

**Beitrag zum Integrierten Klimaschutzprogramm des
Landes Hessen (InKlim 2012) des Fachgebiets Weinbau
der Forschungsanstalt Geisenheim**

**Der Einfluss klimatischer Veränderungen auf die phänologische Entwicklung
der Rebe, die Sorteneignung sowie Mostgewicht und Säurestruktur der
Trauben**

Projektbearbeitung:

**Prof. Dr. H.R. Schultz
Dr. D. Hoppmann
Dipl.-Phys. Marco Hofmann**

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG	3
2 MATERIAL UND METHODEN	4
2.1 Die Wetterdaten	4
2.2 Die Modelle	10
2.2.1 Die Modelle zur Berechnung der phänologischen Eintrittstermine	10
2.2.2 Der Wasserhaushalt.....	11
2.2.3 Der Huglin-Index	12
2.2.4 Das Modell zur Berechnung der Äpfelsäure.....	12
3 ERGEBNISSE	15
3.1 Die phänologischen Eintrittstermine	15
3.1.1 Der Austrieb	15
3.1.2 Der Blühbeginn	15
3.1.3 Der Reifebeginn	20
3.1.4 Die Lesereife	20
3.2 Äpfelsäuregehalt und Mostgewichte	25
3.3 Der Huglin - Index	32
3.4 Der Wasserhaushalt	33
4 FAZIT UND AUSBLICK	37
5 DANKSAGUNG	41
6 LITERATUR	42

1 Einleitung

Die deutschen Weinbauregionen sind durch ein vergleichsweise kühles Klima geprägt, welches sich für die in Deutschland angebauten Rebsorten als besonders geeignet erweist. Die Kombination von Standort, Klima und Rebsorten bildet die Grundlage für regional-typische Weine.

Eine Klimaerwärmung wird sich daher nicht zwangsläufig positiv auf den Weinbau auswirken. Das Ausnahmejahr 2003 zeigte schon einige der zu erwartenden Veränderungen: Ungewöhnlich frühe Lesetermine, Verkürzung der Reifephase, teilweise unharmonische Weine mit hohem Alkoholgehalt bei niedrigen Säurewerten. Letzteres führte auch zur Intervention der Länder Österreich, Deutschland und Luxemburg bei der EU und damit zur erstmaligen Erlaubnis des Gesetzgebers zur Ansäuerung von Weinen und Mosten. Zudem kamen noch Probleme mit der Trockenheit hinzu, die sich für einige Standorte aufgrund geringer Niederschläge im Winter und Frühjahr bis ins Jahr 2004 auswirkten. Das Jahr 2003 brachte aber auch eine Fülle von Rotweinen ungeahnter Qualität. Themen wie Bewässerung, Ansäuerung, Veränderung im Rebsortenspiegel usw. werden derzeit rege diskutiert. Die in diesem Bericht vorgelegten Untersuchungen geben Anhaltspunkte dafür, wie sich die zu erwartenden klimatischen Veränderungen auf den Weinbau in Hessen auswirken werden. Dazu wurden Modelle zur Berechnung der phänologischen Eintrittstermine verwendet, um anhand der vorgegebenen meteorologischen Szenarien die Veränderungen auf die phänologische Entwicklung der Rebe abzuschätzen.

Die Sorteneignung bezüglich der klimatischen Ansprüche ist in Europa mit dem klimatischen Index nach Huglin beschrieben worden (HUGLIN 1983). Dieser Index gewichtet Tagesdurchschnittstemperaturen und Tagesmaximaltemperaturen sowie den Breitengrad über die Periode vom 01.04. bis zum 30.09 und eignet sich gut, um etwaige Veränderungen im Sortenspiegel bei sich änderndem Klima abzuschätzen.

Wassermangel durch längere Trockenperioden kann für viele Rebstandorte zu einem Qualitätsproblem in der Zukunft führen. Vor allem weiße Rebsorten reagieren auf lange Trockenphasen mit der Bildung von teilweise untypischen Aromastoffen. Um die Entwicklung des Wasserhaushalts von Rebstandorten grob abschätzen zu können, wurden anhand der gestellten Szenarien die Veränderungen in der klimatischen Wasserbilanz berechnet.

Wohl bei kaum einem anderen Nahrungs- und Genussmittel wird die Qualität des Produkts stärker diskutiert als beim Wein. Daher ist es sinnvoll auch die Entwicklung wichtiger Traubeninhaltsstoffe zu betrachten. Neben dem Zuckergehalt, ausgedrückt durch das Mostgewicht, der direkt den Alkoholgehalt des Weines beeinflusst, ist die Äpfelsäure einer der wichtigsten Traubeninhaltsstoffe, die einen großen Einfluss auf den Charakter der angebauten Weine ausübt. Bei den Weinen aus dem Jahr 2003 konnte man feststellen, dass die säurearmen und alkoholreichen Weine, die das Jahr zum Teil hervorgebracht hat, eigentlich einem anderen Weintyp entsprechen, als der mit dem sich Deutschland als Anbaugebiet vom Weltmarkt unterscheidet. Die Einbeziehung der Modellierung der Äpfelsäure ermöglichte es, nicht nur die Veränderungen der phänologischen Entwicklung der Pflanze zu bewerten, sondern auch im Zusammenhang mit der Modellierung des potenziellen Mostgewichts zu beurteilen, ob die Klimaentwicklung den Charakter der in Hessen produzierten Weine verändern wird. Ein Modell zur Berechnung des Äpfelsäuregehalts auf der Basis von

Wetterdaten wurde im Rahmen dieses Projekts an der FA Geisenheim entwickelt. Die in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen beziehen sich alle auf die für Hessen wichtigste Weißweinsorte, den Riesling.

2 Material und Methoden

2.1 Die Wetterdaten

Zur Berechnung der phänologischen Eintrittstermine, des potenziellen Mostgewichts, des Gehalts an Äpfelsäure, sowie der klimatischen Wasserbilanz wurden Datensätze auf Tageswertbasis für den Zeitraum der Jahre 2000 – 2100 der Firma MeteoResearch verwendet (ENKE 2003, ENKE 2004). Diese Wetterdaten beinhalten für jede Station und für jede Dekade zehn verschiedene Simulationsläufe, welche die Schwankungsbreite des Regionalisierungsverfahrens repräsentieren. Für jedes dieser „Szenarien“ wurden nochmals „Unterszenarien“ gerechnet, die wiederum die Vielfalt möglicher Wetterrealisierungen innerhalb eines Klimaszenarios repräsentieren. Für die Simulationen anhand der Phänologie- und Inhaltsstoffmodelle sind allerdings kontinuierliche Szenarien von 100 Jahren für den Zeitraum von 2000 – 2100 notwendig. Um den Spielraum des Datenmaterials zu nutzen, aber auch den Arbeitsaufwand in vertretbaren Grenzen zu halten, wurden die Berechnungen auf die Stationen Geisenheim, Frankfurt und Gernsheim beschränkt. Geisenheim ist repräsentativ für den Rheingau und der in der Nähe von Frankfurt gelegene Weinberg „Frankfurter Lohrberger Hang“ markiert die östliche Ausdehnungsgrenze dieses Anbaugebietes. Gernsheim liegt im Rheintal am Fuße der Westhänge des Odenwalds und kann als repräsentativ für die Weinberge der Hessischen Bergstraße angesehen werden.

Zusätzlich wurden die gelieferten Daten so aufgearbeitet, dass eine überschaubare Anzahl an Szenarien entstand, die zur weiteren Analyse dienen. Hierzu wurden, wie in Abbildung 1 für die Wetterstation Geisenheim und den Klimafaktor Temperatur illustriert, Dekadenmittelwerte aus den 20 „Unterszenarien“ jedes Simulationslaufes für die Tagesmitteltemperaturen, den Niederschlag und die Sonnenscheinstunden gebildet. Da der Klimafaktor Temperatur auf die phänologische Entwicklung der Rebe

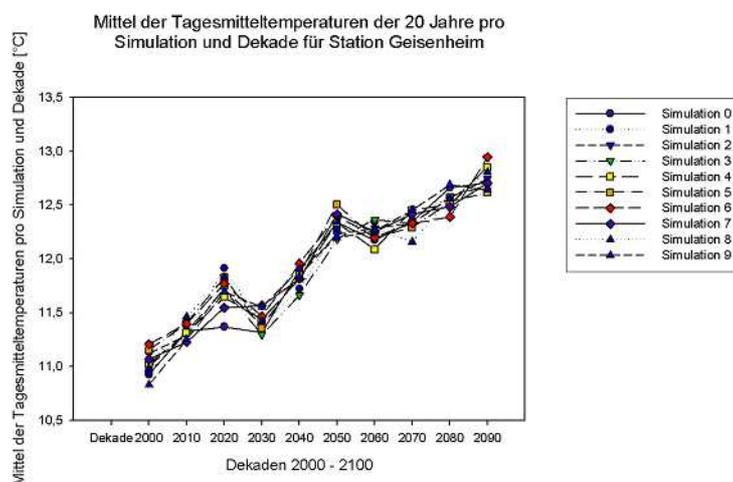
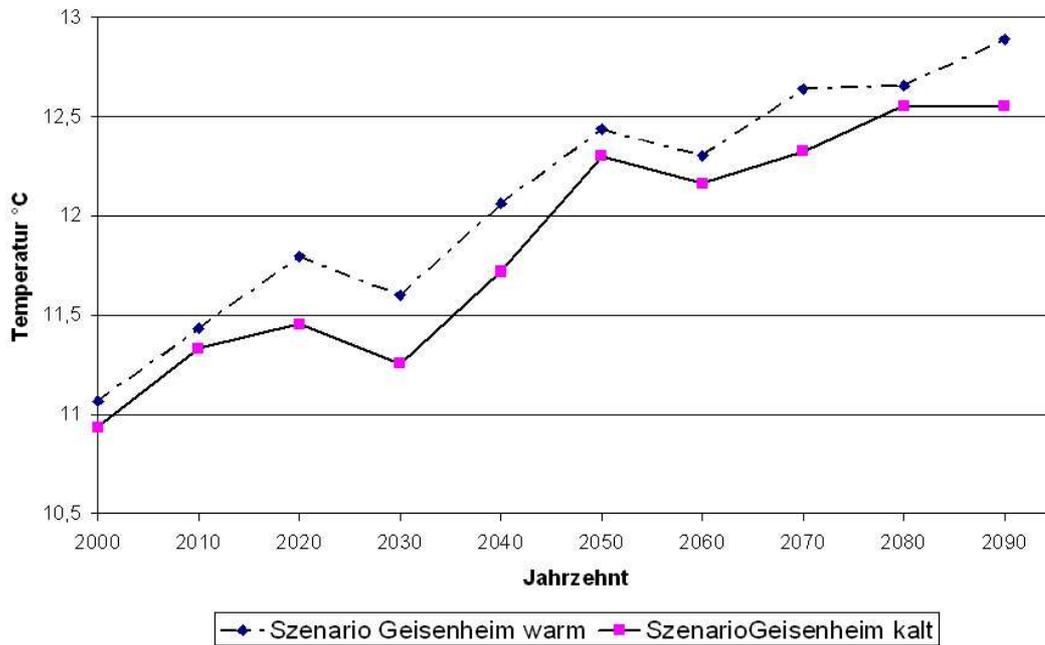


Abbildung 1: Vergleich der Tagesmitteltemperaturen der verschiedenen Klimaszenarien von MeteoResearch für den Standort Geisenheim.

den größten Einfluss ausübt, wurde aus den Simulationen für Geisenheim aus jeder Dekade eine tendenziell warme und eine tendenziell kühlere Simulation ausgewählt. Ein Zufallsgenerator wählte dann, ausgehend von den 20 Unterszenarien, aus den 20 Jahren der jeweiligen Simulation und Dekade 10 Jahre aus, so dass man auf diese Weise zu einem wärmeren und einem kühleren kontinuierlichen Szenario von 100 Jahren auf Tageswertbasis kam. Die Abbildungen 2-4 zeigen für die Stationen Geisenheim, Gernsheim und Frankfurt Dekadenmittelwerte der kühleren und wärmeren Szenarien der Temperatur, der Sonnenscheinstunden und des Niederschlags. Entsprechende Simulationen und Jahre wurden auch aus den Daten für Frankfurt und Gernsheim ausgewählt. Auf diese Weise erhielt man für jede Wetterstation ein warmes und ein kaltes Szenario von 100 Jahren, auf deren Basis die weiteren Modellrechnungen durchgeführt wurden.

Dekadenmittelwerte der Temperaturen der verwendeten Szenarien für die Station Geisenheim



Dekadenmittelwerte für Sonnenschein und Niederschläge der verwendeten Szenarien für Geisenheim

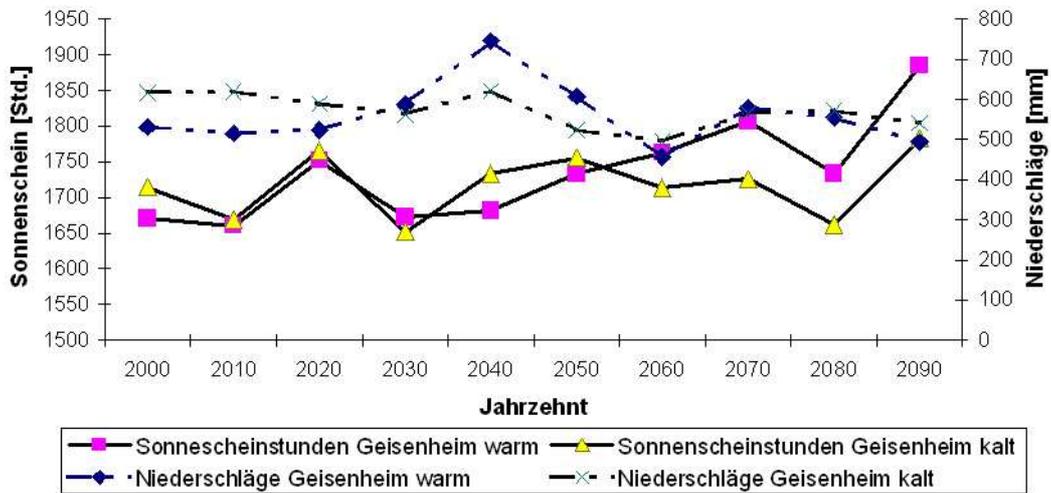
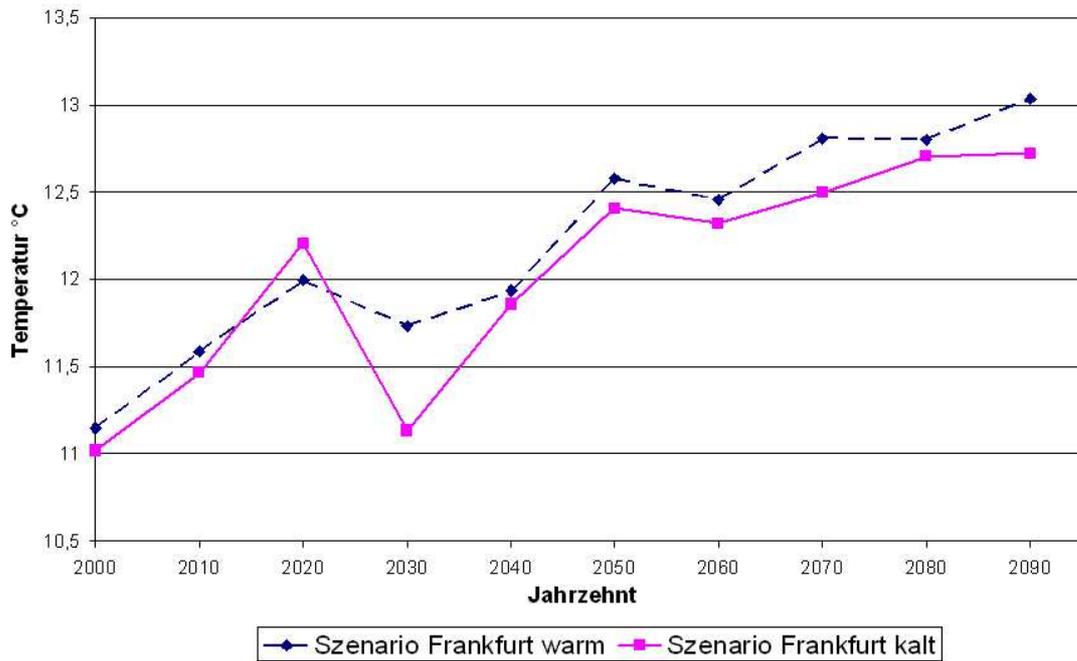


Abbildung 2: Dekadenmittelwerte der Klimafaktoren Temperatur, Sonnenscheinstunden und Niederschlag der verwendeten Szenarien für den Standort Geisenheim

Dekadenmittelwerte der Temperaturen der verwendeten Szenarien für die Station Frankfurt



Dekadenmittelwerte für Sonnenschein und Niederschläge der verwendeten Szenarien für Frankfurt

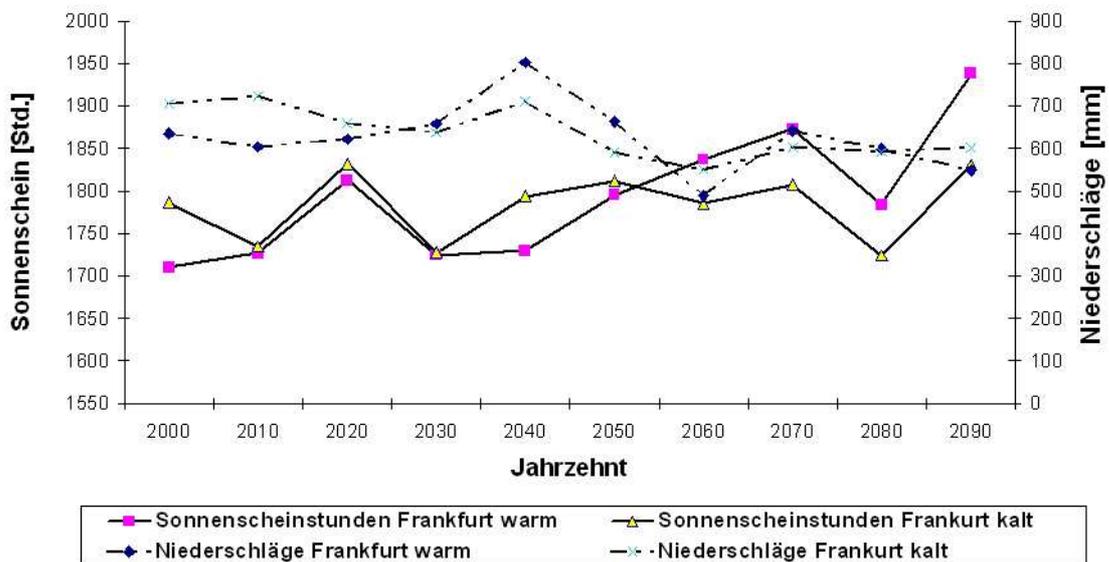
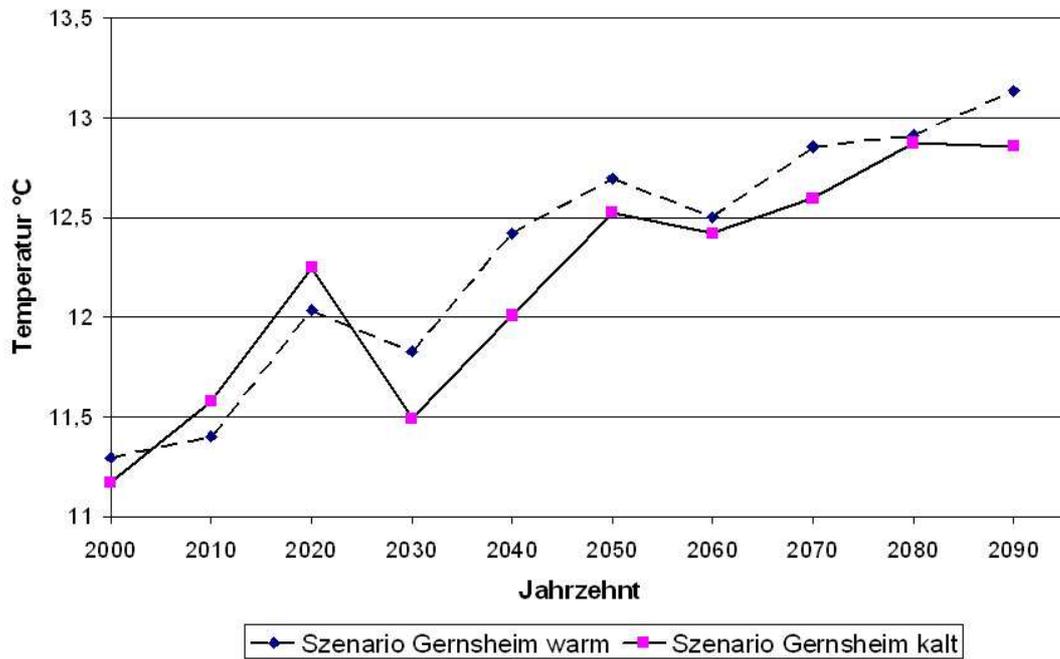


