

HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN



Frank-M. Chmielewski, Antje Müller¹⁾, Wilfried Küchler²⁾

MÖGLICHE AUSWIRKUNGEN KLIMATISCHER VERÄNDERUNGEN
AUF DIE VEGETATIONSENTWICKLUNG IN SACHSEN

¹⁾ Humboldt-Universität zu Berlin

²⁾ Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Frank-M. Chmielewski, Antje Müller und Wilfried Kähler

Mögliche Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Vegetations- entwicklung in Sachsen

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt,
gefördert vom Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie

Mit 29 Abbildungen und 23 Tabellen

Eigenverlag HU Berlin, Juni 2004

Projektleiter: PD Dr. Frank-M. Chmielewski
Projektmitarbeiterin: Dipl. Geogr. Antje Müller

Anschrift:

Humboldt-Universität zu Berlin
Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät
Institut für Pflanzenbauwissenschaften
Lehrgebiet Agrarmeteorologie
Albrecht-Thaer-Weg 5
D-14195 Berlin

Email: chmielew@rz.hu-berlin.de

Projektbetreuung: Dipl. Met. Wilfried Kuchler

Anschrift:

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Ref. 22 – Gebietsbezogener Immissionsschutz / Klimawandel
Zur Wetterwarte 11
D-01109 Dresden

Email: wilfried.kuechler@lfug.smul.sachsen.de

Inhaltsverzeichnis

1	VORBEMERKUNGEN	4
2	DATEN UND METHODEN	5
2.1	Phänologische Daten	5
2.2	Klimadaten	6
2.2.1	Beobachtungsdaten	6
2.2.2	Klimaszenarien	7
2.3	Methodische Aspekte	8
2.3.1	Datenergänzungen	8
2.3.2	Auswertungsmethoden	9
2.3.2.1	Berechnung phänologischer und klimatologischer Mittelwertskarten.....	9
2.3.2.2	Phänologische Modelle	9
2.3.3	Berechnung der phänologischen Modelle und Darstellung der Ergebnisse ...	13
3	ERGEBNISSE	14
3.1	Rezente und künftige Klimaänderungen in Sachsen	14
3.1.1	Lufttemperatur	14
3.1.2	Niederschlagshöhe	17
3.1.3	Agrarklimatologisch relevante Parameter	19
3.1.3.1	Fröste.....	19
3.1.3.2	Thermische Vegetationsperiode.....	23
3.1.4	Klimatische Bedingungen in der Hauptvegetationszeit	27
3.2	Rezente und künftige Veränderungen in der Pflanzenentwicklung	29
3.2.1	Veränderungen in der Phänologie des Apfels	30
3.2.2	Überblick über die Veränderungen der Pflanzenentwicklung	35
3.2.2.1	Rezente und künftige Trends in der Entwicklung.....	35
3.2.2.2	Veränderung der Frostgefahr während der Blüte von Obstgehölzen.....	39
3.2.2.3	Extreme Verfrühungen in der Vegetationsentwicklung.....	40
3.2.2.4	Auswirkungen von Trockenheit auf die Pflanzenentwicklung	41
3.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	44
4	LITERATUR	47
5	ANHANGSVERZEICHNIS	50

1 Vorbemerkungen

Durch den bevorstehenden Klimawandel sind Ökosysteme, Wälder und landwirtschaftliche Nutzpflanzen erheblich gefährdet. So kann ein zeitigerer Austrieb der Pflanzen im Frühjahr zu einem erhöhten Spätfrostisiko führen. Eine Zunahme von Frostschäden wäre in diesem Fall möglich. Verschiebungen der Vegetationsperiode können in der landwirtschaftlichen Produktion Veränderungen in der Bewirtschaftung zur Folge haben und damit ökonomische Bedeutung erlangen. Zunehmende Trockenheit im Sommer, verbunden mit höheren Temperaturen, kann sowohl für die natürlichen als auch für die gestalteten Ökosysteme zu vielfältigen negativen Auswirkungen führen.

Phänologische Daten ermöglichen die Saisonalität von Pflanzen zu beschreiben, die natürliche Vegetationszeit einer Region zu definieren und den jährlichen Entwicklungsverlauf der Vegetation darzustellen. Da die Entwicklungsprozesse der Pflanzen in hohem Maße temperaturabhängig sind, werden phänologische Beobachtungen zu sensitiven Bioindikatoren von Klimaänderungen in den mittleren und höheren Breiten. Dies gilt vor allem für die Frühjahrsphasen, d.h. dem Aufbrechen der Knospen, der Blattentfaltung und der Blüte von Pflanzen.

Bereits zum Ende der Vegetationszeit im Herbst bereiten sich die Bäume und Sträucher auf den Vegetationsbeginn im kommenden Jahr vor. Knospen werden angelegt und die Pflanze tritt nachfolgend in die Winterruhe (Dormanz) ein. In diesem Zustand führen, für das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen normalerweise förderliche Temperaturen noch nicht zum Austrieb der Knospen. Die Pflanze muss vorerst über einen bestimmten Zeitraum, der von Pflanzenart zu Pflanzenart verschieden ist, niedrigen Temperaturen (ca. 0 - 10 °C) ausgesetzt sein, bevor die Knospen die Dormanz überwunden haben. Diesen Zustand erreichen die Bäume und Sträucher meist schon gegen Ende des Jahres (Sarvas 1974; Hänninen 1990; Leinonen 1996a). Erst jetzt können für das Wachstum der Pflanzen förderliche Temperaturen die Entwicklung der Knospen weiter vorantreiben, so dass nach dem Erreichen einer bestimmten Temperatursumme im Frühjahr die Knospen aufbrechen, sich die Blätter entfalten bzw. die Pflanzen zu blühen beginnen. Zur Berechnung dieser artenspezifischen Temperatursummen sind vielfältige Ansätze in der Literatur zu finden (u.a. Sarvas 1972, Hänninen 1995, Leinonen 1996b, Kramer 1996, Kramer et al. 2000, Häkkinen et al. 1998, Chuine et al. 1999).

In den letzten Jahren berichten zunehmend Arbeiten über rezente Veränderungen in der Pflanzenentwicklung u.a. aus China (Chen und Zhang 2001), Deutschland (Menzel et al. 2001, Chmielewski et al. 2004), England (Fitter et al. 1995, Sparks et al. 1997, Sparks et al. 2000), Estland (Jaagus J. und Ahas R. 2000), Kanada (Beaubien und Freeland 2000), Ungarn (Walkovszky 1998), der Schweiz (Defila und Clot 2001), der Slowakei (Braslavská und Kamensky 1999) sowie aus Mitteleuropa (Rötzer et al. 2000, Menzel 2000, Chmielewski und Rötzer 2001 & 2002, Ahas et al. 2002, Scheifinger et al. 2002).

Das Vorhaben soll einen ersten detaillierten Beitrag zur Beurteilung der Auswirkungen von gegenwärtigen und zu erwartenden Klimaänderungen auf die Vegetationsentwicklung in Sachsen liefern. Es ist dem Zukunftsthema "Klimafolgen" des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (SLfUG) zugeordnet.

2 Daten und Methoden

2.1 Phänologische Daten

Für die Untersuchungen zur Vegetationsentwicklung in Sachsen wurden phänologische Beobachtungsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) im Zeitraum 1961-2000 verwendet. Aus dem Beobachtungsprogramm des DWD sind diejenigen Pflanzenarten ausgewählt worden, die für die Untersuchungsregion relevant sind und für die möglichst viele Beobachtungen vorlagen (Tab. 1). Die untersuchten Pflanzen sind drei Gruppen zugeordnet:

- Natürliche Vegetation,
- Obstgehölze,
- Landwirtschaftliche Nutzpflanzen.

Für jede Vegetationsgruppe wurden entsprechend der obigen Kriterien Pflanzenarten zugeordnet.

Tabelle 1: Für die Untersuchung ausgewählte Pflanzenarten und phänologische Phasen, (*kartographische Darstellung für Kontrolllauf und Szenarien ist im Anhang vorhanden)

Pflanzenart	Phänologische Phase	Abkürzung
<i>Natürliche Vegetation</i>		
Hänge-Birke	Beginn der Blattentfaltung* Blattverfärbung*	BF _{Br} BV _{Br}
Roskastanie	Beginn der Blattentfaltung* Beginn der Blüte Erste reife Früchte Blattverfärbung	BF _{Ka} BB _{Ka} EF _{Ka} BV _{Ka}
Stiel-Eiche	Beginn der Blattentfaltung* Erste reife Früchte Blattverfärbung	BF _{Ei} EF _{Ei} BV _{Ei}
Sommer-Linde	Beginn der Blüte	BB _{Li}
Flieder	Beginn der Blüte*	BB _{Fl}
Fichte	Maitrieb*	MT _{Fi}
Robinie	Beginn der Blüte	BB _{Ro}
Schwarzer Holunder	Beginn der Blüte* Erste reife Früchte*	BB _{Ho} EF _{Ho}
Sal-Weide	Beginn der Blüte*	BB _{Sw}
Wiesen-Knautgras	Beginn der Vollblüte*	VB _{Kn}
<i>Obstgehölze</i>		
Apfel	Beginn der Blüte* Beginn der Pflückreife (früh)*	BB _{Ap} PR _{Ap}
Süßkirsche	Beginn der Blüte* Beginn der Pflückreife	BB _{Sü} PR _{Sü}
Sauerkirsche	Beginn der Blüte* Beginn der Pflückreife	BB _{Sa} PR _{Sa}
Stachelbeere	Beginn der Blattentfaltung* Beginn der Blüte* Beginn der Pflückreife*	BF _{St} BB _{St} PR _{St}

Fortsetzung Tabelle 1:

Rote Johanesbeere	Beginn der Blüte * Beginn der Pflückreife *	BB _{Jo} PR _{Jo}
<i>Landwirtschaftliche Nutzpflanzen</i>		
Winterroggen	Beginn der Bestellung Beginn des Auflaufens Beginn des Schossens Beginn des Ährenschiebens Beginn der Vollblüte Beginn der Ernte	BE _{Wr} AU _{Wr} SS _{Wr} AE _{Wr} VB _{Wr} ER _{Wr}
Hafer	Beginn der Bestellung Beginn des Auflaufens * Beginn des Schossens Beginn des Rispenschiebens Beginn der Ernte	BE _{Ha} AU _{Ha} SS _{Ha} RS _{Ha} ER _{Ha}

Alle in Tabelle 1 aufgeführten Phasen wurden für die nachfolgenden Untersuchungen herangezogen, d.h. es wurden sowohl die rezenten Veränderungen der Phänophasen innerhalb des Beobachtungszeitraumes (1961-2000) analysiert als auch Abschätzungen zum künftigen Auftreten der Phasen unter geänderten klimatischen Bedingungen (Szenariorechnungen) vorgenommen. Für die überwiegende Anzahl von Entwicklungsstadien konnten Phänokarten berechnet werden, die die Veränderungen in der Vegetationsentwicklung anschaulich darstellen.

2.2 Klimadaten

2.2.1 Beobachtungsdaten

Zur Analyse der Beziehungen zwischen Klima und Vegetationsentwicklung wurden Klimadaten aus den CLISAX-Studien verwendet (Bernhofer und Goldberg 2001, Bernhofer et al. 2002). Diese Daten umfassen Beobachtungswerte aller sächsischen Klimastationen sowie einiger weiterer Standorte, die im Grenzbereich zu den benachbarten Bundesländern liegen (Tab. 2).

Für die Untersuchungen im Rahmen dieses Vorhabens wurden in erster Linie Beobachtungswerte der Lufttemperatur benötigt, da die Pflanzenentwicklung in den mittleren Breiten maßgeblich durch diesen Parameter gesteuert wird. Lang anhaltende Trockenperioden haben ebenfalls vielfältige Wirkungen auf die Pflanzen, so dass auch die Veränderungen im Niederschlagsregime für Sachsen von Interesse waren.

Der in der Studie verwendete Zeitraum ist entsprechend den phänologischen Beobachtungen auf die Periode 1961-2000 begrenzt. Die als Tageswerte vorliegenden Klimadaten wurden für einige Auswertungen zu Monatswerten verdichtet. Grundlage dafür war das Vorhandensein einer lückenlosen Datenreihe über den gesamten Zeitraum.

Insgesamt waren für die Lufttemperatur Beobachtungsreihen von 15 Klimastationen vorhanden, die für die Untersuchung verwendet werden konnten (Tab. 2). Bei den Niederschlagsdaten standen lückenlose Datenreihen für nur sechs Stationen zur Verfügung.

Tabelle 2: Verfügbare Klimastationen und Klimaparameter für Sachsen und die angrenzenden Bundesländer im Beobachtungszeitraum 1961-2000 und für die Klimaszenarien, T: Lufttemperatur, P: Niederschlagshöhe

Klimastation	Breite (°)	Länge (°)	Höhe (m ü. NN)	Klimaelemente für Beobachtungsdaten	Klimaelemente für Kontrolllauf und Szenarien
Bad Lauchstädt	51.40	11.88	119	-	T, P
Cheb	50.07	12.38	471	T	-
Chemnitz	50.80	12.87	418	T, P	T, P
Cottbus	51.77	14.32	69	T, P	T, P
Doberlug-Kirchhain	51.65	13.58	97	T	T, P
Dresden-Klotzsche	51.13	13.75	227	T	T, P
Fichtelberg	50.43	12.95	1213	T, P	T, P
Gera	50.88	12.13	311	T, P	T, P
Görlitz	51.17	14.95	238	T, P	T, P
Hof	50.32	11.92	474	T	T, P
Hof-Hohensaas	50.32	11.88	567	T, P	T, P
Leipzig-Flughafen	51.43	12.23	141	T	T, P
Leipzig-Stadt	51.32	12.42	141	-	T, P
Marienberg	50.65	13.15	639	-	T, P
Plauen	50.48	12.13	386	T	T, P
Torgau	51.55	12.97	87	-	T, P
Tharandt	50.98	13.58	214	T	-
Wildacker	50.97	13.57	385	T	-
Wildenau	50.20	12.17	611	-	T, P
Wittenberg	51.88	12.63	105	T	T, P

2.2.2 Klimaszenarien

Für die Beurteilung der künftigen Vegetationsentwicklung in Sachsen wurde eine „Regionale Klimaprognose“ verwendet, die speziell für das Bundesland erstellt wurde (REKLISA-Studie: Enke 2003, Küchler und Sommer 2003). Das statistische Regionalisierungsverfahren geht von der Grundannahme aus, dass das reale Wettergeschehen durch eine Abfolge von Wetterlagen beschrieben werden kann und die Wetterlagen in globalen Klimamodellen (GCMs) relativ zuverlässig wiedergegeben werden. Da jede Wetterlage mit einem charakteristischen Wettergeschehen an einem Ort (Beobachtungsstation) verbunden ist, kann auf der Grundlage der Häufigkeit und Andauer von Wetterlagen in Klimaszenariorechnungen auf die klimatischen Verhältnisse unter veränderten Randbedingungen (Zunahme der klimawirksamen Treibhausgase) geschlussfolgert werden. Basis der regionalen Klimaszenarien für Sachsen sind Modellergebnisse des Deutschen Klimarechenzentrums in Hamburg (Modell: ECHAM4/OPYC3, T42-Auflösung, IPCC- Szenario B2).

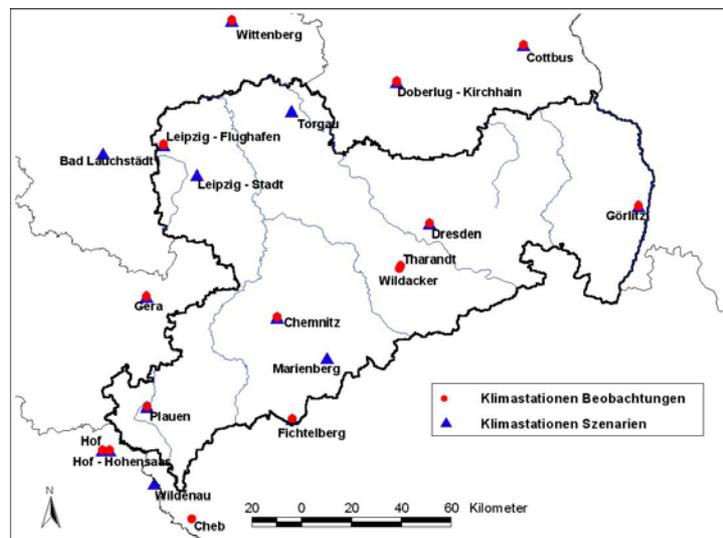
Die für die Untersuchung verwendeten Klimaszenarien lagen für die Zeiträume 2021-2030 (Sz I), 2031-2040 (Sz II) und 2041-2050 (Sz III), sowie für den Kontrolllauf 1981-2000 (Ctrl.) vor. Jeder dieser Zeitabschnitte umfasst 10 Simulationsreihen über 20 Jahre, die mittels Zufallsgenerator erzeugt wurden. Somit waren für jedes Jahrzehnt tägliche Daten von über 200 Simulationsjahren verfügbar, die die klimatischen Verhältnisse, d.h. die mögliche Variationsbreite des Klimas innerhalb dieses Zeitraumes repräsentieren.

Für das Untersuchungsgebiet waren Klimaszenarien von insgesamt 17 Stationen vorhanden (Tab. 2). Die Klimastationen sind relativ gut über das Untersuchungsgebiet verteilt, wobei die unterschiedlichen Höhenlagen in Sachsen ebenfalls abgedeckt sind (Abb. 1). Zur Charakterisierung der thermischen Verhältnisse wird die gegebene Stationsdichte als ausreichend erachtet, da die Lufttemperatur durchaus für ein größeres Gebiet als repräsentativ angesehen werden kann (Schönwiese et al. 1998).

Klimatologische Gebietsmittelwerte für Sachsen wurden für den Beobachtungszeitraum und für die Modellrechnung jeweils unter Verwendung aller verfügbaren Stationen bestimmt (s. Tab. 2). Die Veränderungen der klimatischen Verhältnisse in den Szenariorechnungen beziehen sich jeweils auf die Bedingungen im Kontrolllauf. Die Verifikation des Kontrolllaufs erfolgte mit den Beobachtungsdaten im Zeitraum 1981-2000.

Abb. 1

Lage der Klimastationen im Untersuchungsgebiet



2.3 Methodische Aspekte

2.3.1 Datenergänzungen

Sowohl in den phänologischen Beobachtungen als auch in den Lufttemperaturdaten mussten einzelne fehlende Beobachtungswerte ergänzt werden, um im Untersuchungszeitraum 1961-2000 über einen vollständigen phänologischen und klimatologischen Datensatz zu verfügen. Die Ergänzung fehlender *phänologischer Beobachtungen* erfolgte mittels linearer Regression mit einem abhängigen Parameter. Als Prediktor wurde entweder die gleiche oder eine andere Phänophase einer Nachbarstation im Untersuchungsgebiet verwendet. Entscheidungskriterium für die Auswahl der zur Ergänzung herangezogenen Phänophase bzw. Beobachtungsstation war die Stärke der Korrelation zwischen den Datenreihen. Auf diese Weise wurden sowohl Einzelwerte von individuellen phänologischen Stationen als auch phänologische Mittelwerte für Sachsen ergänzt. Der Umfang der ergänzten Mittelwerte lag bei 26.5 %.

Lücken in den täglichen *Beobachtungsdaten der Lufttemperatur* mussten ebenfalls geschlossen werden. Hierzu wurden die Beobachtungsdaten einer benachbarten Station auf die Daten

der zu ergänzenden Station reduziert. Im Einzelnen betraf dies die Stationen Doberlug-Kirchhain, Hof, Leipzig-Flughafen und Plauen.

2.3.2 Auswertungsmethoden

2.3.2.1 Berechnung phänologischer und klimatologischer Mittelwertskarten

Die jährlichen Eintrittstermine phänologischer Phasen sind in den mittleren Breiten vor allem vom Verlauf der Lufttemperatur abhängig. Da im Frühjahr die Lufttemperatur von Süd nach Nord und von West nach Ost sowie das ganze Jahr über mit zunehmender Höhe abnimmt, können die geographische Breite und Länge sowie die Höhe über NN verwendet werden, um den mittleren Eintritt einer phänologischen Phase kartographisch darzustellen. Dieser Zusammenhang lässt sich über lineare multiple Regressionsmodelle beschreiben:

$$P(x,y,z) = c + a_x x + a_y y + a_z z \quad (1)$$

mit: $P(x,y,z)$: Beginn der phänologischen Phase P an der geographischen Koordinate mit der Breite (x), der Länge (y) und der Höhe (z)
c: Konstante
 a_x, a_y, a_z : Regressionskoeffizienten.

Das Residuum der Regressionsgleichung beinhaltet neben dem Fehler auch unbekannte Einflussfaktoren wie das Mikroklima des Standortes. Das Gütemaß der Regressionsgleichung (Bestimmtheitsmaß) belegt jedoch, dass für Mittelwertskarten die geographischen Faktoren einen Großteil der Varianz beschreiben (Rötzer und Chmielewski 2001).

Für die Erstellung klimatologischer Karten ist nach dem gleichen Schema vorgegangen worden. Die Abhängigkeit der Klimaelemente von Länge, Breite und Höhe dient als Grundlage für die Berechnung der Karten. Die Formel (1) kann dabei übernommen werden, allerdings steht als abhängige Variable das jeweilige Klimaelement anstelle der phänologischen Phase.

Mit dem geographischen Informationssystem ArcView und dem digitalen Höhenmodell „GTOPO30“, das eine horizontale Auflösung von 30 arc-Sekunden (entspricht ca. 300-700 m für die Länge und ca. 900 m für die Breite) und eine vertikale Auflösung von 30 m besitzt, wurden die Mittelwertskarten erstellt. Zur Beurteilung der Kartengüte wird das Bestimmtheitsmaß einschließlich Signifikanzniveau angegeben. Zusätzlich wurde für alle phänologischen Karten der mittlere absolute Fehler (MAE) berechnet. Dieser ergibt sich aus der mittleren absoluten Differenz zwischen Modell- und Beobachtungswert an allen für die jeweilige Phänophase verfügbaren Stationen im Gebiet von Sachsen.

2.3.2.2 Phänologische Modelle

Zur Beurteilung der Vegetationsentwicklung unter geänderten Klimabedingungen war es notwendig, für alle phänologischen Phasen (Tab. 1) Modelle zu erstellen. Im ersten Schritt wurden für die Frühjahrs- und Sommerphasen Temperatursummenmodelle berechnet, da die-

se Phasen eine starke Abhängigkeit von der Lufttemperatur zeigen. Bei den phänologischen Phasen im Herbst hingegen ergeben sich deutlich geringere Beziehungen zur Lufttemperatur, so dass für diese Phasen ein vorausgehender Entwicklungszeitpunkt mit berücksichtigt werden musste. Indirekt wurde somit die positive Korrelation zweier aufeinander folgender Entwicklungsstadien ausgenutzt, die lediglich durch die Temperaturverhältnisse zwischen beiden Zeitpunkten modifiziert wird. Zur Darstellung dieser Phasen wurden multiple lineare Regressionsmodelle berechnet.

Temperatursummenmodelle

Für nahezu alle Klimastationen standen Tagesmittelwerte der Lufttemperatur zur Verfügung (Tab. 2), so dass zur Modellierung der phänologischen Phasen effektive Temperatursummenmodelle berechnet werden konnten. Den Modellen liegt die Annahme zugrunde, dass bis zum Auftreten einer phänologischen Phase (Zeitpunkt: t_2) eine bestimmte pflanzenspezifische Temperatursumme (T_S), die oberhalb einer Basistemperatur (T_B) liegt, erreicht sein muss.

$$T_S = \sum_{i=t_1}^{t_2} T_i - T_B \quad (2)$$

Dieser relativ einfache Ansatz hat sich vielfach bewährt und ist daher häufig verwendet worden (s. Abschn. 1). In den bisherigen Untersuchungen ging es darum, ein für heutige klimatische Bedingungen geeignetes Modell zu finden. Dementsprechend wurden sowohl die Basistemperatur als auch der Starttag (t_1) variiert. Geht man in dieser Art und Weise vor, so ergibt sich für die meisten Frühjahrsphasen ein Starttag im Februar bzw. im März, womit die Bedeutung des Temperaturverlaufs im Zeitraum zwischen Februar und April für die Pflanzenentwicklung im Frühjahr nochmals unterstrichen wird.

Die Klimaszenarien für Sachsen deuten auf eine signifikante Temperaturzunahme, vor allem in den Wintermonaten hin. Im Januar ist mit einer mittleren Temperaturzunahme von 3.4 K zu rechnen. Es ist daher anzunehmen, dass die Pflanzen in ihrer Entwicklung auf diesen Temperaturanstieg reagieren werden. In dieser Studie wurde deshalb angenommen, dass die Ruhephase der Pflanzen bis zum Ende des Vorjahres abgeschlossen ist. Hierzu wurde geprüft, ob sich die Bedingungen für die Dormanz künftig ändern werden. Die Zahlen in Tabelle 3 belegen, dass sich keine wesentliche Veränderung in der Anzahl von Tagen, die für den Abbau der Dormanz förderlich ist, ergeben wird.

Tabelle 3: Anzahl von Tagen mit förderlichen Temperaturen zum Abbau der Dormanz bei Blatt- und Blütenknospen ($0\text{ °C} < T < 10\text{ °C}$) im Zeitraum 01.09. - 31.12. für den Kontrolllauf und die Szenarien, x: Mittelwert, s: Standardabweichung

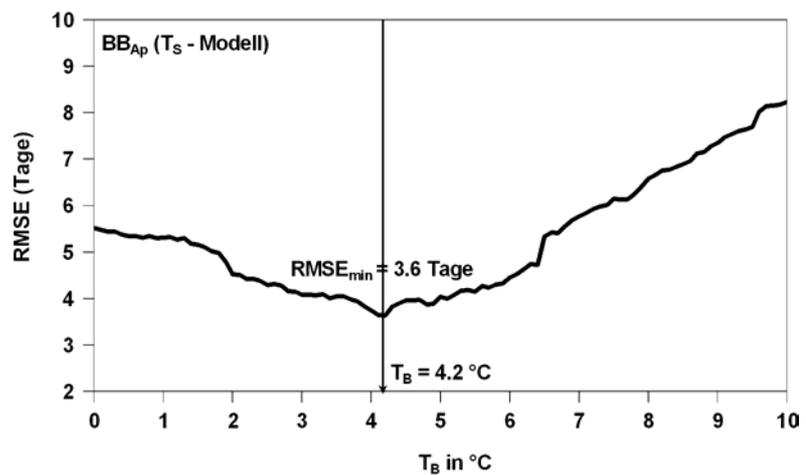
	Ctrl.	Sz I	Sz II	Sz III
x	70	72	71	69
s	10.1	8.0	8.4	7.0
Max	90	92	91	88
Min	42	49	49	48

Unter heutigen Bedingungen und auch bis 2050 werden im Mittel 70 Tage zur Verfügung stehen, in denen die Temperaturen, in einem für die Überwindung der Dormanz relevanten Bereich liegen. Die Annahme, dass die Ruhephase der Gehölze auch unter geänderten klimatischen Bedingungen bis zum Dezember des Vorjahres beendet ist, scheint somit gerechtfertigt. Die Pflanze besitzt damit die Möglichkeit, auf die bereits höheren Temperaturen im Januar zu reagieren. Für die phänologischen Modelle wurde dementsprechend der 01.01. als Starttag (t_1) definiert.

Die Differenzierung der Modelle ergibt sich damit durch die Festlegung der Basistemperatur und der effektiven Temperatursumme. Zur Bestimmung einer optimalen Temperaturschwelle wurde die Lufttemperatur in 0.1 °C-Schritten zwischen 0 °C und 10 °C variiert. Das optimale Modell berechnet sich für die Basistemperatur, bei der das Modell den geringsten mittleren Fehler (RMSE) zwischen berechnetem und beobachtetem Wert aufweist. Abbildung 2 zeigt am Beispiel der Apfelblüte, dass für diesen Termin eine Basistemperatur von $T_B = 4.2$ °C und eine effektive Temperatursumme von $T_S = 180$ K angesetzt werden kann.

Abb. 2:

Bestimmung der Basistemperatur für den Beginn der Apfelblüte in Sachsen: $T_B = 4.2$ °C bei $T_S = 180$ K.



Die Extrema der Apfelblüte lagen im Zeitraum 1961-2000 in den Jahren 1970 (sehr spät: 20.05.) und 1990 (sehr früh: 23.04.). Bei einer Temperaturschwelle von 4.2 °C bestätigt sich für beide Jahre die Gültigkeit einer mittleren effektiven Temperatursumme von 180 K von Jahresbeginn bis zur Apfelblüte (1970: 182.7 K, 1990: 180.6 K). Das Modell ist daher auch für die Berechnung der Pflanzenentwicklung in Extremjahren gut geeignet. Der mittlere Modellfehler (RMSE) beträgt 3.6 Tage (Abb. 3).

Abb. 3:

Berechneter und beobachteter Beginn der Apfelblüte (BB_{Ap} in Tagen nach Jahresbeginn) in Sachsen, 1961-2000

TnJb: Tage nach Jahresbeginn

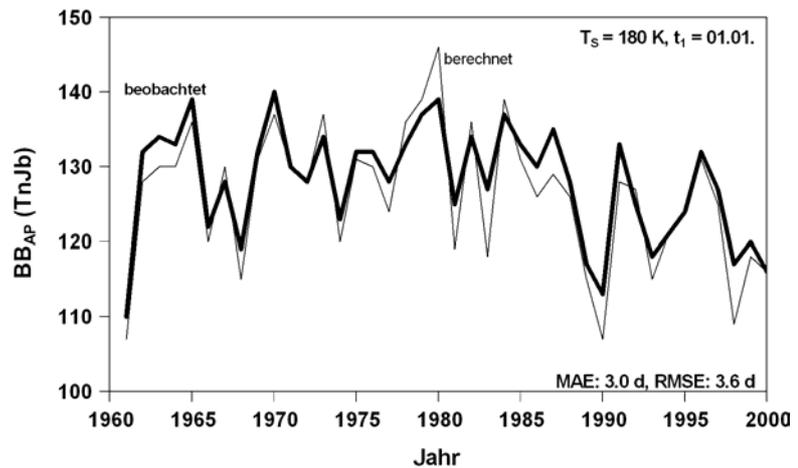
Modell:

$T_B = 4.2 \text{ }^\circ\text{C}$,

$T_S = 180 \text{ K}$

MAE = 3.0 d

RMSE = 3.6 d



Bei der Modellierung der Sommerphasen (Frucht- bzw. Pflückreife) wurde eine optimale Temperatursumme zwischen dem Blühbeginn und dem Eintritt der Reife ermittelt. In diesem Zeitraum liegen die Lufttemperaturen bereits so hoch, dass die Bestimmung einer Basistemperatur zu keiner Modellverbesserung mehr führt. Die Berechnung einer einfachen Temperatursumme ($T_B = 0 \text{ }^\circ\text{C}$) ist daher ausreichend. Für den Beginn der Pflückreife beim Apfel ergibt sich beispielsweise eine Summe von $T_S = 1322 \text{ K}$ zwischen Blühbeginn und Apfelreife (Abb. 4). Der mittlere absolute Fehler (MAE) liegt für diese Phase nur geringfügig höher als für den Beginn der Blüte.

Abb. 4:

Berechneter und beobachteter Beginn der Pflückreife beim Apfel (PR_{Ap} in Tagen nach Jahresbeginn) in Sachsen, 1961-2000

TnJb: Tage nach Jahresbeginn

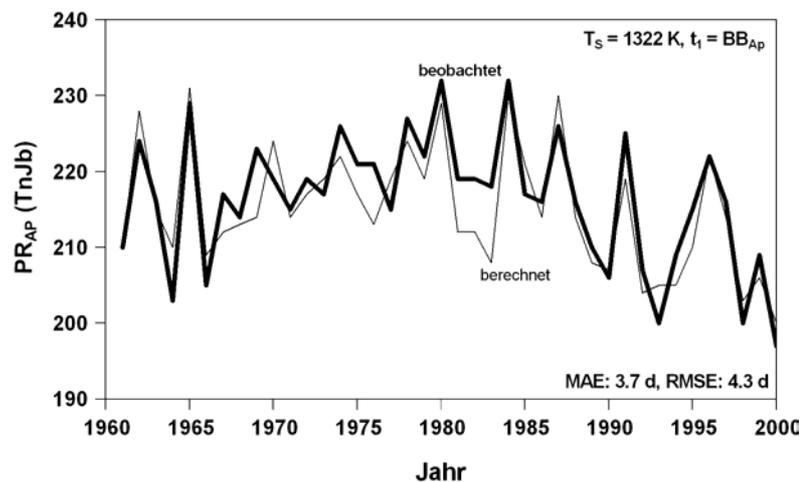
Modell:

$T_B = 0.0 \text{ }^\circ\text{C}$,

$T_S = 1322 \text{ K}$

MAE = 3.7 d

RMSE = 4.3 d



Regressionsmodelle

Regressionsmodelle wurden nur dann für die Abschätzung phänologischer Phasen verwendet, wenn kein adäquates Temperatursummenmodell berechnet werden konnte. Dies war sowohl für die Herbstphasen der natürlichen Vegetation als auch für die Phänophasen der landwirtschaftlichen Nutzpflanzen der Fall. Die für diese Phasen verwendeten Modelle entsprachen im Allgemeinen der Form:

$$P_i = a_0 + a_1 \cdot P_{i-1} + a_2 \cdot T_1 + a_3 \cdot T_2. \quad (3)$$

Für die Berechnung des phänologischen Termins (P_i) wurde eine vorausgehende Phase (P_{i-1}) und der Einfluss der Lufttemperatur in den nachfolgenden Monaten (T_1, T_2, \dots) berücksichtigt. Die Blattverfärbung der Eiche konnte beispielsweise mit ausreichender Genauigkeit unter Berücksichtigung des Termins der ersten reifen Früchte und der Mitteltemperatur für den Monat September abgeschätzt werden (MAE = 1.8 d, RMSE = 2.6 d).

$$BV_{Ei} = 160.23 + 0.41 \cdot EF_{Ei} + 1.45 \cdot T_{09} \quad (4)$$

In dieser Gleichung widerspiegelt sich zum einen die positive Korrelation zwischen Fruchtreife und Blattverfärbung der Kastanie ($r = 0.72$), zum anderen die verzögernde Wirkung höherer Septembertemperaturen auf den Prozess der Blattfärbung.

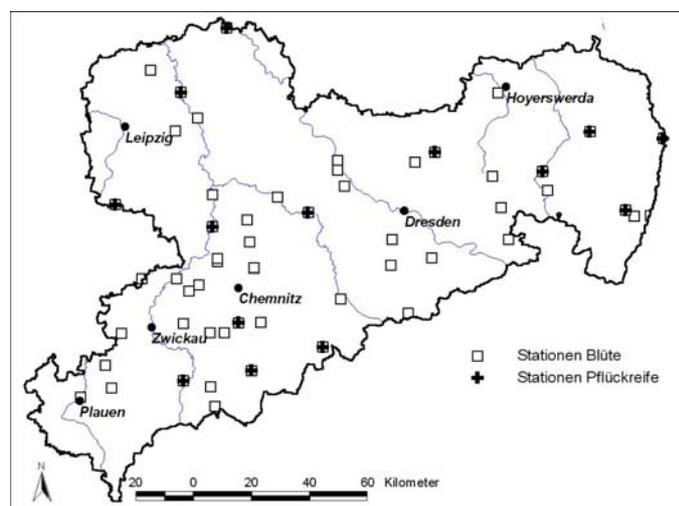
Für einige landwirtschaftliche Nutzpflanzen (Ernte Hafer, Vollblüte Winterroggen) wurde in dem Regressionsansatz anstelle einer Monatsmitteltemperatur die Temperatursumme ab der vorausgehenden Phase verwendet.

2.3.3 Berechnung der phänologischen Modelle und Darstellung der Ergebnisse

Die phänologischen Modelle wurden unter Berücksichtigung aller für Sachsen verfügbaren phänologischen und klimatologischen Daten erstellt. Die Anzahl der in die Berechnung des phänologischen Gebietsmittels eingehenden Werte variiert von Phase zu Phase. Während für die Blattform der Birke 89 Beobachtungsstationen zur Verfügung standen, waren es für die Pflückreife der Sauerkirsche lediglich 9 Stationen im Untersuchungsgebiet. Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Verteilung der Phänostationen für den Blühbeginn und die Pflückreife des Apfels in Sachsen. Hierbei zeigt sich, dass selbst bei wenigen verfügbaren Stationen, wie im Fall der Apfelreife, noch eine gute Verteilung der Beobachtungsstandorte im Bundesland gegeben war.

Abb. 5:

Verteilung der Beobachtungsstationen für die Phänophasen „Beginn der Apfelblüte“ und „Beginn Pflückreife“



Die für die Modellierung benötigten täglichen Gebietsmittel der Lufttemperatur wurden unter Verwendung aller verfügbaren Klimastationen in Sachsen und in den angrenzenden Bundesländern berechnet (Abb. 1). Für den Beobachtungszeitraum 1961-2000 wurden 15 Klimastationen und im Kontrolllauf sowie in den Szenarien (Sz I - Sz III) 17 Stationen verwendet (Tab. 2). Die in den Anlagen aufgeführten phänologischen Modellgleichungen basieren auf den Gebietsmittelwerten für Sachsen.

Zur Darstellung der regionalen Unterschiede in der Pflanzenentwicklung wurden ausgewählten Klimastationen Sachsens (Plauen, Leipzig, Dresden, Chemnitz, Görlitz, Fichtelberg) phänologische Beobachtungsstationen der unmittelbaren Umgebung zugeordnet. Die jeweilige Klimastation wurde für das Beobachtungsgebiet als repräsentativ angesehen und die phänologischen Daten der Umgebung auf die Höhe dieser Station reduziert, so dass jeder Klimastation ein phänologischer Mittelwert zugeordnet werden konnte.

Die für jede Klimastation berechneten phänologischen Modelle basieren auf den gleichen Eingangsparametern wie das Modell für das Gebietsmittel. In den regionalen Modellen widerspiegeln sich zusätzlich lokalklimatische Besonderheiten, wodurch sich die Parameter (T_B , T_S) der regionalen Modelle geringfügig von denen des Gebietsmittels unterscheiden können. Die mittels dieser Modelle berechneten phänologischen Eintrittstermine an den Klimastationen sind die Grundlage für die Berechnung der Phänokarten. Die Anzahl der Klimastationen, die zur Berechnung der Phänokarten herangezogen wurden, ist im Anhang angegeben. Für den Fall, dass an weniger als vier Standorten phänologische Daten den Klimastationen zugeordnet werden konnten, wurde auf eine Darstellung von phänologischen Karten verzichtet. Angegeben wird dann nur die mittlere Veränderung des Phaseneintritts für Sachsen.

3 Ergebnisse

3.1 Rezente und künftige Klimaänderungen in Sachsen

3.1.1 Lufttemperatur

Das vieljährige Jahresmittel der Lufttemperatur für Sachsen beträgt 7.6 °C (Tab. 4). Langjährige Mittelwerte unter 0 °C werden ausschließlich in den Monaten Januar und Februar beobachtet. Mit 16.1 °C ist der Juli der wärmste Monat in der Region.

In der überwiegenden Anzahl von Monaten besteht eine Tendenz zu höheren Temperaturen. Der stärkste Temperaturanstieg wird im Winter und im Frühjahr beobachtet. Für den Herbst kann kein signifikanter Trend nachgewiesen werden.

Insgesamt ergibt sich für den Freistaat Sachsen ein signifikanter Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 0.3 K / Jahrzehnt. Im Untersuchungszeitraum hat sich damit die Temperatur um 1.2 K erhöht. Dieser Trend zur Erwärmung korrespondiert im Betrag und im Verlauf außerordentlich gut mit den Veränderungen der Lufttemperatur in Deutschland (Abb. 6). Hier lag der Anstieg der Jahresmitteltemperatur für den gleichen Zeitraum bei 0.36 K pro Jahrzehnt.

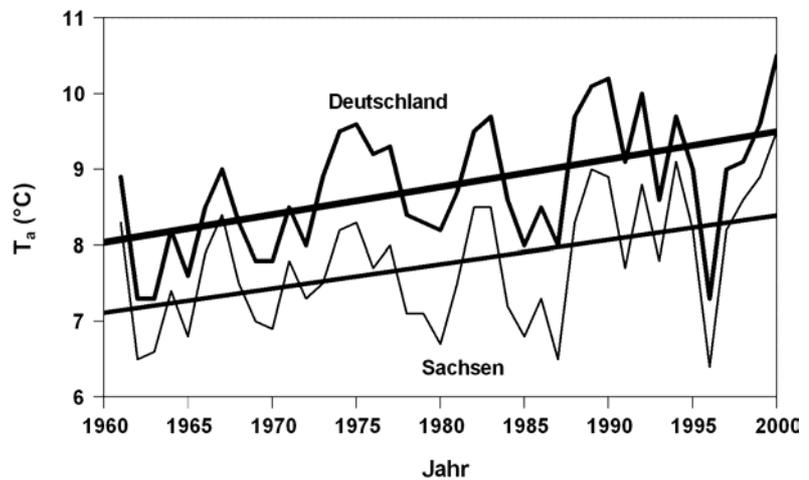
Tabelle 4: Monats- und Jahresmittel der Lufttemperatur (°C) in Sachsen, 1961-2000, sowie zugehöriger Trend (T) in K pro Jahrzehnt, x: Mittelwert, s: Standardabweichung, α : Irrtumswahrscheinlichkeit in %

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Jahr
x	-1.2	-0.4	2.9	7.0	11.6	14.5	16.1	15.8	12.9	8.4	3.3	0.0	7.6
s	3.0	3.0	2.3	1.4	1.5	1.1	1.6	1.2	1.5	1.5	1.7	2.4	0.8
Max	3.5	5.2	6.4	10.4	14.1	16.6	20.3	18.8	16.6	11.3	7.1	3.9	9.2
Jahr	1975	1990	1990	1961	2000	1992	1994	1992	1999	1967	1963	1974	2000
Min	-9.0	-8.4	-2.3	4.5	8.7	12.3	13.7	13.9	9.8	4.9	-0.9	-6.3	6.0
Jahr	1963	1986	1987	1973	1991	1985	1962	1987	1996	1974	1993	1969	1996
T	+0.7	+0.4	+0.5	+0.2	+0.5	+0.0	+0.3	+0.5	+0.0	+0.0	-0.1	+0.6	+0.3
α	0.10	-	0.10	-	0.01	-	-	0.01	-	-	-	0.10	0.01

Abb. 6:

Verlauf des Jahresmittels der Lufttemperatur (T_a) in Sachsen im Vergleich zum Mittelwert für Deutschland, berechnet aus den Beobachtungen der 16 WWR-Stationen, 1961-2000

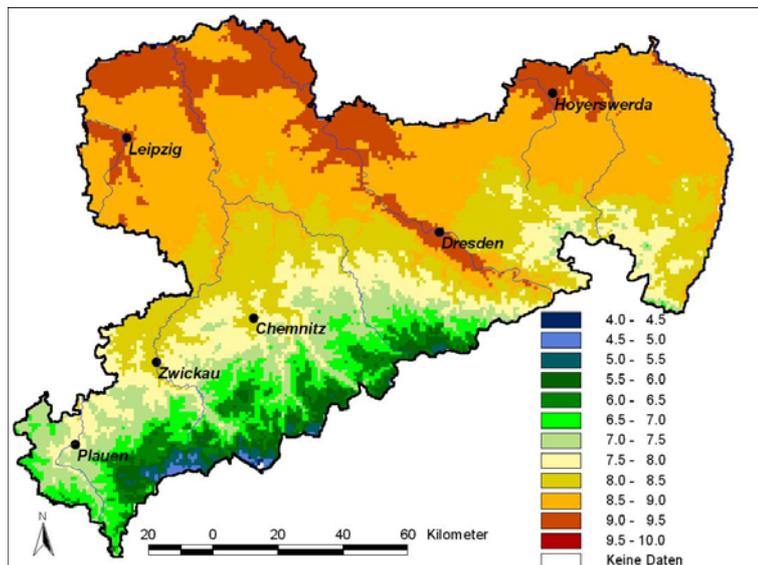
WWR: World Weather Records



Die räumlichen Unterschiede in der Lufttemperatur Sachsens sind vor allem durch die Topographie geprägt (Abb. 7). Die wärmsten Gebiete finden sich in den nördlichen Tieflandsbereichen. Thermisch begünstigt ist vor allem das Elbtal. Im Übergangsbereich zu den Mittelgebirgen ist die Abnahme der Jahresmitteltemperatur deutlich erkennbar. Die Höhenlagen des Erzgebirges sind somit die kältesten Regionen in Sachsen.

