

**Abschlussbericht zum Integrierten Klimaschutzprogramm des Landes Hessen  
(Inklim 2012 II plus) des Fachgebiets Weinbau der Forschungsanstalt  
Geisenheim**

**Einfluss der Klimaentwicklung auf den Wasserhaushalt von Rebstandorten -  
Möglichkeiten der Modellierung von Steillagenregionen**

**Projektbearbeitung:**

**Prof. Dr. H.R. Schultz  
Dipl.-Phys. M. Hofmann**

**Dezember 2008**

## **Vorwort**

Im Rahmen des zweiten Bausteins zum integrierten Klimaschutzprogramm des Landes Hessen war in einer ersten Projektphase im Ursprungsantrag vorgesehen, ein neues geophysikalisches Messverfahren zur Erfassung der Bodenwasserverteilung in unterschiedlichen Bodenschichten in Steillagenweinbergen des Rheingaus zu testen. Erst in einer späteren Projektphase sollten die gewonnenen Daten als Grundlage zur Modellierung der klimainduzierten Veränderung des Wasserhaushalts von Steillagen dienen. Der Ansatz war insofern neu, da es sich bei diesem Messverfahren um ein indirektes, nicht-invasives elektromagnetisches Verfahren handelt, welches in der Landwirtschaft in Form von gezogenen Geräten hinter Traktoren bzw. anderen Zugfahrzeugen bereits eingesetzt wird. Zum Antragszeitpunkt kam zum ersten Mal auch ein tragbares Messgerät auf den Markt, welches es im Prinzip ermöglicht hätte auch extreme Steillagen zu erfassen, die mit der herkömmlichen Technologie nicht zu erfassen gewesen wären. Nach intensiven Studien zum Einsatz solcher geophysikalischer Messverfahren zur Bestimmung des Bodenwasserhaushalts in verschiedenen Bodentiefen und Diskussionen mit Geophysikern im Rahmen der Vorstellung der Ziele dieses Projektes wurde jedoch auf eine Anschaffung eines solchen Messsystems im Rahmen der Finanzierung von Inklim 2012 II plus verzichtet, da Bedenken geäußert wurden, ob ohne Vorarbeiten ein solches Messverfahren in flachgründigen und steinigen Weinbergslagen tatsächlich den Wassergehalt bestimmen könne. Aus diesen Gründen wurde der zweite, ursprünglich längerfristig geplante Projektabschnitt zur Modellierung des Wasserhaushalts von Steillagenweinbergen, basierend auf den zur Verfügung gestellten regionalisierten Klimavorhersagen, vorgezogen. Dieser Projektabschnitt ist entsprechend in diesem Abschlussbericht beschrieben.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>4</b>
1.1	Vergangene und erwartete Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt .....	5
1.2	Mögliche Folgen für den Bodenwassergehalt .....	8
1.3	Der Einfluss der Wasserversorgung auf verschiedene Pflanzenparameter.....	10
<b>2</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>12</b>
2.1	Verwendete Klimadaten .....	12
2.2	Versuchsstandorte .....	13
2.3	Das Wasserhaushaltsmodell.....	13
2.3.1	Kopplung der Wasserhaushaltsparameter von Boden und Pflanze.....	14
2.3.2	Modellierung der Transpiration der Reben.....	15
2.3.3	Modellierung der Evapotranspiration des Bodens .....	16
2.3.4	Einbeziehung von Hangneigung und Ausrichtung .....	16
<b>3</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>18</b>
3.1	Überblick über verschiedene Teilprozesse .....	18
3.1.1	<i>TTSW</i> und Verdunstungsraten der Reben des offenen und des begrüneten Bodens.....	18
3.1.2	<i>FTSW</i> und das frühmorgendliche Wasserpotenzial .....	19
3.2	Abschätzung der Veränderung des Wasserhaushalts .....	21
3.2.1	Rüdesheimer Schlossberg – der trockene Standort.....	21
3.2.2	Johannisberger Schloss – der Standort mit guter Wasserversorgung.....	26
3.3	Bewertung der Entwicklung von Variabilität und Extremen im Auftreten von Sommertrockenheit .....	29
3.3.1	Variabilität .....	30
3.3.2	Entwicklungstendenzen bei sehr trockenen und sehr feuchten Sommern .....	31
<b>4</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>33</b>
4.1	Unsicherheiten der Ergebnisse .....	33
4.2	Bewertung der Ergebnisse.....	34
4.3	Anpassungsmaßnahmen .....	34
<b>5</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>39</b>

# 1 Einleitung

Die prognostizierten klimatischen Entwicklungen werden weitreichende Veränderungen und Folgen für die Landwirtschaft in Europa haben (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007). Der Weinbau ist einer der landwirtschaftlichen Wirtschaftssektoren, die in Bezug zur Produktqualität am stärksten von den klimatischen Einflüssen abhängig sind. Wie sich die klimatischen Veränderungen auf den Weinbau auswirken könnten, ist derzeit Diskussionsgegenstand, fußt aber meistens auf Ableitungen aus der Klimaentwicklung der Vergangenheit und den direkt beobachteten Veränderungen von z. B. der phänologischen Entwicklung der Rebe. Nach Aussagen des Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), des Max-Planck Instituts für Meteorologie in Hamburg sowie des Umweltbundesamtes in Berlin dürften vor allem die innerjährlichen Veränderungen des Verlaufs von Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer und anderen Komponenten dazu führen, dass offensichtlich zeitliche Verschiebungen in Phänologie und Schädlingsaufkommen erfolgen werden. Geänderte Temperaturverläufe und damit höhere Verdunstungsansprüche werden sich zwangsläufig auf den Boden- und Rebenwasserhaushalt auswirken und je nach Standort zu vermehrten Wasser- und Nährstoffmangelsituationen führen. Das träfe vor allem auf flachgründige Steillagen zu, deren prägender Beitrag zur Kulturlandschaft und Landschaftsökologie durch hohe Arbeitskosten sowieso gefährdet ist.

Reben werden weltweit in relativ trockenen und warmen Gebieten kultiviert. In Europa liegen die jährlichen Niederschläge der Weinbauregionen zwischen 320 mm (z.B. Castilla de la Mancha Region, Spanien) und 1500 mm (Region Vinho Verde, Portugal; Teile des Veneto, Italien). Die deutschen Weinbaugebiete liegen im Bezug zu den Jahresniederschlägen eher im niedrigen Bereich, wobei der Großteil der Regionen zwischen 500 mm und 650 mm erhält (Region Freiburg 910 mm). Bedingt durch die niedrigeren Temperaturen im Vergleich zu südlicheren Weinbauregionen ist allerdings auch die Verdunstungsrate geringer. Allen Weinbergsregionen gemeinsam ist eine negative Wasserbilanz (Verdunstung übersteigt die Niederschläge) in den Sommermonaten, wobei dieses Defizit in Abhängigkeit von der jährlichen Niederschlagsverteilung unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Im Einklang mit der Niederschlagsmenge, der Verteilung, den Temperaturbedingungen und der Luftfeuchte variieren auch die Anbaumethoden zwischen den Weinbauregionen Europas. In Südspanien findet man z.B. bei hohen Temperaturen und geringen Sommerniederschlägen sehr weite Standräume ohne Begrünungspflanzen, so dass einer einzelnen Rebe ein größeres Boden- und Wasservolumen zur Verfügung steht. In Deutschland macht eine, im Durchschnitt der Jahre, gleichmäßige Verteilung der Niederschläge innerhalb des Jahres Anbauverfahren, wie z.B. den Einsatz von Begrünungspflanzen, erforderlich, um eine Befahrbarkeit der Rebzeilen auch nach Niederschlägen zu gewährleisten und so einen adäquaten Pflanzenschutz durchzuführen. Die zunehmenden Temperaturen und jahrgangsabhängige z.T. starke Verschiebungen in der Niederschlagsverteilung haben die Bewässerung auch in Deutschland ein Thema werden lassen. Dies ist auch vor dem Hintergrund zu sehen, dass die Aromausprägung weißer Rebsorten deutlich empfindlicher auf lange Trockenperioden reagiert, als dies bei roten Traubensorten zu beobachten ist.

Die möglichen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt der Reben, die durch die prognostizierten Änderungen des Klimas hervorgerufen werden könnten, gehören folglich mit zu den wichtigsten Fragen zum Thema Klimawandel und Weinbau. Die räumlich hoch aufgelösten (regionalisierten) Klimaprojektionen, welche mittlerweile zur Verfügung stehen, bieten die Möglichkeit mit geeigneten Modellen diese Folgen abzuschätzen. Ähnlich wie die Klimaprojektionen, die eine große Bandbreite möglicher Tendenzen in der Klimaentwicklung zeigen, verdeutlichen die regionalisierten Modellrechnungen starke Unterschiede zwischen den Regionen, die auch zur Erarbeitung von zukünftigen Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt werden sollten.

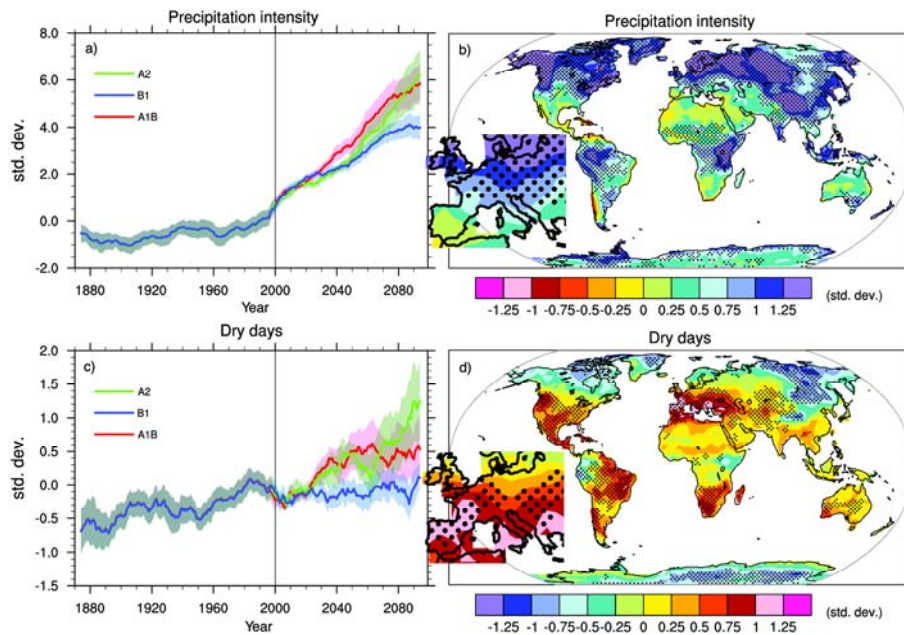
Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein rebenspezifisches Wasserhaushaltsmodell weiterentwickelt und ergänzt. Dabei wurden Anpassungen vorgenommen, um das Modell auch für Steillagen einsetzen zu können. Steillagen könnten von den Entwicklungen besonders betroffen sein, da sich durch eine etwaige Zunahme von Starkregenereignissen, selbst bei unveränderter Niederschlagsmenge, der oberflächige Wasserverlust erhöhen würde. Mit dem entwickelten Modell ist es möglich, die Folgen des Klimawandels für den Wasserhaushalt der Reben, soweit diese von den Klimazeitreihen wiedergegeben werden, abzuschätzen und zu quantifizieren. Die Berechnungen wurden exemplarisch für zwei typische Weinberge aus dem Rheingau durchgeführt mit jeweils standortspezifischen Größen, die diese Weinberge genau charakterisieren.

## **1.1 Vergangene und erwartete Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt**

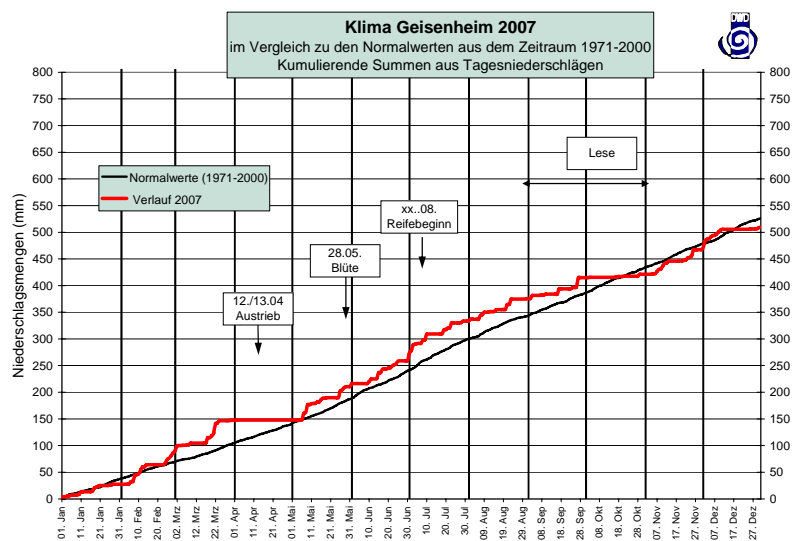
Nach dem jüngsten IPCC-Bericht ist es global betrachtet *sehr wahrscheinlich*, dass die Häufigkeit von Hitzeextremen, Hitzewellen und Starkniederschlägen weiter zunimmt (IPCC 2007). Global gesehen wird die Niederschlagsintensität zunehmen und damit die durchschnittliche Regenmenge pro Tag steigen. Gleichzeitig wird mit einer Zunahme der Trockenperioden gerechnet und somit auch die maximale Anzahl aufeinanderfolgender trockener Tage pro Jahr zunehmen, was zu einer stärkeren Heterogenität im Witterungsablauf führen wird (IPCC 2007). Nach Meehl et al. (2007) ist zu erkennen, dass Mitteleuropa und weite Teile Deutschlands von diesen Entwicklungen wahrscheinlich betroffen sein werden (Abbildung 1). Eine Trockenperiode wie im Frühjahr 2007 (Abbildung 2) könnte demnach in Zukunft häufiger vorkommen. Auch die Europäische Hitzeperiode im Jahr 2003 wird als ein Beispiel für Hitzeereignisse angeführt, die unter einem zukünftigen wärmeren Klima wahrscheinlich üblicher werden (Meehl et al. 2007).

Schönwiese et al. (2005) berichteten, dass die Jahressumme der Niederschläge im Flächenmittel für Hessen von 1951-2000 um 8-9 % zugenommen hat. Im Gegensatz dazu haben die Niederschläge im Sommer um etwa 18 % abgenommen. Nach Schönwiese et al. (2006) ist im selben Zeitraum in Hessen im Sommer die Zahl der mindestens sieben- und elftägigen Trockenperioden angestiegen. Auch die Dauer der längsten Trockenperiode hat im Sommer in diesem Zeitraum zugenommen. Extreme Niederschlagsreihen (drei Niederschläge > 10 mm innerhalb von vier Tagen) haben im Sommer hingegen abgenommen. Die regionalisierten Klimaprojektionen zeigen eine Fortführung dieser Trends (Abbildung 3). Schon zur Jahrhunderthälfte könnten die Niederschläge in den Sommermonaten um weitere 10–20 % abnehmen. Demgegenüber wird für die Wintermonate eine Zunahme von bis zu 30 % vorhergesagt (Abbildung 4). Neben dem absoluten Rückgang der

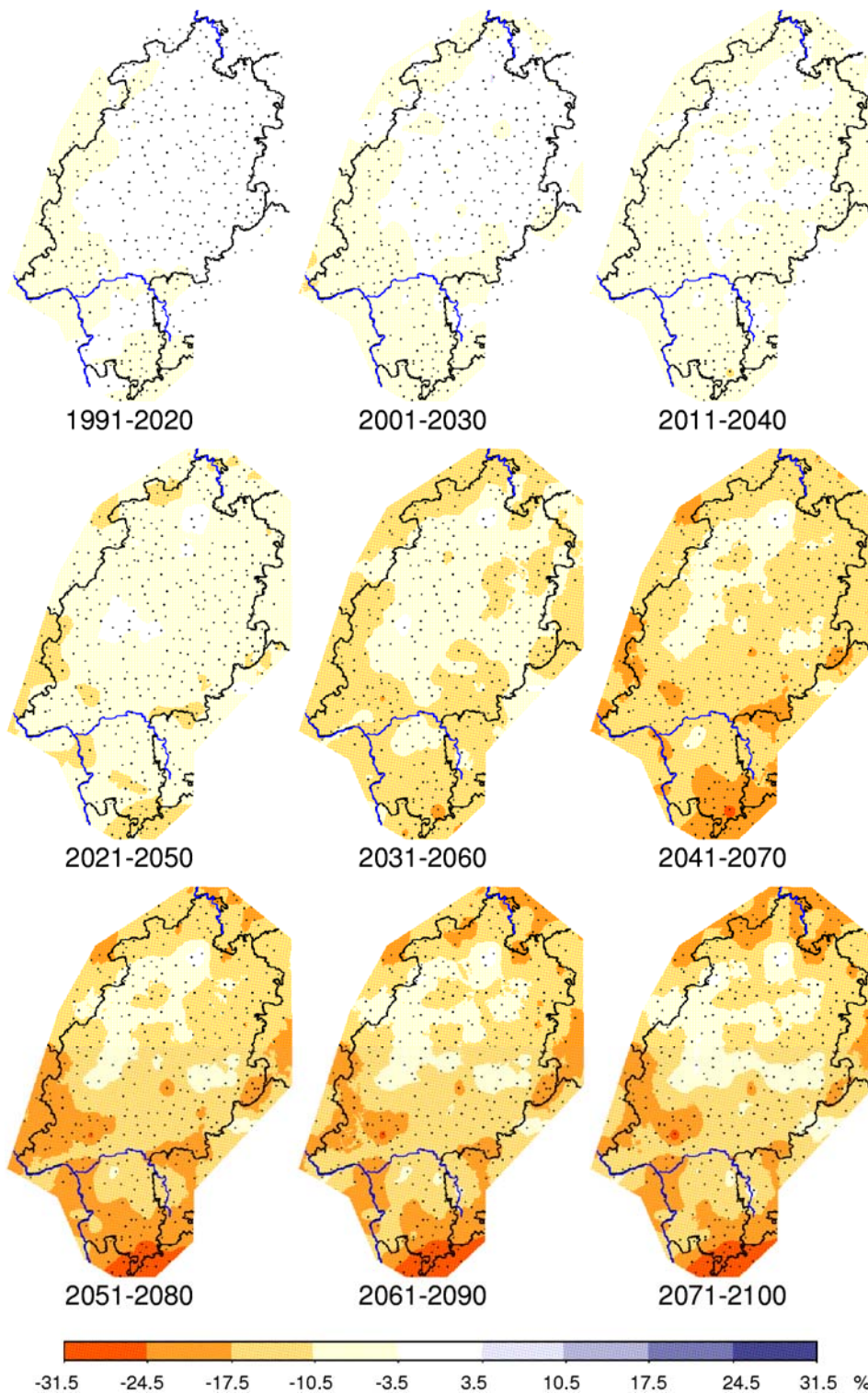
Sommerniederschläge wird sich voraussichtlich die jährliche Niederschlagsverteilung weiter verändern (Abbildung 4). Möglicherweise kommt es auch zu einer Zunahme der Häufigkeit besonders trockener oder besonders feuchter Jahre.