Abbildung 3: Dekadenmittelwerte der Klimafaktoren Temperatur, Sonnenscheinstunden und Niederschlag der verwendeten Szenarien für den Standort Frankfurt

Dekadenmittelwerte der Temperaturen der verwendeten Szenarien für die Station Gernsheim



Dekadenmittelwerte für Sonnenschein und Niederschläge der verwendeten Szenarien für Gernsheim

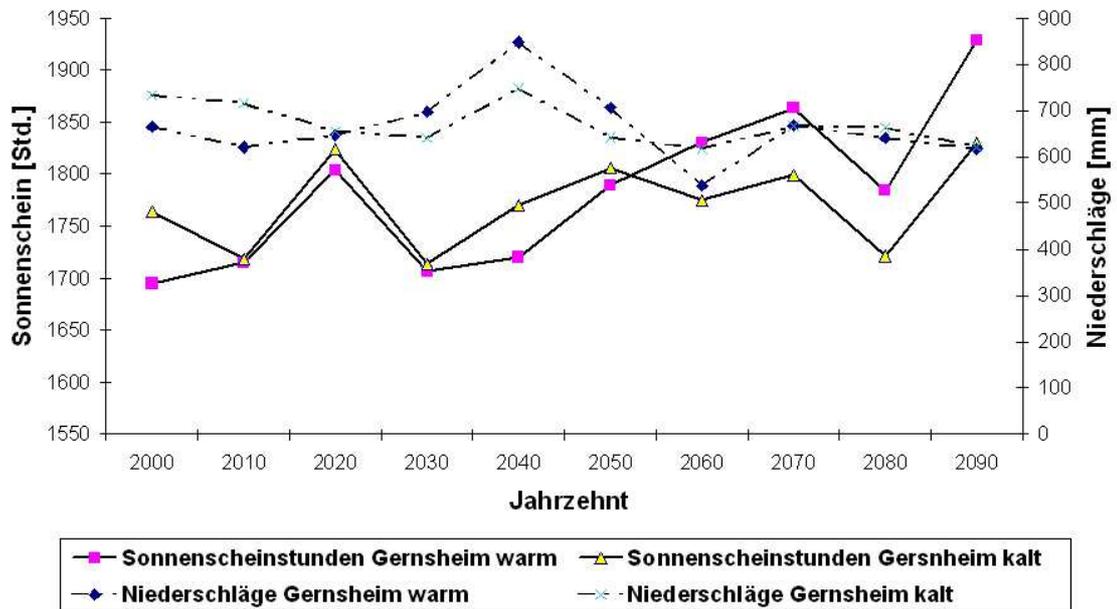


Abbildung 4: Dekadenmittelwerte der Klimafaktoren Temperatur, Sonnenscheinstunden und Niederschlag der verwendeten Szenarien für den Standort Gernsheim

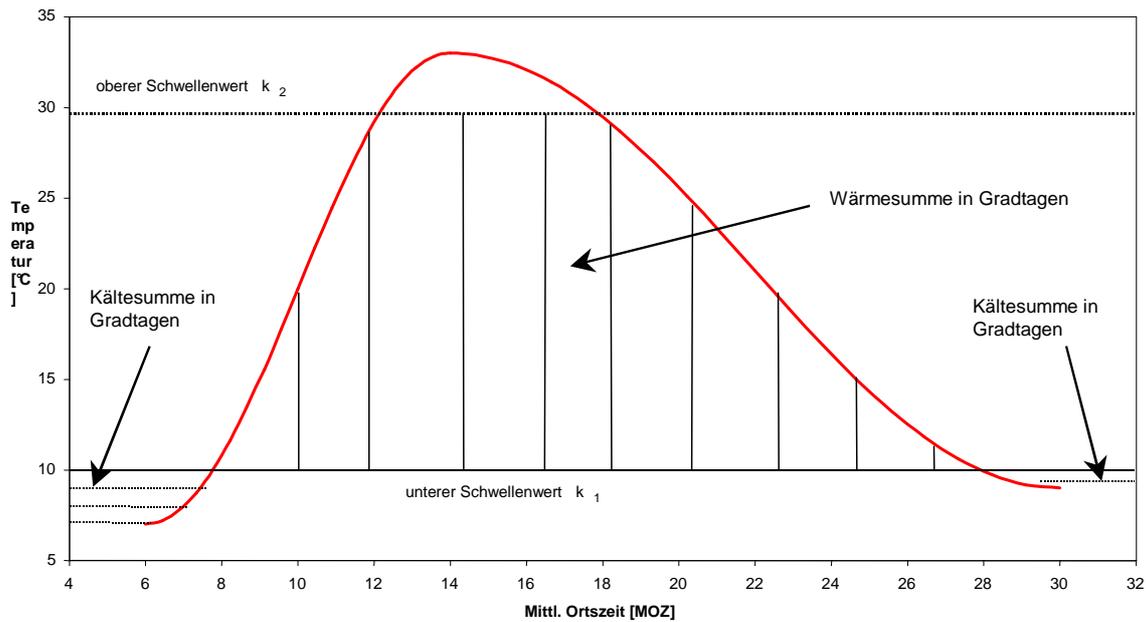


Abbildung 5: Tagesgangfunktion mit Schwellenwerten zur Berechnung der Wärme und Kältesummen in Gradtagen

	<p>Fall 4:</p> $HDD = \frac{1}{2\pi} \left\{ \bar{T} - k_1 \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) + \alpha \cos \theta \right\} \quad (1)$ $CDD = \frac{1}{2\pi} \left\{ (k_1 - \bar{T}) \left(\theta + \frac{\pi}{2} \right) + \alpha \cos \theta \right\} \quad (2)$ $\theta = \text{SIN}^{-1} \left[(k_1 - \bar{T}) / \alpha \right] \quad (3)$
	<p>Fall 5:</p> $HDD = \frac{1}{2\pi} \left\{ (\bar{T} - k_1) \left(\theta + \frac{\pi}{2} \right) + (k_2 - k_1) \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) - \alpha \cos \theta \right\} \quad (4)$ $CDD = 0 \quad (5)$ $\theta = \text{SIN}^{-1} \left[(k_2 - \bar{T}) / \alpha \right] \quad (6)$

- HDD = Wärmesumme in Gradtage
- CDD = Kältesumme in Gradtage
- \bar{T} = Temperaturmittelwert in der Temperaturhalbwelle des Tages/12.00 Uhr)
- α = Temperaturamplitude $(T_{\max} - T_{\min})/2$
- K_1 = unterer Schwellenwert der Temperatur
- K_2 = oberer Schwellenwert der Temperatur
- $\theta, \theta_1, \theta_2$ = Zeitpunkte, an denen die Temperaturschwellenwerte über-/unterschritten werden

Abbildung 6: Zwei ausgewählte Fälle zur Berechnung der Wärme- und Kältesummen.

2.2 Die Modelle

2.2.1 Die Modelle zur Berechnung der phänologischen Eintrittstermine

Die wichtigsten phänologischen Entwicklungsstadien der Rebe sind Austriebzeitpunkt, Blühbeginn, Blühende, Reifebeginn und Lesereife. Anhand dieser phänologischen Phasen des Rebwachstums lassen sich Änderungen durch weinbaulich relevante Klimatrends ablesen.

Zur Berechnung der phänologischen Eintrittstermine wurden Modelle verwendet, welche von HOPPMANN und BERKELMANN-LÖHNERTZ entwickelt wurden (HOPPMANN und BERKELMANN-LÖHNERTZ, 2000).

Die Temperatur ist der Klimafaktor, welcher auf das Wachstum der Rebe den größten Einfluss ausübt. Daher basieren die Modelle in erster Linie auf Wärme- und Kältesummen, welche mit verschiedenen Funktionen berechnet werden. Dadurch wird die Berechnung des Temperatureinflusses auf die jeweilige phänologische Phase der Rebe optimiert. So werden z.B. Kältesummen bei der Berechnung der Blühdauer berücksichtigt. In den Funktionen werden auch untere und obere Schwellenwerte definiert, wodurch nur die für das Rebwachstum bedeutsamen Temperaturbereiche berücksichtigt werden.

Das Vorgehen wird durch Abbildung 5 erläutert. Durch Festlegung der unteren und oberen Schwellenwerte (k_1, k_2) lässt sich für jeden Tag in Abhängigkeit von Tagesmaximum- und Tagesminimumtemperatur eine Wärme- und Kältesumme berechnen. Diese Wärme- und Kältesumme ist weiterhin von der ausgewählten Funktion abhängig, welche den Tagesgang beschreibt. Es werden 6 Fälle zur Berechnung der Wärme- und Kältesummen unterschieden, von denen zwei in Abbildung 6 illustriert sind.

Auch die Schwellenwerte ändern sich im Laufe des Jahres und sind dem Entwicklungsstadium der Rebe angepasst. Sie liegen für die Wärmesumme im Frühjahr bis zum Austrieb z.B. bei 6 °C und 25 °C und während der Vegetationsperiode bei 13 °C und 32 °C. Die Schwellenwerte für die Kältesumme während dieser Phase liegen bei 17 °C und 34 °C.

In den Modellen findet auch eine Arcustangens Funktion Verwendung, mit der die Temperaturabhängigkeit der Assimilationsleistung der Rebe beschrieben wird.

Für jeden Tag lassen sich mit dieser Funktion Assimilationswerte errechnen. Zur Bestimmung eines phänologischen Eintrittstermins werden diese Werte entsprechend einer Vorschrift summiert, bis der Wert 1 erreicht wird. So wird z.B. zur Berechnung des Austriebstermins die Gleichung verwendet:

$$1 / \text{Austrieb} = C + A_1 \cdot \text{ATTX1} + A_2 \cdot \text{GRT2} + A_3 \cdot \text{ATTX3} \quad (7)$$

C	Konstante
A_1, A_2, A_3	Koeffizienten
ATTX1	Arcustangensfunktion der Maximumtemperatur im Januar + Februar
GRT2	Gradtage (Wärmesumme) für den März mit den Schwellen 6°C u. 25°C
ATTX3	Arcustangensfunktion der Maximumtemperatur im April bis zum Austrieb

Dabei werden die Werte von Tag zu Tag aufsummiert. Wenn der Wert 1 überschritten wird, ist das Datum des Austriebs erreicht

Die Berechnung des Mostgewichtes erfolgt nach folgender Gleichung:

$$OE = C + B_1 \cdot BLa + B_2 \cdot ETP(PH4) + B_3 \cdot GLOB(PH5) + B_4 \cdot GLOB(PH6) \quad (8)$$

<i>OE</i>	Mostgewicht Grad Oechsle
<i>C</i>	Konstante
<i>B₁, B₂, B₃, B₄</i>	Koeffizienten
<i>BLa</i>	Blühbeginn
<i>ETP</i>	Mittelwert der tägl. potenziellen Verdunstung in der Phase <i>PH*</i>
<i>GLOB</i>	Mittelwert der Tagessumme der Globalstrahlung in der Phase <i>PH*</i>
<i>PH4-PH6</i>	Phänolog. Phasen Blühende, Reifebeginn und Lese mit jeweils einer Zwischenphase.

2.2.2 Der Wasserhaushalt

Die Ergebnisse zum Wasserhaushalt in dieser Arbeit beschränken sich auf die Berechnung der potenziellen Verdunstung der Reben und der Darstellung der Niederschläge und der daraus resultierenden klimatischen Wasserbilanz in der Phase vom Blühende bis zum Reifebeginn.

Die potenzielle Verdunstung wird in Abhängigkeit vom Sättigungsdefizit und unter Berücksichtigung des vegetativen Wachstums der Rebe nach der Formel von HAUDE (HAUDE 1963) errechnet:

$$ETP_h = f(E_s - e)_{14^{00}} \quad (9)$$

<i>ETP_H</i>	potenzielle Verdunstung
<i>f</i>	rebenspezifischer Faktor
<i>(ES-e)</i>	Sättigungsdefizit um 14 Uhr aus Temperatur und Luftfeuchte

Der Faktor *f* ist abhängig vom phänologischen Tag und unterscheidet noch eine offene oder begrünte Bodenbearbeitung.

Die potenzielle Verdunstung ist ein theoretischer Wert und beschreibt die Menge an Wasserdampf, welche bei einer optimalen Wasserversorgung der Rebe an die Atmosphäre abgegeben wird. Die aktuelle Verdunstung erfordert zusätzlich noch eine Berücksichtigung standortabhängiger bodenspezifischer Größen. Zur Beurteilung ob für die Rebe zu einem bestimmten Zeitpunkt tatsächlich eine Trockenstresssituation vorliegt, ist die Kenntnis der aktuellen Bodenfeuchte notwendig.

Diese Bestimmung ist mit einem Bodenfeuchtemodell möglich, welches zusätzlich zu den klimatischen Faktoren noch bodenspezifische Größen (Feldkapazität, Welkepunkt, Bodenbedeckung (begrünt oder offen), Schichtdicken) berücksichtigt. Mit diesem Modell lässt sich dann für bestimmte Bodenarten die aktuelle Verdunstung, Evaporation, Transpiration sowie die nutzbare Feldkapazität berechnen, woraus sich explizit ableiten lässt ob Trockenstress vorliegt oder nicht. Dieses Modell benötigt allerdings stundenaufgelöste Werte für Temperatur und Luftfeuchte und konnte daher im Rahmen dieses Projekts nicht eingesetzt werden.

Die klimatische Wasserbilanz ist aufgrund der hohen Verdunstungswerte in der Phase Blühende bis Reifebeginn meist negativ. In dieser Wachstumsphase sind die Reben aber auf eine gute Wasserversorgung angewiesen und müssen daher ihren Wasserbedarf aus den Bodenvorräten decken (HOPPMANN und HÜSTER, 1988). Die Berechnung der potenziellen Verdunstung und der klimatischen Wasserbilanz kann

also nur Hinweise darauf geben, ob sich Probleme mit der Wasserversorgung der Reben in Zukunft verschärfen könnten. Dies ist besonders relevant für Standorte mit leichten, sandigen oder skelettreichen Böden, die auch schon bisher mit Trockenheit zu kämpfen hatten und die in Zukunft häufiger unter Wassermangel leiden werden. Zur Interpretation der Ergebnisse sollte man aber beachten, dass eine Bezifferung der Anzahl, der Zunahme oder der Dauer von Tagen mit Trockenstress, und eine genaue Bewertung dieser Probleme mit dem eingesetzten Modell nicht möglich war.

2.2.3 Der Huglin-Index

Die von Pierre Huglin entwickelte Berechnung eines Index (HUGLIN 1983) erlaubt einerseits die Einteilung verschiedener Rebsorten hinsichtlich ihres Wärmebedarfs, sowie die Einschätzung eines Standorts im Hinblick auf geeignete Rebsorten. Er basiert auf der Berechnung einer Temperatursumme nach Gl. 10. Das Mittel aus Tagesmittel- (T_{mit}) und Tagesmaximumtemperatur (T_{max}) wird vom 1.4. bis 30.9 abzüglich einer Basistemperatur von 10 °C summiert. Die Summe wird mit einem vom Breitengrad des Standorts abhängigen Faktor K ($K(40^\circ) = 1,2$, $K(50^\circ) = 1,6$) multipliziert, der die im Sommer längeren Tageslängen nördlicher Breiten berücksichtigt. Klimatisch bedingte Änderungen, die möglicherweise eine Verschiebung im Rebsortenspiegel bewirken, lassen sich an einer Veränderung des Huglin Index ablesen.

$$HI = K \sum_{1.4.}^{30.9.} \left(\frac{T_{mit} + T_{max}}{2} - 10 \right) \quad (10)$$

2.2.4 Das Modell zur Berechnung der Äpfelsäure

Der Gesamtsäuregehalt eines Mostes besteht zu ca. 90 % aus der Wein- und der Äpfelsäure. Zu Reifebeginn werden für die Weinsäure meist Gehalte von ca. 12 g/l gemessen, bei der Äpfelsäure liegen die Werte eher bei 20 g/l. Der Reifebeginn ist gekennzeichnet durch den Beginn der Zuckereinlagerung in den Beeren, sowie durch eine deutliche Abnahme des Säuregehalts. Während die Abnahme der Weinsäure in der Reifephase relativ gering ausfällt und vorwiegend durch Verdünnung oder Weinsteinausfall in der Beere hervorgerufen wird, ist die Abnahme der Äpfelsäure wesentlich stärker und temperaturabhängig, so dass zur Lese je nach Jahr der Gehalt an Äpfel- und Weinsäure stark schwanken kann.

Der Mechanismus des Abbaus der Äpfelsäure ist noch nicht vollständig geklärt, es werden 3 Wege diskutiert, auf denen die Äpfelsäure abgebaut wird (RUFFNER 1982). Ein durch Enzymaktivität hervorgerufener Abbau, die Bildung von Hexosen aus der Äpfelsäure über die Gluconeogenese, sowie die Veratmung der Äpfelsäure über den Zitronensäurezyklus, welches die mit Abstand größte Bedeutung beim Äpfelsäureabbau hat (RUFFNER 1982).

Zur Validation und Entwicklung des Modells zur Berechnung des Äpfelsäuregehalts dienten Äpfelsäuredaten der SLFA Neustadt aus den Jahren 2002, 2003 und 2004, die wöchentlich von Reifebeginn bis zur Lese an 12 verschiedenen Standorten gemessen worden sind. Die SLFA Neustadt stellte uns dieses Datenmaterial freundlicherweise zur Verfügung. Zudem gab es einen Datensatz aus dem Jahre 1979 der aus Geisenheim stammte.

Das DLR in Oppenheim, sowie der DWD in Geisenheim überließ uns die zu den Standorten und Jahren entsprechenden Wetterdaten.

Zur Modellierung wurden verschiedene Ansätze gewählt. Der Ansatz, ein deterministisches, auf der Berechnung des Äpfelsäureabbaus beruhendes Modell zu erstellen, erwies sich als zu komplex. Auch mit dem Versuch, den enzymatischen Weg des Äpfelsäureabbaus mit einer Reaktionskinetik nach Michaelis – Menten abzubilden, konnte keine Verbesserung der Anpassung erzielt werden.

