.2	1.1	50.3	0.5	-0.1	0.2	-0.1	-0.1	-75.8	0.0
Kl. Feldberg Ts.	1.3	1.2	1.2	5.5	-0.1	0.0	0.3	-0.1	-0.1	-57.1	0.2
Wiesbaden	1.3	1.2	1.1	44.7	0.4	0.0	0.3	-0.1	0.0	-56.6	-0.1
Waldems	1.3	1.2	1.3	0.2	-0.0	-0.0	0.3	-0.0	-0.0	-52.8	0.2
Geisenheim	1.3	1.2	1.2	10.1	0.7	-0.2	0.3	-0.1	-0.1	-53.4	-0.0
Simmern	1.3	1.2	1.2	28.8	-0.1	-0.1	0.2	-0.1	-0.0	-61.6	0.1
Roxheim	1.3	1.2	1.1	42.4	0.6	-0.3	0.3	-0.0	-0.1	-54.1	0.0
Kaiserslautern	1.3	1.2	1.1	53.8	0.7	-0.1	0.3	-0.1	-0.1	-52.3	0.0
Pirmasens	1.4	1.2	1.2	107.4	0.0	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-48.4	0.1
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
Gschwend	1.5	1.2	1.2	34.2	-0.2	0.1	0.2	0.1	-0.2	-54.4	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
Mannheim	1.3	1.2	1.1	27.7	0.5	0.0	0.2	-0.1	-0.1	-56.2	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
Beerfeld	1.3	1.1	1.2	135.5	0.2	0.1	0.3	0.0	-0.0	-42.8	0.0
Wertheim	1.3	1.2	1.1	58.6	0.4	0.1	0.2	-0.1	-0.1	-63.2	0.1
Alzey	1.3	1.2	1.2	21.6	0.3	-0.1	0.3	-0.1	-0.1	-62.3	0.0
Bergzabern	1.3	1.2	1.1	64.1	0.1	0.1	0.3	-0.1	-0.1	-60.1	0.0
Baden-Baden	1.3	1.2	1.1	10.3	-0.1	0.0	0.3	0.1	-0.2	-30.2	0.0
Worms	1.3	1.2	1.1	20.7	0.8	-0.2	0.3	-0.1	-0.0	-64.4	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
Herrenalb	1.3	1.2	1.2	34.5	-0.2	0.1	0.2	0.0	-0.1	-43.9	0.1
Schöenberg	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

grau = gesicherte Trends mit mindestens 90% statistischer Sicherheit

6.3 Extreme und deren Veränderung

Mit der Auswertung der Ereignistage im Basis- und Zukunftsszenarium ergibt sich die Möglichkeit auch die Veränderung von Extremen zu erfassen. Insbesondere der Vergleich der temperaturgebundenen Ereignistage zeigt bereits im Mittel erhebliche Differenzen, die von knapp 30% (Rückgang Frosttage) über 43% (Rückgang Eistage) und 48% (Zunahme Sommertage) bis zu 120% (Zunahme der heißen Tage) reichen (vgl. Tabelle 12). Entsprechend stark sind auch die Verschiebungen beim ersten bzw. letzten Eintreten dieser Ereignistage. Da die Verschiebungen gegensinnig wirken, also z. B. eine Verfrühung des ersten mit einer Verspätung des letzten Auftretens auftritt, addieren sie sich in der Wirkung auf die Länge der „Saison“, also die Zeitspanne in der diese Ereignisse auftreten. Bei den heißen Tagen addieren sich die Verschiebungen auf annähernd 50 Tage. Bei einer vergleichsweise kurzen Saison von nur 36 Tagen entspricht dies einer Zunahme um 138%. Einzige Ausnahme sind die Eistage bei denen sich das letzte Eintreten zwar geringer, aber ebenso wie das erste Auftreten im Jahr verspätet. In der Summe verkürzt sich die Zeitspanne in der Eistage auftreten trotzdem deutlich um 14 Tage (-22%).

Dagegen erscheinen die Veränderungen für die restlichen Ereignistage zunächst weniger spektakulär (vgl. Tabelle 13). Die Anzahl der Tage mit wenig Niederschlag steigt um 5%, bei gleichzeitiger Abnahme der Andauern. Die Zahl der Tage mit viel Niederschlag steigt im Mittel geringfügig. Die relative Änderung der Tage mit viel Sonne (Abnahme) und wenig Sonne (Zunahme), viel Bewölkung (Zunahme) und wenig Bewölkung (ebenfalls Zunahme) liegen mit etwa 15% alle in derselben Größenordnung. Allerdings werden in den Karten regional begrenzt natürlich deutlich stärkere Änderungen ausgewiesen. Dazu kommt bei den Andauern der Umstand, dass jeder Einzeltag mit der entsprechenden Charakteristik in die Berechnung des Andauerverhaltens eingeht, wodurch die Verhältnisse eher nivelliert werden.

Insgesamt zeigt die Zusammenschau aller Karten häufig markante Änderungen immer in denselben Regionen auf, vielfach in direkter Nachbarschaft zu Änderungen in der Gegenrichtung. Dieses hohe Änderungspotenzial, kann als eine höhere Gefährdung durch Extremereignisse interpretiert werden.

7 Klimatische Wasserbilanz

Die klimatische Wasserbilanz dient zur Kennzeichnung des örtlichen Wasserhaushalts bei potenzieller Evapotranspiration (Ep), also unter der Annahme einer immer ausreichenden Wasserverfügbarkeit um die klimatisch höchstmögliche Verdunstung zu gewährleisten. Bestimmt wird die Differenz aus Niederschlagsmenge und potenzieller Evapotranspiration, die nach Turc-Ivanov berechnet wird, da die notwendigen Eingangsdaten unmittelbar zur Verfügung stehen. Die Ergebnisgenauigkeit dieser Methode wird charakterisiert durch eine gute Korrelation der Ergebnisse im Vergleich zu langjährigen Messreihen (vgl. DVWK, 1996). Neben der Vegetation wird die Verdunstung auch durch Neigung und Exposition der betrachteten Fläche beeinflusst. In Abhängigkeit von der Neigung und Orientierung der Fläche ergeben sich besonders an strahlungsintensiven Tagen z. T. deutliche Erhöhungen der potenziellen Evapotranspiration. Für eine differenzierte Verdunstungsberechnung von einzelnen Lagen können die Komponenten der Globalstrahlung auf geneigte Verhältnisse umgerechnet werden. Für eine überschlägige Wasserhaushaltsbilanzierung werden diese Einflüsse jedoch vernachlässigt.

Zu erwarten ist eine räumliche Verteilung der Werte der klimatischen Wasserbilanz, die ausgehend von der Niederschlagsverteilung, durch die Temperaturverhältnisse und deren Änderung modifiziert wird und dadurch eine Identifizierung von Regionen mit einer möglichen Gefährdung durch ein verringertes Wasserangebot ermöglicht.

Das BASZ zeigt für das Gesamtjahr (vgl. Abb. 23) positive Werte der klimatischen Wasserbilanz in den niederschlagsreicheren Gebieten nördlicher Schwarzwald, Odenwald und im Bereich der Löwensteiner Berge. Aber auch Teile des Pfälzer Walds, Spessart und hoher Taunus heben sich deutlich hervor. Negative Bilanzen treten im Mittelrheingebiet, im Rhein-Main-Tiefland und vor allem im nördlichen Oberrheintiefland mit Werten bis zu -160 mm auf. Hier gibt es auch vermehrt Bereiche mit einem leichten negativen Trend, ansonsten ist die Trendentwicklung positiv mit im Mittel +48 mm. Das ZUSZ schreibt diese Entwicklung mit etwas verringerten Werten fort, wobei Pfälzer Wald, Odenwald und Spessart stärker profitieren.

Klimatische Wasserbilanz

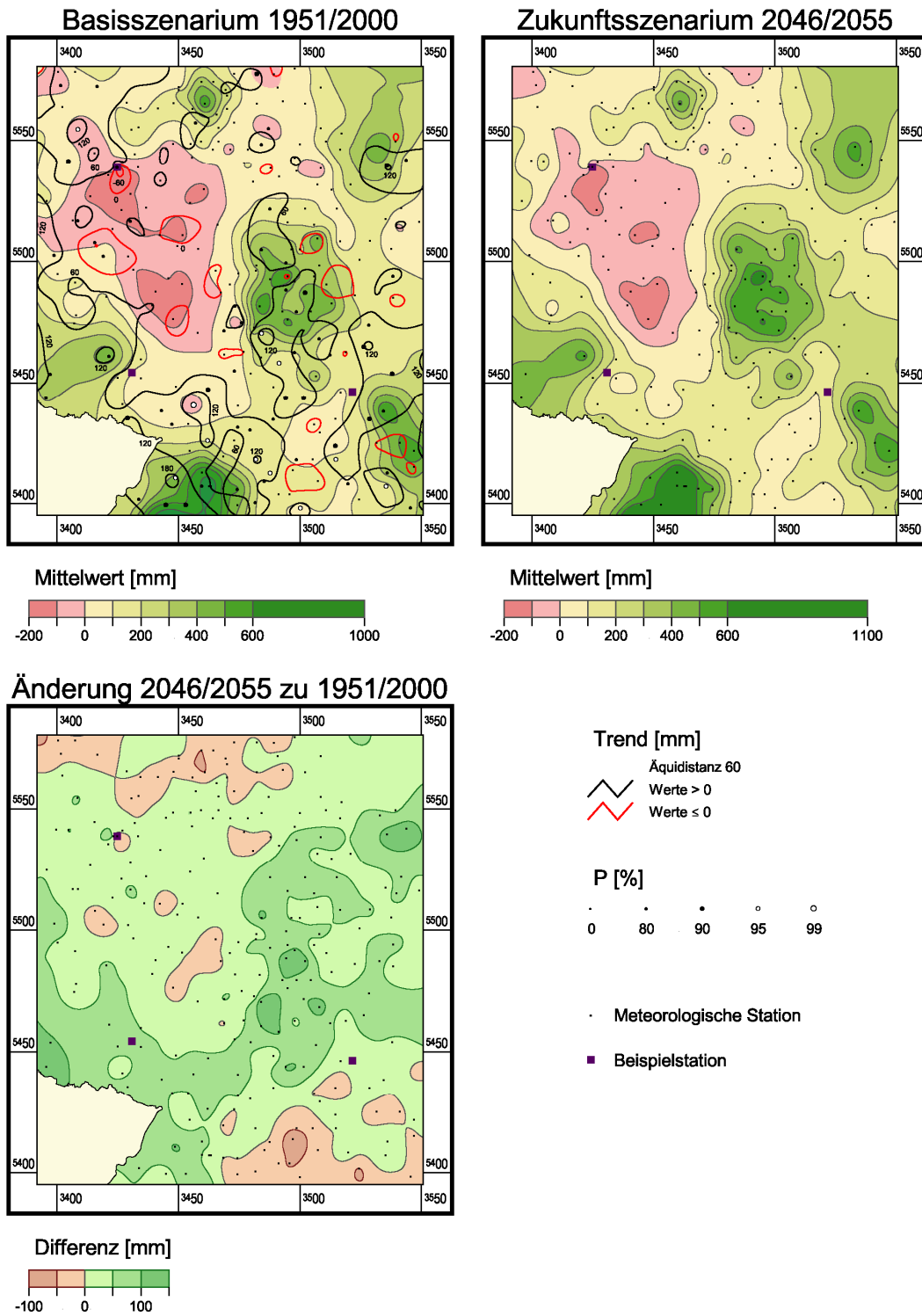


Abb. 23: Mittelwerte, Trends und Entwicklung der klimatischen Wasserbilanz in SWD

Zur Charakterisierung der innerjährlichen Differenzierung sind die Auswertungen auch für die Jahreszeiten durchgeführt worden. Die entsprechenden Kartendarstellungen finden sich zusammengefasst in Anhang I (A30, A31, A32, A33).

Im Frühjahr sind die Bereiche mit negativer Wasserbilanz deutlich ausgeweitet, das Mittel für den gesamten Ausschnitt ist aber nur leicht negativ. Räumliche Verteilung der Werte, Trendentwicklung und Verteilung der ausgewiesenen Differenzen ähneln den Verhältnissen für das Gesamtjahr sehr stark. Im Mittel wird im ZUSZ eine weitere, verringerte Zunahme ausgewiesen.

Der Sommer zeigt die höchsten und fast flächendeckend negative Werte. Die Maximaldefizite im BASZ mit mehr als 150 mm finden sich im Nordwesten des nördlichen Oberrheintieflands. Der Trend ist fast flächendeckend negativ. Dagegen weist das ZUSZ zum Ende des Szenarienzeitraums im Mittel eine leichte Zunahme aus, d.h. die Defizitwerte sinken, vor allem im mittleren Bereich des Ausschnitts, während im Südwesten und tendenziell im Norden ein weiterer Rückgang ausgewiesen wird.

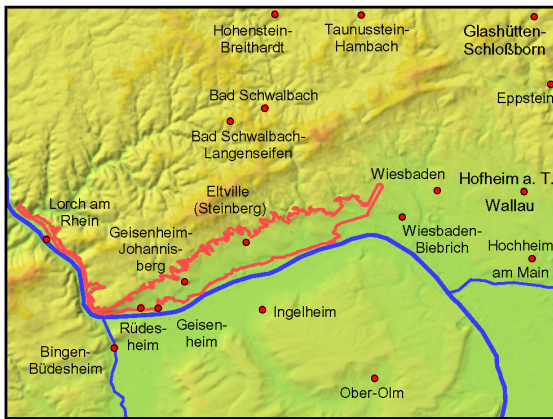
Im Herbst wird durchgängig eine positive Wasserbilanz ausgewiesen, auch die Trendwerte sind positiv und steigen nach Südwesten an. Auch hier zeigt das ZUSZ fast durchwegs negative Differenzwerte aus, d. h. die positive Wasserbilanz im Herbst vermindert sich.

Der Winter weist die größten Überschüsse auf bei fast flächendeckenden positiven, aber in der Regel wenig gesicherten Trendwerten. Das ZUSZ zeigt insgesamt eine weitere Zunahme, wobei im Norden geringe Abnahmen auftreten und nach Süden die Zunahme größer wird.

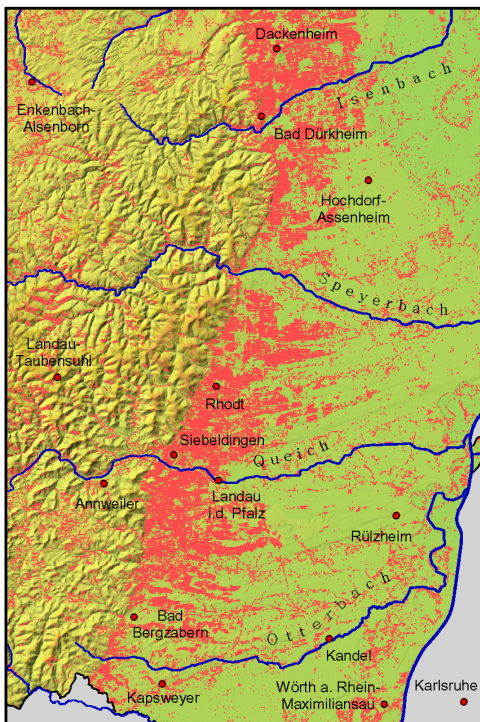
8 Die Untersuchungsgebiete

Für die Untersuchung ausgewählt wurden die Weinbaugebiete Rheingau, Pfalz und Württemberg mit den Beispielstationen Geisenheim, Landau und Heilbronn. Die bereits in Abb. 2 skizzierten Bearbeitungsausschnitte werden in Abb. 24 näher vorgestellt. Die Beispielstationen und alle im BASZ bzw. ZUSZ verfügbaren Stationen sind angegeben. Für den Rheingau ist eine Umhüllende der Einzellagen (nach HLUG, 2004) zur Orientierung angegeben. Für die Pfalz und Württemberg sind stattdessen die nach LfU (2002) in die Landnutzungs-kategorie Wein/Obstplantage fallenden Flächen ausgewiesen (Auflösung 30 x 30 m).

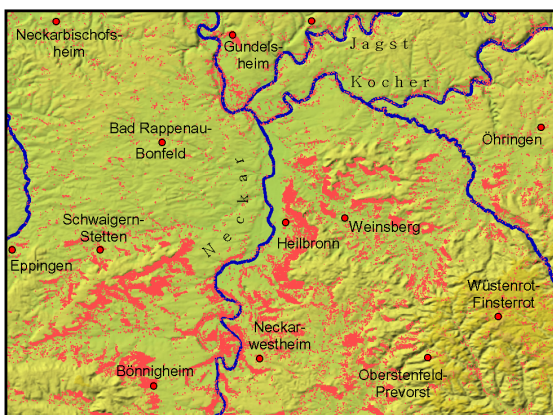
Beispielgebiete



Rheingau



Pfalz



Württemberg

- Meteorologische Station
- Umhüllende der Einzellagen im Rheingau
- Landnutzung: Wein, Obstplantage

Höhe [m]

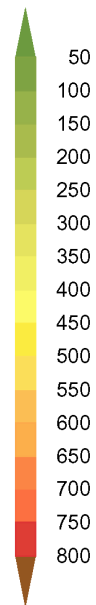


Abb. 24: Übersicht der ausgewählten Weinbaugebiete

8.1 Mittlere Verhältnisse und Trends

Für die 11 meteorologischen Größen werden die Verhältnisse an der Station Geisenheim in Tabelle 14 angegeben, entsprechend für Landau in Tabelle 15 und in Tabelle 16 für Heilbronn. Geisenheim zeigt bei den Temperaturen etwas niedrigere Werte, ebenso bei den Trendwerten. Die ausgewiesene Zunahme im ZUSZ ist gleich. Besonders in Geisenheim kann sich die bereits unterdurchschnittliche Niederschlagssumme deutlich weiter verringern. Der Trend im BASZ ist vergleichsweise niedrig, aber noch positiv. Zum Ende des Szenarienzeitraums wird dagegen eine Abnahme von 29 mm ausgewiesen. Heilbronn zeigt zwar eine unterdurchschnittliche Zunahme im ZUSZ, profitiert aber von den höchsten Ausgangswerten. Die Station Landau gewinnt im ZUSZ am deutlichsten hinzu.

