

Institution

Hochschule Geisenheim University
Institut Allgemeiner und Ökologischer Weinbau
Von-Lade-Str. 1



65366 Geisenheim

Projekttitle

Einfluss regionaler klimatischer Veränderungen auf den Wasserhaushalt von Rebstandorten: Erstellung einer Risikoanalyse für die hessischen Weinbaugebiete mit Hilfe eines physiologischen Rebenmodells
– Abschlussbericht –

**Laufzeit**

Oktober 2009 – April 2015

Projektleitung

Prof. Dr. Hans Reiner Schultz

Projektbearbeitung

Dipl.-Phys. Marco Hofmann

Auftraggeber

Fachzentrum Klimawandel Hessen
im Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Projektbetreuung

Fachzentrum Klimawandel Hessen

Geisenheim, August 2016

Zusammenfassung

Reben sind eine klimasensible Kultur und der Wasserhaushalt von Rebstandorten ist entscheidend für die Ertrags- und Qualitätsbildung. Vor allem Standorte in Steillagenregionen unterliegen erheblichen Schwankungen in der Wasserversorgung und sind traditionell auch die trockensten Standorte. Die Projektionen der Klimamodelle deuten auf trockenere Sommer bzw. wechselnde Wasserversorgung hin, was ein angepasstes Management des Wasserhaushalts sehr schwierig machen würde.

Um ein Risiko-Management hinsichtlich des Wasserhaushalts für Rebstandorte zu etablieren, wurde ein Wasserhaushaltsmodell für Weinberge weiterentwickelt, um die wesentlichen Größen, welche den Wasserhaushalt der Weinberge hessischer Weinbaugebiete beeinflussen, zu berücksichtigen. Das Modell kann so auch für Steillagenweinberge verwendet werden und beachtet unterschiedliche Formen der Bodenbewirtschaftung. Das Modell wurde über zwei Jahre auf drei unterschiedlichen Standorten getestet und kalibriert und konnte die vor Ort gemessenen Werte der Bodenfeuchte und des Wasserverbrauchs der Reben gut wiedergeben. Eine Verknüpfung der Daten aus einem digitalen Höhenmodell, zur Ermittlung der Hangneigung und Exposition der Weinberge, und digital vorliegender Karten zur Wasserspeicherfähigkeit der Böden, diente der Bestimmung der nötigen Eingangsgrößen, um Wasserhaushaltsrechnungen für den Rheingau und die Hessische Bergstraße flächendeckend durchzuführen. Dabei wurden sowohl beobachtete Wetterdaten als auch Klimaprojektionen vier verschiedener regionaler Klimamodelle verwendet. Als Indikator zur Abschätzung möglicher Änderungen des Wasserhaushalts wurde die Summe der pro Jahr auftretenden Trockenstresstage bestimmt. Da weite Teile der hessischen Weinbaubereiche eine gute Wasserspeicherfähigkeit aufweisen, zeigen drei der vier Modelle keine gravierenden Änderungen für diese Regionen. In den Steillagenregionen bei Rüdesheim und Assmannshausen, sowie auf vereinzelt weiteren Standorten, zeigen die Ergebnisse jedoch, dass das Mittel der pro Jahr auftretenden Trockenstresstage in Zukunft zunehmen würde. Damit könnte einhergehen, dass Jahre, die sich aufgrund von Trockenheit negativ auf Ertrag und Qualität auswirken, häufiger auftreten werden. Eines der vier Modelle projiziert eine Zunahme der Trockenheit, von der schon in den nächsten dreißig Jahren auch Weinberge mit guter Wasserspeicherfähigkeit betroffen wären. Dieses Modell beschreibt allerdings im Vergleich zu anderen regionalen Klimamodellen die trockenste Realisierung einer möglichen zukünftigen Klimaentwicklung.

Die Weinbauforschung ist derzeit gefordert, Anpassungsmaßnahmen an die vielfältigen Auswirkungen der Klimaerwärmung zu entwickeln, welche nicht isoliert voneinander betrachtet werden können. Der Wasserhaushalt ist dabei ein wichtiger Aspekt. Z. B. ist die Etablierung einer Tropfbewässerung in Steillagenbereichen häufig schwierig zu bewerkstelligen und die Fragen zur Wasserentnahme und Bereitstellung sind derzeit nicht geklärt. Auch ist die Steuerung von Bewässerungsmaßnahmen im Weinbau nicht einfach, da es hier weniger auf die Menge, als auf den richtigen Zeitpunkt ankommt und eine Überversorgung schneller zu Einbußen führen kann als bei anderen Kultursorten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
2	Material und Methoden	11
2.1	Beschreibung der Untersuchungsflächen	11
2.2	Das Modell zur Strahlungsaufteilung im Weinberg	13
2.3	Das Wasserhaushaltsmodell	15
2.3.1	Evaporation des offenen Bodens	16
2.3.2	Transpiration der Reben	18
2.3.3	Transpiration der Begrünung	19
2.4	Wetterdaten und Evapotranspiration	22
2.5	Oberflächenabfluss	23
2.6	Die Klimamodelle und Wetterdaten	25
2.6.1	WETTREG2010	25
2.6.2	REMO und CLM	27
2.7	Analyse des Trockenstressrisikos	28
2.7.1	Analyse für die drei Versuchsstandorte	28
2.8	Risikoanalyse der Weinbaugebiete Rheingau und Hessische Bergstraße	28
2.8.1	Bewertung des Trockenstressrisikos	34
2.9	Messungen zur Validierung des Wasserhaushaltsmodells	34
2.9.1	Messungen der Bodenfeuchte	34
2.9.2	Saftflussmessungen	35
2.9.3	Messungen der Porosität	35
3	Ergebnisse	36
3.1	Strahlungsaufteilung im Weinberg	36
3.2	Messungen der Porosität in Abhängigkeit von der Wegstrecke des Lichts in der Laubwand	37
3.3	Charakteristische Standorteigenschaften	38
3.4	Evaluation von Modellparametern	39
3.4.1	Der rebenspezifische Transpirationskoeffizient $k_{c,v}$	39
3.4.2	Einfluss der Wasserverfügbarkeit auf die Transpiration der Reben	40
3.5	Einfluss von Hangneigung und Exposition auf die potenzielle Evapotranspiration ..	41
3.6	Validierung des Wasserhaushaltsmodells	42
3.6.1	Simulation des Wasserhaushalts	42
3.6.2	Simulation der Transpiration der Reben	43
3.7	Vergleich verschiedener berechneter Wasserflüsse	45
3.8	Abschätzung des Einflusses des Klimawandels auf den Wasserhaushalt für drei Versuchsstandorte	47
3.9	Abschätzung der Modellsensitivität	48

3.10	Hochrechnung des Wasserhaushalts für den Rheingau und die Hessische Bergstraße.....	50
3.10.1	Änderungssignale Modell EH-CLM_U	51
3.10.2	Änderungssignale Modell HadCM3-CLM_U.....	53
3.10.3	Änderungssignale Modell REMO-UBA_U	54
3.10.4	Änderungssignale Modell EH-CLM_K	55
3.10.5	Änderungssignale Modell HadCM3-CLM_K.....	57
3.10.6	Änderungssignale Modell REMO-UBA_K	58
3.10.7	Änderungssignale Modell WETTREG2010	59
4	Diskussion	62
4.1	Das Wasserhaushaltsmodell	62
4.2	Bewertung und Interpretation der Ergebnisse	64
4.2.1	Anpassungsmaßnahmen	66
5	Fazit und Ausblick	67
6	Anhang	69
7	Literatur.....	74

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Skizze der drei Versuchsstandorte, maßstabsgetreu bezüglich des Reihenabstands, der Laubwandhöhe, sowie der Hangneigung und der Exposition. Die Laubwände der Reben sind durch grüne Quader und der Boden durch graue Flächen dargestellt.	12
Abbildung 2 Skizze der geometrischen Darstellung der reihenorientierten Struktur eines Weinbergs. Der blaue Pfeil illustriert ein aus der Richtung θ, φ kommendes Photon (Lichtquant). Die in der Laubwand zurückgelegte Strecke wird durch die gepunktete Linie hervorgehoben.	15
Abbildung 3 Wasserentnahmeprofile von drei Weinbergen: Schwarze Linien und Punkte zeigen die Differenz des Wassergehalts bei Feldkapazität und vor Beginn der Transpiration der Reben (gemessen am 15. Mai 2011) nach einer Trockenperiode mit geringen Niederschlägen im Frühjahr; rote Linien und Punkte zeigen die Differenz des Wassergehalts bei Feldkapazität und am Ende der Vegetationsperiode (1. November 2011).	21
Abbildung 4 Einfluss von Hangneigung und Niederschlagshöhe auf den Oberflächenabfluss für einen offen gehaltenen (CN = 86) und einen begrünten Boden (CN = 58). Die Werte wurden mit der SCS Curve number method berechnet, für den Einfluss der Hangneigung wurde die Formel von Huang et al. (2006) verwendet.	24
Abbildung 5 Mit der SCS Curve number method (Cronshey et al., 1986) und Niederschlagsdaten der Station Geisenheim berechneter Oberflächenabfluss pro Jahr für einen alternierend begrünten Weinberg (CN = 86 für den offenen Bodenanteil und CN = 58 für den begrünten Bodenanteil).	25
Abbildung 6 Vergleich von Summe und Standardabweichung des Jahresniederschlags der 10 Simulationsläufe von drei WETTREG2010-Stationen. Die Linien zeigen gleitende Mittelwerte bzw. Standardabweichungen für 30-jährige Zeiträume. Die gestrichelten Linien zeigen zum Vergleich die Mittelwerte bzw. Standardabweichungen für den Zeitraum von 1961-1990 der Beobachtungsdaten der entsprechenden DWD-Stationen.	26
Abbildung 7 Die Anzahl der im Zeitraum von 2002-2013 in Hessen neu angelegten Weinberge, aufgeschlüsselt nach dem Abstand der Reihen (Datenquelle: Weinbauamt Eltville, Regierungspräsidium Darmstadt).	29
Abbildung 8 Obere Abbildung: Niederschlagsverteilung der Untersuchungsregion auf Basis des langjährigen Mittels (1961-1990) der Stationsdaten des DWD (schwarze Punkte). Die hessischen Weinbauregionen Rheingau (inkl. Maingau) und Hessische Bergstraße (inkl. Bereich Umstadt) sind in magenta dargestellt. Die drei im Projekt verwendeten Stationen des Klimamodells WETTREG2010 sind als weiße Punkte eingezeichnet. Untere Abbildung: Das Niederschlagsmuster des Modells REMO-UBA (Variable „preciprot“, ohne Driftberücksichtigung).	33
Abbildung 9 Beispiel für eine Bildanalyse zur Bestimmung der Porosität der Laubwand, bei der die Gruppenbildung mit Hilfe chromatischer Koordinaten zur Beschreibung des Farbraums durchgeführt wurde. Die Porosität berechnet man im rechten Bild aus der Summe der blauen Pixel geteilt durch die gesamte Anzahl der Pixel.	36
Abbildung 10 Globalstrahlung und die berechnete, von Reben absorbierte, Strahlung für Weinberge (in Reihenstruktur, Reihenabstand 1,60 m, Laubwandbreite 0,40 m, -höhe 1,10 m, 0,80 m über dem Boden) mit unterschiedlicher Porosität und Orientierung der Reihen: Für in Nord-Süd (A, B) und in Ost-West (C, D) Richtung gezeigte Reihen mit einer Porosität der Laubwände von 0,25 (A, C) und 0,5 (B, D). Durchgezogene Linien zeigen den Tagesgang der Globalstrahlung an einem Strahlungstag in Geisenheim (20. August 2011), gestrichelte Linien die im Tagesverlauf berechnete von Reben absorbierte Strahlung nach dem Modell von Riou et al. (1989) und gepunktete Linien die absorbierte Strahlung nach einem Monte-Carlo Modell.	37