Eine Analyse der Daten ergab eine enge Korrelation zwischen dem Gehalt an Äpfelsäure und der Temperatursumme während der Reifephase (Abb. 7) und obwohl die Äpfelsäure komplizierten biochemischen Abbauprozessen unterworfen ist, ließen sich die Daten mit dem einfachen Ansatz eines proportionalen Zusammenhangs zwischen der Abbaurate und des Gehalts an Äpfelsäure gut anpassen (Abb. 7, Gl. 11 - 13).

$$\frac{d[\ddot{A}S]}{dGT} = -k[\ddot{A}S] \quad (11)$$

Integration ab Reifebeginn liefert:

$$\int_{GT_{RB}}^{GT(Tag)} \frac{1}{[\ddot{A}S]} d[\ddot{A}S] = -k \int_{GT_{RB}}^{GT(Tag)} dGT \quad (12)$$

$$\ln \frac{[\ddot{A}S(GT(Tag))]}{[\ddot{A}S(GT_{RB})]} = -k(GT(Tag) - GT_{RB})$$

$$[\ddot{A}S(GT)] = [\ddot{A}S(GT_{RB})] e^{-k((GT(Tag) - GT_{RB}))} \quad (13)$$

wobei:

$GT(Tag)$	Gradtage
GT_{RB}	Gradtage zu Reifebeginn
$[\ddot{A}S(GT)]$	Konzentration der Äpfelsäure in Abhängigkeit der Gradtage
$[\ddot{A}S(GT_{RB})]$	Konzentration der Äpfelsäure zu Reifebeginn
k	Proportionalitätskonstante (Geschwindigkeitskonstante)

Die gewählten Formeln entsprechen der Geschwindigkeitsgleichung für Reaktionen erster Ordnung (s.a. Lehrbücher der physikalischen Chemie oder Biochemie).

Aus dem Datenmaterial der SLFA Neustadt sowie den entsprechenden Wetterdaten wurden die Werte für den Gehalt an Äpfelsäure in Abhängigkeit der Gradtage seit Reifebeginn $[\ddot{A}S(GT)]$ ermittelt. Die Fitroutine nach der Methode der kleinsten Quadrate ergab einen Wert für die Konzentration der Äpfelsäure zu Reifebeginn von $[\ddot{A}S(GT_{RB})] = 18,6 \text{ g/l}$ und $k = 0,0034 \text{ 1/GT}$ für die Geschwindigkeitskonstante.

Die Berechnung der Temperatursumme erfolgte mit der Formel:

$$\text{Gradtage} = \sum_{\text{Reifebeginn}}^{\text{Lesereife}} (T_{mit} - T_b) \quad (14)$$

wobei die Tagesmitteltemperatur (T_{mit}) und eine Basistemperatur (T_b) von 7°C verwendet wurden, mit der die beste Anpassung erzielt werden konnte. Die Tage für den Reifebeginn und die Lesereife wurden aus den Simulationen der phänologischen Eintrittstermine entnommen.

Damit war es möglich, anhand der Wetterdaten der verwendeten Szenarien die Äpfelsäuregehalte zu berechnen.

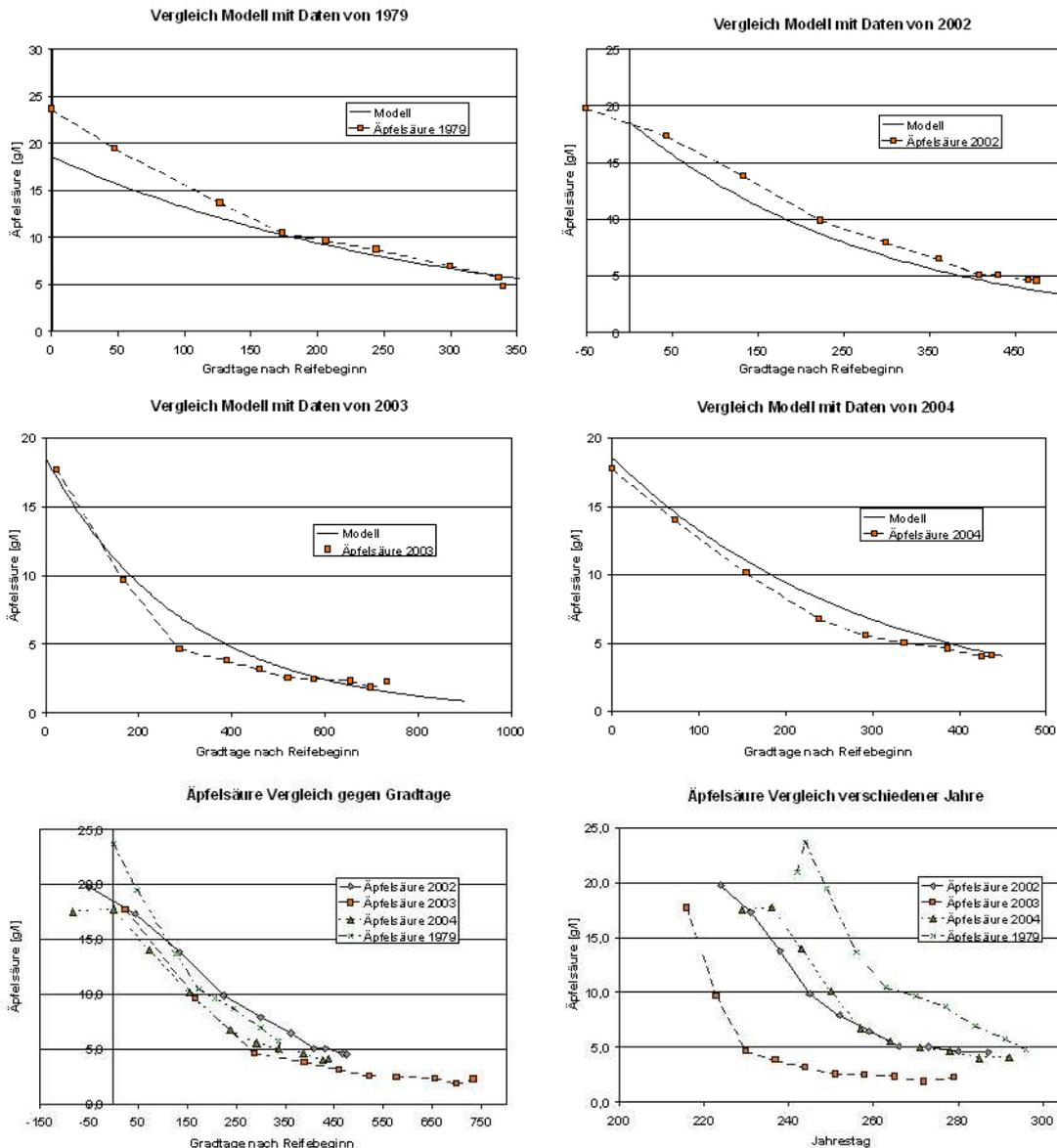


Abbildung 7: Beschreibung des Abbaus der Äpfelsäure durch das Modell im Vergleich zu den gemessenen Daten von 1979 (oben links), 2002 (oben rechts), 2003 (Mitte links) und 2004 (Mitte rechts). Unten rechts ist der Verlauf des Abbaus für alle Jahre als Funktion des Jahrestages aufgezeichnet, wobei extreme Jahresunterschiede deutlich werden. Unten links sind die Daten der 4 Einzeljahre als Funktion der aufgelaufenen Temperatursumme dargestellt.

Für die Aussagekraft des Modells ist vor allem eine gute Übereinstimmung mit den Äpfelsäurewerten zum Zeitpunkt der Lese entscheidend. Diese ist für die verschiedenen Jahre gegeben (Abb. 7).

Das verwendete Datenmaterial umfasste klimatisch sehr verschiedene Jahre. Dies wird ersichtlich, wenn man den Äpfelsäuregehalt der verschiedenen Jahre gegen den jeweiligen Jahrestag aufträgt (Abb. 7 u.r.). Deutlich zu sehen ist der Unterschied zwischen dem heißen Jahr 2003 und dem kühlen Jahr 1979. Während in 2003 der Äpfelsäuregehalt schon unter 5 g/l lag, hatte 1979 der Reifeprozess und damit der Äpfelsäureabbau noch nicht einmal angefangen. Daher kann man davon ausgehen, dass das Modell auch diese Extremjahre durchaus wiedergeben kann (Abb. 7 u.l.).

3 Ergebnisse

Wie eingangs bereits geschildert, beziehen sich die Berechnungen auf die Standorte Geisenheim, Gernsheim und Frankfurt und wurden jeweils für ein kaltes und ein warmes Szenario durchgeführt.

3.1 Die phänologischen Eintrittstermine

3.1.1 Der Austrieb

Die kalten Szenarien

Obwohl die Durchschnittstemperaturen auch bei den kühlen Szenarien deutlich zunehmen, ist eine signifikante Veränderung des Austriebszeitpunkts nicht zu erkennen. Nimmt man für Geisenheim die Mittelwerte über 10 Jahre, so ist der Austriebszeitpunkt im letzten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts durchschnittlich am 20. April und liegt damit nur 2 Tage früher als zu Beginn dieses Jahrzehnts. Das Jahrzehnt von 2050 – 2060 zeigt allerdings eine Abweichung gegenüber den anderen Jahrzehnten, hier findet der Austrieb durchschnittlich schon am 12. April statt. Ganz ähnliche Ergebnisse erhält man für die anderen Standorte (Abb. 8).

Die warmen Szenarien

Eine deutliche Veränderung ist bei den warmen Szenarien zu erkennen (Abb. 9). Nach den Berechnungen würde der Austrieb bei allen Standorten gut eine Woche früher stattfinden. Hier zeigen die Mittelwerte über zehn Jahre, dass diese Veränderung schon zur Mitte des Jahrhunderts erreicht wird. Liegt der Austrieb zu Beginn des Jahrhunderts noch durchschnittlich am 24. April, so ist er zur Mitte des Jahrhunderts schon am 15. April und bleibt bis zum Ende des Jahrhunderts auf diesem Niveau. Ebenso ist feststellbar, dass der Austrieb in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts häufig vor dem 10. April stattfindet. So frühe Termine kommen in den ersten 20 Jahren nicht vor (Abb. 9).

3.1.2 Der Blühbeginn

Die kalten Szenarien

Beim Blühbeginn ist auch bei den kalten Szenarien ein deutlicher Trend zu einer früheren Blüte zu erkennen (Abb. 10). Nach den Berechnungen wird der Blühbeginn zum Ende des Jahrhunderts ungefähr eine Woche früher stattfinden, als zu Beginn des Jahrhunderts. Diese Änderung vollzieht sich den Daten zufolge in einem relativ kurzen Zeitraum in der Mitte des Jahrhunderts. In der ersten Jahrhunderthälfte liegt der Blühbeginn überwiegend zwischen dem 3. Juni und 11. Juni, ab 2050 überwiegend zwischen dem 30. Mai und 3. Juni (Abb. 10).

Die warmen Szenarien

Bei den warmen Szenarien liegt der Blühbeginn zum Ende des Jahrhunderts etwa 10 Tage früher als zu Beginn (Abb. 11). Auch hier zeigt eine Analyse der Mittelwerte über zehn Jahre für Geisenheim, dass diese Änderung in einer kurzen Zeitspanne zur Jahrhunderthälfte stattfindet. In den ersten 50 Jahren liegen die Dekadenmittelwerte alle zwischen dem 12. Juni (2000 – 2010) und 4. Juni, in der zweiten Hälfte zwischen dem 28. Mai (2050 – 2060) und 2. Juni. In Gernsheim ist die Blüte durchschnittlich 4 Tage früher als in Geisenheim und Frankfurt (Abb. 11).

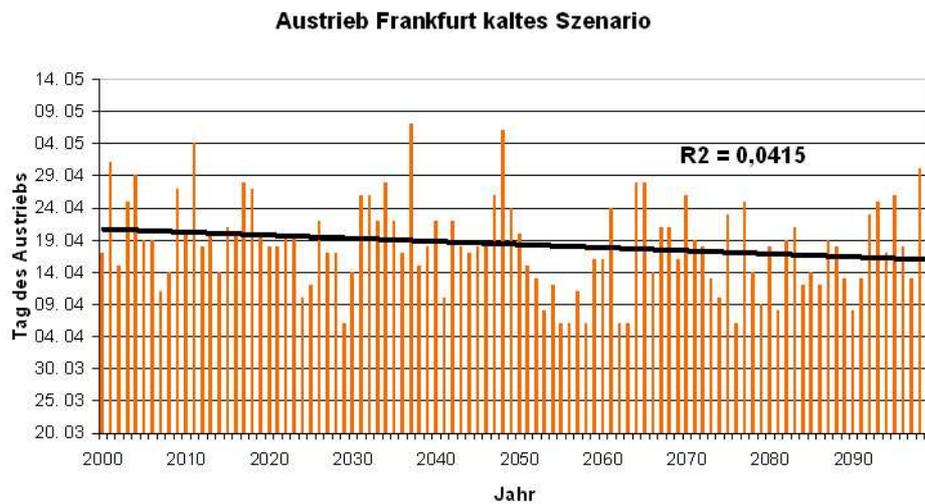
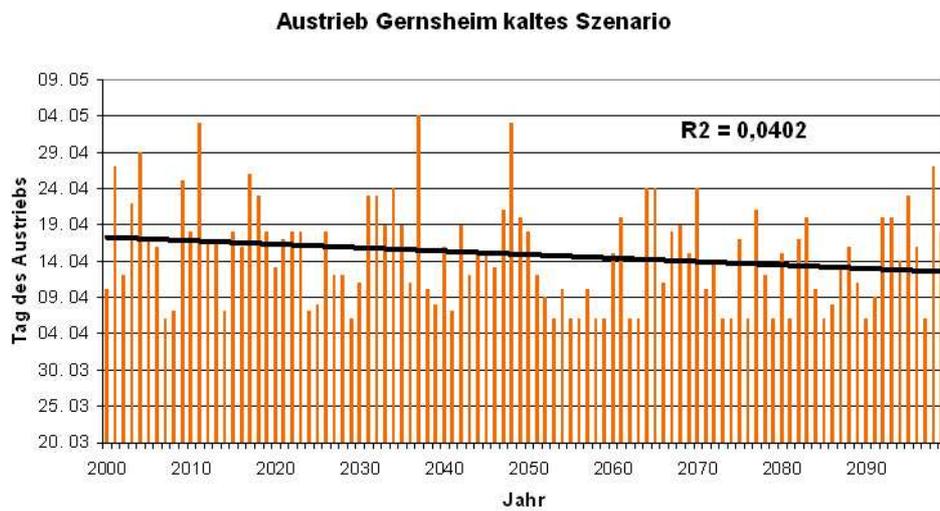
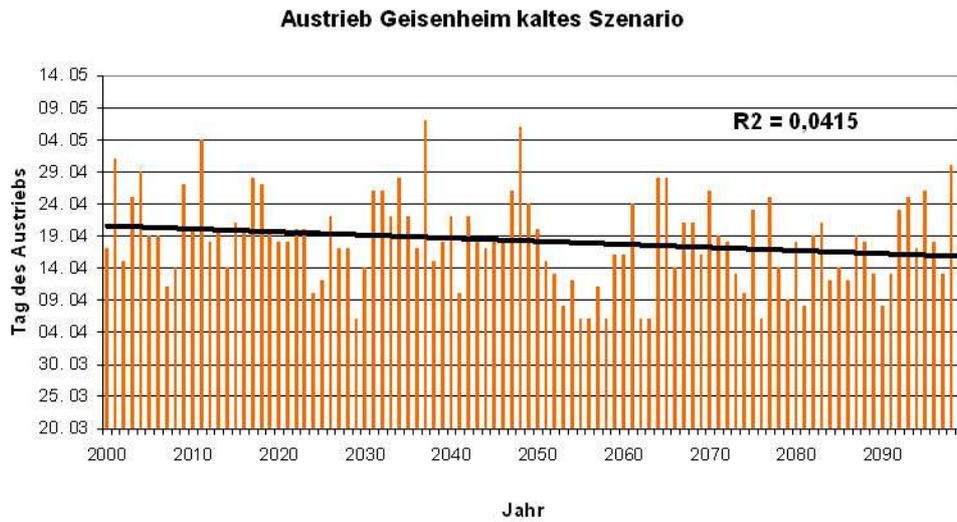


Abbildung 8: Berechneter Austriebszeitpunkt für die Stationen Geisenheim, Gernsheim und Frankfurt auf Basis eines „kalten“ Klimaszenarios