**Abbildung 1:** Änderungen von Extremen beruhend auf Simulationen von neun global gekoppelten Klimamodellen, angepasst nach Tebaldi et al. (2006). (a) Global gemittelte Änderungen der Niederschlagintensität (definiert als jährlicher Gesamtniederschlag dividiert durch die Zahl der Regentage) für ein niedriges (SRES B1), mittleres (SRES A1B) und hohes (SRES A2) Szenario. (b) Räumliche Änderung der simulierten Niederschlagsintensität zwischen zwei 20-jährigen Mitteln (2080-2099 minus 1980-1999) für das A1B Szenario. (c) Global gemittelte Änderungen der trockenen Tage (definiert als die jährliche maximale Zahl von aufeinander folgenden trockenen Tagen). (d) Räumliche Änderungen von simulierten trockenen Tagen zwischen zwei 20-jährigen Mitteln (2080-2099 minus 1980-1999) für das A1B Szenario. Durchgezogene Linien in (a) und (c) sind geglättete 10-jährige Mittel der geglätteten Multi-Model Ensemble; der farbige Hintergrund zeigt die Standardabweichung des Ensembles. Die Punkte in (b) und (d) zeigen die Gebiete, wo mindestens fünf der neun Modelle darin übereinstimmen, dass die Änderung statistisch signifikant ist. Aus Meehl et al. (2007), Seite 785

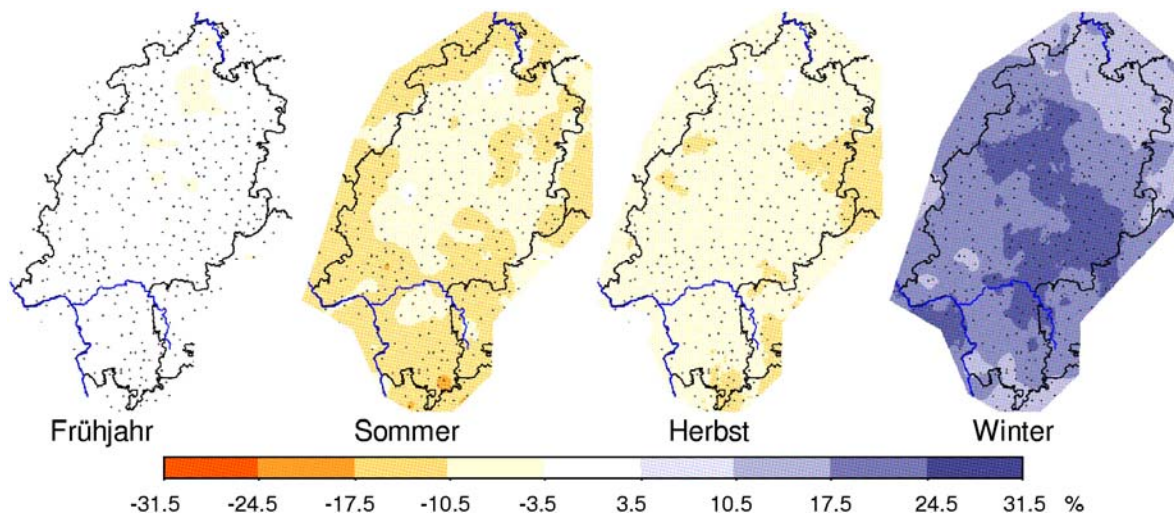


**Abbildung 2:** Vergleich der kumulierten Niederschläge des Jahres 2007 mit langjährigen Daten. Die absolute Jahressumme bewegt sich nahe an den langjährigen Daten. Im April ist eine Trockenperiode zu sehen, wobei im ganzen April nur 1 mm Niederschlag fiel. Im langjährigen Mittel sind die Niederschläge gleichmäßig über das Jahr verteilt (Daten des Deutschen Wetterdienstes, Außenstelle Geisenheim).

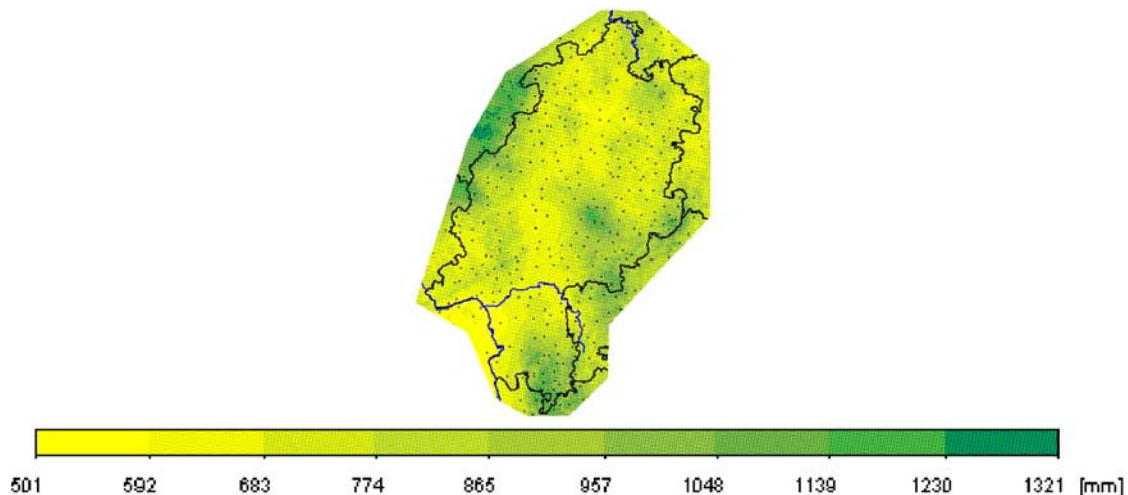


**Abbildung 3:** Die Sommerniederschläge (JJJ, 30-jährige Mittel) jeweils im Vergleich zu den Sommerniederschlägen der Periode 1971-2000. Datenbasis: WETTREG/ECHAM5, Szenario A1B (Mittel über alle Simulationen). Man erkennt deutlich den Trend zu stärkerer Sommertrockenheit für weite Teile Hessens, auch für die Weinbauggebiete an der Hessischen Bergstrasse und im Rheingau.





**Abbildung 4:** Die Veränderung der Niederschläge für Frühjahr (MAM), Sommer (JJA), Herbst (SON) und Winter (DJF): 30-jährige Mittel, 2031-2060 im Vergleich zu 1971-2000. Datenbasis: WETTREG/ECHAM5, Szenario A1B (Mittel über alle Simulationen). Es ist mit einer deutlichen Veränderung der jährlichen Niederschlagsverteilung zu rechnen.



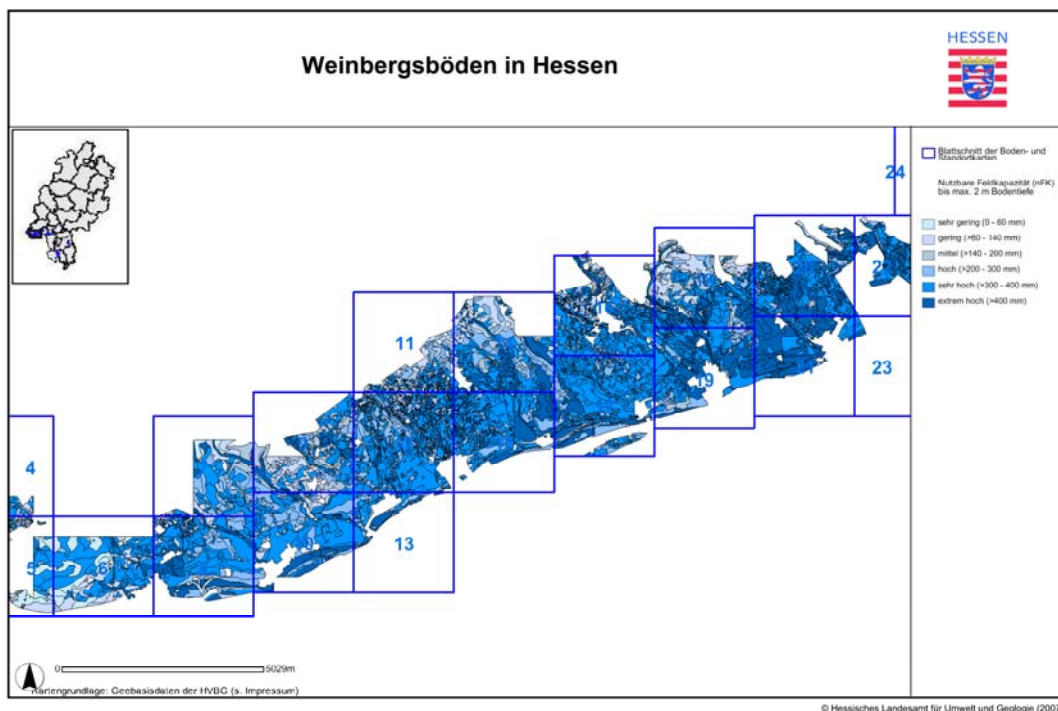
**Abbildung 5:** Jahresniederschläge in Hessen, Mittel 1971-2000 (Reanalysen, WETTREG/ECHAM5, Mittel über alle Simulationen).

## 1.2 Mögliche Folgen für den Bodenwassergehalt

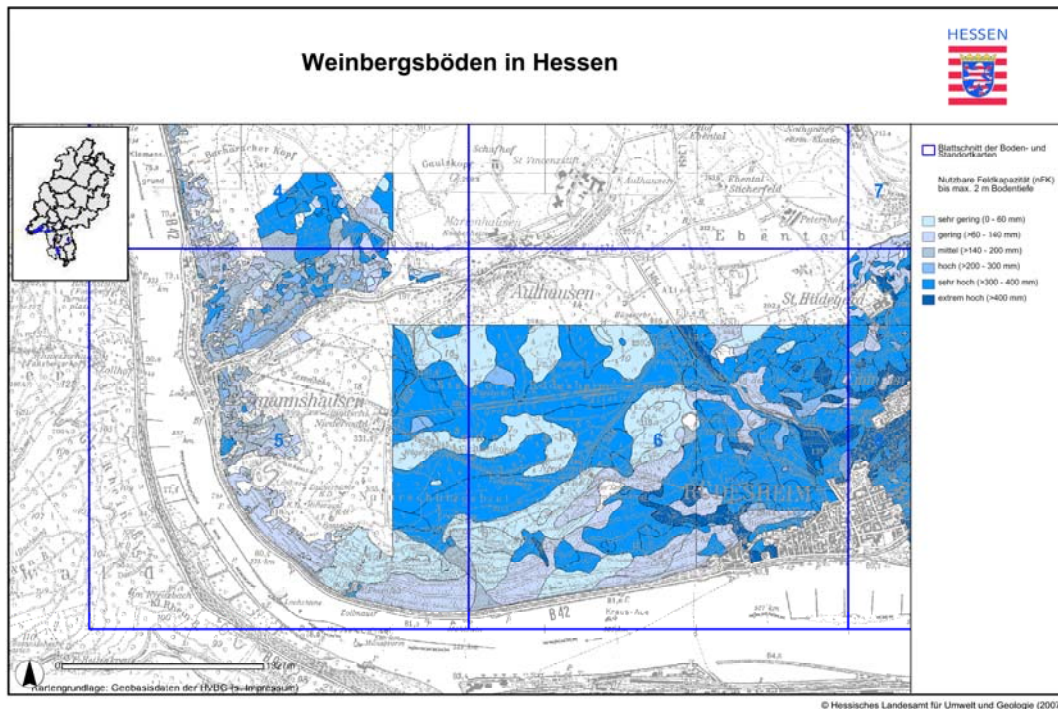
Die Menge des pflanzenverfügbaren Wassers, welches Böden speichern und Pflanzen bei Bedarf entnehmen können, wird üblicherweise als nutzbare Feldkapazität (nFK) bezeichnet. Die nutzbare Feldkapazität ist daher für den Wasserhaushalt eines Standorts eine wichtige Größe. Ein Blick in die Karte der nutzbaren Feldkapazität aus der Standortkartierung der hessischen Weinbaugebiete (Löhnertz et al., 2004) zeigt, dass die nutzbare Feldkapazität räumlich sehr unterschiedlich ist (Abbildung 6). In den Steillagenregionen zu Beginn des Mittelrheintals bei Rüdesheim und Assmannshausen (Abbildung 7) sind Standorte mit geringer Feldkapazität überdurchschnittlich vertreten. In der Großlage Burgweg westlich von Rüdesheim werden 23 % (70 ha) zur niedrigsten Klasse gerechnet (nFK < 100 mm). In der Großlage Steil, zu der die Weinberge bei Assmannshausen gehören, liegt der Anteil an der niedrigsten Klasse bei 4,2 %, weitere 39 % der Fläche haben eine nutzbare Feldkapazität unter 125 mm. Nur 5 % haben eine Speicherfähigkeit über 150 mm.



Die oben beschriebenen klimatischen Entwicklungen könnten in Zukunft häufiger zu Problemen mit der Wasserversorgung der Reben führen. Davon wären die Steillagenregionen aufgrund ihres hohen Anteils an Standorten mit geringem Wasserspeichervermögen besonders betroffen. Gerade Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität zeigen eine größere Dynamik in der saisonalen Entwicklung der Bodenfeuchte und neigen dazu, häufiger in Bereiche großer Trockenheit zu gelangen. Dieser Wasserstress hat besonders auf den verbreiteten Riesling und andere Weißweinsorten negative Auswirkungen, die sich qualitativ in geringerem Alterungsvermögen, der verstärkten Neigung zur Ausbildung des untypischen Alterungsstons, sowie in deutlich reduzierten Erträgen äußern (siehe detaillierte Beschreibung unter 1.3). Vor dem Hintergrund, dass in Steillagen die Trauben sowieso schon unter erschwerten Bedingungen erzeugt werden, könnte in Zukunft die Traubenerzeugung auf Rebflächen mit unzureichender Wasserversorgung, ohne geeignete Anpassungsmaßnahmen, unwirtschaftlich werden und der Steillagenweinbau weiter abnehmen.



**Abbildung 6:** Übersicht der nutzbaren Feldkapazität über weite Teile des Rheingaus (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, nach Löhnertz et al. 2004).



**Abbildung 7:** Die Karte der nutzbaren Feldkapazität für den Bereich Rudesheim / Assmannshausen. In dieser Region sind sehr viele Steillagen zu finden, mit zum Teil sehr geringem Wasserspeichervermögen (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, nach Löhnertz et al. 2004).

### 1.3 Der Einfluss der Wasserversorgung auf verschiedene Pflanzenparameter

Für Reben ist sowohl eine zu hohe als auch eine zu niedrige Wasserversorgung für die Bildung von gewünschten Inhaltsstoffen und ausgewogenen Erträgen negativ. Ein sehr hohes vegetatives Wachstum durch zu hohe Wasserversorgung führt allgemein zu sehr dichten Laubwänden und sehr kompakten Trauben, wodurch sich Fäulniserreger besser ansiedeln können und der Aufwand für Laubarbeiten im Sommer steigt. Auch für die Bildung von Zucker und Säuren sowie der Farbstoffe bei roten Rebsorten ist eine zu hohe Wasserversorgung eher negativ. Optimal ist eine Wasserversorgung, die sich im Bereich eines moderaten Wassermangels bewegt (Tabelle 1). Die Auswirkungen auf die Physiologie der Rebe, auf die Balance des Wachstums und die Bildung der Inhaltsstoffe sind in diesem Bereich als sehr positiv anzusehen. Sortenspezifisch kann die individuelle Reaktion zwar variieren, aber generell gilt ein moderater Wassermangel als qualitätsfördernd. Im starken Stressbereich ist die Assimilationsleistung der Rebe so stark eingeschränkt, dass die Folgen auf den Ertrag und die Inhaltsstoffbildung als sehr negativ einzustufen sind (Tabelle 1). Die Grenzen zwischen den aufgeführten Bereichen sind fließend und hängen auch von weiteren Faktoren wie der Sorte, der Unterlage und dem Alter der Anlage ab. Die negativen Folgen durch zu starken Wassermangel sind im Allgemeinen gravierender als die Folgen einer zu hohen Wasserversorgung, außer wenn es zu extremem Krankheitsbefall kommt.