Abbildung 11 Die Porosität einer Rebenlaubwand in Abhängigkeit von der in der Laubwand zurückgelegten Wegstrecke des Lichts.	38
Abbildung 12 Der Verlauf des Verhältnisses von gemessener aktueller Transpiration der Reben (Saftflussmessungen) zur berechneten potenziellen Transpiration für drei Weinberge (EF, BU, WI) mit unterschiedlicher Wasserspeicherfähigkeit während der Jahre 2011 (A) und 2012 (B).....	39
Abbildung 13 Das Verhältnis von aktueller (bestimmt durch Saftflussmessungen) zu potenzieller Transpiration der Reben $T_{a,v}/T_{0,v}$ in Abhängigkeit vom relativen Gehalt transpirierbaren Wassers (<i>FTSW</i>) für drei Weinberge. Der farbige Hintergrund beschreibt die Konfidenzintervalle von $T_{a,v}/T_{0,v}$, in denen kein limitierender Einfluss der Wasserversorgung auf die Transpiration feststellbar ist. Der Schwellenwert von 0,4 wurde durch den Punkt abgeschätzt, an dem das Verhältnis von $T_{a,v}/T_{0,v}$ mit abnehmendem <i>FTSW</i> unter die untere Grenze des Konfidenzintervalls sinkt.	41
Abbildung 14 (A) Tagesmittel der potenziellen Evapotranspiration ET_0 (horizontales Äquivalent, basierend auf Daten der Wetterstation Geisenheim von 2000-2013) für eine horizontale Fläche und zwei um 15° und 30° geneigte Flächen. (B) Die tägliche Differenz der ET_0 der beiden geneigten Flächen zur horizontalen Fläche.	42
Abbildung 15 Jahresverläufe des Niederschlags (D) und des relativen Gehalts an transpirierbarem Wasser (<i>FTSW</i> , A-C) von drei Versuchsstandorten für die Jahre 2011 und 2012. Durchgezogene Linien zeigen das simulierte <i>FTSW</i> , Kreise (Mittelwerte von mindestens fünf Messrohren pro Weinberg, Fehlerbalken zeigen das Konfidenzintervall, $p < 0,05$) und die gepunktete Linie (ein Messrohr am Standort Ehrenfels) das gemessene <i>FTSW</i>	43
Abbildung 16 Jahresverläufe der aktuellen Transpiration der Reben für drei verschiedene Weinberge für die Jahre 2011 und 2012. Durchgezogene Linien zeigen die gemessene Transpiration (Saftflussdaten von sechs Reben pro Weinberg), graue Flächen das Konfidenzintervall ($p < 0,05$) und die gepunktete Linien die simulierte Transpiration der Reben.....	45
Abbildung 17 Simulationsbeispiel für die Transpiration der Reben, die Evapotranspiration der Begrünung und Evaporation des offenen Bodens für drei Weinberge für das Jahr 2012 (A-C). Die Entwicklung der Begrünungspflanzen ist in Wachstumsphasen eingeteilt. Es wird angenommen, dass die Begrünungspflanzen bei mäßigem Frost erfrieren und während des Frühjahrs wieder auflaufen.....	46
Abbildung 18 Anzahl der Trockenstresstage pro Jahr für drei Weinberge mit unterschiedlicher Wasserspeicherfähigkeit der Böden, berechnet mit einem Wasserhaushaltsmodell, Originaldaten und den Projektionen regionaler Klimamodelle. Die Linien zeigen 30-jährige gleitende Mittel (geglättet).....	47
Abbildung 19 Anzahl der Trockenstresstage (30-jährige gleitende Mittel) für den Standort Burgweg, berechnet mit dem Klimamodell EH-CLM_U, wobei die Niederschläge um den Faktor 10 bis 150 % verändert wurden.	49
Abbildung 20 Die in den Abschnitten 3.10.1-3.10.7 dargestellten Karten zeigen die mögliche zukünftige Zunahme der Trockenstresstage pro jährliche Vegetationsphase (1. Mai – 30. Sept.) für die Weinbergspartellen des Rheingaus und der Hessischen Bergstraße. Die Zunahme ist als Differenz des Mittels der Trockenstresstage der Zeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 zum Zeitraum 1971-2000 dargestellt und wurde mit einem Wasserhaushaltsmodell für Weinberge und verschiedenen regionalen Klimamodellen (siehe Tabelle 3) berechnet.	61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Haupteigenschaften der drei Weinberge zur Modellierung und Untersuchung des Wasserhaushalts.....	13
Tabelle 2 Total evaporable water (<i>TEW</i>) und readily evaporable water (<i>REW</i>) für drei Weinberge dieser Wasserhaushaltsstudie.....	18
Tabelle 3 Auflistung der verwendeten regionalen Klimamodelle. Die räumliche Auflösung bezieht sich auf die Abstände der Längen- bzw. Breitengrade der Gitterpunkte, woraus die Distanz der Gitterpunkte in Nord-Süd bzw. Ost-West Richtung in der untersuchten Region folgt.....	27
Tabelle 4 Eingangsparameter des Wasserhaushaltsmodells und Herkunft der verwendeten Daten.....	32
Tabelle 5 Verhältnisse von aktueller zu potenzieller Transpiration der Reben für drei Weinberge während Phasen mit guter Wasserversorgung. Fehlerwerte sind Mittelwerte der Konfidenzintervalle ($p < 0,05$) von täglichen Saftflusswerten von sechs Reben pro Weinberg.....	40
Tabelle 6 Berechnung der Jahressumme des horizontalen Äquivalents der potenziellen Evapotranspiration (ET_0), für unterschiedliche Neigungs- und Expositionswinkel für das Jahr 2012 (Wetterstation Geisenheim, DWD).....	42
Tabelle 7 Vergleich von aktueller Evapotranspiration und Transpiration der Reben (Messdaten) und potenzieller Evapotranspiration für drei Weinberge in den Jahren 2011 (Juli-September) und 2012 (Juni-September). Die aktuelle Evapotranspiration resultiert aus Messungen des Niederschlags und der Bodenfeuchte, die Transpiration der Rebe aus Saftflussmessungen.....	45
Tabelle 8 Änderungssignale bezüglich der projizierten jährlichen Summe der Trockenstresstage (Apr.-Sep.) von vier regionalen Klimamodellen, berechnet mit einem Wasserhaushaltsmodell für drei Weinberge. Signifikante Änderungssignale (die Differenz ist größer als die modellspezifische Standardabweichung der Trockenstresstage von 1971-2000) sind in kursiv gedruckt. Für das WETTREG2010 Modell sind in Klammern je das kleinste und größte Änderungssignal der 10 Läufe dargestellt.....	48
Tabelle 9 Die Änderung der Trockenstresstage berechnet mit dem Modell EH-CLM_U für den Standort Burgweg, wobei der Niederschlag mit Faktoren von 50 bis 150 % multipliziert wurde.....	49

1 Einleitung

Weltweit findet sich der Großteil der Weinbauflächen zwischen dem 30. und 50. Breitengrad auf der Nordhemisphäre und dem 30. und 40. Breitengrad auf der Südhemisphäre, obwohl zunehmend auch in den Tropen Wein angebaut wird. Diese Einteilung entspricht grob einem Bereich der Jahresmitteltemperatur von 10 °C bis 20 °C, was der tatsächlichen geographischen Verbreitung durch das Einbeziehen der Wintertemperaturen nicht immer nahe kommt. Die tatsächliche derzeitige Verbreitung wird etwas besser abgegrenzt durch die 12 °C bis 22 °C-Isotherme der durchschnittlichen Temperatur der Vegetationsperiode (April-Oktober, Nordhemisphäre; Oktober-April, Südhemisphäre) (Jones et al., 2005b). Für europäische Verhältnisse liegen 12 °C zwar etwas zu niedrig (in etwa Durchschnitt (1961-1990) von London (England)), aber dadurch können die Weinbaugebiete Kanadas besser einbezogen werden. Für viele Weinbauregionen wurde in den letzten 40-50 Jahren ein Temperaturanstieg beobachtet, der vor allem in den letzten ca. 30 Jahren stark ausgeprägt war und je nach Region zwischen 1 °C und 1,4 °C für die Periode 1950-2000 lag und meist stärker die Minimumtemperaturen betraf (Jones et al., 2005a; Schultz und Jones, 2010). Die Temperaturzunahme beeinflusst die geographische Verbreitung des Weinanbaus, z. B. hat die Anbaufläche in England deutlich zugenommen und sich von 2010 bis zum Jahr 2015 auf ca. 2000 ha verdoppelt (www.englishwineproducers.com). Innerhalb der bestehenden Regionen ist häufig Wasserknappheit ein wichtiger einschränkender Umweltfaktor (Williams und Matthews, 1990; Moriondo et al., 2013) und auch in gemäßigttem Klima ist Trockenstress zeitweise zu beobachten (Gaudillère et al., 2002; Gruber und Schultz, 2005; Schultz und Hofmann, 2016).