Abb. 7:

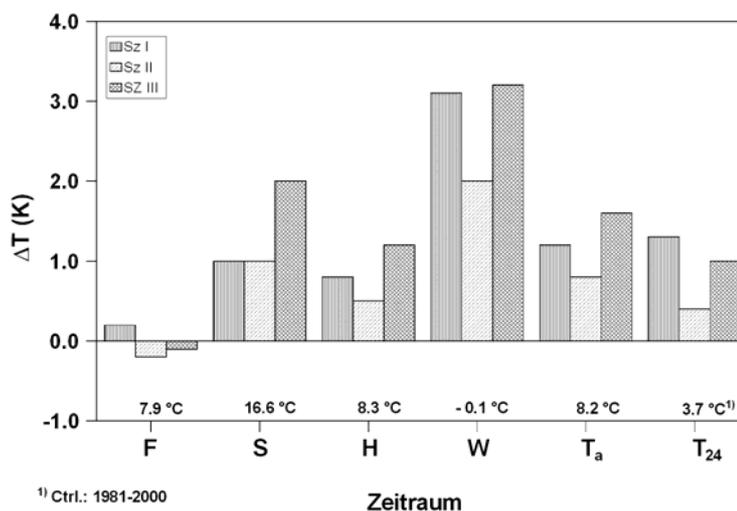
Jahresmittel der Lufttemperatur (T_a in °C) in Sachsen, 1961-2000



Diese Temperaturunterschiede widerspiegeln sich im zeitlichen Auftreten der phänologischen Phasen. In den thermisch begünstigten Regionen, wie den Tieflandsbereichen und dem Elbtal, ist der Phaseneintritt jeweils einige Tage früher zu beobachten (s. Anhang).

In der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts wird sich die Lufttemperatur in Sachsen weiter erhöhen. Die Erwärmung verläuft unter Schwankungen und jahreszeitlich differenziert (Abb. 8). Im Jahresmittel erreicht die Temperaturzunahme im letzten Jahrzehnt (2041-2050) den Höchstbetrag von 1.6 K. An dem Anstieg der Lufttemperatur ist vor allem der Winter mit bis zu + 3.2 K und der Sommer mit maximal + 2.0 K beteiligt. Die Übergangsjahreszeiten zeigen geringere Veränderungen. Im Frühjahr sind sogar schwach gegenläufige Trends möglich. Der unter heutigen klimatischen Bedingungen für die Pflanzenentwicklung im Frühjahr relevante Zeitraum von Februar bis April zeigt eine moderate Temperaturzunahme von maximal 1.3 K im Szenario I.

Abb. 8:
Abweichungen der Lufttemperatur (ΔT) in den Szenarien zum Kontrolllauf für einzelne Jahreszeiten (F, S, H, W), im Jahresmittel (T_a) und im Zeitraum Februar-April (T_{24})



In der überwiegenden Anzahl von Monaten dominieren die positiven Anomalien zwischen Kontrolllauf und den Szenarien (Tab. 5). Lediglich zwischen März und April finden sich einige negative Werte. Nach Küchler und Sommer (2003) existieren in Sachsen keine signifikanten räumlichen Unterschiede für die simulierten Lufttemperaturtrends, d.h. die Erwärmung vollzieht sich in der gesamten Region homogen.

Tabelle 5: Veränderungen der Monats- und Jahresmittel der Lufttemperatur (ΔT in K) in Sachsen für die Szenarien in Bezug zum Kontrolllauf

ΔT	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Jahr
Sz I	3.1	3.4	0.2	0.3	0.2	1.0	0.9	1.1	0.9	0.9	0.5	3.0	1.3
Sz II	2.2	1.7	-0.2	-0.3	-0.2	0.7	1.1	1.2	0.6	0.8	0.3	2.1	0.8
Sz III	3.3	3.1	-0.3	0.0	0.0	2.1	1.8	2.2	1.3	1.6	0.9	3.1	1.6

3.1.2 Niederschlagshöhe

Das langjährige Jahresmittel der Niederschlagshöhe in Sachsen beträgt 731.4 mm (Tab. 6). Die geringsten Niederschläge fallen im Februar, die höchsten, konvektiv beeinflussten Niederschlagsmengen liegen mit über 80 mm im Juni und Juli.

Die Jahressumme der Niederschlagshöhe zeigt nahezu keinen Trend. Im Jahresverlauf ergeben sich jedoch einige Unterschiede. In erster Linie besteht eine Tendenz zu geringeren Niederschlagshöhen im Vorsommer (April - Juni), woran der Mai den stärksten Anteil hat. In allen übrigen Monaten sind vornehmlich positive Trends erkennbar, die das Niederschlagsdefizit im Vorsommer wieder kompensieren. Abgesehen von dem Trend im Monat Mai, sind die beobachteten Veränderungen nicht statistisch gesichert.

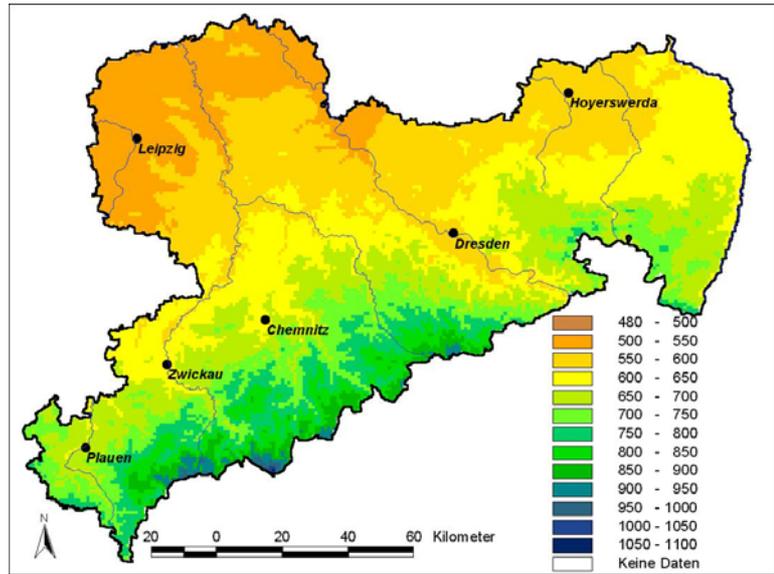
Tabelle 6: Monats- und Jahresmittel der Niederschlagshöhe (mm) in Sachsen, 1961-2000, sowie zugehöriger Trend (T) in mm pro Jahrzehnt, x: Mittelwert, s: Standardabweichung, α : Irrtumswahrscheinlichkeit in %

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Jahr
x	50.0	43.8	51.8	54.6	68.3	80.9	80.3	79.1	58.4	48.8	54.3	61.1	731.4
s	26.3	20.7	24.8	21.6	28.8	26.2	35.4	30.3	25.7	30.0	20.3	32.7	115.6
Max	153.6	89.6	129.0	101.7	138.8	142.1	162.1	149.7	109.7	146.2	104.9	157.5	983.6
Jahr	1976	1988	2000	1980	1978	1971	1980	1978	1967	1974	1977	1974	1981
Min	3.3	6.2	16.9	18.8	16.0	28.9	22.5	25.4	15.9	12.4	18.1	4.8	541.2
Jahr	1996	1972	1984	1988	1990	1962	1971	1965	1982	1962	1997	1972	1982
T	+0.4	0.0	+4.8	-4.3	-8.9	-1.8	+7.3	+0.3	+1.0	+0.3	+1.1	+0.2	+0.3
α	-	-	-	-	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-

Die regionale Verteilung der Niederschläge in Sachsen zeigt einen deutlichen Nord-Süd-Gradienten, der durch die Höhenlage bestimmt ist (Abb. 9). Demnach sind die Gebiete des geringsten Niederschlages in Sachsen im nördlichen bis nordwestlichen Bereich zu finden. Dazu gehören das Leipziger Land und das nördliche Elbtal, in dessen Bereichen nur 500 bis 550 mm Niederschlag im Jahr fallen. In den übrigen Bereichen Sachsens, bis an den Fuß der Mittelgebirge, fallen bis ca. 650 mm pro Jahr. Mit zunehmender Höhe nimmt der Niederschlag zu und erreicht in den höchsten Lagen Werte bis 1100 mm (Fichtelberg). Die eingeschnittenen Flusstäler zeigen im Gegensatz zu ihrer höheren Umgebung deutlich geringere Niederschlagsmengen. Ein gutes Beispiel ist das Elbtal. Aber auch die Täler der Freiburger und Zwickauer Mulde sowie das der Weißen Elster treten mit niedrigeren Niederschlagshöhen im Gegensatz zu ihrer Umgebung hervor.

Abb. 9:

Jahressumme der Niederschlags-
höhe (mm) in Sachsen, 1961-
2000



In Zukunft ist mit einer weiteren Abnahme der Jahresniederschläge zu rechnen, die sich unter Schwankungen vollzieht (Tab. 7). Die stärkste Verringerung der jährlichen Niederschlagshöhe ergibt sich im Szenario III (- 25.3 mm). Geringere Niederschläge werden in allen drei Szenarien in den Monaten April, Mai und September beobachtet. Dies hat zur Folge, dass sich die bereits andeutende Vorsommertrockenheit weiter fortsetzen wird. Für den Anbau sommeranueßer Getreidearten ist dies gewiss eine ungünstige Entwicklung, da die Pflanzen im Mai (Schossphase) einen erhöhten Wasserbedarf haben.

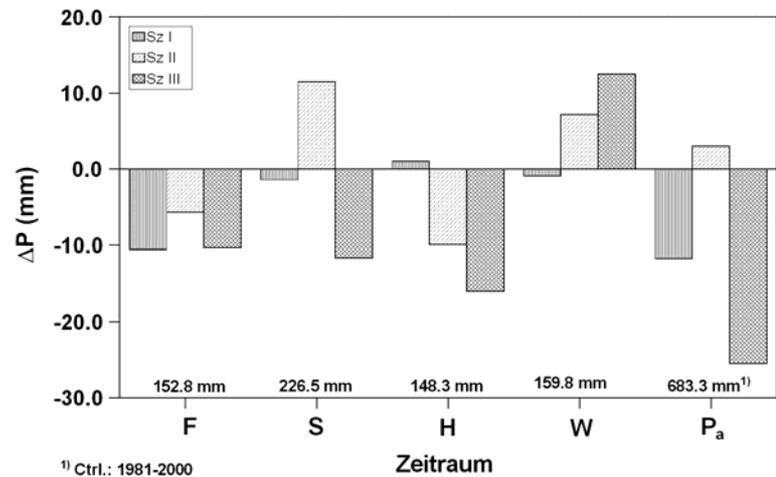
Tabelle 7: Veränderungen der Monats- und Jahresmittel der Niederschlagshöhe (ΔP in mm) in Sachsen für die Szenarien in Bezug zum Kontrolllauf

ΔP	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Jahr
Sz I	0.1	-1.1	-2.4	-2.0	-6.1	0.0	0.6	-1.9	-2.5	1.1	2.4	0.2	-11.6
Sz II	3.8	-2.7	0.3	-1.3	-4.7	8.2	1.3	2.0	-2.3	-5.9	-1.8	6.1	3.0
Sz III	3.6	3.4	-0.6	-5.1	-4.6	-1.7	-2.8	-7.1	-7.5	-5.0	-3.5	5.6	-25.3

In den Wintermonaten ist von einer Zunahme der Niederschlagshöhen auszugehen, die auf eine weiter ansteigende Häufigkeit winterlicher Westwetterlagen zurückzuführen sein dürfte. Sehr einheitlich ist die Abnahme des Niederschlages im Frühjahr über alle drei Szenarioabschnitte (Abb. 10). Im Sommer ist eine relativ hohe Variabilität zwischen den Jahrzehnten zu erkennen (Szenario II: + 11.5 mm, Szenario III: - 11.6 mm). Die Veränderungen im Niederschlagsregime sind nach Enke (2003) auf die sich verstärkenden Luv/Lee- Effekte an den Mittelgebirgen zurückzuführen, welche vor allem im Winter, teilweise aber auch im Sommer zu beobachten sein werden. Diese regionalen Unterschiede in den Monatsniederschlägen sind statistisch gesichert (Enke 2003).

Abb. 10:

Abweichungen der Niederschlagshöhe (ΔP) in den Szenarien zum Kontrolllauf für einzelne Jahreszeiten (F, S, H, W) und in der Jahressumme (P_a)



3.1.3 Agrarklimatologisch relevante Parameter

3.1.3.1 Fröste

Die häufigsten Frostschäden treten nicht im Winter auf, wenn die Gehölze sich in der Ruhephase befinden und damit größtenteils frostresistent sind, sondern im Herbst und Frühjahr, wenn dieser Zustand noch nicht erreicht ist oder die Pflanzen keine ausreichende Kälteresistenz mehr besitzen. Dementsprechend wird von einigen Autoren der Zeitraum zwischen dem letzten Frost im Frühjahr und dem Auftreten des ersten Frostes im Herbst zur Definition der Vegetationszeit verwendet (Critchfield 1966; Brown 1976, Goodrich 1984, Chmielewski, 2003a).

Für den Obst-, Gemüse- und Weinbau sowie den Anbau einiger Sonderkulturen ist vor allem der Termin des letzten Frostes im Frühjahr (Spätfröste) von Bedeutung. Frost während der Obstblüte kann zu völligen Ertragsausfällen führen. Hierbei ist die Stärke, Andauer und der Zeitpunkt von Frösten entscheidend. Ebenfalls spielt die Pflanzenart und Resistenz der Sorte eine Rolle. Die Empfindlichkeit der Pflanzen gegenüber Spätfrösten steigt mit dem Voranschreiten der Entwicklung. Geschlossene Blütenknospen beim Apfel halten kurzzeitig noch Temperaturen von -4 °C aus, voll entfaltete Blüten nur noch Tiefsttemperaturen bis etwa -2 °C , kleine Früchte hingegen keine Minima mehr, die unter -1 °C liegen. Kirschen hingegen sind deutlich frostempfindlicher. Hier können die bereits schwellenden Knospen bei -2 °C erfrieren (v. Eimern und Häckel 1979, Schumacher 1989).

Für Sachsen ergibt sich im vieljährigen Mittel ein frostfreier Zeitraum von 172 Tagen zwischen dem 29.04. und 19.10. (Tab. 8). In den letzten 40 Jahren hat sich die frostfreie Zeit signifikant um 17 Tage verlängert. Die Ausdehnung der frostfreien Zeit ist annähernd zu gleichen Teilen auf das spätere Auftreten der Frühfröste ($+2.3\text{ d} / 10\text{ a}$) und das zeitigere Ende der Spätfröste ($-2.0\text{ d} / 10\text{ a}$) zurückzuführen. Pflanzen, die in ihrer Entwicklung im Frühjahr einen stärkeren Trend als $-2.0\text{ d} / \text{Jahrzehnt}$ aufweisen, sind somit zunehmend spätfrostgefährdet.

Tabelle 8 : Letzter Spät- (F_S), erster Frühfrost (F_F) in Tagen nach Jahresbeginn (TnJb) und Länge der frostfreien Zeit in Sachsen (F_D), einschl. beobachteter Trends (T) in Tagen pro Jahrzehnt, 1961-2000, x: Mittelwert, s: Standardabweichung, α : Irrtumswahrscheinlichkeit in %

	F_S (TnJb)	F_F (TnJb)	F_D (Tage)
x	119.2 (29.04.)	291.5 (19.10.)	172.3
s	8.1	10.3	14.5
Max	137.9	318.1	212.5
Jahr	1980	2000	2000
Min	103.4	270.3	142.9
Jahr	1961	1964	1962
T	-2.0	+2.3	+4.3
α	0.10	-	0.05

Das Auftreten von Spätfrösten ist deutlich von der Topographie abhängig (Abb. 11). Mit zunehmender Höhe verspätet sich der Beginn der frostfreien Zeit. Über 800 m ü. NN kommt es noch nach dem 15.05. zu Spätfrösten. Auf den höchsten Lagen und dem Fichtelberg werden bis Ende Mai Spätfröste beobachtet. Im Elbtal und den Tälern der Flüsse werden diese nur bis zum 25. April registriert.

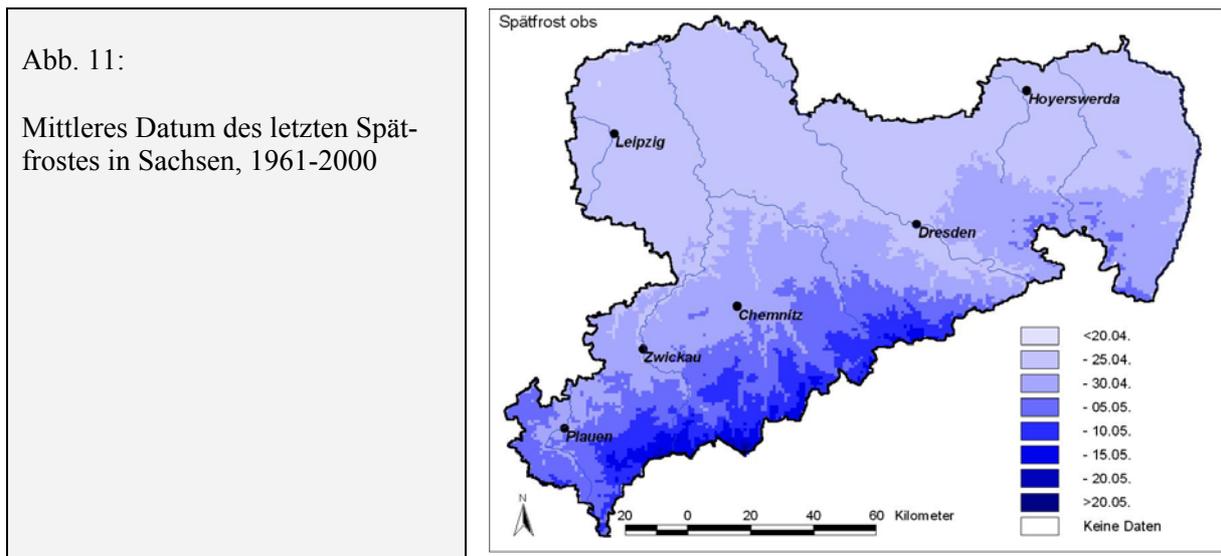


Tabelle 9: Mittlere Termine von Spät- (F_S) und Frühfrost (F_F) in Tagen nach Jahresbeginn (TnJb) und Andauer der frostfreien Zeit (F_D) in Tagen für Kontrolllauf und Szenarien sowie Abweichung (Δ) in den Szenarien zum Kontrolllauf, x: Mittelwert, s: Standardabweichung, verändert nach Pazucha 2004

Zeitraum	F_S (TnJb)		F_F (TnJb)		F_D (Tage)	
	x	s	x	s	x	s
Ctrl.	119 (29.04.)	10.2	286 (13.10.)	11.6	167	15.7
Szenarien						
Sz I	119 (29.04.)	10.4	295 (22.10.)	10.8	176	15.3
Sz II	121 (01.05.)	10.7	294 (21.10.)	9.6	173	13.4
Sz III	117 (27.04.)	9.4	297 (24.10.)	11.1	180	15.5
Δ Sz I	0		+ 9		+ 9	
Δ Sz II	+ 2		+ 8		+ 6	
Δ Sz III	- 2		+ 11		+ 13	

In den Szenarien zeichnet sich eine weitere Verlängerung der frostfreien Zeit ab (Tab. 9). Hierfür ist im Gegensatz zu den Beobachtungen ausschließlich das verspätete Auftreten der ersten Frühfröste verantwortlich. Diese verschieben sich in den drei Szenariorechnungen um 8 (Sz II) bis 13 Tage (Sz III) nach hinten.

Veränderungen bei den Spätfrösten sind nicht erkennbar. Dies hat zur Folge, dass die Gefahr von Spätfrösten für die Pflanzen steigen wird, da die Vegetationsentwicklung aufgrund des höheren Temperaturniveaus generell früher einsetzt und schneller abläuft.

Die geringe Veränderlichkeit der Spätfröste gegenüber den Frühfrösten ist sehr wahrscheinlich durch regionale Besonderheiten bedingt. Hierfür ist vor allem die Zunahme von Ostwetterlagen im Frühjahr verantwortlich, die immer wieder zum Absinken der nächtlichen Tiefsttemperaturen unter den Gefrierpunkt, infolge intensiver Ausstrahlung führt. Enke (2003) spricht in diesem Zusammenhang von einer vergleichsweise geringen Änderung der Minimum- zur Maximumtemperatur.

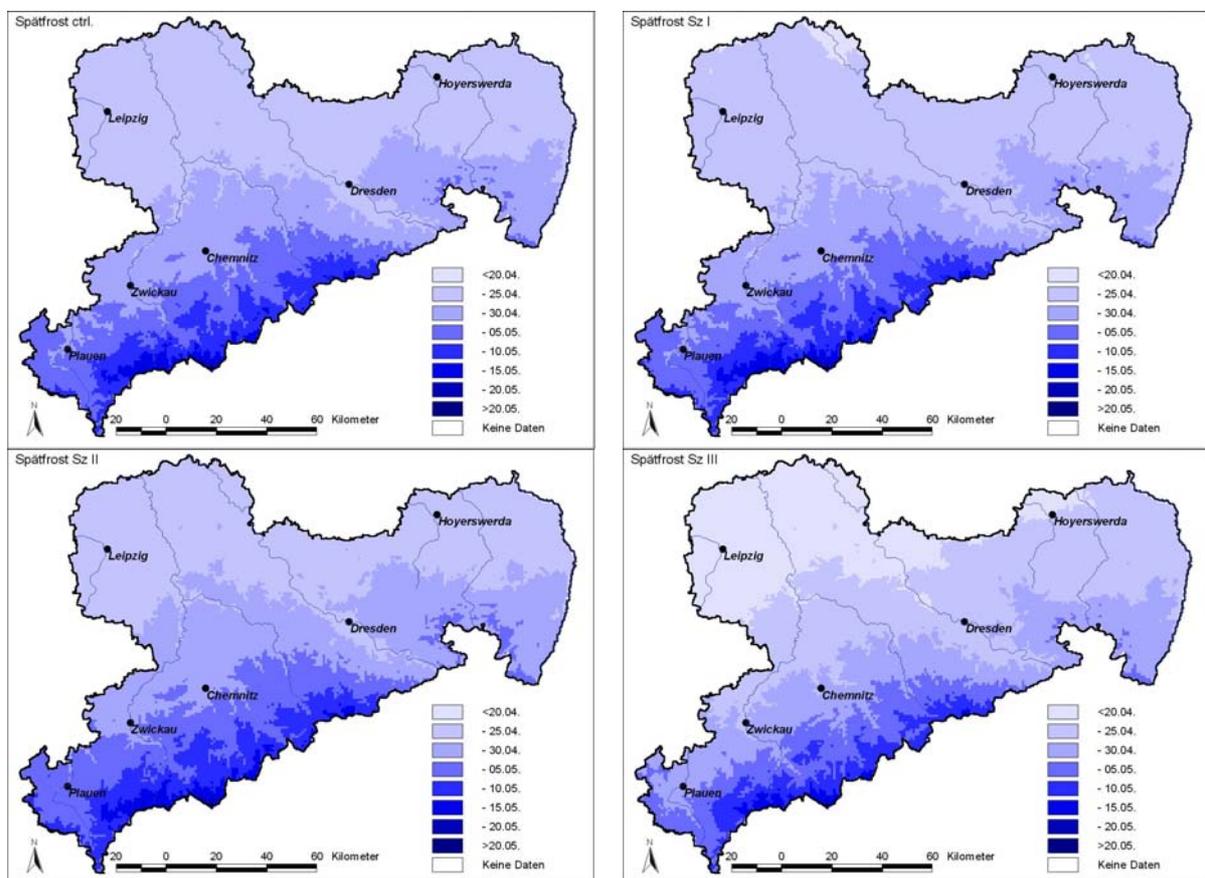


Abb. 12: Mittlere Termine für Spätfröste im Kontrolllauf und den Szenarien

Die Karten für das mittlere Auftreten von Spätfrösten in Sachsen unterstreichen das oben gesagte (Abb. 12). Im Vergleich zum Kontrolllauf zeigt sich nur in den Tieflandsbereichen und im Szenario III eine geringe Verfrühung des letzten Spätfrostes.

Die Frühfröste hingegen verspäten sich in ganz Sachsen, woraus eine Verlängerung der frostfreien Zeit resultiert. Selbst in den Hochlagen ist diese Veränderung erkennbar (Abb. 13).

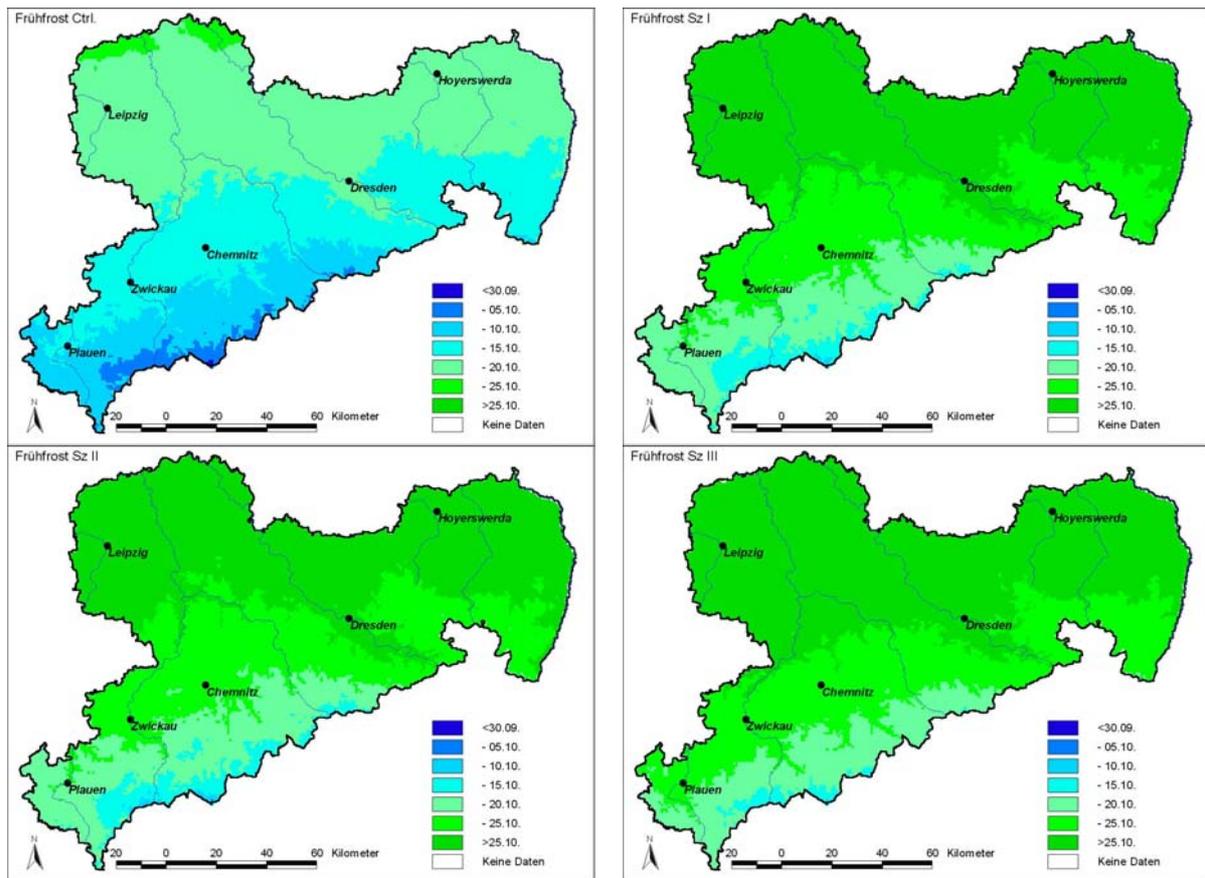


Abb. 13: Mittlere Termine für Frühfröste im Kontrolllauf und den Szenarien

Tabelle: 10 Mittlere Anzahl von Frosttagen für den Kontrolllauf und die Szenarien (d) sowie die Veränderung der Frosttage (Δ in Tagen) in den Szenarien in Bezug zum Kontrolllauf, x: Mittelwert, s: Standardabweichung

	Ctrl.	Sz I	Sz II	Sz III	Δ Sz I	Δ Sz II	Δ Sz III
x	101	76	85	73	-25	-16	-28
s	24.4	26.9	21.2	25.9			

Eine Ausdehnung der frostfreien Zeit bedeutet zugleich eine Abnahme der jährlichen Zahl von Frosttagen (Tab. 10). Diese reduziert sich von 101 Tagen im Kontrolllauf auf nur 73 Tage im Szenario III. Bis 2050 kann also im Mittel mit einer Abnahme von 28 Frosttagen gerechnet werden.

Dieser Trend zu weniger Frosttagen ist mit Differenzierungen in ganz Sachsen zu beobachten (Abb. 14). Im Allgemeinen ist im Tiefland und in den thermisch begünstigen Flusstälern die geringste Anzahl von Frosttagen zu beobachten. Im Bereich des Elbtals um Dresden nimmt die Anzahl in allen drei Szenarien am stärksten ab. Hier ergeben sich Veränderungen von bis zu - 30 Tagen im Szenario III. Mit zunehmender Höhe steigt die Zahl der jährlichen Frosttage generell an, trotzdem ergibt sich in den Höhenlagen noch eine Verringerung von 20-23 Frosttagen gegenüber dem Kontrolllauf.

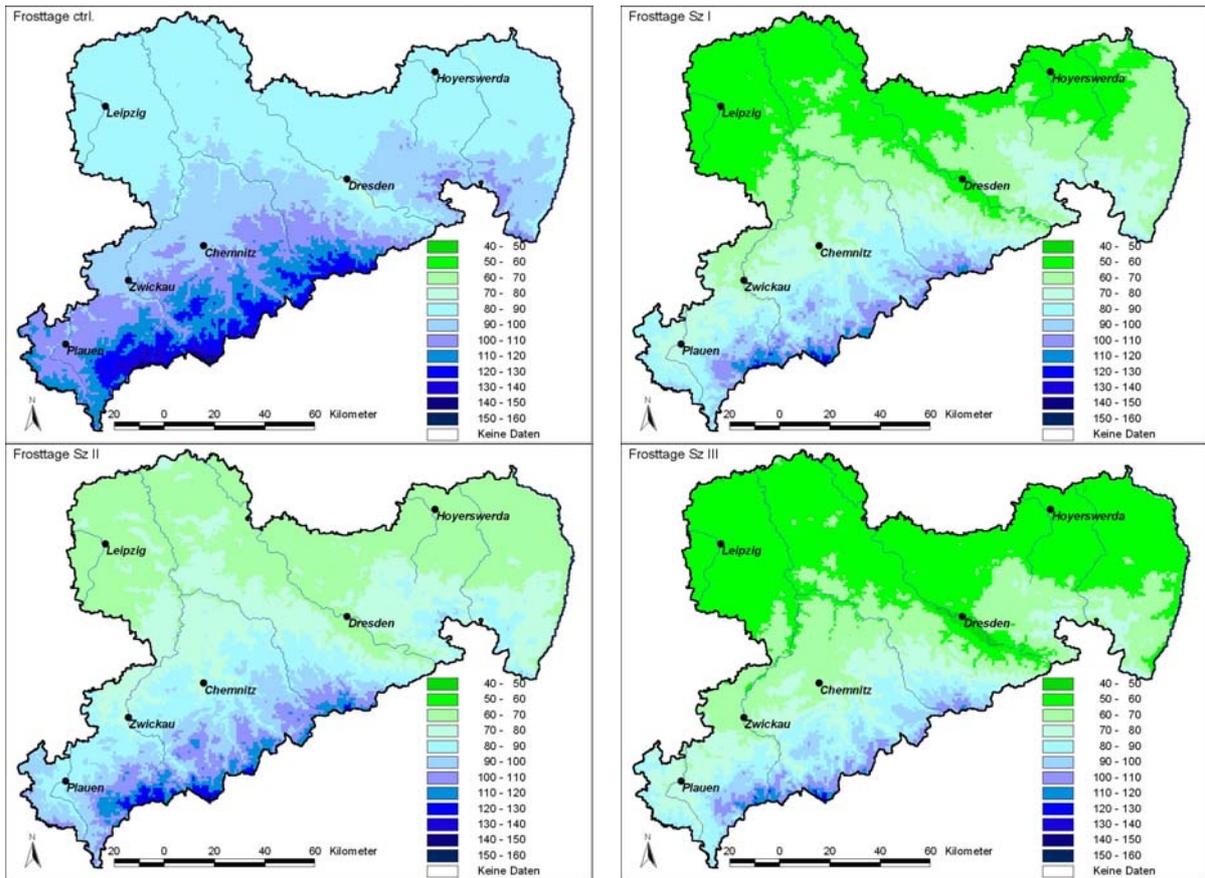


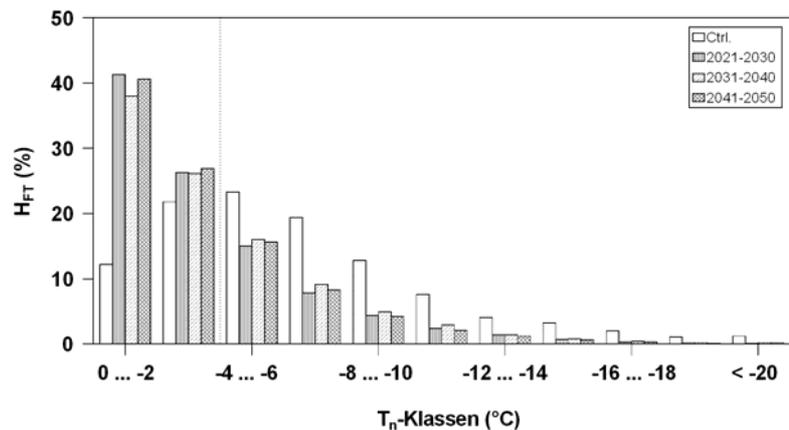
Abb. 14: Jährliche Anzahl von Frosttagen (d) im Kontrolllauf und in den Szenarien

Differenziert man die Untersuchungen weiter nach der Stärke des Frostes, so wird deutlich, dass vor allem Fröste bis $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ häufiger auftreten werden. Sehr deutlich ist der Anstieg der leichten (< 0 bis $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$) und mittleren Fröste (< -2 bis $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$) zu erkennen. Die strengen Fröste unter $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ nehmen hingegen in den Szenarien ab (Abb. 15).

Abb. 15:

Relative Häufigkeit von Frosttagen (H_{FT}) vorgegebener Stärke (T_n -Klassen) für den Kontrolllauf und die Szenarien

T_n : Minimum der Lufttemperatur



3.1.3.2 Thermische Vegetationsperiode

Die Länge der Vegetationsperiode bestimmt im Wesentlichen den Zeitraum, der in einer Region für das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen jährlich zur Verfügung steht. Im Allgemeinen wird die thermische Vegetationszeit durch das Über- bzw. Unterschreiten der

Tagesmitteltemperatur von 5 °C definiert (Chmielewski 2003b). Dieser Zeitraum dauert in Sachsen im Mittel 223 Tage, d.h. ca. 7 Monate (Tab. 11). Der mittlere Vegetationsbeginn in Sachsen (28.03.) fällt annähernd mit der Aussaat des Sommergetreides zusammen. Die Vegetationsperiode endet im Mittel am 7. November.

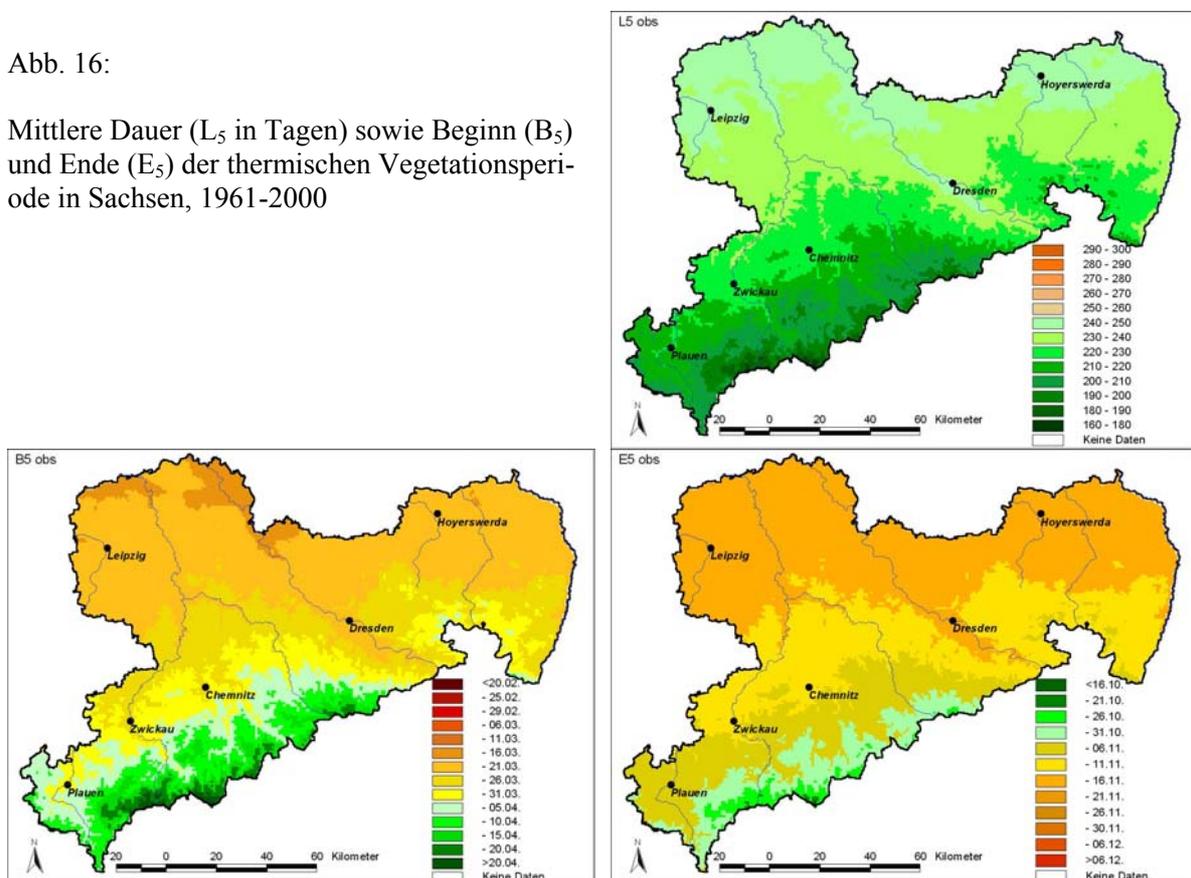
Tabelle 11: Beginn (B_5), Ende (E_5) in Tagen nach Jahresbeginn (TnJb) und Länge (L_5) der thermischen Vegetationszeit in Sachsen (d), einschl. beobachteter Trends (T) in Tagen pro Jahrzehnt, 1961-2000, x: Mittelwert, s: Standardabweichung, α : Irrtumswahrscheinlichkeit in %

	B_5 (TnJb)	E_5 (TnJb)	L_5 (Tage)
x	87 (28.03.)	311 (07.11.)	223
s	13.8	10.7	17.4
Max	109	338	270
Jahr	1970	1994	1990
Min	46	290	199
Jahr	1990	1993	1979
T	-2.6	-0.3	2.2
α	-	-	-

Über den gesamten Untersuchungszeitraum ergibt sich ein Trend zur Verlängerung der Vegetationsperiode von 2.2 Tagen pro Jahrzehnt, der hauptsächlich durch die Verfrühung des Vegetationsbeginns um immerhin 2.6 Tage / Jahrzehnt bedingt ist. Damit bestätigt sich auch für Sachsen die allgemeine Tendenz zu einer Verlängerung der Vegetationsperiode. Die annuelle Variabilität ist jedoch relativ groß, so dass sich der Trend nicht statistisch sichern lässt.

Abb. 16:

Mittlere Dauer (L_5 in Tagen) sowie Beginn (B_5) und Ende (E_5) der thermischen Vegetationsperiode in Sachsen, 1961-2000



Räumlich gesehen variiert die Andauer der Vegetationszeit zwischen 180 Tagen in den Höhenlagen der Mittelgebirge und 250 Tagen in den nördlichen Tieflandsbereichen und im Elbtal (Abb. 16). Dabei beginnt die Vegetationsperiode im Tieflandsbereich um den 16. März und verzögert sich nach Süden mit zunehmender Höhe auf den 15. April und später. Das Ende der Vegetationsperiode vollzieht sich genau gegenläufig. Es setzt in den Höhenlagen vor dem 31. Oktober ein und erreicht das Tiefland bis zum 16. November.

Tabelle 12: Thermische Vegetationsperiode (B_5 : Beginn, E_5 : Ende, jeweils in Tagen nach Jahresbeginn, Datum in Klammern, L_5 : Länge in Tagen) für den Kontrolllauf und die Szenarien, x: Mittelwert, s: Standardabweichung

	Ctrl.	Sz I	Sz II	Sz III
B_5				
x	86 (27.03.)	69 (10.03.)	83 (24.03.)	71 (12.03.)
s	10.7	17.7	13.1	19.7
Max	112 (22.04.)	105 (15.04.)	110 (20.04.)	112 (22.04.)
Min	42 (11.02.)	33 (02.02.)	32 (01.02.)	25 (25.01.)
E_5				
x	313 (09.11.)	326 (22.11.)	320 (16.11.)	328 (24.11.)
s	9.1	13.0	11.5	13.1
Max	341 (07.12.)	352 (18.12.)	346 (12.12.)	358 (24.12.)
Min	284 (11.10.)	295 (22.10.)	298 (25.10.)	293 (20.10.)
L_5				
x	227	258	237	257
s	13.4	21.8	16.1	23.8
Max	272	311	282	328
Min	195	209	203	204

Die bereits beobachtete Verlängerung der thermischen Vegetationszeit wird sich künftig fortsetzen. Im Vergleich zum Kontrolllauf nimmt die mittlere Andauer um mindestens 10 Tage (Sz II) bis maximal 31 Tage (Sz III) zu (Tab. 12). Als Ursache ist sowohl die Verfrühung des Vegetationsbeginns als auch die Verspätung des Vegetationsendes zu sehen. Hierbei kommt es vor allem an den Stationen bis ca. 450 m ü. NN zu einer deutlichen Verfrühung des Vegetationsbeginnes gegenüber dem Kontrolllauf (Tab. 13). Die Abweichungen reichen von - 33 Tagen in Bad Lauchstädt bis zu - 6 Tagen in Plauen. In den höheren Lagen fallen die Veränderungen des thermischen Vegetationsbeginns uneinheitlich aus. Hier sind sogar geringfügige Verspätungen in den Szenarien II und III möglich.

Das Ende der Vegetationszeit wird in allen Szenarien verspätet beobachtet, wobei die Höhendifferenzierung auch hier deutlich erkennbar ist.

Die Länge der thermischen Vegetationsperiode ändert sich demzufolge vor allem in den Tieflandsbereichen und bleibt mit zunehmender Höhe annähernd gleich (Abb. 17). In der Leipziger Tieflandsbucht, im Leipziger Land bis in das südliche Sächsische Hügelland verlängert sich die Vegetationsperiode bis 2050 auf 280-300 Tage, d.h. um immerhin 30-50 Tage. Auch in der Elbtalweitung kann noch eine Verlängerung von 20-30 Tagen beobachtet werden. In den höchsten Lagen des Sächsischen Mittelgebirges fällt die Verlängerung mit weniger als 5 Tagen nur gering aus.