Im Jahresgang der Änderung der mittleren Monatssummen des Niederschlags (Tabelle 17 bis Tabelle 19) zeigen die 3 Stationen ein ähnliches Verhalten mit einigen Besonderheiten. Die Monate Januar bis März zeigen generell starke Zunahmen. Dies führt zur Erhöhung der Wintersumme, selbst wenn – wie in Landau - der Dezember eine starke Abnahme aufweist. Lediglich in Geisenheim mit dem maximalen Änderungsbetrag im Dezember verringert sich die Wintersumme insgesamt leicht.

Tabelle 14: Vergleich der mittleren Verhältnisse zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55 an der Station Geisenheim

Met. Größe		Mittelwert BASZ	Mittel Trend BASZ	Mittelwert 2046/55	Differenz zum BASZ
Tmax	°C	14.2	0.8	15.8	+1.6
Tmit	°C	10.0	0.9	11.4	+1.4
Tmin	°C	6.1	1.4	7.6	+1.5
Niederschlag	mm	537.5	10.6	509.0	-28.5
Rel. Luftfeuchte	%	74.0	-1.1	74.3	+0.3
Luftdruck	hPa	1001.3	0.8	1002.5	1.2
Wasserdampfdruck	hPa	9.7	0.3	10.0	0.4
Sonnenscheindauer	h	4.3	-0.3	4.1	-0.2
Bedeckungsgrad	-/8	5.4	0.3	5.4	+0.0
Globalstrahlung	J/cm ²	1002.6	107.2	998.5	-4.1
Windgeschwindigkeit	m/s	2.8	-0.3	2.6	-0.2

Tabelle 15: Vergleich der mittleren Verhältnisse zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55 an der Station Landau

Met. Größe		Mittelwert BASZ	Mittel Trend BASZ	Mittelwert 2046/55	Differenz zum BASZ
Tmax	°C	14.6	1.2	16.4	+1.7
Tmit	°C	10.0	1.2	11.6	+1.5
Tmin	°C	5.7	1.6	7.2	+1.5
Niederschlag	mm	665.4	71.8	713.6	48.3
Rel. Luftfeuchte	%	77.7	-1.5	77.2	-0.5
Luftdruck	hPa	996.0	0.7	997.4	+1.4
Wasserdampfdruck	hPa	10.2	0.4	10.5	+0.3
Sonnenscheindauer	h	4.6	-0.3	4.4	-0.2
Bedeckungsgrad	-/8	5.2	0.1	5.1	-0.1
Globalstrahlung	J/cm ²	1022.0	-26.9	954.2	-67.7
Windgeschwindigkeit	m/s	2.4	-0.2	2.3	-0.1

Tabelle 16: Vergleich der mittleren Verhältnisse zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55 an der Station Heilbronn

Met. Größe		Mittelwert BASZ	Mittel Trend BASZ	Mittelwert 2046/55	Differenz zum BASZ
Tmax	°C	14.7	1.0	16.3	+1.6
Tmit	°C	10.0	1.2	11.6	+1.5
Tmin	°C	5.9	1.3	7.3	+1.4
Niederschlag	mm	749.8	39.1	764.1	+14.3
Rel. Luftfeuchte	%	79.4	-1.1	79.0	-0.3
Luftdruck	hPa	995.9	1.2	997.4	+1.5
Wasserdampfdruck	hPa	10.6	0.3	10.9	+0.2
Sonnenscheindauer	h	4.5	-0.2	4.4	-0.1
Bedeckungsgrad	-/8	5.0	-0.1	4.9	-0.1
Globalstrahlung	J/cm ²	1064.5	-19.0	1012.9	-51.7
Windgeschwindigkeit	m/s	1.4	-0.2	1.3	-0.2

Im Juli zeigen die Stationen eine Zunahme der Niederschlagsmenge, die jedoch durch Rückgänge in den anderen Sommermonaten ausgeglichen wird, so dass in Geisenheim und Heilbronn eine Abnahme der Sommersumme im ZUSZ ausgewiesen wird. Da in Landau auch im August noch eine Zunahme auftritt, ist die Änderung der Sommersumme hier positiv.

Tabelle 17: Veränderung der mittleren Monatssummen des Niederschlags im ZUSZ (2046/2055 – 1951/2000) an der Station Geisenheim

Niederschlag	Monat											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Änderung in mm	5.8	5.7	6.2	-6.0	-2.1	-4.2	4.8	-13.3	-6.6	4.7	-8.1	-15.6
Änderung in %	14.8	16.7	17.9	-16.6	-4.4	-7.4	8.4	-25.4	-15.1	10.8	-17.3	-32.7

Tabelle 18: Veränderung der mittleren Monatssummen des Niederschlags im ZUSZ (2046/2055 – 1951/2000) an der Station Landau

Niederschlag	Monat											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Änderung in mm	13.3	18.2	16.4	-4.3	10.1	-8.7	7.9	6.5	-7.4	6.8	2.2	-12.7
Änderung in %	25.2	36.8	35.1	-10.4	16.2	-12.3	13.7	11.6	-14.4	12.9	3.7	-19.1

Tabelle 19: Veränderung der mittleren Monatssummen des Niederschlags im ZUSZ (2046/2055 – 1951/2000) an der Station Heilbronn

Niederschlag	Monat											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Änderung in mm	18.6	16.4	11.2	-12.1	-0.1	-14.1	9.9	-4.9	-14.2	0.3	2.9	0.3
Änderung in %	34.6	32.0	21.4	-23.6	-0.2	-16.8	13.5	-7.0	-23.9	0.5	4.9	0.5

Bemerkenswert sind noch die Globalstrahlungswerte in Geisenheim mit einem überdurchschnittlich positiven Trend im BASZ im Vergleich zu negativen Trends an den beiden anderen Stationen. Auch die Veränderung im ZUSZ bleibt von Landau und Heilbronn deutlich unterschieden. Während diese eher eine durchschnittliche Verringerung zeigen, ist die Änderung in Geisenheim vernachlässigbar.

8.2 Extreme und deren Veränderung

Wie bereits bei der Beschreibung der allgemeinen Verhältnisse in Südwestdeutschland ist auch an den Beispielstationen mit der generell zu beobachtenden Erwärmung im Basis- und Zukunftsszenarium drastische Veränderungen bei den temperaturgebundenen Ereignistagen festzustellen. Die Anzahl der heißen Tage verdoppelt sich annähernd, die Sommertage nehmen um bis zu 50% zu und in dieser Größenordnung können die Eistage abnehmen. Die Verhältnisse an den 3 Beispielstationen sind in den Tabelle 20 bis Tabelle 22 angegeben.

Der Vergleich der Veränderungen im Gesamtgebiet und an den Beispielstationen zeigt, dass Landau am deutlichsten von der Zunahme der Temperaturen profitiert, die Zunahme der Anzahl von Sommertagen liegt (bei weiter verlängerter Saison) höher und die Zunahme der Anzahl von heißen Tagen ist überdurchschnittlich, eine verlängerte Saison resultiert aus der starken Verfrühung des ersten heißen Tages.

Tabelle 20: Vergleich temperaturgebundener Ereignistage zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55 an der Station Geisenheim

Ereignis	Mittelwert BASZ Datum/Tage	Mittelwert 2046/55 Datum/Tage	Differenz zum BASZ Tage
Anzahl Frosttage Tage	60.7	44.8	-15.9
Erster Frosttag Tag	31. Oktober	20. November	+19.8
Letzter Frosttag	10. April	06. April	-4.2
Andauer	3.6	2.9	-0.8
Anzahl Eistage Tage	13.6	8.7	-4.9
Erster Eistag	12. Dezember	03. Januar	+22.4
Letzter Eistag	06. Februar	08. Februar	+2.6
Andauer	2.4	1.8	-0.6
Anzahl Sommertage Tage	40.8	60.4	+19.6
Erster Sommertag	10. Mai	28. April	-11.7
Letzter Sommertag	10. September	05. Oktober	+24.7
Andauer	3.0	2.9	-0.1
Anzahl heiße Tage Tage	7.8	15.5	+7.7
Erster heißer Tag	28. Juni	02. Juni	-26.2
Letzter heißer Tag	09. August	02. September	+24.1
Andauer	1.5	1.7	+0.2

Tabelle 21: Vergleich temperaturgebundener Ereignistage zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55 an der Station Landau

Ereignis		Mittelwert BASZ Datum/Tage	Mittelwert 2046/55 Datum/Tage	Differenz zum BASZ Tage
Anzahl Frosttage	Tage	73.5	49.0	-24.5
Erster Frosttag	Tag	26. Oktober	12. November	+17.6
Letzter Frosttag		17. April	13. April	-3.7
Andauer		3.9	3.0	-0.9
Anzahl Eistage	Tage	13.3	7.2	-6.1
Erster Eistag		12. Dezember	29. Dezember	+16.9
Letzter Eistag		06. Februar	10. Februar	+4.7
Andauer		2.7	1.8	-0.9
Anzahl Sommertage	Tage	47.2	70.4	+23.2
Erster Sommertag		05. Mai	20. April	-15.0
Letzter Sommertag		19. September	11. Oktober	+22.1
Andauer		3.0	3.0	+0.0
Anzahl heiße Tage	Tage	10.6	20.8	+10.2
Erster heißer Tag		22. Juni	20. Mai	-32.8
Letzter heißer Tag		15. August	08. September	+23.4
Andauer		1.7	2.0	+0.3

Tabelle 22: Vergleich temperaturgebundener Ereignistage zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55 an der Station Heilbronn

Ereignis		Mittelwert BASZ Datum/Tage	Mittelwert 2046/55 Datum/Tage	Differenz zum BASZ Tage
Anzahl Frosttage	Tage	70.0	46.1	-23.9
Erster Frosttag	Tag	26. Oktober	18. November	+23.0
Letzter Frosttag		12. April	04. April	-8.2
Andauer		3.8	3.2	-0.6
Anzahl Eistage	Tage	13.6	7.7	-5.9
Erster Eistag		13. Dezember	05. Januar	+23.1
Letzter Eistag		04. Februar	04. Februar	-0.0
Andauer		2.7	2.1	-0.6
Anzahl Sommertage	Tage	49.3	66.3	+17.0
Erster Sommertag		02. Mai	23. April	-9.1
Letzter Sommertag		21. September	08. Oktober	+16.5
Andauer		2.9	3.0	+0.1
Anzahl heiße Tage	Tage	11.1	20.3	+9.2
Erster heißer Tag		18. Juni	29. Mai	-20.1
Letzter heißer Tag		16. August	08. September	+22.6
Andauer		1.7	2.0	+0.3

Die Veränderungen in Geisenheim und Heilbronn liegen in der Größenordnung der mittleren Veränderungen, wobei Geisenheim bei den Sommer- und heißen Tagen tendenziell mehr gewinnt als Heilbronn, dagegen sind bei den Frost- und Eistagen die Änderungsbeträge in Heilbronn deutlich höher. Bei den korrespondierenden Veränderungen der Saisonlängen zeigt Heilbronn hier sogar höhere Absolutbeträge als Landau.

Die Eistage bilden auch an den Stationen eine Ausnahme. Der letzte Eistag zeigt in Geisenheim eine leichte Verspätung, die in Landau bereits 5 Tage erreicht. Dennoch tritt an allen 3 Stationen eine deutliche Verkürzung auch der Zeitspanne auf in der Eistage vorzukommen, aufgrund der starken Verspätung des ersten Eistags im Jahr.

Die Ergebnisse für die Veränderungen bei den restlichen Ereignistagen werden in Tabelle 23 bis Tabelle 25 zusammengefasst. In Geisenheim weist das ZUSZ sogar einen leichten Rückgang bei der Anzahl der Tage mit viel Niederschlag aus, während die Änderung in Landau etwas höher ausfällt.

Tabelle 23: Vergleich weiterer Ereignistage zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55 an der Station Geisenheim

Ereignis		Mittelwert BASZ Tage	Mittelwert 2046/55 Tage	Differenz Tage
Tage ohne Niederschlag	Anzahl	211.3	213.4	+2.1
	Andauer	3.6	2.9	-0.7
Tage mit hohem Niederschlag	Anzahl	11.9	11.3	-0.6
	Andauer			
Feuchte Tage	Anzahl	32.1	26.2	-5.9
	Andauer	1.5	1.2	-0.3
Trockene Tage	Anzahl	12.2	14.3	+2.1
	Andauer	1.5	1.2	-0.3
Tage mit hohem Dampfdruck	Anzahl	41.2	44.5	3.3
	Andauer	2.6	1.9	-0.8
Tage ohne Sonnenschein	Anzahl	83.4	94.5	11.1
	Andauer	1.9	1.9	-0.1
Tage mit viel Sonne	Anzahl	11.9	8.6	-3.3
	Andauer	1.2	1.1	-0.1
Tage mit viel Bewölkung	Anzahl	57.2	58.0	+0.8
	Andauer	1.6	1.5	-0.1
Tage ohne Bewölkung	Anzahl	12.2	13.3	1.1
	Andauer	1.3	1.2	-0.1

Tabelle 24: Vergleich weiterer Ereignistage zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55 an der Station Landau

Ereignis		Mittelwert BASZ Tage	Mittelwert 2046/55 Tage	Differenz Tage
Tage ohne Niederschlag	Anzahl	214.7	226.3	+11.6
	Andauer	3.7	3.2	-0.5
Tage mit hohem Niederschlag	Anzahl	17.1	18.9	+1.8
	Andauer			
Feuchte Tage	Anzahl	50.6	39.4	-11.2
	Andauer	1.7	1.3	-0.4
Trockene Tage	Anzahl	3.9	6.5	+2.6
	Andauer	0.9	1.1	+0.2
Tage mit hohem Dampfdruck	Anzahl	56.9	60.2	+3.3
	Andauer	3.3	2.2	-1.1
Tage ohne Sonnenschein	Anzahl	50.3	69.2	+18.9
	Andauer	1.7	1.7	-0.1
Tage mit viel Sonne	Anzahl	12.7	10.5	-2.2
	Andauer	1.3	1.2	-0.1
Tage mit viel Bewölkung	Anzahl	31.8	34.7	+2.9
	Andauer	1.4	1.3	-0.1
Tage ohne Bewölkung	Anzahl	6.9	9.3	+2.4
	Andauer	1.0	1.1	+0.0

Tabelle 25: Vergleich weiterer Ereignistage zwischen Basisszenarium und dem Zeitraum 2046/55 an der Station Heilbronn

Ereignis		Mittelwert BASZ Tage	Mittelwert 2046/55 Tage	Differenz Tage
Tage ohne Niederschlag	Anzahl	199.0	205.0	+6.0
	Andauer	3.4	2.9	-0.5
Tage mit hohem Niederschlag	Anzahl	20.4	21.1	+0.7
	Andauer			
Feuchte Tage	Anzahl	75.7	69.4	-6.2
	Andauer	1.8	1.4	-0.4
Trockene Tage	Anzahl	3.7	6.0	+2.3
	Andauer	0.9	1.0	+0.1
Tage mit hohem Dampfdruck	Anzahl	69.3	75.3	+6.0
	Andauer	4.1	2.7	-1.4
Tage ohne Sonnenschein	Anzahl	24.9	32.7	+7.8
	Andauer	1.3	1.3	+0.0
Tage mit viel Sonne	Anzahl	4.2	5.2	+1.0
	Andauer	0.9	1.0	+0.2
Tage mit viel Bewölkung	Anzahl	57.4	61.0	+3.6
	Andauer	1.5	1.4	-0.1
Tage ohne Bewölkung	Anzahl	16.9	22.6	+5.7
	Andauer	1.3	1.3	-0.1

Dagegen ist die Abnahme der Anzahl der feuchten Tage und die Zunahme der Tage ohne Sonne deutlicher erhöht.

Eine Zusammenfassung der Veränderungen beim ersten und letzten Auftreten der temperaturgebundenen Ereignistage gibt die Abb. 25.