Im Einklang mit dem globalen Trend ist die Temperatur auch in Hessens Weinbaugebieten in der jüngeren Vergangenheit deutlich angestiegen. Das bewirkte unter anderem eine Verfrühung der phänologischen Entwicklung, eine Zunahme der Mostgewichte und eine Abnahme der Mostsäurewerte (Hofmann et al., 2016). Etwas weniger Beachtung findet der weltweit an vielen Stationen beobachtete Anstieg der Globalstrahlung während der 1990er Jahre (Hofmann und Schultz, 2010; Wild et al., 2005)) der auch zu einer Zunahme der Mostgewichte beigetragen hat (Hoppmann, 2010). Durch den Anstieg der Temperatur und die höhere Globalstrahlung hat die potenzielle Verdunstung in einigen Regionen seit den 1990er Jahren zugenommen. Betrachtet man dagegen die Niederschläge, so zeigen sich keine räumlich einheitlich ausgeprägten Trends. Der Niederschlag ist allerdings eine Klimagröße, die sich durch eine hohe zeitliche und räumliche Variabilität auszeichnet (z. B. bei den Jahres-

oder Monatssummen). Dabei liegen die Weinbauregionen ohnehin zum großen Teil in Gegenden mit einem vergleichsweise geringen Niederschlagsaufkommen. Dazu zählt auch der Rheingau. Durch die hier beobachtete erhöhte Verdunstung (Schultz und Hofmann, 2016) ist in Verbindung mit der natürlichen Variabilität des Niederschlags auch häufiger Trockenstress für Weinreben in der jüngeren Vergangenheit aufgetreten. Langanhaltende Trockenperioden im Frühjahr, die mit einer verstärkten Zunahme der Globalstrahlung einhergehen, können besonders an Steillagenstandorten zu einer starken Abnahme des pflanzenverfügbaren Wassers führen. Durch die Hangneigung nach Süden sind bei hoher Einstrahlung die Evaporationsraten im Frühjahr und Herbst deutlich höher als die von Flachlagen (Tabelle 6; Abbildung 14; Hofmann und Schultz, 2015). In Kombination mit den häufig flachgründigen Bodenverhältnissen der Steillagen können Begrünungspflanzen so schon einen großen Teil der Bodenwasservorräte im Frühjahr aufbrauchen. Je nach Witterungsverlauf und Standortbedingungen kann für die Reben im weiteren Verlauf der Vegetationsperiode mehr oder minder starker Trockenstress auftreten, der sich im Allgemeinen bei weißen Rebsorten negativ auf Ertrag und Qualität auswirkt. Die Niederschläge haben sich noch aus einem weiteren Grund als zunehmender Risikofaktor herauskristallisiert. Da die Trauben früher und unter deutlich höheren Temperaturen reifen, können hohe Niederschläge in dieser Phase zu einer wesentlich schnelleren und schadhafteren Entwicklung von Traubenfäulnis führen als bei kühleren Reifebedingungen. Die Projektionen der Wetterverläufe regionaler Klimamodelle deuten auf trockenere Sommer bzw. wechselnde Wasserversorgung in der Zukunft hin, was ein angepasstes Management des Wasserhaushalts erschweren würde. Das trifft besonders für Standorte zu, die anfällig für das Auftreten von Trockenstress sind. Aus diesen Gründen ist die Identifizierung von Trockenstress-Risikoregionen ein hilfreiches Instrument, um schon jetzt Entscheidungsprozesse einleiten zu können und die Entwicklung nötiger Anpassungsmaßnahmen und -strategien zu unterstützen. Diese können vielfältiger Natur sein und hängen auch sehr stark von den lokalen Möglichkeiten und dem Ziel der Kulturführung ab. Neben der Bewässerung, der Wahl der Unterlage (Wurzelrebe), der Rebsorte und der Form der Bodenbewirtschaftung, z. B. durch Offenhalten, Begrünen oder Abdecken der Böden, arbeitet die Industrie auch an neuen technologischen Entwicklungen, z. B. an wasserspeichernden Substraten, die in die Böden eingebracht werden können.

Das vorliegende Projekt hatte zum Ziel, eine Abschätzung der Entwicklung des Trockenstressrisikos für die hessischen Weinbauflächen vorzunehmen. Ihm ging ein Projekt voraus, in dem für zwei exemplarische Standorte im Rheingau ein bestehendes

Wasserhaushaltsmodell getestet und modifiziert wurde, um dann mit diesem Wasserhaushaltsmodell und Eingangsdaten aus regionalen Klimamodellen Projektionen der Entwicklung des Wasserhaushalts zu berechnen. Daraus konnte eine mögliche Entwicklung des zukünftigen Trockenstressrisikos für diese Standorte abgeleitet werden (Schultz und Hofmann, 2008). Um das Modell auf die Weinbaugebiete in Hessen übertragen zu können, war ein Schwerpunkt der Arbeit, das bestehende Wasserhaushaltsmodell so weiter zu entwickeln, dass alle relevanten Größen, welche den Wasserhaushalt der Weinberge beeinflussen, berücksichtigt werden. Diese Größen sind die Wasserspeicherfähigkeit der Weinbergsböden, die Hangneigung und die Exposition, welche die potenzielle Verdunstung beeinflussen, sowie der Reihenabstand, die Laubwandhöhe und -breite der Rebzeilen. Auch die Art der Bodenbewirtschaftung hat einen großen Einfluss auf den Wasserhaushalt, da sich offene und begrünte Böden bezüglich des Wasserhaushalts sehr unterschiedlich verhalten. Zur Validierung des weiterentwickelten Wasserhaushaltsmodells wurden in intensiven Messkampagnen an drei unterschiedlichen Weinbergstandorten die Entwicklung des Wasserhaushalts erfasst. Neben der Bodenfeuchte wurde auch der Saftfluss (Transpiration) der Reben gemessen. Dieser Schritt, der in vergleichbaren Studien zum Wasserhaushalt noch nicht durchgeführt wurde, zeigte sich als wesentlich, um sich gegenseitig kompensierende Fehler zu minimieren. Z. B. kann eine Überschätzung der Transpiration der Reben durch eine Unterschätzung der Verdunstung des Bodens ausgeglichen werden. Die Übertragbarkeit des Modells auf andere Standorte wäre dadurch in Frage gestellt. Die Messungen zur Validierung des Modells zeigten, dass es nötig war, viele Module des Modells komplett neu zu erarbeiten, um die Messdaten der unterschiedlichen Standorte reproduzieren zu können (Hofmann et al., 2014). Der zweite Schwerpunkt des Projekts bildete die Projektion des Wasserhaushalts mit regionalen Klimamodellen und dem erweiterten Wasserhaushaltsmodell und die abschließende Analyse hinsichtlich der Entwicklung des Trockenstressrisikos.

2 Material und Methoden

2.1 Beschreibung der Untersuchungsflächen

Die Messungen zur Validierung des Wasserhaushaltsmodells wurden in drei kommerziellen Weinbergen in der Nähe von Rüdesheim durchgeführt, die sich in der Wasserspeicherfähigkeit, der Bodenbewirtschaftung, der Weinberggeometrie, der Hangneigung und der Exposition unterscheiden (Abbildung 1, Tabelle 1). Die Standorte,

bezeichnet als Ehrenfels (EF), Burgweg (BU) und Wilgert (WI), sind mit *Vitis Vinifera* cv. ‘Riesling’ bestockt und im Drahtrahmen Spaliersystem erzogen. Nach der Blüte (circa Mitte Juni) wurde die Geometrie (der Reihencharakter) der Weinberge durch zwei bis dreimaligen Laubschnitt erhalten.

Die Riesling Reben in Burgweg und Wilgert wurden im Jahr 1983 gepflanzt und sind auf die Unterlage (Wurzelrebe) 5C gepfropft. Am Standort Ehrenfels wurden die Reben (Unterlage Börner) 1996 gepflanzt. Ehrenfels und Burgweg sind Steillagenstandorte (Tabelle 1) mit skelettreichen Böden, geringem Gehalt an Löss und Lehm (weitgehend carbonatfrei) und geringmächtiger Bodenauflage (< 1,5 m) über dem anstehenden Festgestein (Bodenklasse I, Löhnertz et al., 2004). Die Bodenauflage des Wilgert ist deutlich tiefer (> 1,5 m), weist einen höheren Lehmanteil auf und verfügt folglich auch über eine höhere Wasserspeicherfähigkeit als Ehrenfels und Burgweg (Bodenklasse II, Löhnertz et. al., 2004).