Tabelle 13: Veränderung des thermischen Vegetationsbeginns (ΔB_5) und des thermischen Vegetationsendes (ΔE_5) in Tagen in Bezug zum Kontrolllauf, x: Mittelwert, s: Standardabweichung

Station	Höhe ü. NN (m)	ΔB_5			ΔE_5		
		Sz I	Sz II	Sz III	Sz I	Sz II	Sz III
Cottbus	69	-30	-5	-26	19	9	19
Torgau	87	-23	-2	-19	15	6	14
Doberlug-Kirchhain	97	-28	-3	-23	19	9	19
Wittenberg	105	-27	-3	-22	18	8	18
Bad Lauchstädt	119	-33	-11	-30	19	10	19
Leipzig-Stadt	141	-31	-9	-30	18	10	18
Leipzig-Flughafen	144	-31	-8	-30	19	10	18
Dresden	222	-28	-4	-23	20	11	19
Goerlitz	238	-13	0	-13	15	7	16
Gera	311	-17	0	-13	15	8	17
Plauen	386	-6	0	-8	9	6	15
Chemnitz	418	-16	-2	-17	15	9	18
Hof-Stadt	474	-4	1	2	6	5	8
Hof-Hohensasse	567	-2	1	1	4	2	8
Wildenau	611	-1	2	2	4	3	8
Marienberg	639	-3	1	-2	5	3	9
Fichtelberg	1213	-2	1	0	7	6	11
x		-17	-2	-15	13	7	15
s		12.0	3.9	11.7	6.0	2.8	4.4

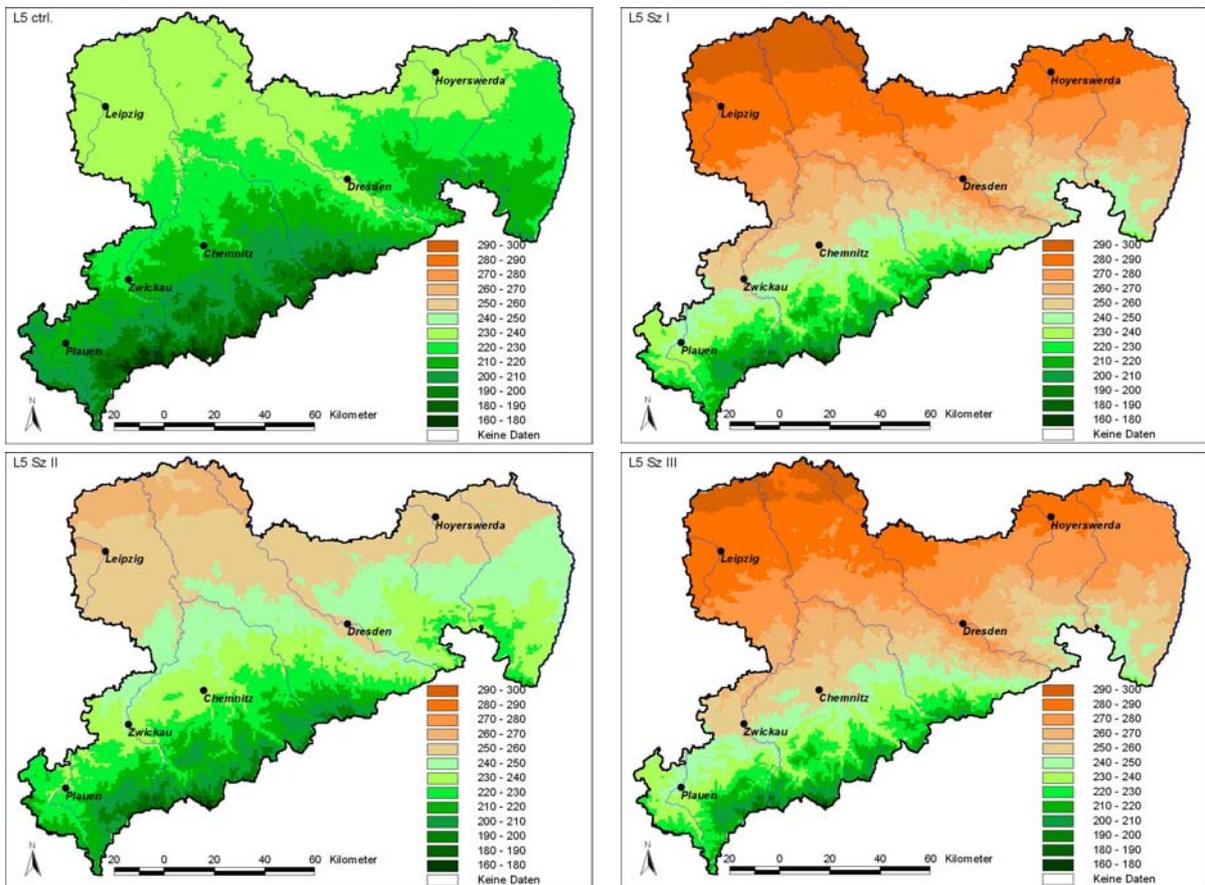


Abb. 17 : Dauer der Vegetationsperiode (L_5 in Tagen) im Kontrolllauf und in den Szenarien

3.1.4 Klimatische Bedingungen in der Hauptvegetationszeit

Der Zeitraum von April bis Oktober kann als Hauptvegetationszeit definiert werden, da das Pflanzenwachstum der meisten Kulturarten in diese Zeitspanne fällt. Für die Entwicklung des Getreides sind hiervon die ersten 4 Monate relevant, für das Wachstum der Hackfrüchte vor allem der Zeitraum ab Juli. In Bezug auf die natürliche Vegetation ist dieser Zeitabschnitt ebenfalls von Bedeutung, da in dieser Zeit der Hauptbiomassezuwachs erfolgt.

Tabelle 14: Mittlere Lufttemperatur (T_{04-10} in °C) verschiedener Untersuchungszeiträume und Veränderung der Temperatur (ΔT_{04-10} in K) in den Szenarien innerhalb der Hauptvegetationszeit April bis Oktober, nach Pazucha 2004

	Beobachtungen (1961-2000)		Ctrl. (1981-2000)		Sz I (2021-2030)		Sz II (2031-2040)		Sz III (2041-2050)	
	X	S	X	S	X	S	X	S	X	S
T_{04-10}	12.3	1.9	13.0	1.7	13.8	1.7	13.6	1.7	14.3	1.7
ΔT_{04-10}	-		-		+ 0.8		+ 0.6		+ 1.3	

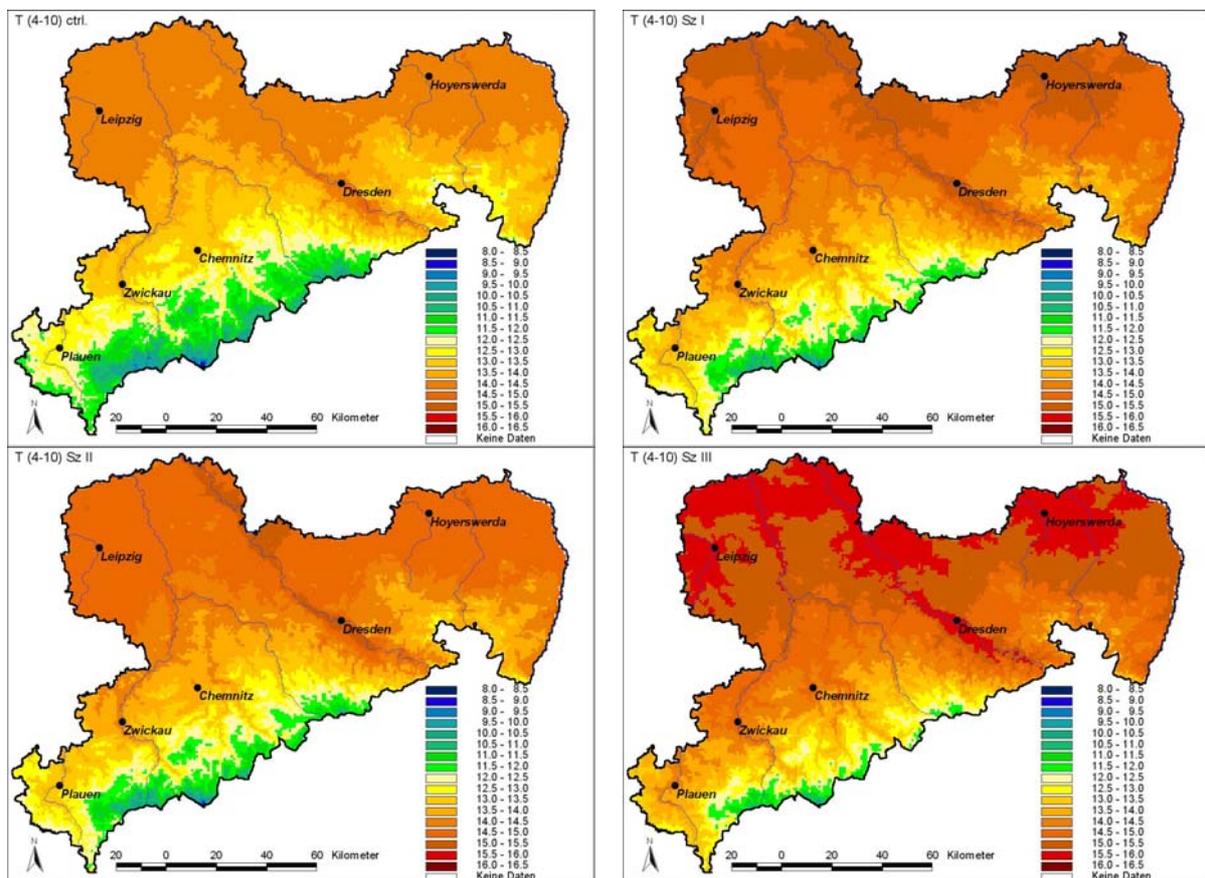


Abb. 18: Mittlere Lufttemperatur (T_{04-10} in °C) in der Hauptvegetationszeit April bis Oktober im Kontrolllauf und den Szenarien

Die mittlere Temperatur in der Hauptvegetationszeit beträgt heute 12.3 °C (Tab. 14). Bereits im Kontrolllauf ergibt sich eine etwas höhere Temperatur von 13.0 °C, die durch die stärkere Zunahme der Lufttemperatur in den 1990er Jahren zu erklären ist. In den Szenarien setzt sich der Temperaturanstieg innerhalb der Hauptvegetationszeit fort, so dass bis 2050 die Mitteltemperatur 14.3 °C beträgt und gegenüber dem Zeitraum 1981-2000 um 1.3 K höher liegt.

Der Temperaturanstieg ist im gesamten Bundesland zu beobachten, wobei in allen drei Szenarien die Erwärmung in den Höhenlagen geringfügig stärker ausfällt als in den tiefer gelegenen Gebieten (Abb. 18).

Zudem wird die *Niederschlagshöhe in der Hauptvegetationszeit* deutlich abnehmen (Tab. 15). Bis 2050 kann der Wert von heute 436 mm (Ctrl.) auf 402 mm sinken. Damit ergibt sich in diesem, für die Entwicklung der Vegetation wichtigen Zeitraum, eine Reduktion des mittleren Niederschlages um nahezu 34 mm. Berücksichtigt man gleichzeitig den über diesen Zeitabschnitt prognostizierten Temperaturanstieg von + 1.3 K, so werden die Veränderungen in den agrarklimatologischen Anbaubedingungen noch deutlicher. Sowohl der Temperaturanstieg als auch die fehlenden Niederschläge im Zeitraum zwischen April und Oktober werden sich negativ auf den Bodenwasserhaushalt und damit auf das Pflanzenwachstum auswirken.

Tabelle 15: Mittlere Niederschlagshöhe (P_{04-10} in mm) verschiedener Untersuchungszeiträume innerhalb der Hauptvegetationszeit April bis Oktober, nach Pazucha 2004

	Beobachtungen (1961-2000)		Ctrl. (1981-2000)		Sz I (2021-2030)		Sz II (2031-2040)		Sz III (2041-2050)	
	X	S	X	S	X	S	X	S	X	S
P_{04-10}	470.3	113.8	435.8	83.3	424.9	82.2	433.1	80.4	402.0	71.6

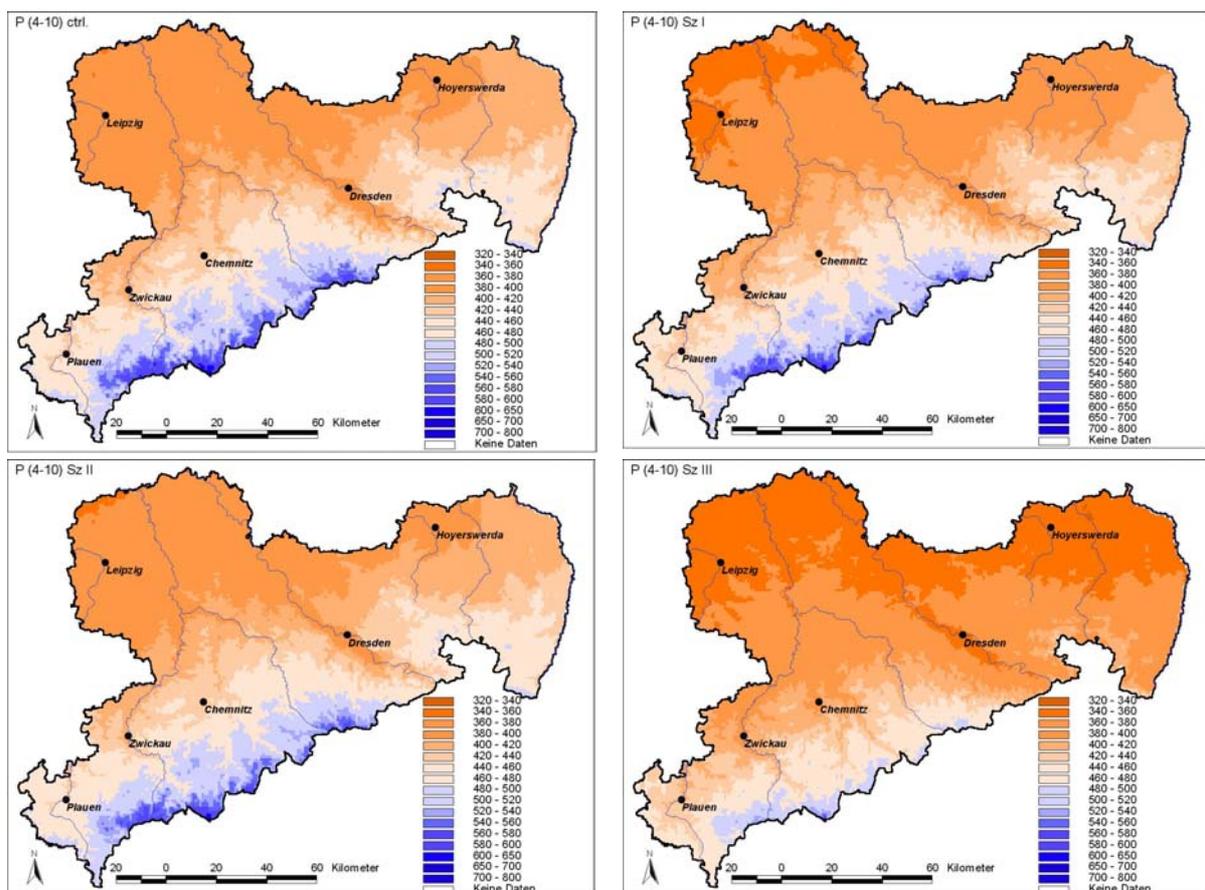


Abb. 19: Niederschlagshöhe (P_{04-10} in mm) in der Hauptvegetationszeit April bis Oktober im Kontrolllauf und den Szenarien

Abbildung 19 zeigt die räumliche Abnahme der Niederschläge. Besonders deutlich verändert sich die Niederschlagsmenge in den Höhenlagen, vor allem im Szenario III. In den Bereichen oberhalb 700 m ü. NN kommt es zu einer Verringerung des Niederschlagsdargebotes von 70 - 90 mm. Hiervon wird in erster Linie die natürliche Vegetation betroffen sein. Zusätzlich werden sich bis 2050 die Niederschlagshöhen in der östlichsten Region Sachsens und in der Oberlausitz deutlich verringern. Die räumliche Verteilung der Niederschläge bleibt jedoch erhalten, d.h. es dominiert ein Nord-Südgradient, der durch die Höhe bestimmt wird.

3.2 Rezente und künftige Veränderungen in der Pflanzenentwicklung

Im Anhang sind für alle in Tabelle 1 aufgeführten Pflanzenarten die Veränderungen in der Entwicklung sowohl für die letzten Jahrzehnte (1961-2000) als auch auf der Grundlage von Klimaszenarien für die Zukunft zusammengestellt. Hier finden sich ebenfalls die berechneten phänologischen Karten, deren Güte den Tabellen zu entnehmen ist. Phänologische Karten mit einem Bestimmtheitsmaß $< 50\%$ sollten jedoch mit Vorsicht interpretiert werden.

Im Einzelnen liefert der Kartenanhang folgende Informationen:

BEOBACHTUNG (1961-2000):

1. Mittelwerte und Trends der jeweiligen Phänophase im Zeitraum 1961-2000 sowie Angaben zur Anzahl und Höhenlage der phänologischen Stationen.
2. Georegression für die Berechnung phänologischer Karten im Beobachtungszeitraum 1961-2000. Der mittlere absolute Fehler (MAE) stellt die Abweichung zwischen Modellwert (Georegression) und Beobachtung an der Phänostation dar.
3. Karte 1 (links oben): Mittlerer Phaseneintritt in Sachsen auf der Basis aller verfügbaren Beobachtungsstationen, die Anzahl der Phänostationen ist angegeben.
4. Karte 2 (links unten): Mittlerer Phaseneintritt in Sachsen auf der Grundlage der phänologischen Gebietsmittel an den Klimastationen, unter Angabe der Anzahl der hierbei verwendeten Klimastationen.
5. Karte 3 (rechts unten): Mittlerer Phaseneintritt in Sachsen, berechnet auf der Grundlage des phänologischen Modells an den jeweiligen Klimastationen.
6. Phänomodell für Sachsen (Gebietsmittel) einschließlich der Gütemaße (MAE: mittlerer absoluter Fehler, RMSE: Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers).

SZENARIO (2021-2030, 2031-2040, 2041-2050):

1. Karte 1 (links oben): Mittlerer Phaseneintritt für den Kontrolllauf, berechnet auf der Grundlage der phänologischen Modelle an den Klimastationen.
2. Karten 2 bis 4 (rechts oben Szenario I, links unten Szenario II, rechts unten Szenario III) mittlerer Phaseneintritt für die Szenariorechnungen auf der Basis der phänologischen Modelle an den Klimastationen.
3. Veränderungen des phänologischen Gebietsmittels für Sachsen zum Kontrolllauf für die Szenarien Sz I bis Sz III.

Um die Interpretation des Kartenanhangs etwas zu erleichtern werden nachfolgend am Beispiel des Apfels die hieraus zu entnehmenden Informationen ausführlich dargestellt. Einen Gesamtüberblick über die möglichen Veränderungen in der Pflanzenentwicklung in Sachsen gibt der Abschnitt 3.2.2.

3.2.1 Veränderungen in der Phänologie des Apfels

Der Apfel (*Malus domestica*) gehört zur Familie der Rosengewächse (*Rosaceae*). Innerhalb dieser Familie ist der Apfel zu den Sammelbalgfrüchten oder Sammelsteinfrüchten zu zählen (Franke 1997).

In den gemäßigten Breiten gehört der Apfel zu dem bedeutendsten Fruchtbst. Der Kulturapfel, als Resultat der Domestikation und Kreuzung aus zahlreichen Malusarten, besteht heute in ca. 20.000 Sorten (Franke 1997). Sachsen ist das fünftgrößte Obstanbaugebiet der Bundesrepublik Deutschland. In den sächsischen Obstanbaugebieten ist der Apfel die wichtigste Obstart. Auf 68 % der gesamten Obstanbaufläche Sachsens stehen ca. 5.1 Millionen Apfelbäume. Regionale Schwerpunkte des sächsischen Obstanbaus liegen zwischen dem Elbtal mit seinen Randgebieten, der Vorgebirgslage des Erzgebirges, der Freiburger Mulde und der Mulde.

Beim Apfel werden früh-, mittel- und spätreifende Sorten unterschieden. In der hier vorliegenden Untersuchung wurden nur frühreifende Sorten verwendet, für die phänologische Beobachtungen in einem ausreichenden Umfang verfügbar waren. Zu ihnen zählen u.a. Discovery, Lodi, Mantet, Stark Earliest, Vista Bella und Weißer Klarapfel. Bei der Datenaufnahme fand eine Unterscheidung innerhalb dieser Sorten nicht statt.

Tabelle 16: Phänologische Eckdaten des Apfels, 1961-2000, x: Mittelwert, s: Standardabweichung, Max: spätestes, Min: frühestes Jahr, a,b: signifikanter Unterschied der Mittelwerte, t-Test

Apfel	Beginn der Blüte	Beginn der Pflückreife
Abkürzung	BB_{Ap}	PR_{Ap}
x 1961-1990 (s)	10.05. ^a (7.5)	06.08. ^a (7.3)
x 1991-2000 (s)	03.05. ^b (6.0)	29.07. ^b (9.4)
x 1961-2000 (s)	08.05. (7.6)	04.08. (8.6)
Max (Jahr)	20.05. (1970)	20.08. (1980)
Min (Jahr)	20.04. (1961)	16.07. (2000)
Trend / 10a (1961-2000)	-2.1	-2.2
Trend / 40a (1961-2000)	-8.4	-8.8
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.05$	$\alpha \leq 0.10$
Anzahl der Stationen	56	15
Höchste Station	760 m – Altenberg (Weißeritzkreis)	600 m – Frohnau (Annaberg)
Karten-Verifikation		
Bestimmtheitsmaß	91.2 %	76.7 %
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.01$	$\alpha \leq 0.01$
MAE (s) in Tagen	1.2 (0.8)	3.6 (2.6)
Max	3.4	8.5
Min	0.0	0.3

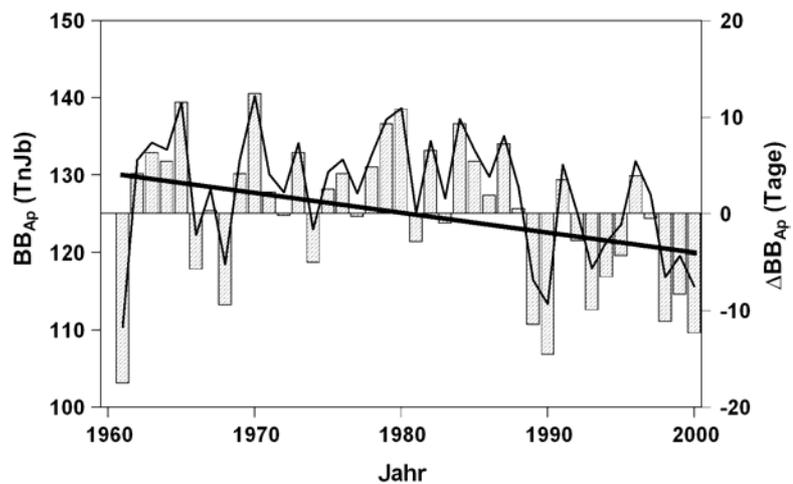
Im Mittel des Zeitraumes 1961-2000 begann die Blüte des Apfels am 8. Mai. Der früheste Termin in diesem Zeitabschnitt ist am 20.04.1961, der späteste am 20.05.1970 beobachtet worden (Tab. 16).

Über den gesamten Zeitraum hat sich der Beginn der Apfelblüte in Sachsen signifikant ($\alpha \leq 0.05$) um 8.4 Tage verfrüht (Abb. 20). Auffällig sind die überwiegend negativen Anomalien im Blühbeginn seit 1989. Diese Verfrüfung der phänologischen Phasen seit dem Ende der 1980er Jahre ist für viele Pflanzenarten in ganz Deutschland nachgewiesen worden (Müller 2002, Chmielewski et al. 2004). Im letzten Jahrzehnt sind für Sachsen nur noch in den Jahren 1991 und 1996 schwach positive Anomalien zu finden.

Abb. 20:

Mittlerer Beginn (BB_{Ap} in Tagen nach Jahresbeginn), Anomalien (ΔBB_{Ap}) und Trend im Beginn der Apfelblüte in Sachsen, 1961-2000

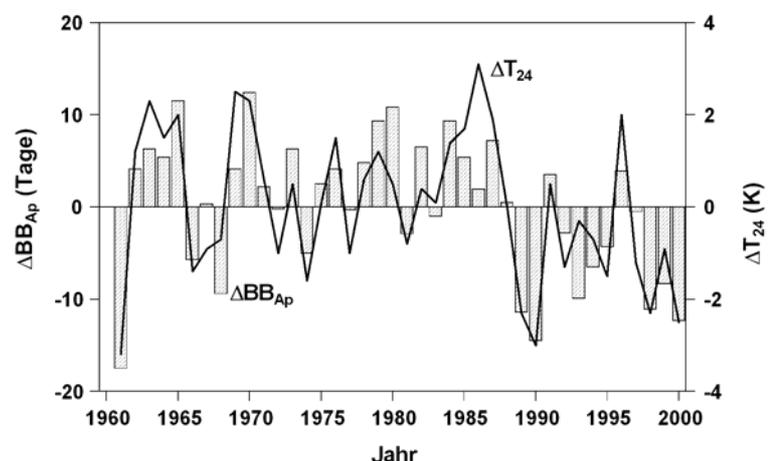
TnJb: Tage nach Jahresbeginn



Die Anomalien im Blühbeginn des Apfels korrespondieren außerordentlich gut mit den Abweichungen der Lufttemperatur im Zeitraum zwischen Februar und April ($r = -0.85$). In bereits vorausgehenden Untersuchungen wurde die Temperatur in diesem Zeitraum als relevant für das Auftreten der Frühjahrsphasen erachtet (Chmielewski und Rötzer 2001). Die in den 1990er Jahren beobachtete Verfrüfung im Termin der Apfelblüte ist damit eindeutig auf die Temperaturänderung in Sachsen zurückzuführen (Abb. 21).

Abb. 21:

Mittlere Anomalien im Blühbeginn des Apfels (ΔBB_{Ap}) und in der Lufttemperatur (ΔT_{24}) in Sachsen von Februar bis April, 1961-2000



Die regionalen Unterschiede in den Phänophasen des Apfels sind in Abbildung 22 erkennbar. Vom Leipziger Land nach Osten bis zur polnischen Grenze vollzieht sich der Beginn der Blü-

te bis zum 5. Mai. Die Elbtalweitung stellt dabei ein Gunstgebiet dar, in dessen Bereich der Beginn der Blüte zum selben Termin beobachtet werden kann. Im Bereich des Lößhügellandes, des Westlausitzer Hügellandes sowie der östlichen Oberlausitz wird der Termin bis zum 10. Mai beobachtet. Mit zunehmender Höhe verspätet sich die Blüte zusehends und wird auf den höchsten Lagen erst nach dem 25. Mai erreicht. Dabei bleiben die Täler der Flüsse deutliche Gunstgebiete, in denen die Phase früher als in ihren höheren Umgebungen eintritt.

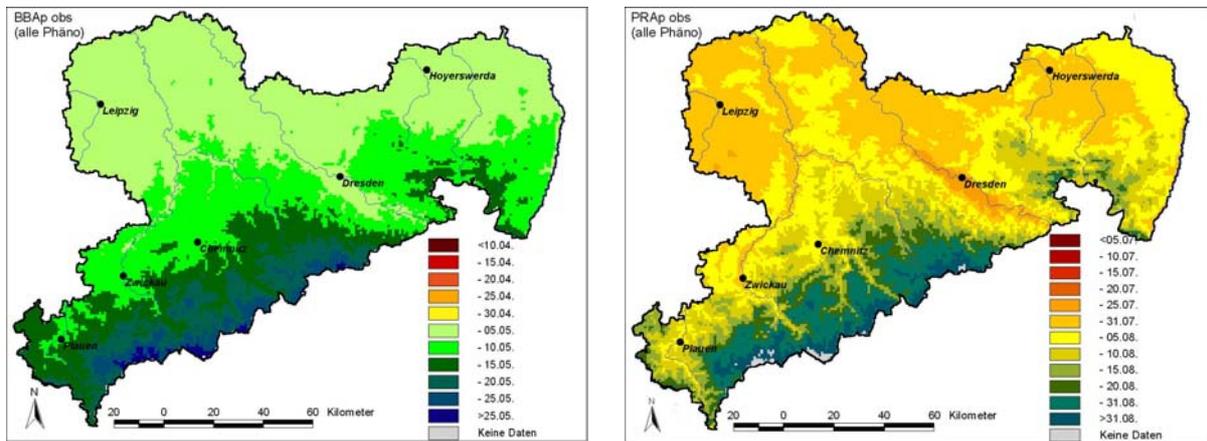
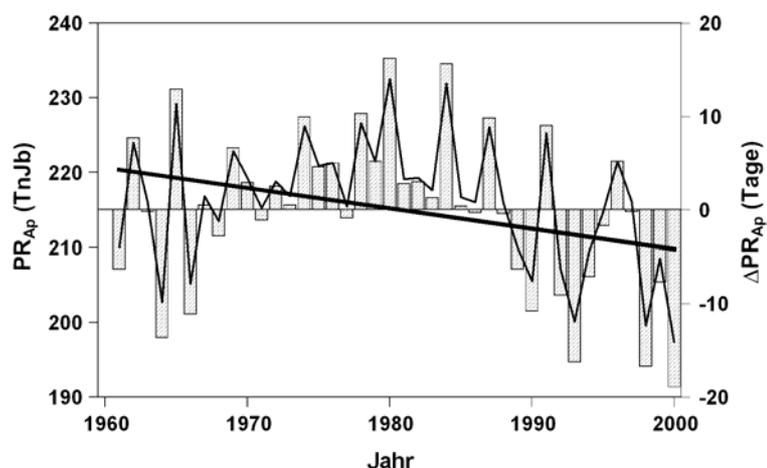


Abb. 22: Mittlerer Beginn der Apfelblüte (BB_{Ap}) und Pflückreife des Apfel (PR_{Ap}) in Sachsen, 1961-2000

Die Pflückreife des frühen Apfels wird in Sachsen im Mittel am 04.08. beobachtet. Der zeitigste Phasenbeginn in der Periode 1961-2000 konnte am 16.07.2000 beobachtet werden, die späteste Reife am 20.08.1980 (siehe Tab. 16).

Diese Phase hat sich ebenso deutlich verfrüht wie die Blüte (Abb. 23). Der berechnete Trend ist sogar geringfügig stärker. Die Verfrüfung der Pflückreife im Zeitraum 1961-2000 liegt bei 2.2 Tagen pro Jahrzehnt ($\alpha \leq 0.10$), beträgt also 8.8 Tage im Untersuchungszeitraum. Hier sind ebenfalls die starken negativen Anomalien, d.h. die frühen Termine ab 1989 augenscheinlich.

Abb. 23:
Mittlerer Beginn (PR_{Ap} in Tagen nach Jahresbeginn), Anomalien (ΔPR_{Ap}) und Trend im Beginn der Pflückreife beim Apfel in Sachsen, 1961-2000
TnJb: Tage nach Jahresbeginn



Ursache hierfür ist der enge Zusammenhang zwischen dem Beginn der Blüte und der Pflückreife ($r = 0.73$). Andererseits beschleunigen übernormale Temperaturen zwischen diesen beiden Entwicklungsterminen den Reifeprozess. Im Mittel ist nach dem Beginn der Blüte eine Temperatursumme von 1322 K erforderlich, bis die Pflückreife in Sachsen beobachtet werden

kann. In Jahren mit überdurchschnittlichen Temperaturen von Mai bis Juli wird der Termin dementsprechend zeitiger erreicht als in Jahren mit niedrigeren Temperaturen.

Auf der Grundlage der zur Verfügung stehenden Szenarien war es möglich, die Entwicklung der Vegetation unter geänderten Klimaverhältnissen zu betrachten (Tab. 17). Beim Apfel werden sich sowohl für den Blühbeginn als auch für den Reifetermin deutliche Veränderungen gegenüber den heutigen Bedingungen (Kontrolllauf) ergeben. In allen drei Jahrzehnten werden sich die Phasen verfrühen. Die Veränderungen des Blühbeginns und der Reife sind von ähnlicher Größenordnung und betragen maximal 10 bzw. 9 Tage. Damit wird der Beginn der Apfelblüte im Mittel bereits im April zu beobachten sein, die Pflückreife dementsprechend schon Ende Juli.

Tabelle 17: Veränderung des mittleren Eintrittstermins (Δ in Tagen) der Phasen Beginn der Blüte (BB_{Ap}) und Beginn der Pflückreife (PR_{Ap}) beim Apfel in Sachsen für die Szenarien in Bezug zum Kontrolllauf

	Sz I	Sz II	Sz III
ΔBB_{Ap}	-10	-4	- 8
ΔPR_{Ap}	-8	-4	-9

Ursache für den zeitigeren Blühbeginn des Apfels ist im Wesentlichen der markante Anstieg der Lufttemperatur im Januar und Februar (Tab. 5), da die Veränderungen im Frühjahr nur ausgesprochen gering sind. Die Verfrühung der Apfelreife ist hingegen die Folge der Erwärmung im Juni und Juli, wodurch die für die Reife benötigte Temperatursumme früher erreicht wird.

Räumlich treten die größten Veränderungen der Apfelblüte in den tieferen Lagen auf (Abb. 24). Im Gegensatz zum Kontrolllauf zeigt sich in allen Szenarien, vor allem im NW- Bereich Sachsens, eine Verfrühung des Termins. Im Szenario I und III wird im Leipziger Land bereits bis zum 15. April die Blüte erreicht, während sie im Kontrolllauf erst bis zum 30.04., maximal bis zum 25.04. zu beobachten ist. In allen Zeiträumen fällt das Elbtal mit seinen Randgebieten als Gunstraum auf, der bis weit nach Süden reicht. In Richtung Süd-Ost nimmt die Verfrühung ab. Bis nördlich vom Erzgebirge (Erzgebirgsbecken und Löbhubergland) wird im Szenario I und III die Blüte bis zum 25. bzw. 30. April beobachtet. In den unteren Erzgebirgsbereichen bis auf 500 m ü. NN wird diese Phase bis zum 10.05. erreicht. Im Szenario II sind die Veränderungen gegenüber dem Kontrolllauf nicht ganz so stark, dennoch findet auch hier in allen Regionen eine Verfrühung des Phasenbeginns statt.

Der Beginn der Pflückreife wird im Kontrolllauf für den 1. August berechnet. Auch bei dieser Phase ist die Veränderung in den Szenarien stark (Abb. 25). Mit 9 Tagen Verfrühung gegenüber dem Kontrolllauf wird im Szenario III die Pflückreife im Mittel bereits am 23. Juli beobachtet. Im Szenario I wurde eine Verfrühung von 8 Tagen und im Szenario II von 4 Tagen berechnet. Wie bereits bei der Blüte geschildert, sind die Veränderungen der Pflückreife in den tieferen Bereichen Sachsens am stärksten und nehmen mit zunehmender Höhe ab. Besonders Gunstgebiete sind auch hier wieder die Täler der Flüsse, besonders das der Elbe.

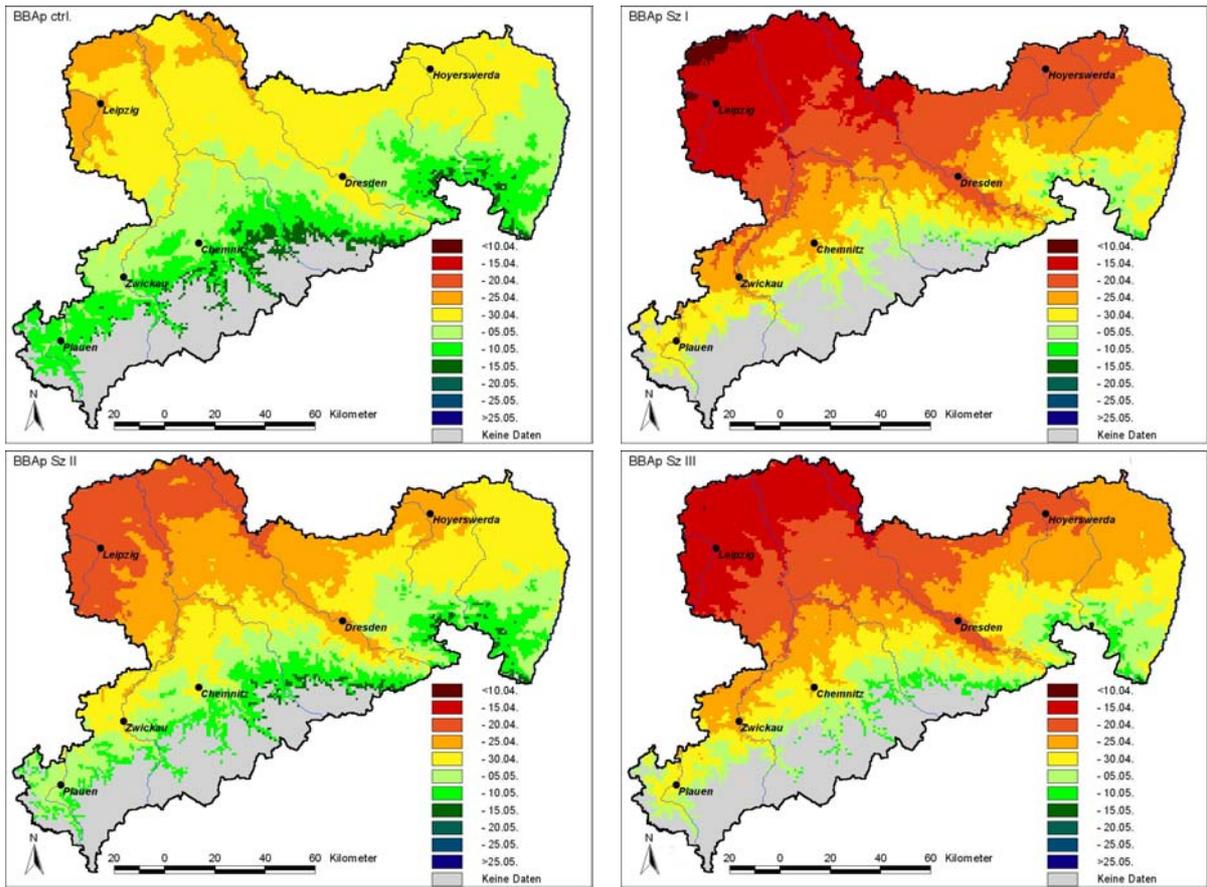


Abb. 24: Mittlerer Beginn der Apfelblüte im Kontrolllauf und in den Szenarien

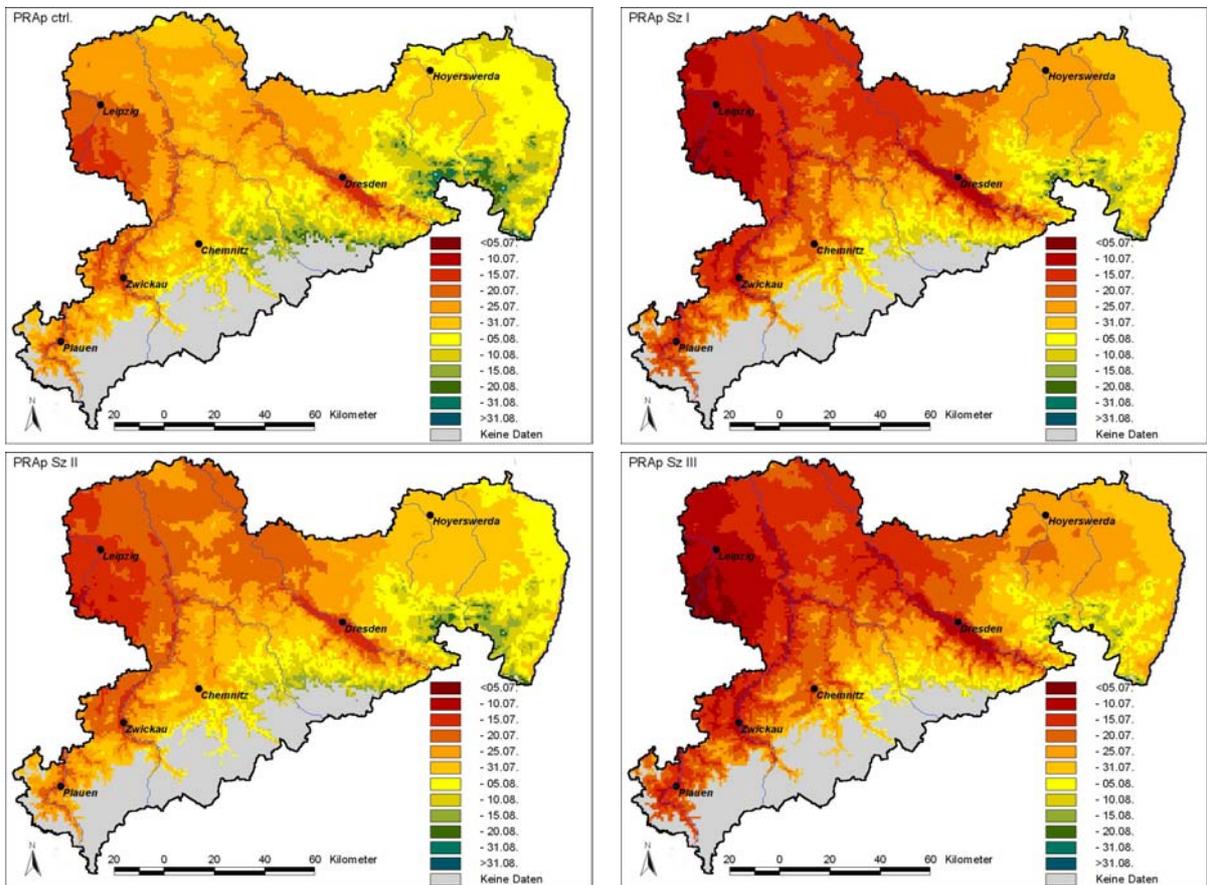


Abb. 25: Mittlerer Beginn der Pflückreife des Apfels im Kontrolllauf und in den Szenarien

Durch die Analyse von Einzeljahren konnten die Extrema für den Beginn der Apfelblüte in Sachsen gefunden werden (Tab. 18). Als frühester Termin der Apfelblüte wurde der 28. März ermittelt (Jahr 60 im Szenario I). Dieser Termin liegt immerhin 41 Tage vor dem Mittelwert im Zeitraum 1961-2000 und 33 Tage zeitiger als das Kontrolllaufmittel. Die genaue Betrachtung der Lufttemperatur in diesem Modelljahr zeigt, dass die Monatsmitteltemperaturen von Januar bis März deutlich über dem heutigen Mittelwert liegen (Kontrolllauf). So ist z.B. der Januar 8 K wärmer als die Monatsmitteltemperatur im Kontrolllauf. Auch die Februar- und Märztemperaturen zeigen deutliche positive Anomalien in dem Szenariojahr.

Tabelle 18: Maximale Verfrühung der Apfelblüte in Sachsen im Szenario gegenüber dem Kontrolllauf, x: Mittelwert, s: Standardabweichung, ΔT : Temperaturanomalien (K) in ausgewählten Monaten, P_{\min} : frühester Eintrittstermin

P	x	s	x	P_{\min}	Jahr	ΔT_{01}	ΔT_{02}	ΔT_{03}	ΔT_{04}
	1961-2000		1981-2000						
BB _{Ap}	08.05.	7.6	30.04.	28.03.	60 / Sz I	+8.0	+3.1	+4.2	-

In solchen Extremjahren, in denen die Blüte bedeutend früher zu beobachten ist, ist die Gefahr von Spätfrostschäden besonders hoch. In dem angeführten Beispiel werden noch 5 Frosttage nach dem Einsetzen der Apfelblüte beobachtet. Am 10.04., also nur 13 Tage nach dem Blühbeginn, fallen die nächtlichen Temperaturen nochmals auf - 4.7 °C. Der letzte Frosttag wird in diesem Beispieljahr noch am 09.05. beobachtet. Die Folgeschäden dürften in diesem Jahr erheblich sein. Hier zeigt sich noch einmal deutlich, dass auch unter wärmeren Klimabedingungen die Gefahr des Auftretens singulärer Ereignisse, wie Spätfröste, nicht gebannt ist. Das Spätfrostisiko nimmt daher vermutlich für einige Pflanzenarten zu (s. Abschn. 3.2.2.2).

3.2.2 Überblick über die Veränderungen der Pflanzenentwicklung

3.2.2.1 Rezente und künftige Trends in der Entwicklung

Alle in Tabelle 1 aufgeführten Pflanzenarten wurden, wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt, auf Trends in der Vegetationsentwicklung untersucht. Im Anhang finden sich die statistischen Eckdaten zu allen Pflanzenarten und Phänophasen.

Die nachfolgenden Ergebnisse belegen, dass die für Europa (Chmielewski und Rötzer 2001, 2002) und Deutschland (Müller 2002, Chmielewski et al. 2004) gefundenen Trends in der Pflanzenentwicklung uneingeschränkt auf Sachsen übertragbar sind. Seit dem Ende der 1980er Jahre zeigen sich bei nahezu allen phänologischen Phasen deutliche Veränderungen im Eintrittsverhalten. Die beobachteten Verfrühungen in den Phänophasen korrespondieren außerordentlich gut mit den Veränderungen der Lufttemperatur.

Die Studie zeigt, dass sowohl die natürliche Vegetation als auch Obstgehölze und landwirtschaftliche Kulturen auf die rezente Klimaveränderungen deutlich reagiert haben. Unterschiede in der Reaktionsstärke bestehen sowohl zwischen den Pflanzenarten als auch in der Jahreszeit. Generell zeigen die Frühjahrsphasen den stärksten Trend zur Verfrühung (Tab. 19). Innerhalb einer Pflanzenart nimmt dieser Trend im Jahresverlauf ab und kann sich

bis zum Herbst teilweise in eine Verspätung des Phaseneintritts umwandeln. Die starken negativen Trends bei den Frühjahrsphasen resultieren einerseits aus der relativ hohen Variabilität der Lufttemperatur im Frühjahr, andererseits liegen die Temperaturen in dieser Zeit des Jahres noch weit unterhalb der pflanzenspezifischen Optima. Hierdurch reagieren die Pflanzen im Frühjahr außerordentlich stark auf die Variabilität der Witterung. Im Herbst können höhere Temperaturen die physiologischen Prozesse der Pflanze noch aufrechterhalten, so dass bei einem Anstieg der Herbsttemperaturen eine verlängerte Pflanzenentwicklung zu erwarten ist, wenn nicht vorausgehende Trockenheit zu vorzeitiger Blattverfärbung und zum Blattfall führt.