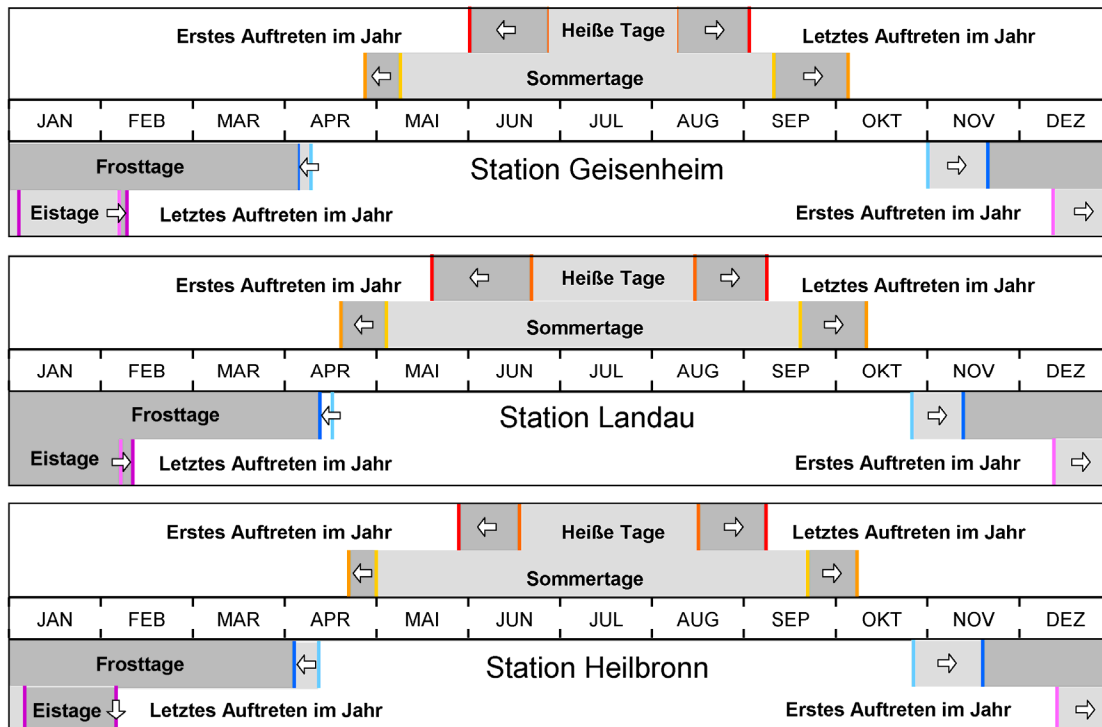


Abb. 25: Veränderung des ersten und letzten Auftretens im Jahr ausgewählter Ereignistage an den Stationen Geisenheim, Landau und Heilbronn

Neben den bereits genannten zusätzlichen, eher meteorologisch motivierten Kenngrößen, werden weitere für den Weinbau besonders relevante Kenngrößen ausgewertet. Über die Auswertung von Phänologiedaten erfolgt auf der Grundlage der Zukunftsszenarien eine Anbindung der Szenarien an die Rebphänologie. Damit ist es möglich die meteorologischen Kenngrößen in weinbaurelevanten Phasen zu bestimmen. Die Vorgehensweise und Ergebnisse werden in Kapitel 9.2 vorgestellt.

9 Reifeindex und Phänologie der Rebe

9.1 Huglin-Index

Die möglichen Veränderungen der Anbauwürdigkeit verschiedener Rebsorten wurde innerhalb von KLIMA 2050 mittels des skalaren Huglin-Index (Huglin, 1978, 1986) bewertet. Dabei repräsentieren höhere Indizes die Anbauwürdigkeit thermisch immer anspruchsvollerer Reben und schließen die Rebsorten mit geringeren thermischen Ansprüchen mit ein. In Tabelle 27 sind ausgewählte anbauwürdige Rebsorten den entsprechenden Index-Intervallen zugeordnet. Es sei hier noch auf weitere Klassifizierungsmöglichkeiten der thermischen Anbauwürdigkeit hingewiesen:

- minimale klimatologische Anforderungen für Weinbau in Tabelle 26
- Der Winkler-Index als gegenüber dem Huglin-Index vereinfachte Temperatursumme.

Tabelle 26: Minimale klimatologische Anforderungen für Weinbaugebiete	
Kriterium	Wertebereich
Sonnenscheindauer	> 1250 h
frostfreie Tage pro Vegetationsperiode	> 180 d
Durchschnittstemperatur gesamt Winter Sommer	> 8°C besser 9°C um 0°C um 20°C
optimale Durchschnittstemperatur Weisswein Rotwein	9,5°C – 11,5°C 10,5°C – 13,0°C
Tolerable Grenzwerte Wintertemperatur Sommertemperatur Niederschlag -minimal -optimal -maximal	-15°C bis -25°C ca. 45°C 300 mm 420 mm 700 mm

Der Huglin-Index ist eine Wärmesumme. Mit ihm kann nur ermittelt werden, ob der Wärmebedarf bestimmter Sorten unter den entsprechenden thermischen Bedingungen erfüllt wird oder nicht. Er stellt im wesentlichen nur eine Minimalbedingung dar, ob ein Anbau spezifischer Sorten aus thermischer Sicht potenziell möglich ist. Insbesondere lassen sich aus ihm keine Aussagen zu anderen Einflüssen (Auftreten und Wirkung von Schaderregern, Bodeneigenschaften, Qualitätsmerkmale und dgl.) oder etwaige Anbauempfehlungen ableiten.

9.1.1 Berechnung des Huglin-Index

Der Huglin-Index ist als eine Wärmesumme über Tagesmittel- und Tagesmaximumwerte der Lufttemperatur im Zeitraum April bis September definiert:

$$H := \sum_{t=01.apr}^{30.sep} K(x_{Lat}) \cdot \frac{(T_{mit}(t) - 10^{\circ}C) + (T_{max}(t) - 10^{\circ}C)}{2} \quad (1)$$

mit x_{Lat} Geographische Breite [$^{\circ}$ NB oder $^{\circ}$ SB]
 $K(x_{Lat})$ Breitengradabhängiger Korrekturfaktor [\pm] folgender Form:

$$K(x_{Lat}) := \begin{cases} 1.02 & |x_{Lat}| \leq 40^{\circ} \\ 1.02 + 0.04 * \frac{x_{Lat} - 40^{\circ}}{10^{\circ}} & 40^{\circ} < |x_{Lat}| < 50^{\circ} \\ 1.06 & |x_{Lat}| \geq 50^{\circ} \end{cases}$$

$T_{mit}(t)$ Tagesmittel (Tmit) der Lufttemperatur [$^{\circ}$ C]

$T_{max}(t)$ Tagesmaximum (Tmax) der Lufttemperatur [$^{\circ}$ C]

Tabelle 27: Huglin-Indizes für wichtige Sorten

Huglin-Index H	Farbcode	Ausgewählte anbauwürdige Rebsorten
$H \leq 1500$		kein Anbau empfohlen
$1500 < H \leq 1600$		Müller-Thurgau
$1600 < H \leq 1700$		Weißer Burgunder, Gamay noir
$1700 < H \leq 1800$		Riesling, Chardonnay, Sauvignon blanc, Spätburgunder
$1800 < H \leq 1900$		Cabernet franc
$1900 < H \leq 2000$		Chinon blanc, Cabernet sauvignon, Merlot
$2000 < H \leq 2100$		Ugni blanc
$2100 < H \leq 2200$		Grenache noir, Syrah
$2200 < H \leq 2300$		Carignan
$2300 < H \leq 2400$		Aramon

Die in Tabelle 27 angegebenen Werte sind als Richtwerte für ebene Flächen im mittleren regionalen Maßstab anzusehen (ca. 1km x 1km). Insbesondere Hanglagen mit Südausrichtung werden nach je nach Inklination thermisch anspruchsvollere Klassen erreichen, als durch den einfachen Huglin-Index ausgewiesen.

9.1.2 Ergebnisse

Zur Berechnung der flächendeckenden Indizes wurden aufgezeichnete meteorologische Daten (1951-2000 AD) und daraus generierte Zukunftsszenarien (2001-2055 AD) verwendet. Weiterhin erfolgte eine Interpolation der an den Beobachtungsstationen punktweise vorliegenden Indizes. Auf der Grundlage einer linearen Regression zwischen Höhenlage und Huglin-Index wurden die Indizes auf eine Referenzhöhe umgerechnet, räumlich interpoliert und die nun flächendeckend vorliegenden Werte entsprechend ihrer tatsächlichen Höhe und der Regressionsbeziehung konvertiert. Hier seien die Veränderungen der 10-jährigen gleitenden Mittel des Huglin-Index für die ausgewählten Regionen näher vorgestellt.

9.1.2.1 Rheingau

Für die 60-er Jahre zeigen die Indizes nur Anbaumöglichkeiten entlang des Rheins und der Nahe, beschränkt auf die niedrigsten zwei Klassen mit einem sehr eng begrenzten höherwertigen Gebiet im Bereich des „inneren“ Rheingaus um Geisenheim und Rüdesheim. Als deutlich sichtbare Auswirkungen der Erwärmung während der 1990-er Jahre haben sich diese Gebiete ausgeweitet (Nord- und Ostausbreitung, Aufstieg in höhere Lagen), und es wird der Anbau immer anspruchsvollerer Sorten möglich (bereits 3 Klassen mit deutlich wachsenden Flächenanteilen). Dieser Trend setzt sich im 21. Jahrhundert fort und kann damit in den nächsten Jahrzehnten die Bedingungen des Weinbaus im Rheingau nachhaltig beeinflussen.