Die Böden aller drei Weinberge waren auf natürliche Weise teilweise begrünt, wobei sich der Flächenanteil der Begrünung (f_{cc}) der Standorte unterschied (Tabelle 1). Unterhalb der Reben wurde in allen Weinbergen ein Streifen von etwa 40 cm Breite durch die Anwendung von Herbiziden offengehalten. An den Standorten Ehrenfels und Wilgert war jede Gasse zwischen den Rebzeilen begrünt und im Burgweg waren die Gassen alternierend begrünt (eine Gasse offen, eine Gasse begrünt), wobei die nicht begrünteren Gassen durch gelegentliches Grubbern oder Fräsen offen gehalten wurden. Die Begrünung der Gassen wurde gemäht und kurz gehalten.

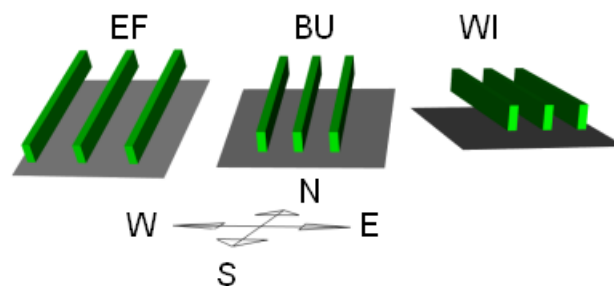


Abbildung 1 Skizze der drei Versuchsstandorte, maßstabsgetreu bezüglich des Reihenabstands, der Laubwandhöhe, sowie der Hangneigung und der Exposition. Die Laubwände der Reben sind durch grüne Quader und der Boden durch graue Flächen dargestellt.

Tabelle 1 Haupteigenschaften der drei Weinberge zur Modellierung und Untersuchung des Wasserhaushalts.

Standort	Pflanzdichte (Reben/ ha)	Gesamttranspirierbares Wasser (mm)	Laubwandhöhe (m)	Laubwandbreite (m)	Reihenabstand (m)	Porosität (min.)	Hangneigung (Grad)	Flächenanteil der Begrünung (%)
EF	4400	85	1,00	0,40	2,50	0,40	35	84
BU	6875	115	1,10	0,40	1,60	0,25	27	40
WI	6875	160	1,35	0,40	1,60	0,25	15	75

2.2 Das Modell zur Strahlungsaufteilung im Weinberg

Im ursprünglichen Modell von Lebon et al. (2003) wurde die Strahlung berechnet, welche vom Weinberg absorbiert wird und auf die Reben und den Boden aufgeteilt. Die Geometrie des Weinbergs wurde dabei durch den Abstand der Reihen D und die Breite L und Höhe H der Laubwände beschrieben. Höhe und Breite der Laubwand formen einen Quader, dessen dritte Kantenlänge der Länge der Reihen entspricht und als unendlich angenommen wird. Weitere Eingangsvariablen waren die Porosität der Laubwand (rechtwinklig zu den vertikalen Seiten der Laubwand), die Reflexionsvermögen (Albedos) des Bodens und der Blätter, die direkte und diffuse Sonnenstrahlung und die Richtung der direkten Strahlung. Die horizontalen Ober- und Unterseiten der Laubwand wurden als opak angenommen.

Entsprechend der Aufteilung der Strahlung auf Reben und Boden formulierten Lebon et al. (2003) Gleichungen für die potenzielle Transpiration der Reben $T_{0,v}$ und die potenzielle Evaporation des Bodens E_0 .

$$T_{0,v} = \frac{R_v}{R_{vy}} ET_0 \quad (1)$$

$$E_0 = \frac{R_s}{R_{vy}} ET_0 \quad (2)$$

wobei R_v , R_s , R_{vy} die Strahlung, welche von den Reben, bzw. dem Boden oder dem Weinberg ($R_{vy} = R_v + R_s$) absorbiert wird, und ET_0 die potenzielle Evapotranspiration ist.

Dieses einfache Modell zur Strahlungsaufteilung (Riou et al., 1989; Lebon et al., 2003) wurde aus drei Gründen durch eine numerische Simulation ersetzt: (1) Es stellte sich heraus, dass für sehr lückenhafte Laubwände (hohe Porosität) die berechnete Rebentranspiration deutlich höher war als die gemessene Transpiration. (2) Durch die Annahme, dass die horizontalen Außenflächen opak sind, könnte die von den Reben absorbierte Strahlung überschätzt werden, wenn das Verhältnis der Laubwandbreite zum Reihenabstand und die Porosität hoch sind. (3) Bei der Anwendung des Modells in einer Klimaimpaktstudie für vollständige

Steillagenregionen kommen die unter (1) und (2) beschriebenen Situationen aufgrund des Alters der Weinberge (geringe Zeilenbreiten) und deren geringer Wasserspeicherfähigkeit (kann hohe Porosität verursachen) recht häufig vor.

Daher wurde eine numerische Simulation basierend auf der Monte-Carlo Methode formuliert, welche zur Lösung von Problemen des Strahlungstransports häufig verwendet wird (Modest, 2003). Um die gleichen Eingangsvariablen zu benutzen, wurde die geometrische Beschreibung des Weinbergs nur leicht verändert. Der Parameter der Stammhöhe S wurde eingeführt, um die Strahlung, welche vom Boden auf die Reben zurück gestreut wird, besser zu berücksichtigen. Weiter wurden im Gegensatz zum vorhergehenden Modell die Ober- und Unterseiten der Laubwand nicht mehr als opak betrachtet und für die Porosität der Laubwand kein fester Wert mehr angenommen (Lebon et al., 2003). Der Strahlungstransport in der Laubwand wurde in Abhängigkeit von der Länge der Wegstrecke, welche die Strahlung innerhalb der Laubwand theoretisch zurücklegen kann, beschrieben. Die Extinktion (Abschwächung) der Strahlung innerhalb von Pflanzenbeständen wird gewöhnlich durch die Anwendung des Lambert-Beerschen Gesetzes berechnet, wobei die Extinktion das Produkt aus dem Extinktionskoeffizienten und dem kumulierten Blattflächenindex entlang der Lichtwegstrecke ist (Hirose, 2005). Wenn man annimmt, dass die Verteilung des Blattflächenindex innerhalb der Laubwand homogen ist, kann der entlang der Wegstrecke kumulierte Blattflächenindex durch die entsprechende Wegstrecke ersetzt werden. Der Extinktionskoeffizient kann aus der Porosität rechtwinklig zur vertikalen Laubwand und der entsprechenden Laubwandbreite bestimmt werden, welche beide leicht zu messende Größen sind. Das Strahlungsmodell wird im Detail in Anhang A beschrieben.

Für die entsprechenden relativen Anteile der von Reben ($f_{R,v}$) und vom Boden ($f_{R,s}$) absorbierten Strahlung erhält man:

$$f_{R,v} = R_v / R_{vy} \quad (3)$$

$$f_{R,s} = R_s / R_{vy} \quad (4)$$

Die Entwicklung der Höhe, Breite und der Porosität der Laubwand wird mit linearen Funktionen in Abhängigkeit von Temperatursummen und Schwellenwerten für den Austrieb, den ersten Laubschnitt und den Beginn und das Ende des Blattfalls beschrieben (Lebon et al, 2003).

Die relativen Anteile der absorbierten direkten Sonnenstrahlung für Reben und Boden sind abhängig von der einfallenden Richtung der Strahlung relativ zu den Reihen der Reben, die von der Hangneigung und der Exposition des Weinbergs und der Position der Sonne

festgelegt wird. Diese Anpassung des Modells an geneigte Standorte wird in Anhang B beschrieben.

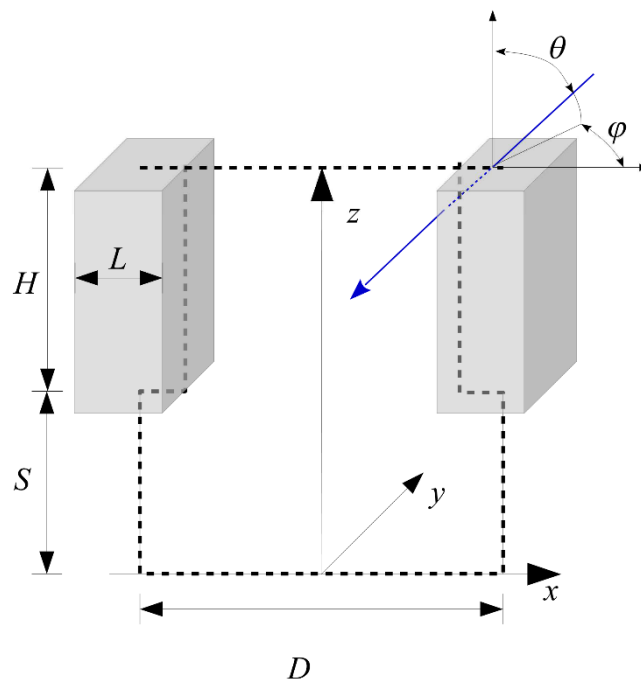


Abbildung 2 Skizze der geometrischen Darstellung der reihenorientierten Struktur eines Weinbergs. Der blaue Pfeil illustriert ein aus der Richtung θ, φ kommendes Photon (Lichtquant). Die in der Laubwand zurückgelegte Strecke wird durch die gepunktete Linie hervorgehoben.

2.3 Das Wasserhaushaltsmodell

Es gibt zwei naheliegende Möglichkeiten zur Berechnung der Wasserflüsse, wenn das Wasserhaushaltsmodell auf geneigte Standorte übertragen wird. Entweder berechnet man die Wasserflüsse rechtwinklig zur Bodenoberfläche oder man benutzt die horizontalen Äquivalente der Wasserflüsse. Weil der Niederschlag und die Bodenfeuchte als horizontale Äquivalente gemessen wurden, wurde die zweite Variante verwendet: Alle Wasserflüsse (im Boden sowie als Evapotranspiration aus dem Boden heraus) wurden für eine horizontale Fläche berechnet und in l/m^2 oder den äquivalenten mm angegeben.