Tabelle 19: Mittlere Eintrittstermine (x) und Trends (T) ausgewählter Phänophasen in Sachsen, 1961-2000, s: Standardabweichung

Pflanzenart	Phänophase	x	s (Tage)	T (Tage/Jahrzehnt)
<i>Natürliche Vegetation</i>				
Birke	BF	23.04.	7.5	- 1.5
	BV	05.10.	2.9	+ 0.2
Kastanie	BF	27.04.	6.9	- 1.8
	BB	16.05.	7.1	- 1.6
	EF	22.09.	4.5	- 1.5
	BV	05.10.	3.8	- 0.6
Eiche	BF	10.05.	6.5	- 1.9
	EF	25.09.	5.1	- 1.2
	BV	17.10.	3.9	+ 0.6
<i>Obstgehölze</i>				
Stachelbeere	BF	08.04.	10.0	- 3.0
	BB	23.04.	8.8	- 2.2
	PR	18.07.	6.4	- 1.6
Süßkirsche	BB	27.04.	8.0	- 1.9
	PR	19.06.	5.7	- 0.5
Apfel (früh)	BB	08.05.	7.6	- 2.1
	PR	04.08.	8.6	- 2.2
<i>Landwirtschaftliche Nutzpflanzen</i>				
Winterroggen	BE	28.09.	3.5	0.0
	AU	11.10.	4.1	0.0
	SS	30.04.	6.2	- 2.2
	AE	23.05.	5.8	- 2.0
	VB	08.06.	5.2	- 2.0
	ER	05.08.	7.5	+ 1.0
Hafer	BE	30.03.	9.3	- 0.4
	AU	20.04.	7.5	- 0.7
	SS	19.05.	4.4	- 0.9
	RS	23.06.	5.6	- 2.4
	ER	22.08.	8.0	+ 1.3

Für die Zukunft lassen sich ähnliche Reaktionen der Pflanzen feststellen, wie sie schon für den Beobachtungszeitraum 1961-2000 diskutiert worden sind. In den Tabellen 20-22 sind die Phasen nach ihrem Auftreten im Jahresverlauf geordnet. Sowohl bei der natürlichen Vegetation, als auch beim Obst nehmen die Veränderungen mit dem späteren Eintreten der Phasen im Jahresverlauf ab.

Die größten Abweichungen gegenüber dem Kontrolllauf zeigen sich demzufolge für die zeitigen Frühjahrsphasen, wie für die Blüte der Sal-Weide oder die Blattentfaltung der Birke und Kastanie (Tab. 20). Diese starken Verfrühungen in den Szenarien I und III sind auf die markanten Veränderungen der Lufttemperaturen in den beiden letzten Wintermonaten zurückzuführen. Bei den Sommer- und Herbstphasen ist das Verhalten der Pflanzen mit den bisher aus den Beobachtungsdaten gefundenen Ergebnissen vergleichbar. Die später im Jahresverlauf auftretenden Phasen zeigen deutlich geringere Veränderungen. Während für die Phasen der Fruchtreife noch ein leichter negativer Trend vorhanden ist, zeigt der Termin der Blattverfärbung im Herbst kaum noch eine Verschiebung.

Tabelle 20: Mittlere Eintrittstermine der phänologischen Phasen (P_i in Tagen nach Jahresbeginn) der natürlichen Vegetation im Kontrolllauf und in den Szenarien und ihre Veränderungen (Δ) in den Szenarien gegenüber dem Kontrolllauf in Tagen

P_i	Ctrl.	Sz I	Sz II	Sz III	$\Delta Sz I$	$\Delta Sz II$	$\Delta Sz III$
BB _{Sw}	84	57	69	57	-27.0	-15.0	-27.0
BF _{Br}	107	97	104	98	-10.0	-3.0	-9.0
BF _{Ka}	110	103	110	104	-7.0	0.0	-6.0
BF _{Ei}	127	122	128	123	-5.0	1.0	-4.0
BB _{Ka}	127	121	127	123	-6.0	0.0	-4.0
MT _{Fi}	128	123	129	125	-5.0	1.0	-3.0
BB _{Fl}	130	124	130	126	-6.0	0.0	-4.0
BB _{Ro}	151	148	152	149	-3.0	1.0	-2.0
BB _{Ho}	153	147	152	148	-6.0	-1.0	-5.0
VB _{Kn}	151	146	151	148	-5.0	0.0	-3.0
BB _{Li}	178	174	178	173	-4.0	0.0	-5.0
EF _{Ho}	247	241	243	237	-6.0	-4.0	-10.0
EF _{Ka}	261	258	260	257	-3.0	-1.0	-4.0
EF _{Ei}	263	260	263	260	-3.0	0.0	-3.0
BV _{Ka}	275	274	275	274	-1.0	0.0	-1.0
BV _{Br}	282	283	282	281	1.0	0.0	-1.0
BV _{Ei}	288	288	288	288	0.0	0.0	0.0

Beim Obst wurde ebenfalls eine deutliche Verfrühung der zeitigen Phasen nachgewiesen (Tab. 21). Die Blattentfaltung und die Blüte der Stachelbeere sind die frühesten zu beobachtenden Phänophasen. Sie zeigen in den Szenarien I und III mit maximal 24 bzw. 17 Tagen die stärkste Reaktion.

Die Pflückreife beim Obst liegt in den Monaten Juni und Juli. Aufgrund der steigenden Sommertemperaturen, insbesondere in den ersten beiden Monaten, wird die Fruchtreife merklich beschleunigt. Die maximalen Veränderungen bei den Obstarten betragen - 5 Tage (Pflückreife Süßkirsche) bis - 9 Tage (Pflückreife Stachelbeere und Apfel). Hierdurch wird jedoch die Länge des Reifezeitraums der Gehölze nicht beeinträchtigt, da sich der Blühbeginn in ähnlichem Maße verfrüht hat.

Tabelle 21: Mittlere Eintrittstermine der phänologischen Phasen (P_i in Tagen nach Jahresbeginn) beim Obst im Kontrolllauf und in den Szenarien und ihre Veränderungen (Δ) in den Szenarien gegenüber dem Kontrolllauf in Tagen

P_i	Ctrl.	Sz I	Sz II	Sz III	$\Delta Sz I$	$\Delta Sz II$	$\Delta Sz III$
BF _{St}	91	68	80	67	-23.0	-11.0	-24.0
BB _{St}	103	87	97	86	-16.0	-6.0	-17.0
BB _{Jo}	110	102	109	104	-8.0	-1.0	-6.0
BB _{Sü}	111	102	109	104	-9.0	-2.0	-7.0
BB _{Sa}	118	113	120	116	-5.0	2.0	-2.0
BB _{Ap}	124	114	120	116	-10.0	-4.0	-8.0
PR _{Sü}	162	156	161	157	-6.0	-1.0	-5.0
PR _{Jo}	185	178	183	178	-7.0	-2.0	-7.0
PR _{St}	188	179	184	179	-9.0	-4.0	-9.0
PR _{Sa}	201	196	200	195	-5.0	-1.0	-6.0
PR _{Ap}	213	205	209	204	-8.0	-4.0	-9.0

Bei den landwirtschaftlichen Nutzpflanzen sind nur geringe Veränderungen in der Entwicklung erkennbar (Tab. 22). Die Phase der Bestellung konnte bei beiden untersuchten Getreidearten (Hafer, Winterroggen) nicht berechnet werden, da der Termin von vielfältigen Faktoren abhängig ist. Beim Hafer besteht ein sehr enger Zusammenhang zwischen der Bestellung und dem Auflaufen der Saat. Die nachfolgenden Phasen sind schon relativ unabhängig vom Aussattermin und werden zunehmend durch den Witterungsverlauf gesteuert. Die sich in den Szenarien ergebenden Veränderungen im Eintrittstermin der Phasen sind jedoch äußerst gering.

Beim Winterroggen erfolgen die Bestellung und das Auflaufen der Saat zum Ende der Vegetationsperiode im Herbst. Die nachfolgenden Phasen wie Schossen, Ährenschieben, Vollblüte und Ernte werden erst im darauf folgenden Jahr beobachtet und sind somit unabhängig vom Aussattermin. Der Schossbeginn und der Beginn des Ährenschiebens werden maßgeblich durch die Temperaturen im zeitigen Frühjahr beeinflusst. Da in diesem Zeitraum die Temperaturänderungen im Szenario nur gering sind, fallen die Veränderungen in der Entwicklung vergleichsweise moderat aus. Die maximale Verfrühung beider Phasen beträgt im Durchschnitt nur 3 Tage. Die Veränderungen der nachfolgenden Phasen sind wiederum vernachlässigbar.

Tabelle 22: Mittlere Eintrittstermine der phänologischen Phasen (P_i in Tagen nach Jahresbeginn) bei landwirtschaftlichen Nutzpflanzen im Kontrolllauf und in den Szenarien und ihre Veränderungen (Δ) in den Szenarien gegenüber dem Kontrolllauf in Tagen

P_i	Ctrl.	Sz I	Sz II	Sz III	$\Delta Sz I$	$\Delta Sz II$	$\Delta Sz III$
AU _{Ha}	95	93	97	96	-2.0	2.0	1.0
SS _{Ha}	138	137	139	138	-1.0	1.0	0.0
RS _{Ha}	173	173	174	174	0.0	1.0	1.0
ER _{Ha}	233	233	234	234	0.0	1.0	1.0
SS _{Wr}	117	114	117	115	-3.0	0.0	-2.0
AE _{Wr}	141	138	141	139	-3.0	0.0	-2.0
VB _{Wr}	157	156	157	157	-1.0	0.0	0.0
ER _{Wr}	215	213	215	214	-2.0	0.0	-1.0

3.2.2.2 Veränderung der Frostgefahr während der Blüte von Obstgehölzen

Wie bereits erwähnt ist die potentielle Spätfrostgefährdung der Pflanzen von vielen Faktoren abhängig. Hierzu zählen neben Pflanzenart und Sorte der Zeitpunkt, die Stärke und die Andauer des Frostes. Für den Anbau von Obst und Wein ist die Frostgefahr von außerordentlicher Bedeutung, da durch einzelne Frostnächte die Ernte eines ganzen Jahres vernichtet oder merklich dezimiert werden kann. Der Witterungsverlauf im Zeitraum der Obstblüte ist daher von größerer Bedeutung, als die Bedingungen während der Reife.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass sich der Blühbeginn bei allen untersuchten Obstarten bis 2050 weiter verfrühen wird. Ebenso wurde gezeigt, dass die Abnahme der jährlichen Anzahl von Frosttagen vor allem auf die Reduktion der herbstlichen Frühfröste zurückzuführen ist. Das zeitliche Auftreten von Spätfrösten hingegen unterliegt kaum Veränderungen. Hierdurch wird sich für einige Obstbäume eine zunehmende Frostgefährdung ergeben.

Um dies zu untersuchen, wurde für relevante Obstgehölze das Auftreten von Frost im Zeitraum zwischen Blühbeginn bis 10 Tage nach diesem Zeitpunkt ausgewertet (Tab. 23). Hierbei wird zwischen Frost verschiedener Stärke unterschieden.

Tabelle 23: Veränderungen in der relativen Häufigkeit (%) von leichtem ($0 > T_n \geq -2$ °C), mittlerem ($-2 > T_n \geq -4$ °C) und strengem ($T_n < -4$ °C) Frost bis 10 Tage nach Beginn der Apfelblüte, T_n : Minimum der Lufttemperatur

T_n in °C	Ctrl.	Sz I	Sz II	Sz III
	1981-2000	2021-2030	2031-2040	2041-2050
Spätfrosthäufigkeit bei Süßkirschen				
< 0 ... -2	33.5	54.5	47.5	45.0
< -2 ... -4	11.5	28.5	23.5	19.5
< -4	3.0	17.0	7.5	3.5
Spätfrosthäufigkeit bei Sauerkirschen				
< 0 ... -2	18.0	30.0	20.5	18.5
< -2 ... -4	5.5	12.0	6.0	4.5
< -4	0.5	2.0	1.0	1.0
Spätfrosthäufigkeit bei Äpfeln				
< 0 ... -2	14.5	30.5	20.5	19.0
< -2 ... -4	4.5	10.0	5.0	4.0
< -4	1.0	1.0	0.5	0.5

Für alle untersuchten Gehölze zeigt sich im Szenario I eine deutliche Zunahme der leichten und mittleren Fröste während der Blüte. Der Anstieg der mittleren Fröste ist sogar noch größer als die Zunahme der leichten Fröste. Für die Kirschen ist der Anstieg der strengen Fröste im Zeitraum 2031-2040 extrem hoch. Beispielsweise ergibt sich für Süßkirschen nahezu eine Versechsfachung der Frostgefahr. Obwohl die Spätfrostgefährdung der Süßkirsche in den nachfolgenden Szenarien zurückgeht, liegt sie künftig stets höher als im Kontrolllauf. Da die Knospen und Blüten von Kirschbäumen weniger frostresistent sind als die von Apfelbäumen, ist hier die Gefahr von Frostschäden äußerst hoch.

Während der Blüte der Apfelbäume nimmt die Frostgefahr ebenfalls zu. Dies betrifft vor allem die leichten und mittleren Fröste, die sich zum Szenario I hin verdoppeln. In den darauf folgenden Jahrzehnten ist ein Rückgang der Frosthäufigkeit gegenüber dem ersten Szenario-

Abschnitt zu erkennen, die Anzahl der leichten Fröste im Szenario III übersteigt jedoch immer noch die Verhältnisse im Kontrolllauf.

Insgesamt zeigt sich, dass durch die Verfrühung der Obstblüte die Spätfrostgefahr deutlich zunehmen wird. Die früher blühenden Kirschbäume sind hiervon extrem betroffen. Bei Äpfeln kann annähernd mit einer Verdoppelung von Spätfrostschäden gerechnet werden.

3.2.2.3 Extreme Verfrühungen in der Vegetationsentwicklung

Milde Winter und warme Frühjahre hatten bereits in den Beobachtungen zu starken Verfrühungen in der Vegetationsentwicklung geführt. Beispiele hierfür sind die Jahre 1961, 1989, 1990 und 2000. Im Mittel führt eine Temperaturzunahme von 1 K im zeitigen Frühjahr zu einer Verfrühung des Phaseneintritts um ca. 5-7 Tage.

Um zu prüfen, inwieweit Pflanzen auf extreme Temperaturänderungen reagieren können wurde im Rahmen dieses Projektes ein Pilotversuch gestartet. Hierzu wurden Pflanzenproben ab dem 01.01.2004 unter kontrollierte Bedingungen gebracht. Die Lufttemperatur variierte in dem Versuch zwischen 25 °C am Tage und 15 °C in der Nacht. Unter diesen Verhältnissen konnte eindeutig das Voranschreiten der Pflanzenentwicklung beobachtet werden. Ende Januar hatten die Birken, Kastanien und Eichen ihre ersten Blätter (Abb. 26). Gleichzeitig konnte mit diesem Experiment gezeigt werden, dass die Winterruhe der Pflanzen tatsächlich bis zum 31.12.2003 überwunden war.



Abb. 26: Blattentfaltung und Blüte der Stieleiche unter kontrollierten Bedingungen, 25.01. Blattentfaltung, 27.01. Beginn der Blüte

In Tabelle 23 sind die extremen Verfrühungen im Phaseneintritt für einige Pflanzenarten zusammengestellt, wie sie auf der Grundlage der Szenarien berechnet wurden. Der absolut früheste Termin ergab sich für den Blühbeginn der Sal-Weide (28.01.). In diesem Jahr (Jahr 146 im Szenario III) war der Januar mit einer Temperaturanomalie von + 8.7 K extrem warm. Im Februar betrug die Abweichung immerhin noch + 2.7 K. Für die Blattentfaltung der Stachelbeere wurde in diesem Jahr ebenfalls der zeitigste Termin berechnet. Die Verfrühung des Phaseneintritts zum Mittel in der Beobachtungsperiode 1991-2000 beträgt 59 Tage und ist damit von ähnlicher Größenordnung wie bei der Sal-Weide (- 54 Tage). Beide Pflanzenarten zeigen damit eine ähnliche Reaktion auf den warmen Januar. Extrem milde Wintermonate

(Januar, Februar) könnten ebenfalls dazu führen, dass in Einzeljahren die Birken bereits Anfang Februar, die Kastanien Mitte Februar und die Eichen Anfang April ihre Blätter entfalten. Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass dies durchaus möglich ist. In historischen Aufzeichnungen findet man ähnliche Hinweise auf solche außergewöhnlichen Ereignisse. So berichtet beispielsweise Henning (1904, s. Hupfer und Chmielewski, 1990) über einen „Winter (1186) von ungewöhnlicher Milde, wohl der mildeste, der je in Mitteleuropa gewesen ist: im Januar blühen in der Schweiz die Bäume, im Februar findet man kleine, Haselnuss grosse Äpfel, im Mai sind die Feldfrüchte und das Getreide, Anfang August die Trauben reif“.

Tabelle 23: Mittlere Eintrittstermine (\bar{x}) phänologischer Phasen (P_i) aus den Beobachtungen (1961-2000, 1991-2000) und extreme Verfrühungen ausgewählter Phasen im Szenario (P_{\min}) unter Angabe der monatlichen Temperaturanomalien (ΔT_m in K) im vorausgehenden Zeitraum, s: Standardabweichung

P_i	\bar{x}	s	\bar{x}	P_{\min}	Jahr/Szenario	ΔT_{01}	ΔT_{02}	ΔT_{03}	ΔT_{04}
	1961-2000		1991-2000						
BB _{Sw}	30.03.	12.2	23.03.	28.01.	146/Sz III	+8.7	-	-	-
BF _{Br}	23.04.	7.5	20.04.	09.02.	200/Sz III	+8.1	+3.8	-	-
BF _{Ka}	27.04.	6.9	23.04.	20.02.	200/Sz III	+8.1	+3.8	-	-
BF _{Ei}	10.05.	6.5	05.05.	04.04.	48/Sz I	+5.1	+9.0	+1.3	-
BB _{Ka}	16.05.	7.1	12.05.	08.04.	200/Sz III	+8.1	+3.8	-1.1	-
MT _{Fi}	16.05.	6.2	11.05.	14.04.	91/Sz I	+8.0	+3.1	+1.4	-
BB _{Fl}	17.05.	7.7	12.05.	16.04.	105/Sz III	+1.5	+8.3	+0.3	+2.5
BB _{Ho}	09.06.	8.0	03.06.	15.05.	113/Sz I	-1.9	+7.2	+4.1	+4.1
BF _{St}	08.04.	10.0	03.04.	03.02.	146/Sz III	+8.7	+2.7	-	-
BB _{Sü}	27.04.	8.0	23.04.	05.03.	200/Sz III	+8.1	+3.8	-	-
BB _{Jo}	28.04.	7.9	25.04.	16.03.	138/Sz III	+2.1	+3.0	+1.7	-
BB _{Sa}	04.05.	7.2	01.05.	25.03.	60/Sz I	+8.0	+3.1	+4.2	-
BB _{Ap}	08.05.	7.6	03.05.	28.03.	60/Sz I	+8.0	+3.1	+4.2	-

3.2.2.4 Auswirkungen von Trockenheit auf die Pflanzenentwicklung

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Studie haben gezeigt, dass überdurchschnittliche Temperaturen zu einer Verfrühung der phänologischen Phasen im Frühjahr und Sommer führen. Ein milder Herbst (September, Oktober) kann im Gegensatz hierzu die physiologischen Prozesse der Pflanze noch verlängern und somit den Zeitpunkt der Blattverfärbung verzögern. Dies zeigte sich vor allem bei der Birke, Kastanie und Eiche. Voraussetzung hierfür sind ausreichend Niederschläge innerhalb der Vegetationszeit.

Extreme Trockenheit, die in unseren Breiten meist mit überdurchschnittlichen Temperaturen gepaart ist, kann den Einfluss der Lufttemperatur auf die Pflanzenentwicklung verstärken oder kompensieren. Fehlende Niederschläge im Frühjahr sind hierbei weniger problematisch, da

durch die winterlichen Niederschläge die Bodenwasservorräte meist noch nicht erschöpft sind. Die Pflanzen reagieren daher vor allem auf die höheren Temperaturen, d.h. mit einer Verfrühung in der Pflanzenentwicklung. Lang anhaltende Trockenheit im Sommer führt vor allem zu vorzeitiger Reife, beispielsweise beim Getreide und beim Obst. Die durch Trockenheit und Hitze eingeleitete Notreife ist meist mit deutlichen Ertragseinbußen verbunden.

Trockenperioden im Sommer und Herbst führen vor allem bei Bäumen zum frühzeitigen Laub- bzw. Nadelabwurf. Diese Reaktion ist vor allem auf extremen Trockenstress zurückzuführen. Hierdurch kann sich bei Trockenheit die Vegetationszeit einzelner Baumarten verkürzen.

Der Sommer 2003 war beispielhaft dafür, welche Auswirkungen Trockenheit und Hitze auf die Pflanzenentwicklung haben können. Eine quasi-stationäre Hochdruckwetterlage über Mitteleuropa führte in diesem Jahr zu Rekordtemperaturen, einer überdurchschnittlichen Sonnenscheindauer und erheblichen Niederschlagsdefiziten in weiten Teilen Europas. Die Sommertemperatur lag in Europa um 2 K, in Deutschland sogar um 3.4 K über dem langjährigen Durchschnitt. In Sachsen betrug die mittlere Temperaturanomale zwischen März und Juni + 2.1 K, das Niederschlagsdefizit belief sich im selben Zeitraum bereits auf - 176 mm (Küchler und Sommer, 2003).

Vielerorts waren deutliche Trockenschäden an Bäumen erkennbar. Die ausgesprochen intensive Blüte und Fruchtbildung bei fast allen Gehölzen im Jahr 2003 (Vollmastjahr) stellte einen zusätzlichen Kraftaufwand für die Bäume dar, so dass zur Bewältigung der extremen Witterung kaum Reserven vorhanden waren. Dementsprechend offensichtlich waren die Schäden (Abb. 27).

Abb. 27:

Trockenschäden an Bäumen in Sachsen im August 2003

Foto: W. Küchler



Auswertungen des Hitzejahres 2003 in der Schweiz belegen sehr deutliche Verfrühungen der phänologischen Sommerphasen, die im Mittel zwischen 16 (Vollblüte Schwarzer Holunder) und 20 Tagen (Vollblüte Winterlinde) liegen (Defila 2004). Für den Herbst 2003 wurde ebenfalls eine vorzeitige Blattverfärbung registriert, die auf die außerordentliche Trockenheit zurückzuführen war.

An den Waldklimastationen in Bayern kam es auch zu einem vorzeitigen Blatt- und Fruchtfall. Besonders betroffen waren die Buchen-, Eichen-, und Kiefernbestände (Raspe et al. 2004). Die Blattverfärbung setzte ca. 1-3 Wochen früher als normal ein. Bei Fichten war 2003

ein starker Borkenkäferbefall zu verzeichnen. Die trocken-warme Witterung führt zu einer Massenvermehrung der Schädlinge. In einigen Regionen wurden bis zu vier Generationen von Borkenkäfern beobachtet.

In Sachsen wurden adäquate Reaktionen der Bäume auf die Trockenheit festgestellt. Die Schäden an den durch die Trockenheit geschwächten Bäumen sind selbst noch im Folgejahr erkennbar. Vor allem die Eichen, bislang als ein Symbol für Stärke bekannt, zeichnen sich im Frühjahr 2004 durch ein sehr dünnes Blattkleid aus (Abb. 28). Vermutlich haben die Bäume aufgrund der Trockenheit im Jahr 2003 zu wenig Nährstoffe aufgenommen, so dass Ihnen jetzt die Kraft zum Austreiben fehlt. Die wenigen, selbst erst im Mai ausgetriebenen Blätter sind deutlich von Schädlingen (u.a. Frostspanner, Eichenwickler) befallen.



Abb. 28: Eichen in Sachsen Ende Mai 2004, links: Fraßschäden an Blättern, rechts: äußerst spärliche Belaubung der Eichen

Stärkerer Schädlingsbefall ist auch an Buchen zu erkennen, die 2003 gleichfalls stark unter der Trockenheit gelitten haben (Abb. 29).

Abb. 29:

Unterseite von Buchenblättern im
Frühjahr 2004



Einzelne trocken-heiße Sommer werden gewiss nicht zu irreversiblen Schäden an der Vegetation führen. Die Klimaszenarien für Sachsen deuten jedoch auf eine Zunahme solcher Ereignisse hin. Für den letzten Zeitabschnitt (2041-2050) ist nochmals ein deutlicher Anstieg der Sommertemperaturen gegenüber dem vorausgehenden Zeitraum, bei gleichzeitiger Abnahme

der mittleren sommerlichen Niederschlagshöhe berechnet worden. Trockenheit und Hitze werden daher zunehmend das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen in Sachsen beeinträchtigen.

Auf Grundlage der bisherigen Erkenntnisse sind folgende Auswirkungen vorstellbar:

- Trockenheit kann zu einer frühzeitigen Blattverfärbung und einem vorzeitigen Blatt- bzw. Nadelverlust der Bäume führen.
- Der frühzeitige Vegetationsbeginn der Gehölze wird in trocken-heißen Jahren durch eine zeitige Blattverfärbung bzw. durch Blattfall kompensiert.
- Die Biomasseproduktion wird in solchen Extremjahren gering ausfallen.
- Trocken-heiße Jahre bieten Schädlingen optimale Bedingungen zur Entwicklung und Reproduktion, wodurch der Schädlingsbefall und die hierdurch verursachten Schäden zunehmen könnten. Die durch Trockenheit gestressten Bäume können dem Befallsdruck schlechter widerstehen.
- Zu den von Trockenheit gefährdeten Baumarten in Sachsen zählen nach bisherigen Beobachtungen vor allem die Buchen, Eichen und Fichten.
- Eine Abfolge von mehreren Trockenjahren, vergleichbar mit dem Jahr 2003, würde zu schweren Schäden an der natürlichen Vegetation führen, die gewiss irreversibel wären.

3.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Über die letzten 40 Jahre (1961-2000) haben sich in Sachsen nachweisbare klimatische Veränderungen vollzogen. Diese äußern sich in einem Anstieg der Lufttemperatur, der vor allem im Winter und Frühjahr ausgeprägt ist, sowie in einer zunehmenden Vorsommertrockenheit von April bis Juni. Verbunden mit dem Anstieg der winterlichen Lufttemperatur ist die Abnahme der jährlichen Anzahl von Frosttagen und dementsprechend die Verlängerung der frostfreien Zeit, um immerhin 17 Tage. Die thermische Vegetationszeit hat sich, hauptsächlich infolge eines früheren Vegetationsbeginns, um 9 Tage verlängert.

Phänologische Beobachtungen erlauben, die Reaktion von Pflanzen auf Klimaänderungen zu beschreiben. Die im Rahmen dieser Studie gewonnenen Ergebnisse belegen, dass die Pflanzen in Sachsen bereits auf den Klimawandel angesprochen haben. Sowohl die natürliche Vegetation als auch Obstgehölze und landwirtschaftliche Nutzpflanzen zeigen Verfrühungen im Eintritt der phänologischen Phasen, die außerordentlich gut mit den Veränderungen der Lufttemperatur korrespondieren. Sehr anschaulich ist dies in den 1990er Jahren erkennbar, die überdurchschnittlich warm waren. Dementsprechend zeitiger wurden die phänologischen Phasen der Pflanzen beobachtet.

Je früher eine Phasen im Jahresverlauf zu beobachten ist, desto stärker ist ihr Trend zur Verfrühung, wie sich beispielsweise an der Blattentfaltung der Stachelbeere (1961-2000: -12 Tage) erkennen lässt. Ursache hierfür sind die deutlich milderen Wintertemperaturen. Mit dem allmählichen Anstieg der Lufttemperatur im Jahresverlauf werden die beobachteten Verfrü-

hungen im Phaseneintritt kleiner. Milde Witterung im Herbst, z.B. im September, kann die Blattverfärbung der Birke, Kastanie und Eiche verzögern. Auf extreme Witterungsverläufe reagieren die Pflanzen deutlich. Dies betrifft sowohl starke Temperaturanomalien als auch hohe Defizite im Niederschlag.

Entsprechend der für Sachsen vorliegenden Klimaszenarien, wird der Klimawandel bis 2050 unter Variationen weiter voranschreiten. Dies bedeutet, dass sich die Lufttemperatur im Jahresmittel um 1.6 K erhöhen wird. An diesem Anstieg sind, wie bereits schon heute beobachtet, die Winter- (+ 3.2 K), aber auch zunehmend die Sommermonate (+ 2.0 K) beteiligt. Im Frühjahr hingegen ergeben sich keine Veränderungen gegenüber den heutigen Bedingungen. Die Niederschlagshöhe kann sich in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts um 25 mm im Jahresdurchschnitt verringern. Der Niederschlagszunahme in den drei Wintermonaten, steht eine Abnahme der monatlichen Niederschläge in der übrigen Zeit gegenüber. In der Hauptvegetationszeit von April bis Oktober wird sich die Lufttemperatur, bei gleichzeitiger Abnahme der Niederschläge, um 1.3 K erhöhen. Dies führt zwangsläufig zu einer Verringerung der Bodenvasservorräte und somit zu allgemein schlechteren Bedingungen für das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen. In Sachsen wird sich dies zuerst auf den leichteren Böden im Norden des Landes bemerkbar machen.

Der prognostizierte Anstieg der Lufttemperatur in Sachsen wird zu einer Abnahme der jährlichen Anzahl von Frosttagen und damit einer weiteren Verlängerung der frostfreien Zeit (+ 13 Tage) führen. Hierbei ist von außerordentlicher Bedeutung, dass die Abnahme in der Frosthäufigkeit ausschließlich auf die Reduktion der Frühfröste zurückzuführen ist, da im Frühjahr keine wesentlichen Änderungen der Lufttemperatur prognostiziert wurden. Dies hat, wie nachfolgend noch diskutiert wird, außerordentliche Bedeutung für die Spätfrostgefährdung der Pflanzen. Die thermische Vegetationszeit wird sich gegenüber heute nochmals deutlich um einen Monat verlängern. Hieran sind zu gleichen Teilen der Vegetationsbeginn und das Vegetationsende beteiligt. Die längere Vegetationszeit wird vor allem in den tieferen Lagen bis ca. 450 m zu beobachten sein. In den Höhenlagen sind die Veränderungen hingegen nur gering.

Der Anstieg der Lufttemperatur und die klimatischen Veränderungen innerhalb der Vegetationszeit können verschiedenste Auswirkungen auf die Pflanzenentwicklung in Sachsen haben. Auf die zunehmend milderen Winter werden die Pflanzen mit einem zeitigeren Austrieb reagieren. Große Veränderungen in den Eintrittsterminen, sind bei den frühen Phänophasen zu erwarten. So könnte sich bis 2050 der Blühbeginn der Sal-Weide im Mittel um 27 Tage, die Blättentfaltung der Stachelbeere um 24 Tage verfrühen. Der im Frühjahr vorhandene Vorsprung in der Entwicklung wird durch die ansteigenden Sommertemperaturen teilweise wieder kompensiert. Für Obstgehölze wie die Kirsche und den Apfel werden sich damit kaum nennenswerte Veränderungen in der Länge der Reifephase ergeben. Der gesamte Entwicklungszeitraum wird lediglich nach vorn verschoben.

In Extremjahren, in denen Abweichungen der Lufttemperatur von mehr als 8 K im Januar und Februar möglich sind, wird es zu außerordentlich zeitigen Terminen der Blüte und Blättentfaltung kommen. Nach dem frühen Austrieb ist das Frostrisiko sehr hoch, so dass in solchen Jahren mit erheblichen Frostschäden an den Bäumen und Sträuchern zu rechnen ist.

Selbst in durchschnittlichen Jahren ist von einem höheren Spätfrostrisiko auszugehen. Mit der ersten markanten Erwärmung im Zeitraum 2021-2030 wird sich beispielsweise die Häufigkeit der leichten und mittleren Fröste während der Obstblüte stark erhöhen. Während der Kirschblüte nimmt sogar der Anteil der strengen Fröste unter -4 °C noch zu. Damit ist diese Obstart sehr stark von Ertragsausfällen bedroht. Beim Apfel, der einen großen Stellenwert im sächsischen Obstanbau einnimmt, ist ebenfalls mit einer Verdoppelung der mittelschweren Fröste (-2 bis -4 °C) während der Blüte zu rechnen. Obwohl das Frostrisiko für alle Fruchtarten im weiteren Verlauf der Erwärmung abnimmt, liegt es in vielen Fällen im Zeitraum 2041-2050 immer noch höher als heute.

Ein weiterer wichtiger Aspekt im Verlauf des Klimawandels ist die Zunahme der Trockenheit in Sachsen, die sich für alle Monate von März bis November im letzten Jahrzehnt des Szenarios abzeichnet. Verschärfend kommt hinzu, dass in den Sommermonaten die Lufttemperatur, um immerhin 2 K im Durchschnitt ansteigen wird. Damit erhöht sich für die Pflanzen im Zeitraum 2041-2050 die Gefahr von Trockenstress. Die abnehmenden Niederschläge werden sowohl für die Getreidearten als auch für die Hackfrüchte zu schlechteren Wachstums- und Entwicklungsbedingungen führen. Vor allem auf den leichteren Böden wird das Ertragsrisiko zunehmen. Mit der Intensivierung und Ausweitung der Bewässerung, bodenschonenden Maßnahmen und einer standortangepassten Bewirtschaftung kann das Ertragsrisiko minimiert werden. Die längere Vegetationszeit bietet der Landwirtschaft generell einen größeren Spielraum was Sortenwahl, Fruchtfolge und Zwischenfruchtanbau betrifft. Heute regional etablierte Kulturarten und Sorten könnten durch besser angepasste Fruchtarten ersetzt werden. Das wärmere Klima in Sachsen kann beispielsweise den Anbau von Körnermais und Wein verbessern.

Für die natürliche Vegetation gestalten sich regulative Eingriffe des Menschen wesentlich schwieriger, wenn man die lange Generationsdauer von Wäldern berücksichtigt. Trockenheit kann die individuelle Vegetationszeit von Bäumen durch vorzeitige Blattverfärbung bzw. frühen Blattfall verringern. Die Nährstoffaufnahme der Pflanzen und der Biomassezuwachs sind in trockenen Jahren sehr begrenzt, so dass sich nach extremer Trockenheit noch im Folgejahr Wirkungen an den Pflanzen nachweisen lassen, wie beispielsweise ein spärlicher Blattaustrieb im nächsten Frühjahr. Die meisten Insektenarten reagieren auf Trockenheit und Wärme mit gesteigerter Aktivität, höherer Reproduktivität und schnellerer Entwicklung. Dies stellt eine zusätzliche Gefahr für die Wälder dar. Der Forstwirtschaft ist daher zu empfehlen, beim Umbau der Wälder schon heute die langfristige Klimaentwicklung mit zu berücksichtigen. Die betrifft sowohl die standortgerechte Baumartenwahl als auch den Umbau von Reinbeständen zu Mischwaldbeständen. Einzelne trocken-heiße Jahre können Wälder kompensieren. Eine Häufung oder sogar Aufeinanderfolge mehrerer Jahre mit ausgeprägter Niederschlagsarmut wäre für die in unseren heutigen Wäldern vertretenen Baumarten nur schwer zu verkraften.

- Ahas, R.; Aasa, A.; Menzel, A.; Fedotova, V.G.; Scheifinger, H. (2002): Changes in European spring phenology. *Int J Climatology* 22, 1727-1738.
- Beaubien, E.G.; Freeland H.J. (2000): Spring phenology trends in Alberta, Canada: links to ocean temperature. *Int. J. Biometeorology* 44: 53-59.
- Bernhofer, Ch.; Goldberg, V. (2001): CLISAX I – Statistische Untersuchungen regionaler Klimatrends in Sachsen. Tharandt, Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, AZ 3-8802.3521/48, 123 S.
- Bernhofer, Ch.; Goldberg, V.; Franke, J. (2002): CLISAX II – Assimilation von standardisierten und abgeleiteten Klimadaten für die Region Sachsen und Ausbau der Sächsischen Klimadatenbank. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie AZ: 13-8802.3521/50, 70 S.
- Braslavská O.; Kamensky L. (1999): Leafing of forest trees and shrubs in the period 1986–1999. *Atmosféra Stor Organiz Ekosyst* 21:67–71 (in Slovak).
- Brown, J.A. (1976): Shortening of growing season in the U.S. corn belt. *Nature* 260: 420-421.
- Chen, X.; Zhang, F. (2001): Spring phenological fluctuations and its response to climate change in Beijing during the last 50 years. *Agric. Meteorol.* 21: 1-5 (in Chinese).
- Chmielewski, F.-M. (2003a): Phenology and Agriculture (Chapter 7). In: Schwartz, M.D. (Ed.): *Phenology: An Integrative Environmental Science*. Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 505-522.
- Chmielewski, F.-M. (2003b): Rezente Veränderungen der Lufttemperatur und der Niederschlagshöhe in Berlin-Dahlem, 1931-2000. In: Chmielewski, F.-M.; Foken, Th. (Hrsg.): *Beiträge zur Klima- und Meeresforschung. Aus Anlass des 70. Geburtstages von P. Hupfer*, Eigenverlag Chmielewski & Foken, Berlin/Bayreuth, ISBN 3-00-011043-7: 79-90.
- Chmielewski, F.-M.; Müller, A.; Bruns, E. (2004): Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000. *Agricultural and Forest Meteorology* 121 (1-2): 69-78.
- Chmielewski, F.-M.; Rötzer, T. (2001): Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 108: 101-112.
- Chmielewski, F.-M.; Rötzer, T. (2002): Annual and spatial variability of the beginning of growing season in Europe in relation to air temperature changes. *Clim. Res.* 19 (1): 257-264.
- Chuine I.; Cour P.; Rousseau D.D. (1999): Selecting models to predict the timing of flowering of temperate trees: implication for tree phenology modelling. *Plant, Cell & Environment* 22: 1-13.
- Critchfield, H.J. (1966): *General Climatology*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 141-284.
- Defila, (2004): Der Sommer und Herbst 2003 aus phänologischer Sicht. *Schweizer Zeitschrift für Forstwesen* 155, 5: 142-145.
- Defila, C.; Clot, B. (2001): Phytophenological trends in Switzerland. *Int. J. Biometeorology* 45: 203-207.

- DWD (1991): Anleitung für die phänologischen Beobachter des Deutschen Wetterdienstes. (BAPH). Vorschriften und Betriebsunterlagen Nr. 17. Offenbach (Main), 155 S.
- Enke, W. (2003): Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Anwendung eines Verfahrens zur wetterlagenkonsistenten Projektion von Zeitreihen und deren Extreme mit globaler Klimasimulation“. Meteo-Research Stahnsdorf, 67 S.
- Fitter, A.H.; Fitter, R.S.R.; Harris, I.T.B.; Williamson, M.H. (1995): Relationships between first flowering date and temperature in the flora of a locality in central England. *Functional Ecology* 9: 55-60.
- Franke, W. (1997): Nutzpflanzenkunde. Nutzbare Gewächse der gemäßigten Breiten, Subtropen und Tropen. 6. Aufl. Stuttgart, 509 S.
- Goodrich, S. (1984): Checklist of vascular plants of the Canyon and Church Mountain (Utah, USA). *Great Basin Nat.* 44: 277-295.
- Häkkinen, R.; Linkosalo, T.; Hari, P. (1998): Effects of dormancy and environmental factors on timing of bud burst in *Betula pendula*. *Tree Physiology* 18: 707-712.
- Hänninen, H. (1990): Modelling bud dormancy release in trees from cool and temperate regions. *Act. For. Fenn.* 213, 47p.
- Hänninen, H. (1995): Effects on climate change on trees from cool and temperate regions: an ecophysiological approach to modelling the bud burst phenology. *Can. J. Bot.* 73 (2): 183-199.
- Hupfer, P.; Chmielewski, F.-M. (1990) (Hrsg.): Das Klima von Berlin. Akademie-Verlag Berlin, 288 S.
- Jaagus J.; Ahas R. (2000): Space-time variations of climatic seasons and their correlation with the phenological development of nature in Estonia. *Climate Research* 15(3): 207–219.
- Kramer, K. (1996): Phenology and growth of European trees in relation to climate change. PhD Thesis, Agricultural University, Wageningen, 210 p.
- Kramer, K.; Leinonen, I.; Loustau, D. (2000): The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forest ecosystems: an overview. *Int. J. Biometeorology* 44: 67-75.
- Küchler, W.; Sommer, W. (2003): Zusammenfassender Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Anwendung eines Verfahrens zur wetterlagenkonsistenten Projektion von Zeitreihen und deren Extreme mit globaler Klimasimulation“. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 24 S.
- Leinonen, I. (1996a): Dependence of dormancy release on temperature in different origins of *Pinus sylvestris* and *Betula pendula* seedlings. *Scand. J. For. Res.* 11: 122-128.
- Leinonen, I. (1996b): A simulation model for the annual frost hardiness and freeze damage of Scots pine. *Ann. Bot.* 78: 687-693.
- Menzel, A. (2000): Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *Int. J. Biometeorology* 44: 76-81.
- Menzel A., Estrella N., Fabian P. (2001): Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. *Global Change Biology* 7: 657-666
- Müller, A. (2002): Zeitliche und räumliche Variabilität der Phänologie landwirtschaftlicher und obstbaulicher Kulturen in Deutschland. Diplomarbeit HU- Berlin, 87 S., unveröffentlicht

- Pazucha K. (2004): Agrarklimatische Bedingungen für den Anbau ausgewählter Kulturpflanzen in Sachsen unter heutigen und geänderten Klimaverhältnissen. Diplomarbeit HU-Berlin, 117 S., unveröffentlicht
- Raspe S.; Schulz, Ch.; Kroll, F. (2004): Wenn schon im Sommer tonnenweise Blätter fallen. Baumentwicklung und Streufall. LWF aktuell, 43: 11-13
- Rötzer, T.; Chmielewski, F.-M. (2001): Phenological maps of Europe. *Clim. Res.* 18 (3): 249-257.
- Rötzer T.; Wittenzeller M.; Häckel H.; Nekovar J. (2000): Phenology in central Europe; differences and trends of spring-phenophases in urban and rural areas. *Int. J. Biometeorology* 44: 60–67.
- Sarvas, R. (1972): Investigations on the annual cycle of development of forest trees. Active period. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 76 (3): 1-110.
- Sarvas, R. (1974): Investigations on the annual cycle of development of forest trees II. Autumn dormancy and winter dormancy. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 84 (1): 1-101.
- Scheifinger, H.; Menzel, A.; Koch, E.; Peter, C.; Ahas R. (2002): Atmospheric Mechanisms Governing the Spatial and Temporal Variability of Phenological Phases in Central Europe. *Int. J. Climatology* 22: 1739-1755.
- Schönwiese C.-D.; Walter, A.; Rapp, J.; Meyhöfer, S.; Denhard, M. (1998): Statistische Analyse der Klimavariabilität und anthropogene Klimasignale in globaler und regionaler Betrachtung. *Berichte des Instituts für Meteorologie und Geophysik der Univ. Frankfurt/M.* Nr. 102, Eigenverlag Frankfurt/M. 156 S.
- Schumacher, R. (1989): Die Fruchtbarkeit der Obstgehölze: Ertragsregulierung und Qualitätsverbesserung. 3. Aufl. Stuttgart, 242 S.
- Sparks, T.H.; Carey, P.D.; Combes, J. (1997): First leafing dates of trees in Surrey between 1947 and 1996. *The London Naturalist* 76: 15-20.
- Sparks, T.H.; Jeffree, E.P.; Jeffree, C.E. (2000): An examination of relationships between flowering times and temperature at the national scale using long-term phenological record from the UK. *Int. J. Biometeorology* 44: 82-87.
- Walkovszky, A. (1998): Changes in phenology of the locust tree (*Robinia pseudoacacia* L.) in Hungary. *Int. J. Biometeorology* 41: 155-160.