**Tabelle 1:** Die Reaktion verschiedener Parameter auf die Wasserversorgung bei Reben

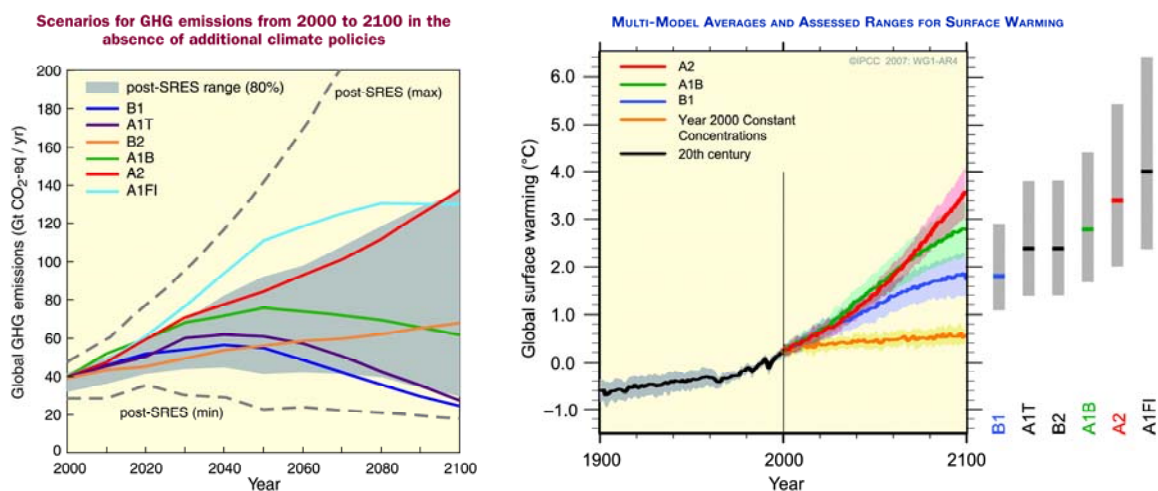
<b>Pflanzenreaktion</b>	<b>Wasserversorgung</b>			
	zu hoch	adäquat	Stress moderat	Stress stark
Wasserpotenzial (MPa)	-0,03 bis -0,1	-0,1 bis -0,2	-0,2 bis -0,6	< -0,6
Assimilationsleistung	hoch	hoch	reduziert	stark reduziert
Vegetatives Wachstum	sehr hoch	hoch	stark reduziert	eingestellt (Sorte)
Blüteverlauf	schlecht	gut	gut	schlecht
Ertrag	hoch	hoch	etwas reduziert	stark reduziert
Zuckergehalt	etwas reduziert	hoch	sehr hoch	reduziert
Farbstoffausbildung	reduziert	reduziert	hoch	sehr hoch
Säure	sehr hoch	hoch	reduziert	reduziert
Holzausreife	schwach	gut	sehr gut	gut bis schwach

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Verwendete Klimadaten

Die Modellrechnungen wurden mit den Zeitreihen des Regionalisierungsmodells WETTREG von CEC Potsdam durchgeführt, basierend auf den Ergebnissen des globalen Zirkulationsmodells ECHAM5 (MPI für Meteorologie, Hamburg). Die WETTREG-Daten werden vom Umweltbundesamt bereitgestellt (Spekat et al. 2007). Mit dem Programm IDP (Kreienkamp und Spekat 2007) wurden aus dem umfangreichen Datenmaterial für die Station Geisenheim und die Emissionsszenarien B1 und A2 quasi kontinuierliche Zeitreihen erzeugt. Aus der Vielzahl der Simulationsläufe wurden innerhalb der Emissionsszenarien B1 und A2 jeweils eine trockene (*tro*)<sup>1</sup> und eine feuchte (*feu*) Realisierung für den Zeitraum 2001-2100 ausgewählt (insgesamt 4). Für den Zeitraum von 1961-2000 unterscheiden sich die Daten verschiedener Emissionsszenarien nicht. Hier wurden Daten der *nor*<sup>1</sup> Realisierung verwendet, die in Bezug auf das Niederschlagsverhalten den realen Daten recht nahe kommt.

Das Emissionsszenario B1 kann als moderat eingeschätzt werden. Ab dem Jahr 2040 wird bei diesem Szenario von einer Reduktion der Treibhausgasemissionen ausgegangen. Das Szenario A2 geht von einer kontinuierlichen Zunahme der Treibhausgasemissionen bis zum Ende des Jahrhunderts aus. Entsprechend den Emissionen sind auch die Auswirkungen auf die Erderwärmung (Abbildung 8), die beim B1 Szenario deutlich milder ausfallen und sich in der zweiten Jahrhunderthälfte abschwächen, während das A2 Szenario eine kontinuierliche Erwärmung um etwa 4 °C bis zum Ende des Jahrhunderts vorhersagt. Die aufgeführten vier Szenarien wurden einerseits ausgewählt, um die Bandbreite möglicher Änderungen, wie sie in den Klimadaten enthalten sind, zu erfassen, andererseits, um zu sehen, ob sich die Niederschläge in verschiedenen Szenarien stark unterschiedlich repräsentieren.



**Abbildung 8:** Die Treibhausgasemissionen (GHG) der verschiedenen SRES-Szenarien (SRES 2000, IPCC 2007b) und prognostizierte Auswirkung auf die Erderwärmung (rechts, IPCC 2007)

<sup>1</sup> Es heißt bei Kreienkamp und Spekat (2007, Kap. 3.3, S. 24): „...Die Wahl von „tro“, „nor“ oder „feu“ führt zu kontinuierlichen Reihen, deren 10-jährige Segmente jeweils als besonders trocken, mittelwerttypisch oder feucht bezüglich des Niederschlagsverhalten identifiziert wurden.“ Weitere Erläuterungen hierzu und zu der angewendeten Methode WETTREG findet man in diesem Bericht im Anhang B.

## 2.2 Versuchsstandorte

Die Berechnungen wurden exemplarisch für zwei Standorte in Kombination mit obigen vier Klimaszenarien durchgeführt. Einmal für eine Steillage an der Burgruine Ehrenfels im Rüdesheimer Schlossberg, die nur eine geringe Bodenaufgabe und Wasserspeicherfähigkeit (gesamt transpirierbare Wassermenge,  $TTSW = 50$  mm) aufweist. Der zweite Standort, ein Weinberg unterhalb des Johannisberger Schlosses, verfügt über einen tiefgründigen Lößlehm Boden und folglich auch mittlere bis gute Wasserversorgung ( $TTSW = 175$  mm). Trotz der großen Heterogenität der Weinbergböden in Hessen ist diese Lage sicherlich nicht ganz untypisch für die Situation im Rheingau.

Beide Weinberge werden kommerziell genutzt. Die Rüdesheimer Lage ist mit einer Tröpfchenbewässerung ausgestattet. Die Bewässerung wird mit dem Parameter *frühmorgendliches Wasserpotenzial* (Kap. 2.3.1, Abbildung 9) gesteuert und von der Forschungsanstalt Geisenheim wissenschaftlich begleitet.

## 2.3 Das Wasserhaushaltsmodell

Man kann die Vielzahl vorhandener Wasserhaushaltsmodelle grob in zwei Gruppen einteilen. Die eine wählt einen Ansatz zur direkten Berechnung des zeitlichen Verlaufs des Wasserpotenzials im Boden mit Hilfe geeigneter Lösungen der eindimensionalen Richards-Gleichung, der noch ein Sink-Term für die Wasserentnahme der Pflanzen hinzugefügt wird (Adekalu und Fapohunda, 2007; Schaller et al., 1994). Diese Modelle können die Saugspannung im Boden in Abhängigkeit von Bodentiefe und Zeit berechnen.

Die anderen sind bilanzierender Natur. In bestimmten Zeitabschnitten (bspw. Stunden oder Tage) werden die Zu- und Abflüsse zu einem Reservoir berechnet und damit der aktuelle Wassergehalt des Reservoirs, z. B. des Bodens bestimmt. Zum Teil wird der Boden in verschiedene Schichten aufgeteilt (Hüster 1993). Bei beiden Ansätzen müssen die Entnahmen, z.B. die Transpiration der Pflanzen oder die Evaporation des Bodens, an die jeweiligen Verhältnisse durch Modellgleichungen angepasst werden. Es zeigt sich, dass die Qualität der Modelle vor allem durch eine gute und differenzierende Beschreibung der Teilprozesse, der Zu- und Abflüsse, erzielt wird. Für Modelle, die auf der Richards-Gleichung beruhen, bedeutet dies, dass sich die Randbedingungen ständig ändern. Daher bietet dieser Ansatz keinen Vorteil, besonders dann, wenn das Wasserhaushaltsmodell zur Beschreibung der Wasserversorgung der Pflanzen verwendet werden soll und weniger zur Bestimmung der Wasserverteilung im Boden.

Im Weinberg hängt der Wasserhaushalt von vielen Faktoren ab. Dazu zählt das Klima, die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens, die Bodenmächtigkeit, Lage, Hangneigung und Hangausrichtung, sowie die Bewirtschaftungsform, wie z.B. offener oder begrünter Boden, die Geometrie der Anlage, ausgedrückt durch Laubwandbreite und Höhe sowie der Abstand der Reihen.

Als Basis der Weiterentwicklung und der späteren Berechnungen diente das von Lebon et al. (2003) entwickelte Wasserhaushaltsmodell, welches die verschiedenen weinbergsspezifischen Teilprozesse sehr differenziert behandelt. Bei diesem Modell wurde die Kopplung des Bodenwassers an das frühmorgendliche Wasserpotenzial (Abschnitt 2.3.1), einem entscheidenden Parameter der Stressquantifizierung, ergänzt. Für eine Verwendung in Steillagen musste zusätzlich der durch

Hangneigung und Hangausrichtung veränderte Strahlungshaushalt berücksichtigt werden. Auch diese Anpassung wurde vorgenommen (2.3.4).

Der Wassergehalt des Bodens wird im Modell durch zwei Reservoirs repräsentiert. Diese Reservoirs können maximal mit der jeweiligen Menge an pflanzenverfügbarem Wasser (ausgedrückt als *TTSW*, s.o.) aufgefüllt sein. Zu diesen Reservoirs werden die täglichen Zu- und Abflüsse berechnet. Zufluss ist der tägliche Niederschlag, Abflüsse sind die Transpiration der Reben und die Evaporation des Bodens. Diese beiden Prozesse werden getrennt behandelt und in den folgenden Abschnitten näher erklärt.

### 2.3.1 Kopplung der Wasserhaushaltsparameter von Boden und Pflanze

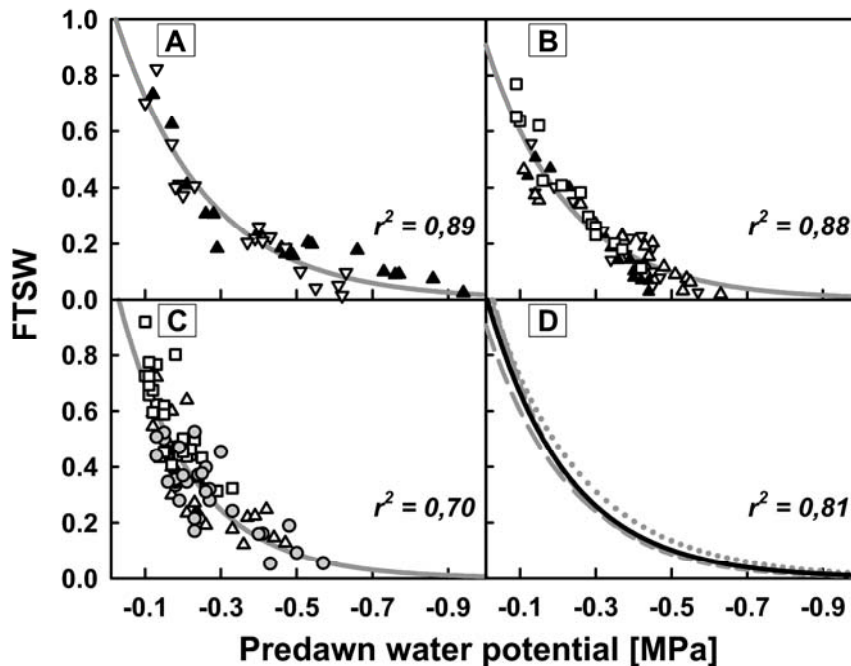
Wasserhaushaltsmodelle, die dazu dienen den Wasserversorgungsstatus von Pflanzen abzuschätzen, beinhalten oftmals das Problem, von der Berechnung eines Bodenwassergehalts oder eines Wasserpotenzials im Boden auf den tatsächlichen Versorgungsstatus der Pflanze schließen zu können. Letztlich ist die tatsächliche Wasserverteilung im Boden, ebenso wie die Verteilung der Wurzelspitzen, nicht bekannt. Ohne Bezug zu einem Pflanzenparameter ist die Festlegung eines Schwellenwertes, mit dem zwischen Stress oder keinem Trockenstress unterschieden wird, anhand eines absoluten oder prozentualen Bodenwassergehalts willkürlich.

Ein Grundproblem der Wasserhaushaltsmodelle liegt somit in der Feststellung, wann für eine Pflanze Trockenstress vorliegt. Es hat sich gezeigt, dass das frühmorgendliche Blattwasserpotenzial ( $\psi_{\text{predawn}}$ ) ein Parameter ist, der sich experimentell recht genau bestimmen lässt und verlässlich über den Versorgungszustand einer Pflanze Auskunft erteilt. Dieses Wasserpotenzial kann vor Sonnenaufgang direkt am Blatt gemessen werden. Aufgrund des nicht vorhandenen Strahlungsantriebs in der Nacht und den geschlossenen Schließzellen des Blattes erreicht das Blattwasserpotential zu diesem Zeitpunkt ein Gleichgewicht mit dem Bodenwasserpotenzial in der Bodenregion, in der die Wurzeln Wasser aufnehmen können. Man misst die Differenz des Energiestatus des Wassers im Blatt zum Energiestatus freien Wassers unter atmosphärischem Druck, welcher definitionsgemäß gleich null gesetzt wird (Slatyer und Taylor 1960). Die Wasserpotenzialwerte werden dabei in Druckeinheiten angegeben. Etwas vereinfacht ausgedrückt ist das Wasserpotenzial ein Maß für die Arbeit, die eine Pflanze aufwenden muss, um dem Boden eine bestimmte Menge Wasser zu entziehen. Wird ein Boden trockener, ist das Wasser im Boden stärker gebunden (der Energiestatus ist stärker negativ) und der Aufwand steigt. Mit diesem Parameter kann man den Energiestatus aller Komponenten im Boden-Pflanze-Atmosphären Kontinuum beschreiben. Außerdem lassen sich durch das Wasserpotenzial auch verschiedene Standorte verlässlich vergleichen, ohne über die Situation des Wassers im Boden Genaueres zu wissen.

Gruber und Schultz (2005) zeigten eine Möglichkeit auf, den Bodenwassergehalt an das frühmorgendliche Blattwasserpotenzial zu koppeln. Hierbei wurde zur Beschreibung des Bodenwassergehalts das Konzept des **Total Transpirable Soil Water** (gesamtes transpirierbares Bodenwasser, *TTSW*) und dessen prozentualer Anteil, der **Fraction of Transpirable Soil Water** (*FTSW*), verwendet (Sinclair und Ludlow 1986). Unter *TTSW* versteht man das gesamte den Pflanzen zur Verfügung stehende Wasser. Es ist die Differenz aus der Feldkapazität und dem gemessenen absoluten minimalen Wassergehalt des Standorts. Im Unterschied zur nutzbaren Feldkapazität (*nFk*) wird als Minimum nicht der Wassergehalt bei einem festgelegten



Matrixpotential ( $pF = 4,2$ , permanenter Welkepunkt) gewählt, sondern der tatsächlich vor Ort festgestellte minimale Wassergehalt des Wurzelraums. *FTSW* ist der Anteil des pflanzenverfügbaren Wassers an der Gesamtmenge (*TTSW*) zum Zeitpunkt der Messung. Gruber und Schultz (2005) konnten für verschiedene Standorte mit unterschiedlichsten Bodeneigenschaften vergleichbare Zusammenhänge zwischen *FTSW* und dem jeweiligen frühmorgendlichen Wasserpotenzial  $\psi_{pd}$  nachweisen (Abbildung 9), so dass sich mit einer Näherungskurve das frühmorgendliche Wasserpotenzial aus dem *FTSW*-Wert errechnen lässt.



**Abbildung 9:** Beziehung zwischen *FTSW* und frühmorgendlichem Wasserpotenzial (predawn water potential) für die Standorte Rüdesheim (A), Rauenthal (B) und Johannisberg (C) im Rheingau. D zeigt die Näherungskurven der drei verschiedenen Standorte. Es zeigt sich, dass die Näherungskurve für verschiedene Standorte gültig ist (aus Gruber und Schultz (2005)).

### 2.3.2 Modellierung der Transpiration der Reben

Je nach Entwicklungsstand der Vegetation und Geometrie der Laubwände wird in einem Weinberg nur ein bestimmter Anteil der einfallenden Globalstrahlung von den Reben absorbiert. Multipliziert man diesen Anteil mit der potenziellen Evapotranspiration (Penman, 1956), kann so nach Riou et al. (1994) die potenzielle Transpiration der Reben ( $TV_p$ ) berechnet werden. In *Situationen ohne Wassermangel* ist die aktuelle Transpiration der Reben ( $TV$ ) gleich  $TV_p$ .

Die von den Reben absorbierte Strahlung ( $R_{gv}$ ) wird in Abhängigkeit von der Geometrie des Weinbergs unter Verwendung des Modells von Riou et al. (1989) bestimmt. In diesem Modell hat eine Laubwand die Form eines Parallelepipeds unendlicher Länge. Die horizontalen Flächen des Epipedes werden opak behandelt, die vertikalen Flächen können in Abhängigkeit von einem Porositätsfaktor ( $P_0$ ), der die Durchlässigkeit der Laubwand beschreibt, Sonnenlicht absorbieren. Der Schattenwurf einer Reihe wird für drei benachbarte Reihen berücksichtigt. Die Größe des Parallelepipeds (der Laubwand) wird durch dessen Höhe und Breite festgelegt, ein weiterer Geometriefaktor ist der Abstand der Reihen. Die zeitliche Entwicklung der Laubwand, die Zunahme von Höhe und Breite, die Abnahme der Porosität, ist linear abhängig von der entsprechenden Temperatursumme und wird durch maximale (bzw. minimale) Werte für Höhe, Breite und Porosität begrenzt (Lebon et

al. 2003). Diese Werte hängen von der Erziehungsart und der Bewirtschaftung eines Weinbergs ab und gehen als Eingabeparameter in das Modell ein.

Mit zunehmendem *Wassermangel* regulieren die Schließzellen der Reben die Transpiration und die aktuelle Transpiration wird sich gegenüber der potenziellen Transpiration verringern. Dieses Verhalten wird mit einer bilinearen Funktion in Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt (*FTSW*) beschrieben. Im Bereich  $1 < FTSW < 0,4$  wird die Transpiration nicht reduziert und  $TV/TV_p = 1$ . Bei stärkerer Bodentrockenheit ( $0,4 < FTSW < 0$ ) sinkt auch  $TV/TV_p$  linear mit *FTSW* auf 0 ab und es gilt  $TV/TV_p = 2,5 FTSW$ .

### **2.3.3 Modellierung der Evapotranspiration des Bodens**

Um die Evaporation des Bodens möglichst gut an reale Gegebenheiten anzupassen, wie sie im Allgemeinen bei bewirtschafteten Weinbergen vorkommen, unterscheidet das Modell zwischen offenem und begrüntem Boden. Das Verhältnis von offener zu begrünter Bodenoberfläche geht als Eingangsgröße in das Modell mit ein.