Das Wasserhaushaltsmodell basiert auf dem Modell von Lebon et al. (2003) und einigen Erweiterungen, die von Celette et al. (2010) eingeführt wurden. Der Wassergehalt des Bodens wird durch ein Reservoir repräsentiert, welches durch die Gesamtmenge an transpirierbarem Wasser (total transpirable soil water, *TTSW*), das der Boden speichern kann, charakterisiert ist. *TTSW* ist die Differenz aus dem maximalen gemessenen Wassergehalt des mit Wasser gesättigten Bodens (vergleichbar mit der Feldkapazität) und dem minimalen gemessenen Wassergehalt (zu einem Zeitpunkt, an dem die Bodenfeuchte nach einer Trockenperiode nicht weiter absinkt), der die Grenze der Extrahierbarkeit darstellt. Im Jahresverlauf wird das im

Boden zu irgendeinem Zeitpunkt verbleibende Wasser durch das transpirable soil water (*TSW*) (der aktuell gemessene oder berechnete Wassergehalt abzüglich des Minimums) und dessen relativen Anteil an *TTSW* (fraction of transpirable soil water, $FTSW=TSW/TTSW$) angegeben (Sinclair und Ludlow, 1986). Das Reservoir schließt zwei Teilreservoirs ein, eines für die Begrünpflanzen und eines für den offenen Boden. Die Teilreservoirs werden verwendet, um individuelle Wasserbilanzverläufe zu berechnen, mit dem Ziel die aktuellen Evapotranspirationsraten auf die Anteile der Begrünpflanzung, des offenen Bodens und der Reben aufzuteilen (Celette et al., 2010). Die Begrünpflanzen können Wasser nur aus ihrem Teilreservoir extrahieren, welches durch dessen spezifische Gesamtmenge an transpirierbarem Wasser ($TTSW_{cc}$) charakterisiert ist. Die Wurzeln der Reben befinden sich im gesamten Boden und können daher auch Wasser aus den Teilreservoirs entziehen (Celette et al., 2008). Die Modellrechnungen und die Datenanalyse wurden mit Hilfe der Programmiersprache R durchgeführt (R Development Core Team, 2012).

2.3.1 Evaporation des offenen Bodens

In den vorhergehenden Wasserhaushaltsmodellen (Lebon et al., 2003; Celette et al., 2010) wurde die Evaporation des offenen Bodens nach Ritchie (1972) und Brisson und Perrier (1991) berechnet. Dieser Modellteil wurde durch den Ansatz von Allen et al. (1998) der FAO Richtlinien zur Berechnung des Wasserbedarfs von Nutzpflanzen ersetzt, der kürzlich verändert wurde, um den Einfluss relativ kleiner Niederschlagsmengen auf die Evaporation zu berücksichtigen (Allen, 2011). Die Parametrisierung dieses Modells ist für die geplante Anwendung des Wasserhaushaltsmodells besser geeignet und es wurde gezeigt, dass das Modell auch auf verschiedenen Bodentypen robuste Ergebnisse liefert (Allen et al. 1998). In beiden Modellen (dem ursprünglichen und dem neuen Modell) wird der Evaporationsprozess in zwei Phasen aufgeteilt. In der ersten Phase ist die Evaporation nur durch den an der Bodenoberfläche verfügbaren Energieeintrag begrenzt. In der zweiten Phase ist die Evaporationsrate niedriger, weil die trockene oberste Bodenschicht reduzierend auf den Transport des unterirdischen Wassers zur Bodenoberfläche wirkt. Im Modell von Ritchie (1972) und Brisson und Perrier (1991) wird dieses Verhalten durch eine Funktion, die von der Quadratwurzel der Zeit abhängt, beschrieben, bei Allen et al. (1998) durch eine Funktion, die vom relativen Gehalt an evaporierbarem Wasser in der Evaporationsschicht des Bodens abhängt. Im Modell von Allen et al. (1998) wird angenommen, dass maximal die obersten 0,10-0,15 m der Bodenoberfläche durch Evaporation austrocknen können. Diese Schicht stellt das Teilreservoir der Bodenfeuchte des offenen Bodens dar. Sie wird durch die Gesamtmenge an evaporierbarem Wasser charakterisiert (*TEW*, total evaporable water), die gleichbedeutend

mit der maximalen Wassermenge ist, die während eines Trocknungszyklus evaporieren kann. Die Wassermenge, die während der ersten Phase evaporieren kann, wird als readily evaporable water (*REW*, leicht evaporierbares Wasser) bezeichnet und kann in Abhängigkeit von *TEW* berechnet werden. Die Auswirkung des trockenen Oberbodens auf die Evaporationsrate in der zweiten Phase wird durch den Evaporationsreduzierungskoeffizienten K_r ([0-1], dimensionslos) beschrieben, der gleich dem Verhältnis der verbleibenden Menge an evaporierbarem Wasser in der Evaporationsschicht zur Differenz *TEW-REW* ist. Um die Auswirkung kleiner Niederschlagsmengen zu berücksichtigen, fügte Allen (2011) eine zusätzliche Oberschicht dem Modellansatz hinzu, die an der Bodenoberfläche als Teil der Evaporationsschicht angesiedelt ist und deren Gesamtmenge an evaporierbarem Wasser mit *REW* übereinstimmt. Solange evaporierbares Wasser in dieser Oberschicht verfügbar ist, verläuft der Evaporationsprozess entsprechend der ersten Phase ($K_r = 1$) und die Reduzierung, beschrieben durch K_r , ist nur wirksam, wenn diese Schicht trocken ist. Die Erweiterung des Modellansatzes führt dazu, dass Regenmengen, die auf einen trockenen Boden fallen, schneller verdunsten (erste Phase) als im Ansatz von Allen et al. (1998).

Das Modell von Allen (2011) berechnet den täglichen Verlauf der Wasserbilanz, wobei die potenzielle Evapotranspiration ET_0 eine der Eingangsvariablen ist. Um das Modell für den offenen Boden in das Wasserhaushaltsmodell zu integrieren, wurde die Wasserbilanz für einen vollständig offenen Boden berechnet, wie es im dual crop-coefficient Ansatz von Allen (2011) detailliert (und in Kürze oben) beschrieben ist. Anstelle der täglichen ET_0 Werte wurde das Produkt $f_{R,s}ET_0$ (Gleichung 4) verwendet, um die an der Bodenoberfläche wirksame Evapotranspiration zu berücksichtigen, welche durch die Abschattung der Reben reduziert ist. Die Wasserbilanzroutine berechnet den Evaporationskoeffizienten K_e (in Abhängigkeit von K_r) mit dem man für die Evaporation des offenen Bodens des Weinbergs E_s erhält:

$$E = K_e f_{R,s} ET_0 \quad (5)$$

$$E_s = E(1 - f_{cc}) \quad (6)$$

wobei E die Evaporation eines vollständig offenen Bodens ist. Der Faktor f_{cc} entspricht dem begrünten Flächenanteil des Bodens und hängt von der Bodenbewirtschaftung ab.

Die Wassermengen, welche durch die Transpiration der Reben oder der Begrünpflanzen der Evaporationsschicht entzogen werden, werden wie von Allen et al. (1998) empfohlen bei der Berechnung der Wasserbilanz dieser Schicht nicht berücksichtigt. Das *TEW* wurde durch das *TTSW* der obersten 0,15 m des Bodens abgeschätzt (mit den Messdaten der Bodenfeuchterohre) und ist in guter Übereinstimmung mit Tabellenwerten von Allen et al. (1998) (Tabelle 2).

Tabelle 2 Total evaporable water (*TEW*) und readily evaporable water (*REW*) für drei Weinberge dieser Wasserhaushaltsstudie.

Standort	<i>TEW</i> (mm)	<i>REW</i> (mm)
EF	26,9	11,0
BU	21,5	9,2
WI	21,4	9,1

2.3.2 Transpiration der Reben

Die Berechnung der Transpiration der Reben wird ähnlich gehandhabt wie im Modell von Lebon et al. (2003). Mit Gleichung 3, welche den Anteil der von den Reben absorbierten Strahlung beschreibt, kann man für Gleichung 1 schreiben:

$$T_{0,v} = f_{R,v} ET_0 \quad (7)$$

$T_{0,v}$ ist ein Ausdruck für die potenzielle Transpiration der Reben (ohne das Vorhandensein von Wassermangel). Zur Berechnung der aktuellen Transpiration der Reben ($T_{a,v}$) wird $T_{0,v}$ mit zwei Koeffizienten multipliziert:

$$T_{a,v} = k_{c,v} k_s T_{0,v} \quad (8)$$

wobei k_s ein Wasserstresskoeffizient ist [0-1], der den Einfluss von Wassermangel auf die Transpiration bewertet. Der k_s Koeffizient wurde schon von Lebon et al. (2003) eingeführt, um die stomatäre Reaktion der Reben auf Wassermangel zu beschreiben (Trambouze und Voltz, 2001). Diese Reaktion wird durch eine bilineare Funktion beschrieben, bei der während der ersten Phase der Wasserabnahme die relative Transpirationsrate $T_{a,v}/T_{0,v}$ nicht durch die Wasserverfügbarkeit reduziert wird und die Transpiration maximal ist. Wenn $FTSW$ unter den Schwellenwert p_{FTSW} fällt, nimmt mit sinkendem $FTSW$ k_s linear gegen null ab (Lebon et al., 2003):

$$k_s = \begin{cases} FTSW / p_{FTSW} & (0 \leq FTSW \leq p_{FTSW}) \\ 1 & (p_{FTSW} < FTSW \leq 1) \end{cases} \quad (9)$$

Dieses Konzept ist analog zu dem System aus *REW* und *TEW*, welches Allen et al. (1998) beschrieben hat, um den Einfluss der Bodenfeuchte auf die Transpiration von Nutzpflanzen zu bestimmen. Weil die Wurzeln der Reben im gesamten Reservoir vorhanden sind (Celette et al., 2008), wird $FTSW$ in Abhängigkeit der Bodenfeuchte des gesamten Bodenprofils bestimmt ($FTSW = TSW / TTSW$). Der Schwellenwert p_{FTSW} wurde auf 0,4 gesetzt, wie im Modell von Lebon et al. (2003), in dem die Abschätzung des Schwellenwerts auf Messungen der stomatären Leitfähigkeit basierte. Der Schwellenwert wurde davon unabhängig im Projekt

auf der Basis von Saftfluss- und Bodenfeuchtemessungen bestimmt, wobei der gleiche Wert von $p_{FTSW} = 0,4$ gefunden wurde (Details im Ergebnisteil).