5 Anhangsverzeichnis

Pflanzenart	Phänologische Phase	Abkürzung
Natürliche Vegetation		
Hänge-Birke	Beginn der Blattentfaltung* Blattverfärbung*	BF _{Br} BV _{Br}
Stiel-Eiche	Beginn der Blattentfaltung* Erste reife Früchte Blattverfärbung	BF _{Ei} EF _{Ei} BV _{Ei}
Fichte	Maitrieb*	MT _{Fi}
Flieder	Beginn der Blüte*	BB _{Fl}
Schwarzer Holunder	Beginn der Blüte* Erste reife Früchte*	BB _{Ho} EF _{Ho}
Roskastanie	Beginn der Blattentfaltung* Beginn der Blüte Erste reife Früchte Blattverfärbung	BF _{Ka} BB _{Ka} EF _{Ka} BV _{Ka}
Wiesen-Knautgras	Beginn der Vollblüte*	VB _{Kn}
Sommer-Linde	Beginn der Blüte	BB _{Li}
Robinie	Beginn der Blüte	BB _{Ro}
Sal-Weide	Beginn der Blüte*	BB _{Sw}
Obstgehölze		
Apfel	Beginn der Blüte* Beginn der Pflückreife (früh)*	BB _{Ap} PR _{Ap}
Rote Johannesbeere	Beginn der Blüte* Beginn der Pflückreife*	BB _{Jo} PR _{Jo}
Sauerkirsche	Beginn der Blüte* Beginn der Pflückreife	BB _{Sa} PR _{Sa}
Stachelbeere	Beginn der Blattentfaltung* Beginn der Blüte* Beginn der Pflückreife*	BF _{St} BB _{St} PR _{St}
Süßkirsche	Beginn der Blüte* Beginn der Pflückreife	BB _{Sü} PR _{Sü}
Landwirtschaftliche Nutzpflanzen		
Hafer	Beginn der Bestellung Beginn des Auflaufens* Beginn des Schossens Beginn des Rispschiebens Beginn der Ernte	BE _{Ha} AU _{Ha} SS _{Ha} RS _{Ha} ER _{Ha}
Winterroggen	Beginn der Bestellung Beginn des Auflaufens Beginn des Schossens Beginn des Ährenschiebens Beginn der Vollblüte Beginn der Ernte	BE _{Wr} AU _{Wr} SS _{Wr} AE _{Wr} VB _{Wr} ER _{Wr}

* Karten für Kontrolllauf und Szenarien sind vorhanden

Betula pendula (HÄNGEBIRKE)

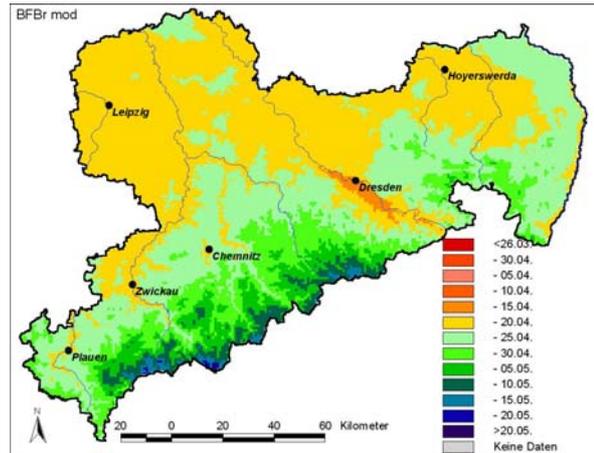
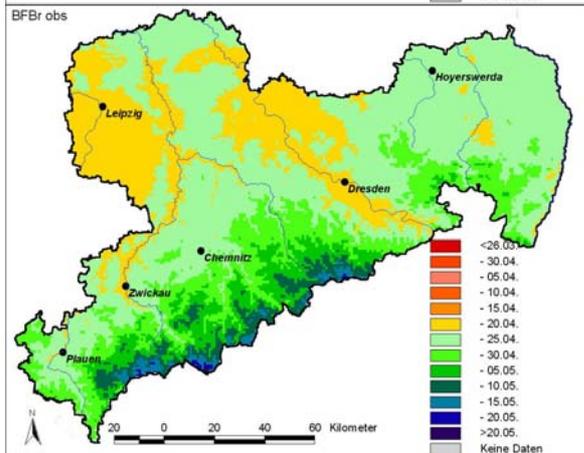
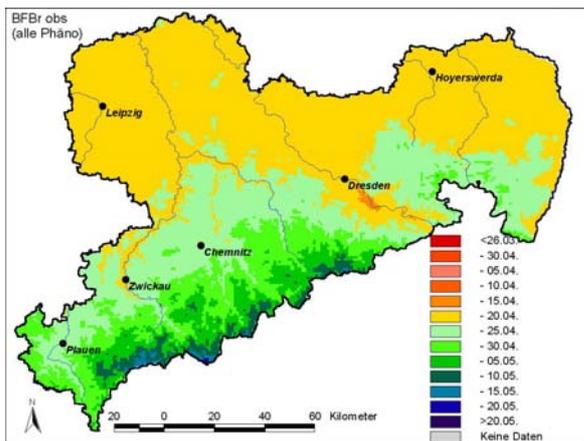
BF

BEOBACHTUNG

Hänge-Birke	Beginn Blattentfaltung
Abkürzung	BF_{Br}
x 1961-1990 (s)	24.04. ^a (8.1)
x 1991-2000 (s)	20.04. ^a (4.2)
x 1961-2000 (s)	23.04. (7.5)
Max (Jahr)	05.05. (1980)
Min (Jahr)	05.04. (1990)
Trend /10a (1961-2000)	-1.5
Trend /40a (1961-2000)	-6.0
Signifikanzniveau	-
Anzahl der Stationen	89
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz (p≤0.05); t-Test)

Hänge-Birke	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
BF	23.04.	$BF_{Br} = -232.314 + 6.6227 \cdot \varphi - 0.352452 \cdot \lambda + 0.0383608 \cdot h$	2.5 d



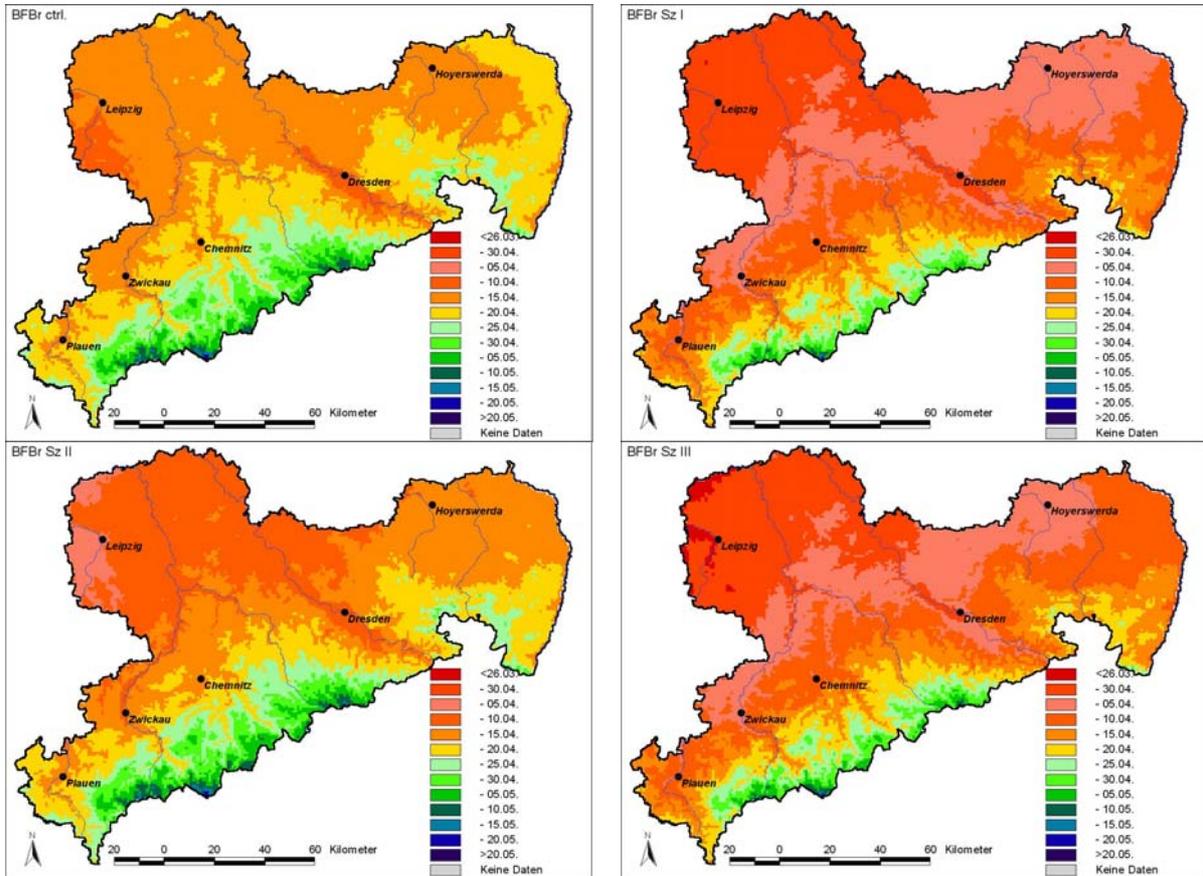
Karte 1: 89 Phänostationen

Karte 2: 6 Klimastationen

Karte 3: Phänomodell BF_{Br}

Phänomodell BF _{Br} Starttag: 01.01.	T _B = 4.0 °C, T _S = 110.6 K; MAE = 4.0 d, RMSE = 6.0 d
--	---

SZENARIO



ΔBF_{Br}

Kontrolllauf 107 (17.04.)	Szenario I 97 (-10 d)
Szenario II 104 (-3 d)	Szenario III 98 (-9 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Betula pendula (HÄNGEBIRKE)

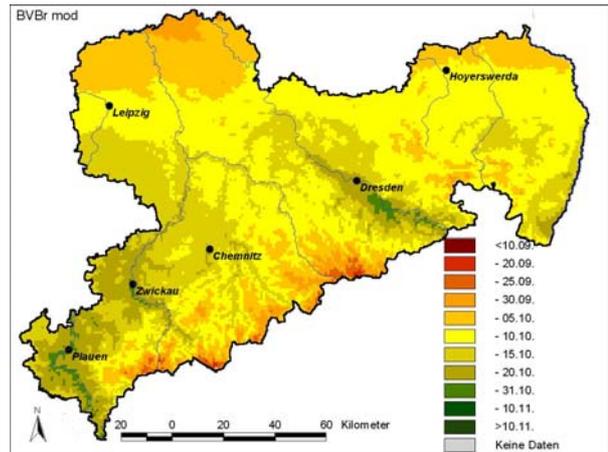
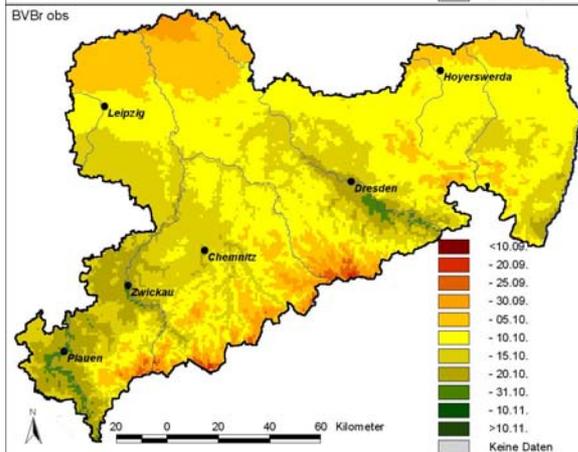
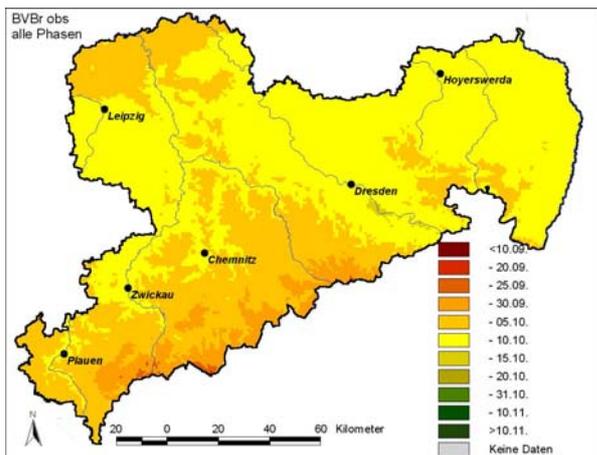
BV

BEOBACHTUNG

Hänge-Birke	Beginn der Blattverfärbung
Abkürzung	BV _{Br}
x 1961-1990 (s)	05.10. ^a (2.9)
x 1991-2000 (s)	06.10. ^a (2.3)
x 1961-2000 (s)	05.10. (2.9)
Max (Jahr)	12.10. (1975)
Min (Jahr)	29.09. (1986)
Trend /10a (1961-2000)	0.2
Trend /40a (1961-2000)	0.8
Signifikanzniveau	-
Anzahl der Stationen	66
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz (p≤0.05); t-Test)

Hänge-Birke	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
BV	05.10.	$BV_{Br} = 681.329 - 8.07263 \cdot \varphi + 1.20368 \cdot \lambda - 0.0234415 \cdot h$	4.6



Karte 1: 66 Phänostationen

Karte 2: 4 Klimastationen

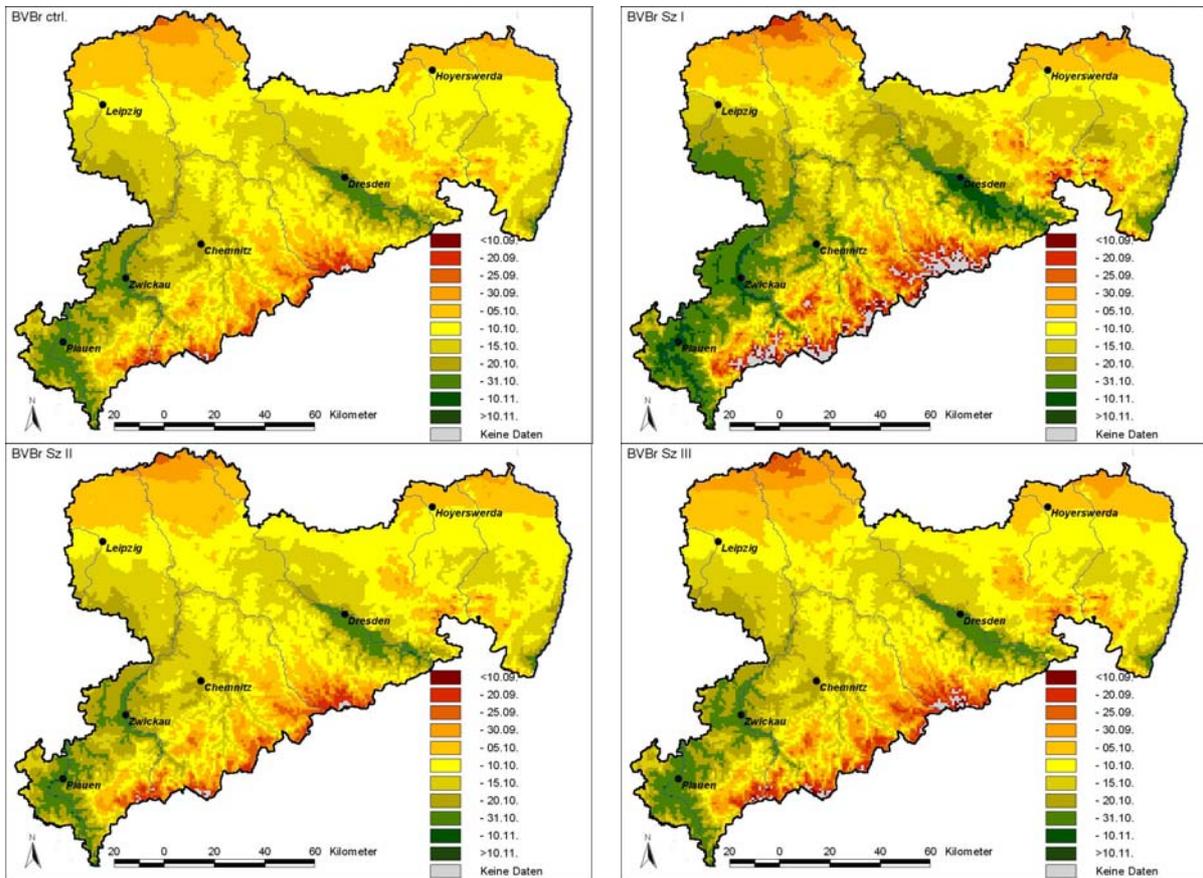
Karte 3: Phänomodell BV_{Br}

Phänomodell BV_{Br}

$$BV = 279.329 + 0.026 \cdot BF - 1.084 \cdot T_{06} + 0.899 \cdot T_{09};$$

$$MAE = 1.9 \text{ d, RMSE} = 2.3 \text{ d}$$

SZENARIO



ΔBV_{Br}

Kontrolllauf	Szenario I
282	283
(09.10.)	(+1 d)
Szenario II	Szenario III
282	281
(0 d)	(-1 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Quercus robur (STIEL-EICHE)

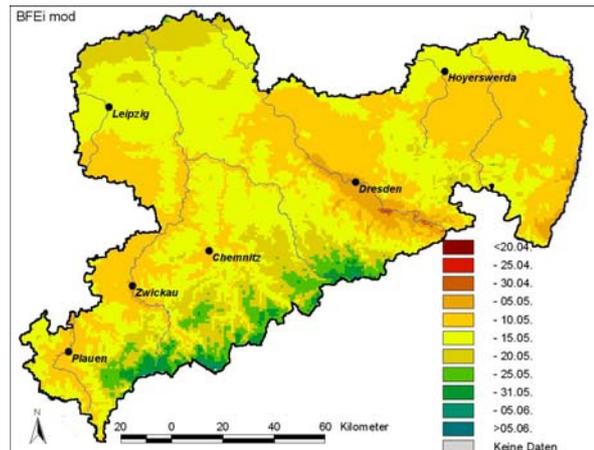
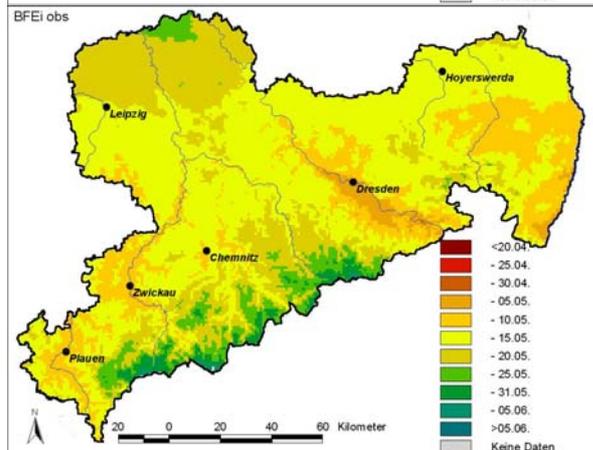
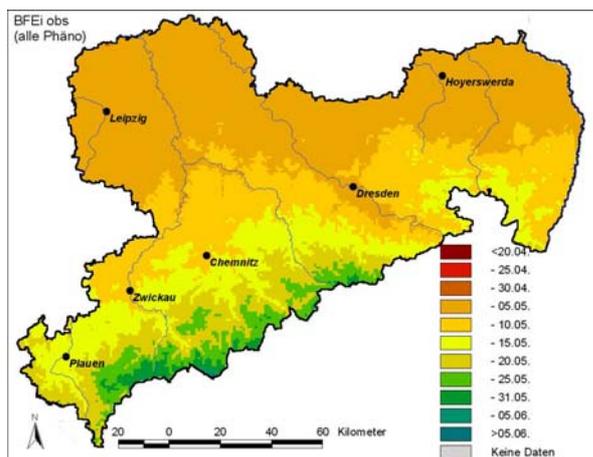
BF

BEOBACHTUNG

Stiel-Eiche	Beginn Blattentfaltung
Abkürzung	BF_{Ei}
x 1961-1990 (s)	12.05. ^a (5.8)
x 1991-2000 (s)	05.05. ^b (6.0)
x 1961-2000 (s)	10.05. (6.5)
Max (Jahr)	23.05. (1980)
Min (Jahr)	26.04. (1961)
Trend /10a (1961-2000)	-1.9
Trend /40a (1961-2000)	-7.6
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.05$
Anzahl der Stationen	39
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Stiel-Eiche	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
BF	10.05.	$BF_{Ei} = 158.269 - 0.877245 \cdot \varphi + 0.382117 \cdot \lambda + 0.0345963 \cdot h$	2.1 d



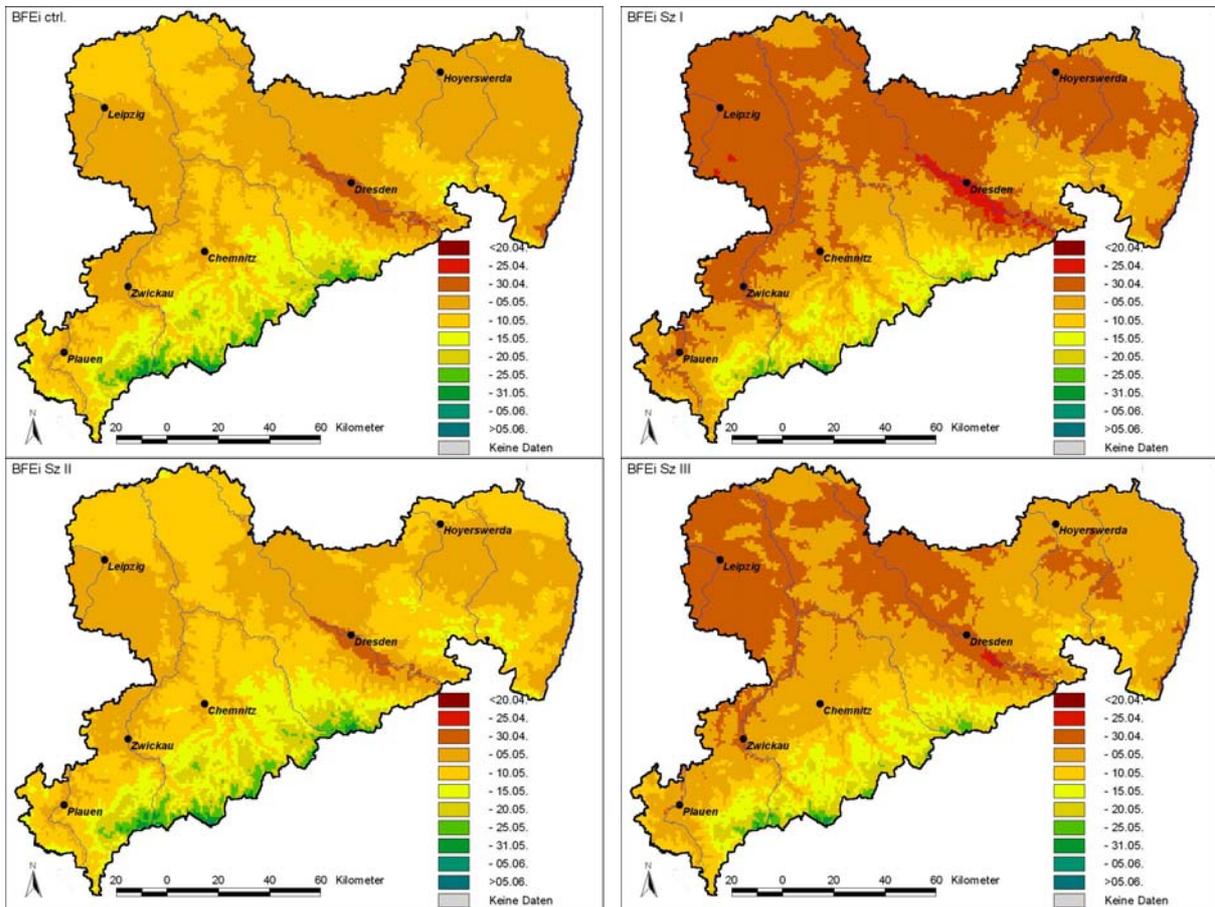
Karte 1: 39 Phänostationen

Karte 2: 4 Klimastationen

Karte 3: Phänomodell BF_{Ei}

Phänomodell BF_{Ei} Starttag: 01.01.	$T_B = 5.3 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_S = 144.9 \text{ K}$; MAE = 3.3 d, RMSE = 4.0 d
---	---

SZENARIO



ΔBF_{Ei}

Kontrolllauf 127 (07.05.)	Szenario I 122 (-5 d)
Szenario II 128 (+1 d)	Szenario III 123 (-4 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Quercus robur (STIEL-EICHE)

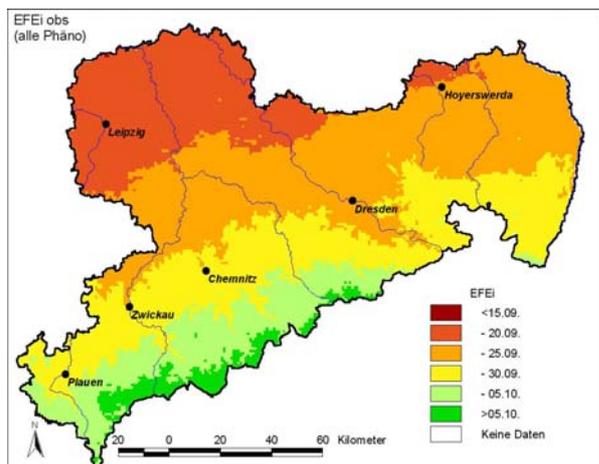
EF

BEOBACHTUNG

Stiel-Eiche	Erste Früchte
Abkürzung	EF _{Ei}
x 1961-1990 (s)	27.09. ^a (3.7)
x 1991-2000 (s)	22.09. ^b (6.9)
x 1961-2000 (s)	25.09. (5.1)
Max (Jahr)	05.10. (1991)
Min (Jahr)	10.09. (2000)
Trend /10a (1961-2000)	-1.2
Trend /40a (1961-2000)	-4.8
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.10$
Anzahl der Stationen	31
Höchste Station	550 m – Zschorlau (Westerzgebirgskreis)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Stiel-Eiche	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
EF	25.09.	$EF_{Ei} = 566.722 - 6.37295 \cdot \varphi + 1.5865 \cdot \lambda + 0.0191725 \cdot h$	3.2 d



Phänomodell EF _{Ei}	$EF = 265.568 + 0.313 \cdot BF - 1.302 \cdot T_{05} - 1.568 \cdot T_{06};$ MAE = 2.1d, RMSE = 2.6 d
------------------------------	--

ΔEF_{Ei}

Kontrolllauf	Szenario I
263 (20.09.)	260 (-3 d)
Szenario II	Szenario III
263 (0 d)	260 (-3 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Quercus robur (STIEL-EICHE)

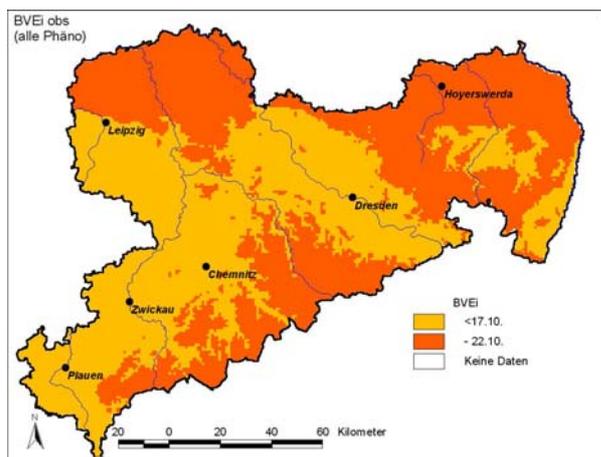
BV

BEOBACHTUNG

Stiel-Eiche	Beginn Blattverfärbung
Abkürzung	BV _{Ei}
x 1961-1990 (s)	17.10. ^a (3.9)
x 1991-2000 (s)	17.10. ^a (4.2)
x 1961-2000 (s)	17.10. (3.9)
Max (Jahr)	24.10. (1991)
Min (Jahr)	09.10. (1964)
Trend /10a (1961-2000)	0.6
Trend /40a (1961-2000)	2.4
Signifikanzniveau	-
Anzahl der Stationen	65
Höchste Station	620 m – Dörnthal (Mittlerer Erzgebirgskreis)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Stiel-Eiche	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
BV	17.10	$BV_{Ei} = 8.98666 + 5.44004 \cdot \varphi + 0.0460886 \cdot \lambda + 0.00902313 \cdot h$	4.4 d



Phänomodell BV _{Ei}	$BV = 160.227 + 0.412826 \cdot EF + 1.44854 \cdot T_{09}$ MAE = 1.8 d, RMSE = 2.6 d
------------------------------	--

ΔBV_{Ei}

Kontrolllauf	Szenario I
288 (15.10.)	288 (0 d)
Szenario II	Szenario III
288 (0 d)	288 (0 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Picea abies (Fichte)

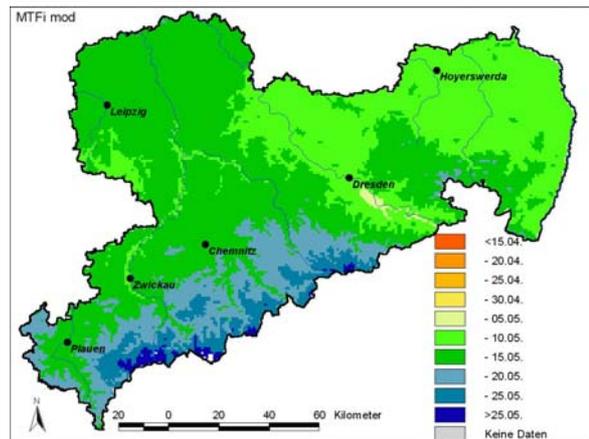
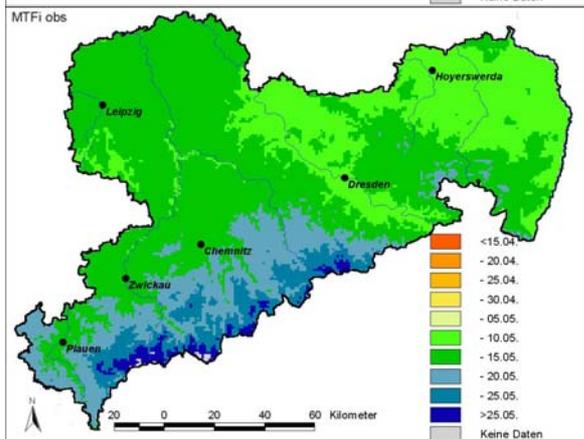
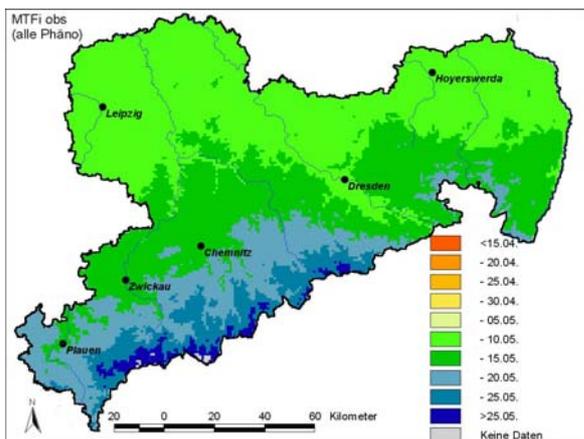
MT

BEOBACHTUNG

Fichte	Beginn Maitrieb
Abkürzung	MT _{Fi}
x 1961-1990 (s)	17.05. ^a (5.4)
x 1991-2000 (s)	11.05. ^b (5.7)
x 1961-2000 (s)	16.05. (6.2)
Max (Jahr)	26.05. (1970)
Min (Jahr)	01.05. (1961)
Trend /10a (1961-2000)	-1.9
Trend /40a (1961-2000)	-7.6
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.05$
Anzahl der Stationen	49
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz (p<0.05); t-Test)

Fichte	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
MT	16.05.	$MT_{Fi} = 22.6731 + 1.97425 \cdot \varphi + 0.0759372 \cdot \lambda + 0.0293395 \cdot h$	3.1 d



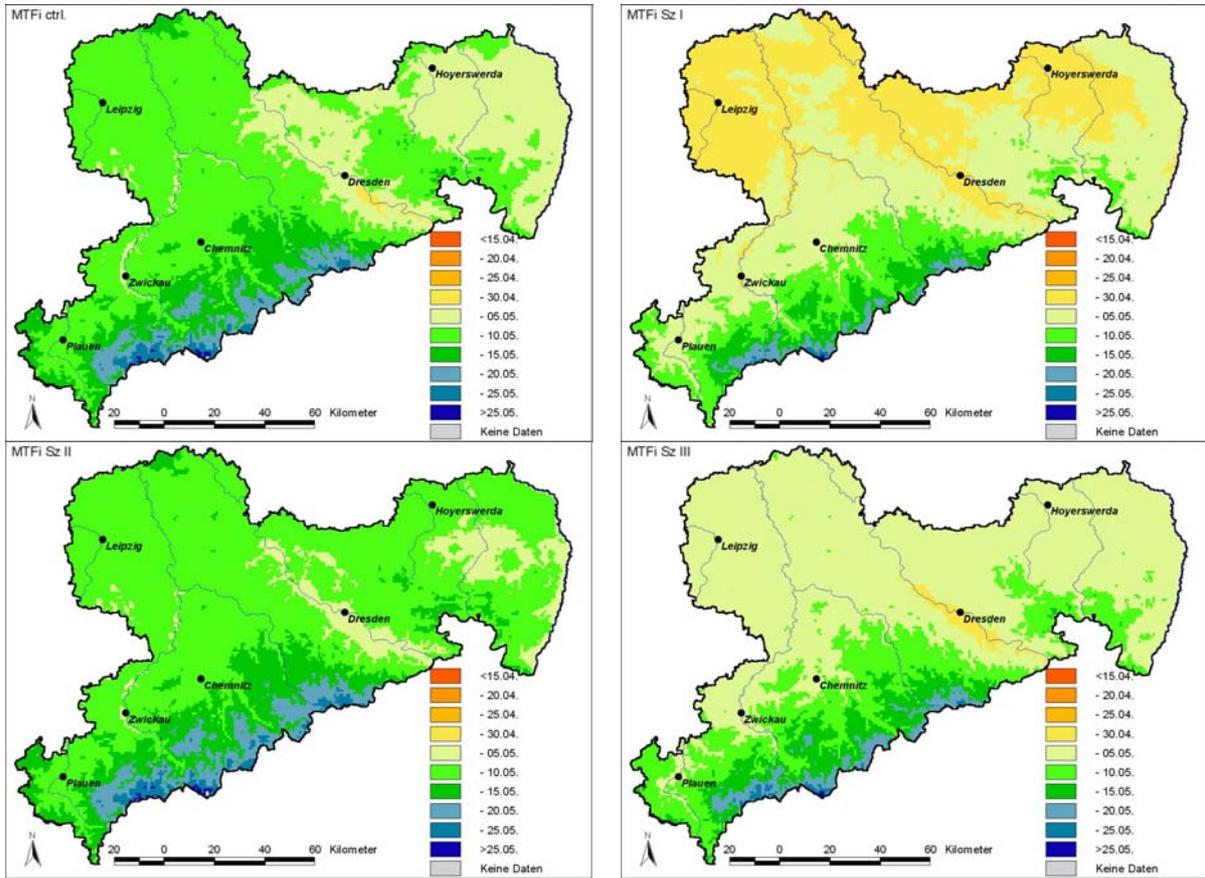
Karte 1: 49 Phänostationen

Karte 2: 4 Klimastationen

Karte 3: Phänomodell MT_{Fi}

Phänomodell MT _{Fi} Starttag: 01.01.	T _B = 5.1 °C, T _S = 191.7 K; MAE = 3.3 d, RMSE = 3.8 d
--	---

SZENARIO



ΔMT_{Fi}

Kontrolllauf 128 (08.05.)	Szenario I 123 (-5 d)
Szenario II 129 (+1 d)	Szenario III 125 (-3 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Syringa vulgaris (Flieder)

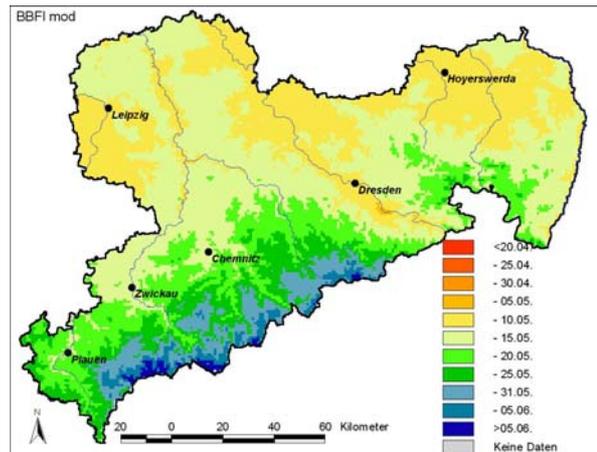
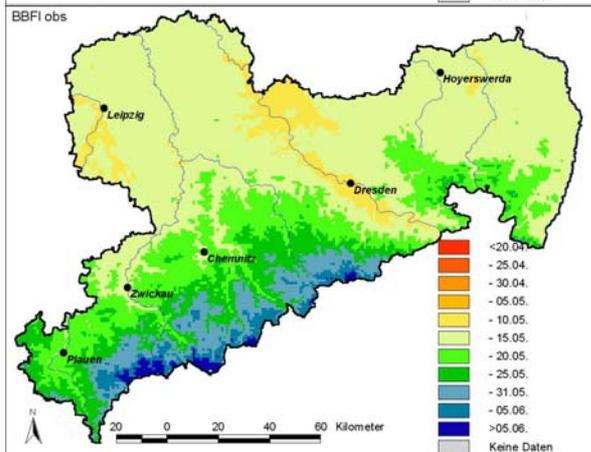
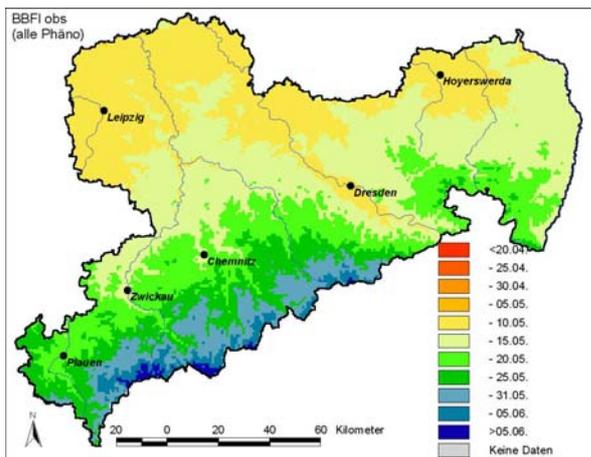
BB

BEOBACHTUNG

Flieder	Beginn Blüte
Abkürzung	BB_{F1}
x 1961-1990 (s)	19.05. ^a (7.0)
x 1991-2000 (s)	12.05. ^b (8.3)
x 1961-2000 (s)	17.05. (7.7)
Max (Jahr)	01.06. (1970)
Min (Jahr)	30.04. (1961)
Trend /10a (1961-2000)	-1.9
Trend /40a (1961-2000)	-7.6
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.10$
Anzahl der Stationen	67
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Flieder	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
BB	17.05.	$BB_{F1} = 16.0138 + 2.02078 \cdot \varphi + 0.32488 \cdot \lambda + 0.0405763 \cdot h$	2.0 d



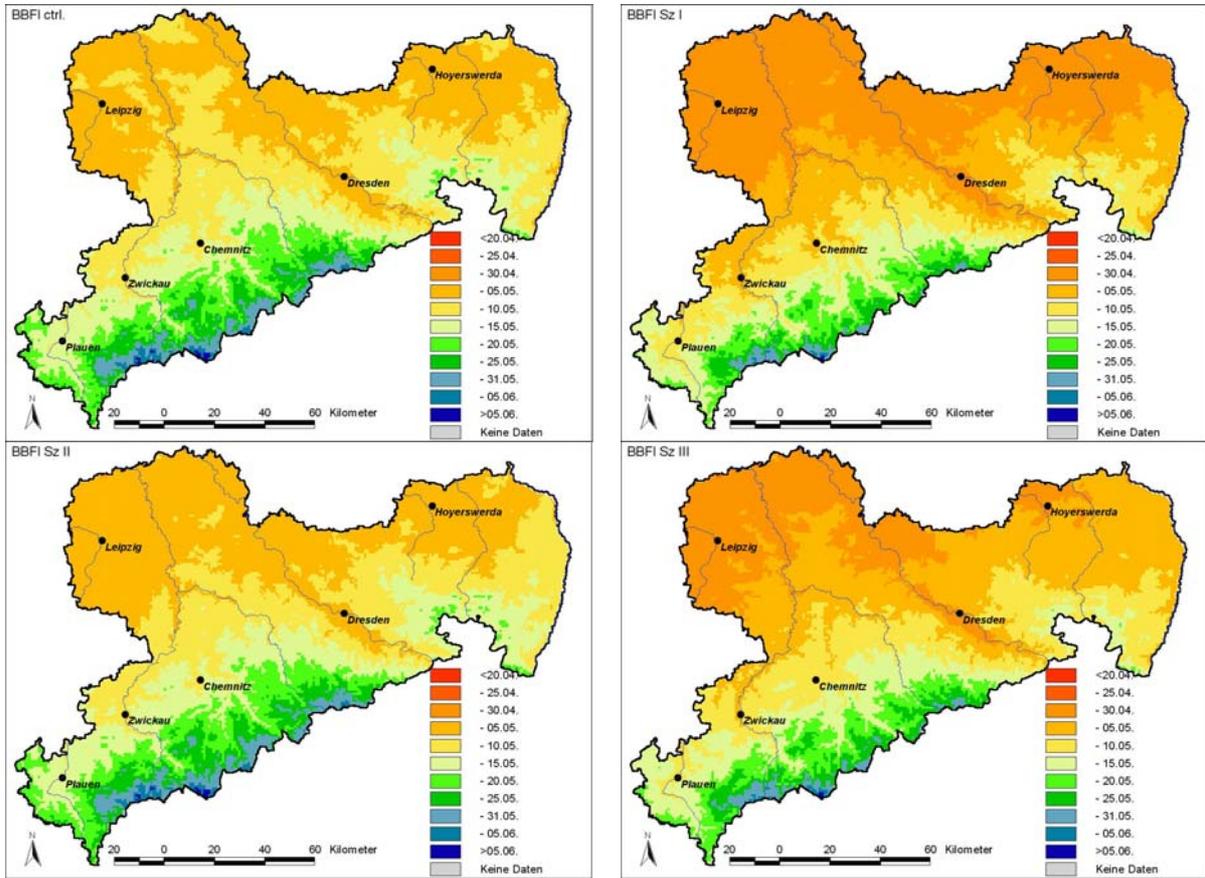
Karte 1: 67 Phänostationen

Karte 2: 5 Klimastationen

Karte 3: Phänomodell BB_{F1}

Phänomodell BB _{F1} Starttag: 01.01.	$T_B = 4.9 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_S = 212.8 \text{ K}$; MAE = 2.3 d, RMSE = 2.9 d
--	---

SZENARIO



ΔBB_{FI}

Kontrolllauf 130 (10.05.)	Szenario I 124 (-6 d)
Szenario II 130 (0 d)	Szenario III 126 (-4 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Sambucus nigra (Schwarzer Holunder)

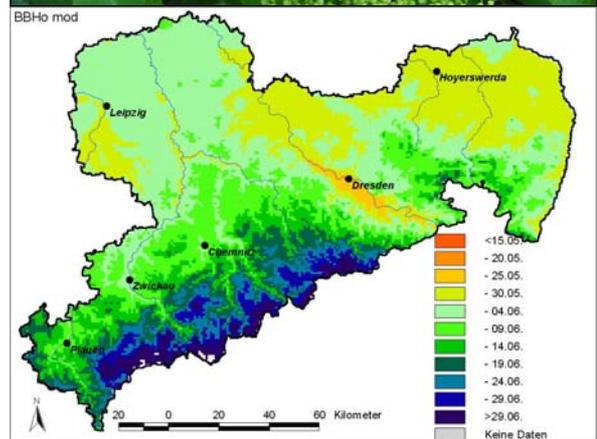
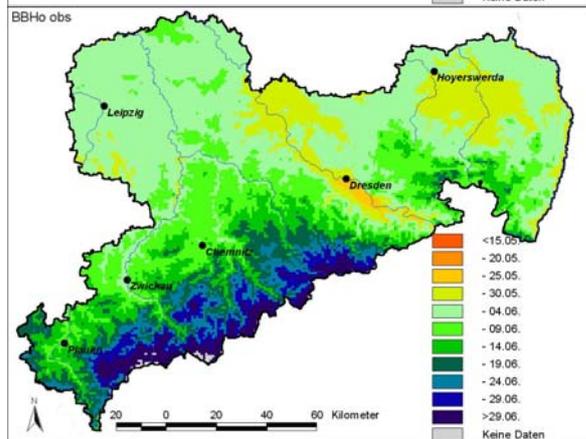
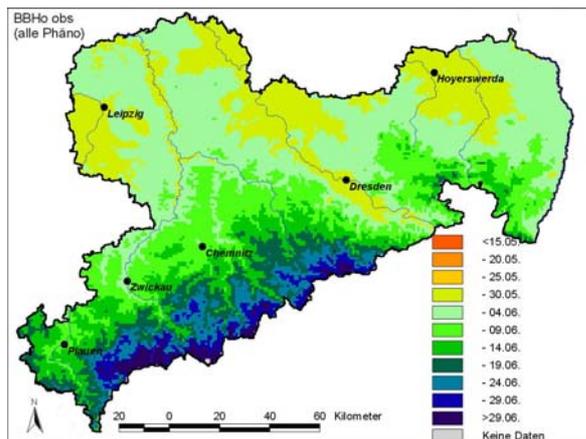
BB

BEOBACHTUNG

Schwarzer Holunder	Beginn Blüte
Abkürzung	BB_{H0}
x 1961-1990 (s)	11.06. ^a (6.2)
x 1991-2000 (s)	03.06. ^b (10.1)
x 1961-2000 (s)	09.06. (8.0)
Max (Jahr)	25.06. (1991)
Min (Jahr)	21.05. (2000)
Trend /10a (1961-2000)	-3.1
Trend /40a (1961-2000)	-12.4
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.01$
Anzahl der Stationen	39
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Schwarzer Holunder	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
BB	09.06.	$BB_{H0} = -301.538 + 8.79157 \cdot \varphi - 0.52773 \cdot \lambda + 0.0585147 \cdot h$	2.4 d