#### **Evaporation des offenen Bodens**

Vergleichbar mit der Transpiration der Reben wird bei der Evaporation des Bodens auch zwischen einer ersten Phase, in der die aktuelle Evaporation (*ET*) gleich der potenziellen Evaporation ( $ET_0$ ) ist, und einer zweiten Phase, in der *ET* reduziert ist, unterschieden. In der ersten Phase nach einem Niederschlag ist die aktuelle Evaporation des Bodens gleich der potenziellen, reduziert um einen Faktor, der den Anteil der Globalstrahlung, der für die Evaporation des Bodens zur Verfügung steht, beschreibt.

Erreicht die kumulierte Evaporation einen Grenzwert, der einer Wassermenge in der obersten Bodenschicht entspricht, die gemäß der potenziellen Evaporation ungehindert verdunsten kann, beginnt die zweite Phase. In der zweiten Phase wird die Evaporation nach einem semiempirischen Modell von Brisson und Perrier (1991) berechnet. Dieses basiert auf einer täglichen Massenbilanz der trockenen, obersten Bodenschicht.

#### **Evapotranspiration des begrüntem Bodens**

Die Evapotranspiration des begrüntem Bodens wird ähnlich behandelt wie die Transpiration der Reben. Zunächst wird der Anteil der Strahlung an der Globalstrahlung bestimmt, die für die Evapotranspiration des begrüntem Bodens zur Verfügung steht. Mit diesem Faktor wird die potenzielle Evapotranspiration des begrüntem Bodens berechnet. Auch den flach wurzelnden Begrünungspflanzen steht nur ein begrenztes Wasserreservoir zu Verfügung, dessen aktueller Gehalt als *FTSW* ausgedrückt wird. Abhängig vom *FTSW* wird ein Stressfaktor berechnet, der die verminderte Transpiration der Begrünungspflanzen bei zunehmender Trockenheit der obersten Bodenschicht beschreibt (Brisson und Perrier, 1991).

### **2.3.4 Einbeziehung von Hangneigung und Ausrichtung**

Die Hangneigung und Ausrichtung hat einen erheblichen Einfluss auf den Strahlungsgenuss einer Weinbergsfläche. Um das Modell auch für Steillagen einsetzen zu können, musste der veränderte Strahlungstransport in den Hang berücksichtigt werden. Die größte Änderung in der Strahlungsbilanz verursacht hierbei der direkte Anteil der Globalstrahlung, der diffuse Anteil wird näherungsweise als isotrop betrachtet.

## Die Globalstrahlung

In den verwendeten Klimazeitreihen sind die Strahlungsdaten als tägliche Sonnenscheindauer angegeben. Diese Daten mussten zunächst von der Form der täglichen Sonnenscheindauer zu täglichen Strahlungswerten in der Einheit J/(m<sup>2</sup>Tag) umgerechnet werden. Dazu wurde die Modellgleichung von Angström-Prescott verwendet, die diese Umrechnung mit guter Genauigkeit durchführt (Iziomon und Mayer, 2001). Im Modell werden die Tagesdaten auf gleichmäßig über den jeweiligen Tag verteilte Stundendaten umgerechnet und mit einer empirisch ermittelten Formel in einen diffusen und direkten Anteil aufgeteilt.

## Der Strahlungstransport im Hang

Die von Reben und Boden absorbierten Anteile der direkten Strahlung werden in Abhängigkeit von der Position der Sonne zur horizontalen Fläche berechnet. Die Sonnenposition wird üblicherweise mit zwei Winkeln, dem Stundenwinkel (Winkel zwischen der Projektion des Sonnenvektors in die Ebene und der Südrichtung) und dem Elevations- oder Zenitwinkel (Winkel zwischen dem Horizont oder der Lotrichtung und dem Sonnenvektor), angegeben. Aus Sicht einer geneigten Fläche sind diese beiden Winkel gegenüber der Horizontalen verändert und müssen für die geneigte Fläche neu berechnet werden. Dabei kann die Neigung der Fläche gegenüber der Horizontalen durch eine Drehung um zwei Koordinatenachsen ausgedrückt werden, solange die Zeilung der Reben hangabwärts verläuft. Dieses ist in Steillagen im Allgemeinen gegeben. Ausnahmen wären Querterrassierungen, die allerdings in Hessen nicht sehr verbreitet sind. Die beiden Drehungen entsprechen zum einen der Hangneigung der Fläche und zum anderen der Richtung der Neigung. Mit diesen beiden Angaben ist die Orientierung der Fläche im Raum festgelegt. Aus diesen Drehungen resultiert ein zweites Koordinatensystem, das „Hangsystem“, mit dem die Richtung zur Sonne entsprechend zum horizontalen System beschrieben werden kann. Durch Anwendung einer Koordinatentransformation erhält man die neuen Winkel, welche die Sonnenposition aus dem horizontalen System in das Hangsystem überführt. Daraufhin kann der erwähnte Formalismus von Riou et al. (1989) angewendet werden, um die Absorptionskoeffizienten für die Laubwand und den Boden zu berechnen.

Gleichung 1 beschreibt eine solche Drehmatrix, mit der man kartesische Koordinaten eines Systems in die entsprechenden Koordinaten des gedrehten Systems umrechnen kann. Der Nutationswinkel repräsentiert die Hangneigung und der Präzessionswinkel die Neigungsrichtung. Der Drehwinkel beschreibt eine Rotation der Hangfläche um ihre Flächennormale und würde quasi bedeuten, dass die Zeilung der Reben nicht mehr hangabwärts sondern schräg im Hang verlief.

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \varphi - \cos \vartheta \sin \psi \sin \varphi & -\cos \psi \sin \varphi - \cos \vartheta \sin \psi \cos \varphi & \sin \vartheta \sin \psi \\ \sin \psi \cos \varphi + \cos \vartheta \cos \psi \sin \varphi & -\sin \psi \sin \varphi + \cos \vartheta \cos \psi \cos \varphi & -\sin \vartheta \sin \psi \\ \sin \vartheta \sin \varphi & \sin \vartheta \cos \varphi & \cos \vartheta \end{pmatrix}$$

**Gleichung 1:** Beispiel für eine Drehmatrix, mit der Koordinatentransformationen von zwei kartesischen Koordinatensystemen berechnet werden können. Angewendet auf einen Vektor  $(x,y,z)$  erhält man die Koordinaten  $(x',y',z')$  des gedrehten Systems. Die Lage des gedrehten Systems wird dabei von drei Winkeln eindeutig bestimmt, die man auch als Eulersche Winkel bezeichnet. In diesem Fall erhält man das gedrehte System durch eine Drehung der z-Achse um den Präzessionswinkel  $\psi$ , im nächsten Schritt durch eine Drehung der x'-Achse um den Nutationswinkel  $\vartheta$  sowie durch eine Drehung der z'-Achse um den Drehwinkel  $\varphi$ . Für die Anwendung in den Steillagen ist der Drehwinkel in der Regel gleich 0, wodurch sich die Drehmatrix vereinfacht. Weitere Einzelheiten können z. B. bei Bronstein et al. (2005) nachgelesen werden.

### 3 Ergebnisse

Wie in Abschnitt 2.1 erwähnt, wurde aus den Szenarien B1 und A2 jeweils eine trockene und eine feuchte Realisierung ausgewählt. Dabei stellt das Szenario *A2-trocken* ein „worst-case“ Szenario der WETTREG-Daten dar, während das Szenario *B1-feucht* die geringsten Auswirkungen erwarten lässt. Die Berechnungen wurden exemplarisch für zwei Standorte durchgeführt, an einer sehr flachgründigen Steillage an der Burgruine Ehrenfels im Rüdesheimer Schlossberg und einem geneigten Standort unterhalb des Johannisberger Schlosses, bei dem die Reben auf tiefgründigem Lößlehm wachsen (siehe 2.2). Für den trockenen Standort wurden alle Szenarien gerechnet, für den Standort mit guter Wasserversorgung nur die beiden „extremen“ Szenarien *B1-feucht* und *A2-trocken*. Tabelle 2 zeigt einen Überblick über die gerechneten Szenarien.

**Tabelle 2:** Überblick über die gerechneten Szenarien

Standort	Gerechnete Szenarien
Johannisberger Schloss, gute Wasserversorgung	- B1-feucht - A2-trocken
Rüdesheimer Schlossberg, trockener Standort	- B1-feucht - B1-trocken - A2-feucht - A2-trocken

#### 3.1 Überblick über verschiedene Teilprozesse

##### 3.1.1 *TTSW* und Verdunstungsraten der Reben des offenen und des begrünten Bodens

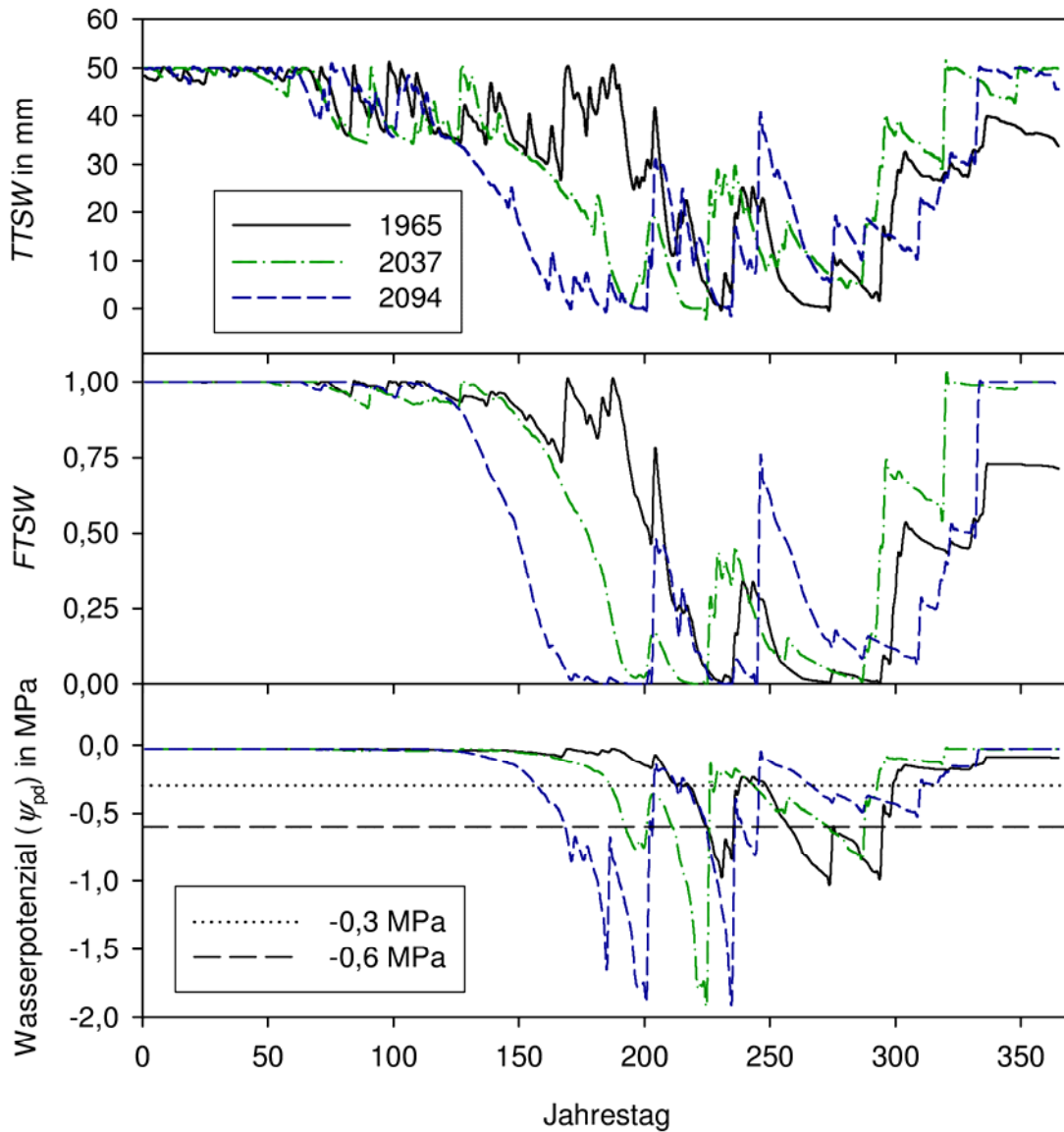
Die Entwicklung des Bodenwassergehalts (*TTSW*) für drei ausgewählte Jahre (1965, 2037, 2094, Szenario *B1-feucht*) ist in Abbildung 10 (oben) aufgezeigt. Die Jahre wurden so ausgewählt, dass sie – in Bezug auf das Auftreten von Tagen mit starkem Wassermangel – als typisch für die Zeiträume 1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100 und das Szenario *B1-feucht* betrachtet werden können. *TTSW* ist, wie oben beschrieben, grob vergleichbar mit der nutzbaren Feldkapazität, also der gesamten Menge an Wasser, welches den Reben, dem offenen und dem begrünten Boden zur Verfügung steht. Abbildung 11 zeigt für das Jahr 2037 die täglichen Verdunstungsraten der Reben des offenen und des begrünten Bodens. Die Berechnung wurde für den trockenen Standort im Rüdesheimer Schlossberg vorgenommen. Dieser Weinberg ist bis auf einen etwa 50 cm breiten Streifen unter den Reben dauerbegrünt. Daher überwiegt die Verdunstung des begrünten Bodens gegenüber dem Anteil des offenen Bodens. Man erkennt, dass die Begrünung eine Wasserkonkurrenz für die Rebe darstellt. Im Frühjahr sind die Transpirationsraten hoch, beeinflussen aber den gesamten Wassergehalt des Bodens nur wenig, weil den flachwurzelnenden Begrünungspflanzen nur ein Teilbereich des *TTSW* zur Verfügung steht. Ab Juni (Jahrestag 150) beginnen auch die Reben mit zunehmender Entwicklung der Blattfläche Wasser zu verbrauchen. Das wirkt sich auf

den Bodenwassergehalt aus, der absinkt und während der Vegetationsperiode einigen Schwankungen unterworfen ist.

### **3.1.2 *FTSW* und das frühmorgendliche Wasserpotenzial**

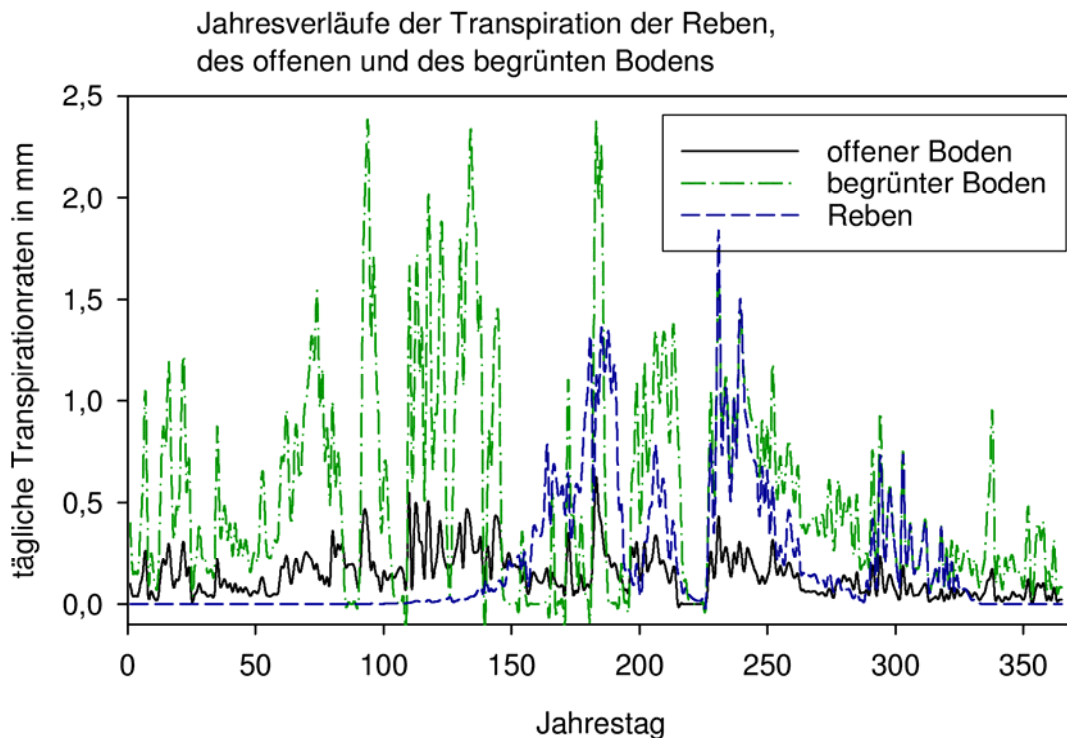
Abbildung 10 (Mitte) zeigt das *FTSW* sowie den relativen Anteil des Bodenwassers, welcher den Reben zur Verfügung steht und Abbildung 10 (unten) das daraus errechnete frühmorgendliche Blattwasserpotenzial. Die starken Ausschläge nach unten sind auf den logarithmischen Zusammenhang zwischen *FTSW* und Blattwasserpotenzial zurückzuführen. Wasserpotenzialwerte, die niedriger als -1 MPa liegen, werden von den Reben eher selten erreicht und bedeuten extremen Wasserstress (Abbildung 9). Die extremen Werte, die in Abbildung 10 (unten) dargestellt sind, resultieren aus der Näherungsgleichung, die auch in extremen Bereichen Werte berechnet, die in der Realität keine Rolle spielen. Im Allgemeinen kann man ab einem Wasserpotenzial von unter -0,6 MPa von starkem Wasserstress sprechen. Bei -0,3 MPa liegt ein Schwellenwert, bei dem man nach gegenwärtiger Praxis bewässert. Diese beiden Schwellenwerte sind in Abbildung 10 (unten) zusätzlich dargestellt. Man erkennt, dass es sich bei diesem trockenen Standort um eine Lage handelt, bei der die Zusatzbewässerung sehr sinnvoll ist, um den Reben über die trockenen Phasen hinweg zu helfen.