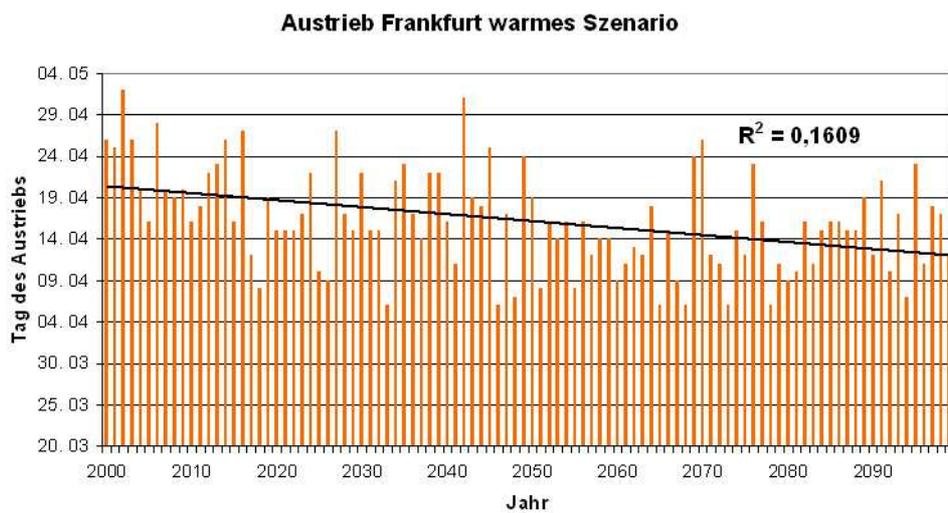
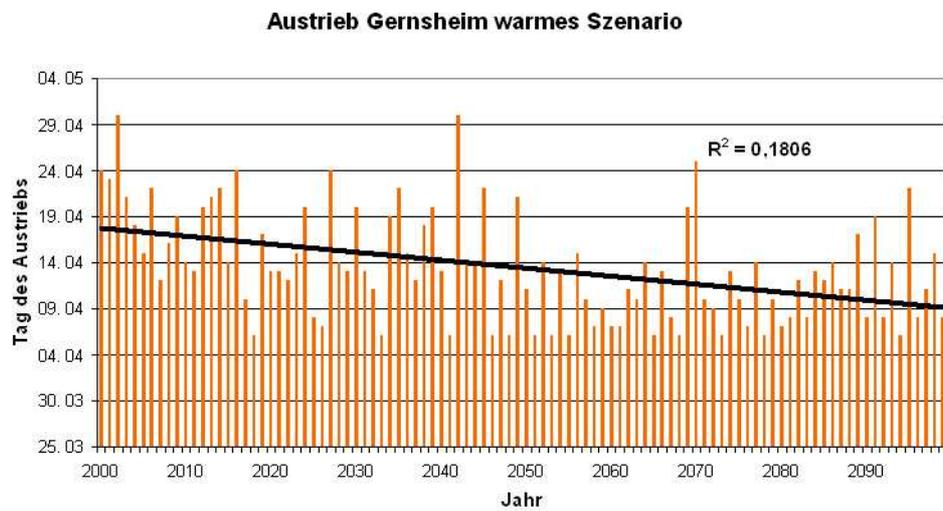
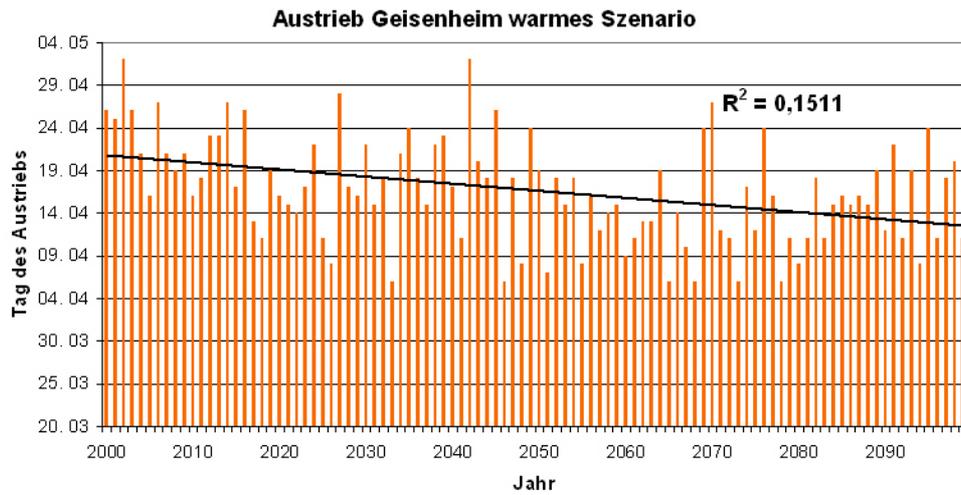
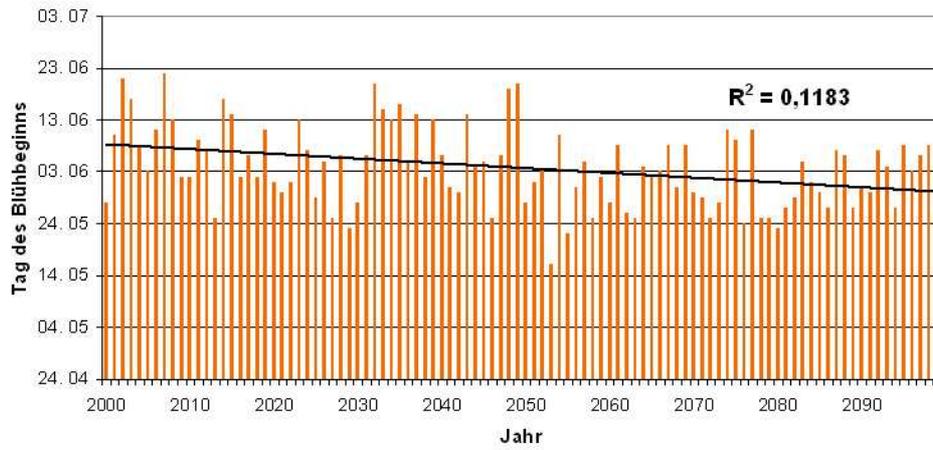
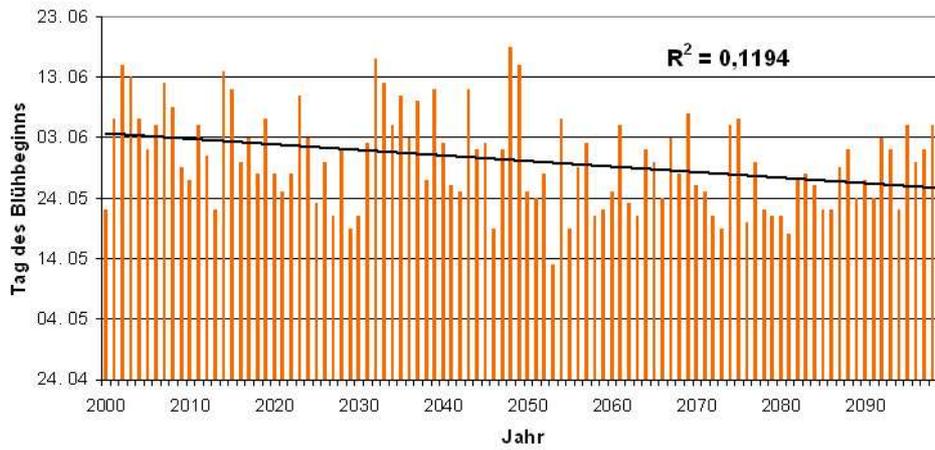


Abbildung 9: Berechneter Austriebszeitpunkt für die Stationen Geisenheim, Gernsheim und Frankfurt auf Basis eines „warmen“ Klimaszenarios.

Blühbeginn Geisenheim kaltes Szenario



Blühbeginn Gernsheim kaltes Szenario



Blühbeginn Frankfurt kaltes Szenario

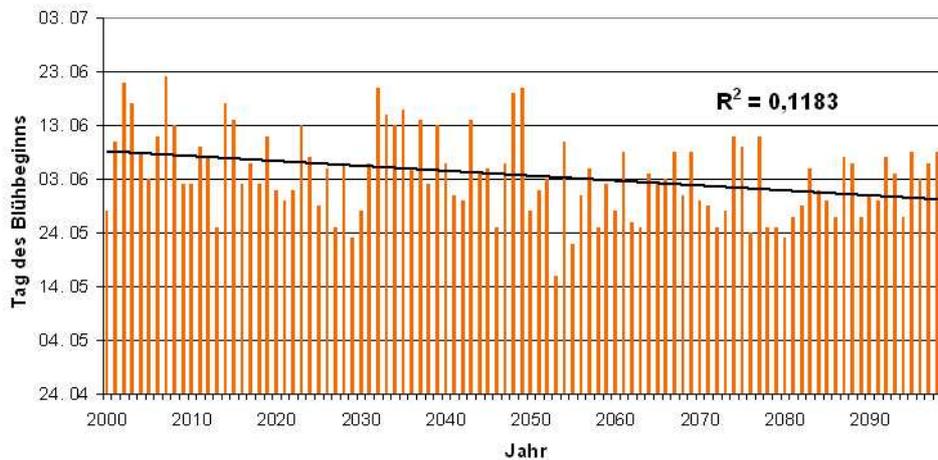
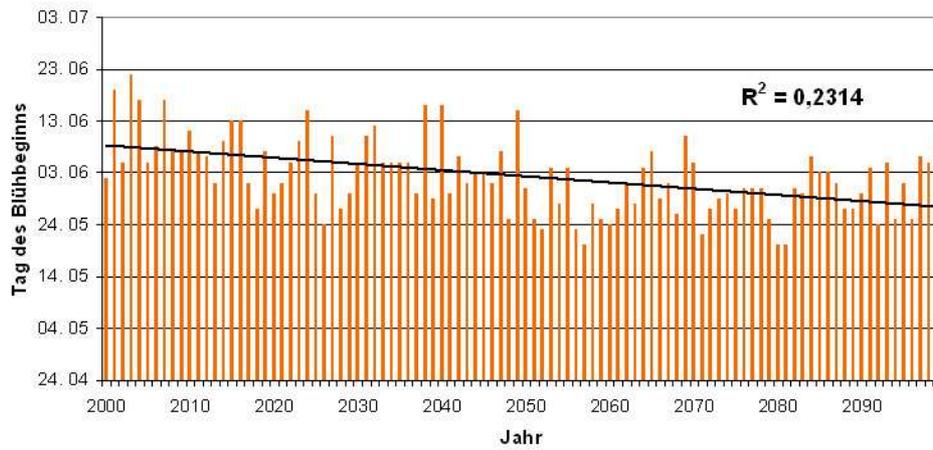
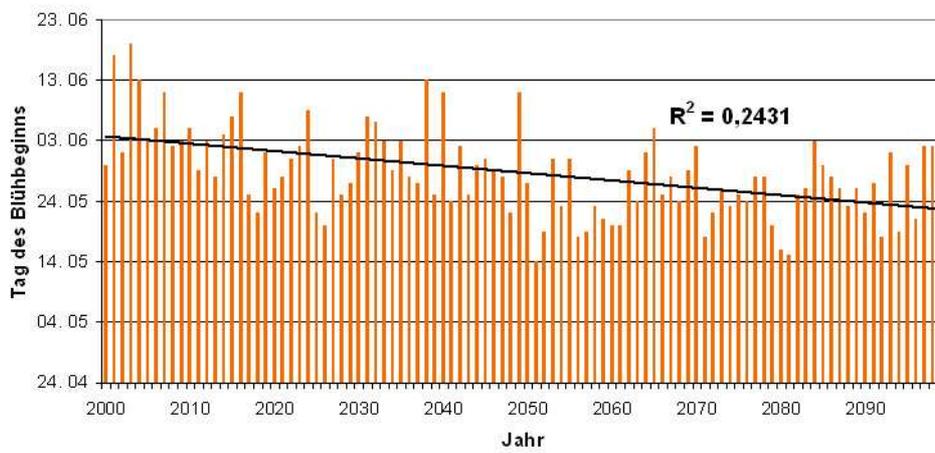


Abbildung 10: Berechneter Zeitpunkt des Blütebeginns für die Stationen Geisenheim, Gernsheim und Frankfurt auf Basis eines „kalten“ Klimaszenarios.

Blühbeginn Geisenheim warmes Szenario



Blühbeginn Gernsheim warmes Szenario



Blühbeginn Frankfurt warmes Szenario

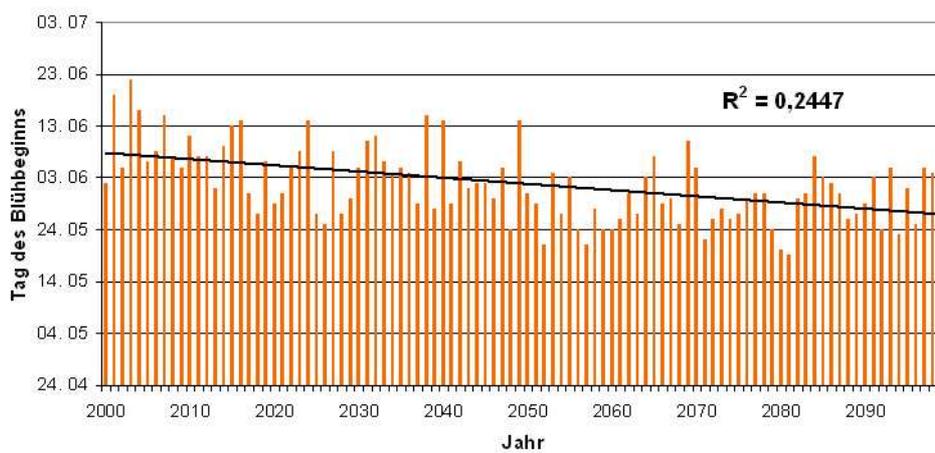


Abbildung 11: Berechneter Zeitpunkt des Blütebeginns für die Stationen Geisenheim, Gernsheim und Frankfurt auf Basis eines „warmen“ Klimaszenarios.

3.1.3 Der Reifebeginn

Die kalten Szenarien

Zumindest für die kühlen Szenarien setzt sich der Trend zu einem früheren Termin, der bei der Blüte zu beobachten war, für den Reifebeginn nur bedingt fort. Der Vorsprung, den die Reben durch die früher stattfindende Blüte haben, wird nicht verstärkt. Daraus lässt sich schließen, dass sich den kühlen Szenarien zufolge die Phase zwischen Blühbeginn und Reifebeginn nicht verkürzt. Dementsprechend finden auch beim Reifebeginn die größten Änderungen zur Jahrhunderthälfte statt. In der ersten Hälfte liegen die Termine für Geisenheim im Mittel über zehn Jahre zwischen dem 10. August und 17. August, danach zwischen dem 9. und 11. August (Abb. 12). Ähnliches ist für die anderen Standorte zu beobachten.

Die warmen Szenarien

Auch den warmen Szenarien zufolge ist eine Verstärkung des Trends nicht zu beobachten. Auch hier resultiert der frühere Reifebeginn aus der früher stattfindenden Blüte (Abb. 13). Es gibt sogar kaum einen Unterschied zu den kühlen Szenarien. Die Mittelwerte liegen für Geisenheim bis zum Jahre 2050 zwischen dem 10. und 17. August, danach zwischen dem 4. und 11. August (Abb. 13). Auch hier sind die Verläufe für die anderen Standorte ähnlich.

3.1.4 Die Lesereife

Die kalten Szenarien

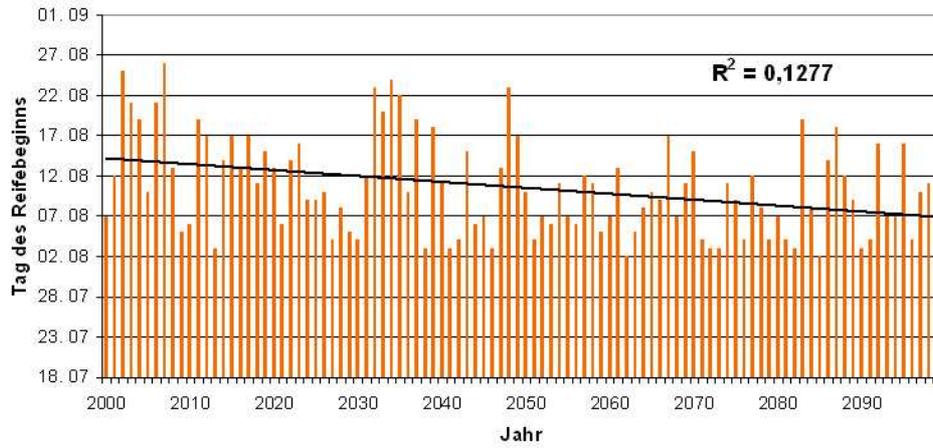
Auch bei der Lesereife zeigt sich, dass die klimatischen Veränderungen vor allem die Phase zwischen Austrieb und Blühbeginn verkürzen. Gegen Ende des Jahrhunderts wird die Lesereife nach den kühlen Szenarien etwa 10 bis 12 Tage früher erreicht werden als zu Beginn des Jahrhunderts (Abb. 14). Die Mittelwerte zeigen wiederum fast eine Zweiteilung des Jahrhunderts. In der ersten Hälfte liegen die Werte für Geisenheim zwischen dem 27. September und dem 3. Oktober und in der zweiten Hälfte zwischen dem 21. September (2050 – 2060) und 25. September (Abb. 14). Dies ist bei allen Standorten zu beobachten.

Die warmen Szenarien

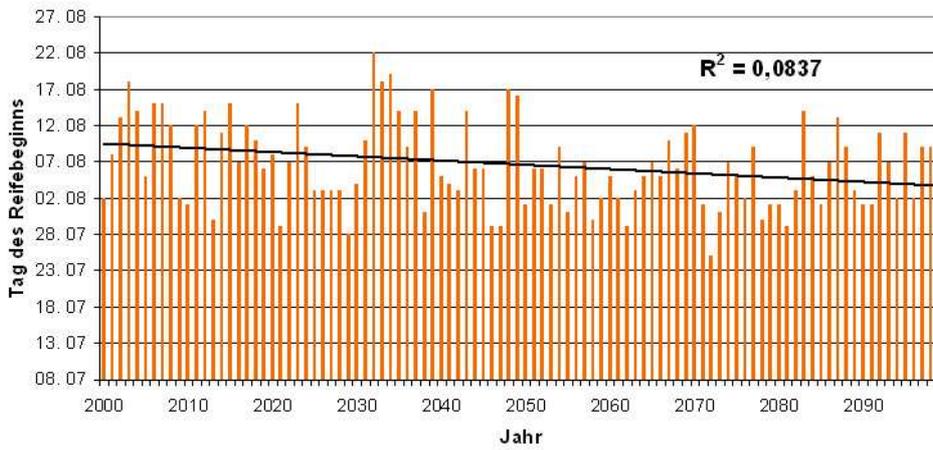
Bei den warmen Szenarien ist nur noch ein geringfügiger Unterschied zu den kühlen Szenarien zu erkennen. Hier verändern sich die Dekadenmittelwerte recht kontinuierlich vom 3. Oktober für das Jahrzehnt 2000 – 2010 auf den 28. September in der Dekade von 2040 – 2050 (Abb. 15). Dann erfolgt ein Sprung und in der Dekade von 2050 – 2060 wird die Lesereife im Mittel am 20. September erreicht und in den darauffolgenden Dekaden nicht mehr nach dem 24. September. Dies gilt in ähnlicher Form für alle Standorte.

Nicht abzuschätzen ist in wieweit der nach vorne geschobene Reifeverlauf, der dann unter deutlich höherem Temperaturregime ablaufen wird die Aromatik der Weine beeinflusst. Hier sollte die Simulation der Äpfelsäureveratmung zumindest tendenziell eine Antwort geben.

Reifebeginn Geisenheim kaltes Szenario



Reifebeginn Gernsheim kaltes Szenario



Reifebeginn Frankfurt kaltes Szenario

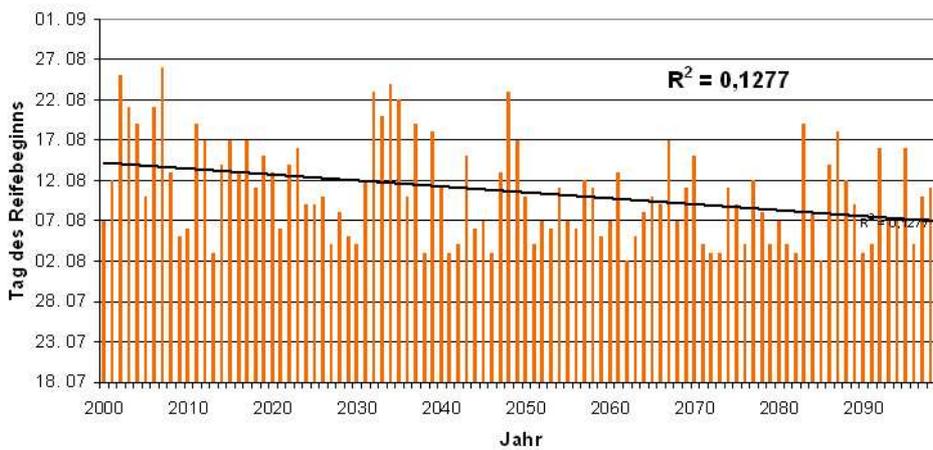
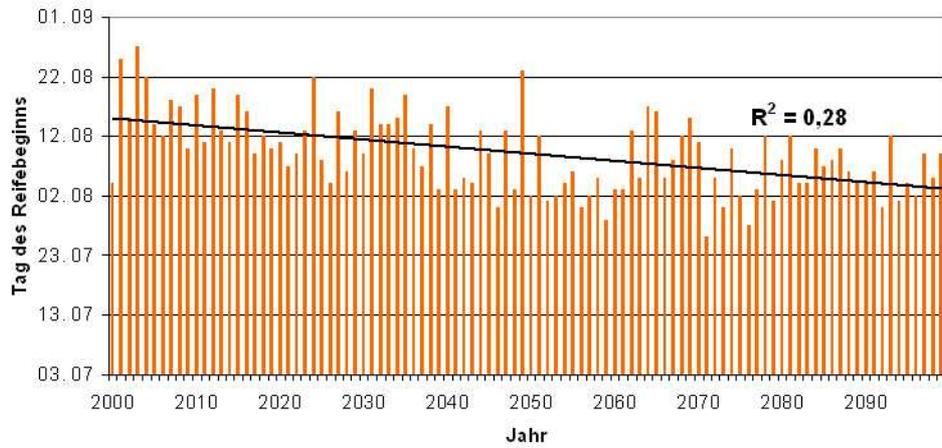
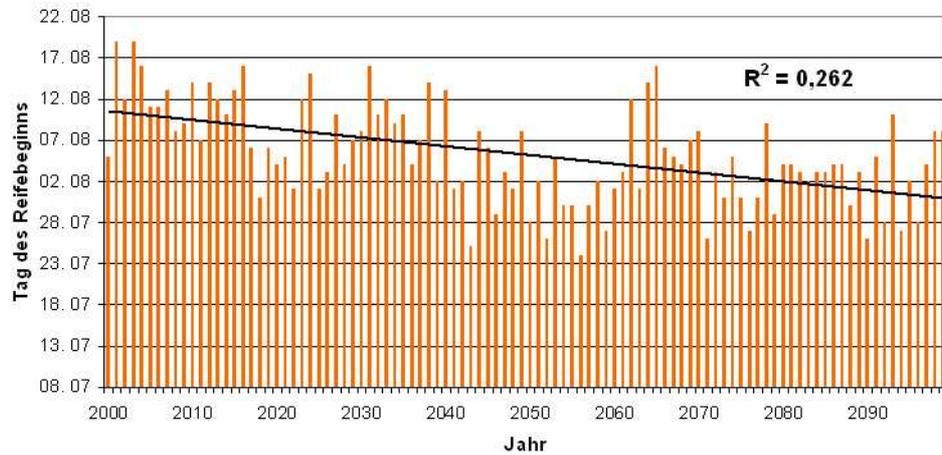