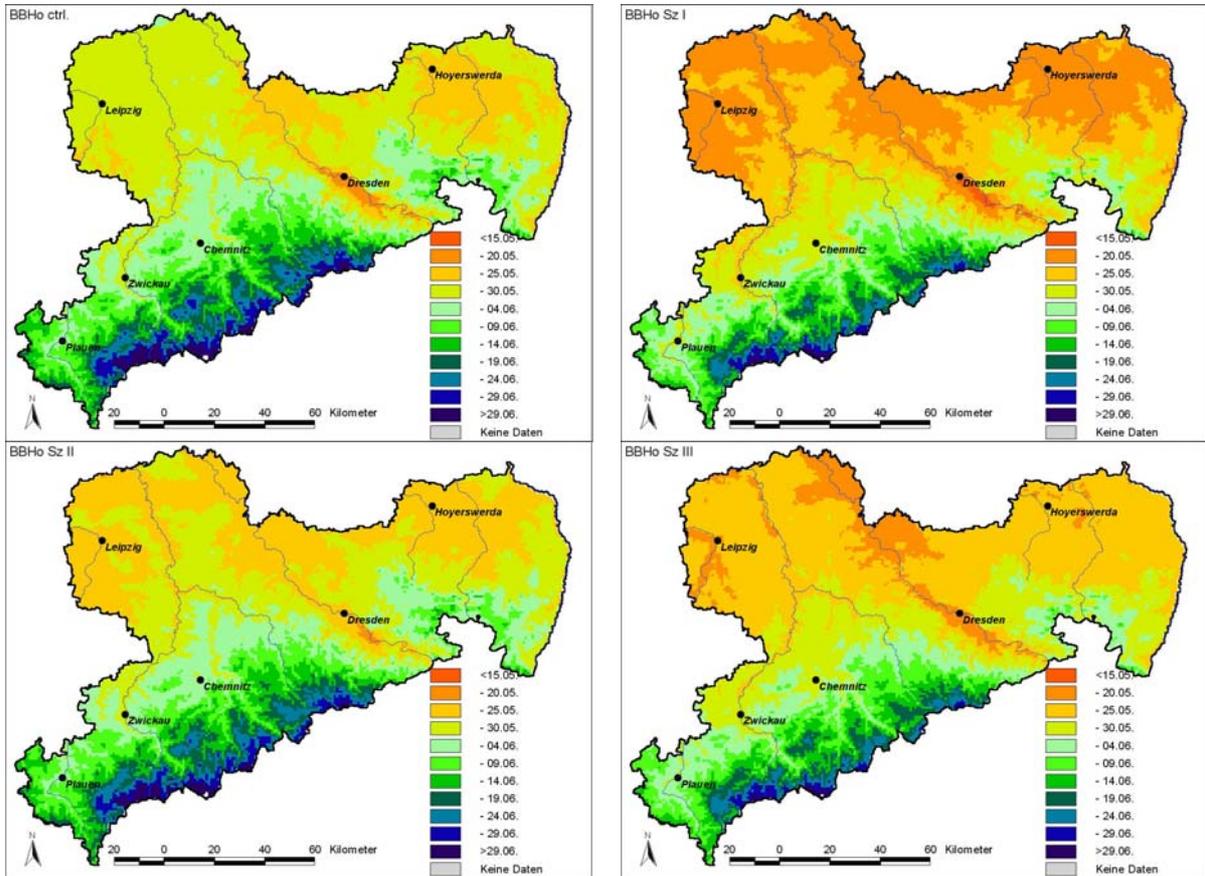
Karte 1: 39 Phänostationen

Karte 2: 5 Klimastationen

Karte 3: Phänomodell BB_{H0}

Phänomodell BB _{H0} Starttag: 01.01.	$T_B = 5.2 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_S = 383.0 \text{ K}$; MAE = 3.2 d, RMSE = 3.8 d
--	--

SZENARIO



ΔBB_{Ho}

Kontrolllauf 153 (02.06.)	Szenario I 147 (-6 d)
Szenario II 152 (-1 d)	Szenario III 148 (-5 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Sambucus nigra (Schwarzer Holunder)

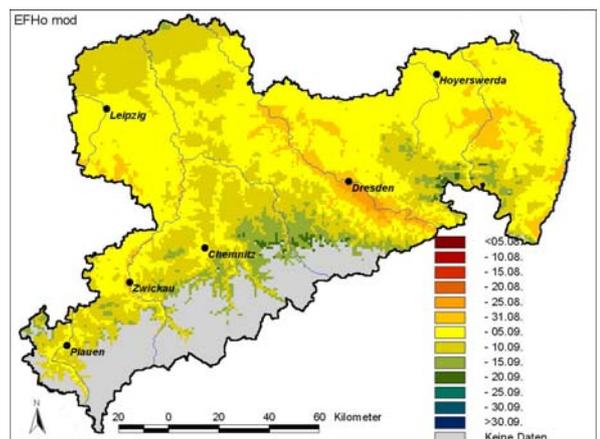
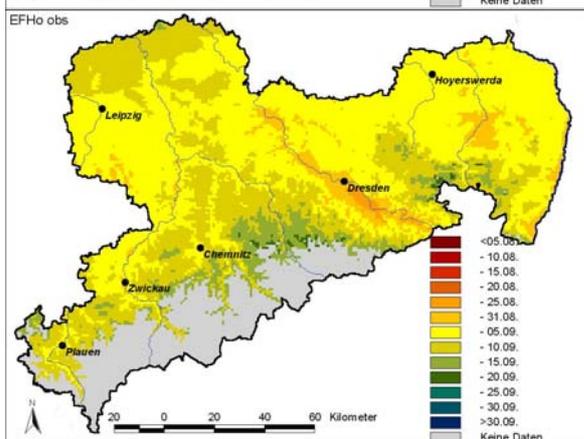
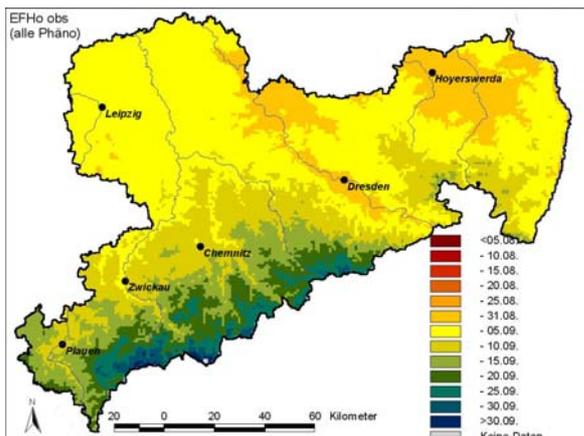
EF

BEOBACHTUNG

Schwarzer Holunder	Erste Früchte
Abkürzung	EF _{Ho}
x 1961-1990 (s)	11.09. ^a (5.8)
x 1991-2000 (s)	31.08. ^b (8.2)
x 1961-2000 (s)	08.09. (7.9)
Max (Jahr)	23.09. (1984)
Min (Jahr)	19.08. (2000)
Trend /10a (1961-2000)	-2.5
Trend /40a (1961-2000)	-10.0
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.05$
Anzahl der Stationen	62
Höchste Station	780 m – Johannegeorgenstadt (Westerzgebirgskreis)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Schwarzer Holunder	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
EF	08.09.	$EF_{Ho} = -79.3878 + 6.45938 \cdot \varphi - 1.04891 \cdot \lambda + 0.0445993 \cdot h$	4.2 d



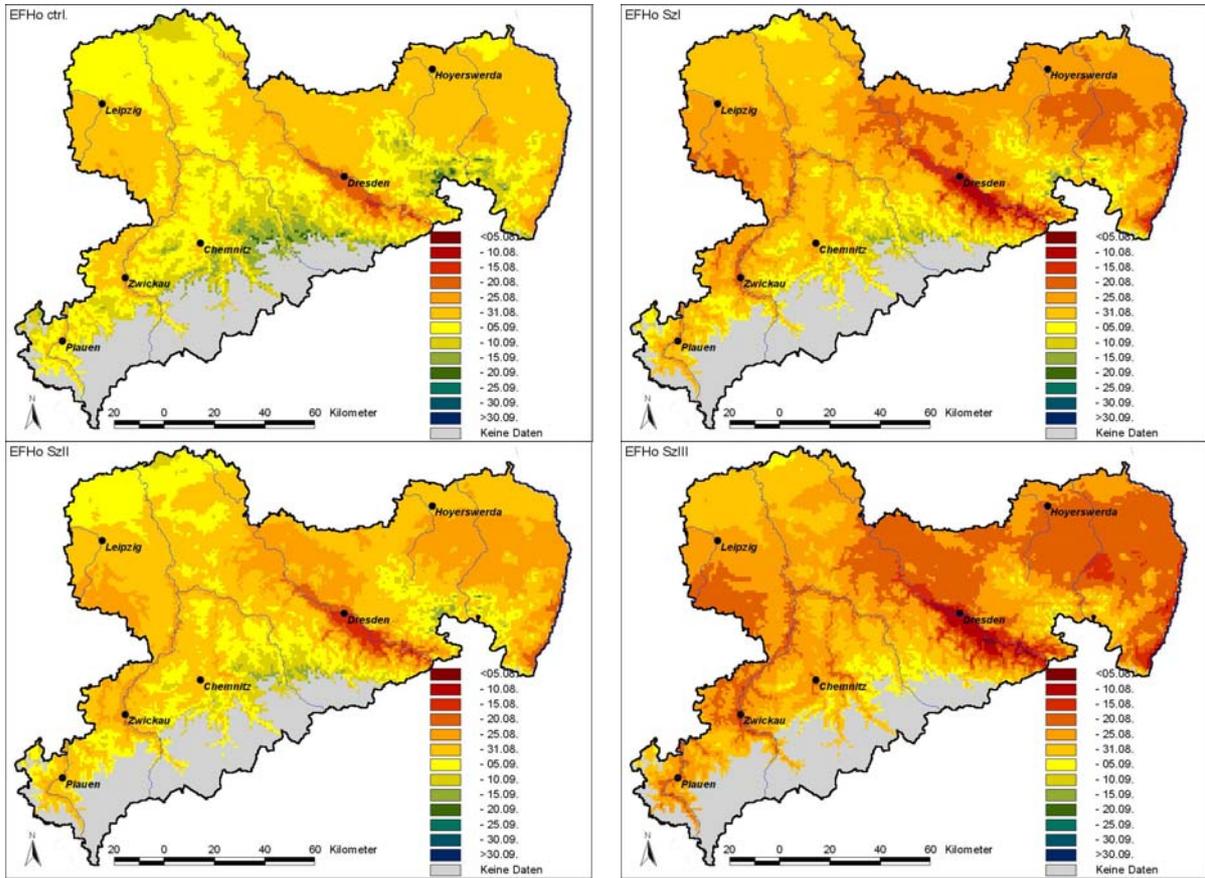
Karte 1: 62 Phänostationen

Karte 2: 4 Klimastationen

Karte 3: Phänomodell EF_{Ho}

Phänomodell EF _{Ho}	$EF = 178.551 + 0.713 \cdot BB - 1.872 \cdot T_{06} - 0.894 \cdot T_{07};$ MAE = 2.5 d, RMSE = 2.9 d
------------------------------	---

SZENARIO



ΔEF_{Ho}

Kontrolllauf 247 (04.09.)	Szenario I 241 (-6 d)
Szenario II 243 (-4 d)	Szenario III 237 (-10 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Aesculus hippocastanum (Rosskastanie)

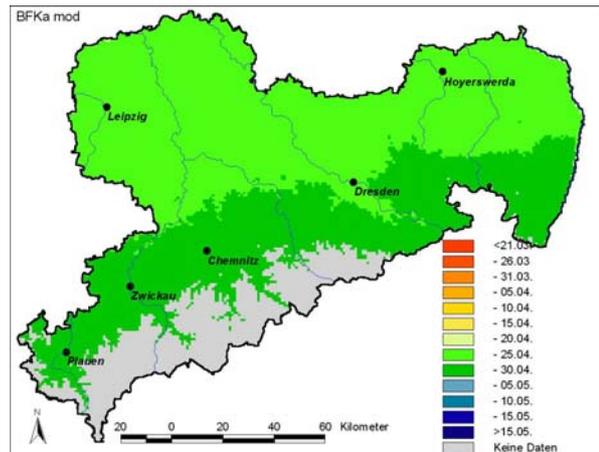
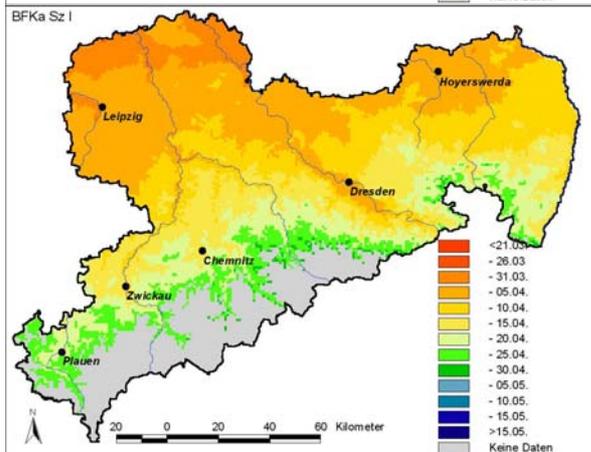
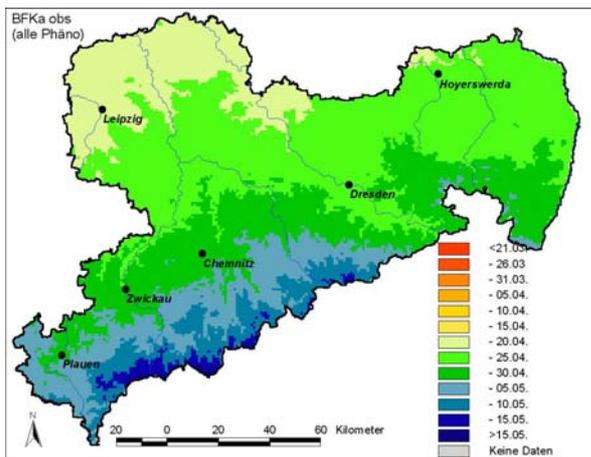
BF

BEOBACHTUNG

Rosskastanie	Beginn Blattentfaltung
Abkürzung	BF_{Ka}
x 1961-1990 (s)	29.04. ^a (7.1)
x 1991-2000 (s)	23.04. ^b (4.5)
x 1961-2000 (s)	27.04. (6.9)
Max (Jahr)	10.05. (1970)
Min (Jahr)	13.04. (1961)
Trend /10a (1961-2000)	-1.8
Trend /40a (1961-2000)	-7.2
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.10$
Anzahl der Stationen	81
Höchste Station	780 m – Johannegeorgenstadt (Westerzgebirgskreis)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Rosskastanie	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
BF	27.04.	$BF_{Ka} = 206.371 - 2.10578 \cdot \varphi + 0.663061 \cdot \lambda + 0.0289339 \cdot h$	2.8 d



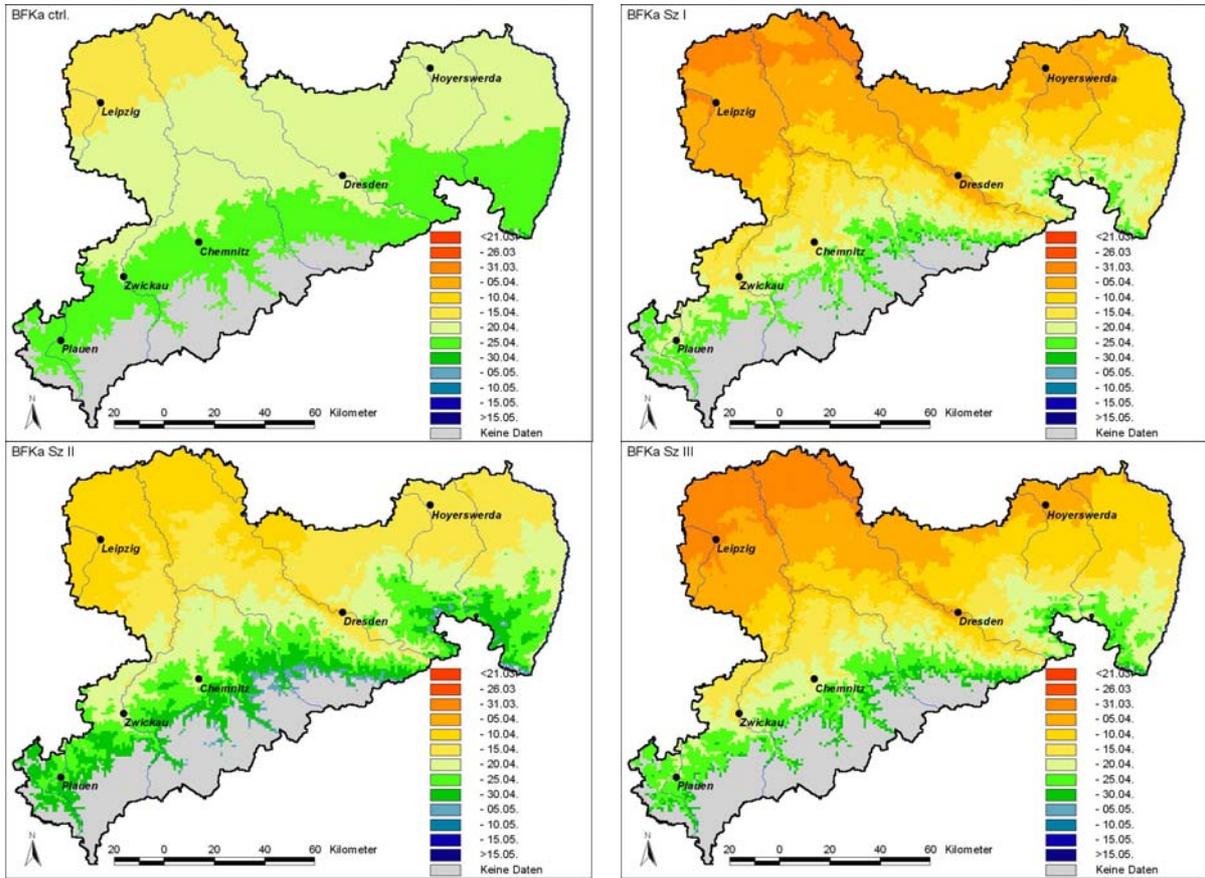
Karte 1: 81 Phänostationen

Karte 2: 5 Klimastationen

Karte 3: Phänomodell BF_{Ka}

Phänomodell BF_{Ka} Starttag: 01.01.	$T_B = 3.9 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_S = 132.2 \text{ K}$; MAE = 4.5 d, RMSE = 7.2 d
---	---

SZENARIO



ΔBF_{Ka}

Kontrolllauf 110 (20.04.)	Szenario I 103 (-7 d)
Szenario II 110 (0 d)	Szenario III 104 (-6 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

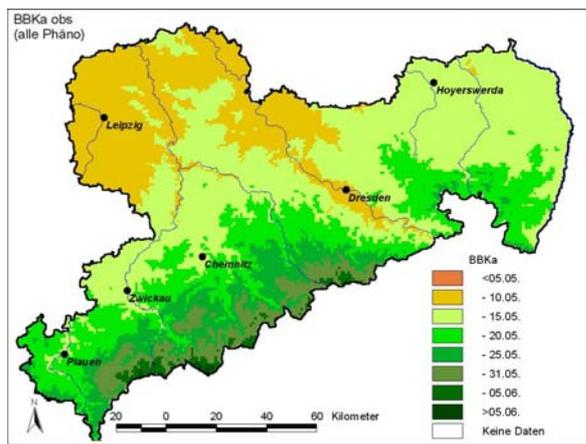
<i>Aesculus hippocastanum</i> (Rosskastanie)	BB
--	----

BEOBACHTUNG

Rosskastanie	Beginn Blüte
Abkürzung	BB_{Ka}
x 1961-1990 (s)	17.05. ^a (6.4)
x 1991-2000 (s)	12.05. ^b (7.7)
x 1961-2000 (s)	16.05. (7.1)
Max (Jahr)	28.05. (1991)
Min (Jahr)	30.04. (1961)
Trend /10a (1961-2000)	-1.6
Trend /40a (1961-2000)	-6.4
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.10$
Anzahl der Stationen	56
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Rosskastanie	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
BB	16.05.	$BB_{Ka} = -166.229 + 5.44656 \cdot \varphi + 0.841936 \cdot \lambda + 0.039912 \cdot h$	1.8 d



Phänommodell BB _{Ka} Starttag: BF	$T_B = 0.0 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_S = 193.2 \text{ K}$; MAE = 1.9 d, RMSE = 2.6 d
---	---

ΔBB_{Ka}

Kontrolllauf	Szenario I
127 (07.05.)	121 (-6 d)
Szenario 2	Szenario 3
127 (0 d)	123 (-4 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

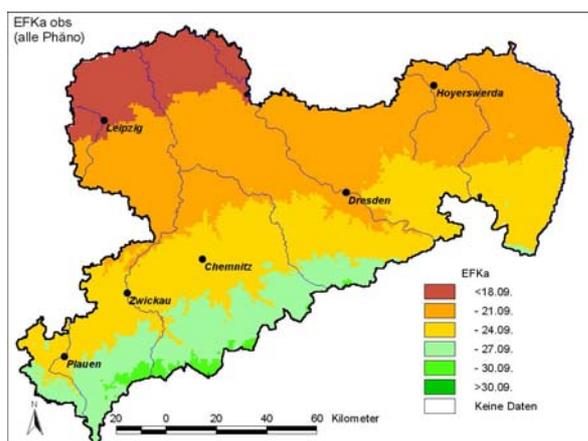
<i>Aesculus hippocastanum</i> (Rosskastanie)	EF
--	----

BEOBACHTUNG

Rosskastanie	Erste reife Früchte
Abkürzung	EF _{Ka}
x 1961-1990 (s)	23.09. ^a (4.0)
x 1991-2000 (s)	19.09. ^b (4.7)
x 1961-2000 (s)	22.09. (4.5)
Max (Jahr)	01.10. (1974)
Min (Jahr)	11.09. (2000)
Trend /10a (1961-2000)	-1.5
Trend /40a (1961-2000)	-6.0
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.05$
Anzahl der Stationen	52
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Rosskastanie	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
EF	22.09.	$EF_{Ka} = 432.926 - 3.54508 \cdot \varphi + 0.758368 \cdot \lambda + 0.0087389 \cdot h$	4.0 d



Phänomodell EF _{Ka}	$EF = 267.833 + 0.238 \cdot BB - 1.551 \cdot T_{05} - 1.17 \cdot T_{06}$; MAE = 1.3 d, RMSE = 1.7 d
------------------------------	---

ΔEF_{Ka}

Kontrolllauf 261 (18.09.)	Szenario I 258 (-3 d)
Szenario II 260 (-1 d)	Szenario III 257 (-4 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

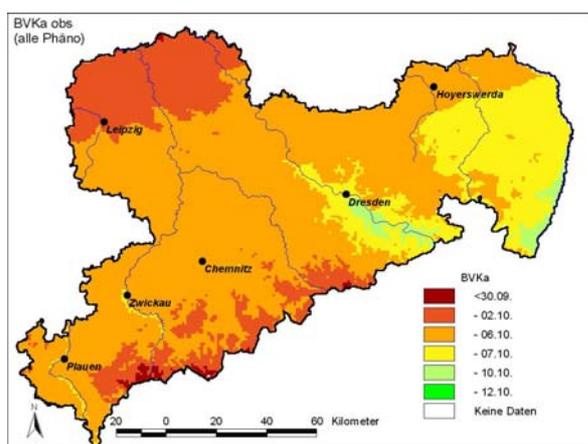
<i>Aesculus hippocastanum</i> (Rosskastanie)	BV
--	----

BEOBACHTUNG

Rosskastanie	Beginn Blattverfärbung
Abkürzung	BV_{Ka}
x 1961-1990 (s)	05.10. ^a (3.5)
x 1991-2000 (s)	03.10. ^a (4.3)
x 1961-2000 (s)	05.10. (3.8)
Max (Jahr)	12.10. (1975)
Min (Jahr)	24.09. (1993)
Trend /10a (1961-2000)	-0.6
Trend /40a (1961-2000)	-2.4
Signifikanzniveau	-
Anzahl der Stationen	65
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Rosskastanie	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
BV	05.10.	$BV_{Ka} = 697.254 - 8.63306 \cdot \varphi + 1.85647 \cdot \lambda - 0.0145233 \cdot h$	3.9 d



Phänommodell BV_{Ka}	$BV = 93.020 + 0.628 \cdot EF + 1.387 \cdot T_{09}$; MAE = 1.3 d, RMSE = 1.6 d
------------------------	--

ΔBV_{Ka}

Kontrolllauf 275 (02.10.)	Szenario I 274 (-1 d)
Szenario II 275 (0 d)	Szenario III 274 (-1 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Dactylis glomerata (Wiesen-Knauelgras)

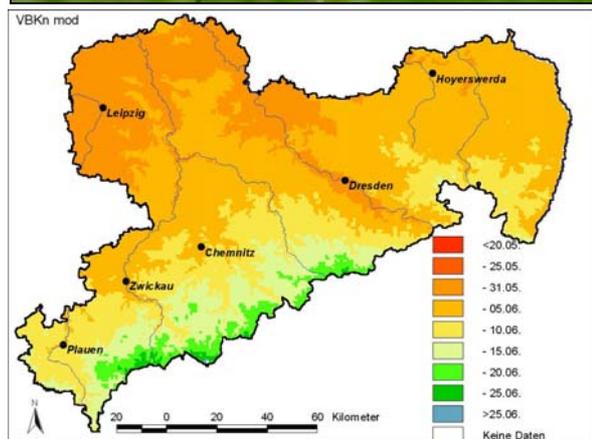
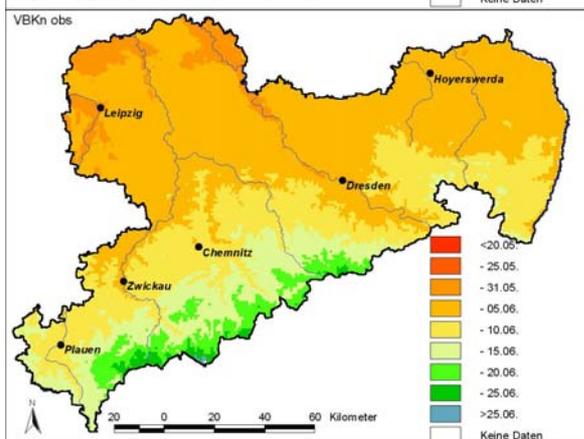
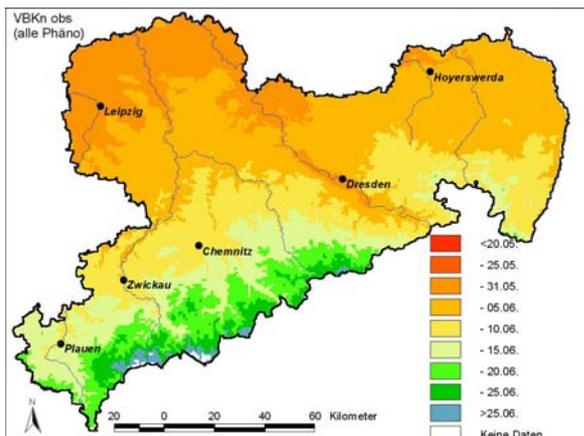
VB

BEOBACHTUNG

Wiesen-Knauelgras	Beginn Vollblüte
Abkürzung	VB_{Kn}
x 1961-1990 (s)	10.06. ^a (4.9)
x 1991-2000 (s)	06.06. ^b (8.0)
x 1961-2000 (s)	09.06. (6.0)
Max (Jahr)	21.06. (1991)
Min (Jahr)	24.05. (2000)
Trend /10a (1961-2000)	-1.7
Trend /40a (1961-2000)	-6.8
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.05$
Anzahl der Stationen	58
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Wiesen-Knauelgras	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
VB	09.06.	$VB_{Kn} = 151.776 - 0.257714 \cdot \varphi + 0.587328 \cdot \lambda + 0.0377712 \cdot h$	2.4 d



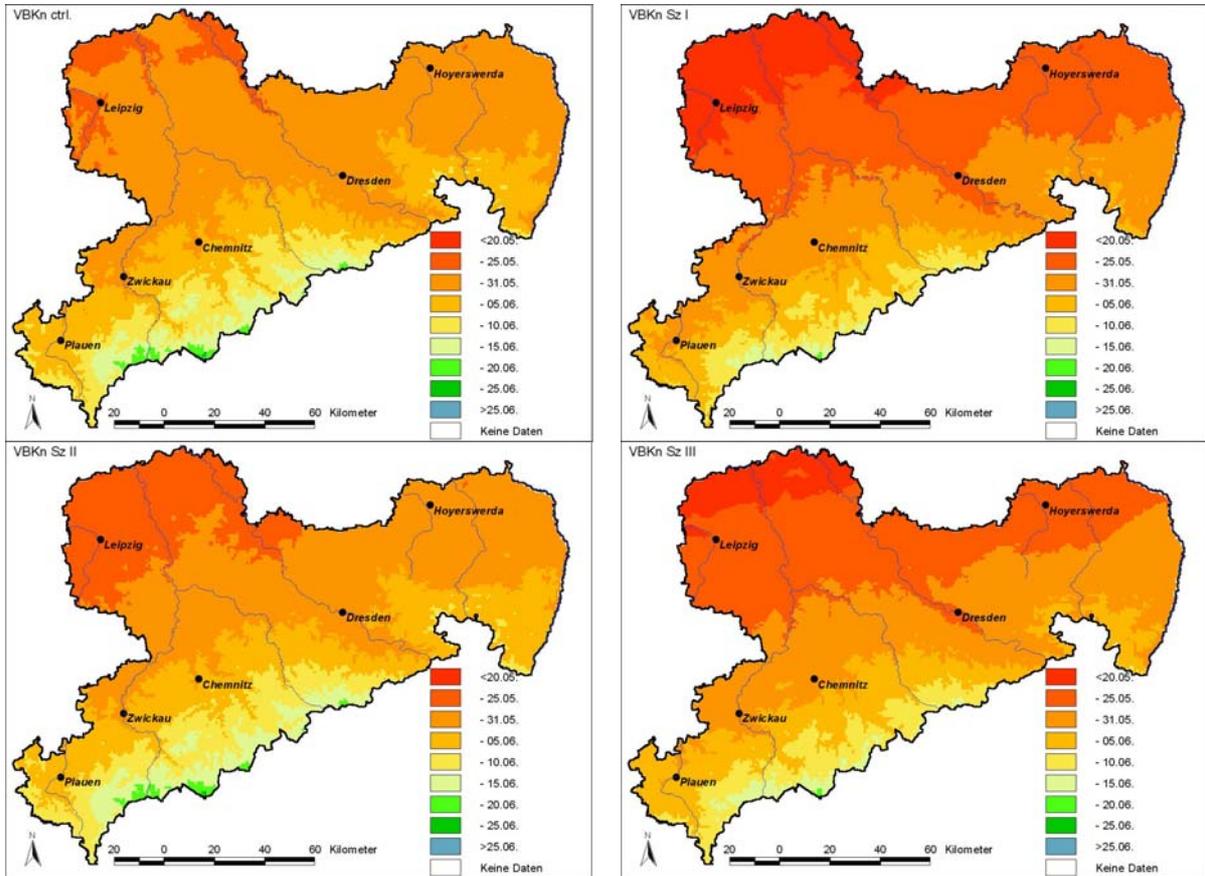
Karte 1: 58 Phänostationen

Karte 2: 5 Klimastationen

Karte 3: Phänomodell VB_{Kn}

Phänomodell VB_{Kn} Starttermin: 01.01.	$T_B = 5.6 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_S = 355.7 \text{ K}$; MAE = 2.8 d, RMSE = 3.7 d
--	---

SZENARIO



ΔVB_{Kn}

Kontrolllauf 151 (31.05.)	Szenario I 146 (-5 d)
Szenario II 151 (0 d)	Szenario III 148 (-3 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Tilia platyphyllos (Sommer- Linde)

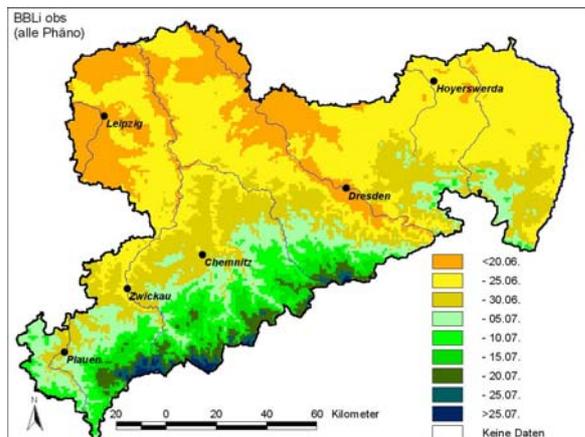
BB

BEOBACHTUNG

Sommer-Linde	Beginn Blüte
Abkürzung	BB_{Li}
x 1961-1990 (s)	01.07. ^a (5.9)
x 1991-2000 (s)	25.06. ^b (8.3)
x 1961-2000 (s)	30.06. (7.0)
Max (Jahr)	12.07. (1980)
Min (Jahr)	14.06. (1993)
Trend /10a (1961-2000)	-2.0
Trend /40a (1961-2000)	-8.0
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.05$
Anzahl der Stationen	50
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Sommer-Linde	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
BB	30.06.	$BB_{Li} = -267.28 + 8.38177 \cdot \varphi + 0.089450 \cdot \lambda + 0.056961 \cdot h$	2.9 d



Phänommodell BB _{Li} Starttag: 01.01.	$T_B = 6.4 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_S = 527.1 \text{ K}$; MAE = 2.6 d, RMSE = 3.5 d
---	---

ΔBB_{Li}

Kontrolllauf	Szenario I
178 (27.06.)	174 (-4 d)
Szenario II	Szenario III
178 (0 d)	173 (-5 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Robinia pseudoacacia (Robinie)

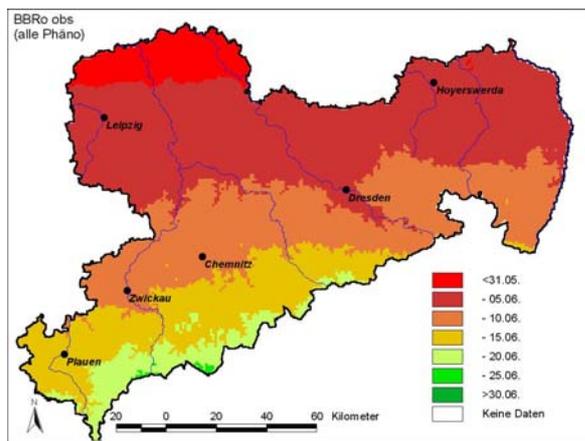
BB

BEOBACHTUNG

Robinie	Beginn Blüte
Abkürzung	BB_{Ro}
x 1961-1990 (s)	09.06. ^a (6.3)
x 1991-2000 (s)	30.05. ^b (10.5)
x 1961-2000 (s)	06.06. (8.5)
Max (Jahr)	22.06. (1965)
Min (Jahr)	15.05. (2000)
Trend /10a (1961-2000)	-3.6
Trend /40a (1961-2000)	-14.4
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.01$
Anzahl der Stationen	30
Höchste Station	550 m – Zschorlau (Westerzgebirgskreis)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Robinie	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
BB	06.06.	$BB_{Ro} = 511.453 - 7.12374 \cdot \varphi + 0.357185 \cdot \lambda + 0.0156321 \cdot h$	2.1 d



Phänomodell BB _{Ro} Starttag: 01.01.	$T_B = 5.5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_S = 336.4 \text{ K}$; MAE = 2.6 d, RMSE = 3.2 d
--	---

ΔBB_{Ro}

Kontrolllauf 151 (31.05.)	Szenario I 148 (-3 d)
Szenario II 152 (+1 d)	Szenario III 149 (-2 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Salix caprea (Sal-Weide)

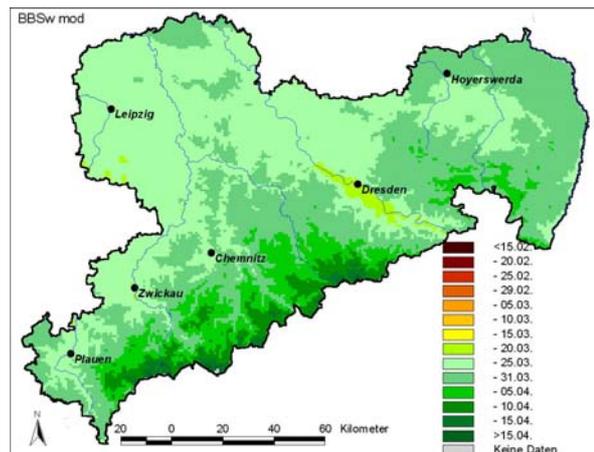
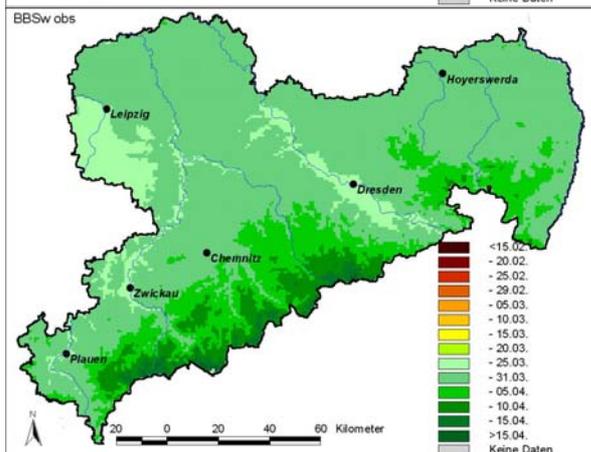
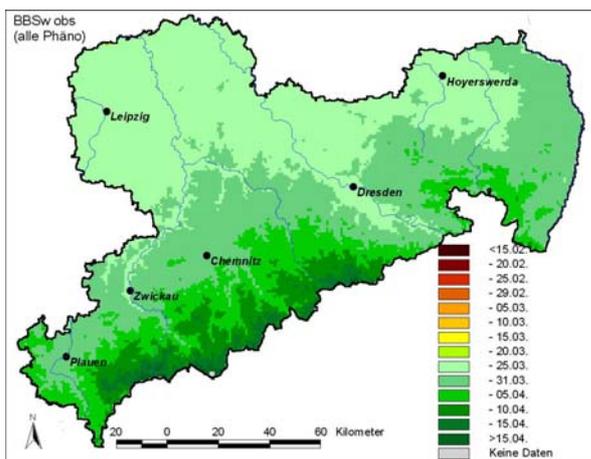
BB

BEOBACHTUNG

Sal-Weide	Beginn Blüte
Abkürzung	BB _{Sw}
x 1961-1990 (s)	01.04. ^a (12.2)
x 1991-2000 (s)	23.03. ^b (10.0)
x 1961-2000 (s)	30.03. (12.2)
Max (Jahr)	22.04. (1970)
Min (Jahr)	03.03. (1990)
Trend /10a (1961-2000)	-3.4
Trend /40a (1961-2000)	-13.6
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.05$
Anzahl der Stationen	77
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Sal-Weide	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
BB	30.03.	$BB_{Sw} = -170.474 + 4.53593 \cdot \varphi + 1.1512 \cdot \lambda + 0.0366704 \cdot h$	2.3 d



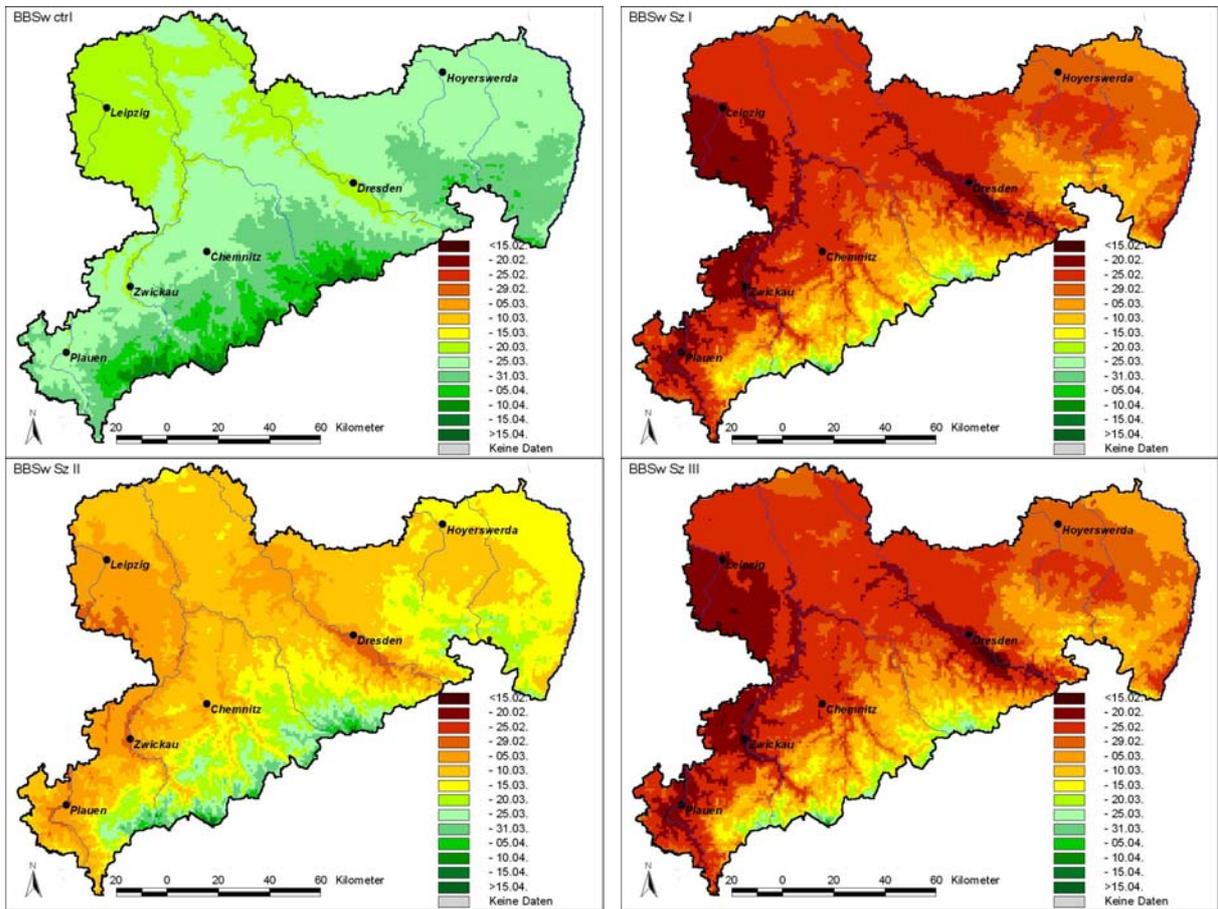
Karte 1: 77 Phänostationen

Karte 2: 5 Klimastationen

Karte 3: Phänomodell BB_{Sw}

Phänomodell BB _{Sw} Starttermin: 01.01.	$T_B = 0.0 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_S = 178.8 \text{ K}$; MAE = 5.8 d, RMSE = 7.6 d
---	--

SZENARIO



ΔBB_{Sw}

Kontrolllauf 84 (25.03.)	Szenario I 57 (-27 d)
Szenario II 69 (-15 d)	Szenario III 57 (-27 d)

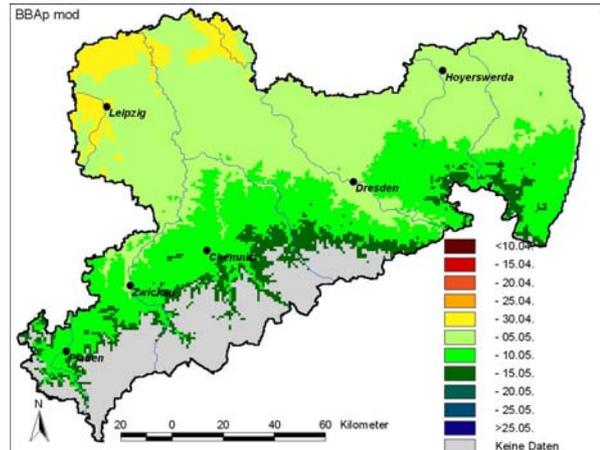
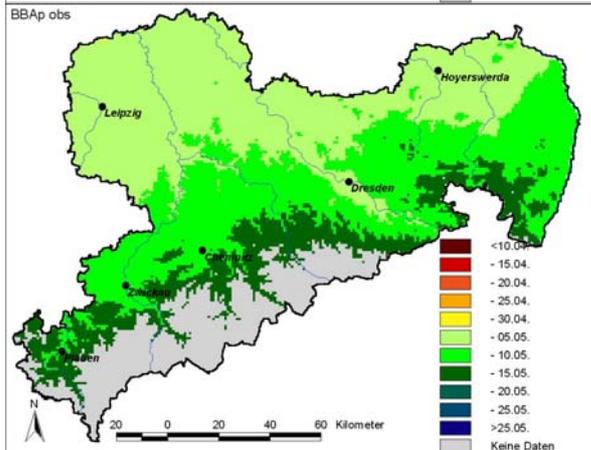
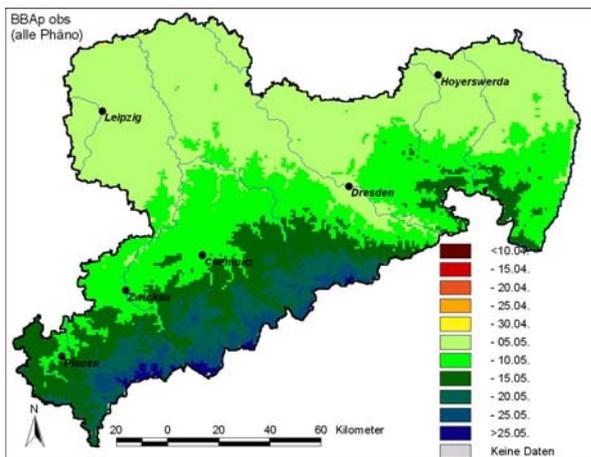
Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