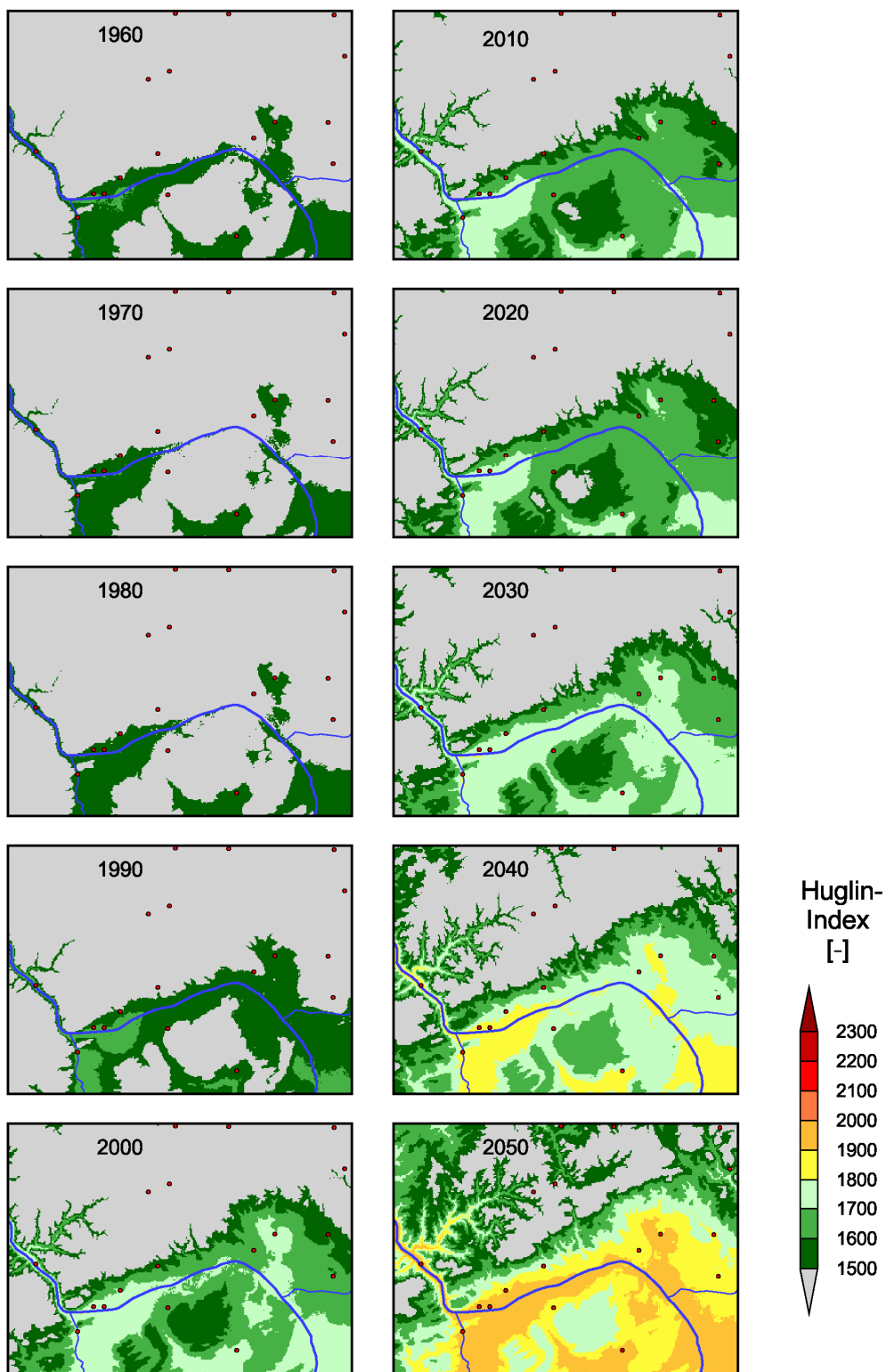


Abb. 26: Zeitschnitte für die Entwicklung des Huglin-Index im Rheingau

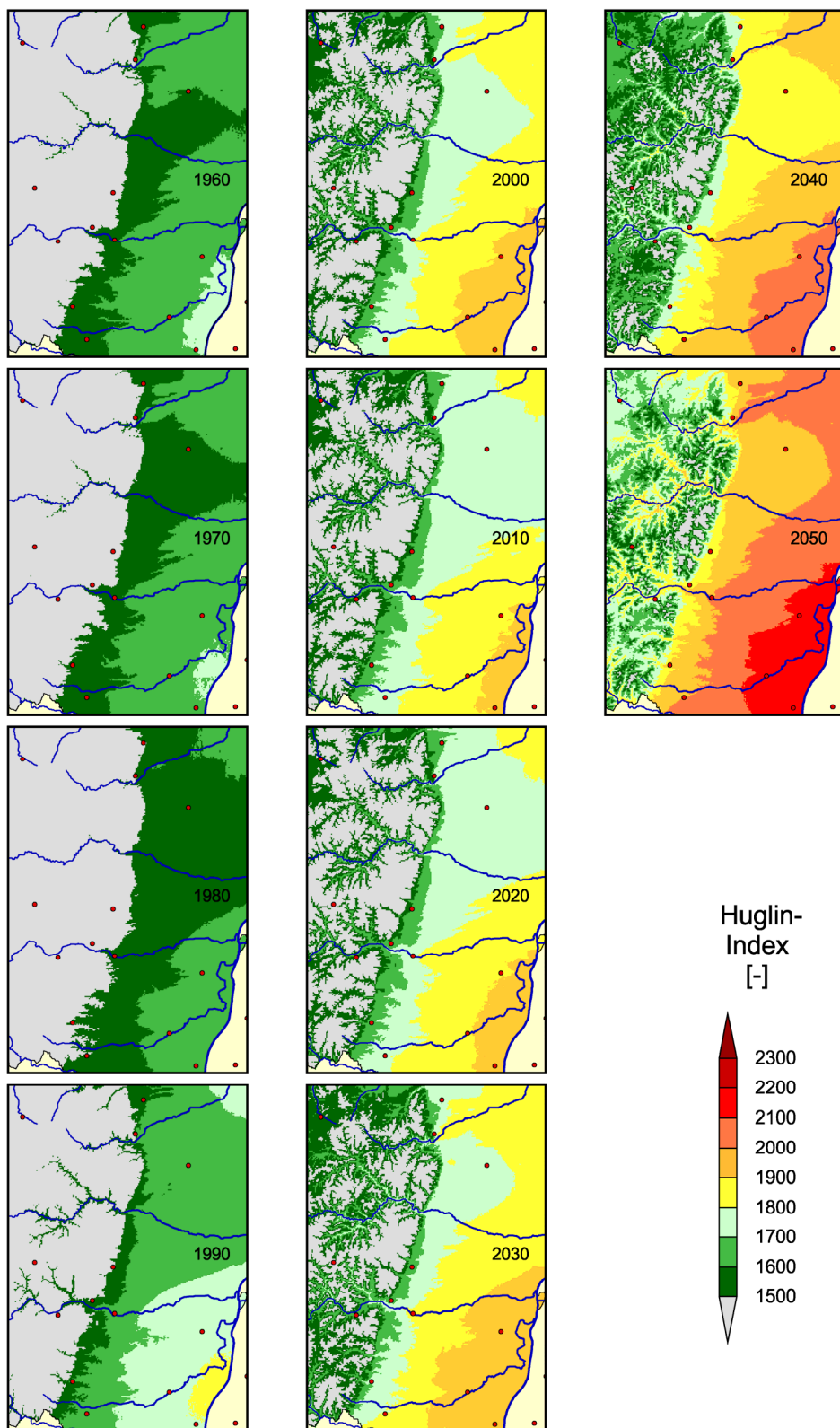


Abb. 27: Zeitschnitte für die Entwicklung des Huglin-Index in der Pfalz

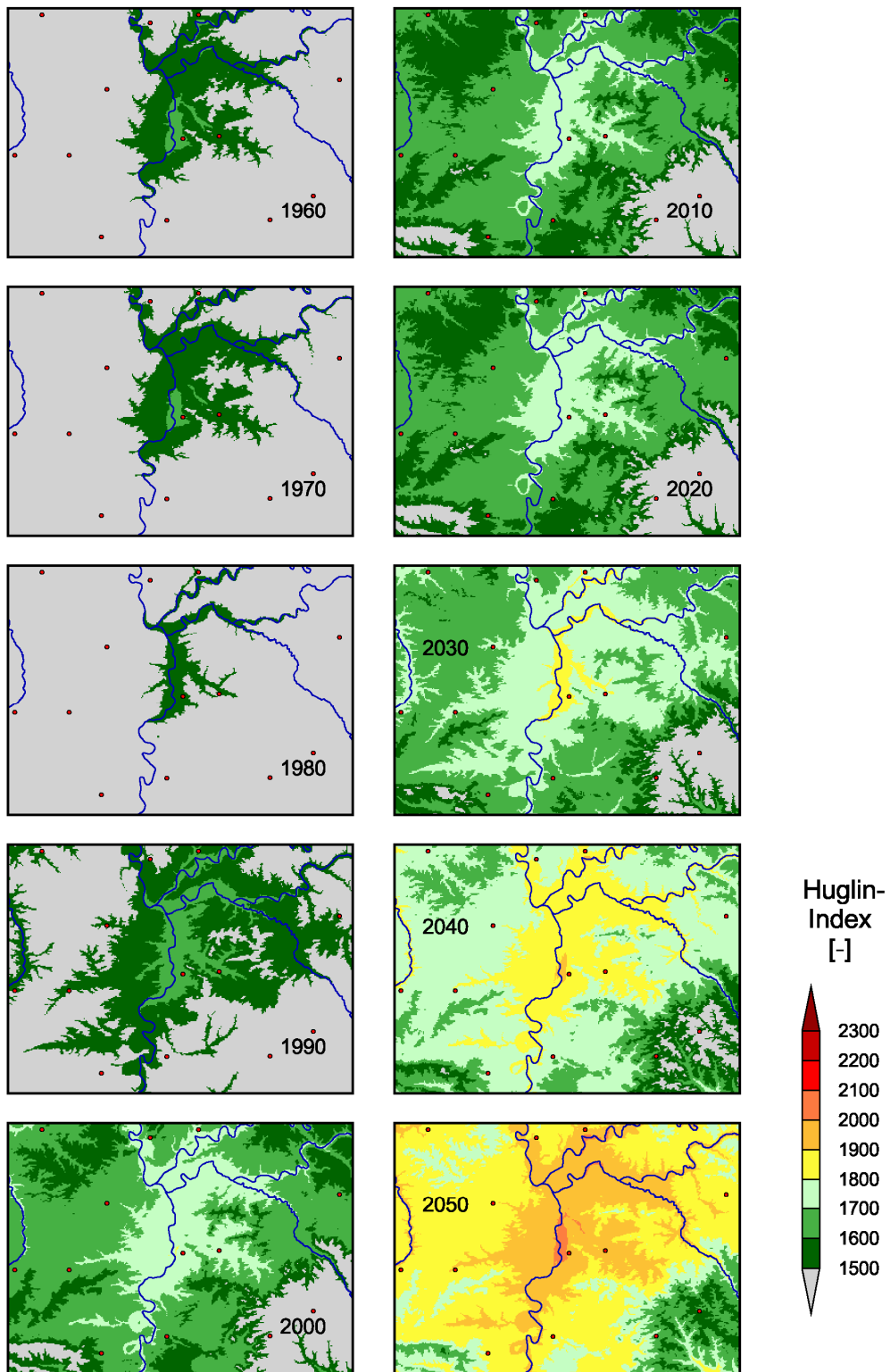


Abb. 28: Zeitschnitte für die Entwicklung des Huglin-Index in Württemberg

Spätestens ab den 2020-er Jahren wird sich das bereits in den 1990-er Jahren etablierte thermische Niveau nachhaltig etabliert haben. Danach treten weitere potenzielle Ausweitungen der thermisch geeigneten Weinbauflächen auf. Ab den 2040-er des ZUSZ werden fünf Klassen ausgewiesen. Für die wichtigen Weinbaustandorte Rüdesheim und Geisenheim erscheint dann der Anbau von thermisch anspruchsvolleren Sorten wie Chinon blanc und Cabernet sauvignon potenziell möglich. Die Einzeluntersuchung für den Referenzstandort Geisenheim bestätigt diese Tendenz. Diese nur aus den Änderungen des Huglin-Index' abgeleiteten erweiterten Anbaumöglichkeiten immer anspruchsvollerer Sorten lassen jedoch keine Bewertungen über evtl. Veränderungen beim Anbau der bisher hier präferierten Sorte Riesling zu. Diese Abschätzungen bleiben den Ausführungen zu den wahrscheinlichen Veränderungen des phänologischen Ablaufes im Abschnitt 9.2.2 vorbehalten.

9.1.2.2 Pfalz

Die Huglin-Indizes der 1950-er Jahre weisen für die Pfalz den potenziellen Anbau der drei thermisch niedrigsten Klassen aus. In den 1990-er Jahren treten bereits 5 Klassen auf. Die potenziellen Anbaugebiete mit geringeren thermischen Ansprüchen sind entlang der Täler des Pfälzer Waldes höher gewandert. In den traditionellen Anbaugebieten wird die Kultivierung thermisch anspruchsvollerer Sorten möglich (ein bis max. zwei Klassen höher).

Diese Tendenz setzt sich im ZUSZ fort. In den letzten Dekaden des ZUSZ weisen die berechneten Huglin-Werte den Anbau thermisch sehr anspruchsvoller Sorten (Grenache, Syrah) für einige Teile der Pfalz als potenziell möglich aus.

Für den Referenzstandort Landau wird der Anbau von Chinon blanc und Cabernet sauvignon in den 2050-ern als möglich ausgewiesen.

9.1.2.3 Württemberg

Für die 50-er Jahre zeigen die Indizes nur wenige Flächen im dargestellten Ausschnitt in Württemberg in den beiden niedrigsten Klassen. Die höhere Klasse

umschließt mit sehr kleinem Flächenanteil den Referenzstandort Heilbronn. Als bereits deutlich sichtbare Auswirkungen der Erwärmung während der 1990-er Jahre haben sich die potenziellen Anbaugebiete ausgeweitet (fast den gesamten Ausschnitt umfassende Ausbreitung, Aufstieg in höhere Lagen). Dabei wird der Anbau thermisch immer anspruchsvollerer Sorten möglich (drei flächenmäßig weit ausgedehnte Klassen und eine vierte höhere Klasse [Cabernet franc] in unmittelbarer Umgebung von Heilbronn). Dieser Trend setzt sich im 21. Jahrhundert fort. Die bereits heute bestehende Dominanz der Kultivierung von Rotwein im Württembergischen entspricht der dort gewachsenen Tradition. Dabei werden landeseigene Sorten (z.B. die bekannten Sorten Trollinger, Lemberger und Schwarzriesling) bevorzugt kultiviert (Johnson, Robinson, 2002). Für das Anbaugebiet Württemberg lassen die in den nächsten Jahrzehnten zu erwartenden klimatisch bedingten Änderungen die Kultivierung der bisher bevorzugten und einen zunehmenden Anbau anspruchsvollerer Sorten erwarten.

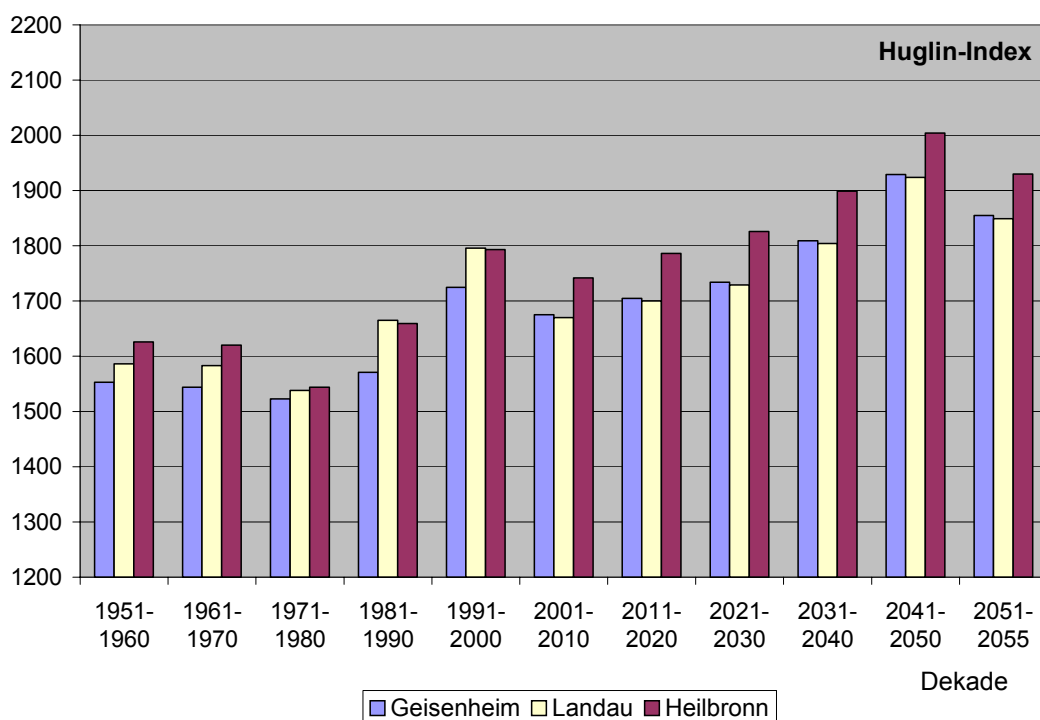


Abb. 29: Entwicklung des Huglin-Index an der Stationen Geisenheim, Landau i.d. Pfalz und Heilbronn

Die Einzelauswertung für den Referenzstandort Heilbronn zeigen die höchsten Huglin-Indizes aller drei Referenzstandorte, hier werden die thermischen Bedingungen für den Anbau noch anspruchsvollerer Sorten (Ugni blanc, evtl Grenache und Syrah) erfüllt.

Insgesamt werden die untersuchten traditionellen deutschen Weinanbaugebiete ab Mitte des 21. Jahrhunderts thermische Bedingungen wie jetzt etwa das Loire-Tal bieten. Die (wenn auch flächendeckenden) Berechnungen des Huglin-Index lassen jedoch nur Aussagen zur Befriedigung der thermischen Ansprüche verschiedener Rebsorten zu. Ein funktionsfähiges Phänologiemodell kann dagegen zur Bearbeitung weitergehender Fragestellungen genutzt werden. Diesem Themenkreis wird sich das nächste Kapitel widmen.

9.2 Phänologie

Die zeitliche Abfolge einzelner Entwicklungsstadien und deren Eintrittszeitpunkte bei annualen und perennialen Pflanzen werden üblicherweise als Phänologie bezeichnet. Dieser biologischen Uhr bzw. der „erlebten“ biologischen Zeit kommt innerhalb der Vegetationsperiode eine Schlüsselrolle in der Aktivierung und Deaktivierung wichtiger Prozesse und deren Synchronisierung zu. Die Entwicklung von der Winterruhe bis zum Laubfall am Rebstock lässt sich in standardisierter Dezimalform nach Lorenz et al. (1994) mit Werten zwischen 00 und 100 im Dezimalcode bzw. BBCH-Code beschreiben. Der Einfluss der einzelnen meteorologischen Parameter auf das Wachstum, den Entwicklungs- und Reifeprozess des Weines ist in den einzelnen Entwicklungsstadien unterschiedlich. Damit werden bei Nutzung einem funktionsfähigen Phänologiemodell sehr detaillierte Untersuchungen zu den Auswirkungen von Klimaänderungen in den einzelnen Entwicklungsstadien möglich. Gleichzeitig wird damit eine Voraussetzung für die in Zukunft geplanten Abschätzungen der von Schaderregern ausgehenden Risiken geschaffen.

9.2.1 Das Phänologiemodell

Die im Rahmen des Vorhabens KLIMA 2050 durchgeführten Untersuchungen zur Phänologie der Rebe und wichtiger abgeleiteter weinbaulich relevanter Klimagrößen basieren auf einem Phänologiemodell nach Hoppmann & Berkelmann-Löhnertz (2000). Dieses Modell wurde zur Beschreibung der Phänologie von Riesling im Rheingau entwickelt. Die Beobachtungen dazu wurden den letzten 3 Jahrzehnten in der Lage Fuchsberg (Geisenheim) am Klon GM 239 durchgeführt. Die Angaben zu den kultivierten Klons von 1951 bis in die Mitte der 1970-er Jahre waren nicht mehr rekonstruierbar. Gemäß den Hauptentwicklungsabschnitten erfolgt in der am PIK für die speziellen Fragestellungen von KLIMA 2050 erstellten Version eine Einteilung der Phänologie in fünf Phasen:

Phase	Beginn	BBCH	Ende	BBCH	Abk.
Phase 1	Dormanz	00	bis vor Knospenaufbruch	09	(AUS)
Phase 2	Austriebsbeginn	09	bis vor Blühbeginn	61	(BLB)
Phase 3	Blühbeginn	61	bis vor Blühende	69	(BLE)
Phase 4	Blühende	69	bis vor Reifebeginn	81	(REB)
Phase 5	Reifebeginn	81	bis vor Lesereife	89	(LES).

Die Berechnung der Phänologie und die Ableitung relevanter Größen erfolgte unter Nutzung der in den Kapiteln 5 und 6 beschriebenen BASZ und ZUSZ. Wichtige modellinterne Größen für praktisch alle Phasen sind:

- Wärme- (H_{DD}) und Kältesummen (C_{DD}) nach Allen (1976);
- eine asymptotische Sättigungsfunktion $A_{TX}(T)$ nach Hoppmann & Berkelmann-Löhnertz (2000).

Die asymptotische Sättigungsfunktion $A_{TX,I}(T)$ ist wie folgt definiert

$$A_{TX,I}(T) = c_{TX,I} \cdot \left(\frac{\arctan(a_{TX,I} \cdot (T - T_{U,TX,I})) + \frac{\pi}{2}}{\pi} \right) \cdot \left(1 - \frac{\arctan(b_{TX,I} \cdot (T - T_{O,TX,I})) + \frac{\pi}{2}}{\pi} \right) \quad (2)$$

mit	T	Temperatur [°C]
	$T_{U,TX,I}$	untere Grenzwerttemperatur [°C] in Phase I
	$T_{O,TX,I}$	obere Grenzwerttemperatur [°C] in Phase I
	$a_{TX,I}$	Initialer Anstieg von $A_{TX}(T_{U,TX,I})$
	$b_{TX,I}$	Initialer Anstieg von $A_{TX}(T_{O,TX,I})$
	$c_{TX,I}$	Amplitude von $A_{TX,I}$ [°C]
	I	Phasenzähler; $I \in [\text{AUS, BLB, BLE, REB, LES}]$

Die Ermittlung der für die Phänologieberechnung notwendigen Wärme- ($H_{DD,I}$) und Kältesummen ($C_{DD,I}$) wird gemäß Allen (1976), jedoch in absteigender Sequenz von T_{min} und T_{max} definiert. Dabei erfolgt die Ermittlung von H_{DD} und C_{DD} zerlegt in partielle Summen des durch Sinusteilwellen approximierten Temperaturverlaufes unter Berücksichtigung der Minimaltemperatur des Folgetages:

$$H_{DD}(t) := H_{DD}(T_{max}(t), T_{min}(t), 1) + H_{DD}(T_{max}, T_{min}(t+1d), 2)$$

$$C_{DD}(t) := C_{DD}(T_{max}(t), T_{min}(t), 1) + C_{DD}(T_{max}, T_{min}(t+1d), 2)$$

Im folgenden sei dann nur noch beschrieben, wie die jeweiligen Partialsummen berechnet werden. Zur Unterscheidung der den einzelnen phänologischen Pha-

sen zugeordneten unterschiedlichen Parameterwerte für T_O und T_U wird wie in (2) der Index I eingeführt.

Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Anteile der Teilwellen werden zuerst noch die drei Korrekturgrößen $\delta_{DD,J}$, $F_{H,J}$ und $F_{C,J}$ eingeführt:

$$\bar{T} = \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \quad (3)$$

$$\delta_{DD,J} = p_J + q_J \frac{1}{2} (\bar{T} - T_{\min}) \quad (4)$$

mit $p_J ; q_J$ Geometrieparameter für Partialsummenanteile
 J Index der Partialsumme, $J \in \{1,2\}$

$$F_{H,J} = \frac{T_{O,I} - T_{U,I}}{T_{\max} - T_{\min}} \cdot \delta_{DD,J} \quad (5)$$

mit $T_{O,I}$ obere Grenzwerttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
 $T_{U,I}$ untere Grenzwerttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
 I Phasenzähler wie in (2)

$$F_{C,J} = \frac{T_{U,I} - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \cdot \delta_{DD,J} \quad (6)$$

Fall 1: $T_{O,I} \leq T_{\min}$; ($T_{O,I} \leq T_{\max}$ ist evident)

$$H_{DD,I}(T_{\max}, T_{\min}, J) = \frac{1}{2} (T_{O,I} - T_{U,I}) \quad (7)$$

$$C_{DD,I}(T_{\max}, T_{\min}, J) = 0 \quad (8)$$

In den folgenden Gleichungen sei zur Vereinfachung auf die Angabe der Variablen T_{\max} , T_{\min} und J bei H_{DD} und C_{DD} verzichtet.