Abbildung 12: Berechneter Reifebeginn für die Stationen Geisenheim, Gernsheim und Frankfurt auf Basis eines „kalten“ Klimaszenarios“

Reifebeginn Geisenheim warmes Szenario



Reifebeginn Gernsheim warmes Szenario



Reifebeginn Frankfurt warmes Szenario

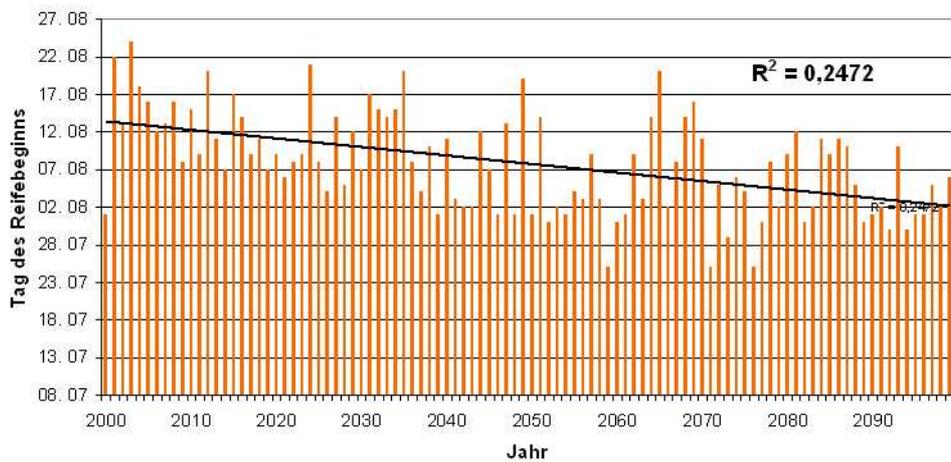
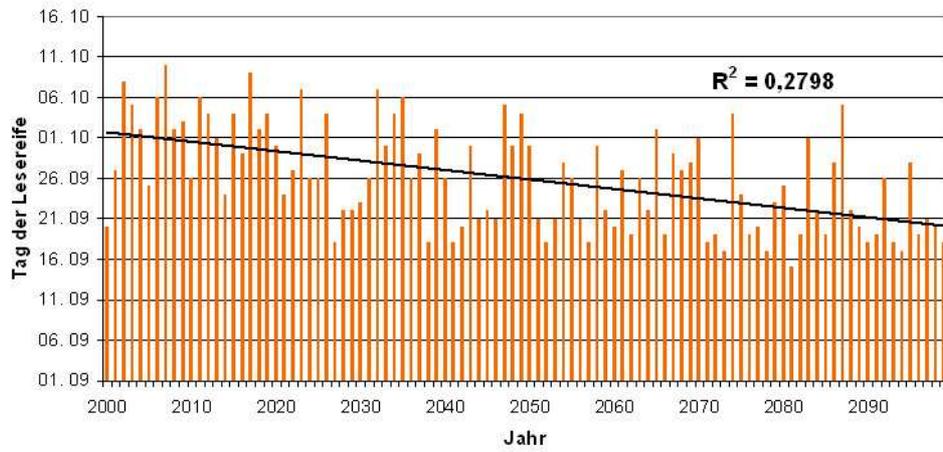
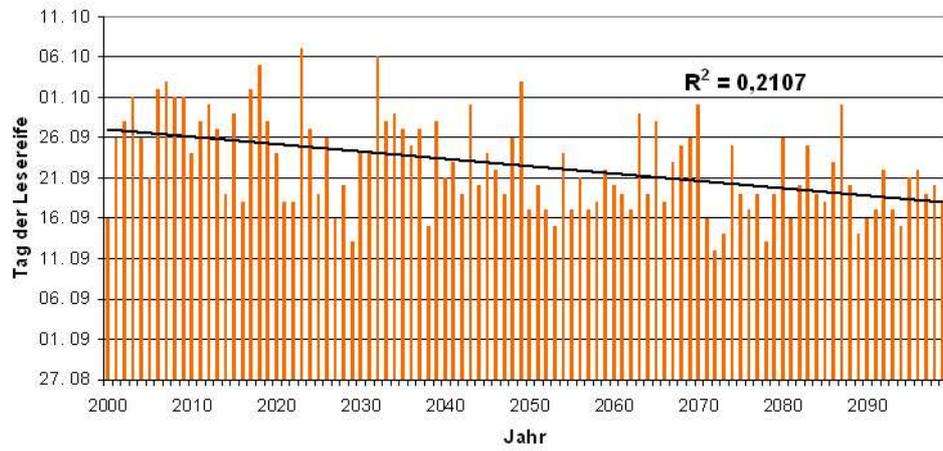


Abbildung 13: Berechneter Reifebeginn für die Stationen Geisenheim, Gernsheim und Frankfurt auf Basis eines „warmen“ Szenarios.

Lesereife Geisenheim kaltes Szenario



Lesereife Gernsheim kaltes Szenario



Lesereife Frankfurt kaltes Szenario

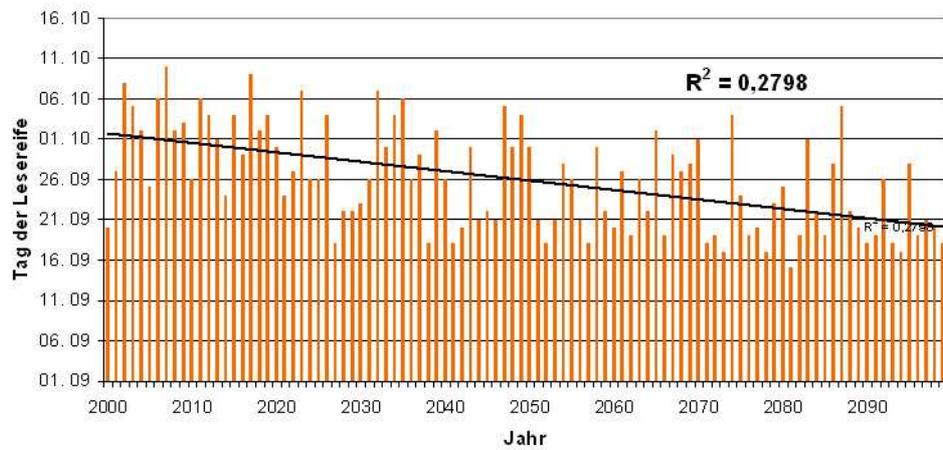
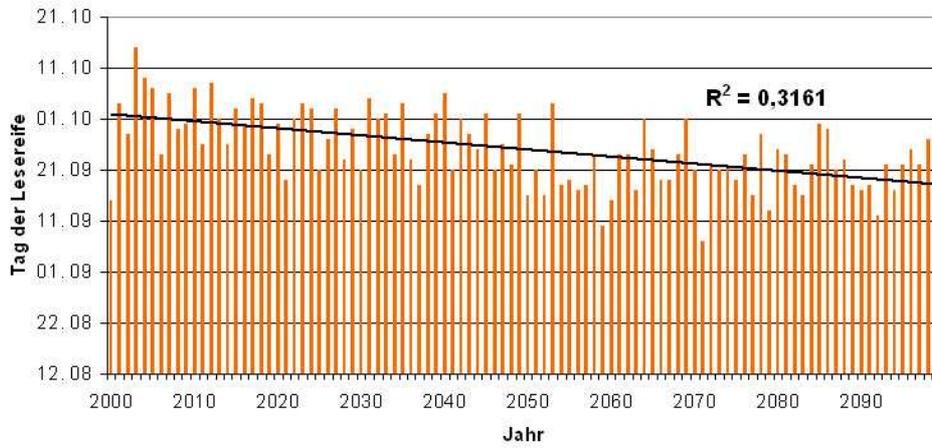
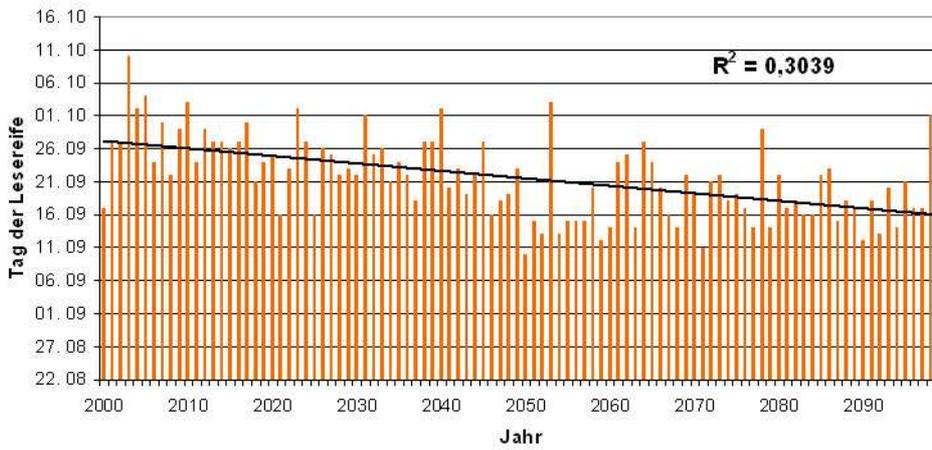


Abbildung 14: Berechneter Zeitpunkt der Lesereife für die Stationen Geisenheim, Gernsheim und Frankfurt auf Basis eines „kalten“ Szenarios.

Lesereife Geisenheim warmes Szenario



Lesereife Gernsheim warmes Szenario



Lesereife Frankfurt warmes Szenario

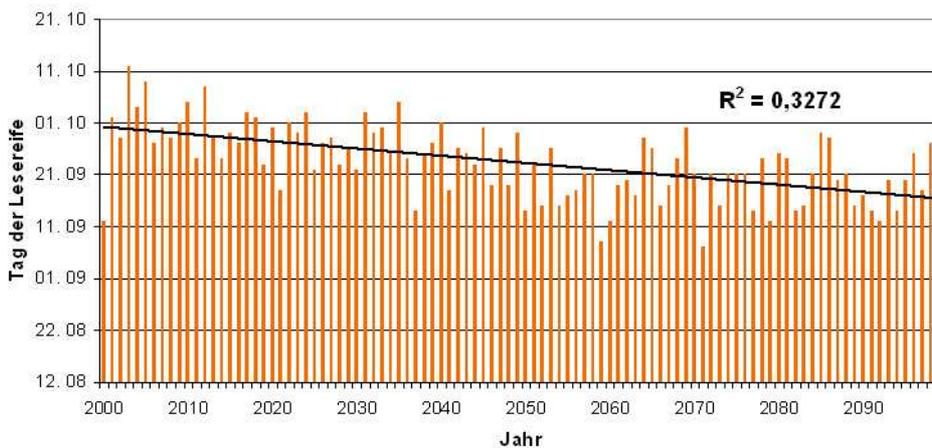


Abbildung 15: Berechneter Zeitpunkt der Lesereife für die Stationen Geisenheim, Gernsheim und Frankfurt auf Basis eines „warmen“ Klimaszenarios.

3.2 Äpfelsäuregehalt und Mostgewichte

Zum Vergleich der Datenbasis sei erwähnt, dass die Äpfelsäuregehalte in der Pfalz für die Rebsorte Riesling im Jahr 2003 bei ca. 2 g/l lagen, 2002 bei 4,5 g/l und 2004 bei ca. 4 g/l. Insofern kann man Jahrgänge in denen die Äpfelsäurewerte bei ca. 2 – 3 g/l liegen als säurearme Jahrgänge bezeichnen. Im Jahr 2003 haben früh reifende Rebsorten wie der Weißburgunder oder Müller Thurgau vielfach alkoholbetonte und säurearme Weine hervorgebracht, die unharmonisch wirkten. Eine Häufung solcher Jahrgänge könnte Hinweise auf eine Veränderung im Rebsortenspiegel geben, um in Zukunft weiter belebende Weißweine mit einer ausgewogenen Aromausprägung und Harmonie in den Alkohol und Säurewerten im trockenen und halbtrockenen Bereich zu erzeugen. Auch für die Weißweine mit Restsüße spielt die Säure als Gegensatz zur Süße eine wichtige Rolle. Bei den Rotweinen ist ein heißes Jahr wie 2003 positiv zu bewerten. Durch die Zunahme im Alkoholgehalt wirken die Weine gehaltvoller, bei einer besseren Ausprägung von Farbstoffen und Ausreifung der Tannine.

Die kalten Szenarien

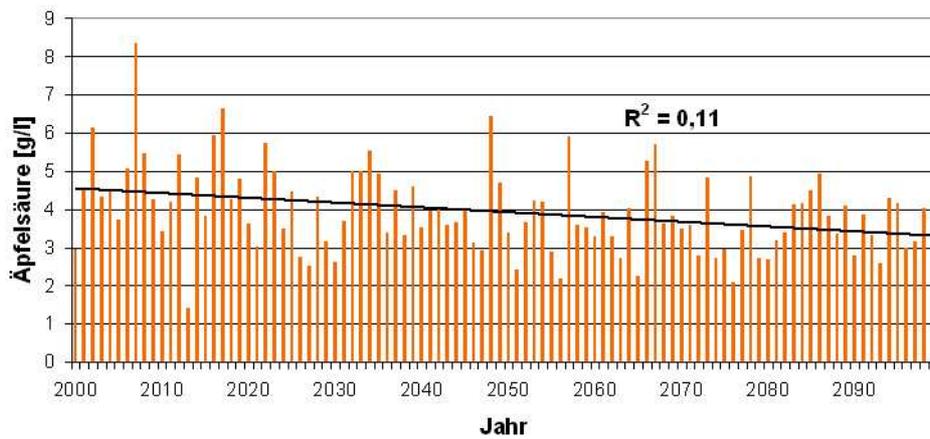
Die kalten Szenarien (Abb. 16) zeigen für Geisenheim eine durchschnittliche Abnahme des Äpfelsäuregehalts um 1 – 1,5 g/l bis zum Ende dieses Jahrhunderts. Bis 2020 gibt es viele Jahre, in denen der Äpfelsäuregehalt über 4 g/l liegt. In späteren Jahren wird das eher die Ausnahme sein. Die zweite Hälfte zeigt, dass die meisten Jahre einen Äpfelsäuregehalt zwischen 3 und 4 g/l haben werden. In Gernsheim liegen die Werte durchschnittlich um 0,5 g/l unter denen von Geisenheim und Frankfurt. Die Mostgewichte zeigen dagegen eine moderate Zunahme von 5 – 8 ‰ für alle Standorte (Abb. 17), was in etwa einer Zunahme vom 0,5 % Vol. im potenziellen Alkoholgehalt entspricht.

Die warmen Szenarien

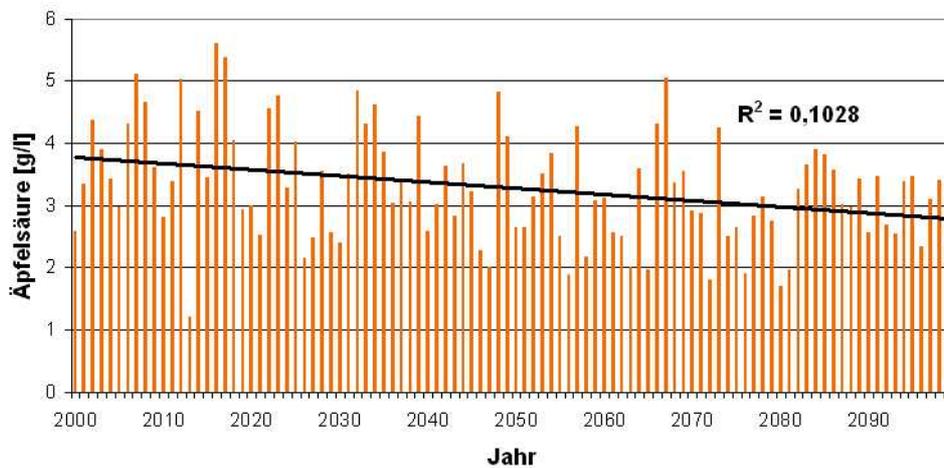
Die warmen Szenarien (Abb. 18) zeigen eine etwas deutlichere Abnahme des Äpfelsäuregehalts um 1,5 – 2 g/l. Danach werden auch in Geisenheim in der zweiten Jahrhunderthälfte viele Jahrgänge einen Äpfelsäuregehalt unter 3 g/l aufweisen. Für Gernsheim werden Jahre wie das Jahr 2003 mit einem Äpfelsäuregehalt von ca. 2 g/l keine Seltenheit mehr sein. Wieder zeigt sich, dass sich diese Entwicklung schon bis zur Hälfte des Jahrhunderts ausprägen wird. Das Mostgewicht wird nach dem warmen Szenario etwas stärker zunehmen, um 10 ‰, das entspricht einer Zunahme des potenziellen Alkoholgehalts um ca. 1 % Vol (Abb. 19).

Die Tabellen 1-3 zeigen für die drei Standorte und den zugrundegelegten warmen und kalten Klimaszenarien eine Gegenüberstellung der Entwicklung der Äpfelsäurekonzentration und der Mostgewichte. Der Vergleich zeigt, dass die von der Temperaturzunahme bewirkte Abnahme des Äpfelsäuregehalts mit einer Zunahme des potenziellen Alkoholgehalts einhergeht.