Der zweite Faktor, $k_{c,v}$, ist ein rebenspezifischer Transpirationskoeffizient, der auch aus den Saftflussmessungen resultiert. Die Einführung des Koeffizienten wurde notwendig, um das Verhältnis von gemessener Transpiration der Reben (durch die Saftflussmessungen) zur berechneter potenziellen Transpiration der Reben ($T_{a,v}/T_{o,v}$) in Situationen ohne Wassermangel ($k_s = 1$) korrekt zu beschreiben. Der Koeffizient $k_{c,v}$ wurde auf 0,56 gesetzt, wie im Ergebnisteil beschrieben.

Das verbleibende TSW des Gesamtreservoirs wird für jeden Tag aus der Bilanz der Wasserflüsse berechnet:

$$TSW(i+1) = TSW(i) + P_{eff}(i) - ET_a \quad (10)$$

wobei TSW auf den Wertebereich $0 \leq TSW \leq TTSW$ begrenzt ist, $i \in \{1,2,3,\dots,n\}$ bezieht sich auf den Tag, $P_{eff}(i)$ ist der Niederschlag nach Abzug des Oberflächenabflusses und:

$$ET_a = T_{a,v} + ET_{a,cc} + E_s \quad (11)$$

ist die Evapotranspiration des Weinbergs, mit $ET_{a,cc}$ als Evapotranspiration der begrünten Flächen.

2.3.3 Transpiration der Begrünung

Die Transpirationsraten der Begrünung sind abhängig vom gesamten transpirierbaren Wasser $TTSW_{cc}$ des Begrünungsreservoirs, welches von den Bodeneigenschaften und dem Bodenvolumen abhängt, von dem die Begrünungspflanzen Wasser extrahieren können. Messungen von Entnahmeprofilen im Frühjahr, bevor die Transpiration der Reben einsetzte, zeigten, dass eine Durchwurzelungstiefe der Begrünungspflanzen von 1 m eine gute Abschätzung für alle Weinberge in der Untersuchung darstellt (Abbildung 3). Das belegen auch Untersuchungen von Uliarte et al. (2013) durch Messungen an verschiedenen Arten von Begrünungspflanzen im Rheingau und ist auch annähernd in Übereinstimmung mit Tabellenwerten von Allen et al. (1998) für die Durchwurzelungstiefe von Gräsern kühler Regionen (Rispengras, Weidelgras, Rohrschwengel) von 0,5-1 m. Celette et al. (2008) beobachtete indessen, dass Begrünungspflanzen bis zu einer Tiefe von 1,5 m Wasser entnommen haben, jedoch unter sehr trockenen Bedingungen im Süden Frankreichs. Aufgrund der eigenen Messungen und der Annahme, dass es wegen der höheren Häufigkeit von Sommerniederschlägen im Rheingau für die Begrünungspflanzen nicht notwendig ist Wasser aus tiefer als 1 m gelegenen Schichten zu extrahieren, wurde das $TTSW_{cc}$ der Begrünungspflanzen folgendermaßen bestimmt:

$$TTSW_{cc} = TTSW(1\text{ m})f_{cc} \quad (12)$$

wobei $TTSW(1\text{ m})$ sich auf das $TTSW$ bis zu einer Bodentiefe von 1 m bezieht und f_{cc} den Flächenanteil der Begrünungspflanzen beschreibt.

Die tägliche verbleibende Wassermenge im Begrünungsreservoir wird daher wie folgt berechnet:

$$TSW_{cc}(i+1) = TSW_{cc}(i) + P_{eff}(i)f_{cc} - ET_{a,cc}(i) - k_{s,v,cc}k_{c,v}T_{0,v} \quad (13)$$

wobei $TSW_{cc}(i+1)$ das transpirierbare Wasser ist und auf den Wertebereich $0 \leq TSW_{cc} \leq TTSW_{cc}$ begrenzt ist und P_{eff} den Niederschlag nach Abzug des Oberflächenabflusses beschreibt. Der letzte Term in Gleichung 13 entspricht der Wassermenge, welche von den Reben dem Begrünungsreservoir entzogen wird. Da sich die aktuelle Transpiration der Reben aus der Summe der Wassermengen zusammensetzt, welche den Teilreservoirs des Bodens entzogen werden, kann man den Wasserstresskoeffizienten k_s entsprechend aufteilen:

$$T_{a,v} = k_s k_{c,v} T_{0,v} = (k_{s,v,cc} + k_{s,v,r}) k_{c,v} T_{0,v} \quad (14)$$

wobei $k_{s,v,cc}$ und $k_{s,v,r}$ Koeffizienten darstellen, welche die Auswirkung der Aufteilung der Transpiration sowie möglichen Wassermangels im Reservoir der Begrünungspflanzen ($k_{s,v,cc}$) oder im übrigen Reservoir (ohne Begrünung, $k_{s,v,r}$) auf die Transpiration der Reben integrieren. Eine Fallunterscheidung, welche die verschiedenen Situationen von Wassermangel im Gesamtreservoir oder in den Teilreservoirs berücksichtigt, führt für die Berechnung von $k_{s,v,cc}$ zu folgendem Ergebnis:

$$k_{s,v,cc} = \begin{cases} \frac{TSW_{cc}}{p_{FTSW} TTSW} & (k_s < 1) \\ \frac{TTSW_{cc}}{TTSW} & \left(k_s = 1 \wedge \frac{TSW_{cc}}{TTSW_{cc}} \geq p_{FTSW} \wedge \frac{TSW_r}{TTSW_r} \geq p_{FTSW} \right) \\ \frac{TSW_{cc}}{p_{FTSW} TTSW} & \left(k_s = 1 \wedge \frac{TSW_{cc}}{TTSW_{cc}} < p_{FTSW} \wedge \frac{TSW_r}{TTSW_r} \geq p_{FTSW} \right) \\ 1 - \frac{TSW_r}{p_{FTSW} TTSW} & \left(k_s = 1 \wedge \frac{TSW_{cc}}{TTSW_{cc}} \geq p_{FTSW} \wedge \frac{TSW_r}{TTSW_r} < p_{FTSW} \right) \end{cases}, \quad (15)$$

wobei TSW_r und $TTSW_r$ das transpirierbare und das gesamte transpirierbare Wasser im übrigen Teilreservoir ohne Begrünungsreservoir bezeichnen.

Um den Wasserverbrauch der Begrünung während des gesamten Vegetationszyklus zu berechnen, wurde das System von Allen et al. (1998) angewendet. Dabei wird die Anbausaison in vier Phasen unterteilt, einer Frühphase, einer Entwicklungsphase, einer Hauptphase und einer Spätphase. Der Beginn der Vegetationsperiode der Begrünung wurde

nach Allen et al. (1998) auf 7 Tage vor dem letzten Auftreten von $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Frühjahr (in der Regel Anfang März) gesetzt und das Ende 7 Tage nach dem ersten Auftreten von $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Spätherbst / Winter (in der Regel Ende November / Anfang Dezember). Der Beginn der Vegetationsperiode kennzeichnet auch den Anfang der Frühphase und das Ende markiert den Anfang der Spätphase. Das Auftreten von Spätfrösten im April oder Mai blieb unberücksichtigt, um die Vegetationsruhe nicht künstlich zu verlängern. Da bisher keine Untersuchungen zu den Evapotranspirationskoeffizienten natürlicher Begrünung im Rheingau bekannt sind, wurde angenommen, dass die Pflanzen während der Spät- und Frühphase nicht aktiv sind und die Evapotranspiration nur in Form von Evaporation auftritt (Allen et al., 1998). Diese Annahme wurde unlängst durch direkte Messungen von Evapotranspirationsraten an verschiedenen Begrünungspflanzen bestätigt (Uliarte et al., 2013). Während der Entwicklungsphase wachsen die Begrünungspflanzen und erreichen eine vollständige Bodenabdeckung am Ende der Phase, so dass die Evapotranspiration während der Hauptphase der aktuellen Evapotranspiration der Begrünung entspricht.

Der Übergang von Evaporation zur Evapotranspiration wurde durch einen Bodenabdeckungskoeffizienten f_g beschrieben, der während der Spät- und Frühphase gleich 0 ist, während der Entwicklungsphase linear von 0 bis 1 zunimmt und während der Hauptphase gleich 1 ist. Die Dauer der Früh- und Entwicklungsphase wurde auf 30 bzw. 50 Tage gesetzt. Diese Werte ergaben gute Resultate für den simulierten Wasserentzug im Frühjahr und stimmen auch mit Beobachtungen vor Ort überein (Uliarte et al., 2013).

Die Evapotranspiration der Begrünung ($ET_{a,cc}$) wird dann wie folgt berechnet:

$$ET_{a,cc} = f_{cc} (f_g k_{s,cc} f_{R,s} ET_0 + (1 - f_g) E) \quad (16)$$

wobei $k_{s,cc}$ ein Wasserstresskoeffizient ist [0-1], der mit Gleichung 9 für $FTSW_{cc} = TSW_{cc} / TTSW_{cc}$ und dem Schwellenwert $p_{FTSW} = 0,4$ (gültig für Weidelgras, Allen et al., 1998) berechnet wird.