Fall 2: $T_{U,I} < T_{\min} < T_{O,I}$; $T_{O,I} < T_{\max}$

$$H_{DD,I} = \frac{1}{2\pi} \left[(\bar{T} - T_{U,I}) \cdot \left(\theta_0 + \frac{\pi}{2} \right) + (T_{O,I} - T_{U,I}) \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \theta_0 \right) - \alpha \cdot \cos(\theta_0) \right] + F_{H,J} \quad (9)$$

$$C_{DD,I} = 0 \quad (10)$$

mit α Temperaturamplitude

$$\alpha = \left(\frac{T_{O,I} - T_{U,I}}{2} \right) \quad (11)$$

θ_O Zeitanteil mit $T > T_{O,I}$ in Bogenmaß $[0..\pi/2]$

$$\theta_O := \arcsin\left(\frac{T_{O,I} - \bar{T}}{\alpha}\right) \quad (12)$$

Fall 3: $T_{U,I} < T_{min} < T_{O,I}$; $T_{U,I} < T_{max} < T_{O,I}$

$$H_{DD,I} = \frac{1}{2}(\bar{T} - T_{U,I}) + \delta_{H,J} \quad (13)$$

$$C_{DD,I} = 0 \quad (14)$$

Fall 4: $T_{min} < T_{U,I}$; $T_{U,I} < T_{max} < T_{O,I}$

$$H_{DD,I} = \frac{1}{2\pi} \left[(\bar{T} - T_{U,I}) \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \theta_U \right) + \alpha \cdot \cos(\theta_U) \right] + F_{H,J} \quad (15)$$

$$C_{DD,I} = \frac{1}{2\pi} \left[(T_{U,I} - \bar{T}) \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \theta_U \right) + \alpha \cdot \cos(\theta_U) \right] - F_{C,J} \quad (16)$$

mit θ_U Zeitanteil mit $T_{min} < T_{U,I}$ in Bogenmaß $[0..\pi/2]$

$$\theta_U := \arcsin\left(\frac{T_{U,I} - \bar{T}}{\alpha}\right) \quad (17)$$

Fall 5: $T_{min} < T_{U,I}$; $T_{O,I} < T_{max}$

$$H_{DD,I} = \frac{1}{2\pi} \left[(\bar{T} - T_{U,I}) \cdot (\theta_O - \theta_U) + \alpha \cdot (\cos(\theta_U) - \cos(\theta_O)) + (T_{O,I} - T_{U,I}) \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \theta_O \right) \right] \quad (18)$$

+ $F_{H,J}$

$$C_{DD,I} = \frac{1}{2\pi} \left[(T_{U,I} - \bar{T}) \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \theta_U \right) + \alpha \cdot \cos(\theta_U) \right] - F_{C,J} \quad (19)$$

Fall 6: $T_{max} \leq T_{U,I}$; ($T_{min} \leq T_{U,I}$ ist evident)

$$H_{DD,I} = 0 \quad (20)$$

$$C_{DD,I} = \frac{1}{2}(T_{U,I} - \bar{T}) - \delta_{C,J} \quad (21)$$

In dieser Form werden Wärmesummen nur für den projizierten Flächenanteil des Temperaturverlaufes im Intervall zwischen $T_{U,l}$ und $T_{O,l}$ gebildet, i.e. höhere Temperaturen als $T_{O,l}$ werden quasi abgeschnitten. Kältesummen werden immer in voller Höhe unterhalb $T_{U,l}$ gebildet. Allgemein werden die Eintrittszeitpunkte der aufeinanderfolgenden phänologischen Stadien durch das Erreichen bzw. Überschreiten eines Schwellenwertes über verallgemeinerte Summen der wichtigsten meteorologischen Größen definiert. Mit dem Erreichen des Schwellenwertes

- endet die Berechnung der zugehörigen Summe;
- beginnt eine neue phänologische Phase;
- beginnt die Berechnung der Summe für die neue Phase.

9.2.1.1 Austrieb (AUS)

Der Eintritt des Austriebs hängt im Modell ausschließlich vom Temperaturverlauf ab. Verwendet werden T_{max} und T_{min} des jeweils aktuellen und T_{min} des Folgetages. Aufgrund der ohnehin herrschenden Dormanz kann die Berechnung zweckmäßigerweise mit dem 1.1. des jeweils betrachteten Jahres beginnen.

Der Eintritt des phänologischen Stadiums Austriebs wird definiert als Zeitpunkt, zu dem die zugehörige verallgemeinerte Summe den Wert 1 erreicht bzw. überschreitet. Dabei erfolgt die Zählung von t als Tageszähler im laufenden Jahr:

$$t := t_{AUS} \text{ für } S_{AUS}(t) \geq 1 ; t \in \mathbb{N} ; \quad \begin{array}{l} 1 \leq t \leq 366 \text{ (22a), (22b);} \\ 60 \leq t \leq 366 \text{ (22c);} \\ 90 \leq t \leq 366 \text{ (22d);} \end{array}$$

mit

$$S_{AUS}(t) := k_{AUS} \cdot t + \tag{a} \quad (22)$$

$$\frac{a_{AUS} \cdot t}{59} \cdot \sum_{t=1}^{59} A_{TX,AUS}(T_{max}(t)) + \tag{b}$$

$$\frac{b_{\text{AUS}} \cdot t}{31} \sum_{t=60}^{90} H_{\text{DD.AUS}}(T \max(t), T \min(t)) + \quad (\text{c})$$

$$\frac{c_{\text{AUS}} \cdot t}{t - 89} \sum_{t=90.}^t A_{\text{TX.AUS}}(T \max(t)) \quad (\text{d}^1)$$

9.2.1.2 Blühbeginn (BLB)

Eingangsdaten für die Berechnung des Blühbeginns sind Tmax und Tmin. Die Berechnung setzt mit dem Erreichen des Austriebes ein:

$$t := t_{\text{BLB}} \text{ für } S_{\text{BLB}}(t) \geq 1 ; t \in \mathbb{N} ; t_{\text{AUS}} \leq t \leq 366$$

$$S_{\text{BLB}}(t) := k_{\text{BLB}} \cdot (t - t_{\text{AUS}} + 1) + \quad (\text{a})$$

(23)

$$a_{\text{BLB}} \cdot \sum_{t=t_{\text{AUS}}}^t H_{\text{DD.BLB}}(T \max(t), T \min(t)) \quad (\text{b})$$

9.2.1.3 Blühdauer bzw. Blühende (BLE)

Eingangsdaten sind Tmax, Tmin, Tmit, Dadr und Relf. Die Berechnung setzt mit dem Blühbeginn ein.

$$t := t_{\text{BLE}} \text{ für } S_{\text{BLE}}(t) \geq 1 ; t \in \mathbb{N} ; t_{\text{BLB}} \leq t \leq 366$$

$$S_{\text{BLE}}(t) := k_{\text{BLE}} \cdot (t - t_{\text{BLB}}) + \quad (\text{a}) \quad (24)$$

$$a_{\text{BLE}} \cdot \sum_{t=t_{\text{BLA}}}^t A_{\text{TX.BLB}}(T \max(t)) + \quad (\text{b})$$

$$b_{\text{BLE}} \cdot \sum_{t=t_{\text{BLA}}}^t C_{\text{DD.BLB}}(T \max(t), T \min(t)) \quad (\text{c})$$

¹ Zur Vermeidung einer Teilung durch Null wird die Partialsumme d auch bei der numerischen Realisierung in jedem Fall erst beginnend mit dem unteren Index t=90 ermittelt.

$$c_{BLE} \cdot \sum_{t=t_{BLE}}^t E_P(t) \quad (d)$$

Dabei wird die potenzielle Evapotranspiration E_P wie folgt ermittelt.:

$$E_P(t) = -3.215 + 0.324 \cdot D_{adr}(t) \cdot \left(\frac{100}{R_{elf}(t)} - 1 \right) + 0.555 \cdot T_{max}(t) - 0.488 \cdot T_{min}(t) \quad (25)$$

9.2.1.4 Reifebeginn (REB)

Direkte Eingangsdaten sind T_{max} , T_{min} , T_{mit} , D_{adr} , R_{elf} und $Nied$. Für die intermediäre Berechnung einer Strahlungssumme in der Phase zwischen Blühende und Reifebeginn wird daneben G_{str} verwendet. Diese Summe fließt in die Berechnung des Lesebeginns ein. Die Berechnungen des Reifebeginns setzen mit dem Blühende ein.

$t := t_{REB}$ für $S_{REB}(t) \geq 1$; $t \in \mathbb{N}$; $t_{BLE} \leq t \leq 366$

$$S_{REB}(t) := k_{REB} \cdot (t - t_{BLE} + 1) + \quad (a)$$

$$a_{REB} \cdot t_{BLE} (t - t_{BLE} + 1) + \quad (b)$$

$$b_{REB} \cdot \sum_{t=t_{BLE}}^t (Nied(t) - E_P(t)) \quad (c) \quad (26)$$

$$c_{REB} \cdot \sum_{t=t_{BLE}}^t E_P(t) \quad (d)$$

$$d_{REB} \cdot \sum_{t=t_{BLE}}^t C_{DD.REB}(T_{max}(t), T_{min}(t)) \quad (e)$$

Neben der Summe zur Ermittlung des Reifebeginns wird für die Berechnung des Reifezustandes in der darauf folgenden Phase auch eine intermediäre Summe der Globalstrahlung gebildet:

$$S_{\text{GST.REB}} = \sum_{t=t_{\text{BLE}}}^{t_{\text{REB}}-1} \text{Gstr}(t) \quad (27)$$

9.2.1.5 Lesereife/Lesebeginn (LES)

Eingangsdaten sind Tmax, Tmin, Nied und Gstr. Die Berechnung setzt mit dem Reifebeginn ein. Berücksichtigt wird auch die zwischen Blühende und Reifebeginn aufgelaufene Globalstrahlungssumme.

$t := t_{\text{LES}}$ für $S_{\text{LES}}(t) \geq 1$; $t \in \mathbb{N}$; $t_{\text{REB}} \leq t \leq 366$

$$S_{\text{LES}}(t) := k_{\text{LES}} \cdot (t - t_{\text{BLE}} + 1) + \quad (a)$$

$$\frac{a_{\text{REB}}}{t - t_{\text{REB}} + 1} \cdot \left(S_{\text{GST.REB}} + \sum_{t=t_{\text{REB}}}^t \text{Gstr}(t) + \right) \quad (b)$$

$$b_{\text{LES}} \cdot \sum_{t=t_{\text{REB}}}^t A_{\text{TX.LES}}(T \max(t)) \quad (c) \quad (28)$$

$$c_{\text{REB}} \cdot t_{\text{BLE}} (t - t_{\text{BLE}} + 1) \quad (d)$$

$$\frac{d_{\text{REB}}}{t - t_{\text{REB}} + 1} \cdot \sum_{t=t_{\text{BLE}}}^t \text{Nied}(t) \quad (e)$$

9.2.2 Simulationsergebnisse zur Phänologie

Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt, soweit möglich, innerhalb der angegebenen phänologischen Phasen unter Einschluss der relevanten Klimagrößen und Ereignisse. Diese Auswertung orientiert sich damit an der jahreszeitlichen Abfolge der Phasen und der in ihnen auftretenden Ereignisse. Eintritt und Dauer der phänologischen Phasen an den drei Referenzstationen sind in Abb. 30 bis Abb. 32 dargestellt. In gleicher Abbildungsart erfolgt die Mitteilung der Berechnungen für alle weinbaulich relevanten Kenngrößen in Anhang III.

Zu Beginn diesen Abschnitts sind einige einleitende Anmerkungen zu den ab den 1990-er Jahren sichtbaren außergewöhnlichen Veränderungen in der Phänologie und den weinbaulich relevanten Ereignissen bzw. Klimagrößen notwendig:

- Die 1990-er Jahre stellten das seit Aufzeichnungsbeginn wärmste Jahrzehnt dar. Temperaturen unter -15°C (Indikator für mögliche Frostschäden) traten am Standort Geisenheim und in Landau in den 1990-ern nur 1997 in zwei Nächten, am Standort Heilbronn 1997 in einer Nacht auf.
- Einen markanten Höhepunkt erreichte die Tendenz der Erwärmung im Sommer des Jahres 2003, der mit einer Vielzahl extremer Erscheinungen einherging.

Wegen der deutlichen Ausnahmestellung des Sommergeverlaufes im Jahre 2003 können die Bedingungen dieses Jahres als ein Realszenarium für die Bedingungen bis weit in das gegenwärtige Jahrhundert angesehen werden.

9.2.2.1 Modell-Messwertvergleich

Ein direkter Modell-Messwertvergleich war nur am Standort Geisenheim für den Zeitraum 1951-2003 möglich. Die Daten wurden freundlicherweise durch den DWD Ast. Geisenheim bereitgestellt. Die Details des Vergleichs können dem Anhang II entnommen werden. Hier seien nur die Mittelwerte und die zugehörigen Standardabweichungen über den Gesamtzeitraum des BASZ als die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.

	Modell	Beobachtung	Differenz (Modell-Messwert)
AUS:	29.04. ± 6d	29.04. ± 8d	0d ± 3d
BLB:	18.06. ± 8d	18.06. ± 8d	0d ± 2d
BLE:	26.06. ± 8d	26.06. ± 8d	0d ± 3d
REB:	29.08. ± 9d	29.08. ± 11d	0d ± 5d
LES:	16.10. ± 7d	15.10. ± 11d	1d ± 8d

9.2.2.2 Modellergebnisse

9.2.2.2.1 Austrieb (Phase 1)

Innerhalb des BASZ zeigte sich bis zu Beginn der 1990-er Jahre an allen drei Referenzstandorten keine Verfrühung des Austriebs. In den 1990-ern setzte eine geringe Verfrühung des Austriebs (maximal –3d) ein. Diese Tendenz setzt sich mit Schwankungen auch für das ZUSZ fort. Spätestens ab Ende der 2040-er Jahren ist mit deutlich früheren Austriebsterminen ($-12d \pm 5d$) gegenüber den 1990-ern zu rechnen. Insgesamt ist diese Verfrühung als eine der wesentlichen primären Veränderungen des phänologischen Ablaufs in den kommenden Jahrzehnten zu betrachten. Die mittleren Austriebstermine betragen

	(1950-er,	1990-er,	2050-er):
Geisenheim:	27.04. ± 7d	27.04. ± 2d	16.04. ± 5d;
Landau:	26.04. ± 7d	24.04. ± 3d	13.04. ± 5d;
Heilbronn:	26.04. ± 7d	23.04. ± 3d	13.04. ± 4d.

Die hier angegebenen Verschiebungen stellen tendenziell eine Unterschätzung der erwarteten Verfrühung dar (Tendenz bei Szenarien mit stärkerer Erwärmung: eher stärkere Verfrühung).

9.2.2.2 Blühbeginn (Phase 2)

Beim Blühbeginn ist eine typische Tendenz zu früheren Terminen bei großer Schwankungsbreite im ZUSZ erkennbar. Auch für diese Phase ist mit Verfrühungen in mindestens der gleichen Größenordnung wie für den Austrieb zu rechnen. Folgende Dekadenmittel wurden für den Blühbeginn ermittelt

	(1950-er,	1990-er,	2050-er):
Geisenheim:	18.06. ± 7d	14.06. ± 9d	3.06. ± 10d;
Landau:	16.06. ± 8d	11.06. ± 8d	31.05. ± 10d;
Heilbronn:	14.06. ± 7d	11.06. ± 8d	31.05. ± 10d.

9.2.2.3 Blühdauer/Blühende (Phase 3)

Im ZUSZ ergibt sich eine sehr schwache Tendenz zu einer Verkürzung der Blühdauer ($-1.5d \pm 1d$). Die Auswirkungen dieser Veränderung sollten begrenzt bleiben, da auch der kürzere Zeitraum für eine ausreichende Bestäubung noch lang genug erscheint.

9.2.2.4 Reifebeginn (Phase 4)

Der Reifebeginn zeigte für alle drei Standorte im BASZ bis in die 1980-er noch keine Verfrühung. Ab den 1990-er Jahren trat eine Verfrühung ein, die sich im ZUSZ einheitlich fortsetzt

	(1950-er,	1990-er,	2050-er):
Geisenheim:	31.08. ± 8d	23.08. ± 6d	20.08. ± 6d;
Landau:	29.08. ± 9d	21.08. ± 4d	14.08. ± 6d;
Heilbronn:	26.08. ± 9d	20.08. ± 5d	15.08. ± 5d.

Damit tritt der Reifebeginn auch im ZUSZ immer eher ein. Auf Grund der abgeschwächten Verfrühung in den letzten Dekaden des ZUSZ ist die Tendenz bei Szenarien mit stärkerer Erwärmung nicht abschätzbar.

9.2.2.2.5 Lesebeginn (Phase 5)

Der Lesebeginn zeigte für alle drei Standorte eine in den 1980-er Jahren einsetzende deutliche und weitgehend einheitliche Verfrühung bereits im BASZ, die sich im ZUSZ fortsetzt.

	(1950-er,	1990-er,	2050-er):
Geisenheim:	19.10. ± 8d	14.10. ± 6d	4.10. ± 5d;
Landau:	14.10. ± 8d	7.10. ± 7d	28.09. ± 6d;
Heilbronn:	15.10. ± 7d	9.10. ± 6d	1.10. ± 5d.

Es konnten keine wesentlichen Veränderungen der Zeitdauer zwischen REB und LES innerhalb des BASZ, des ZUSZ und in den 1990-ern festgestellt werden. Damit bleibt diese wichtige weinbauliche Phase bei fortlaufender Verfrühung in ihrer absoluten Andauer unverändert.

Vegetationsdauer zwischen Austrieb und Lesebeginn

Die relevante Vegetationsperiode (Zeitraum zwischen Austrieb und normalen Lesebeginn) zeigte im BASZ von den 1950-ern bis in die 1990-er eine Zunahme (+6d ± 7d) mit sehr hoher Schwankungsbreite, diese Tendenz kehrte sich danach im ZUSZ aber um. D.h. die jetzt immer weitere Verfrühung des Austriebes wurde durch die noch stärker beschleunigte Entwicklung in den späteren Phasen wettgemacht. Zwar tritt der Vegetationsbeginn im ZUSZ gegenüber dem BASZ weiterhin durch Verfrühung des Austriebs immer eher ein, jedoch bleiben die Änderungen der Andauern der einzelnen danach folgenden Phasen weitgehend unverändert bzw. zeigen in späteren Dekaden des ZUSZ eine leichte Tendenz zur Verkürzung. Die Ursachen dafür liegen aus der Sicht der Bearbeiter in einer stetigen Zunahme von günstigen, beschleunigenden und optimalen Reifebedingungen im BASZ und ZUSZ. Es kann daher nicht von einer weiteren Verlängerung dieses Teilabschnittes innerhalb der Vegetationsdauer in der Zukunft ausgegangen werden. Eine Tendenz bei Szenarien mit stärkerer Erwärmung ist nicht näher abschätzbar. Da im Modell bisher der Blattabwurf nicht mit berechnet wird, können weitergehende Aussagen zu Gesamtvegetationsperiode noch nicht gemacht werden.