BEOBACHTUNG

Apfel	Beginn Blüte
Abkürzung	BB _{Ap}
x 1961-1990 (s)	10.05. ^a (7.5)
x 1991-2000 (s)	03.05. ^b (6.0)
x 1961-2000 (s)	08.05. (7.6)
Max (Jahr)	20.05. (1970)
Min (Jahr)	20.04. (1961)
Trend /10a (1961-2000)	-2.1
Trend /40a (1961-2000)	-8.4
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.05$
Anzahl der Stationen	56
Höchste Station	760 m – Altenberg (Weißeritzkreis)

(a, b signifikante Differenz (p≤0.05); t-Test)

Apfel	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
BB	08.05.	$BB_{Ap} = -29.1208 + 2.76513 \cdot \varphi + 0.441809 \cdot \lambda + 0.0350176 \cdot h$	1.2 d



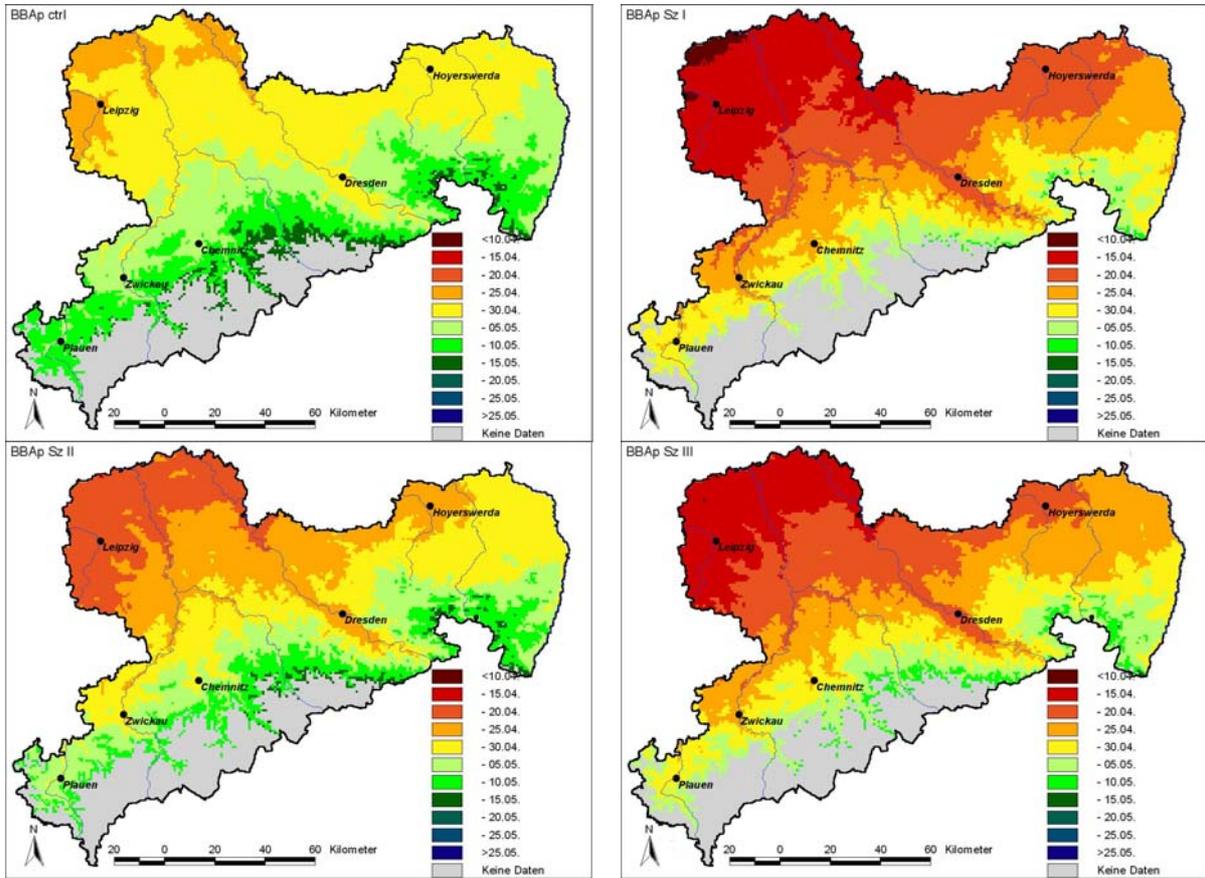
Karte 1: 56 Phänostationen

Karte 2: 5 Klimastationen

Karte 3: Phänomodell BB_{Ap}

Phänomodell BB _{Ap} Starttermin: 01.01.	T _B = 4.2 °C, T _S = 180.0 K; MAE = 3.0 d, RMSE = 3.6 d
---	---

SZENARIO



ΔBB_{Ap}

Kontrolllauf 124 (04.05.)	Szenario I 114 (-10 d)
Szenario II 120 (-4 d)	Szenario III 116 (-8 d)

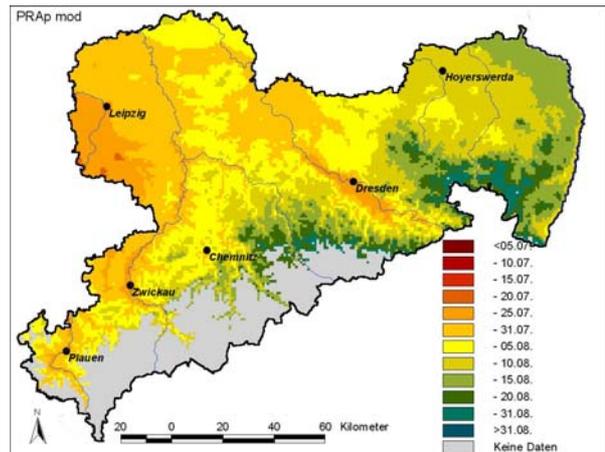
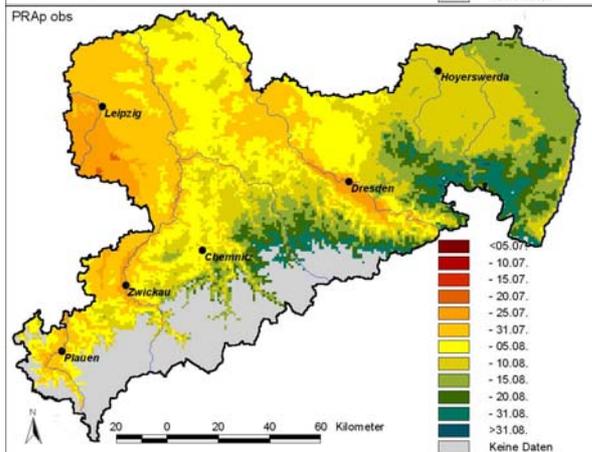
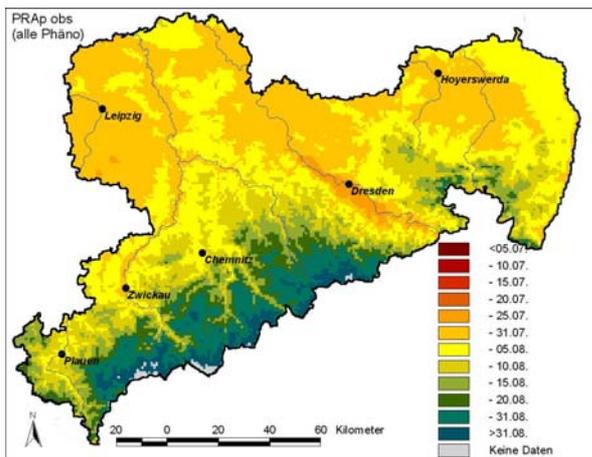
Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

BEOBACHTUNG

Apfel	Beginn Pflückreife
Abkürzung	PR _{Ap}
x 1961-1990 (s)	06.08. ^a (7.3)
x 1991-2000 (s)	29.07. ^b (9.4)
x 1961-2000 (s)	04.08. (8.6)
Max (Jahr)	20.08. (1980)
Min (Jahr)	16.07. (2000)
Trend /10a (1961-2000)	-2.2
Trend /40a (1961-2000)	-8.8
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.10$
Anzahl der Stationen	15
Höchste Station	600 m – Frohnau (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz (p≤0.05); t-Test)

Apfel	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
PR	04.08.	$PR_{Ap} = -811.853 + 19.731 \cdot \varphi - 0.0701234 \cdot \lambda + 0.0822168 \cdot h$	3.6 d



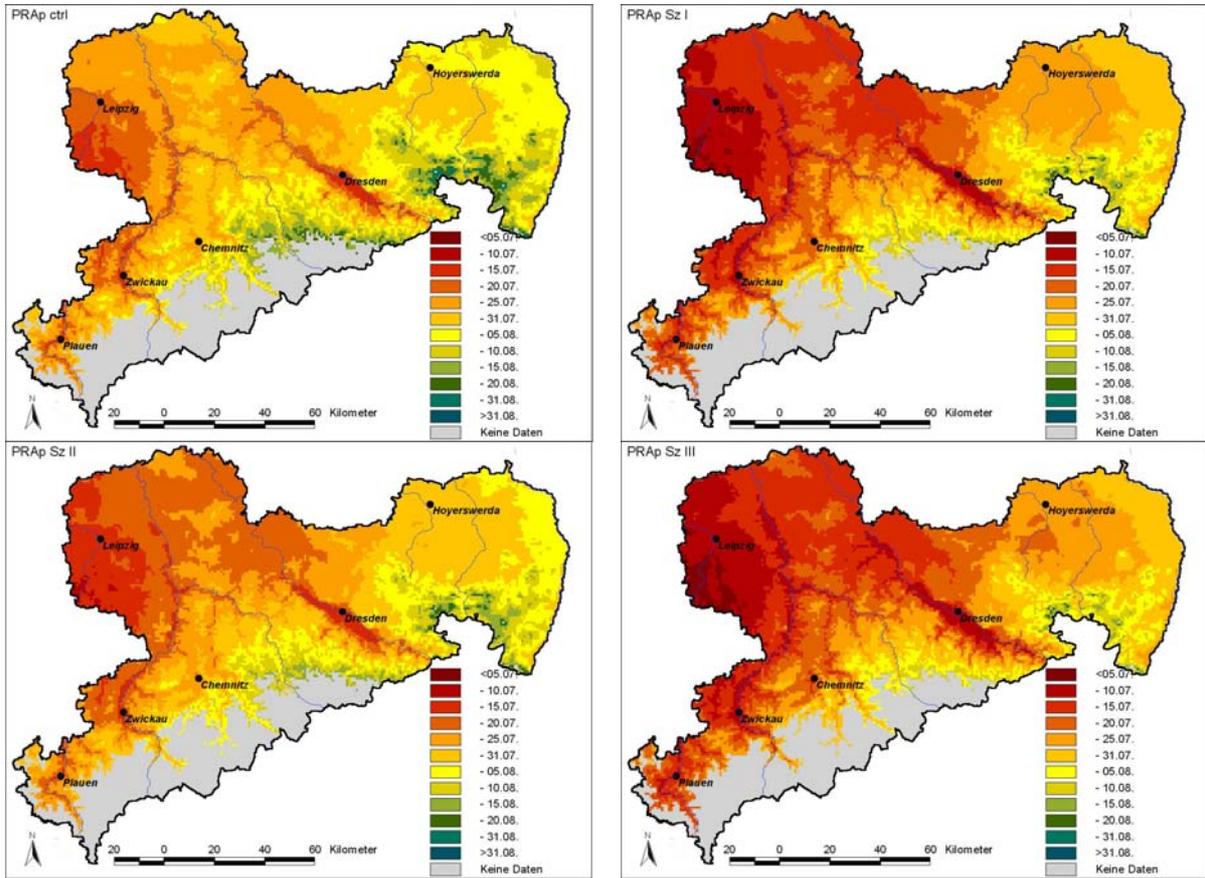
Karte 1: 15 Phänostationen

Karte 2: 4 Klimastationen

Karte 3: Phänomodell PR_{Ap}

Phänomodell PR _{Ap} Starttermin: BB	T _B = 0.0 °C, T _S = 1322.0 K; MAE = 3.7 d, RMSE = 4.3 d
---	--

SZENARIO



ΔPR_{Ap}

Kontrolllauf 213 (01.08.)	Szenario I 205 (-8 d)
Szenario II 209 (-4 d)	Szenario III 204 (-9 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Ribes rubrum (Rote Johannisbeere)

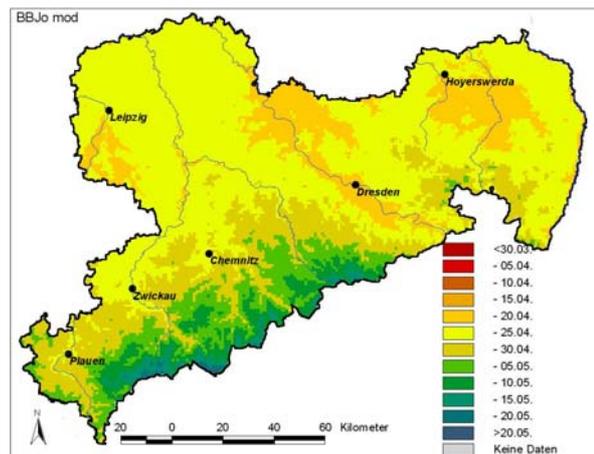
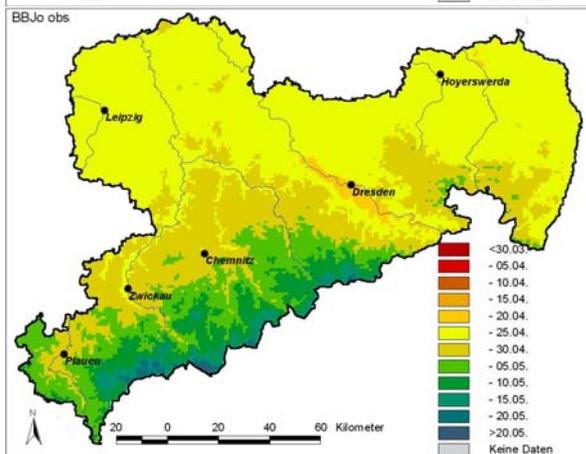
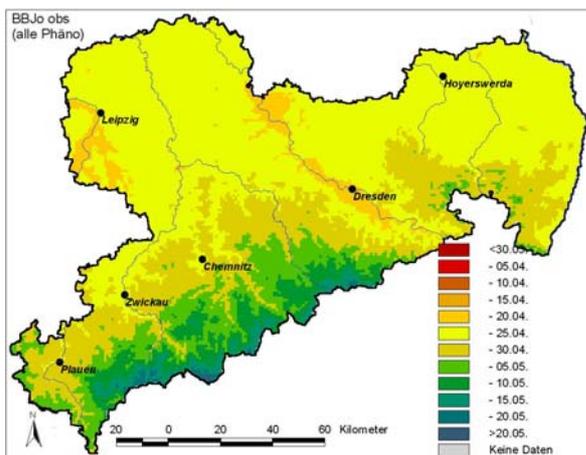
BB

BEOBACHTUNG

Johannisbeere	Beginn Blüte
Abkürzung	BB_{Jo}
x 1961-1990 (s)	28.04. ^a (8.4)
x 1991-2000 (s)	25.04. ^a (6.1)
x 1961-2000 (s)	28.04. (7.9)
Max (Jahr)	12.05. (1970)
Min (Jahr)	09.04. (1961)
Trend /10a (1961-2000)	-1.4
Trend /40a (1961-2000)	-5.6
Signifikanzniveau	-
Anzahl der Stationen	37
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Johannisbeere	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
BB	28.04.	$BB_{Jo} = -288.08 + 7.64257 \cdot \varphi + 0.137646 \cdot \lambda + 0.0421121 \cdot h$	2.3 d



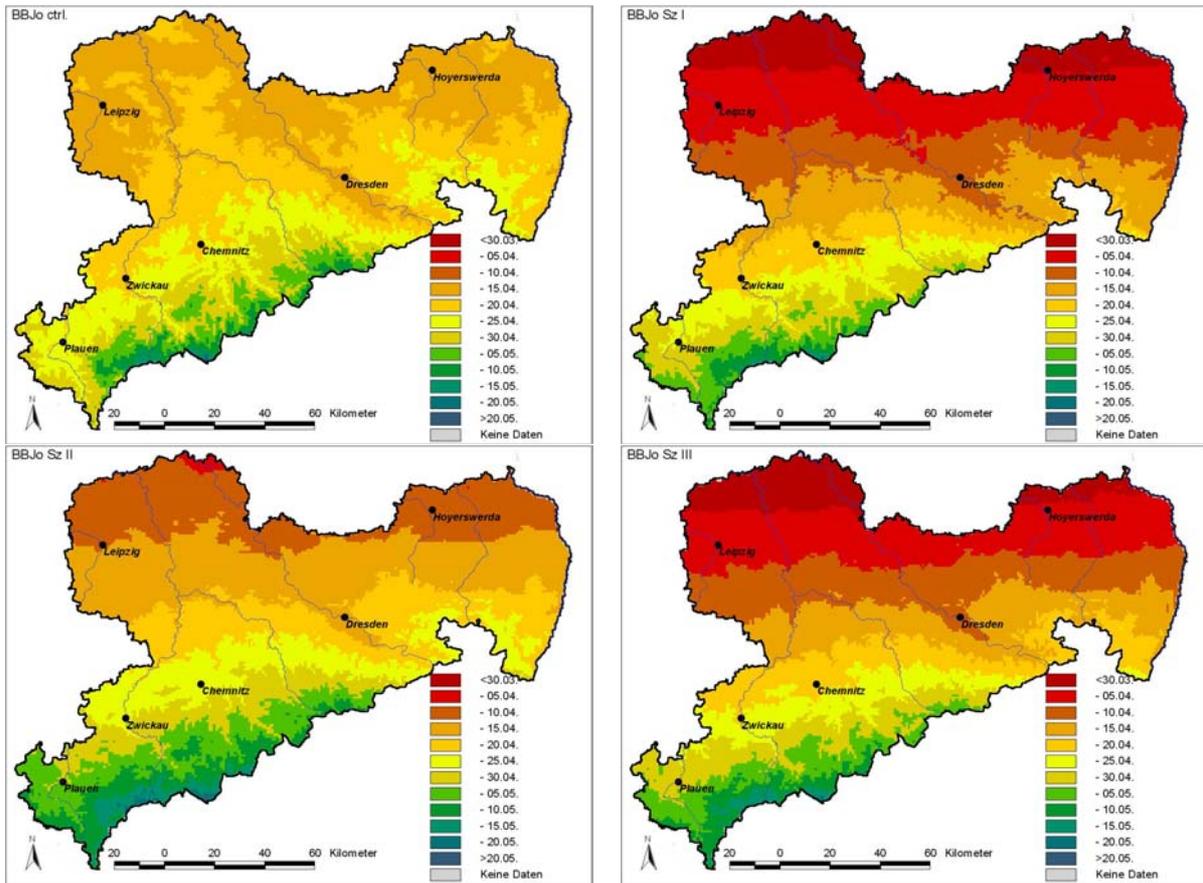
Karte 1: 37 Phänostationen

Karte 2: 4 Klimastationen

Karte 3: Phänomodell BB_{Jo}

Phänomodell BB _{Jo} Starttermin: 01.01.	$T_B = 8.1 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_S = 30.7 \text{ K}$; MAE = 5.4 d, RMSE = 6.9 d
---	--

SZENARIO



ΔBB_{Jo}

Kontrolllauf 110 (20.04.)	Szenario I 102 (-8 d)
Szenario II 109 (-1 d)	Szenario III 104 (-6 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Ribes rubrum (Rote Johannisbeere)

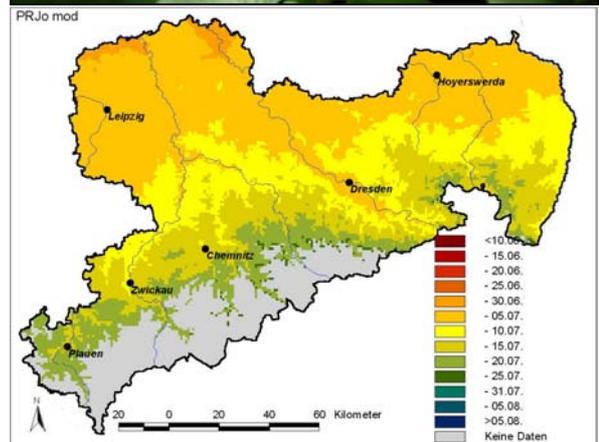
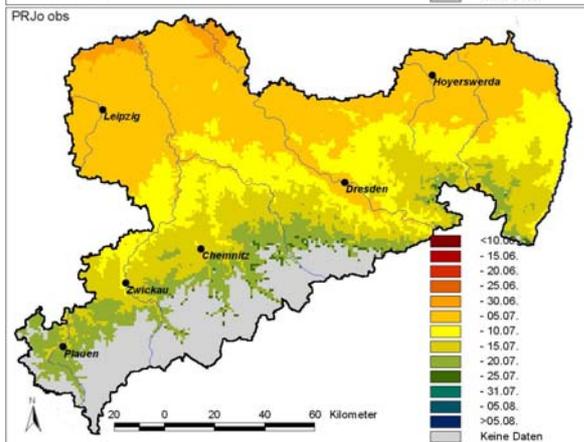
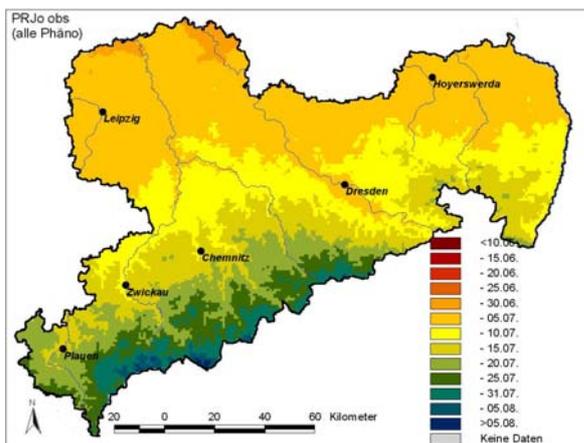
PR

BEOBACHTUNG

Johannisbeere	Beginn Pflückreife
Abkürzung	PR _{J0}
x 1961-1990 (s)	17.07. ^a (5.6)
x 1991-2000 (s)	07.07. ^b (8.7)
x 1961-2000 (s)	14.07. (7.6)
Max (Jahr)	27.07. (1980)
Min (Jahr)	24.06. (2000)
Trend /10a (1961-2000)	-2.8
Trend /40a (1961-2000)	-11.2
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.05$
Anzahl der Stationen	41
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Johannisbeere	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
PR	14.07.	$PR_{J0} = 310.673 - 2.67332 \cdot \varphi + 0.417979 \cdot \lambda + 0.0377717 \cdot h$	3.5 d



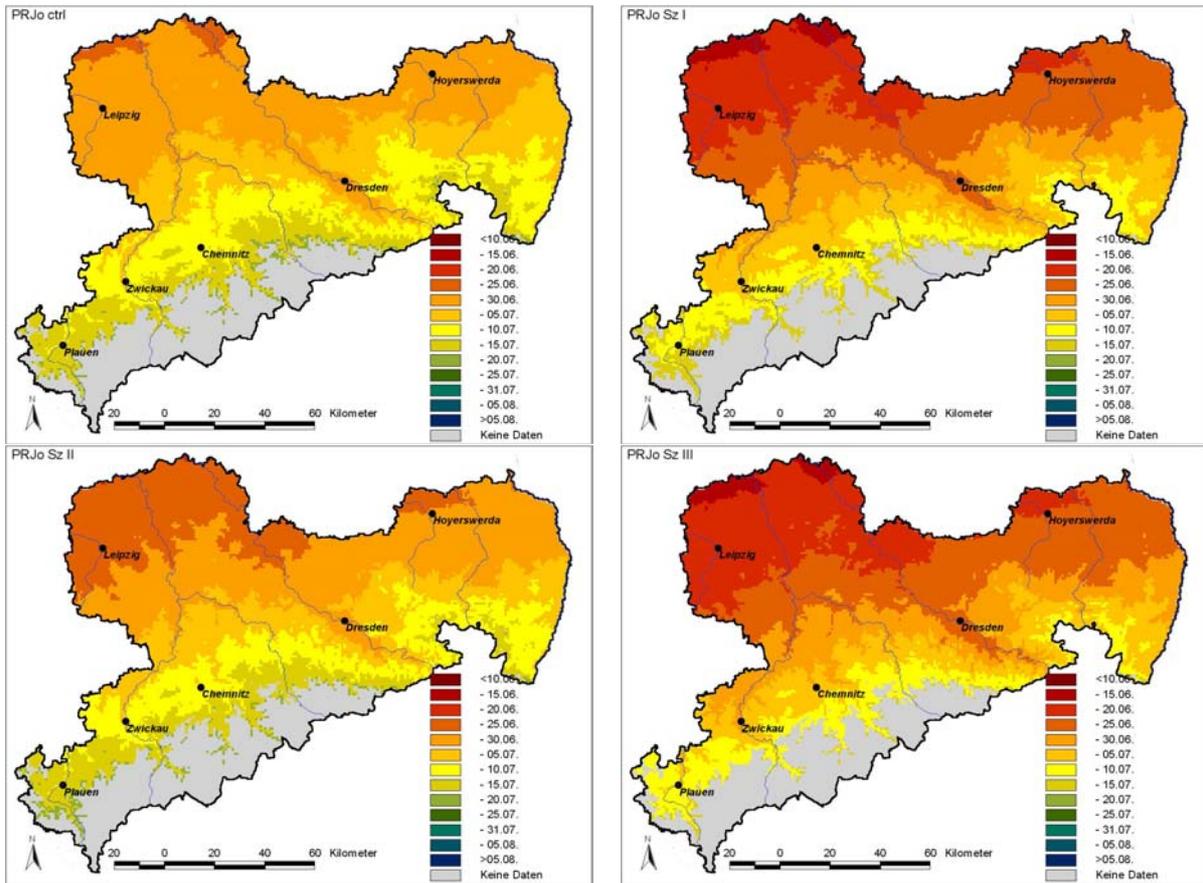
Karte 1: 41 Phänostationen

Karte 2: 4 Klimastationen

Karte 3: Phänomodell PR_{J0}

Phänomodell PR _{J0} Starttag: BB	$T_B = 0.0 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_S = 1066.6 \text{ K}$; MAE = 3.1 d, RMSE = 3.9 d
--	---

SZENARIO



ΔPR_{J_0}

Kontrolllauf 185 (04.07.)	Szenario I 178 (-7 d)
Szenario II 183 (-2 d)	Szenario III 178 (-7 d)

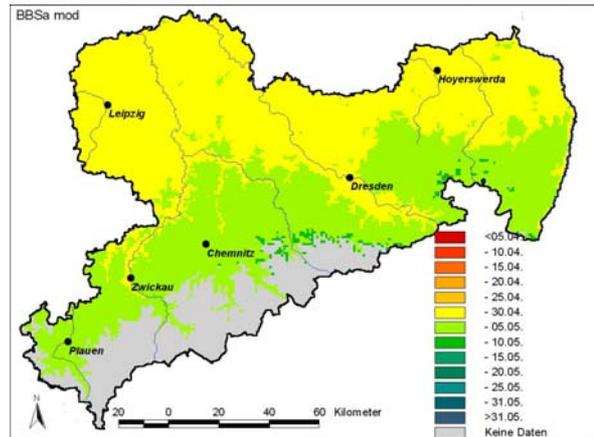
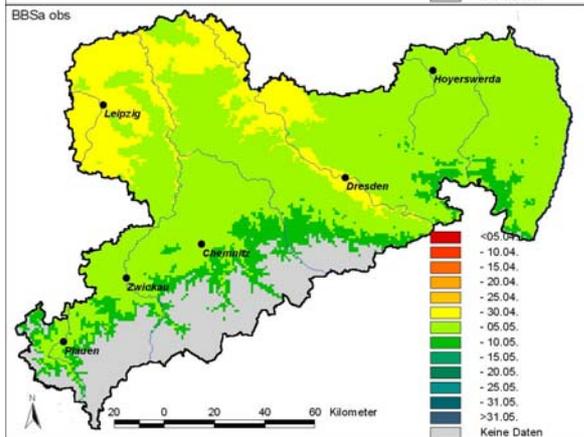
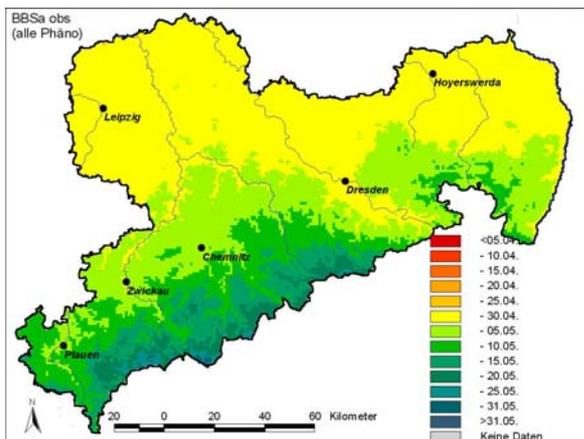
Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

BEOBACHTUNG

Sauerkirsche	Beginn Blüte
Abkürzung	BB _{Sa}
x 1961-1990 (s)	05.05. ^a (7.5)
x 1991-2000 (s)	01.05. ^a (5.6)
x 1961-2000 (s)	04.05. (7.2)
Max (Jahr)	15.05. (1970)
Min (Jahr)	15.04. (1961)
Trend /10a (1961-2000)	-0.9
Trend /40a (1961-2000)	-3.6
Signifikanzniveau	-
Anzahl der Stationen	37
Höchste Station	760 m – Altenberg (Weißeritzkreis)

(a, b signifikante Differenz (p≤0.05); t-Test)

Sauerkirsche	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
BB	04.05.	$BB_{Sa} = -86.2556 + 3.85885 \cdot \varphi + 0.061661 \cdot \lambda + 0.0383471 \cdot h$	1.2 d



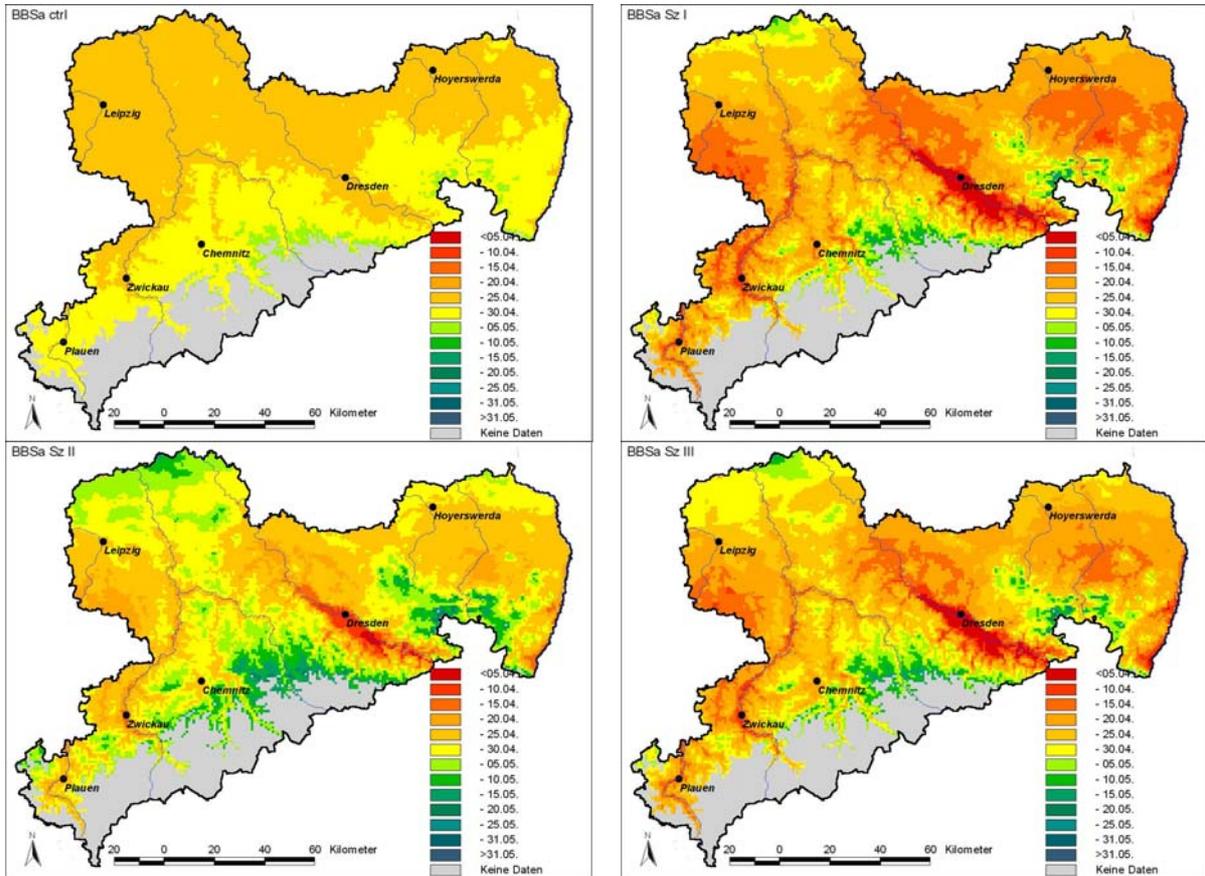
Karte 1: 37 Phänostationen

Karte 2: 4 Klimastationen

Karte 3: Phänomodell BB_{Sa}

Phänomodell BB _{Sa} Starttermin: 01.01.	T _B = 6.6 °C, T _S = 73.5 K; MAE = 4.0 d, RMSE = 5.2 d
---	--

SZENARIO



ΔBB_{Sa}

Kontrolllauf 118 (28.04.)	Szenario I 113 (-5 d)
Szenario II 120 (+2 d)	Szenario III 116 (-2 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

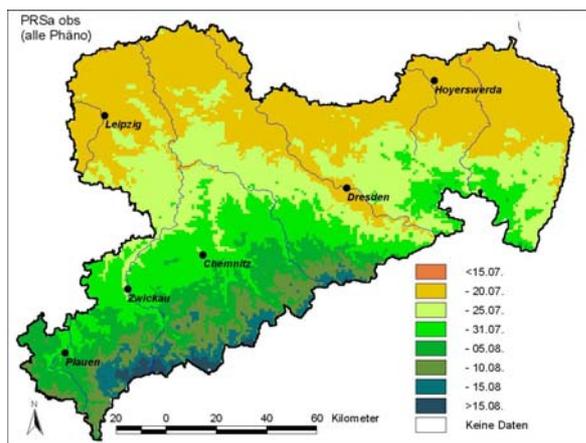
<i>Prunus cerasus</i> (Sauerkirsche)	PR
--------------------------------------	----

BEOBACHTUNG

Sauerkirsche	Beginn Pflückreife
Abkürzung	PR_{Sa}
x 1961-1990 (s)	30.07. ^a (5.6)
x 1991-2000 (s)	21.07. ^b (8.5)
x 1961-2000 (s)	28.07. (7.5)
Max (Jahr)	06.08. (1991)
Min (Jahr)	09.07. (2000)
Trend /10a (1961-2000)	-2.8
Trend /40a (1961-2000)	-11.2
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.05$
Anzahl der Stationen	30
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Sauerkirsche	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
PR	28.07.	$PR_{Sa} = 180.284 + 0.542181 \cdot \varphi - 1.02952 \cdot \lambda + 0.0402908 \cdot h$	2.1 d



Phänommodell PR_{Sa} Starttag: BB	$T_B = 0.0 \text{ °C}$, $T_S = 1238.7 \text{ K}$; MAE = 3.4 d, RMSE = 4.1 d
--	--

ΔPR_{Sa}

Kontrolllauf	Szenario I
201 (20.07.)	196 (-5 d)
Szenario II	Szenario III
200 (-1 d)	195 (-6 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Ribes uva-crispa (Stachelbeere)

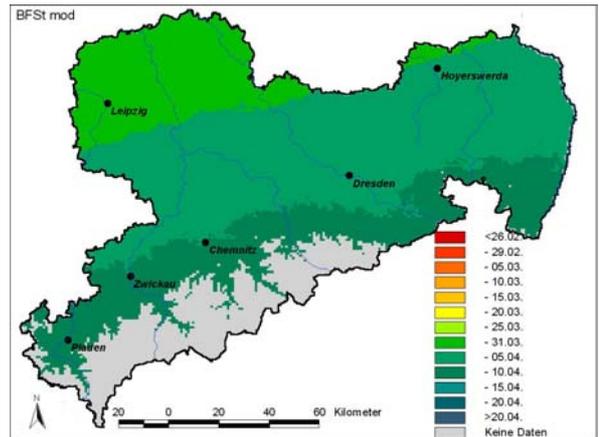
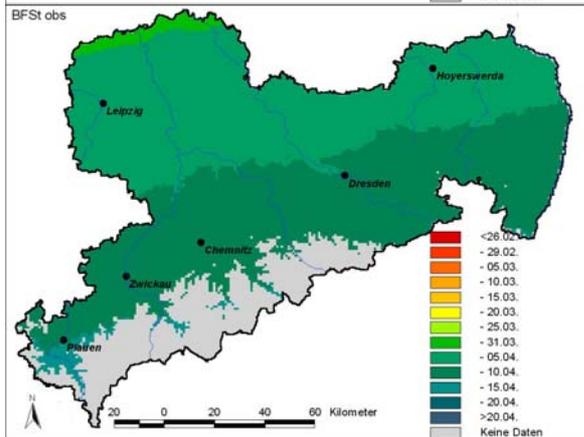
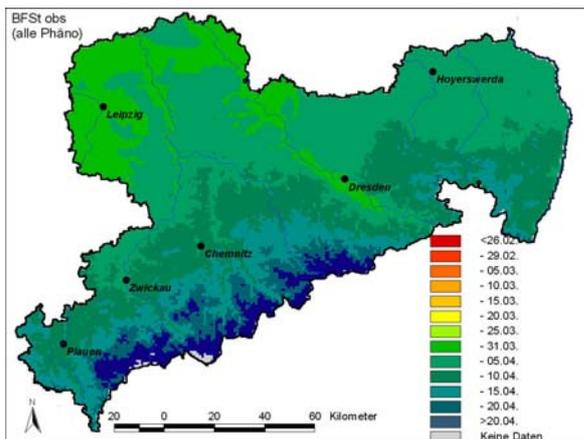
BF

BEOBACHTUNG

Stachelbeere	Beginn Blattentfaltung
Abkürzung	BF _{St}
x 1961-1990 (s)	10.04. ^a (10.0)
x 1991-2000 (s)	03.04. ^b (8.0)
x 1961-2000 (s)	08.04. (10.0)
Max (Jahr)	26.04. (1970)
Min (Jahr)	17.03. (1990)
Trend /10a (1961-2000)	-3.0
Trend /40a (1961-2000)	-12.0
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.05$
Anzahl der Stationen	63
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Stachelbeere	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
BF	08.04.	$BF_{St} = -192.147 + 5.08522 \cdot \varphi + 1.26304 \cdot \lambda + 0.0432163 \cdot h$	3.3 d



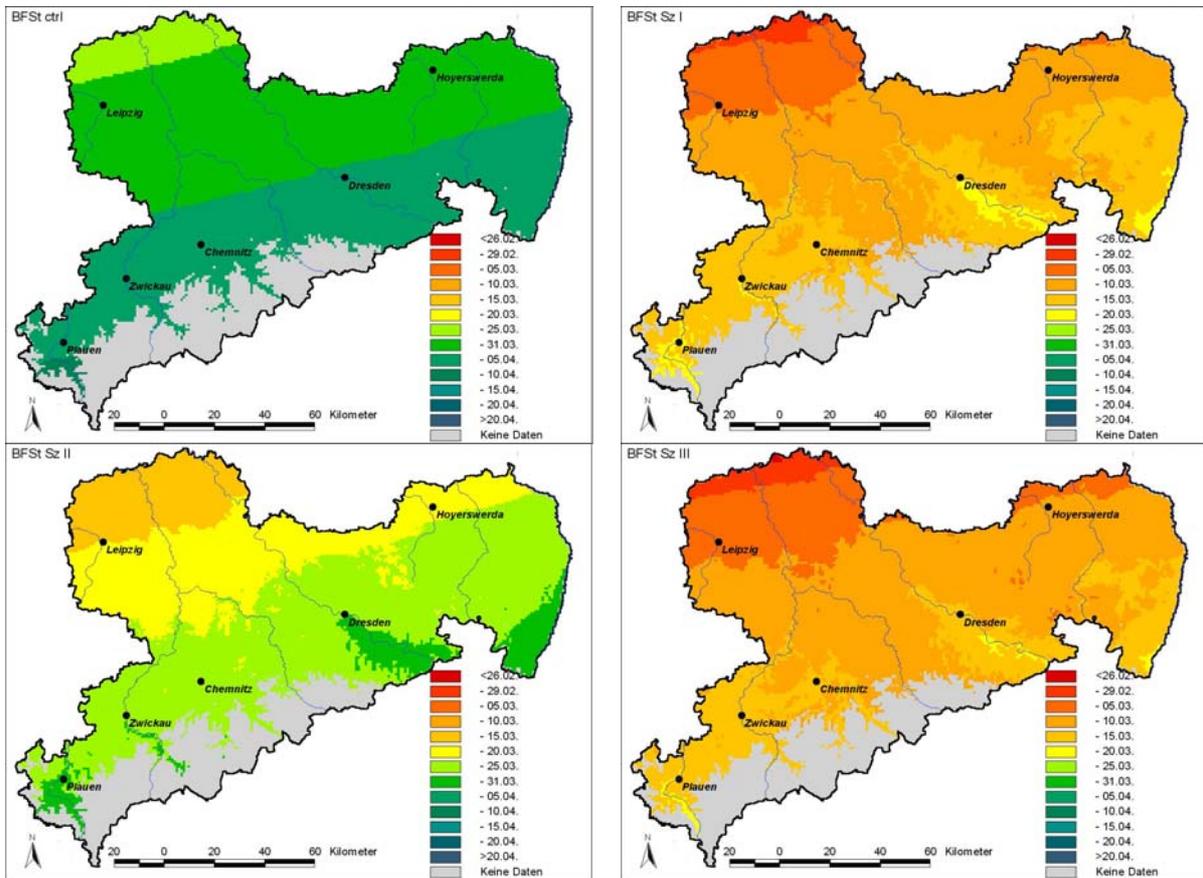
Karte 1: 63 Phänostationen

Karte 2: 5 Klimastationen

Karte 3: Phänomodell BF_{St}

Phänomodell BF _{St} Starttermin: 01.01.	$T_B = 1.2 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_S = 163.0 \text{ K}$; MAE = 6.0 d, RMSE = 8.2 d
---	---

SZENARIO



ΔBF_{St}

Kontrolllauf 91 (01.04.)	Szenario I 68 (-23 d)
Szenario II 80 (-11 d)	Szenario III 67 (-24 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Ribes uva-crispa (Stachelbeere)

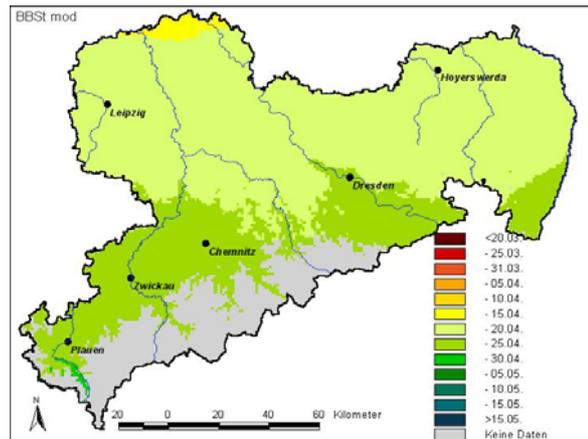
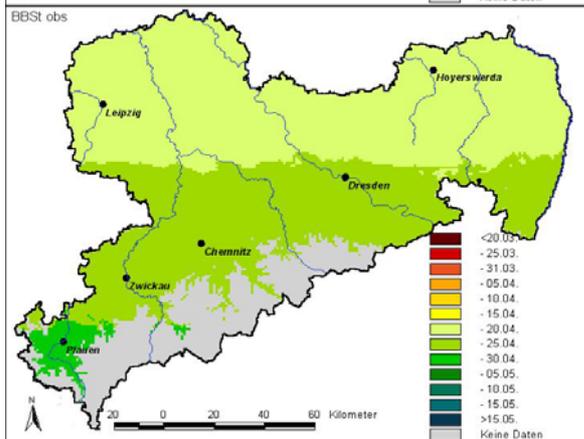
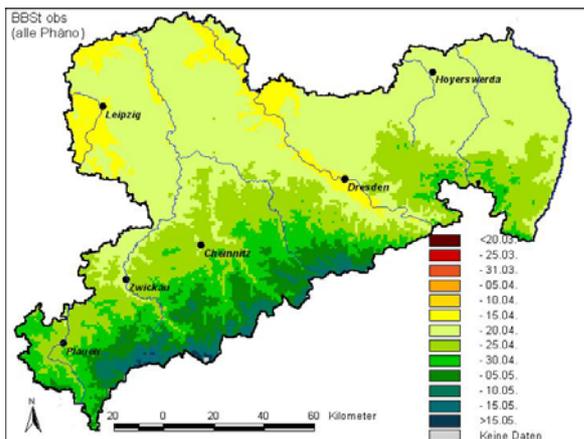
BB