Jahresverläufe des Bodenwassergehalts (*TTSW*, *FTSW*) und des Wasserpotenzials ( $\psi_{pd}$ ) - Szenario B1-feucht, Rüdesheimer Schloßberg



**Abbildung 10:** Simulationsbeispiele des Bodenwassergehalts, einmal als absolute Menge (*TTSW*, oben), dann der relative Anteil des für die Reben zur Verfügung stehenden Wassers (*FTSW*, Mitte) und das daraus resultierende frühmorgendliche Wasserpotenzial (unten) für drei verschiedene Jahre.





**Abbildung 11:** Simulationsbeispiel für die Evapotranspiration der Teilprozesse begrünten Bodens, offener Bodens und der Reben. Die Berechnung basiert auf dem Szenario *B1-feucht* und das Jahr 2037 für den Rüdesheimer Schlossberg.

## 3.2 Abschätzung der Veränderung des Wasserhaushalts

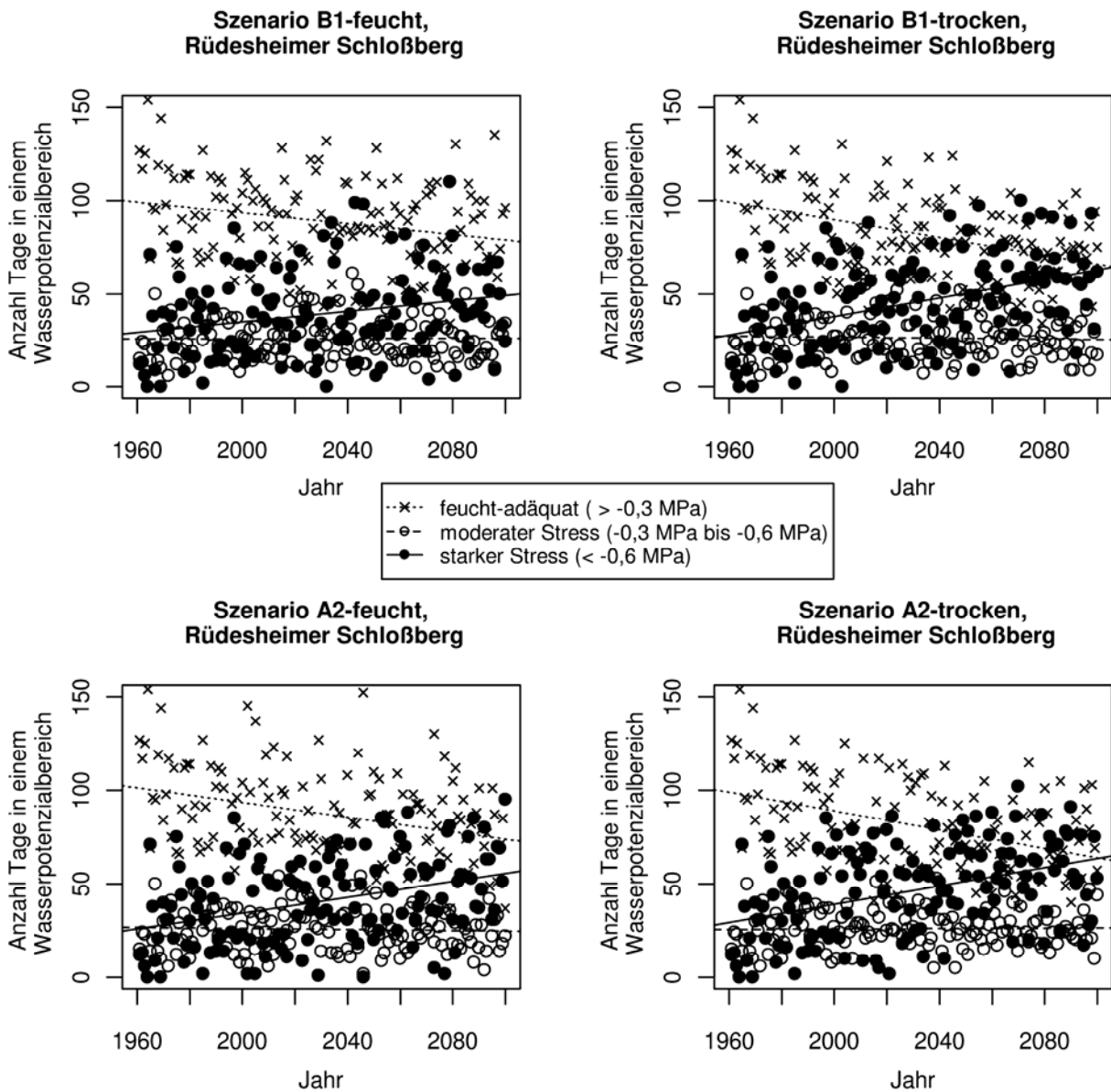
Die Betrachtung der jährlichen Dynamik der verschiedenen Größen, die den Wasserhaushalt beschreiben, ist zum Verständnis der Prozesse hilfreich, eine Abschätzung einer Veränderung des Trockenstressrisikos in der Zukunft ist damit nur schwer möglich.

Stattdessen wurde als Kriterium, um die Jahre bezüglich der Trockenheit einzuordnen, die Anzahl der Tage pro Jahr gewählt, an denen das Blattwasserpotenzial in einem bestimmten Wasserpotenzialbereich liegt. In Anlehnung an Tabelle 1 wurden drei Bereiche ausgesucht, ein feucht-adäquater Bereich mit einem frühmorgendlichen Wasserpotenzial  $\psi_{pd} > -0,3$  MPa, ein moderater Stressbereich ( $-0,3$  MPa  $> \psi_{pd} > -0,6$  MPa) und ein starker Stressbereich ( $\psi_{pd} < -0,6$  MPa) und jeder Tag während der Vegetationsperiode jeweils einem dieser Bereiche zugeordnet. Es wurden dabei nur die Tage vom 1. Mai bis 1. Oktober gezählt, was 154 Tage pro Jahr entspricht. Nach Tabelle 1 ist ein frühmorgendliches Wasserpotenzial zwischen  $-0,2$  MPa und  $-0,6$  MPa noch als allgemein moderat und insbesondere für rote Sorten als positiv einzustufen, so dass zur Betrachtung des Trockenstressrisikos besonders die Entwicklung des starken Stressbereichs von Interesse ist.

### 3.2.1 Rüdesheimer Schlossberg – der trockene Standort

Für den Rüdesheimer Schlossberg wurden die Szenarien *B1-trocken*, *B1-feucht*, *A2-trocken* und *A2-feucht* (Tabelle 2) gerechnet. Ein Überblick über die Ergebnisse zeigt Abbildung 12. Dabei zeigen alle Szenarien, auch das moderate Szenario *B1-feucht*, ähnliche Entwicklungen zu größerer Trockenheit, die sich je nach Szenario in der Stärke der Trends unterscheiden. Für alle Szenarien ist eine Veränderung der jährlichen Tageszahl in einem moderaten Wasserpotenzialbereich nicht feststellbar.

In dem Maße wie die feucht-adäquaten Tage in Zukunft abnehmen, erhöht sich auch die Anzahl der Tage mit starkem Wasserstress. Dabei streuen die Werte recht stark. Die Standardabweichung 10-jähriger Mittelwerte für starke Stresstage beträgt etwa 35 Tage (Abbildung 13).



**Abbildung 12:** Die Anzahl der Tage pro Jahr, an denen sich das Wasserpotenzial in einem feucht-adäquaten, moderaten oder starken Stressbereich bewegt. Berücksichtigt werden die Tage vom 1. Mai – 1. Oktober. Die Linien zeigen die jeweiligen linearen Trends. Berechnungen für eine trockene Lage im Rüdesheimer Schlossberg auf Basis von Klimadaten verschiedener Szenarien für die Station Geisenheim.

### Vergleich der Szenarien

Basierend auf den Ergebnissen der unterschiedlichen Szenarien (Abbildung 12) können die Entwicklungen gut mit linearen Trends beschrieben und verglichen werden (Abbildung 13). Die Zunahme der trockenen Tage verläuft recht gleichmäßig im Laufe des Jahrhunderts.

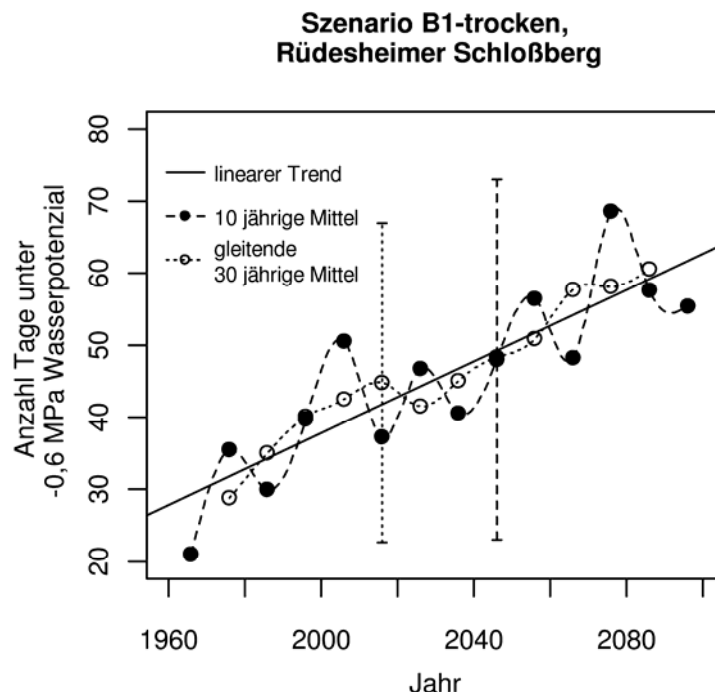
Einen Überblick und Vergleich der Szenarien für den trockenen Standort zeigen Abbildung 14 und Tabelle 3. Für die moderaten Stresstage zeigen alle Szenarien einen fast konstanten Wert von 26 Tagen bei einer Standardabweichung von 12 Tagen. Auch hier zeigt sich die geringe Wasserspeicherfähigkeit dieses Weinbergs.

Der moderate Stressbereich entspricht nur einem geringen Bereich der Bodenfeuchte, so dass sich relativ wenige Tage in dieser Klasse wiederfinden und der Boden scheinbar schnell aus dem feuchten in den sehr trockenen Bereich gelangt oder umgekehrt.

Für die feucht-adäquaten und starken Stresstage wird ein nahezu spiegelbildliches Verhalten deutlich. Die Ergebnisse der Szenarien *B1-trocken* und *A2-trocken* sind fast identisch. Das Szenario *B1-feucht* zeigt erwartungsgemäß die geringsten Änderungen. Das Szenario *A2-feucht* liegt etwa zwischen *B1-feucht* und *B1/A2-trocken*, so dass die Unterschiede innerhalb des A2-Szenarios deutlich geringer sind als beim Szenario B1. Der Trend der trockenen Szenarien B1 und A2 zeigt einen 70 % höheren Anstieg starker Stresstage als das Szenario *B1-feucht*. Für das Bestimmtheitsmaß ergeben sich Werte von 6 % bis 18 %. Da im Prinzip kein deterministischer Zusammenhang zwischen der Zeit und einem Klimatrend vorhanden ist, deuten diese Werte auf einen deutlichen zeitlichen Trend hin, der sich auch in den hohen Signifikanzniveaus der Trends widerspiegelt.

Gegenwärtig wird dieser Weinberg im wöchentlichen Rhythmus bewässert, wenn das Blattwasserpotenzial unter  $-0,3$  MPa sinkt. Im Durchschnitt der letzten sieben Jahre war dies etwa 8 mal pro Saison erforderlich. Das würde ca. 56 Tagen entsprechen, an denen das Wasserpotenzial unter  $-0,3$  MPa sinkt. Nach den Modellrechnungen beträgt die Summe starker und moderater Stresstage ca. 60 Tage, an denen zu Beginn des Jahrhunderts der Bewässerungsschwellenwert unterschritten wird. An dieser Stelle stimmen die Modellrechnungen gut mit den realen Beobachtungen überein.

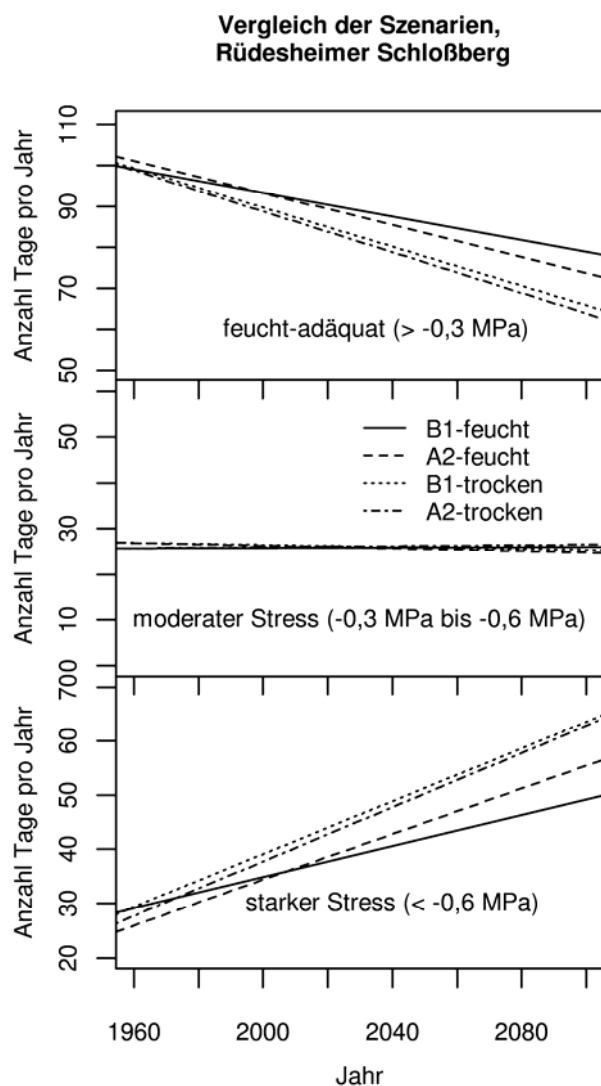
Die Tage im Bereich des starken Stresses nehmen gegen Ende des Jahrhunderts für *B1-feucht* um 14 Tage zu und für die trockenen Szenarien um 30 Tage. Demnach wird an diesem Standort an durchschnittlich 2-5 weiteren Terminen pro Jahr bewässert werden müssen.



**Abbildung 13:** Vergleich des linearen Trends mit 10-jährigen und 30-jährigen gleitenden Mittelwerten für die Anzahl der Tage unter einem frühmorgendlichen Wasserpotenzial von  $-0,6$  MPa. Beispiel für das Szenario *B1-trocken*, gestrichelte Balken zeigen die Standardabweichung.

**Tabelle 3:** Die Koeffizienten der Regressionsgeraden (Rüdesheimer Schlossberg)<sup>2</sup>

Szenario	Steigung	y-Abschnitt (Jahr = 1961)	R <sup>2</sup>
B1-feucht (feucht-adäquat)	-0,144**	99,74	0,06
B1-feucht (moderater Stress)	0,002	26,40	0,00
B1-feucht (starker Stress)	0,143**	29,84	0,06
A2-feucht (feucht-adäquat)	-0,196***	100,62	0,11
A2-feucht (moderater Stress)	-0,015	26,59	0,00
A2-feucht (starker Stress)	0,210***	24,84	0,14
B1-trocken (feucht-adäquat)	-0,239***	98,61	0,18
B1-trocken (moderater Stress)	-0,011	27,69	0,00
B1-trocken (starker Stress)	0,250***	27,69	0,18
A2-trocken (feucht-adäquat)	-0,250***	98,65	0,18
A2-trocken (moderater Stress)	0,010	33,77	0,00
A2-trocken (starker Stress)	0,244***	29,41	0,16



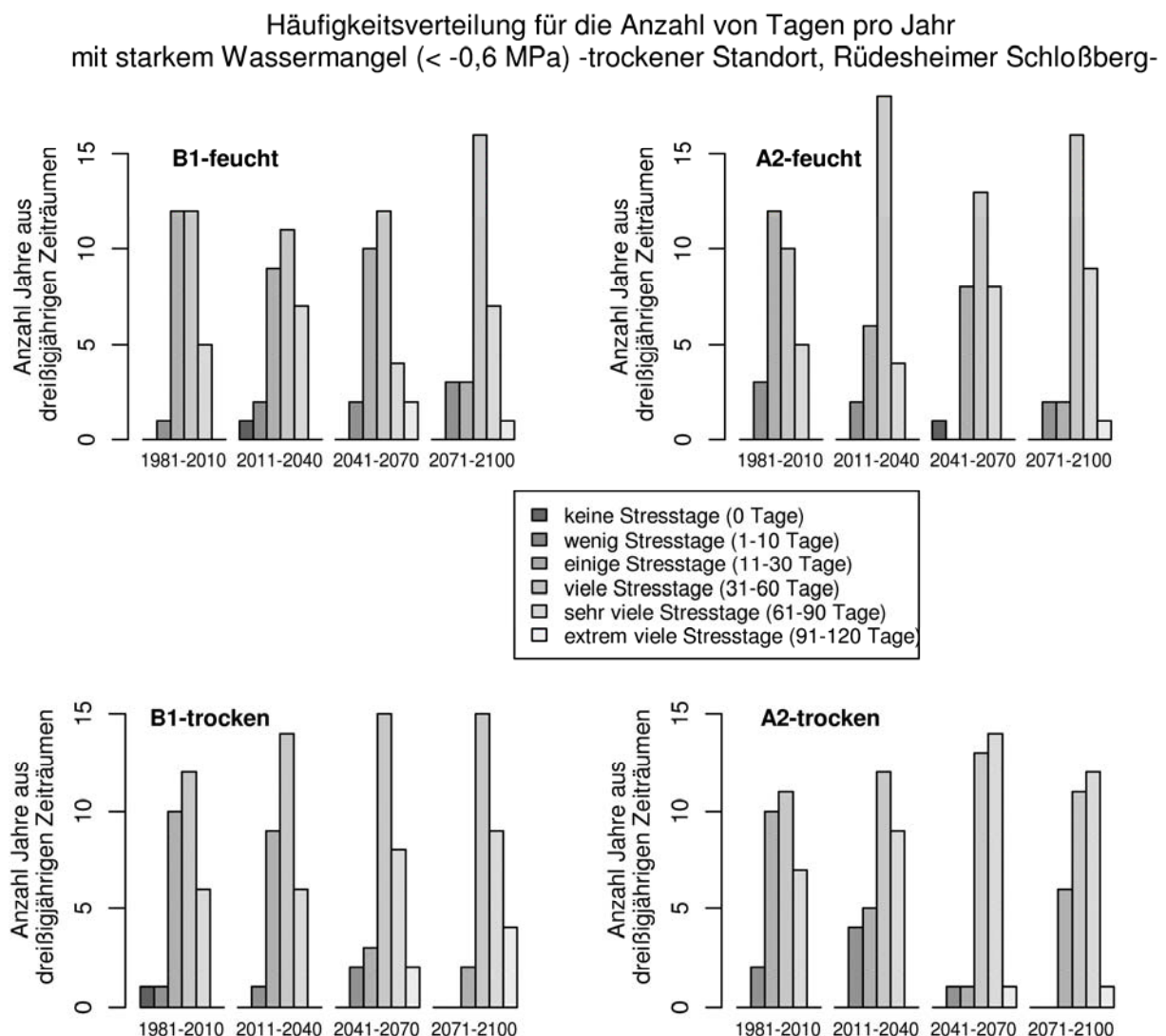
**Abbildung 14:** Vergleich der linearen Trends der gerechneten Szenarien (*B1-feucht*, *A2-feucht*, *B1-trocken*, *A2-trocken*) für einen trockenen Standort im Rüdesheimer Schlossberg

<sup>2</sup> Die Sterne bezeichnen die Signifikanzniveaus der Trends, berechnet mit dem Mann-Kendall-Trendtest (\*\*\*) > 99,9 % > \*\* > 99 % > \* > 95 % > . > 90 %). Dieser Test ist nicht an eine bestimmte Häufigkeitsverteilung gebunden und schätzt die Signifikanz ab, mit der ein Trend in Zeitreihen enthalten ist (Schönwiese 2006b).