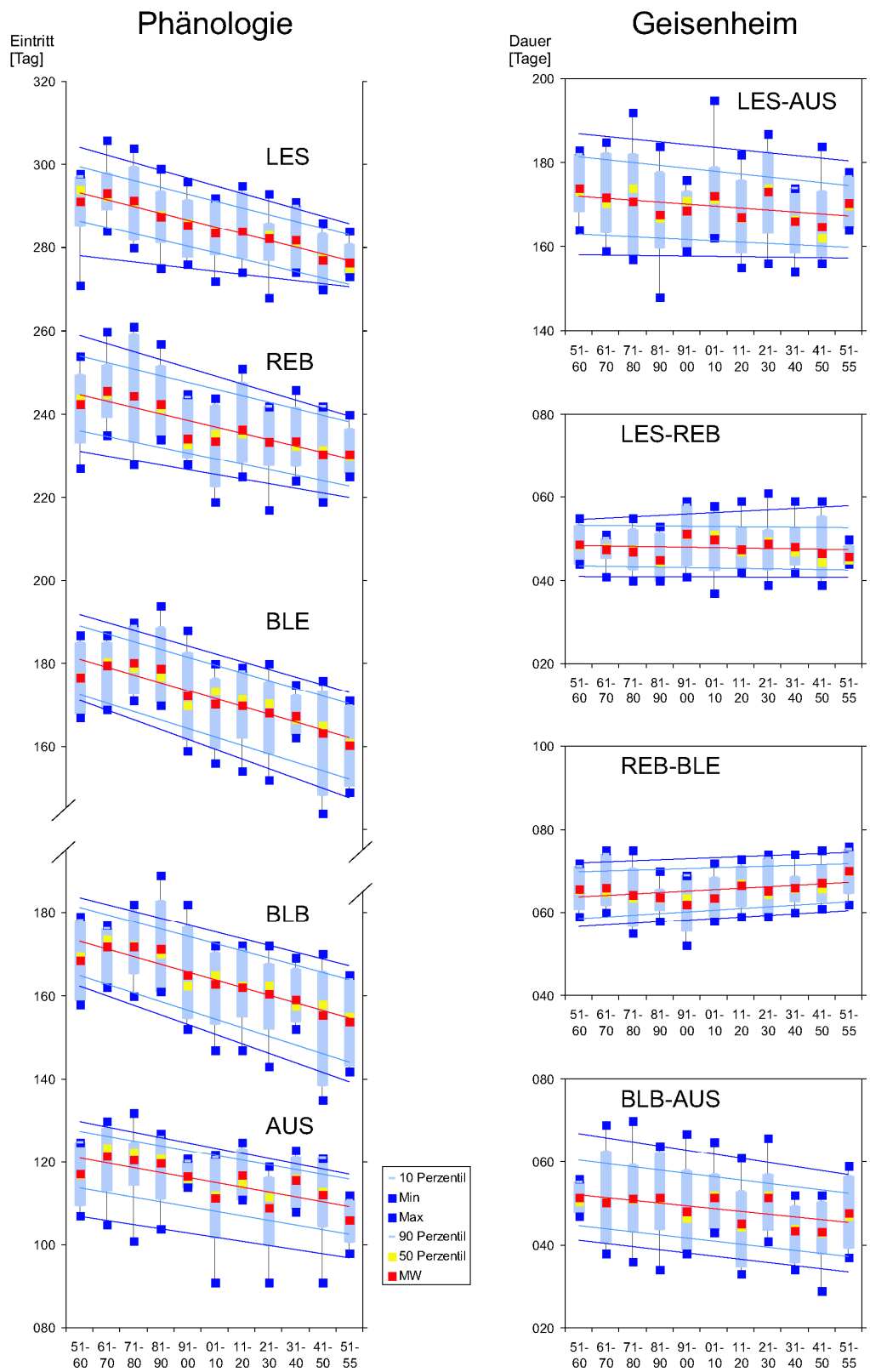


Abb. 30: Potenzielle Eintrittstermine und Dauer ausgewählter phänologischer Phasen an der Station Geisenheim

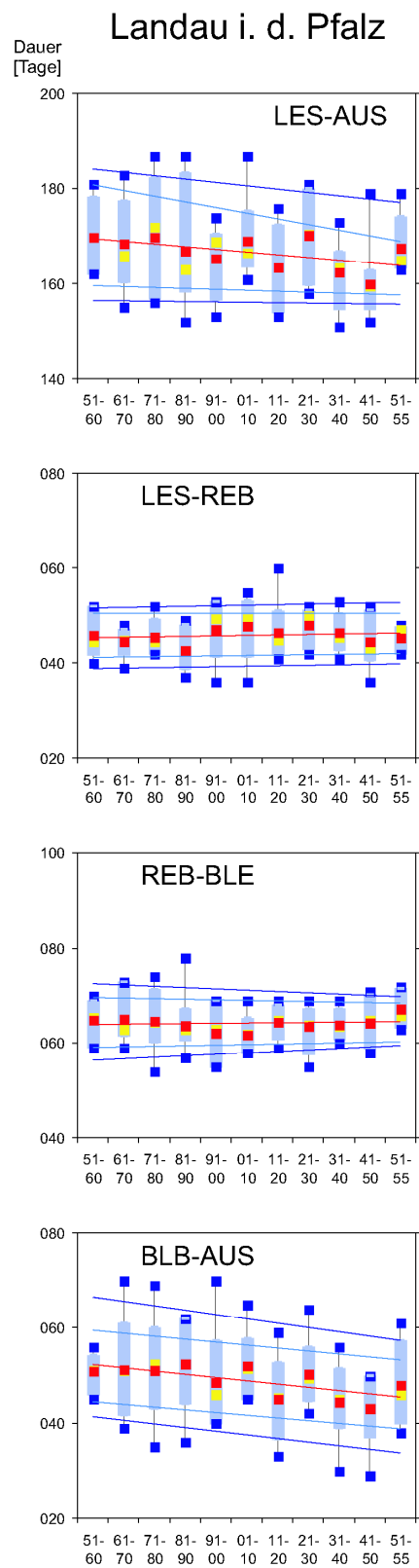
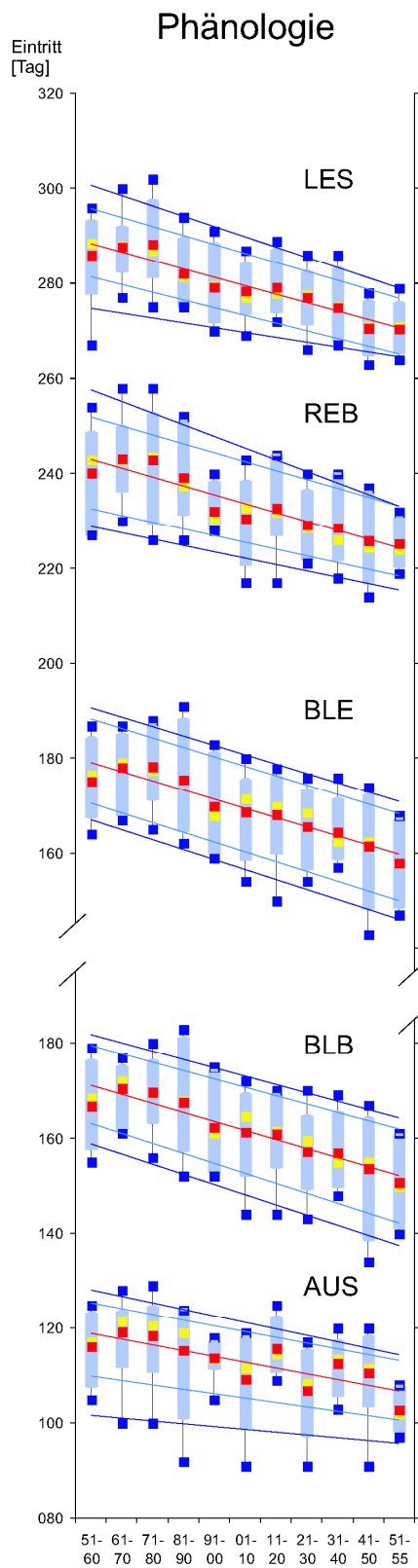


Abb. 31: Potenzielle Eintrittstermine und Dauer ausgewählter phänologischer Phasen an der Station Landau i. d. Pfalz

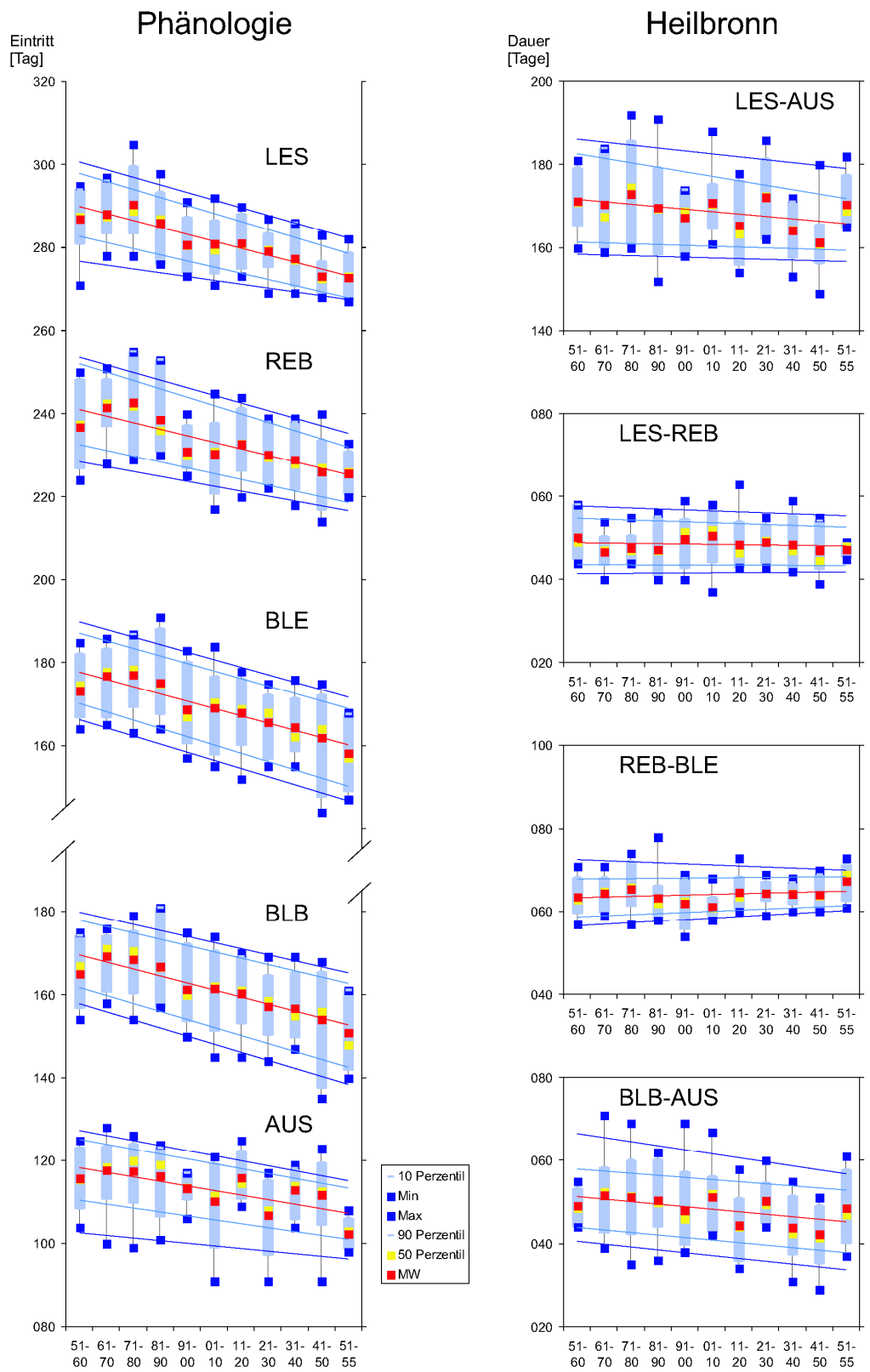


Abb. 32: Potenzielle Eintrittstermine und Dauer ausgewählter phänologischer Phasen an der Station Heilbronn

9.2.2.3 Weinbaulich relevante Kenngrößen

9.2.2.3.1 Phase zwischen Austrieb und Blühbeginn

Spätfröste ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) stellen eine Gefährdung der jungen assimilatorischen Organe am Rebstock nach Austrieb dar. Bei einer anhaltenden Erwärmung ist primär eine Verringerung dieser Ereignisse zu erwarten. Eine Erwärmung führt aber zu einer Verfrühung des Austriebs, damit erhöht sich das Risiko des Eintritts von Spätfrösten tendenziell wieder. Dabei bietet sich für die Referenzstandorte ein in der Tendenz einheitliches in den absoluten Größen jedoch differenziertes Bild. Für den Standort Geisenheim (vgl. Abb. A39) entfallen 6 der insgesamt 10 Spätfrostereignisse im ZUSZ auf die Verfrühung des Austriebs. Für den Referenzstandort Landau weist das ZUSZ insgesamt 23 Spätfrostereignisse aus (vgl. Abb. A58). Davon entfallen 12 auf das durch früheren Austrieb erhöhte Risiko. Für Heilbronn finden sich insgesamt 17 Spätfrostereignisse (vgl. Abb. A77) im ZUSZ, davon werden 8 durch den früheren Austrieb verursacht. Insgesamt nimmt das Risiko dieser Ereignisse im ZUSZ gegenüber den 1990-er Jahren nicht weiter ab. Aufgrund des kompensatorischen Einflusses der mit der Erwärmung einhergehenden Austriebsverfrühung kann die Tendenz bei Szenarien mit stärkerer Erwärmung nicht abgeschätzt werden.

Die Bedingungen für das **Rebwachstum** zwischen Austrieb und Blühbeginn wurden in vier Gruppen (schnell, optimal, verlangsamt, gehemmt) ausgewertet.

Die Anzahl der Tage mit **schnellem Rebwachstum** ($20^{\circ}\text{C} \leq T_{\max} < 25^{\circ}\text{C}$) nahm innerhalb des BASZ ab und stabilisierte sich dann auf dem in den 1990-er Jahren erreichten Niveau auch für das ZUSZ:

	(1950-er,	1990-er,	2050-er):
Geisenheim:	20d ± 5d	15d ± 5d	15d ± 5d;
Landau:	19d ± 3d	15d ± 3d	12d ± 6d;
Heilbronn:	19d ± 4d	15d ± 4d	14d ± 5d.

Die Bedingungen für **optimales Rebwachstum** ($25^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{max}} < 30^{\circ}\text{C}$) verbessern sich leicht (Anzahl der Tage nimmt um 1d bis 2d zu).

Verlangsamtes Rebwachstum ($30^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{max}} < 35^{\circ}\text{C}$) zeigt für alle drei Referenzstandorte eine ähnliche Zunahme (1d bis 2d).

Durch zu hohe Temperaturen ($T_{\text{max}} \geq 35^{\circ}\text{C}$) **gehemmtes Wachstum** trat im BASZ an keiner der drei Referenzstationen auf. Im ZUSZ treten diese Bedingungen als höchst seltene Einzelereignisse auf (1 bis 2 Ereignisse im gesamten ZUSZ pro Standort). Diese einzelne Veränderung ist damit nicht als wesentlich einzuschätzen und liegt im Rahmen der bei der Nutzung von STAR auftretenden modellinternen Schwankungen.

Insgesamt verbessern sich damit die Wachstumsbedingungen zwischen AUS und BLB in Zukunft nicht. Aufgrund der in dieser Phase wirkenden kompensatorischen Mechanismen zwischen den einzelnen Wachstumstypen können weitere Tendenzen dieser Veränderungen bei Szenarien mit stärkerer Erwärmung nicht sicher abgeschätzt werden.

9.2.2.3.2 Phase zwischen Blühbeginn und Blühende

Eine Verlängerung der Blühdauer durch niedrige Temperaturen ($T_{\text{min}} \leq 10^{\circ}\text{C}$) trat nur vereinzelt im Beobachtungszeitraum BASZ auf. Dieses Verhalten bleibt auch im ZUSZ bestehen.

9.2.2.3.3 Phase zwischen Blühende und Reifebeginn

Das **Rebwachstum zwischen Blüte und Reifebeginn** wurde in analoger Weise zur Phase zwischen Austrieb und Blüte ebenfalls in vier Gruppen (beschleunigt, optimal, günstig, verlangsamt) eingeteilt und die Häufigkeiten für BASZ und ZUSZ ausgewertet.

Die Anzahl der Tage mit **beschleunigtem Rebwachstum** ($20^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{max}} < 25^{\circ}\text{C}$) nahm innerhalb des BASZ bis zu den 1990-er Jahren deutlich ab. Danach zeigte sich bei großen Schwankungen zwischen den Dekaden ein differenziertes Bild im ZUSZ mit keiner eindeutig feststellbaren Tendenz:

	(1950-er,	1990-er,	2050-er):
Geisenheim:	32d \pm 8d	22d \pm 7d	26d \pm 3d;
Landau:	29d \pm 9d	20d \pm 8d	20d \pm 4d;
Heilbronn:	30d \pm 7d	21d \pm 6d	24d \pm 6d.

Gegenläufig dazu verhielten sich die Tage mit **optimalen Wachstumsbedingungen** ($25^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{max}} < 30^{\circ}\text{C}$) im BASZ mit einer Tendenz der Stabilisierung im ZUSZ

	(1950-er,	1990-er,	2050-er):
Geisenheim:	18d \pm 7d	23d \pm 4d	23d \pm 7d;
Landau:	18d \pm 6d	23d \pm 4d	26d \pm 5d;
Heilbronn:	18d \pm 6d	23d \pm 3d	19d \pm 6d.