BEOBACHTUNG

Stachelbeere	Beginn Blüte
Abkürzung	BB _{St}
x 1961-1990 (s)	24.04. ^a (9.5)
x 1991-2000 (s)	19.04. ^b (5.3)
x 1961-2000 (s)	23.04. (8.8)
Max (Jahr)	08.05. (1970)
Min (Jahr)	30.03. (1990)
Trend /10a (1961-2000)	-2.2
Trend /40a (1961-2000)	-8.8
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.10$
Anzahl der Stationen	63
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz (p<0.05); t-Test)

Stachelbeere	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
BB	23.04.	$BB_{St} = -156.854 + 4.88603 \cdot \varphi + 0.486457 \cdot \lambda + 0.0429093 \cdot h$	1.4 d



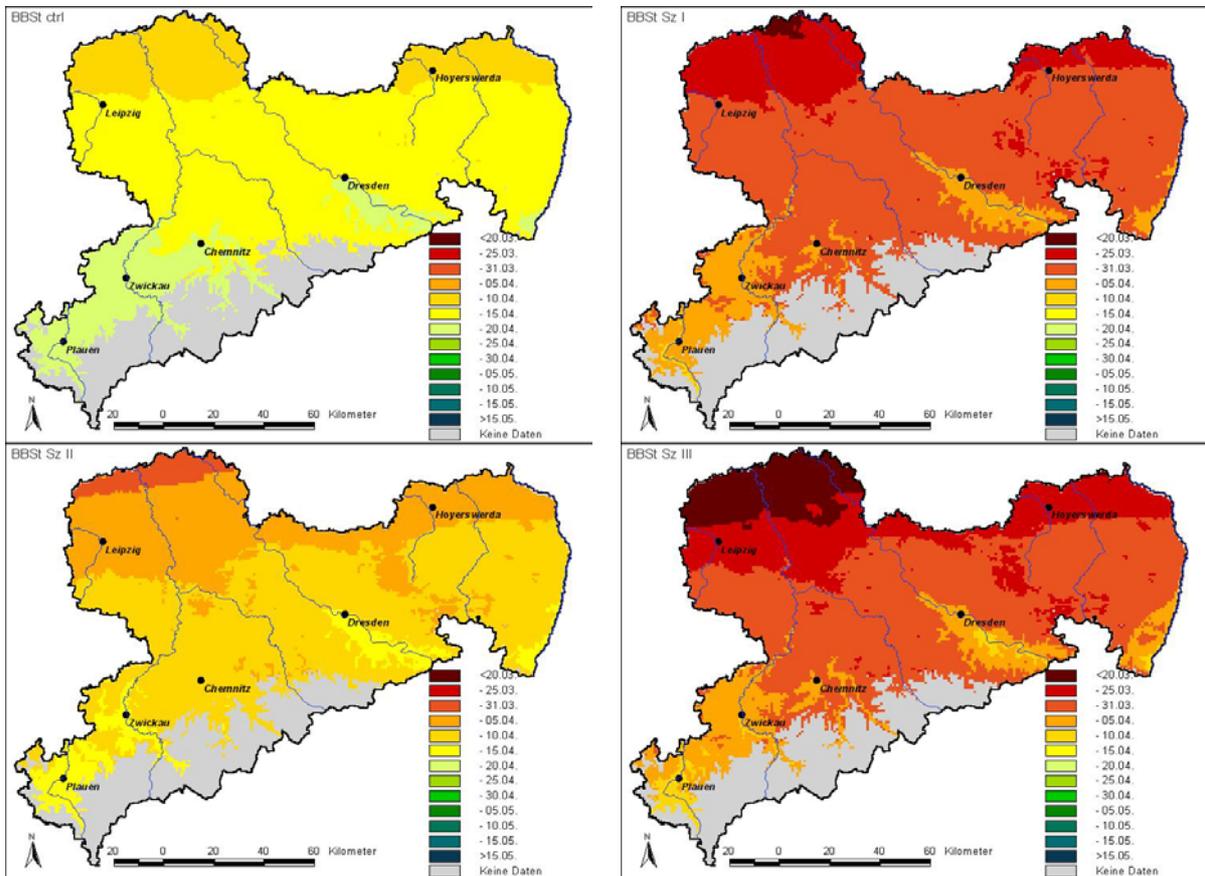
Karte 1: 63 Phänostationen

Karte 2: 5 Klimastationen

Karte 3: Phänomodell BB_{St}

Phänomodell BB _{St} Starttermin: BF	$T_B = 0.0 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_S = 99.7 \text{ K}$; MAE = 2.4 d, RMSE = 3.0 d
---	--

SZENARIO



ΔBB_{St}

Kontrolllauf 103 (13.04.)	Szenario I 87 (-16 d)
Szenario II 97 (-6 d)	Szenario III 86 (-17 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Ribes uva-crispa (Stachelbeere)

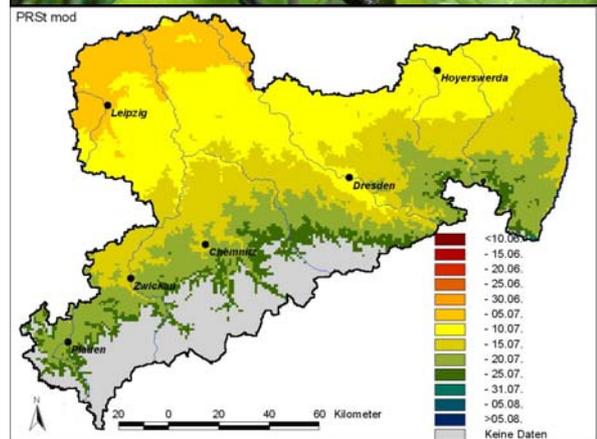
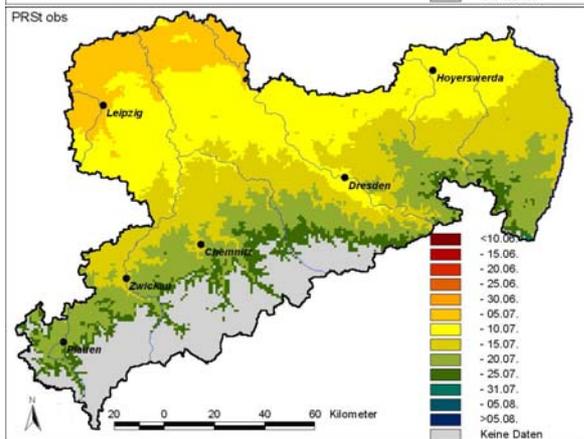
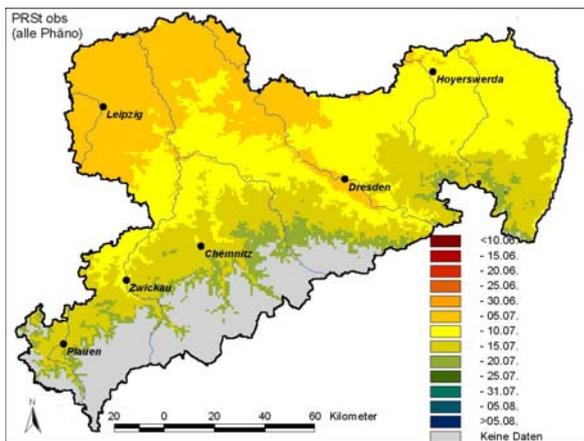
PR

BEOBACHTUNG

Stachelbeere	Beginn Pflückreife
Abkürzung	PR _{St}
x 1961-1990 (s)	19.07. ^a (5.8)
x 1991-2000 (s)	14.07. ^b (7.2)
x 1961-2000 (s)	18.07. (6.4)
Max (Jahr)	30.07. (1980)
Min (Jahr)	02.07. (2000)
Trend /10a (1961-2000)	-1.6
Trend /40a (1961-2000)	-6.4
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.10$
Anzahl der Stationen	55
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Stachelbeere	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
PR	18.07.	$PR_{St} = 105.285 + 1.17754 \cdot \varphi + 1.54348 \cdot \lambda + 0.0388636 \cdot h$	3.3 d



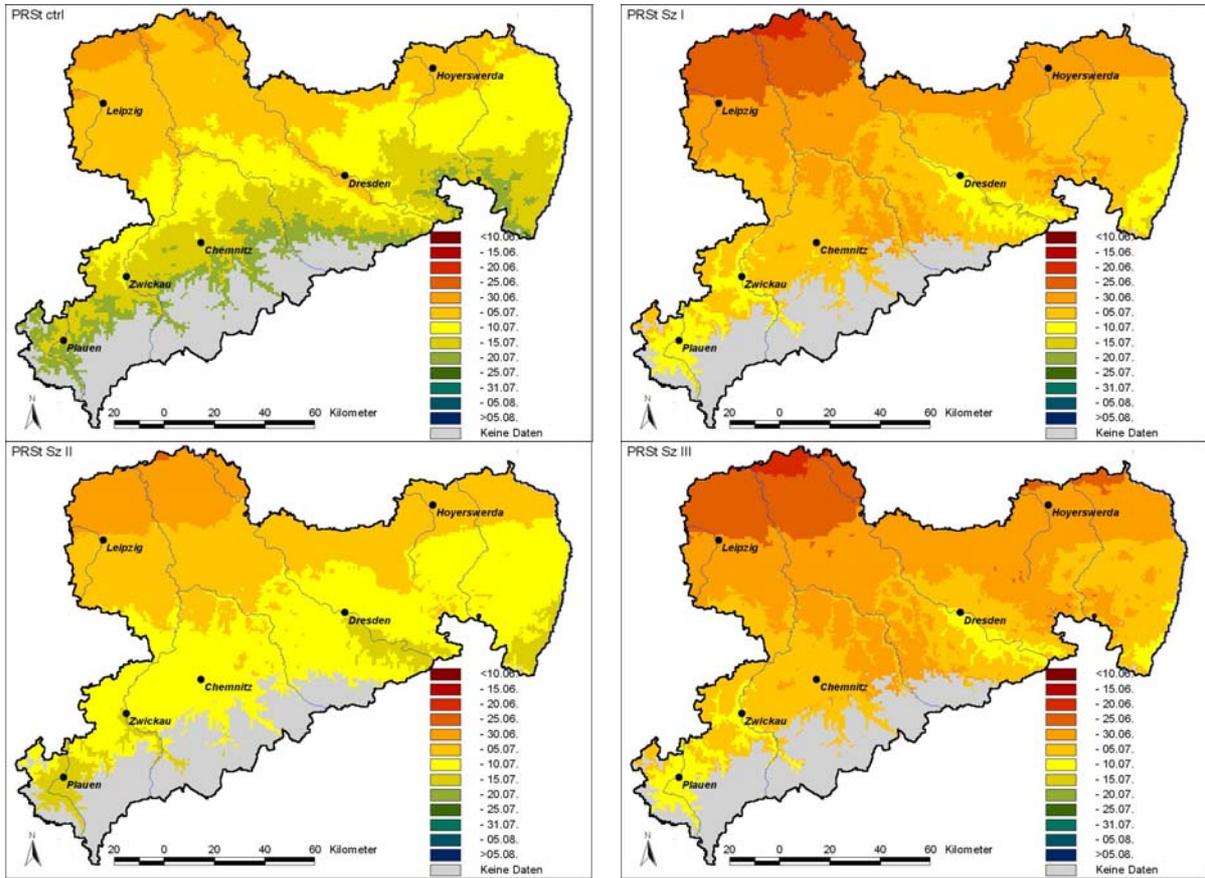
Karte 1: 55 Phänostationen

Karte 2: 5 Klimastationen

Karte 3: Phänomodell PR_{St}

Phänomodell PR _{St} Starttag: BB	$T_B = 0.0 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_S = 1156.4 \text{ K}$; MAE = 2.7 d, RMSE = 3.3 d
--	---

SZENARIO



ΔPR_{St}

Kontrolllauf 188 (07.07.)	Szenario I 179 (-9 d)
Szenario II 184 (-4 d)	Szenario III 179 (-9 d)

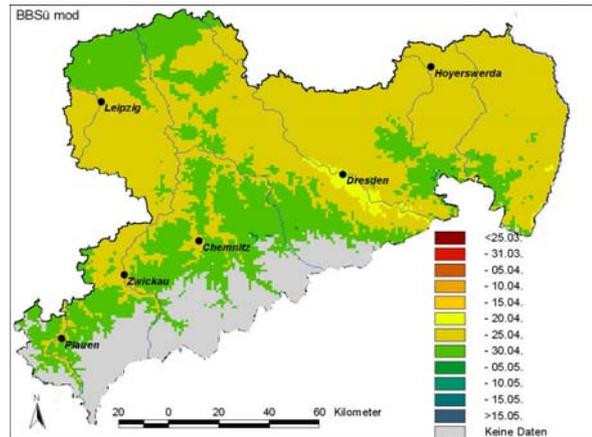
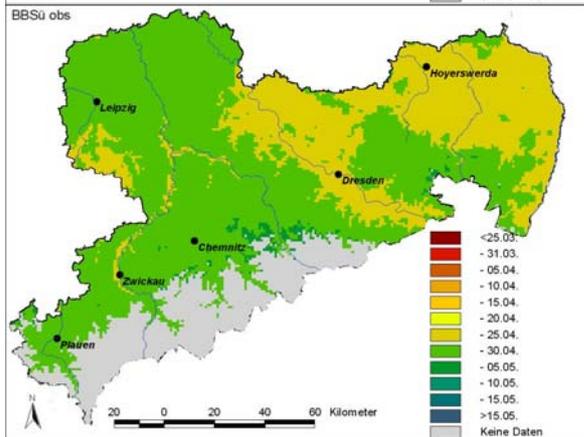
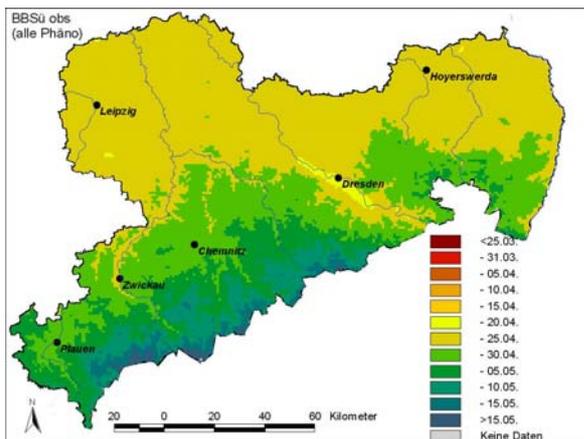
Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

BEOBACHTUNG

Süßkirsche	Beginn Blüte
Abkürzung	BB_{Sü}
x 1961-1990 (s)	28.04. ^a (8.7)
x 1991-2000 (s)	23.04. ^b (4.0)
x 1961-2000 (s)	27.04. (8.0)
Max (Jahr)	10.05. (1970)
Min (Jahr)	08.04. (1990)
Trend /10a (1961-2000)	-1.9 d/10a
Trend /40a (1961-2000)	-7.6 d/40a
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.10$
Anzahl der Stationen	58
Höchste Station	760 m – Altenberg (Weißeritzkreis)

(a, b signifikante Differenz (p≤0.05); t-Test)

Süßkirsche	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
BB	27.04.	$BB_{Sü} = -119.828 + 4.4081 \cdot \varphi + 0.0735464 \cdot \lambda + 0.0372774 \cdot h$	1.4 d



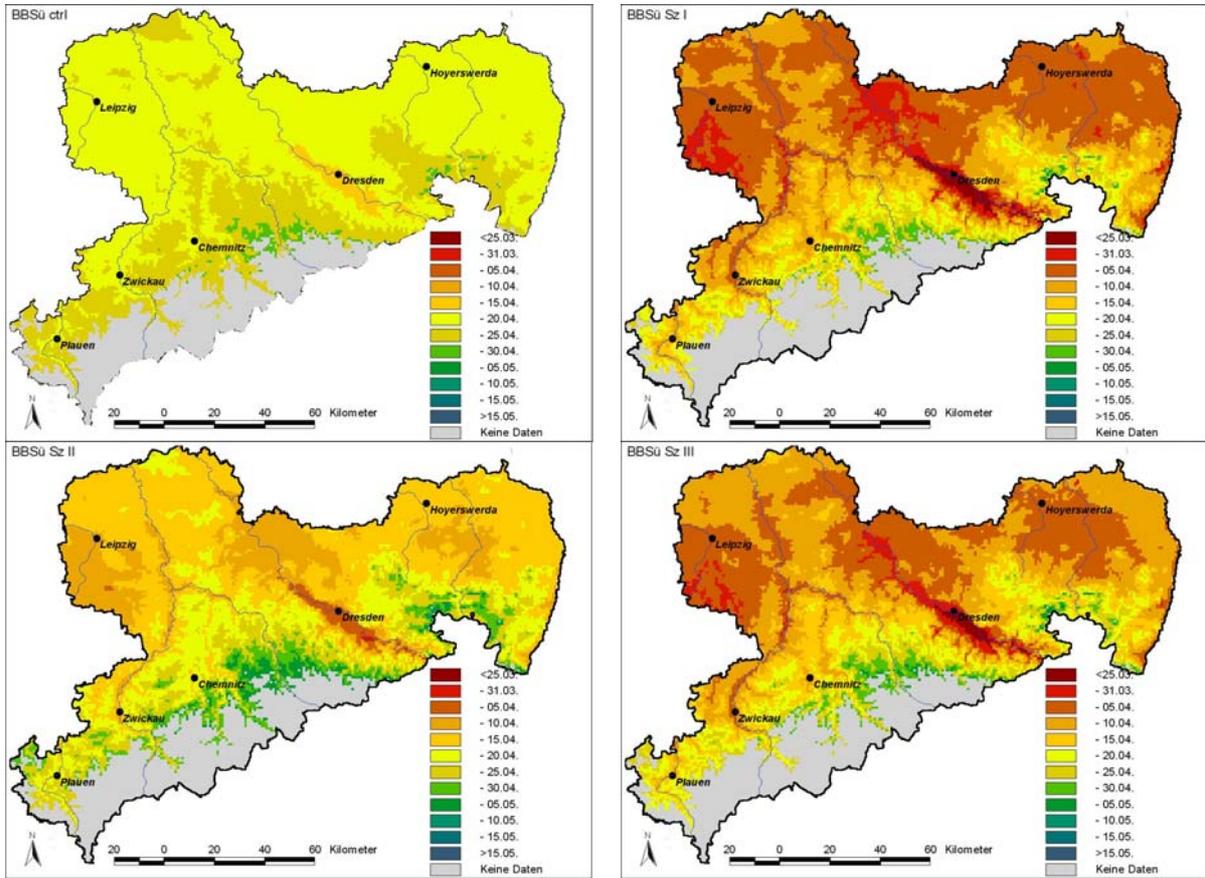
Karte 1: 58 Phänostationen

Karte 2: 5 Klimastationen

Karte 3: Phänomodell BB_{Sü}

Phänomodell BB _{Sü} Starttermin: 01.01.	$T_B = 2.7 \text{ °C}, T_S = 187.5 \text{ K};$ MAE = 3.9 d, RMSE = 5.7 d
---	---

SZENARIO



Δ BBSü

Kontrolllauf 111 (21.04.)	Szenario I 102 (-9 d)
Szenario II 109 (-2 d)	Szenario III 104 (-7 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

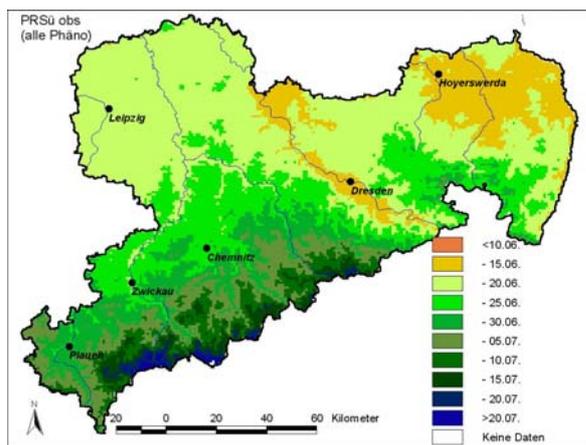
<i>Prunus avium</i> (Süßkirsche)	PR
----------------------------------	----

BEOBACHTUNG

Süßkirsche	Beginn Pflückreife
Abkürzung	PR _{Sü}
x 1961-1990 (s)	20.06. ^a (4.8)
x 1991-2000 (s)	17.06. ^b (7.9)
x 1961-2000 (s)	19.06. (5.7)
Max (Jahr)	01.07. (1991)
Min (Jahr)	08.06. (2000)
Trend /10a (1961-2000)	-0.5 d/10a
Trend /40a (1961-2000)	-2.0 d/40a
Signifikanzniveau	-
Anzahl der Stationen	9
Höchste Station	550 m – Zschorlau (Westerzgebirge)

(a, b signifikante Differenz (p<0.05); t-Test)

Süßkirsche	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
PR	19.06.	PR _{Sü} = -255.738 + 8.62352·φ - 2.00173·λ + 0.0539913·h	1.9 d



Phänommodell PR _{Sü} Starttag: BB	T _B = 0.0 °C, T _S = 661.2 K; MAE = 2.9 d, RMSE = 3.7 d
---	---

$\Delta PR_{Sü}$

Kontrolllauf	Szenario I
162 (11.06.)	156 (-6 d)
Szenario II	Szenario III
161 (-1 d)	157 (-5 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Avena sativa (Hafer)

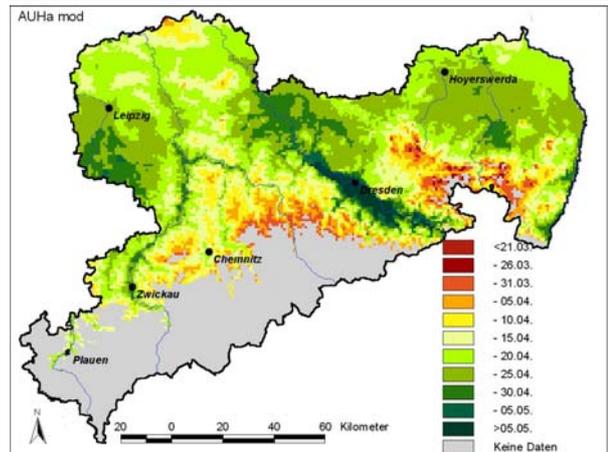
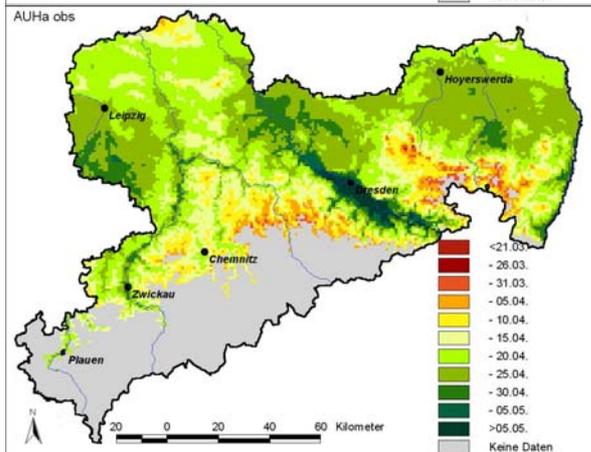
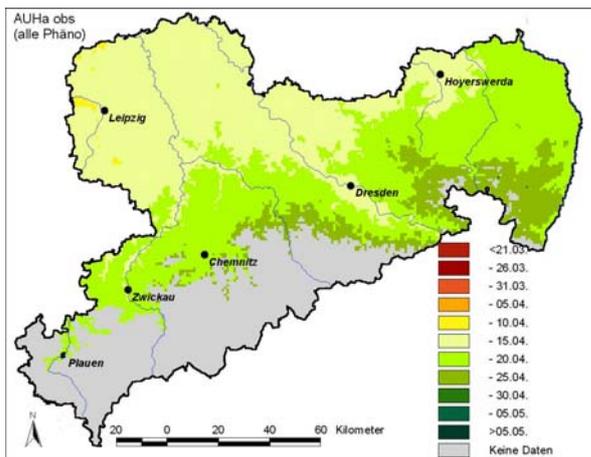
AU

BEOBACHTUNG

Hafer	Beginn Auflaufen
Abkürzung	AU _{Ha}
x 1961-1990 (s)	21.04. ^a (8.1)
x 1991-2000 (s)	18.04. ^b (5.3)
x 1961-2000 (s)	20.04. (7.5)
Max (Jahr)	09.05. (1970)
Min (Jahr)	07.04. (1961)
Trend /10a (1961-2000)	-0.7
Trend /40a (1961-2000)	-2.8
Signifikanzniveau	-
Anzahl der Stationen	34
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz (p≤0.05); t-Test)

Hafer	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
AU	20.04.	$AU_{Ha} = -91.1793 + 2.60057 \cdot \varphi + 1.96628 \cdot \lambda + 0.0382789 \cdot h$	3.5 d



Karte 1: 34 Phänostationen

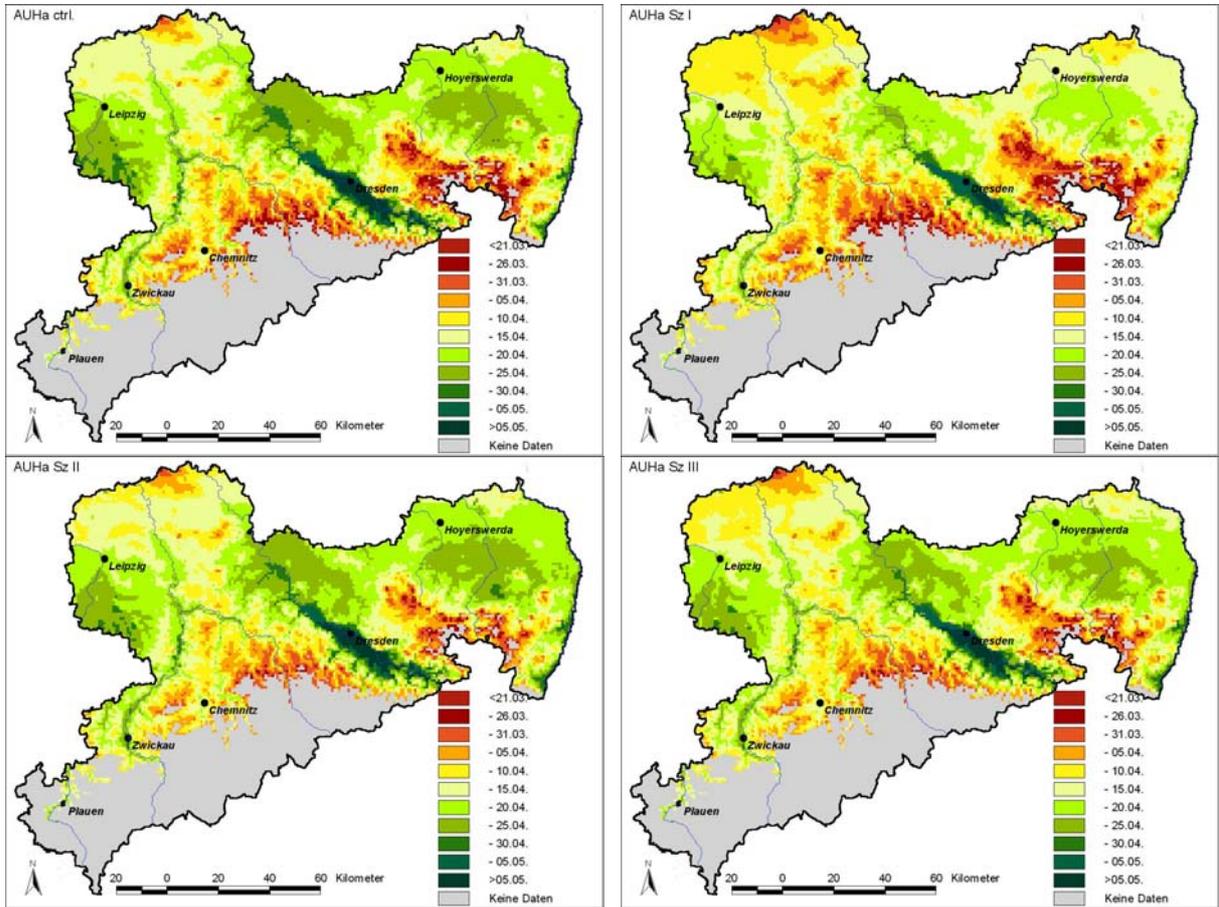
Karte 2: 4 Klimastationen

Karte 3: Phänomodell AU_{Ha}

Phänomodell AU_{Ha}
Starttermin: 28.02.

$T_B = 0.3 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_S = 219.6 \text{ K}$;
MAE = 3.4 d, RMSE = 4.5 d

SZENARIO



ΔAU_{Ha}

Kontrolllauf 95 (05.04.)	Szenario I 93 (-2 d)
Szenario II 97 (+2 d)	Szenario III 96 (+1 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

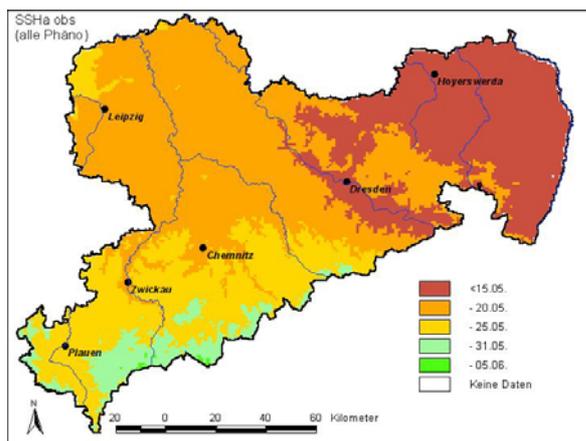
<i>Avena sativa</i> (Hafer)	SS
-----------------------------	----

BEOBACHTUNG

Hafer	Beginn Schossen
Abkürzung	SS _{Ha}
x 1961-1990 (s)	20.05. ^a (4.3)
x 1991-2000 (s)	17.05. ^b (4.4)
x 1961-2000 (s)	19.05. (4.4)
Max (Jahr)	27.05. (1979)
Min (Jahr)	12.05. (1993)
Trend /10a (1961-2000)	-0.9
Trend /40a (1961-2000)	-3.6
Signifikanzniveau	-
Anzahl der Stationen	15
Höchste Station	550 m – Zschorlau (Westerzgebirge)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Hafer	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
SS	19.05.	$SS_{Ha} = -79.2234 + 5.12429 \cdot \varphi - 3.75825 \cdot \lambda + 0.0217117 \cdot h$	2.4 d



Phänomodell SS _{Ha}	$SS = 111.609 + 0.465 \cdot AU - 0.078 \cdot T_S$ MAE = 2.2 d, RMSE = 2.7 d
------------------------------	--

ΔSS_{Ha}

Kontrolllauf	Szenario I
138 (18.05.)	137 (-1 d)
Szenario II	Szenario III
139 (+1 d)	138 (0 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

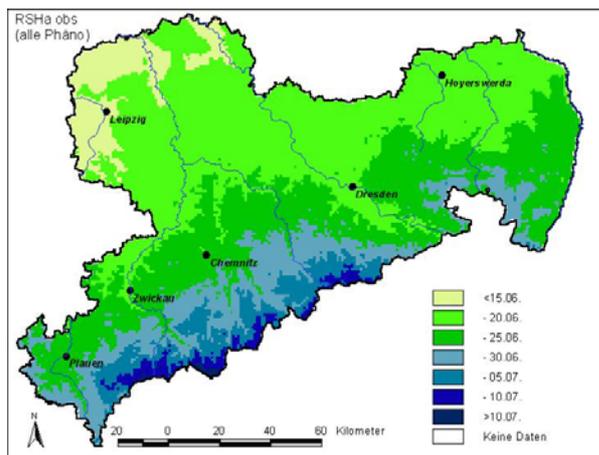
<i>Avena sativa</i> (Hafer)	RS
-----------------------------	----

BEOBACHTUNG

Hafer	Beginn Rispenziehen
Abkürzung	RS _{Ha}
x 1961-1990 (s)	25.06. ^a (4.6)
x 1991-2000 (s)	19.06. ^b (6.3)
x 1961-2000 (s)	23.06. (5.6)
Max (Jahr)	04.07. (1965)
Min (Jahr)	11.06. (2000)
Trend /10a (1961-2000)	-2.4
Trend /40a (1961-2000)	-9.6
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.01$
Anzahl der Stationen	28
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Hafer	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
RS	23.06.	$RS_{Ha} = 43.481 + 1.91146 \cdot \varphi + 1.66594 \cdot \lambda + 0.0334152 \cdot h$	2.3 d



Phänomodell RS _{Ha}	$RS = 224.32 + 0.117 \cdot SS - 0.094 \cdot T_S$ MAE = 3.7 d, RMSE = 4.5 d
------------------------------	---

ΔRS_{Ha}

Kontrolllauf 173 (22.06.)	Szenario I 173 (0 d)
Szenario II 174 (+1 d)	Szenario III 174 (+1 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

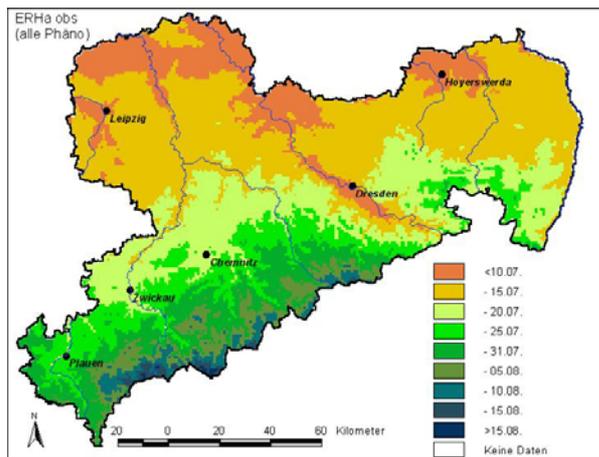
<i>Avena sativa</i> (Hafer)	ER
-----------------------------	----

BEOBACHTUNG

Hafer	Beginn Ernte
Abkürzung	ER _{Ha}
x 1961-1990 (s)	22.08. ^a (7.9)
x 1991-2000 (s)	22.08. ^a (7.8)
x 1961-2000 (s)	22.08. (8.0)
Max (Jahr)	11.09. (1996)
Min (Jahr)	04.08. (1964)
Trend /10a (1961-2000)	+1.3
Trend /40a (1961-2000)	+5.2
Signifikanzniveau	-
Anzahl der Stationen	34
Höchste Station	925 m – Oberwiesenthal (Annaberg)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Hafer	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
ER	22.08.	$ER_{Ha} = 127.153 + 1.79546 \cdot \varphi - 0.216235 \cdot \lambda + 0.0461499 \cdot h$	2.5 d



Phänomodell ER _{Ha}	$ER = -70.492 + 0.852 \cdot RS + 0.156 \cdot T_S$ MAE = 5.4 d, RMSE = 7.6 d
------------------------------	--

ΔER_{Ha}

Kontrolllauf	Szenario I
233 (21.08.)	233 (0 d)
Szenario II	Szenario III
234 (+1 d)	234 (+1 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Secale cereale (Winterroggen)

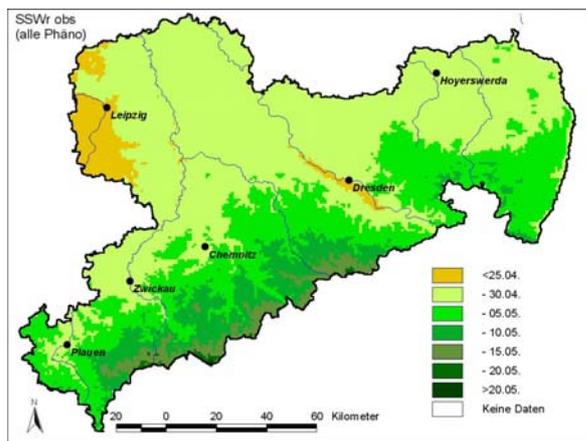
SS

BEOBACHTUNG

Winterroggen	Beginn Schossen
Abkürzung	SS _{Wr}
x 1961-1990 (s)	01.05. ^a (5.3)
x 1991-2000 (s)	25.04. ^b (6.5)
x 1961-2000 (s)	30.04. (6.2)
Max (Jahr)	11.05. (1970)
Min (Jahr)	18.04. (2000)
Trend /10a (1961-2000)	-2.2
Trend /40a (1961-2000)	-8.8
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.01$
Anzahl der Stationen	20
Höchste Station	620 m – Doerthal (Mittlerer Erzgebirgskreis)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Winterroggen	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
SS	30.04.	$SS_{Wr} = -190.029 + 5.50736 \cdot \varphi + 1.47844 \cdot \lambda + 0.0318374 \cdot h$	2.5 d



Phänomodell SS _{Wr}	$SS = 138.396 - 0.584 \cdot T_{02} - 1.039 \cdot T_{03} - 2.309 \cdot T_{04}$ MAE = 2.7 d, RMSE = 3.5 d
------------------------------	--

ΔSS_{Wr}

Kontrolllauf 117 (27.04.)	Szenario I 114 (-3 d)
Szenario II 117 (0 d)	Szenario III 115 (-2 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

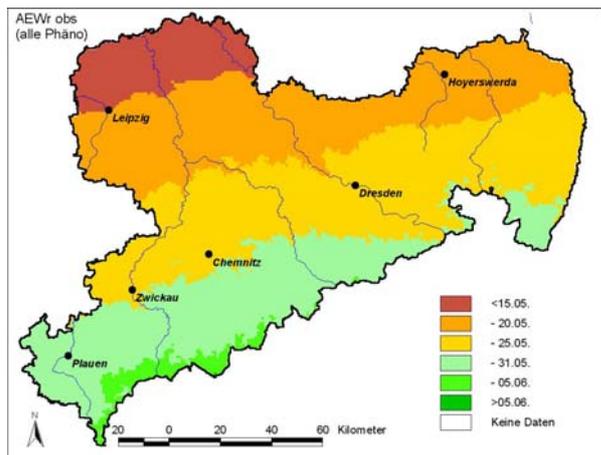
<i>Secale cereale</i> (Winterroggen)	AE
--------------------------------------	----

BEOBACHTUNG

Winterroggen	Beginn Ährenschieben
Abkürzung	AE_{Wr}
x 1961-1990 (s)	24.05. ^a (5.1)
x 1991-2000 (s)	19.05. ^b (6.4)
x 1961-2000 (s)	23.05. (5.8)
Max (Jahr)	05.06. (1970)
Min (Jahr)	08.05. (2000)
Trend /10a (1961-2000)	-2.0
Trend /40a (1961-2000)	-8.0
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.05$
Anzahl der Stationen	16
Höchste Station	550 m – Zschorlau (Westerzgebirge)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Winterroggen	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
AE	23.05.	$AE_{Wr} = 597.173 - 9.34756 \cdot \varphi + 1.46965 \cdot \lambda + 0.0105254 \cdot h$	2.7 d



Phänomodell AE_{Wr}	$AE = 69.404 + 0.708 \cdot SS - 0.993 \cdot T_{05};$ $MAE = 1.7 \text{ d}, RMSE = 2.4 \text{ d}$
-----------------------	---

ΔAE_{Wr}

Kontrolllauf	Szenario I
141 (21.05.)	138 (-3 d)
Szenario II	Szenario III
141 (0 d)	139 (-2 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Secale cereale (Winterroggen)

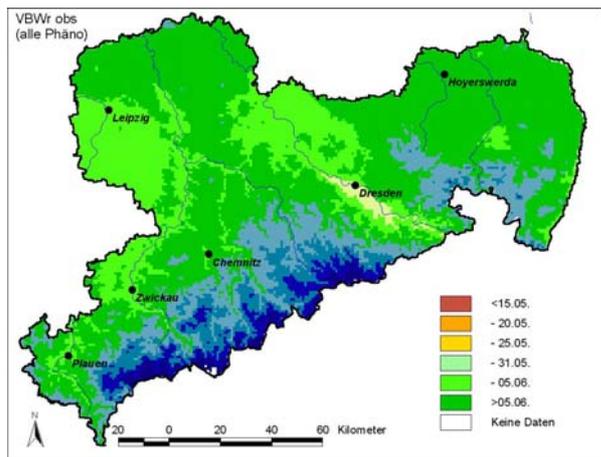
VB

BEOBACHTUNG

Winterroggen	Beginn Vollblüte
Abkürzung	VB _{Wr}
x 1961-1990 (s)	09.06. ^a (4.5)
x 1991-2000 (s)	07.06. ^a (6.8)
x 1961-2000 (s)	08.06. (5.2)
Max (Jahr)	19.06. (1962)
Min (Jahr)	26.05. (2000)
Trend /10a (1961-2000)	-2.0
Trend /40a (1961-2000)	-8.0
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.05$
Anzahl der Stationen	18
Höchste Station	620 m – Doerthal (Mittlerer Erzgebirgskreis)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Winterroggen	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
VB	08.06.	$VB_{Wr} = -735.697 + 17.1396 \cdot \varphi + 0.418856 \cdot \lambda + 0.0521048 \cdot h$	1.8 d



Phänomodell VB _{Wr}	$VB = 74.329 + 0.755 \cdot AE - 0.095 \cdot T_S;$ MAE = 2.4 d, RMSE = 3.0 d
------------------------------	--

ΔVB_{Wr}

Kontrolllauf	Szenario I
157 (06.06.)	156 (-1 d)
Szenario II	Szenario III
157 (0 d)	157 (0 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Secale cereale (Winterroggen)

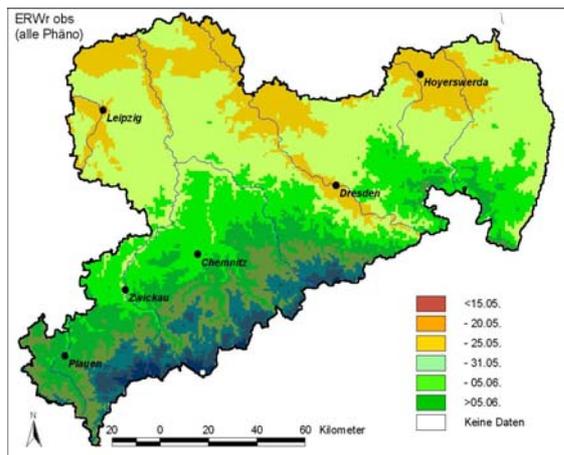
ER

BEOBACHTUNG

Winterroggen	Beginn Ernte
Abkürzung	ER_{Wr}
x 1961-1990 (s)	05.08. ^a (7.5)
x 1991-2000 (s)	05.08. ^a (8.0)
x 1961-2000 (s)	05.08. (7.5)
Max (Jahr)	21.08. (1996)
Min (Jahr)	21.07. (1994)
Trend /10a (1961-2000)	+1.0
Trend /40a (1961-2000)	+4.0
Signifikanzniveau	$\alpha \leq 0.05$
Anzahl der Stationen	20
Höchste Station	550 m – Zschorlau (Westerzgebirge)

(a, b signifikante Differenz ($p \leq 0.05$); t-Test)

Winterroggen	Datum	Georegressionsgleichung	MAE
ER	05.08.	$ER_{Wr} = 23.7296 + 3.66384 \cdot \varphi - 0.442307 \cdot \lambda + 0.0484762 \cdot h$	1.9 d



Phänomodell ER_{Wr} Starttag: VB	$T_B = 0.0, T_S = 918.5 \text{ K};$ $MAE = 2.4 \text{ d}, RMSE = 3.0 \text{ d}$
---------------------------------------	--

ΔER_{Wr}

Kontrolllauf 215 (03.08.)	Szenario I 213 (-2 d)
Szenario II 215 (0 d)	Szenario III 214 (-1 d)

Kontrolllauf: 1981-2000, Szenario I: 2021-2030, Szenario II: 2031-2040, Szenario III: 2041-2050

Anschriften:

PD Dr. F.-M. Chmielewski
Dipl. Geogr. A. Müller

Humboldt-Universität zu Berlin
Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät
Institut für Pflanzenbauwissenschaften
Lehrgebiet Agrarmeteorologie
Albrecht-Thaer-Weg 5
D-14195 Berlin

Tel. 030 - 314 71210
Fax. 030 - 314 71211
chmielew@rz.hu-berlin.de

<http://www.agrar.hu-berlin.de/pflanzenbau/agrarmet/>

Dipl. Met. W. Kuchler

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Ref. 22 - Gebietsbezogener Immissionsschutz / Klimawandel
Zur Wetterwarte 11
D-01109 Dresden

Tel.: 0351 - 8312 661
wilfried.kuechler@lfug.sachsen.de

<http://www.umwelt.sachsen.de/lfug/>

Gestaltung: Gabriele Solger
gsolger@web.de