## Veränderung des Trockenstressrisikos

Abbildung 15 zeigt die Häufigkeitsverteilung starker Stresstage über 30-jährige Zeiträume, mit der das Trockenstressrisiko und dessen Veränderung abgeschätzt werden kann. Man erkennt schon für das Szenario *B1-feucht*, dass Jahre mit keinen oder wenigen Tagen starken Wassermangels äußerst selten sind. Jahre mit sehr vielen und extrem vielen Stresstagen treten zu Beginn des Jahrhunderts alle 5 Jahre und gegen Ende alle 3,75 Jahre auf. Dieser Trend, dass Jahre mit sehr vielen und extrem vielen Wassermangeltagen häufiger auftreten, ist beim Szenario *A2-feucht* etwas deutlicher und bei *B1/A2-trocken* wesentlich deutlicher ausgeprägt. Für die trockenen Szenarien wird gegen Ende des Jahrhunderts fast jedes zweite Jahr zu den beiden trockensten Klassen gehören (Abbildung 15).

Diese beiden Abbildungen (14 und 15) verdeutlichen, dass bei dieser Lage im Rüdeshheimer Schlossberg eine Zusatzbewässerung sehr sinnvoll ist und nach den Berechnungen in Zukunft deutlich an Bedeutung gewinnen wird.



**Abbildung 15:** Häufigkeitsverteilung 30-jähriger Zeiträume für Tage mit starkem Wassermangel basierend auf Klimadaten verschiedener Szenarien für die Station Geisenheim und den Ergebnissen eines Wasserhaushaltsmodells für einen Standort mit geringer Wasserspeicherkapazität im Rüdeshheimer Schlossberg.

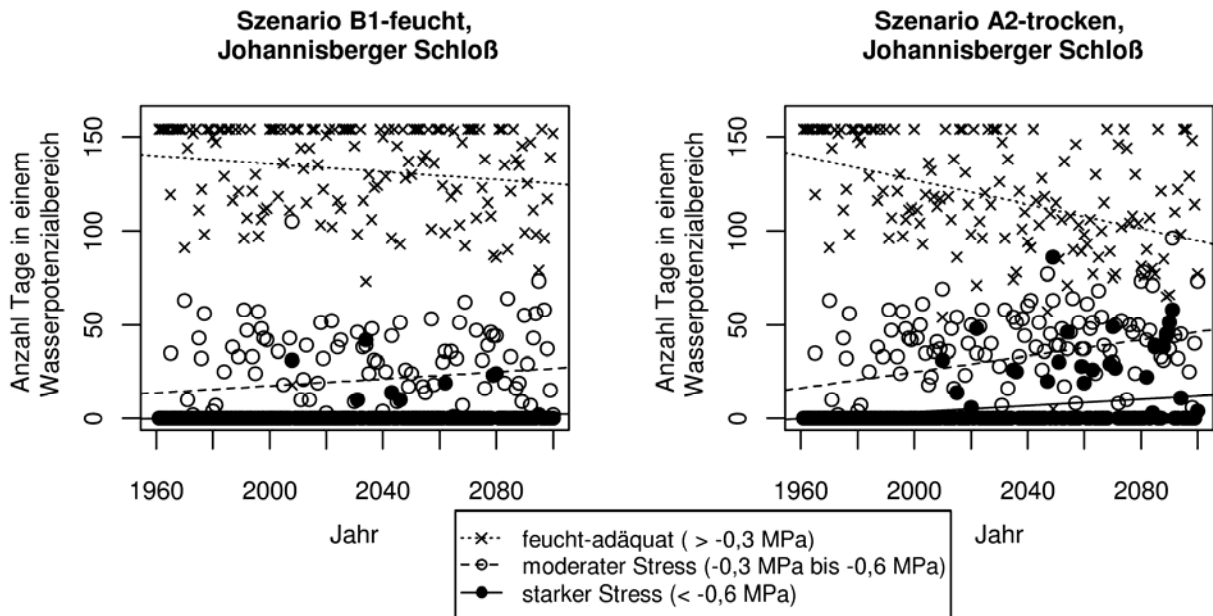
### 3.2.2 Johannisberger Schloss – der Standort mit guter Wasserversorgung

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden für die Lage Johannisberger Schloss nur die Ergebnisse der Szenarien *B1-feucht* und *A2-trocken* vorgestellt. Das Szenario *B1-feucht* lässt die geringsten Auswirkungen, *A2-trocken* die stärksten Änderungen erwarten.

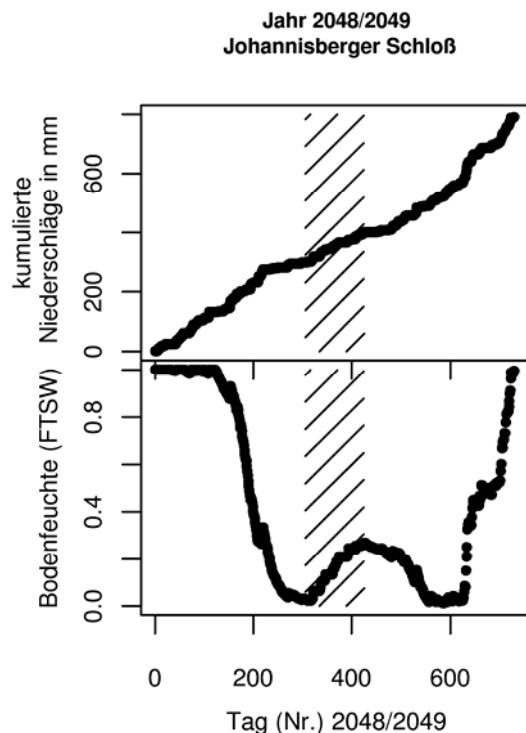
Wie schon erwähnt handelt es sich bei der Lage unterhalb des Johannisberger Schlosses um einen Weinberg mit hoher Wasserspeicherfähigkeit. Das zeigt sich auch deutlich in den Ergebnissen der Simulationsrechnungen. Man sieht in Abbildung 16 sofort, dass in vielen Jahren starke Stresstage nicht auftreten. Im Gegensatz zum trockenen Standort im Rüdesheimer Schlossberg ist beim Standort Johannisberger Schloss auch eine Veränderung der Tage mit moderatem Wasserstress zu verzeichnen. Im Rüdesheimer Schlossberg schlägt sich die Abnahme feucht-adäquater Tage im Wesentlichen in einer Zunahme der sehr trockenen Tage nieder. Auch in der Johannisberger Lage ist eine Abnahme feucht-adäquater Tage bei beiden Szenarien feststellbar, die sich aber zum großen Teil im Anstieg der moderaten Stresstage und nur zu einem kleinen Teil im Anstieg starker Stresstage widerspiegelt. Besonders für das Szenario *A2-trocken* kommen im Laufe des Jahrhunderts einige Jahre vor, an denen auch starke Stresstage auftreten. Für den Zeitraum 1960-2000 war das nur für ein einziges Jahr zu sehen.

Für Weinberge mit vergleichbarer Wasserspeicherfähigkeit wie der Standort am Johannisberger Schloss können ausreichende Winterniederschläge bei zunehmender Sommertrockenheit an Bedeutung gewinnen. Ein extremes Beispiel aus dem Jahr 2048/2049 des Szenarios *A2-trocken* kann diesen Zusammenhang verdeutlichen. Im Jahr 2049 werden 81 starke Stresstage gezählt. Den Grund für dieses Verhalten zeigt Abbildung 17, in der die kumulierten Niederschläge und die Bodenfeuchte des Vorjahres und des Jahres 2049 gezeigt werden. Es handelt sich um zwei aufeinanderfolgende sehr trockene Jahre mit Jahresniederschlägen von etwa 300 mm und 400 mm. Vor allem in der Winterphase zwischen den beiden Jahren (schraffierter Bereich) sind die Niederschläge sehr gering, so dass sich die Böden nicht wieder auffüllen können. Die Reben gehen praktisch mit einem nur zu 20 % aufgefüllten Bodenvolumen in die Vegetationsperiode. Während des Sommers reichen die Niederschläge in diesem Fall nicht aus, um das Bodenvolumen wieder aufzufüllen und werden von Reben und Begrünung direkt verbraucht. Bei einem trockenen Standort mit geringerer Wasserspeicherfähigkeit können einzelne stärkere Sommerniederschläge doch einen großen Teil des Bodenvolumens wieder auffüllen und damit kurzzeitig für Erholung sorgen. Ein trockener Standort ist also von einer wesentlich stärkeren Dynamik geprägt als der Standort mit höherer Wasserspeicherfähigkeit.





**Abbildung 16:** Die Anzahl der Tage pro Jahr, an denen sich das Wasserpotenzial in einem feucht-adäquaten Bereich, moderaten oder starken Stressbereich bewegt. Berücksichtigt werden die Tage vom 1. Mai – 1. Oktober. Die Linien zeigen die jeweiligen linearen Trends. Berechnungen für einen Standort mit guter Wasserversorgung (Johannisberger Schloss).



**Abbildung 17:** Zur Erläuterung der Trockenheit des Simulationsjahres 2049 (Szenario A2-trocken). Der schraffierte Bereich kennzeichnet Herbst/Winter (1.Nov - 28. Feb.). Normalerweise füllt sich der Boden im Winter wieder auf, in diesem Fall würde die Rebe mit kaum aufgefüllten Bodenreservoir in die Vegetationsperiode gehen. Die Sommerniederschläge werden von Reben und Begrünung verbraucht und können das Bodenreservoir nicht auffüllen. Als Folge kann ein Sommer mit ausgeprägter Trockenphase auch auf diesem Standort entstehen. Bei einem trockenen Standort reichen schon geringere Niederschläge, um das Bodenreservoir wieder aufzufüllen und für zumindest kurzzeitige Erholung zu sorgen.

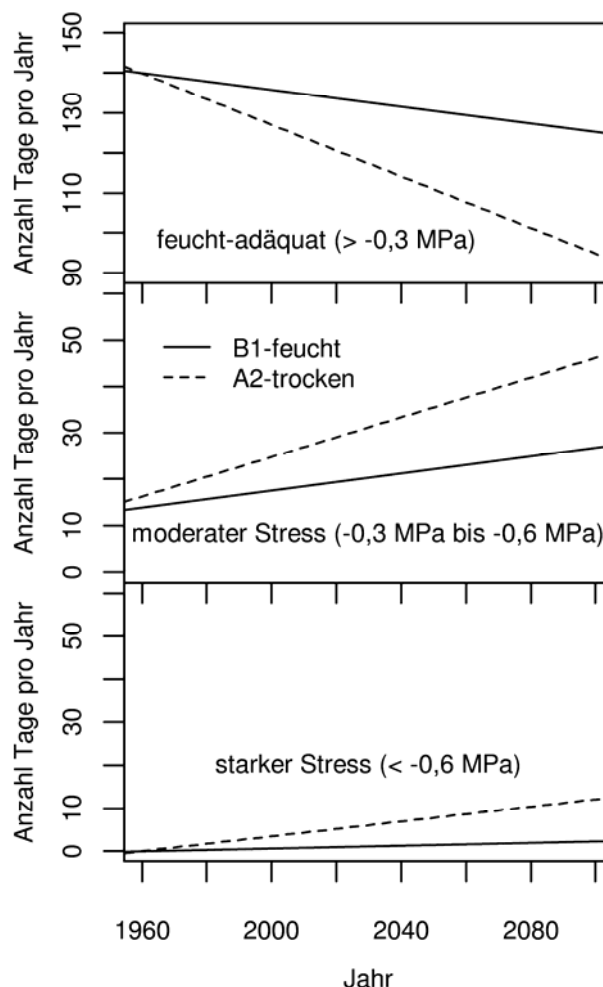
### Vergleich der Szenarien

Das Szenario *B1-feucht* zeigt entsprechend den bisherigen Ergebnissen auch für den Standort Johannisberger Schloss eine Tendenz zu stärkerer Sommertrockenheit (Abbildung 18). Diese drückt sich allerdings in einer Abnahme feucht-adäquater Tage und einer Zunahme moderater Stresstage aus, während für die starken Stresstage nur eine leichte, aber dennoch signifikante Zunahme nach den Berechnungen zu verzeichnen ist. Die Trends sind im Szenario *A2-trocken* wesentlich stärker ausgeprägt. Auch die starken Stresstage nehmen für dieses Szenario deutlich zu. Allerdings ist man zum Ende des Jahrhunderts noch weit von Verhältnissen entfernt, wie man sie momentan am Rüdesheimer Schlossberg vorfindet.

**Tabelle 4:** Die Koeffizienten der Regressionsgeraden für die Szenarien *B1-feucht* und *A2-trocken* (Johannisberger Schloss), Signifikanzniveaus analog zu Tabelle 3

Szenario	Steigung	y-Abschnitt (Jahr = 1961)	R <sup>2</sup>
B1-feucht (feucht-adäquat)	-0,105*	139,21	0,03
B1-feucht (moderater Stress)	0,092*	13,06	0,03
B1-feucht (starker Stress)	0,07 .	0	0,00
A2-trocken (feucht-adäquat)	-0,32***	141,06	0,18
A2-trocken (moderater Stress)	0,213***	15,95	0,14
A2-trocken (starker Stress)	0,109***	0	0,04

**Vergleich der Szenarien,  
Johannisberger Schloß**

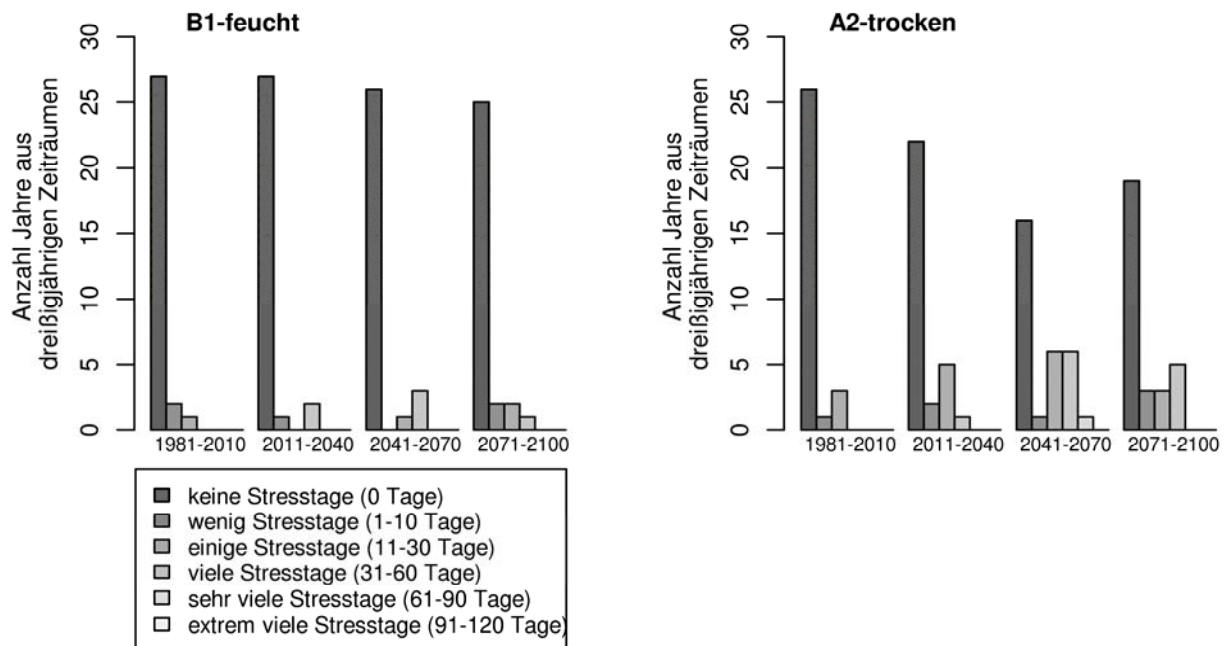


**Abbildung 18:** Vergleich der linearen Trends der beiden Szenarien *B1-feucht* und *A2-trocken* für den Standort Johannisberger Schloss.

## Veränderung des Trockenstressrisikos

Anhand der Häufigkeitsverteilungen lässt sich auch für diesen Standort eine Veränderung des Trockenstressrisikos abschätzen. Dabei wurde die Klasseneinteilung entsprechend der des trockenen Standorts gewählt, um die Ergebnisse der beiden Standorte vergleichen zu können. Für das Szenario *B1-feucht* und den Standort Johannisberger Schloss ist keine Veränderung im Trockenstressrisiko festzustellen. Der Trend für dieses Szenario ist zwar signifikant, aber zu schwach. Etwa alle zehn Jahre scheint ein Jahr aufzutreten, in dem an einigen Tagen ein starker Wassermangel auftritt. Für das Szenario *A2-trocken* macht sich der leicht ansteigende Trend für die Anzahl trockener Tage auch in einer Veränderung des Trockenstressrisikos bemerkbar. Ausgedrückt als relative Häufigkeit kommt in der zweiten Jahrhunderthälfte schon alle 2-3 Jahre ein Jahr vor, in dem starker Wassermangel (1-90 Tage) auftritt, alle 4-6 Jahre tritt der Wassermangel an 31-90 Tagen auf und dürfte sich durchaus negativ auf Ertrag und Qualität auswirken.