Äpfelsäure 2000-2100 Geisenheim kaltes Szenario



Äpfelsäure 2000-2100 Gernsheim kaltes Szenario



Äpfelsäure 2000-2100 Frankfurt kaltes Szenario

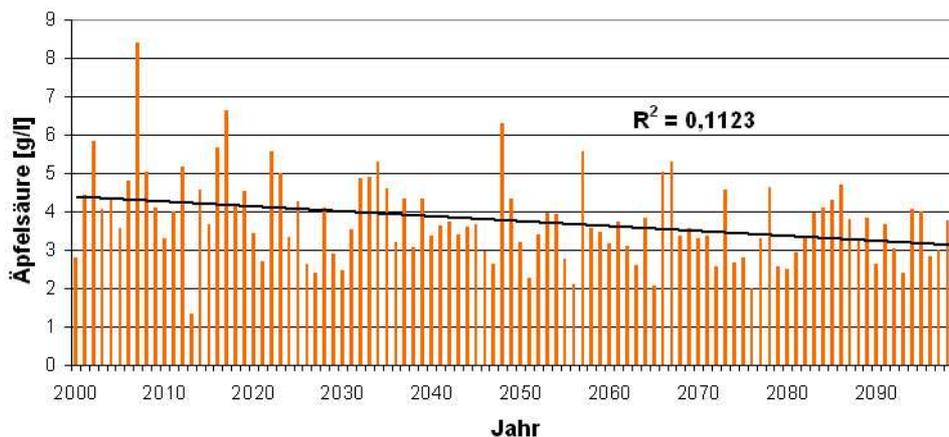
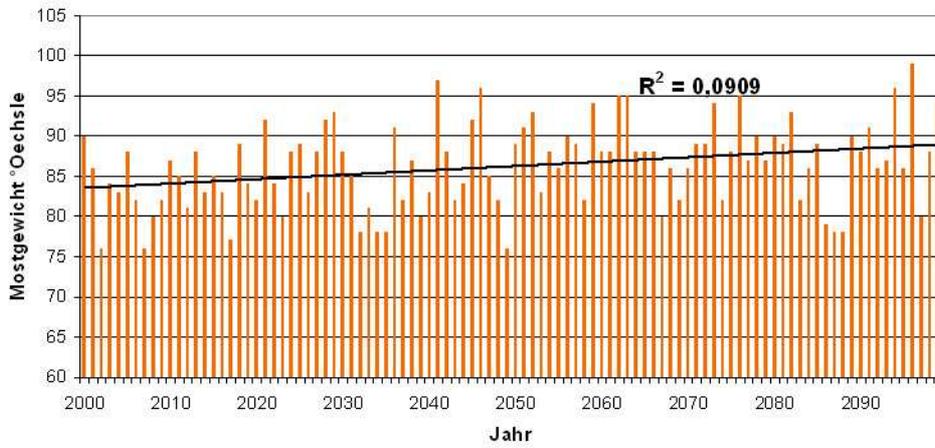
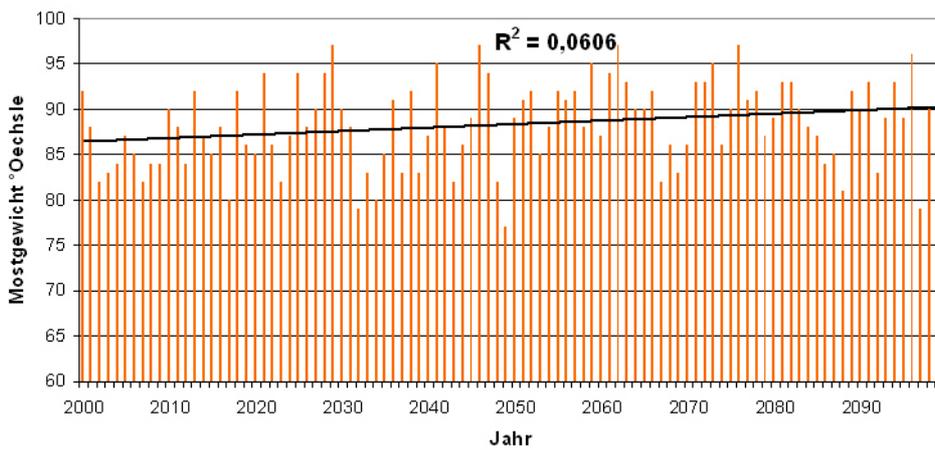


Abbildung 16: Simulation der Äpfelsäuregehalte basierend auf den „kalten“ Klimaszenarien für die Standorte Geisenheim, Gernsheim und Frankfurt bis zum Ende des Jahrhunderts. Zur Verdeutlichung der Entwicklung sind Trendlinien eingezeichnet.

Mostgewicht Geisenheim kaltes Szenario



Mostgewicht Gernsheim kaltes Szenario



Mostgewicht Frankfurt kaltes Szenario

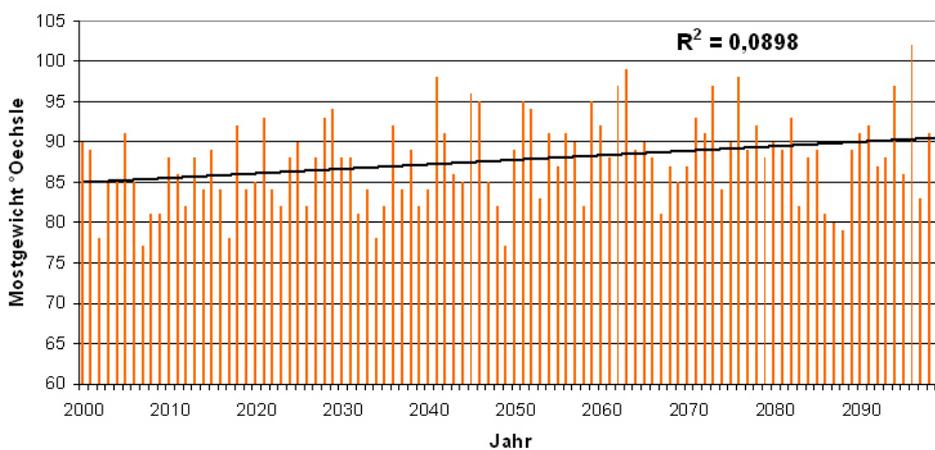
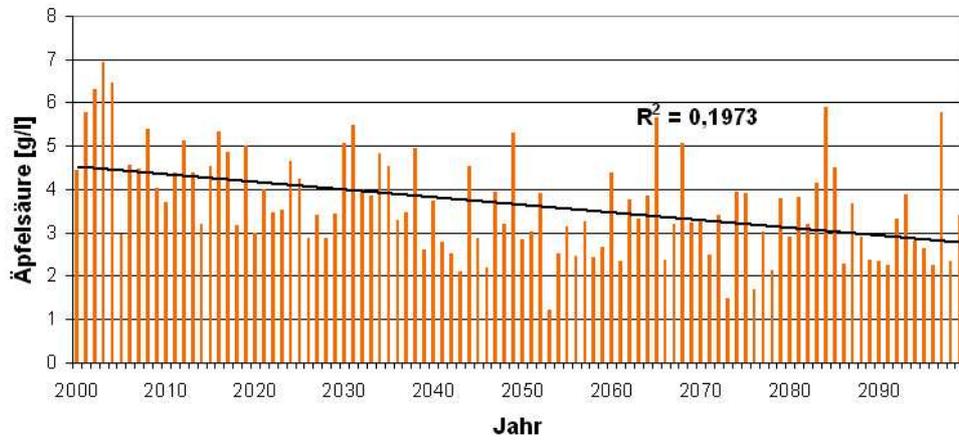
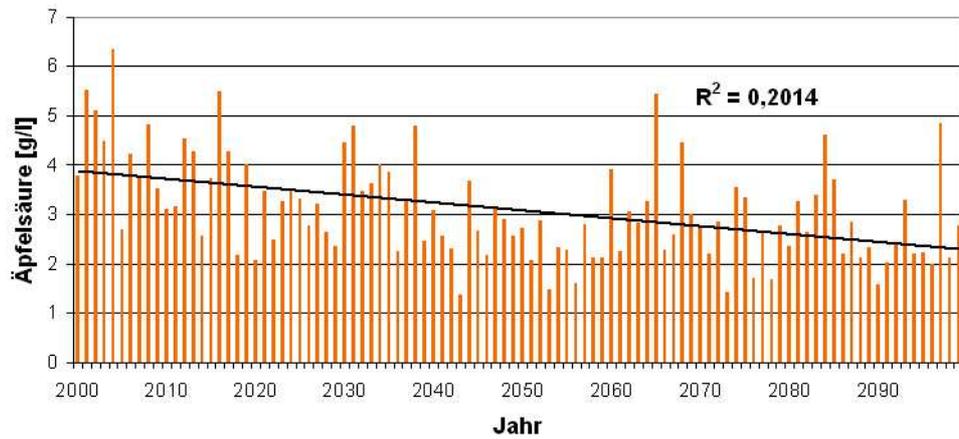


Abbildung 17: Simulation der Mostgewichte basierend auf den „kalten“ Klimaszenarien für die Standorte Geisenheim, Gernsheim und Frankfurt bis zum Ende des Jahrhunderts. Zur Verdeutlichung der Entwicklung sind Trendlinien eingezeichnet.

Äpfelsäure 2000-2100 Geisenheim warmes Szenario



Äpfelsäure 2000-2100 Gernsheim warmes Szenario



Äpfelsäure 2000-2100 Frankfurt warmes Szenario

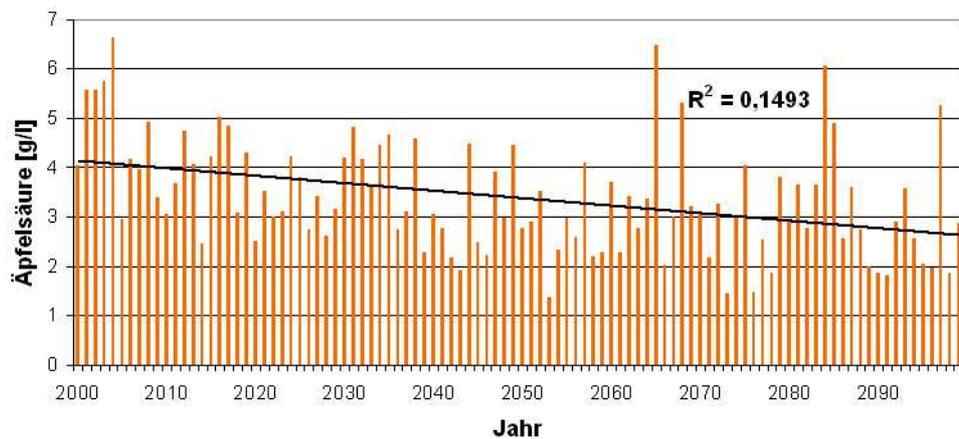
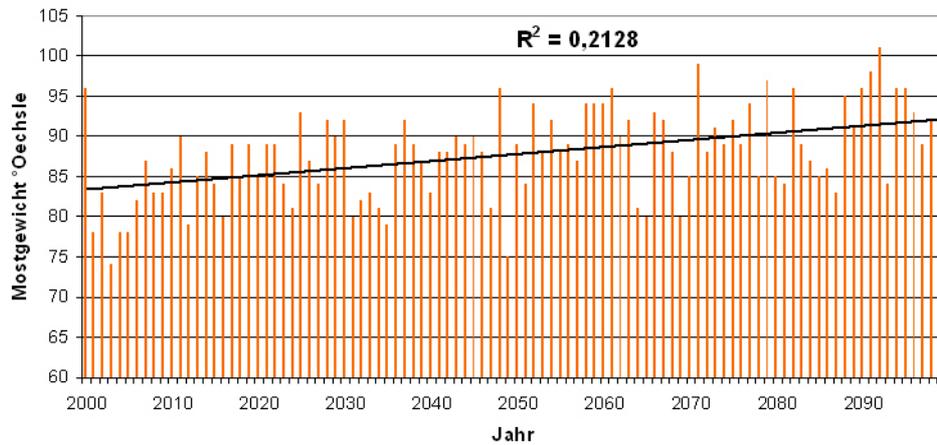
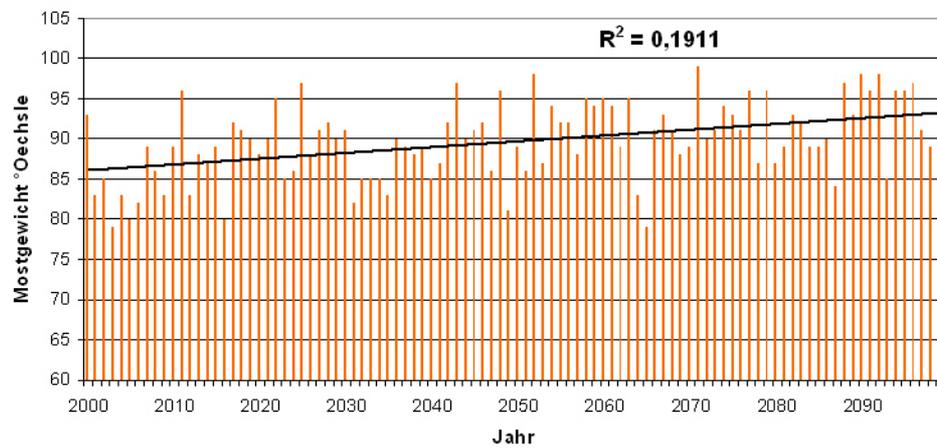


Abbildung 18: Simulation der Äpfelsäuregehalte basierend auf den „warmen“ Klimaszenarien für die Standorte Geisenheim, Gernsheim und Frankfurt bis zum Ende des Jahrhunderts. Zur Verdeutlichung der Entwicklung sind Trendlinien eingezeichnet.

Mostgewicht Geisenheim warmes Szenario



Mostgewicht Gernsheim warmes Szenario



Mostgewicht Frankfurt warmes Szenario

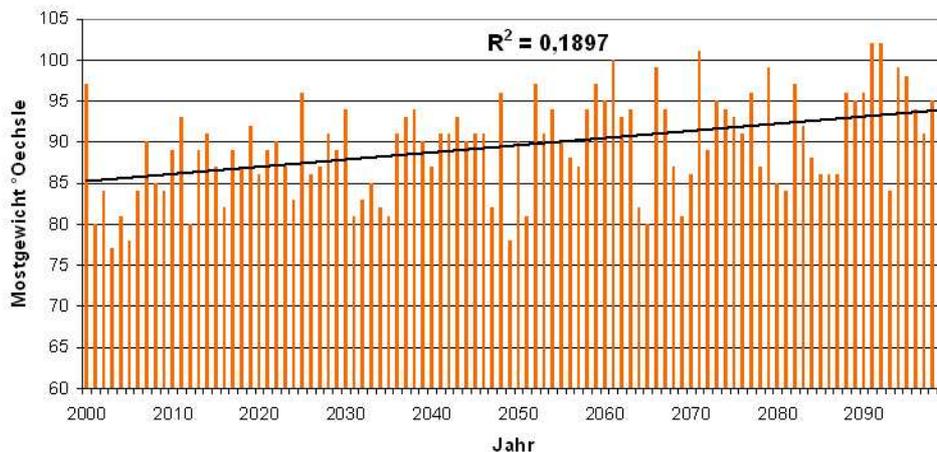


Abbildung 19: Simulation der Mostgewichte basierend auf den „warmen“ Klimaszenarien für die Standorte Geisenheim, Gernsheim und Frankfurt bis zum Ende des Jahrhunderts. Zur Verdeutlichung der Entwicklung sind Trendlinien eingezeichnet.

Tabelle 1: Berechnete Werte für die Entwicklung der Äpfelsäuregehalte und der Mostgewichte bis zum Ende dieses Jahrhunderts für den Standort Geisenheim. Es wurde jeweils ein warmes und ein kaltes Klimaszenario zu Grunde gelegt.

Dekadenmittelwerte für Äpfelsäuregehalt und Mostgewichte für Geisenheim				
	Kaltes Szenario		Warmes Szenario	
Dekade	Äpfelsäure [g/l]	Mostgewicht °Oe	Äpfelsäure [g/l]	Mostgewicht °Oe
2000 - 2009	4,9	82,7	5,1	82,2
2010 - 2019	4,5	84,2	4,4	85,5
2020 - 2029	3,8	87,1	3,5	87,4
2030 - 2039	4,3	82,8	4,2	85,4
2040 - 2049	4,0	86,5	3,3	86,8
2050 - 2059	3,6	88,5	2,7	89,9
2060 - 2069	3,8	87,8	3,7	88,6
2070 - 2079	3,3	88,7	2,9	90,9
2080 - 2089	3,8	85,4	3,6	88,1
2090 - 2099	3,4	89,5	3,1	93,3

Tabelle 2: Berechnete Werte für die Entwicklung der Äpfelsäuregehalte und der Mostgewichte bis zum Ende dieses Jahrhunderts für den Standort Gernsheim. Es wurde jeweils ein warmes und ein kaltes Klimaszenario zu Grunde gelegt.

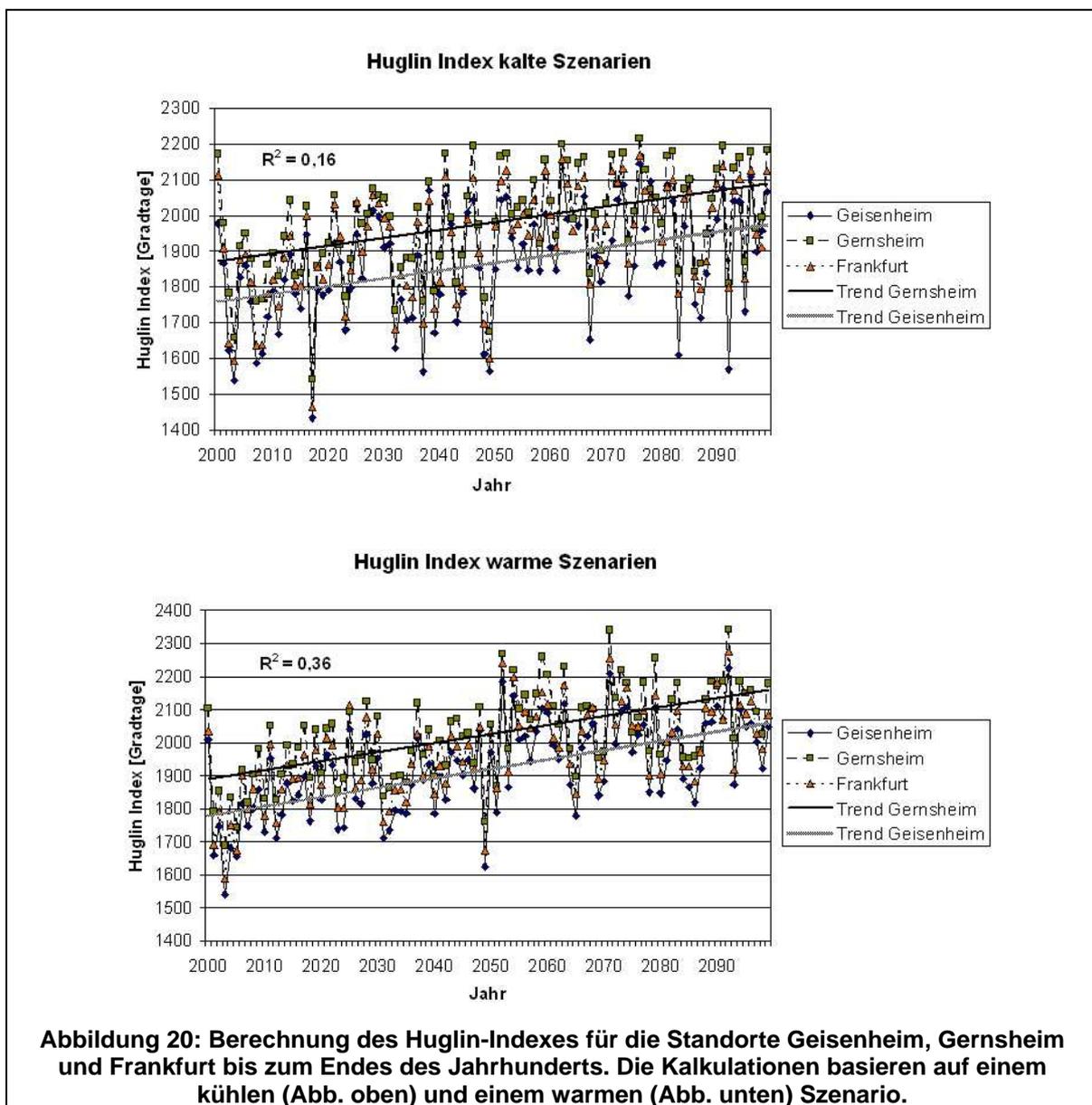
Dekadenmittelwerte für Äpfelsäuregehalt und Mostgewichte für Gernsheim				
	Kaltes Szenario		Warmes Szenario	
Dekade	Äpfelsäure [g/l]	Mostgewicht °Oe	Äpfelsäure [g/l]	Mostgewicht °Oe
2000 - 2009	3,8	85,1	4,4	84,3
2010 - 2019	3,8	87,2	3,7	88,5
2020 - 2029	3,3	89,7	2,9	90,2
2030 - 2039	3,7	85,4	3,7	86,7
2040 - 2049	3,2	87,7	2,6	89,7
2050 - 2059	3,0	90,3	2,2	91,5
2060 - 2069	3,2	89,4	3,3	89,8
2070 - 2079	2,8	91,0	2,5	92,6
2080 - 2089	3,1	88,2	2,9	90,3
2090 - 2099	2,9	89,6	2,5	93,7

Tabelle 3: Berechnete Werte für die Entwicklung der Äpfelsäuregehalte und der Mostgewichte bis zum Ende dieses Jahrhunderts für den Standort Frankfurt. Es wurde jeweils ein warmes und ein kaltes Klimaszenario zu Grunde gelegt.