Die Häufigkeit von **günstigen Wachstumsbedingungen** ($30^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{max}} < 35^{\circ}\text{C}$) nahm innerhalb des BASZ zu. Im ZUSZ stabilisierte sich dieses höhere Niveau.

	(1950-er,	1990-er,	2050-er):
Geisenheim:	5d \pm 4d	9d \pm 6d	8d \pm 1d;
Landau:	6d \pm 5d	11d \pm 6d	11d \pm 3d;
Heilbronn:	5d \pm 4d	11d \pm 7d	14d \pm 4d.

Verlangsamtes Rebwachstum ($T_{\text{max}} \geq 35^{\circ}\text{C}$) trat im BASZ bis in die 1990-er Jahre nur sehr selten auf. Im Jahre 2003 werden hier neue Marken gesetzt, für Geisenheim treten diese Bedingungen an 6d, Landau an 8d und für Heilbronn an 9d auf. Im ZUSZ wird eine geringfügige Zunahme des ursprünglich sehr niedrigen Niveaus (auf ca. 2d bis 3d pro Jahr) ausgewiesen.

Insgesamt lässt sich eine im wesentlichen selbstkompensierende Verschiebung zwischen den einzelnen Typen des Wachstums mit einer Tendenz zur Verbesserung der Wachstumsbedingungen ableiten. Als Tendenz bei Szenarien mit stär-

kerer Erwärmung lässt sich eine eventuelle weitere Verbesserung der thermischen Wachstumsbedingungen abschätzen.

Die **Niederschlagssumme** zwischen Austrieb und Reifebeginn zeigt im BASZ eine Tendenz der Abnahme bis in die frühen 2000er. Dieses verringerte Niveau wird im ZUSZ mindestens erhalten bleiben. Genauere Abschätzungen zur Wirkung auf das Rebwachstum bleiben zukünftigen Arbeiten vorbehalten.

9.2.2.3.4 Phase zwischen Reifebeginn und Lesebeginn

Die **Reifeverzögerung** durch zu niedrige Minimaltemperaturen ($T_{min} \leq 7^{\circ}\text{C}$) zeigt eine deutlich abnehmende Tendenz im BASZ. Das für die 1990-er erreichte niedrige Niveau wird im ZUSZ mindestens nicht wieder ansteigen.

	(1950-er,	1990-er,	2050-er):
Geisenheim:	17d \pm 6d	6d \pm 4d	6d \pm 5d;
Landau:	14d \pm 3d	7d \pm 7d	6d \pm 5d;
Heilbronn:	14d \pm 3d	6d \pm 6d	4d \pm 5d.

Bei Szenarien mit stärkerer Erwärmung sind tendenziell eher weniger Reifeverzögerungen durch zu niedrige Minimaltemperaturen zu erwarten.

Eine **Reifeverzögerung** durch zu hohe Maximaltemperaturen ($35^{\circ}\text{C} \leq T_{max}$) tritt im BASZ für Geisenheim erstmals im Jahre 2003 mit 6 Ereignissen auf. Für Landau werden ein singuläres Ereignis in den 1970-ern aber 9 Ereignisse für 2003 ausgewiesen. Für Heilbronn finden sich je ein Ereignis in den 1950-ern und 1970-ern. Für 2003 traten diese Bedingungen insgesamt 9 mal auf. Diese Ereignisse treten im ZUSZ etwas häufiger (aber immer noch selten) als im BASZ bis zu den 1990-ern ein. Bei Szenarien mit stärkerer Erwärmung sind daher eher mehr Tage mit Reifeverzögerung durch zu hohe Maximaltemperaturen zu erwarten.

Günstige Bedingungen für die Reife ($7^{\circ}\text{C} < T_{min} \leq 20^{\circ}\text{C}$) zeigen im BASZ für alle drei Standorte eine deutliche Zunahme bis in die 1990-er. Im ZUSZ bleibt dieses höhere Niveau erhalten. Besonders der Standort Geisenheim hat dabei

von der in den 1990-ern gegenüber 1950-ern bereits eingetretenen Erwärmung profitiert (Zahl der günstigen Tage in der Reifephase):

	(1950-er,	1990-er,	2050-er):
Geisenheim:	32d ± 5d	45d ± 7d	40d ± 5d;
Landau:	32d ± 6d	40d ± 7d	39d ± 4d;
Heilbronn:	37d ± 6d	44d ± 7d	43d ± 4d.

Diese Werte zeigen für alle Standorte im BASZ deutliche Verbesserungen bei insgesamt sehr hoher Schwankung bis in die 1990-er Jahre. Im ZUSZ treten für Landau und Heilbronn keine wesentlichen Veränderungen mehr auf. Daher lässt sich die weitere Tendenz bei Szenarien mit stärkerer Erwärmung nicht sicher abschätzen.

Beschleunigte Reifebedingungen mit Bezug zur Maximaltemperatur treten für den Temperaturbereich $20^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{max}} < 25^{\circ}\text{C}$ auf. Die Zahl der Tage mit beschleunigtem Reifeverlauf nahm im Verlauf von BASZ und ZUSZ beständig zu

	(1950-er,	1990-er,	2050-er):
Geisenheim:	13d ± 5d	17d ± 6d	18d ± 5d;
Landau:	14d ± 5d	19d ± 4d	19d ± 5d;
Heilbronn:	15d ± 5d	19d ± 4d	20d ± 3d.

Optimale Reifebedingungen mit Bezug zur Maximaltemperatur treten für den Temperaturbereich $25^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{max}} < 30^{\circ}\text{C}$ auf. So betrug die Zahl der Tage mit optimalen Reifebedingungen

	(1950-er,	1990-er,	2050-er):
Geisenheim:	4d ± 6d	6d ± 4d	10d ± 5d;
Landau:	6d ± 4d	8d ± 6d	10d ± 5d;
Heilbronn:	6d ± 5d	8d ± 5d	13d ± 7d.

Ungünstige Reifebedingungen durch zu hohe Minimal- bzw. Nachttemperaturen ($T_{\text{min}} \geq 20^{\circ}\text{C}$, auch: Tropennacht) traten bisher (im BASZ) sehr selten auf. Dieses Phänomen konnte im Gegensatz zum sporadischen kurzzeitigen Auftreten in den 1950-er und 1980-er Jahren erstmals gehäuft im extrem warmen

Sommer 2003 beobachtet werden. Dabei stellen Tropennächte nicht nur eine ungünstige Bedingung für die allgemeine phänologische Entwicklung in der Reifung der Reben dar, sondern lassen auch nachts einen weitgehend ungehemmten Säureabbau in der Reifephase zu. Dies kann das bisher ausgewogene Wechselspiel zwischen dem Aufbau wichtiger Inhaltsstoffe und dem langsam absinkenden Säuregehalt stören. Inwieweit dies den für den deutschen Riesling typischen „eleganten Charakter“ verändern kann, wird im Kapitel 9.2.2 noch diskutiert.

In Geisenheim und Landau traten bis zum Jahre 2002 noch keine Tropennächte auf. Im Sommer 2003 fiel die Temperatur in Geisenheim erstmalig in 2 Nächten nicht unter diese Marke. In Landau werden im BASZ insgesamt 3 Tropennächte für das Jahr 2003 ausgewiesen. Am Standort Heilbronn lässt sich für die Jahre 1951 und 1987 je eine Tropennacht in den Aufzeichnungen erkennen, für das Jahr 2003 traten 2 Tropennächte auf. Damit ergaben sich während des Sommers 2003 durchaus veränderte Reifebedingungen. Diese Ereignisse werden in Zukunft häufiger, wenn auch anfangs noch selten, auftreten. Etwa ab den 2030-er Jahren ist dann mit dem jährlichen Auftreten von 1 bis 3 Tropennächten zu rechnen. Bei Szenarien mit stärkerer Erwärmung sind eher mehr Tropennächte als hier ausgewiesen zu erwarten.

Bei Fortschreibung der im Rahmen dieser Studie angenommenen moderaten Erwärmung wird für die nächsten Jahrzehnte im Mittel noch keine deutliche Gefährdung des „eleganten“ Charakters für die Sorte Riesling auf diesen Standorten signalisiert. Jedoch muss bei einem - zu erwartenden - häufigeren Auftreten von Extremsommern wie im Jahre 2003 mit einer zunehmenden Gefährdung für den „eleganten“ Charakter gerechnet werden. Spätestens ab Ende der 2030-er sollte sich der deutsche Weinbau auf das regelmäßige Auftreten derartiger Sommerverläufe einstellen. Abschließend sei auf die Tendenz bei Szenarien mit stärkerer Erwärmung hingewiesen – dabei ist eher mit einer tendenziell zunehmenden Gefährdung des „eleganten Charakters“ durch Extremsommerereignisse wie im Jahre 2003 zu rechnen.

Die **Niederschlagssumme** zwischen Reife- und Lesebeginn zeigt im BASZ eine Zunahme bis in die frühen 2000er. Dieses erhöhte Niveau wird im ZUSZ mindestens erhalten bleiben. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von feucht-warmer Witterung (in extremer Form im Spätsommer/Herbst 2006) in dieser wichtigen phänologischen Phase mit all ihren Folgen für Rebgesundheit, Lesegutqualität usw. wird in Zukunft damit eher zunehmen.

Detaillierte quantitative Aussagen zu den Veränderungen in dieser wichtigen Phase werden daher Gegenstand weiterer Bearbeitung sein.

Frühfröste ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) können die Entwicklung der reifenden Rebe gefährden. Bei entsprechender Stärke und Andauer ist mit Qualitäts- und Ertragseinbußen, u. U. mit Totalausfällen zu rechnen. Insofern ist eine Risikoabschätzung bedeutsam. Traten Frühfröste im BASZ bereits ab den 1980-ern nur noch extrem selten auf, so wird dieses niedrige Niveau im ZUSZ mindestens erhalten bleiben. Diese Ereignisse werden durch die generell zu erwartende Erwärmung und den dadurch früheren Lesebeginn immer unwahrscheinlicher. Bei Szenarien mit stärkerer Erwärmung sind daher eher weniger bzw. überhaupt keine Frühfröste mehr zu erwarten.

9.2.2.3.5 Phase der Dormanz

Die Rebpflanzen treten mit dem Blattabwurf in die **Dormanz** ein. Dieser Vorgang wird derzeit noch nicht im Phänologiemodell erfasst. Trotzdem sollen dieser Phase einige wichtige Ereignisse zugeordnet werden, soweit sie vom meteorologischen Teil des Phänologiemodells ausgewiesen wurden. Die Einbeziehung des Blattabwurfes in das Phänologiemodell ist in Zukunft vorgesehen.

Die Bestimmung einer **potenziellen Eisweinlese** ist kein spezielles phänologisches Ereignis. Diese Bestimmung erfolgte aber zweckmäßigerweise innerhalb der Auswerterroutinen für abgeleitete Klimagrößen und Ereignisse im Phänologiemodell. Geprüft werden zwischen Lesebeginn und vor dem 31.01. des Folgejahres nur die meteorologischen Bedingungen (erstmaliges Auftreten von

$T_{\min} \leq -7^{\circ}\text{C}$). Es kann davon ausgegangen werden, dass die Weinbauern diese jeweils erste Möglichkeit nutzen, soweit

- sie eine Eisweinlese anstreben;
- das erreichte Mostgewicht die Voraussetzungen dafür erfüllt;
- die Qualität des Lesegutes nicht durch Krankheiten, Schädlinge oder mechanische Beschädigungen beeinträchtigt ist

Es konnte mit dem vorliegenden ZUSZ keine signifikante Abnahme der potenziellen Möglichkeiten einer Eisweinlese an allen untersuchten Standorten gegenüber den gegenwärtigen Bedingungen ausgewiesen werden. Bereits in der Vergangenheit (BASZ) traten vereinzelt Jahre ohne die meteorologischen Bedingungen für eine Eisweinlese auf. Mit einem gehäuften Auftreten dieser Einzelercheinungen ist ausgehend vom gegenwärtigen Wissensstand unter Annahme des moderaten Emissionsszenariums (einschließlich der Aufzeichnungen des Winters 2006-2007) in Zukunft nicht zu rechnen. Als Tendenz bei Szenarien mit stärkerer Erwärmung werden trotzdem eher weniger Eisweintage erwartet als bisher.

Schadfröste können an Rebstöcken während der Dormanz auftreten, falls T_{\min} Werte von -15°C unterschreitet. Es konnte keine signifikante Abnahme dieser eher seltenen Ereignisse für das ZUSZ gegenüber dem BASZ festgestellt werden. Bei Szenarien mit stärkerer Erwärmung ist eher mit weniger Schadfrösten zu rechnen.

10 Anpassungsstrategien

Die zukünftige Entwicklung des Weinbaus in Deutschland wird zunehmend vom Klimawandel beeinflusst werden. Dabei ist es unseres Erachtens von entscheidender Bedeutung, dass dies vom Weinbau als große Herausforderung wahrgenommen wird, um Risiken erkennen und vermeiden sowie mögliche Vorteile nutzen zu können. Die von uns im Projekt Klima 2050 erarbeiteten Szenarien und Ergebnisse sollten daher nicht als Prognosen missverstanden sondern als Ansatzpunkte für Maßnahmen aufgefasst werden. Zukunft ist kein einmal vorgezeichneter Pfad sondern gleicht eher einem Labyrinth, bei dessen Begehung es auch von einer Abfolge einer Reihe von Entscheidungen abhängt, wie wir zum Ziel gelangen, oder ob wir in einer Sackgasse landen. In diesem Sinne haben wir unser Klimamodell als einer Art „Zukunftsradar“ eingesetzt, um einen Lageplan des Labyrinths „Zukunft des Weinbaus im Klimawandel“ vorzulegen, der zugegebenermaßen noch relativ unscharf, lückenhaft und sicherlich auch hier und da fehlerbehaftet ist, als Orientierungshilfe dennoch dem Zustand der Blindheit überlegen ist. Die Entscheidungsträger sind hier in einer ähnlichen Lage, wie die großen Entdecker im sechzehnten Jahrhundert, die mit zum Teil zweifelhaftem Kartenmaterial unbekannte Gewässer bereisten. Dass sie dies mit großem Erfolg und nur verhältnismäßig wenigen Schiffbrüchen bewältigten, verdankten sie ihrem seemännischen Können, dem Bewusstsein über die Unzulänglichkeiten des Kartenmaterials und der unermüdlichen Mitarbeit an der Verbesserung desselben. Wenn wir in diesem Bilde bleiben, sind die im Folgenden dargelegten Anpassungsstrategien und -maßnahmen als eine Art Checkliste zu verstehen, um anhand der Karten vor Ort sicher mit Hilfe von Lot, Kompass und Sextant manövrieren zu können. Für eine spezifische weinbauliche Lage heißt das, einen Katalog von Handlungsoptionen und Manövrierhilfen anhand der Ergebnisse unseres Projekts sowie lokaler lagespezifischer Beobachtungsdaten zusammenzustellen.

Das in Abb. 33 dargestellte Ablaufdiagramm zeigt beispielhaft das Vorgehen bei der Entwicklung von Anpassungsstrategien. Dabei wird vorgeschlagen, die folgenden sechs Schritte im Dialog mit Betroffenen sowie Weinbau- und Klimaexperten zu erörtern.

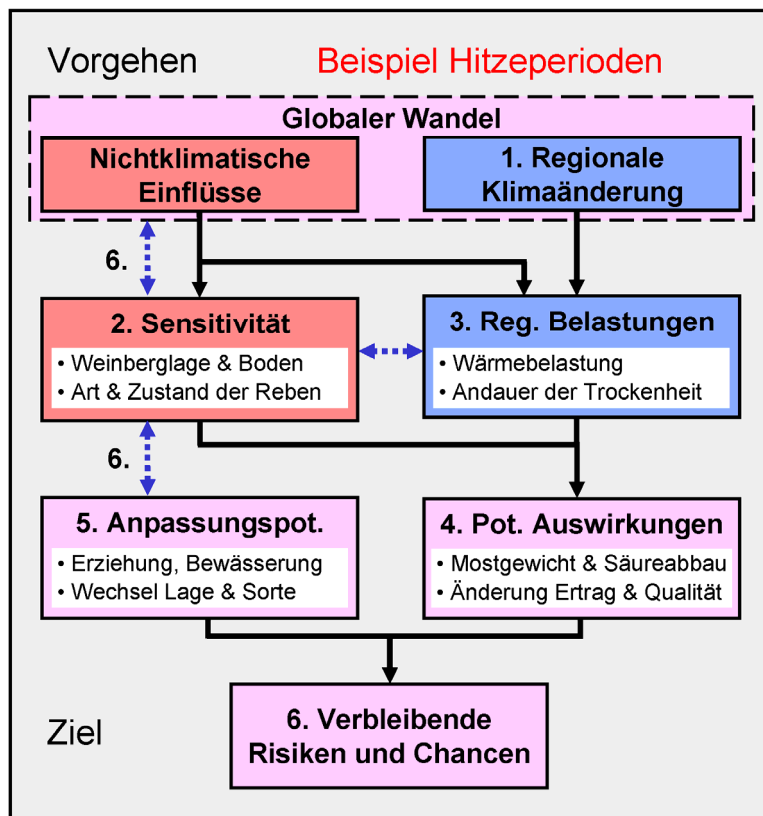


Abb. 33: Schema zur Entwicklung von Anpassungsstrategien

10.1 Übertragung regionaler Szenarien zum Klimawandel

Die Daten zu den regionalen klimatischen Veränderungen in den Klimaszenarien sind regionale Mittelwerte, von denen sich die lagenspezifischen klimatischen Bedingungen teilweise deutlich unterscheiden können. Anhand eines Vergleiches früherer Messwerte am Standort und Aufzeichnungen von klimatischen Besonderheiten und extremen Wettermerkmalen in der Vergangenheit mit den Daten des regionalen Basisszenariums (1951-2000) lassen sich die spezifischen Abweichungen und Besonderheiten einer jeweiligen Lage ermitteln. Auf dieser Grundlage können dann die Daten des regionalen Zukunftsszenariums (2001-2055) in die lagenspezifisch zu erwartenden zukünftigen Entwicklungen des Klimas übertragen werden.