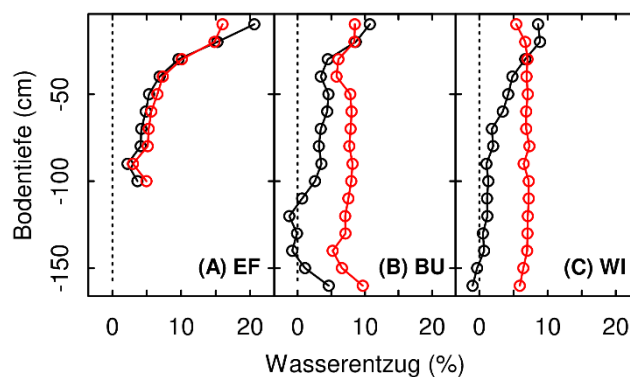


Abbildung 3 Wasserentnahmepprofile von drei Weinbergen: Schwarze Linien und Punkte zeigen die Differenz des Wassergehalts bei Feldkapazität und vor Beginn der Transpiration der Reben (gemessen am 15. Mai 2011) nach einer Trockenperiode mit geringen

Niederschlägen im Frühjahr; rote Linien und Punkte zeigen die Differenz des Wassergehalts bei Feldkapazität und am Ende der Vegetationsperiode (1. November 2011).

2.4 Wetterdaten und Evapotranspiration

Wetterdaten wurden von der Agrarmeteorologischen Außenstelle des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Geisenheim bereitgestellt. Klimatisch liegt der Rheingau in der warm-gemäßigten Zone. Der mittlere Jahresniederschlag beträgt 544 mm (1981-2010) und ist annähernd gleichmäßig über das Jahr verteilt. Der niederschlagsreichste Monat ist der Juli mit 60 mm, der April ist niederschlagsärmster Monat mit 35 mm. Niedrige Niederschlagsereignisse (< 10 mm/Tag) sind vorherrschend und tragen zu 65 % der Gesamtniederschläge bei, Niederschläge über 20 mm/Tag hingegen haben nur einen Anteil von 9 %. Starkregenereignisse kommen eher selten vor, die drei höchsten Tagesniederschläge (1981-2010) waren 75 mm (6. Juli 1999), 52 mm (13. August 1995) und 37 mm (9. August 1981). Die ET_0 beträgt zwischen dem 1. April und dem 30. September im Mittel 605 mm.

Für die Standorte Ehrenfels und Burgweg wurden die Wetterdaten einer Station verwendet, die sich unmittelbar am Standort Ehrenfels befand und Temperatur, Windgeschwindigkeit, Niederschlag, relative Feuchte und Globalstrahlung aufzeichnete. Für den Standort Wilgert wurden mit Ausnahme der Globalstrahlung die entsprechenden Daten einer benachbarten Station genutzt. Für diesen Standort wurden die Strahlungsdaten der Station in Geisenheim verwendet, die auch Daten für die direkten und diffusen Anteile der Globalstrahlung bereitstellte.

Um die globalen und diffusen Anteile der Strahlung für die Standorte Ehrenfels und Burgweg abzuschätzen, wurde eine Korrelation zwischen der Diffusstrahlung und einem Trübungsindex aus den Daten der Station in Geisenheim abgeleitet (Duffie und Beckman, 2006). Diese Korrelation wird in Anhang C beschrieben. Die extraterrestrische Strahlung der geneigten Standorte EF und BU, welche man zur Berechnung des Trübungsindex benötigt, wurde nach Allen et. al (2006) berechnet.

Die potenzielle Evapotranspiration ET_0 wurde nach Allen et al. (2005) bestimmt. Dabei wurde berücksichtigt, dass die Strahlungsbilanz in geneigten Flächen gegenüber der Horizontalen verändert ist. Die Globalstrahlung wurde daher von der Horizontalen in den Hang projiziert, wobei das HDKR Modell (Reindl et al., 1990; Duffie und Beckman, 2006) und die Aufteilung der Strahlung nach Gleichung A14 bzw. A15 verwendet wurde. Die von der umgebenden Topographie emittierte oder reflektierte langwellige Strahlung wurde nicht berücksichtigt. Eine einfache Abschätzung unter der Annahme, dass ein geneigter Standort die gleiche Bestrahlungsstärke zur umgebenden Topographie (die als horizontal angenommen wurde)

emittiert welche er auch von derselben empfängt, so dass nur die Strahlungsbilanz berücksichtigt wird, die sich auf den Sichtfaktor des Hangs zum Himmel bezieht, erhöhte die potenzielle Evapotranspiration für den Standort Ehrenfels (35° Hangneigung) nur um 1 %. Die resultierende potenzielle Evapotranspiration (ET_{0s}) bezieht sich auf die geneigte Fläche und wurde in die Horizontale rückprojiziert, um das horizontale Äquivalent der potenziellen Evapotranspiration zu berechnen, damit die Daten kongruent zu den Niederschlags- und Bodenfeuchtemessungen sind (Allen et al., 2006). Daraus folgt:

$$ET_0 = ET_{0s} / \cos \beta \quad (17)$$

wobei β der Neigungswinkel des Hangs ist.

2.5 Oberflächenabfluss

Ein weitverbreitetes Modell zur Berechnung des Oberflächenabflusses ist das vom früheren US Soil Conservation Service (heute der Natural Resources Conservation Service (NRCS), eine Behörde des United States Department of Agriculture) unter dem Namen „SCS Curve number method“ bekannte Verfahren (Cronshey et al., 1986). Das Verfahren wurde für kleine Einzugsgebiete entwickelt, unter Berücksichtigung, dass der Niederschlag häufig nur als Tageswert vorliegt. Die Böden werden gemäß ihres Versickerungsvermögens in vier hydrologische Bodengruppen eingeteilt und entsprechend der Bodennutzung werden ihnen CN-Werte (runoff curve-number) zugeordnet, welche tabelliert vorliegen. Der CN-Wert ist ein Maß für das Wasserspeichervermögen des Bodens. Ihm zugrunde liegt eine Kurve, die die Beziehung zwischen Niederschlag und resultierendem Oberflächenabfluss darstellt. Der Einfluss von Vorregen (Niederschlagssumme der 5 vorhergehenden Tage) und Jahreszeit wird durch drei Bodenfeuchteklassen berücksichtigt, wodurch der CN-Wert nochmals angepasst wird (Ward und Trimble, 2003; Maniak, 2010). Das Modell wurde auch schon erfolgreich in Wasserhaushaltstudien von Weinbergen in Südfrankreich verwendet (Gaudin et al., 2010). In dieser Arbeit wurden offen gehaltenen Böden ein CN-Wert von 86 (entsprechend „Ödland ohne nennenswerten Bewuchs“) und begrünten Böden ein CN-Wert von 58 (entsprechend „Dauerwiese“; Maniak, 2010) zugeordnet. Für den zur Berechnung des Wasserhaushalts relevanten effektiven Niederschlag P_{eff} gilt damit:

$$P_{eff} = P - P_a, \quad (18)$$

wobei P der Tagesniederschlag und P_a der Oberflächenabfluss ist.

Die Hangneigung wird in diesem Modell nicht berücksichtigt und es gibt nach Kenntnis der Autoren derzeit in der Literatur nur zwei publizierte Formeln, mit denen in Abhängigkeit von der Hangneigung korrigierte CN-Werte berechnet werden können (Huang et al., 2006). Die

neuere Formel von Huang et al. (2006) liefert allerdings nur eine marginale Erhöhung des Oberflächenabflusses mit zunehmender Hangneigung (Ebrahimian et al., 2012; Abbildung 4), die sich im Rahmen der Messgenauigkeit von Niederschlägen und Oberflächenabfluss bewegt. Daraus folgt, dass die Art der Bodenbewirtschaftung oder Bodennutzung einen viel größeren Einfluss auf den Oberflächenabfluss hat, als die Hangneigung. Das geht auch aus der Arbeit von Emde (1992) hervor, der in seiner Dissertation den Oberflächenabfluss und den Bodenaustrag an acht Messstationen im Rheingau mit Hangneigungen von 10, 20, 22 und 32 % untersuchte. Emde (1992) kommt zum Ergebnis: „Bei den eigenen Untersuchungen konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Einfluss der Hangneigung auf den Oberflächenabfluss und den Bodenaustrag ermittelt werden“. Daher wurde auf eine Berücksichtigung der Hangneigung bei der Abschätzung des Oberflächenabflusses mit der SCS Curve number method verzichtet.

Im Mittel liegt der mit Beobachtungsdaten (Station Geisenheim) für einen alternierend begrünten Weinberg berechnete Oberflächenabfluss im Rheingau bei etwa 20 mm/Jahr und spielt daher in der Gesamtbilanz nur eine untergeordnete Rolle im Rahmen der Modellierung des Wasserhaushalts (Abbildung 5). Emde (1992) konnte in begrünten Anlagen keinen Oberflächenabfluss feststellen und zeigte auch, dass offen gehaltene Weinbergböden am stärksten gefährdet sind. Aus diesen Gründen wurde angenommen, dass die mit der CN-Methode berechnete Gesamtmenge an Oberflächenabfluss mit genügender Genauigkeit berücksichtigt wurde. Neben dem Oberflächenabfluss wurden auch die Regenmengen als Verlust behandelt, welche die Speicherkapazität der Böden überschritten, wobei das Modell nicht unterschied, ob die Verluste als Oberflächenabfluss oder als Tiefsickerung auftraten.