Häufigkeitsverteilung für die Anzahl von Tagen pro Jahr mit starkem Wassermangel ( $< -0,6$  MPa)  
-Standort mit guter Wasserversorgung, Johannisberger Schloß-



**Abbildung 19:** Häufigkeitsverteilung 30-jähriger Zeiträume für Tage mit starkem Wassermangel basierend auf Klimadaten verschiedener Szenarien für die Station Geisenheim und den Ergebnissen eines Wasserhaushaltsmodells für einen Standort mit guter Wasserspeicherkapazität unterhalb des Johannisberger Schlosses.

### 3.3 Bewertung der Entwicklung von Variabilität und Extremen im Auftreten von Sommertrockenheit

Wie schon in der Einleitung erwähnt, wird aufgrund der globalen Prognosen des IPCC-Berichts die Frage aufgeworfen, ob Variation und Extreme des Klimas in Zukunft zunehmen. Mit den Ergebnissen der Berechnungen zur Bodenfeuchte kann der Frage hinsichtlich der Variabilität von Jahr zu Jahr in Bezug zur Sommertrockenheit nachgegangen werden. Neben den Klimagrößen Temperatur und Niederschlag ist die Bodenfeuchte eine ausschlaggebende Größe, um Sommertrockenheit zu charakterisieren. Aus Abbildung 12 wird deutlich, dass die

Anzahl trockener Tage pro Jahr am Standort Rüdesheimer Schlossberg (Tage < -0,6 MPa Wasserpotenzial, entsprechend 5 % *FTSW*) auch mit einer Veränderung der Minima und Maxima auf die unterschiedlichen Klimadaten reagiert. Diese Werte können demnach als Maßzahl verwendet werden, um komplette Jahre auf einer Trocken-Feucht Skala einzuordnen und vergleichen zu können.

### 3.3.1 Variabilität

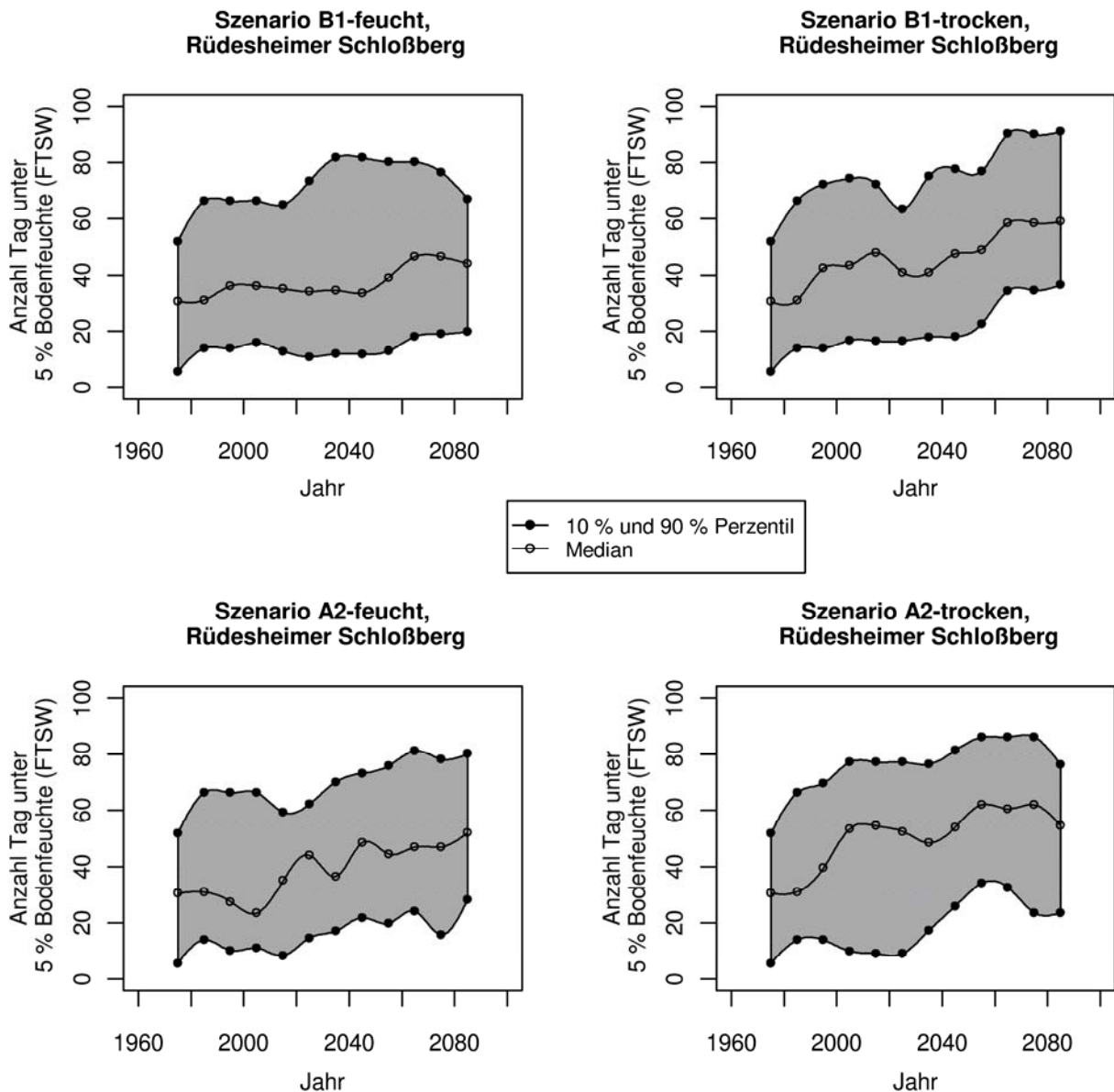
In Abbildung 20 ist die Variation der trockenen Tage, berechnet für den Standort im Rüdesheimer Schlossberg, durch den Abstand des 10 % und des 90 % Perzentils<sup>3</sup> dargestellt. Eine Änderung der Variabilität wird durch die schwankende Breite des grauen Streifens deutlich. Zusätzlich ist noch der Median dargestellt. Untersucht wurden wieder 30-jährige Zeiträume, d.h. den Punkten z.B. beim Jahr 2005 liegen die Ergebnisse des Zeitraums 1990-2020 zu Grunde.

Abbildung 20 zeigt, dass sich die Szenarien unterschiedlich entwickeln, es ist jedoch kein allgemeiner Trend zu einer Zunahme oder Abnahme der Variationsbreite aus dieser Darstellung erkennbar. Für das Szenario *B1-feucht* fällt auf, dass sich Median und 10 % Perzentil im Laufe des Jahrhunderts nur wenig ändern, das 90 % Perzentil hingegen zeigt von 2010-2030 einen Anstieg und fällt dann wieder leicht ab. Hier könnte man von einer Zunahme der Variation sprechen, die auf eine Zunahme der Trockenheit einiger Jahre zurückzuführen wäre. Die anderen Szenarien zeigen auch Schwankungen der Variation, die aber wahrscheinlich der normalen Variabilität im Klimageschehen entsprechen. Man erkennt eher eine Verschiebung hin zu größerer Trockenheit bei in etwa gleichbleibender Variationsbreite.

Es muss erwähnt werden, dass dieses Ergebnis durch die spezielle Auswahl der Szenarien (trocken / feucht) möglicherweise stark beeinflusst wird und somit streng genommen nur für das konkrete Szenario gültig ist. Zudem spiegeln diese Ergebnisse die Situation eines einzelnen Weinbergs unter Verwendung der Daten einer einzelnen Station wider und lassen sich nur bedingt verallgemeinern.

---

<sup>3</sup> Diese Darstellung wurde anstelle von Mittelwert und Standardabweichung gewählt, weil die Daten nach Durchführung des Shapiro-Wilk Tests nicht für alle 30-jährigen Intervalle einer Normalverteilung entsprechen.

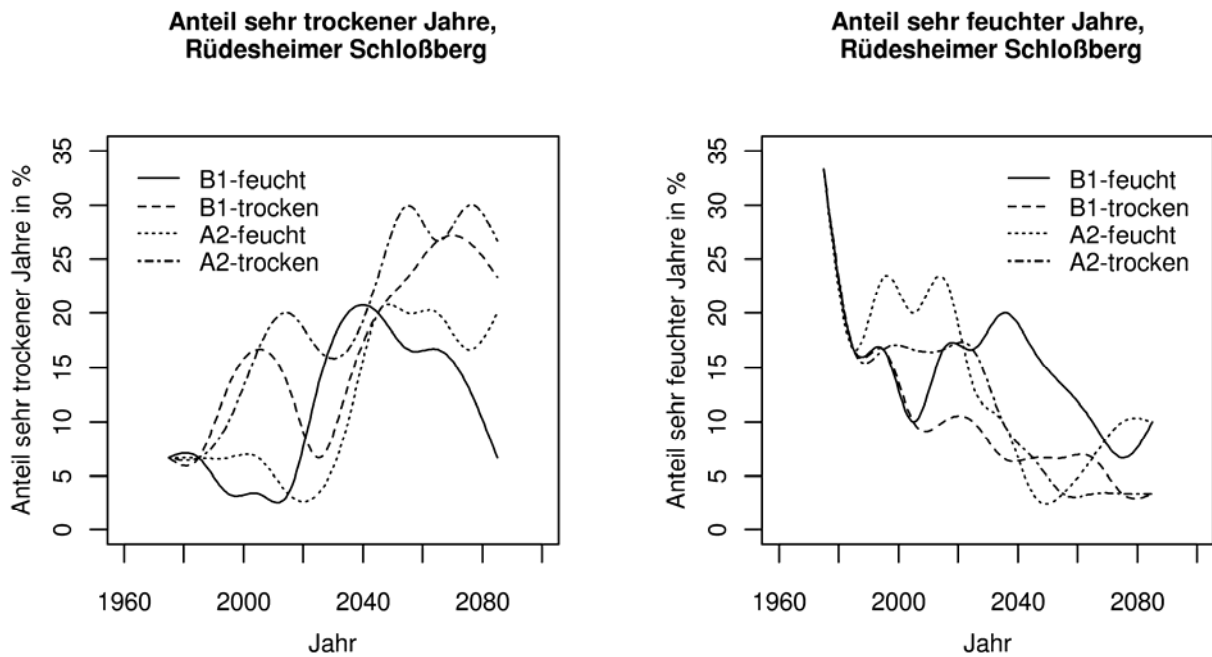


**Abbildung 20:** Die Variation trockener Tage am Standort Rüdeshheimer Schlossberg. Betrachtet werden 30-jährige, gleitende Abschnitte. Die untere Linie zeigt das 10 % Perzentil, die obere das 90 % Perzentil, so dass sich im grauen Bereich 80 % der Daten befinden. Die mittlere Linie stellt den Median dar, somit finden sich 40 % der Jahre in der oberen Hälfte des Streifens und 40 % in der unteren Hälfte. Anhand der Breite des grauen Streifens lässt sich eine Veränderung der Variation gut ablesen.

### 3.3.2 Entwicklungstendenzen bei sehr trockenen und sehr feuchten Sommern

In Abbildung 20 kann man beim 90 %-Perzentilwert von 1985 (Zeitraum 1971-2000) ablesen, dass Jahre, in denen an über 70 Tagen eine Bodenfeuchte unter 5 % *FTSW* auftritt, als sehr trockene Jahre zu bezeichnen sind. Jahre mit weniger als 15 Tagen Bodenfeuchte unter 5 % *FTSW* kann man in diesem Sinn als sehr feucht bezeichnen. Der Verlauf des prozentualen Anteils solcher Jahre basierend auf 30-jährigen Abschnitten ist für die verschiedenen Szenarien in Abbildung 21 dargestellt. Auch wenn aus dieser Abbildung quantitative Aussagen ableitbar sind, interessiert doch eher der qualitative Verlauf. Zum einen gelten die im vorhergehenden Abschnitt gemachten Einschränkungen, zudem ist die Darstellung aufgrund geringer Besetzungszahlen in diesen Klassen Schwankungen unterworfen, die teilweise auch das natürliche Klimageschehen widerspiegeln. Auffallend für die trockenen Jahre ist, dass alle Szenarien einen starken Anstieg von 2020/30 bis 2050/60 zeigen, und bis

auf das Szenario *B1-feucht* in der zweiten Jahrhunderthälfte etwa auf dem Niveau der Mitte des Jahrhunderts bleiben. Für das Szenario *B1-feucht* werden sehr trockene Jahre in der zweiten Jahrhunderthälfte wieder weniger. Für die feuchten Tage ist ein einheitlicher, abnehmender Trend erkennbar. Es zeigt sich, dass quantitativ belastbare Aussagen zur Entwicklung der Häufigkeit sehr trockener oder sehr feuchter Sommer auf der Basis der hier durchgeführten Berechnungen nicht möglich sind. Dennoch deuten die Berechnungen bei der Betrachtung des Zeitraums bis zum Ende des Jahrhunderts auf eine tendenzielle Zunahme sehr trockener und tendenzielle Abnahme sehr feuchter Jahre hin.



**Abbildung 21:** Der prozentuale Anteil an sehr trockenen und sehr feuchten Jahren. Datengrundlage sind 30-jährige, gleitende Abschnitte der Simulationsergebnisse für den Standort Rudesheimer Schloßberg. Sehr trocken ist ein Jahr, an dem an mehr als 70 Tagen pro Jahr eine Bodenfeuchte unter 5 % *FTSW* auftritt und sehr feucht, wenn es weniger als 15 Tage sind.

## 4 Diskussion

### 4.1 Unsicherheiten der Ergebnisse

Genauso wie die prognostizierten Klimazeitreihen keine Wettervorhersage darstellen, sondern mögliche klimatische Änderungen illustrieren, stellen auch die hier vorgestellten Ergebnisse keine Prognose dar, die in irgendeiner Weise einen Anspruch auf Gültigkeit in Bezug auf ein tatsächliches Eintreffen bestimmter Ereignisse oder einer tatsächlichen Repräsentanz bestimmter Häufigkeiten erhebt.

Es werden hier bestimmte Entwicklungen aufgezeigt, die illustrieren, wie sich Änderungen des Klimas auf den Wasserhaushalt von Rebstandorten auswirken könnten.

Die Ergebnisse wurden mit Modellrechnungen erzielt, die ein reales Geschehen nie ganz exakt abbilden, sondern auch mit Unsicherheiten behaftet sind. Zur richtigen Einschätzung der Ergebnisse sind hier zu nennen:

#### **Unsicherheiten der Klimadaten**

Die Ergebnisse beruhen auf prognostizierten Klimadaten und zeigen erhebliche Unterschiede zum einen innerhalb der Datenreihen, die einem Emissionsszenario zugeordnet werden, zum anderen zwischen den jeweiligen Emissionsszenarien. Um diese Unsicherheiten abzuschätzen, wurden die Berechnungen mit mehreren Szenarien durchgeführt.

#### **Methodische Unsicherheiten**

Die Berechnungen beruhen auf Klimadaten *einer einzelnen Station* und sind für zwei Standorte mit spezifischen Eigenschaften durchgeführt worden. Diese Eigenschaften sind sicherlich bis zu einem gewissen Grad vergleichbar mit den Eigenschaften anderer Standorte des Rheingaus. Jedoch sind die Ergebnisse infolge der großen Heterogenität der Standortfaktoren und der räumlichen Variabilität des Klimas nur sehr bedingt auf andere Standorte übertragbar.

#### **Unsicherheiten des Wasserhaushaltsmodells**

Das verwendete Modell wurde erfolgreich in Flachlagen validiert und getestet. Im Rahmen dieser Arbeit ist es aber auf einem stark und einem etwas weniger stark geneigten Standort eingesetzt worden. Es wurde ein einfaches Modul hinzugefügt, um den im Hang veränderten Strahlungsfluss zu berücksichtigen, eine Validierung in Steillagen fehlt allerdings noch.

Eine weitere Fehlerquelle kann die einfache Behandlung des Oberflächenabflusses darstellen. Im Modell findet Oberflächenabfluss dann statt, wenn in der täglich errechneten Bilanz der Wassergehalt die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens (*TTSW*) übersteigt. Diese einfache Methode führt zu Fehlern, wenn bei Starkregenereignissen die Niederschlagsintensitäten so hoch sind, dass lokal die Aufnahmefähigkeit des Bodens überstiegen wird und es in der Folge zu Oberflächenabfluss und Erosion kommt. Um diesen Prozess sinnvoll ins Modell zu integrieren, benötigt man Klimadaten in mindestens stündlicher Auflösung, weil sonst die Informationen zur Niederschlagsintensität nicht genügend genau sind. Die REMO-Projektionen liefern Daten in stündlicher Auflösung, jedoch sind die Niederschlagsdaten geglättet und stellen Mittelwerte über räumliche Gitterboxen dar. Sie können daher nicht zur Abschätzung des Oberflächenabflusses verwendet



werden und haben deshalb in dieser Arbeit keine Verwendung gefunden. In der Praxis hängt der Oberflächenabfluss auch von der Bewirtschaftung (offen/begrünt) eines Weinbergs ab. Dieser Nachteil des Modells wird dadurch gemildert, dass es nur in vereinzelt Jahren und meist lokal begrenzt zu Oberflächenabfluss kommt.

## 4.2 Bewertung der Ergebnisse

Die beiden Weinberge wurden ausgesucht, weil deren Standortfaktoren durch andere Forschungsarbeiten bekannt waren. Dabei handelte es sich einmal um eine extreme Trockenlage mit einer Wasserspeicherfähigkeit von 50 mm, auf der Weinbau ohne Zusatzbewässerung bereits heute nur mit Abstrichen wirtschaftlich möglich wäre. Der andere Weinberg unterhalb des Johannisberger Schlosses verfügt mit 175 mm TTSW über eine sehr gute Wasserspeicherfähigkeit. In der Großlage Erntebinger, zu der die Lage Johannisberger Schlossberg gehört, hat die Hälfte der Weinberge eine Speicherfähigkeit über 175 mm (nFk).