10.2 Bewertung spezifischer Sensitivitäten

Aus den Aufzeichnungen der standortbedingten klimatischen Besonderheiten und der beobachteten Auswirkungen extremer Wettermerkmale in der Vergangenheit lassen sich auch die spezifischen Sensitivitäten charakterisieren. Von Bedeutung für die Auswirkungen von Klimaänderungen sind unter anderem folgende Merkmale:

- lokale mikroklimatische Besonderheiten einer Lage (Terroir)
- Bodenart, Verdichtung, Bewuchs, Bodenwasserhaushalt
- Höhe, Hangneigung und Ausrichtung
- Rebsorte und Unterlage, Alter und Vorgeschichte (z.B. frühere Schädigungen)
- Erziehung und Bewirtschaftung

Aus diesen Merkmalen ergeben sich die spezifischen Anfälligkeiten einer Lage gegenüber den klimatischen Veränderungen

10.3 Klimatische Belastungen

Auf der Grundlage der vorangegangenen lagenspezifischen Datensammlung und -bewertung ergeben sich für die Abfolge der verschiedenen phänologischen Entwicklungsphasen von Rebe und Traube die relevanten Belastungen in Form von:

- Trendentwicklungen der wichtigsten Klimaparameter,
- möglichen Entwicklungen bei Klimavariabilität und Extremwetterereignissen und
- Risikofaktoren für das Auftreten von Krankheiten und Schaderregern (neue Typen, neue Generationen, erhöhte Häufigkeit bzw. veränderte Phänologie).

In der vorliegenden Arbeit wird ein Phänologiemodell verwendet, das an die Entwicklung des Rieslings im Rheingau angepasst wurde. Hier sind bei anderen Sorten und regionalen Verhältnissen daher zusätzliche Überlegungen zur Anwendbarkeit erforderlich.

10.4 Abschätzung potenzieller Auswirkungen

Die qualitative Analyse der Zusammenhänge zwischen den klimatischen Belastungen und den sensitiven Strukturen ergibt eine Liste möglicher positiver oder negativer Effekte in Form von Ursachen-Wirkungs-Beziehungen. Zu den Ursachen, wie Hitzeperioden, Trockenheit oder Feuchte in entsprechenden phänologischen Entwicklungsphasen gehören jeweils Auswirkungen auf Wachstum, Reifung, Schaderregerrisiko, Ertrag, Mostgewicht, Säuregehalt und andere Qualitätsmerkmale. Zur Quantifizierung können, falls vorhanden geeignete Modelle oder ersatzweise Expertenschätzungen herangezogen werden.

10.5 Analyse des vorhandenen Anpassungspotenzials

Die Liste lässt sich im nächsten Schritt zu einer Tabelle erweitern mit den Spalten:

- Ursachen, beschrieben als klimatische Belastungen,
- Einflussfaktoren, in Form von lagespezifischen Sensitivitäten,
- potenziellen Auswirkungen und ergänzend
- vorhandene und mögliche Anpassungsmaßnahmen.

Wesentlicher Schritt ist hier die Ergänzungen der Liste von Ursachen-Wirkungs-Beziehungen durch mögliche Anpassungsmaßnahmen, die entweder bei den Belastungen oder den Sensitivitäten ansetzen. Beispiele sind Bewässerung, Schutzfolien, Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, Änderungen bei Erziehung, Sorte oder gar Lage. Zusätzliche Maßnahmen ergeben sich bei der Kellertechnik, wie beispielsweise durch den Einsatz von Umkehrosmose bei zu regenreichen Jahrgängen.

10.6 Bewertung von verbleibenden Risiken und Chancen

Die einzelnen Maßnahmen im so ermittelten Anpassungspotential lassen sich hinsichtlich Aufwand und Effektivität bewerten und ihr Einsatzbereich anhand von

Indikatoren bestimmen und abgrenzen. Dazu gehört ergänzend die Berücksichtigung anderer, nichtklimatischer Einflüsse und Nebeneffekte, um zusätzliche Verwundbarkeiten zu vermeiden. Mögliche zu berücksichtigende Faktoren sind unter anderem:

- Veränderungen am Weltweinmarkt:
 - neue Produzenten (z.B. Indien) oder
 - neue Konsumenten und andere Nachfragestrukturen,
- Änderungen der Regelungen auf lokaler, nationaler oder EU-Ebene,
- Änderungen der Geschäftsbedingungen (Abgaben, Steuern, Recht, Versicherung)
- Nutzung anderer Geschäftsfelder (z.B. Weintourismus).

Es lässt sich so eine Übersicht von Maßnahmen und verbleibenden Risiken und Chancen erstellen (Tabelle 28).

Tabelle 28: Beispiele für einen Umgang mit möglichen Folgen des Klimawandels im Weinbau

Chancen	Risiken	Anpassungsmaßnahmen
Mehr Sortenmöglichkeiten	Veränderungen im Sortencharakter	Lagenspezifische Analyse des klimatischen Entwicklungspotenzials, Etablierung von Cuvées
Frühere Vegetationsphasen, schnelleres Wachstum	beschleunigtes Wachstum auch bei Schaderregern	Resistente Sorten (ggf. mit Hilfe gentechnischer Methoden)
Mehr Strahlung: beschleunigte Reife	auch mehr Sonnenbrand	Wechsel der bevorzugten Lagen, angepasste Erziehung, Folien
Höhere Qualität einiger Jahrgänge	Einbußen bei anderen Jahrgängen, höhere Variabilität	Versicherungssysteme, Derivate, Etablierung von Cuvées
Weitere Regionen & Flächen	Zusätzlicher Wettbewerb	Offensives Marketing, Förderung des Weintourismus
Steigende Erträge	Sinkende Renditen	Nachhaltiges Qualitätsmanagement

11 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Abschätzung der zukünftigen klimatischen Entwicklung in ausgewählte Weinbauregionen wurde das weiterentwickelte statistisch basierte Szenarienmodell STAR eingesetzt. Das Modell verknüpft generalisierte Informationen aus Berechnungen mit einem globalen Klimamodell (ECHAM4-T42-OPYC) mit regionalen Beobachtungsdaten über eine erweiterte nicht-hierarchische Clusteranalyse.

Durch Monte-Carlo-Simulationen wurde die für ein ausgewähltes meteorologisches Element wahrscheinlichste Entwicklung berechnet.

Das Modell wurde an Beobachtungsdaten validiert, wobei die Fehlerquote für alle meteorologischen Größen im Mittel weniger als 10% betrug.

Den Szenarienrechnungen vorangestellt wurde eine Prüfung und Homogenisierung der Daten von 700 meteorologischen Stationen.

Es wurde ein transientes Szenarium für den Zeitraum 2001-2055 mit einem aus dem ECHAM4-T42-OPYC-Lauf abgeleiteten Temperaturanstieg von ca. 1.2 K berechnet, analysiert und mit dem aktuellen Klima verglichen.

Aus den vorliegenden Ergebnissen wurden Schlussfolgerungen hinsichtlich der zu erwartenden Klimaänderungen abgeleitet, die wichtige Grundlagen für die Beurteilung von Klimaänderungen für den Weinbau bereitstellen.

Durch die Anbindung der Szenariendaten an die Rebphänologie konnten eine Reihe weinbaulich relevanter Kenngrößen ausgewertet werden.

Ein kurzer Ausblick auf die geplanten weiterführenden Arbeiten soll den hier vorliegenden Bericht abschließen.

Neben den in diesem Bericht behandelten Veränderungen auf pflanzenphysiologischer Ebene sind in Zukunft insbesondere Veränderungen im Wechselspiel Wetter-Rebe-Schaderreger zu erwarten. Dabei kann allgemein von einem insgesamt nicht nachlassenden Schaderregerdruck ausgegangen werden. Daneben werden bestimmte Schaderreger häufiger bzw. stärker auftreten. Auch bisher nicht oder nur selten beschriebene Erreger können erwartet werden.

Erste Studien auf der Grundlage eines Szenariums bis zum Jahre 2055 für Sardinien zum Generationsablauf von *Lobesia botrana* (Cossu et al., 2004) zeigten, dass in Zukunft mit dem verstärkten Auftreten einer vierten Generation unmittelbar vor bzw. während der Reifung und Ernte zu rechnen ist. In Deutschland treten in der Regel zwei relevante Generationen auf. Im Jahre 2003 traten in den wichtigsten Anbaugebieten des Untersuchungsgebietes drei Generationen auf. Diese späteren Generationen besitzen ein erhebliches Schadpotential und können wegen der Gefahr der Kontaminierung des Lesegutes mit chemischen Pflanzenschutzmitteln kaum noch kontrolliert werden.

Das in den letzten Jahren (seit ca. 2003) verstärkte Auftreten der Schwarzfäule der Rebe (*Guignardia bidwellii*) an Mosel, Mittelrhein und Nahe sollte beachtet werden. Drieschen und höheres Restinfektionspotential im ökologischen Weinbau können hier beizeitigem warm-feuchten Frühjahr für die weitere Verbreitung sorgen (Holz, 2004). Bisher besitzt diese Erkrankung in Baden und Württemberg noch keine wirtschaftliche Bedeutung. Ähnliches gilt für die immer weitere Verbreitung der Schwarzholzkrankheit (*Bois noir*) und das zunehmende Auftreten seines Vektors, der aus dem südlichen Europa stammenden Winden-Glasflügelzikade (*Hyalesthes obsoletus*). Ein Schwerpunkt dieser Erkrankung hat sich in den Steillagen an Mosel und Nahe herausgebildet (Langer, Maixner, 2003), obwohl das Auftreten bereits in allen großen Weinbaugebieten beobachtet wurde.

LITERATURVERZEICHNIS

- Allen JC (1976) A modified sine wave method for calculating degree-days. *Environmental Entomology* 5:388-396
- Bürger G (1996) Expanded downscaling for generating local weather scenarios. *Clim Res* 7:111-128
- Cossu A, Battaglini A, Bindi M (2004) Cambiamenti climatici e caratteristiche prodotti vedi un'area ad alta vocazione in Sardegna. *L' Informatore Agrario* 33:85-88
- DVWK - Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (1996) Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft 238, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser, Bonn
- Fraedrich K, Gerstengarbe F-W, Werner P C (2001) Climate shift during the last century. *Climatic Change* 50:405-417
- Gerstengarbe F-W & Werner PC (1997) A Method to Estimate the Statistical Confidence of Cluster Separation. *Theor Appl Climatol* 57:103-110
- Gerstengarbe F-W, Werner PC, Fraedrich K (1999) Applying non-hierarchical cluster analysis algorithms to climate classification: some problems and their solution. *Theor Appl Climatol* 64:143-150
- Glaser R (2001) Klimageschichte Mitteleuropas, 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen. Primus-Verlag, Darmstadt
- HLUG - Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2004) Die Standortkartierung der hessischen Weinbaugebiete. *Geologische Abhandlungen Hessen Band 114*, HLUG, Wiesbaden
- Holz B (2004) Schwarzfäule der Rebe (Black Rot) *Guignardia bidwellii* (Ellis) Viala & Ravaz. Informationsblatt der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Institut für Pflanzenschutz im Weinbau, Bernkastel-Kues
- Holz B (2005) First observation of the symptoms of *Guignardia bidwellii* VIALA & RAVAZ in the region Moselle-Saar-Ruwer. Informationsblatt der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Institut für Pflanzenschutz im Weinbau, Bernkastel-Kues
- Hoppmann D (2004) (mündliche Mitteilung).
- Hoppmann D & Berkelmann-Löhnertz B (2000) The prognosis of phenological stages of *Vitis vinifera* (cv. Riesling) for optimizing pest management. *EPPO Bulletin* 30:121-126
- Hoppmann D & Hüster H (1988) 100 Jahre Klimabeobachtungen im Rheingau. *Wein-Wissenschaft* 43:147-160
- Huglin P (1978) Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermique d'un milieu viticole. *CR Acad Agric*:1117-1126
- Huglin P (1986) *Biologie et écologie de la vigne*. Payot, Lausanne, Paris
- IPCC (2000) *Special Report on Emission Scenarios (SRES) of IPCC*
- IPCC (2001) *Climate Change 2001. Third Assessment Report of IPCC*
WG I: The Scientific Basis,
WG II: Impacts, Adaptation, and Vulnerability,
Cambridge University Press, Cambridge
- IPCC (2007) *Climate Change 2007. The 4th Assessment Report*
Vol 1 The Physical Science Basis of Climate Change, Summary Release, Paris
(URL= <http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>)
- Johnson H & Robinson J (2002) *Der Weinatlas*. Gräfe und Unzer, München
- Jones GV & Davis RE (2000) Climate Influences on Grapevine Phenology, Grape Composition, and Wine Production and Quality for Bordeaux, France. *American Journal of Enology and Viticulture* 51:249-261

- Langer M & Maixner M (2003) Schwarzholzkrankheit der Rebe (Bois noir). Informationsblatt der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Institut für Pflanzenschutz im Weinbau, Bernkastel-Kues
- LfU - Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2002) Landnutzungskarte (LANDSAT 2000). Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
- Lorenz DH, Eichhorn KW, Blei-Holder H, Klose R, Meier U, Weber E (1994) Phänologische Entwicklungsstadien der Weinrebe (*Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera*). *Vitic Enol Sci* 49:66-70
- Machenhauer B, Windelband M, Potzet M, Jones RG, Déqué M (1996) Validation of present-day regional climate simulations over Europe: Nested LAM and variable resolution global model simulations with observed or mixed layer ocean boundary conditions. MPI für Meteorologie Report 191, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.
- Österle H, Gerstengarbe F-W, Werner PC (2003) Homogenisierung und Aktualisierung des Klimadatensatzes der Climate Research Unit der Universität of East Anglia, Norwich. In: 6. Deutsche Klimatagung - Klimavariabilität. *Terra Nostra* 2003/6, Alfred-Wegener-Stiftung, Berlin, p 326-329
- Palutikof J (2000) Information Sheets - 4: Indicators of climate change in the UK. Climate Research Unit, <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/iccuk/>
- Stock M, Badeck F, Gerstengarbe F-W, Kartschall T, Werner PC (2003) Weinbau und Klima – eine Beziehung wechselseitiger Variabilität. In: 6. Deutsche Klimatagung - Klimavariabilität. *Terra Nostra* 2003/6, Alfred-Wegener-Stiftung, Berlin, p 422-426
- Stock M, Gerstengarbe F-W, Kartschall T, Werner PC (2005) Reliability of Climate Change Impact Assessments for Viticulture. In: Proceedings of the Seventh International Symposium on Grapevine Physiology and Biotechnology. *Acta Horticulturae* 689, ISHS, Leuven, p 29-40
- Weber E (1980) Grundriss der biologischen Statistik. Fischer, Jena
- Werner PC & Gerstengarbe F-W (1997) A proposal for the development of climate scenarios. *Clim Res* 8:171-182
- White MA, Diffenbaugh NS, Jones GV, Pal JS, Giorgi F (2006) Extreme heat reduces and shifts United States premium wine production in the 21st century. *Proc Natl Acad Sci USA* 103: 11217-11222
- Zadoks JC, Chang TT, Konzak CF (1974) A decimal code for the grown stages of cereals. *Weed Research* 14:415-421
- Zorita E, Hughes JP, Lettemaier DP, von Storch H (1993) Stochastic characterization of regional circulation patterns for climate model diagnosis and estimation of local precipitation. MPI für Meteorologie Report 109, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

Anlagen (CD)

- Anhang I Klima von Südwestdeutschland
- Anhang II Modell-Messwertvergleich
- Anhang III Weinbaulich relevante Kenngrößen

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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-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)
- No. 100 Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-2004) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky
6., verbesserte und ergänzte Auflage
F.-W. Gerstengarbe, P. C. Werner (September 2005)
- No. 101 An Asymptotic, Nonlinear Model for Anisotropic, Large-Scale Flows in the Tropics
S. Dolaptchiev (September 2005)
- No. 102 A Long-Term Model of the German Economy: $lagom^d_{sim}$
C. C. Jaeger (Oktober 2005)
- No. 103 Structuring Distributed Relation-Based Computations with SCDRC
N. Botta, C. Ionescu, C. Linstead, R. Klein (Oktober 2006)
- No. 104 Development of Functional Irrigation Types for Improved Global Crop Modelling
J. Rohwer, D. Gerten, W. Lucht (März 2007)
- No. 105 Intra-Regional Migration in Formerly Industrialised Regions: Qualitative Modelling of Household Location Decisions as an Input to Policy and Plan Making in Leipzig/Germany and Wirral/Liverpool/UK
D. Reckien (April 2007)
- No. 106 Perspektiven der Klimaänderung bis 2050 für den Weinbau in Deutschland (Klima 2050) -
Schlußbericht zum FDW-Vorhaben: Klima 2050
M. Stock, F. Badeck, F.-W. Gerstengarbe, D. Hoppmann, T. Kartschall, H. Österle, P. C. Werner,
M. Wodinski (Juni 2007)