Dekadenmittelwerte für Äpfelsäuregehalt und Mostgewichte für Frankfurt				
	Kaltes Szenario		Warmes Szenario	
Dekade	Äpfelsäure [g/l]	Mostgewicht °Oe	Äpfelsäure [g/l]	Mostgewicht °Oe
2000 - 2009	4,7	84,2	4,7	84,0
2010 - 2019	4,3	85,5	3,9	87,9
2020 - 2029	3,6	87,9	3,2	88,4
2030 - 2039	4,1	84,8	3,9	87,4
2040 - 2049	3,8	87,9	3,0	89,0
2050 - 2059	3,4	89,7	2,7	90,9
2060 - 2069	3,6	89,6	3,6	90,5
2070 - 2079	3,2	90,9	2,7	93,1
2080 - 2089	3,7	86,0	3,5	89,5
2090 - 2099	3,2	91,2	2,7	95,3

3.3 Der Huglin - Index

Bedingt durch die Temperaturerhöhung zeigt der Huglin - Index (Abb. 20) sowohl beim kühlen als auch beim warmen Szenario einen deutlichen Anstieg. Dieses ist eine Fortsetzung des Trends, der sich schon im ausgehenden 20. Jahrhundert bemerkbar machte. In Geisenheim ist das Mittel des Huglin - Indexes im Zeitraum 1951 bis 2000 von 1500 auf 1700 gestiegen (KRÖNING, 2004). Im Jahr 2003 lag der Huglin Index bei 2123. Die Szenarien zeigen eine Fortsetzung dieses Trends, wobei der stärkste Anstieg in der ersten Hälfte des Jahrhunderts zu verzeichnen ist. Schon ab der Dekade 2050 – 2060 liegen die Mittelwerte für Geisenheim (kühles Szenario) bei 1900. Das bedeutet, dass der Huglin - Index in den nächsten 50 Jahren zwar weiter um 200 ansteigen wird, aber in der zweiten Hälfte auf einem ähnlichen Niveau bleibt. Nach den warmen Szenarien liegen schon in den ersten 50 Jahren dieses Jahrhunderts die Dekadenmittelwerte für Geisenheim bei über 1900. In der zweiten Hälfte pendeln sich die Werte bei 2100 ein. Ein Jahr wie 2003 wird demnach in der zweiten Jahrhunderthälfte kein Ausnahmejahr mehr sein.



Dieses wird sicherlich den Rebsortenspiegel beeinflussen. Tabellenwerte für den Wärmebedarf von Rebsorten zeigen, dass in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts ohne weiteres Chardonnay, Merlot und Cabernet Sauvignon angebaut werden können (Abb. 21). In Gernsheim werden sogar in vielen Jahren Wärmesummen erreicht, die den Anbau von Syrah erlauben.

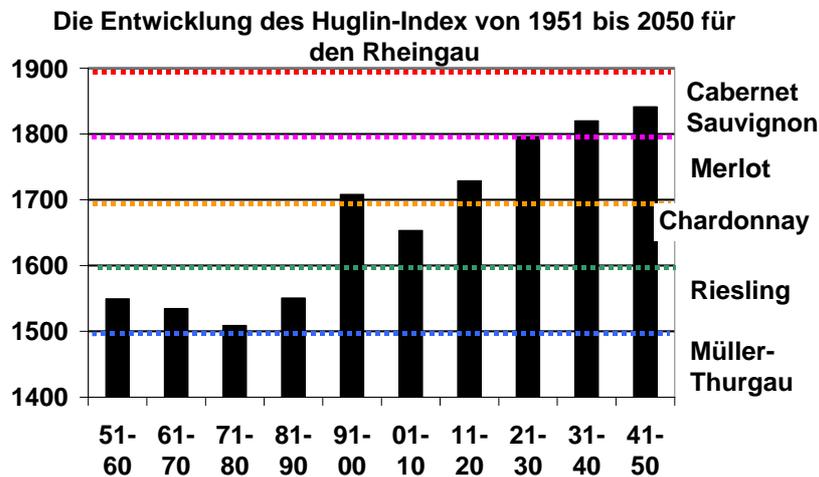


Abbildung 21: Vorhersage der Sorteneignung für den Standort Rheingau bis zum Jahr 2050. Der Huglin Index ist ein klimatischer Index, der die Tagesmittel und Tagesmaxima der Temperaturen unterschiedlich gewichtet und die Tageslänge berücksichtigt.

3.4 Der Wasserhaushalt

Die Betrachtungen zur Wasserbilanz beschränken sich auf die Phase „Ende Blüte bis Reifebeginn“, in der eine gute Wasserversorgung für die Rebe große Bedeutung hat. Eine Betrachtung der anderen Phasen wäre hier wenig sinnvoll, da mit diesen Berechnungen keine Aussage darüber getroffen werden kann, ob für die Rebe tatsächlich eine Trockenstresssituation vorliegt. Für Standorte die stärker durch Trockenheit gefährdet sind, z.B. skelettreiche Böden in Steillagen deutet eine Abnahme der klimatischen Wasserbilanz auf eine Verschärfung der Problematik. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 22 für die kalten Szenarien und 23 für die warmen Szenarien zusammen mit den Trendlinien wiedergegeben.

Die kalten Szenarien

Die kalten Szenarien zeigen nur eine geringfügige Änderung der Wasserbilanz während dieser phänologischen Phase bis zum Ende des Jahrhunderts auf. In der zweiten Jahrhunderthälfte kommt es zu vereinzelten trockenen Jahren, in der die klimatische Wasserbilanz unter 200 mm sinkt. Gegen Ende des Jahrhunderts scheint sich für Gernsheim und Frankfurt ein Trend anzudeuten der auf eine größere

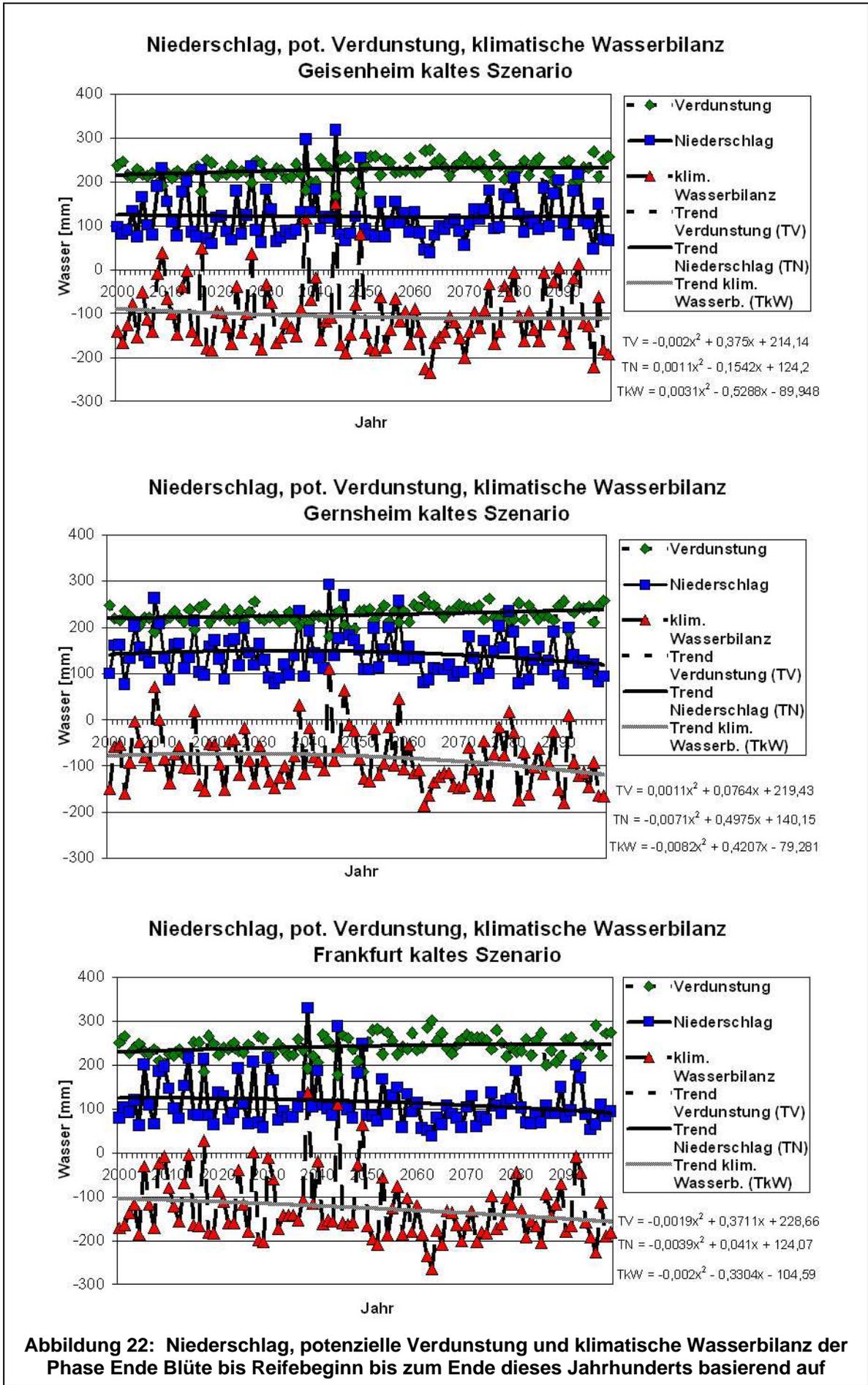
Trockenheit in dieser Phase hindeutet (Abb. 22). Leicht sinkende Niederschläge und eine Erhöhung der potenziellen Verdunstung aufgrund der höheren Temperaturen führen zu einem Absinken der klimatischen Wasserbilanz.

Die warmen Szenarien

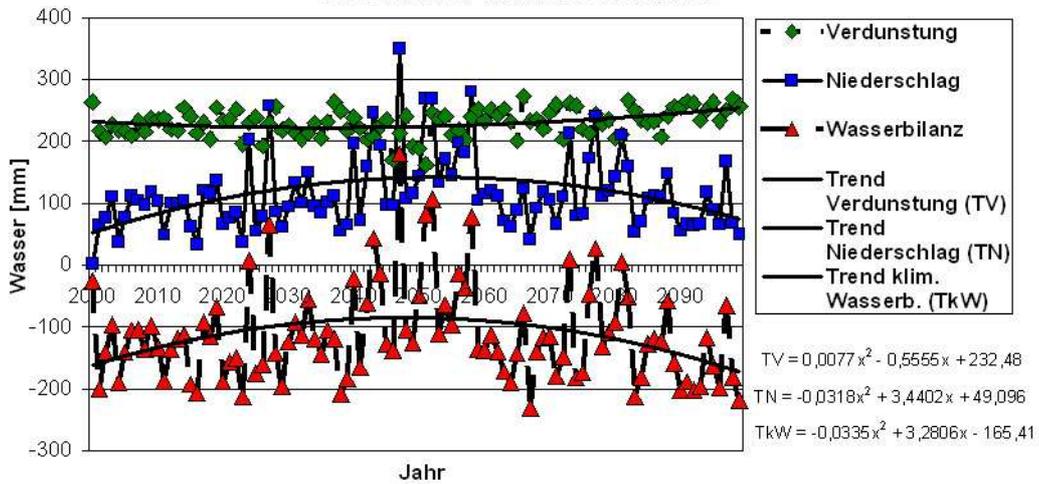
Dieser Trend der sich in den kühlen Szenarien andeutet, erscheint nun bei den warmen Szenarien wesentlich deutlicher ausgeprägt. Für alle drei Standorte kommt es in der Mitte des Jahrhunderts zu einem Anstieg der Niederschläge, der allerdings ab 2060 auf vorherige Werte zurückgeht. Zum Ende des Jahrhunderts kommt es dann zu einer gegenüber den kühlen Szenarien stärker ausgeprägten Verschlechterung der klimatischen Wasserbilanz, verursacht durch leicht sinkende Niederschläge und einer Erhöhung der potenziellen Verdunstung (Abb. 23).

In der Wasserbilanz zeigen sich am deutlichsten regionale Unterschiede zwischen den drei Standorten. Gernsheim weist deutlich höhere Niederschläge auf als Geisenheim und Frankfurt. Diese Unterschiede können im Einzelfall durchaus entscheidend sein, ob ein Standort Trockenstress gefährdet ist oder nicht.

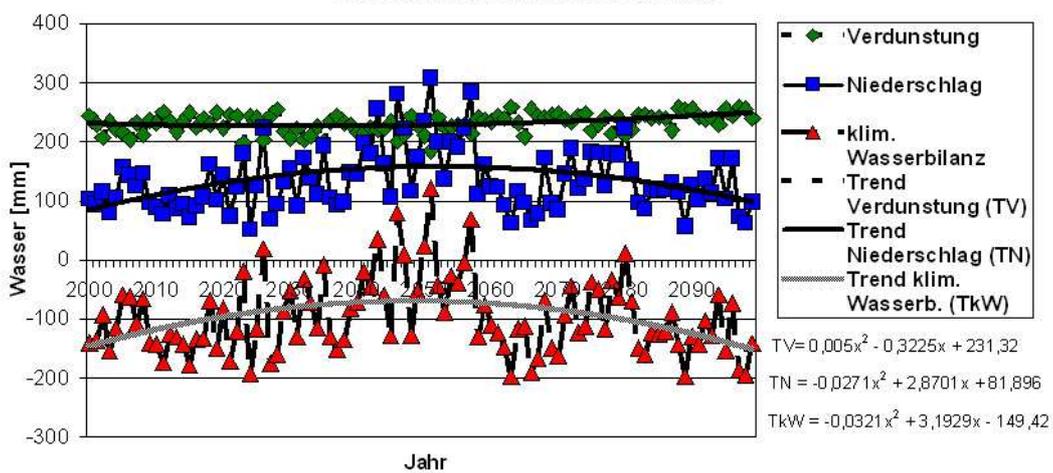
Insgesamt sind die Ergebnisse zum Wasserhaushalt mit der größten Unsicherheit behaftet. Um die Bewertung des Wasserhaushaltes von Rebstandorten in der Zukunft besser durchführen zu können, müssten komplexere Modelle eingesetzt werden.



Niederschlag, pot. Verdunstung, klimatische Wasserbilanz
Geisenheim warmes Szenario



Niederschlag, pot. Verdunstung, klimatische Wasserbilanz
Gernsheim warmes Szenario



Niederschlag, pot. Verdunstung, klimatische Wasserbilanz
Frankfurt warmes Szenario

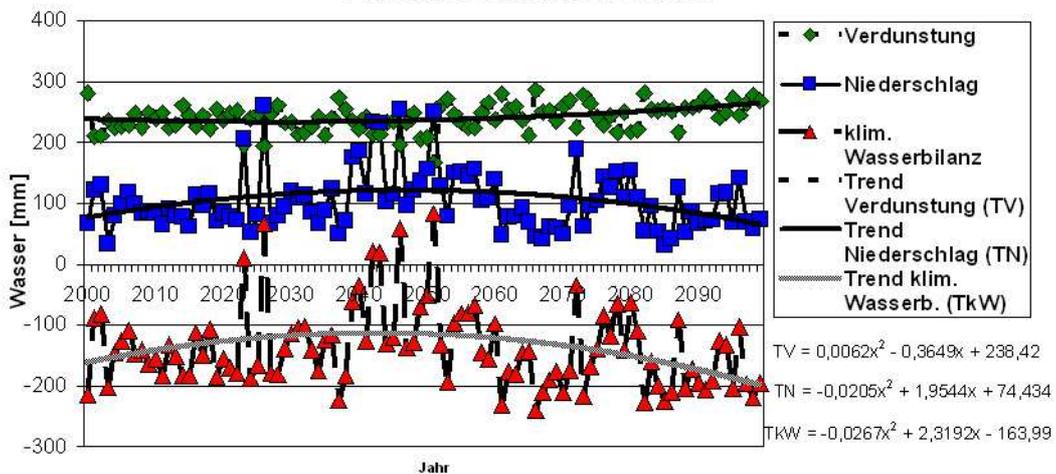


Abbildung 23: Niederschlag, potenzielle Verdunstung und klimatische Wasserbilanz der Phase Ende Blüte bis Reifebeginn bis zum Ende dieses Jahrhunderts basierend auf einem warmen Klimaszenario.

4 Fazit und Ausblick

Die Ursachen für den in den letzten Jahren beobachteten Temperaturanstieg werden auf wissenschaftlicher Seite derzeit scharf diskutiert. Eine Fraktion führt die Veränderung auf die anthropogenen Einflüsse durch den Menschen zurück, die die Strahlungsflüsse zur Erde hin bzw. zurück in den Weltraum nachhaltig beeinflussen. Hierzu tragen die steigenden Emissionen an Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Stickoxiden (N₂O), aber auch an bodennahem Ozon (O₃) und Fluorkohlenwasserstoffen (FCKW) bei. Die andere Wissenschaftlerfraktion führt die derzeitige „Warmphase“ auf eine verstärkte Sonnenaktivität zurück. Niemand hingegen bestreitet, dass sich das Klima ändert und die Wahrscheinlichkeit, dass der Mensch etwas damit zu tun hat, wächst. Die Abschätzungen der weiteren Erwärmung durch Klimamodelle gehen von einer Zunahme der Temperatur bis zum Ende dieses Jahrhunderts um ca. 1,5 °C im Mittelmeerraum bis ca. 4 °C in Nordeuropa aus (HANSEN 2003). Die neuesten Schätzungen des Intergovernmental Panels on Global Climate Change (IPCC 2001) wurden sogar nach oben korrigiert (bis 5,8 °C). Wetteraufzeichnungen bestätigen den anhaltenden globalen Trend und lokale Wetterdaten aus einzelnen deutschen Weinbauregionen zeigen deutlich Tendenzen zu höheren Temperaturen seit Beginn der Messreihen (RUPP 1995, HOPPMANN UND SCHMITT 2001). So geht aus dem Klimastatusbericht des Deutschen Wetterdienstes für den Zeitraum 1866 bis 1998 bereits eine Erwärmung um durchschnittlich 1 °C hervor, weit mehr als der Unterschied zwischen einzelnen Weinbauregionen wie z.B. Geisenheim/Rheingau und Freiburg/Breisgau (0,4 °C) (HOPPMANN UND SCHMITT 2001). Vor allem die neunziger Jahre waren überdurchschnittlich warm, 9 der 13 wärmsten Jahre fielen in den Zeitraum ab 1990 (JONES ET AL. 2001, HOPPMANN UND SCHMITT 2001). Weltweit war 1998 das wärmste (+ 0,55°C), 2002 das zweitwärmste (+0,48°C) und 2003 das drittwärmste Jahr im Vergleich zum langjährigen Durchschnitt (WMO 2003). Diese Erwärmung führt zu einer Veränderung der Anbaugrenzen für Reben. Vor allem die östliche Begrenzung durch bisherige starke Winterfröste wird sich verändern (KENNY AND HARRISON 1993) und das derzeitige Bild der Anbauregionen wandeln, da der erwartete Temperaturanstieg deutlich stärker für die Wintermonate (in etwa doppelt so hoch) als für die Sommermonate erwartet wird (IPCC 2001). Der als sicher einzuschätzende Temperaturanstieg verschiebt die potenziell möglichen Anbaugrenzen um 200 bis 400 km nordwärts und um 100 bis 150 m in die Höhe. Rebsorten aus dem mediterranen Gebiet können auch in Mitteleuropa angepflanzt werden.