Nach den Berechnungen ist für die Lage Johannisberg in naher Zukunft mit keinen Problemen bezüglich der Wasserversorgung zu rechnen. Erst gegen Ende des Jahrhunderts treten einige Jahre auf, bei denen auch für diesen Standort negativer Trockenstress auftreten würde.

Für die trockene Lage hingegen ist in der Zukunft mit einer Zunahme der Bewässerungstermine zu rechnen. Dies wäre für diese Fläche auch eine richtige und wirksame Methode, um negative Folgen auszuschließen oder abzumildern.

Die Berechnungen legen den Schluss nahe, dass einige Weinberge, die eine Wasserspeicherfähigkeit zwischen 50 mm und 175 mm aufweisen, in naher Zukunft häufiger Probleme mit Trockenstress bekommen könnten. Dabei würden auch Weinberge betroffen, die bisher seltener Probleme mit Wassermangel hatten. Man sollte bei dieser Überlegung aber auch beachten, dass die Berechnungen mit Klimadaten der Station Geisenheim durchgeführt worden sind. Eine Abschätzung des Trockenstressrisikos allein auf Basis von Bodenfeuchtedaten oder Schwellenwerten der Wasserspeicherfähigkeit ist für größere Weinbergsareale nicht sinnvoll. Zum Beispiel liegen die Jahresniederschläge in Bensheim an der Hessischen Bergstrasse um etwa 200 mm über denen von Geisenheim. Um für größere Areale das Trockenstressrisiko abzuschätzen, müssten neue Berechnungen durchgeführt werden, die auf den entsprechenden Standortfaktoren und regionalen Klimadaten basieren. In den hessischen Weinbauregionen sind die wichtigsten Standortfaktoren bezüglich des Wasserhaushalts digitalisiert und georeferenziert im Rahmen des Weinbaustandortatlas (Löhnertz et al. 2004) vorhanden, so dass eine solche Berechnung im Prinzip möglich wäre.

## 4.3 Anpassungsmaßnahmen

Die Bewässerung ist die wirkungsvollste Maßnahme, um dem Trockenstress im Weinbau zu begegnen. Besonders mit Tröpfchenbewässerungen ist es möglich, die Ressource Wasser schonend einzusetzen. Damit kann den Reben über Trockenphasen hinweg geholfen werden. Aus den Ergebnissen wird auch die große Variabilität des mitteleuropäischen Klimas deutlich, besonders im Bezug auf die Niederschläge. Die zunehmende Trockenheit äußert sich nicht in einer kontinuierlichen Abnahme der Sommerniederschläge, sondern durch ein vermehrtes Auftreten trockener Jahre. Vor dem Hintergrund der sensiblen Reaktionen der Rebe auf den Wasserhaushalt, wie im Kapitel 1.3 erläutert, sollte folglich die Bewässerung

im Weinbau gesteuert werden und je nach Lage und Jahr auch nicht jedes Jahr zum Einsatz kommen.

Abschätzungen des Trockenstressrisikos, wie sie in Abbildung 15 und Abbildung 19 dargestellt sind, können dabei helfen, die Frage zu beantworten, ob eine Investition in eine Tröpfchenbewässerungsanlage lohnenswert ist.

Auch Bodenabdeckungen haben durch die Verminderung der Evapotranspiration wassersparende Effekte, bieten aber nicht die Möglichkeit der Steuerung des Wasserhaushalts wie Tropfbewässerungen. Der Nutzen von Bodenabdeckungen wird zum Teil auch kontrovers diskutiert, weil je nach Jahresverlauf der Zeitpunkt, an dem Wasserstress auftritt, in die Reifephase verlagert werden kann. Die Pflanzen kommen dann von einer guten Wasserversorgung relativ schnell in einer für die spätere Weinqualität wichtigen Phase in den Stressbereich, der den Nutzen von Bodenabdeckungen in Frage stellt. Trotzdem können Bodenabdeckungen in Gebieten, in denen die Bereitstellung des Wassers für Tröpfchenbewässerungen mit großem Aufwand verbunden wäre, eine Alternative darstellen.

Bei Neuanlagen sollte auf eine ausreichende Bodenaufgabe geachtet werden. Dies betrifft z.B. die Anlage von Querterrassierungen in Steillagen, bei der in der Regel intensive Bodenbewegungen durchzuführen sind. Hierbei sind die Empfehlungen und gesetzlichen Bestimmungen, wie sie z.B. von Böhm et al. (2007) erwähnt werden, zu beachten.

Eine weitere Maßnahme liegt in der Verwendung und Züchtung von Trockenstresstoleranten Unterlagen. Allerdings ist die Wahl der richtigen Unterlage bei der Neuanlage eines Weinbergs keine einfach zu beantwortende Frage. Stark wüchsige Unterlagen, die in der Regel auch eine größere Trockenstressresistenz aufweisen, können in jungen Jahren besonders bei Riesling zu Verrieselungserscheinungen<sup>4</sup> führen, welche sich negativ auf den Ertrag auswirken.

Die Zusammenhänge aus Klima, Boden und Bewirtschaftungsmaßnahmen sind bei der Erzeugung von Trauben, wie bei anderen Nutzpflanzen auch, komplex. Mögliche Anpassungsmaßnahmen sollten die komplexen Zusammenhänge berücksichtigen. Durch die Temperaturzunahme, besonders im Winter, wird es weniger Bodenfrost geben und allgemein zu einer Erhöhung der Bodentemperatur kommen. Das wird einen verstärkten Humusabbau zur Folge haben. Hier bietet es sich wiederum an, durch Begrünungsmaßnahmen während der feuchteren und wärmeren Winter die Produktion von Biomasse zu steigern und so dem Humusabbau entgegenzuwirken. Auch im Sommer haben Begrünungen einige Vorteile. Sie bieten unter anderem einen sehr wirksamen Schutz vor Erosion und führen durch eine Reduzierung der Bodenerwärmung zu einer gleichmäßigeren Nährstoffversorgung und reduziertem Humusabbau. Ob es allerdings in Zukunft zu einer Häufung erosiver Starkniederschläge kommt, wie es die Prognosen des IPCC nahelegen (Abbildung 1), lässt sich aus den bisherigen Klimadaten aufgrund der geringen zeitlichen Auflösung nicht ableiten. Auch für die Vergangenheit sind Untersuchungen zu extremen Niederschlägen nur in Bezug auf Monats- oder Tagesniederschläge vorgenommen worden (Schönwiese et al. 2006).

Besonders in trockenen Jahren konkurrieren Sommerbegrünungen und Reben um Wasser und Nährstoffe. Die Begrünung muss daher kurzgehalten werden. In Steillagen wird deshalb häufig nur ein Teil (z.B. jede zweite Gasse) begrünt, in der

---

<sup>4</sup> Als Verrieselung bezeichnet man die Abstoßung einzelner Beeren nach der Blüte.

Regel nur dort, wo mit modernen Seilzug-Mechanisierungssystemen das Mulchen der Begrünung ökonomisch möglich ist.

Kombinationen aus Begrünung und Bewässerung können eine Möglichkeit darstellen, die Vorteile der Begrünung zu nutzen und in trockenen Jahren der Wasserkonkurrenz entgegenzuwirken.

## 5 Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass es in Zukunft einige Weinberge geben wird, die häufiger mit den Folgen trockener Jahre zu kämpfen haben. Allerdings können anhand der Berechnungen, die für zwei Weinberge mit bekannten Standortfaktoren durchgeführt wurden, keine quantitativen Aussagen über den Anteil potenziell gefährdeter Flächen oder eine Stärke der negativen Folgen getroffen werden. Mit dem vorliegenden Wasserhaushaltsmodell ist es aber prinzipiell möglich, solche Analysen durchzuführen. Die dazu nötigen Standortdaten liegen im Rahmen des Weinbaustandortatlas georeferenziert vor.

### **Bewässerung und Bewässerungssteuerung**

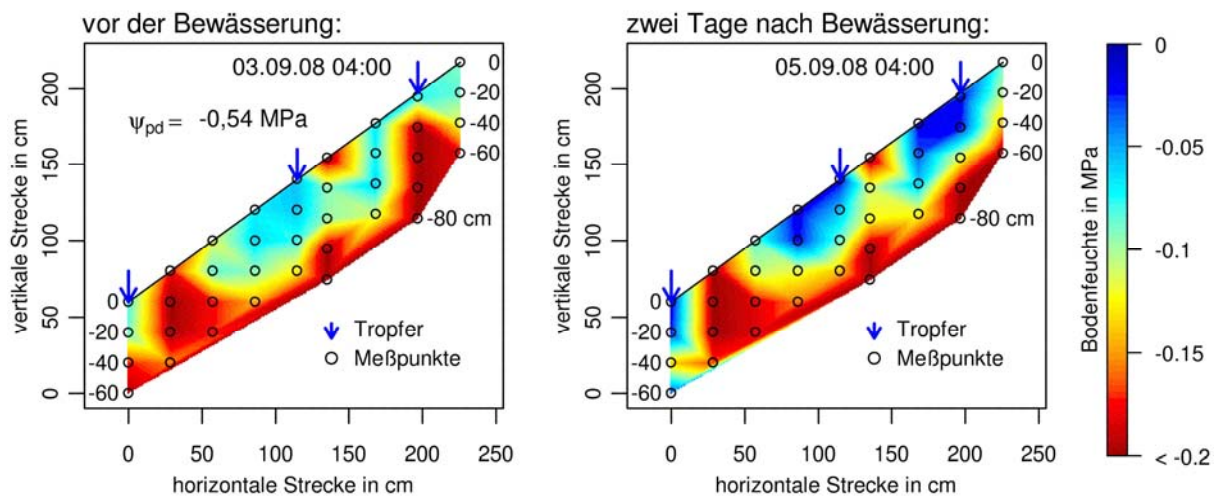
Im Rahmen der Anpassungsmaßnahmen ist die Tröpfchenbewässerung das Mittel der Wahl, um die negativen Folgen in trockenen Jahren zu vermeiden. Hier fehlen allerdings noch Konzepte, die es erlauben, die Bewässerung in größeren Arealen zu steuern, um die Bewässerung qualitätsoptimierend und ressourcenschonend einzusetzen. Die Methode, den Versorgungsstatus durch die Messung des frühmorgendlichen Wasserpotenzials zu bestimmen, ist recht aufwändig und problematisch in der Praxis zu etablieren. Die gilt vor allem für Steillagen, in denen eine große Heterogenität der Wasserspeicherkapazität zu finden ist.

Thermografische Methoden bieten die Möglichkeit, mit einfachen Mitteln Daten größerer Flächenareale zu sammeln. Diese Daten beinhalten im Wesentlichen Informationen zur Blatttemperatur, die keine eindeutigen Rückschlüsse auf den Wasserversorgungsstatus der Pflanzen zulassen. Gegenwärtig ist man noch weit davon entfernt, mit thermografischen Methoden Bewässerung unter den wechselhaften Klimabedingungen Mitteleuropas zu steuern und es ist eine große Herausforderung, eine praxisreife Methode zu entwickeln und einzusetzen.

Ähnliches gilt auch für die Bewässerungssteuerung mit Bodenfeuchtesensoren. Es fehlt an kostengünstigen und langlebigen Sensoren, die auch in den etwas trockeneren Bereichen, die bei der Rebe interessant sind, verlässlich messen können. Es gibt aber Hinweise aus der Industrie, dass in naher Zukunft kostengünstigere Sensoren verfügbar sein könnten. Weiter laufen Forschungsarbeiten, um die Bodenfeuchte, welche nach Bewässerungen im Boden sehr unterschiedlich verteilt ist, räumlich aufgelöst zu messen und damit auf das Blattwasserpotenzial zurückzuschließen (Abbildung 22).

Nicht zuletzt ist auch das vorgestellte Wasserhaushaltsmodell geeignet, die Bewässerungssteuerung zu unterstützen, wenn für den jeweiligen Ort Wetterdaten zur Verfügung stehen. Es ist prinzipiell denkbar, das Modell so zu erweitern, dass ein Bewässerungsereignis mit einbezogen werden kann.

### Bodenfeuchteverteilung und Tropfbewässerung einer Steillage (Ehrenfels, Rüdesheimer Schlossberg)



**Abbildung 22:** Die Verteilung der Bodenfeuchte vor und nach einer Tropfbewässerung in der Steillage an der Burgruine Ehrenfels unterhalb einer Rebzeile. Die in der Abbildung gezeigte Steilheit entspricht der realen Hangneigung. Jeweils eine Rebe befindet sich zwischen den Tropfern. In der linken Abbildung ist das vor der Bewässerung gemessene frühmorgendliche Blattwasserpotenzial der Reben notiert. Nach der Bewässerung (rechte Abb.) sind die Reben in der Regel erholt ( $\psi_{pd} > -0,3$  MPa). Die feuchteren Bereiche in der linken Abbildung sind die Folge vorhergehender Bewässerungen, können aber eventuell auch darauf zurückgeführt werden, dass die Sensoren nicht schnell genug auf die Austrocknung des Bodens reagieren und zu feuchte Werte anzeigen. Der Messbereich der Sensoren reicht leider nicht in die trockeneren Bereiche unter  $-0,2$  MPa. Aufgrund des eingeschränkten Messbereichs und der unklaren Reaktionszeit sind Rückschlüsse auf das Wasserpotenzial der Reben mit diesen einfachen Sensoren schwierig.

## 6 Literatur

- Adekalu, K. & Fapohunda, H. (2007) Comparisons of two soil water flow models under variable irrigation. *Irrigation Science*, 25, 375-385
- Böhm, P., Friedrich, K., & Sabel, K.-J. (2007) Die Weinbergsböden von Hessen, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Böden und Bodenschutz in Hessen, Heft 7
- Brisson, N. & Perrier, A. (1991) A Semiempirical Model of Bare Soil Evaporation for Crop Simulation Models. *Water Resources Research*, 27(5), 719-727
- Bronstein, I., Semendjajew, K.A., Musiol, G., Mühlig, H. (2005) Taschenbuch der Mathematik, 6. Auflage, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main
- Gruber, B. R. & Schultz, H. R. (2005) Coupling of plant to soil water status at different vineyard sites. *Acta Hort. (ISHS)*, 689, 381-390
- Hüster, H. (1993) A Long-Term Simulation of the Soil Water Budget in Tilled and Grass Covered Vineyards. *Die Wein-Wissenschaft*, 48, 127-129
- IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- IPCC, 2007b: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- Iziomon, M. G. & Mayer, H. (2001) Performance of solar radiation models--a case study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 110, 1-11
- Kreienkamp, F. & Spekat, A. (2007) IDP2006. Ein Werkzeug zur explorativen Datenanalyse. Aktualisierung des Berichts: Ableitungen von Transwetterlagen und Entwicklung eines interaktiven Diagnose und Präsentationstools, Version 3.0 / Land Baden-Württemberg vertreten durch die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU-BW), Freistaat Bayern vertreten durch das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU-BY) Dienstort München, Land Hessen vertreten durch das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG), Land Rheinland-Pfalz vertreten durch das Landesamt für Umweltschutz, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUGW), Freistaat Sachsen vertreten durch das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG), Freistaat Thüringen vertreten durch die Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG). 2007 ( BW: 500

- Lebon, E., Dumas, V., Pieri, P. & Schultz, H. R. (2003) Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Functional Plant Biology*, 30, 699-710
- Löhnertz, O., Hoppmann, D., Emde, K., Friedrich, K., Schmanke, M. & Zimmer, T. (2004) Die Standortkartierung der hessischen Weinbaugebiete. *Geologische Abhandlungen Hessen*, 114
- Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao, 2007: Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Penman, H.L. (1956) Evaporation: an introductory survey. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 4, 9-29
- R Development Core Team (2007) *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing, ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>
- Riou, C., Valoncogne, C. & Pieri, P. (1989) Un modèle simple d'interception du rayonnement solaire par la vigne - vérification expérimentale. *Agronomie*, 9, 441-450
- Riou, C., Pieri, P. & Le Clech, B. (1994) Consommation d'eau de la vigne en conditions hydriques non limitantes. Formulation simplifiée de la transpiration. *Vitis*, 33, 109-115
- Schaller, K., Jagoutz, H., Berthold, G., Emde, K., Löhnertz, O. & Hoppmann, D. (1994) Bewirtschaftungssystem und Nitratbildung in Rebflächen. Teil 1: Grundlagen für die Erarbeitung eines Simulationsmodells. *Geisenheimer Berichte*, Band 16a
- Sinclair, T. R. & Ludlow, M. M. (1986) Influence of Soil Water Supply on the Plant Water Balance of Four Tropical Grain Legumes. *Australian Journal of Plant Physiology*, 13, 329-341
- Schönwiese, C.-D., Staeger, T., Steiner, H., Brinckmann, S. (2005) Analyse der Klimaveränderungen in Hessen für den Zeitraum 1901 bis 2003. Abschlussbericht INKLIM2012, Baustein II, Nr. 2004.090353876-3, im Auftrag des Hessischen Landesamts für Umwelt und Geologie, Wiesbaden
- Schönwiese C.-D., Staeger, T. & Jonas, M. (2006) Auftreten und Andauer extremer Witterungsereignisse in Hessen (1951-2000). Abschlussbericht zur Ergänzung



des INKLIM Forschungsvorhaben Nr. 2004.090353876-3 (Bestellung Nr. 4500165141) im Auftrag der Hessischen Landesanstalt für Umwelt und Geologie (HLUG), Wiesbaden

Schönwiese, C.-D. (2006b) Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler, 4. Auflage, Gebrüder Borntraeger, Stuttgart

Slatyer, R. O. & Taylor, S. A. (1960) Terminology in Plant- and Soil-Water Relations. *Nature*, 187, 922-924

Spekat, A., Enke, W. & Kreienkamp, F. (2007) Neuentwicklung von regional hochaufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Final Report. Umweltbundesamt, Dessau, Germany. [www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3133.pdf](http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3133.pdf)

SRES, 2000, Nebojsa Nakicenovic & Rob Swart (Eds.), IPCC Special Report Emission Scenarios, Cambridge University Press

Tebaldi, C., Hayhoe, K., Arblaster, J.M. & Meehl, G.A. (2006) Going to the extremes: An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. *Clim. Change*, 79, 185-211