Dies wird Auswirkungen auf den Weinmarkt haben, welche den Weinbau vielleicht stärker beeinflussen, als die klimatischen Änderungen.

In dieser Arbeit wurden in erster Linie die Folgen erörtert, welche von einer Zunahme der Temperatur bewirkt werden. Neben der Temperaturerhöhung gibt es noch andere Faktoren. Der starke Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration ist neben der Temperatur der auffälligste Faktor der Klimaänderung. Bei der Rebe wird wie bei anderen Kulturpflanzen ein sogenannter CO₂-Düngeeffekt beobachtet (SCHULTZ 2000), der aus einer Erhöhung der Photosyntheseleistung resultiert und eine Verbesserung der Wassernutzungseffizienz bewirkt. Dieser Effekt ist noch nicht genügend quantifiziert, um ihn in Modellrechnungen einfließen zu lassen (WEIGEL 2004).

Allerdings ist bei den Berechnungen deutlich geworden, dass der Klimawandel sich nicht langsam bis zum Ende des Jahrhunderts vollziehen wird, sondern dass die meisten temperaturbedingten Auswirkungen, welche den Weinbau betreffen schon

im Jahrzehnt von 2050 – 2060 vollständig ausgeprägt sein werden. Dies resultiert aus den Prognosen der Entwicklung der Tagesmitteltemperaturen (Abb. 1), die den stärksten Anstieg von 2030 – 2060 aufweisen.

Ein Temperaturanstieg wird die phänologische Entwicklung der Rebe sowie die Sorteneignung nachhaltig beeinflussen. Die milderen Winter, Frühjahre und wärmeren Sommer werden den Vegetationsablauf beschleunigen. Bereits heute liegt der Austriebstermin in Geisenheim ca. 7 Tage früher als im Durchschnitt der letzten 40 Jahre, die Blüte beginnt 10 Tage früher und der Reifebeginn hat sich bereits 12 Tage nach vorne geschoben (HOPPMANN UND SCHMITT 2001). Trotz früheren Austriebs wird sich das Spätfrostisiko vermindern (HOPPMANN UND SCHMITT 2001). Von weinbaulicher Relevanz ist eine solche Verfrühung der Entwicklung vor allem für die Reifephase, die dann unter sehr viel höheren Temperaturen ablaufen wird, was die Inhaltsstoffbildung nachhaltig beeinflusst. In Kalifornien geht man bereits von Einflüssen auf die Weinqualität aus, die vor allem auf den durchschnittlich wärmeren Nachttemperaturen beruhen sollen (NEMANI ET AL. 2001). In Europa wird die Erwärmung mittelfristig auch zu Verschiebungen im Sortenspektrum führen (KENNY UND HARRISON 1993, SCHULTZ 2000, HOPPMANN UND SCHMITT 2001). Insgesamt wird die Anbaueignung von Sorten wie Merlot oder Cabernet Sauvignon erreicht werden und die Produktion von Eiswein wird für die Erzeuger ein zunehmendes Risiko darstellen. Insgesamt wurde bereits durch Satellitenaufnahmen belegt, dass das Pflanzenwachstum und die Länge der Vegetationsperiode vor allem in den nördlichen Breiten > 45 °N stark zugenommen hat (MYNENI ET AL. 1997).

Gleichzeitig zum Anstieg der Temperaturen wird eine Veränderung der Niederschlagsverteilung erwartet. Die Tendenz ist zumindest für den Winter eindeutig. So werden dort deutlich mehr Niederschläge fallen. Beim Sommer ist die Richtung nicht ganz klar, doch geht hier die Tendenz zu geringeren Niederschlagssummen. Insgesamt werden mehr Starkregen fallen als bisher, was bei gleichbleibender Gesamtmenge niedrigere Bodenwasserwerte durch höheren Oberflächenablauf bedeutet. Bereits die letzten 70 Jahre brachten starke globale Verschiebungen in den Niederschlagswerten. Die markantesten Veränderungen zeigten sich hier für 1) Nord-Russland mit + 20% Niederschlag und 2) die afrikanische Sahelzone mit – 20 – 50% Niederschlag (HULME ET AL. 1992).

Selbst wenn die jährlichen Niederschlagswerte konstant bleiben, werden die Evaporations- bzw. Transpirationsraten durch die höheren Temperaturen der Ozean- und Landmassen steigen. Zur Zeit liegt die Evaporationsrate der Meeresoberfläche bei ca. 44.000 km³/Jahr. Wenn die derzeitige durchschnittliche Meerestemperatur von 11,5 °C um 1 °C ansteigen würde, wird die Evaporationsrate um 20 % zunehmen und lokal zu höheren Luftfeuchtwerten und höheren Niederschlägen führen. Dies wird vor allem für küstennahe Weinbaugebiete prophezeit, während andererseits für Zentral- und Nordeuropa zunehmende Trockenheit prognostiziert wird. Dadurch wird sich das Bodenwassermanagement, vor allem in Trockenlagen verändern müssen. Um hierzu klare Aussagen machen zu können, sind die hier gezeigten Hochrechnungen allerdings zu unsicher. Es wird allerdings bei einigen Standorten die Frage aufkommen, ob in manchen Lagen selbst eine Teilflächenbegrünung als Erosionsschutz, als Lieferant organischen Materials und als Grundlage der Mechanisierung risikofrei einsetzbar bleibt, oder ob dies nur in Kombination mit Bewässerung erfolgen kann. Dies ist ein zwiespältiges Problem, da einerseits Modellabschätzungen ein stark erhöhtes Erosionsrisiko belegen (z.B. für Spanien

eine Zunahme der erosionsgefährdeten Flächen um 145.000 km² (Corine Studie 1991)) andererseits Wasser ein noch knapperes Gut werden wird und auch weitgehend die Infrastruktur zur Bewässerung fehlt (z.B. Reservoirs). Das Bodenmanagement wird aber auch Veränderung dadurch erfahren, dass sich die Abbauraten von organischem Material erhöhen werden (SCHULTZ 2000) (Abb. 24).

Simulation der Abbaurate von organischem Material im Boden (50°N)

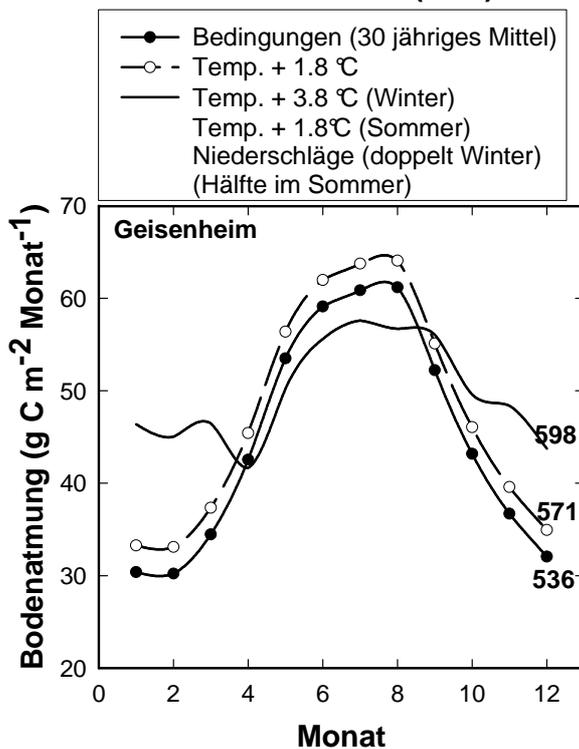


Abbildung 24: Simulation der Abbaurate von organischem Material im Boden unter verschiedenen klimatischen Szenarien. Die Zahlen an den Kurven geben die jährlichen gesamten Abbauraten an (nach Schultz 2000).

Dies wird eine Anpassung der Humuswirtschaft erforderlich machen. Zusätzlich werden dadurch die Nährstoffauswaschungsraten wieder zunehmen und die ausreichende Nährstoffversorgung der Rebe im Sommer eventuell vermehrt über Blattapplikationen erfolgen müssen. Auch die Frage der Wahl der Unterlagen müsste unter diesen Klimaszenarien dann neu aufgegriffen werden. Trockenresistente Unterlagen, deren Einsatzgebiet bisher nur auf Südeuropa begrenzt war, könnten sich als ein zusätzlich geeignetes Instrument zur Verhinderung größerer Trockenschäden erweisen. Allerdings ist mit diesen Unterlagen auch eine relativ starke Wüchsigkeit und damit Neigung zu höherer Krankheitsanfälligkeit verbunden.

Die Temperaturentwicklung auf der Erde war immer eng an den CO₂-Gehalt der Atmosphäre gekoppelt (Treibhauseffekt). Dieser lag stabil über fast 5 Jahrhunderte bei ca. 270 ppm (EHLERINGER UND CERLING 1995) und fluktuierte in den letzten 420.000 Jahren zwischen 180 und maximal 300 ppm (PETIT ET AL. 1999). Seit Beginn der Industrialisierung steigt die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre an. Die heutige Konzentration von ca. 365-380 ppm liegt mehr als 30% über den Vor-Industrie-

Werten und bereits 20 % über denen von 1954. Die Verwendung fossiler Brennstoffe wird die Konzentration weiter nach oben treiben auf geschätzte 540 ppm Mitte des Jahrhunderts.

Derzeit werden ca. 22 Tonnen/Jahr/Person in den USA verbraucht gegenüber ca. 0,7 Tonnen/Jahr/Person in Indien. Aber gerade die Staaten an der Schwelle zur Industrienation werden in Zukunft für die stärksten Steigerungsraten sorgen (für eine ausführliche Liste kann man die Datenbank des Carbon Dioxide Information Analysis Centre im Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA, <http://cdiac.esd.ornl.gov> konsultieren). Nur wenn die CO₂ Ausstoßraten berücksichtigt werden, lässt sich der derzeitige Temperaturanstieg mit Modellen nachvollziehen (MATTHEWS ET AL. 2004). Neben dem indirekten Effekt auf die globale Temperaturentwicklung hat die CO₂-Konzentration einen direkten Effekt auf das Pflanzenwachstum und die Assimilationsrate. Die direkte Reaktion von Reben auf hohe CO₂-Konzentrationen ähnelt denen von anderen vergleichbaren (sogenannten C₃-Pflanzen) annuellen und perennierenden Pflanzen, bei denen Steigerung der Photosyntheseleistung, Biomasseproduktion, Licht-, Nährstoff- und Wassernutzungseffizienz (Ressourceneinsatz/kg Biomasse) beobachtet werden (GRIFFIN UND SEEMAN 1996).

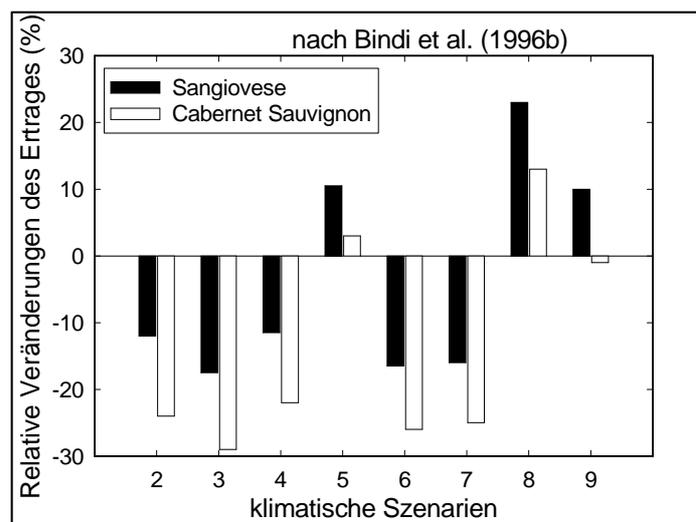


Abbildung 25: Modellsimulation der relativen Veränderung der Erträge bei den Sorten Cabernet Sauvignon und Sangiovese für verschiedene Klimaszenarien (nach Bindi et al. 1996B).

Obwohl über kurze Zeiträume diese Reaktion in Feldversuchen bestätigt wurde (SCHULTZ 2000) scheinen Langzeitstudien darauf hinzudeuten, dass eine Verschiebung von vegetativer zu generativer Entwicklung eintreten könnte (BINDI ET AL. 1996A). Diese Reaktion führt zu einer proportional stärkeren Blattflächenentwicklung und damit zu einem potenziell noch höheren Wasserverbrauch. Diese Verschiebung von generativer zu vegetativer Entwicklung ergab in einer Studie, in der verschiedene Klimaszenarien und Modelle verwendet wurden in 5 von 8 Fällen Ertragsreduzierungen, wobei die Sorte Cabernet Sauvignon deutlich sensibler reagierte als die Sorte Sangiovese (BINDI ET AL. 1996B) (Abb. 25).

Es wird vermutet, dass die Ausbreitung verschiedener Rebschädlinge nach Norden durch Veränderung im Klima mit begünstigt wurde. Zikaden, Esca, Eutypia oder Schwarzfäule waren vor 20 Jahren bei uns noch nahezu unbekannt, beim Traubenwickler wurde die bekreuzte Form nur in sogenannten ‚warmen‘ Jahren angetroffen. Die milden Winter sorgen für ein relativ großes Reinfektionspotential im Frühjahr durch Pilzsporen und die Generationenzahl bei Insekten nimmt zu. Ein Beispiel aus jüngster Vergangenheit aus Kalifornien zeigt, dass durch eine Reihe von sehr milden Wintern sich starke Populationen an Insekten (Leafhopper) aufbauen können, die nach Norden wandern und dort zu Überträgern gefährlicher Rebkrankheiten wie z.B. der sog. Pierces Disease werden.

Die Verlängerung der Vegetationsperiode und die früher einsetzende Reifephase bei höheren Temperaturen wird ab der zweiten Jahrhunderthälfte den Rebsortenspiegel und den Charakter der Weine verändern. Die Säuregehalte werden zurückgehen und die Alkoholgehalte zunehmen. In Deutschland als nördliches Anbaugebiet herrschen während der Reifephase vergleichsweise kühle Temperaturen. Das führt zu einer ausgewogenen Ausprägung von Aromastoffen, Säurewerten und Mostgewichten, die zur großen Vielfalt der Weißweine und deren Charakter beitragen. Dieser Weintyp wird sich mit einigen Rebsorten in Zukunft nicht mehr erzeugen lassen.

5 Danksagung

Folgende Institutionen ermöglichten die Arbeit durch ihre Unterstützung:
DLR Rheinpfalz (Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinpfalz) Neustadt
Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Agrarmeteorologie, Oppenheim
Deutscher Wetterdienst, Außenstelle Geisenheim

6 Literatur

- Bindi, M., Fibbi, L., Gozzini, B., Orlandini, S. und Seghi, L. (1996A) The effect of elevated CO₂ concentration on grapevine growth under field conditions. *Acta Horticulturae* 427, 325-330.
- Bindi, M., Fibbi, L., Gozzini, B., Orlandini, S. and Miglietta, F. (1996B) Modelling the impact of future climate scenarios on yield and yield variability of grapevine. *Climate Research*, 7, 213-224.
- Ehleringer, J.R. und Cerling, T.E. (1995) Atmospheric CO₂ and the ratio of intercellular to ambient CO₂ concentrations in plants. *Tree Physiol.* 15, 105-111.
- Enke, W. 2003: Anwendung eines statistischen Regionalisierungsmodells auf das Szenario B2 des ECHAM4 OPYC3 Klima - Simulationslaufes bis 2050 zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für das Bundesland Hessen. Abschlussbericht zum Werkvertrag B. - Nr. 2003/00082 zwischen dem Landesamt für Umwelt und Geologie Hessen und der Firma Meteo-Research.
- Enke, W. 2004 Erweiterung des Simulationszeitraumes der wetterlagenbasierten Regionalisierungsmethode auf der Basis des ECHAM4-OPYC3 Laufes für die Dekaden 2011/2020 und 2051/2100, Szenario B2. Abschlussbericht zum Werkvertrag Auftrag - Nr.: 2004/09353876_1 zwischen dem Landesamt für Umwelt und Geologie Hessen und der Firma Meteo-Research.
- Griffin, K.L. und J. R. Seemann, (1996) Plants, CO₂ and photosynthesis in the 21st century. *Chemistry and Biology* 3, 245-254.
- Hansen, J.E. (2003) Global temperature trends. Goddard Institute for Space Studies, NASA.
- Haude, W. (1963) Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise, *Mitteilungen des Deutschen Wetterdienstes* 11.
- Hoppmann, D. und H. Hüster (1988) Weinbergsbegrünung unter Berücksichtigung des Wasserbedarfs, *Der Deutsche Weinbau* (12), 594-597.
- Hoppmann, D. und H.H. Schmitt (2001) Die Klimawende. Chancen und Risiken für den Weinbau in Deutschland, *Der Deutsche Weinbau*, 10, 36-39.
- Hoppmann, D. und B. Berkelmann – Löhnertz, (2000) Prognosis of phenological stages of *Vitis vinifera* (cv. Riesling) for optimizing pest management., *Bulletin OEPP/EPPO* (30) 121-126.
- Houghton, J. (2001) Intergovernmental Panel on Climate Change 2001. Cambridge University Press, New York.
- Huglin, P. (1983) Possibilités d'appréciation objective du milieu viticole, *Bull. OIV*, 823-833.

Hulme, M., Marsh, R. und P.P. Jones (1992) Global changes in a humidity index between 1931-1960 and 1961-1990. *Climate Research* 2, 1-22.

Jones, P.D., Parker, D.E., Osborn, T.J. und K.R. Briffa (2001) Global and hemispheric temperature anomalies-land and marine instrumental records. In: *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S Department of Energy, Oak Ridge, Tenn. U.S.A.

Kröning, M. (2004) Weinbauklimatischer Vergleich zwischen Rheingau, Franken und Brandenburg unter Einbeziehung zukünftiger Klimaszenarien, Diplomarbeit (Geisenheim).

Kenny, G.H. und P. A. Harrison (1993) The effects of climatic variability and change on grape suitability in Europe. *Journal of Wine Research* 4, 163-183.

Matthews, H.D., Weaver, A.J., Meissner, K.J., Gillett, N.P., Ely, M. (2004): Natural and anthropogenic climate change: incorporating historical land cover change, vegetation dynamics and the global carbon cycle. *Climate Dynamics* 22, 461-479.

Myneni, R.B., Keeling, C.D., Tucker, C.J., Asrar, G. und R.R. Nemani, (1997) Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386, 698-702.

Nemani, R.R., White, M.A., Cayan, D.R., Jones, G.V., Running, S.W., Coughlan, J.C. und D. L. Peterson (2001) Assymmetric warming over coastal California and its impact on the premium wine industry. *Climate Research* 19, 25-34.

Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barnola, J., Basile, I., Bender M., Chapellaz, J., Davis, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotylakow, V., Legrand, M., Lipenkov, V., Lorius, C., Pepin, L., Pitz, C., Saltzmann, E. und Stievenard (1999) Climatic and atmospheric history of the past 420.000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399, 429-436.

Ruffner, H.P. (1982) Metabolism of tartaric and malic acids in *Vitis*: A review – Part B, *Vitis* 21, 346 – 358.

Rupp, D. (1995) Ändert sich das Klima ? –Weinsberger Wetterdaten auf dem Prüfstand-. *Rebe und Wein* 9, 319-322.

Schultz, H.R. (2000) Climate Change and Viticulture: An European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects, *Australian Journal of Grape and Wine Research* (6) 2-12.

Weigel, H.J. (2004) Gesunde Pflanzen unter zukünftigem Klima, *Gesunde Pflanzen* (57) 6-17.

WMO (2003) Our future climate. World Meteorological Organisation-No 952, 37S.