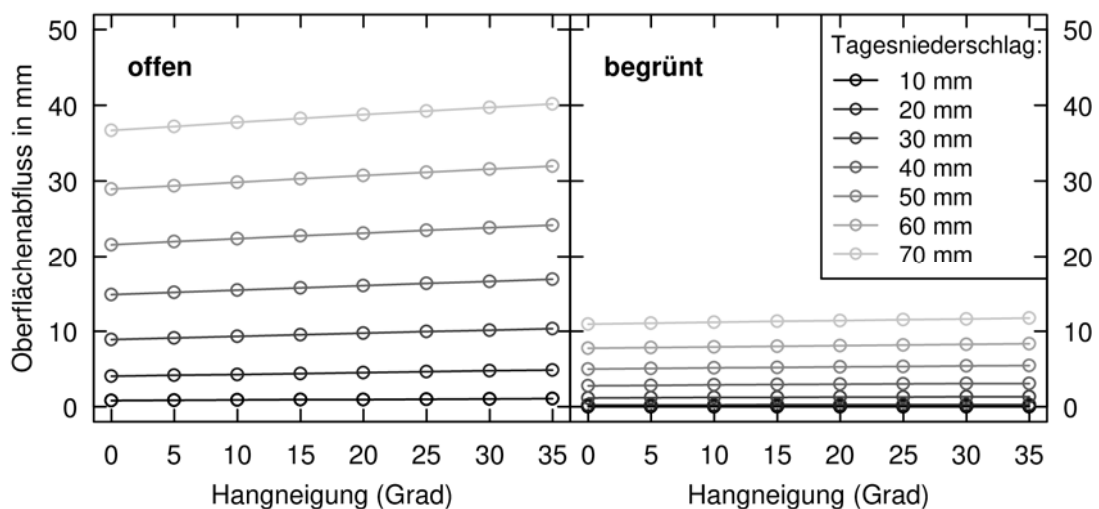


Abbildung 4 Einfluss von Hangneigung und Niederschlagshöhe auf den Oberflächenabfluss für einen offen gehaltenen (CN = 86) und einen begrünten Boden (CN = 58). Die Werte wurden mit der SCS Curve number method berechnet, für den Einfluss der Hangneigung wurde die Formel von Huang et al. (2006) verwendet.

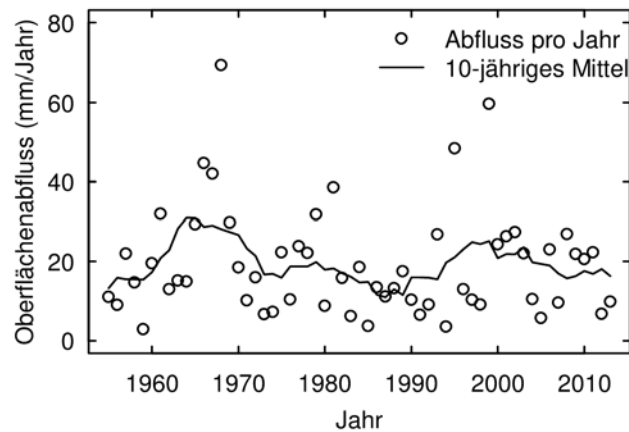


Abbildung 5 Mit der SCS Curve number method (Cronshey et al., 1986) und Niederschlagsdaten der Station Geisenheim berechneter Oberflächenabfluss pro Jahr für einen alternierend begrünten Weinberg (CN = 86 für den offenen Bodenanteil und CN = 58 für den begrünten Bodenanteil).

2.6 Die Klimamodelle und Wetterdaten

Es wurden die vom Projektgeber im Rahmen von INKLIM-A zur Verfügung gestellten regionalen Klimamodelle (RCM) verwendet: Das Modell WETTREG2010 (Kreienkamp et al., 2010), das Modell CLM (Rockel et al., 2008), einmal angetrieben vom Globalmodell ECHAM5/OM (Lautenschläger et al., 2009; EH_CLM_U) und einmal vom Globalmodell HadCM3 (Schaer und Christensen, 2013; HadCM3_CLM_U) sowie das Modell REMO (Jacob, 2005) angetrieben von ECHAM5/OM (REMO-UBA_U), wobei sich alle Projektionen auf das Treibhausgas-Emissionsszenario A1B des IPCC (Nakićenović et al., 2000) beziehen. Die Klimamodelle sind in Tabelle 3 aufgelistet.

2.6.1 WETTREG2010

WETTREG2010 ist ein statistisches Modell, welches Stationsdaten bereitstellt. Für den Rheingau wurden Daten der Stationen Geisenheim und Wiesbaden (Süd) verwendet. Die Station Geisenheim liegt im westlichen Teil des Rheingaus und ist von Weinbergen umgeben. Die Station Wiesbaden (Süd) liegt zwar nicht in unmittelbarer Nähe zu Weinbergen, das Niederschlagsmittel von 1961-1990 ist aber vergleichbar mit benachbarten, im mittleren und östlichen Teil des Rheingaus gelegenen Stationen des DWD (Abbildung 8 oben). Für die Hessische Bergstraße wurde die Station Gernsheim verwendet. Gernsheim liegt in ca. 10 km Entfernung etwas nordwestlich des Anbaugebiets in der Ebene des Oberrheingrabens. Die Weinberge der Hessischen Bergstraße liegen an den westlichen Hängen des Odenwalds, welche hier den Oberrheingraben begrenzen. Durch orographischen Steigungsregen ist die Jahressumme der Niederschläge im langjährigen Mittel jedoch etwa 150 mm höher als in der

Ebene (Abbildung 8, Abbildung 6 oben). WETTREG2010 stellt 10 Simulationsläufe pro Station bereit. Ein Vergleich der langjährigen Mittel und Standardabweichung des Niederschlags der drei Stationen zeigt, dass die 10 Läufe pro Station vergleichbare Trends für die Niederschlagsentwicklung projizieren und eine modellspezifische Streubreite verdeutlichen, die für 30-jährige Jahresmittel des Niederschlags bei etwa 70 mm/Jahr liegt. Aus diesem Grund wurde pro Station nur ein Lauf (jeweils die Simulation Nr. 55) für die Analyse des Trockenstressrisikos verwendet. Auffallend ist jedoch, dass für die Station Geisenheim ein deutlich stärkerer Rückgang des Jahresniederschlags projiziert wird als für die Station Wiesbaden (Süd), die Luftlinie etwa 25 km von der Station Geisenheim entfernt ist. Da eine eindeutige Zuordnung der Weinberge des Rheingaus zur einen oder anderen Station nicht möglich ist und die projizierten Klimatrends beider Stationen gleichermaßen Gültigkeit besitzen, wurden die Modellrechnungen mit den Daten beider Stationen für den Rheingau durchgeführt. Weiterhin fällt auf, dass WETTREG2010 die beobachteten Jahresniederschläge von 1961-1990 der Stationen Geisenheim und Gernsheim deutlich unterschätzt. Auch die beobachtete Varianz des Jahresniederschlags ist an allen drei Stationen größer als die von WETTREG2010 simulierte. Das ist überraschend, weil eine Stärke der statistischen Klimamodelle darin liegt, die beobachtete Klimatologie von Stationsdaten gut reproduzieren zu können.

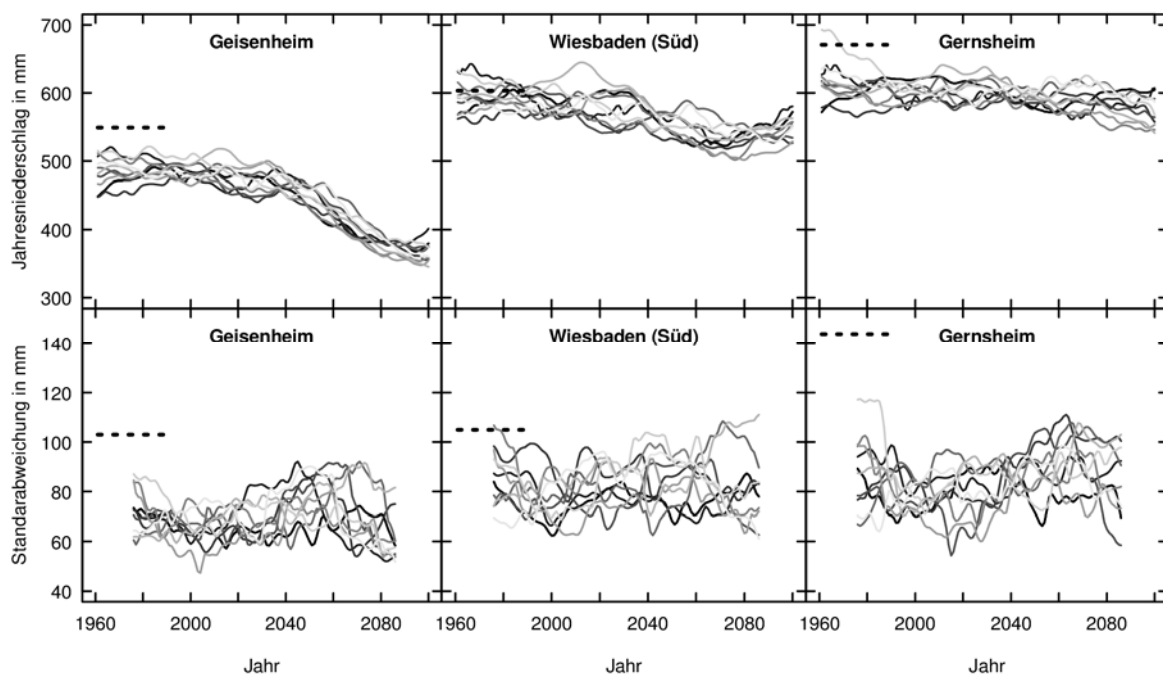


Abbildung 6 Vergleich von Summe und Standardabweichung des Jahresniederschlags der 10 Simulationsläufe von drei WETTREG2010-Stationen. Die Linien zeigen gleitende Mittelwerte bzw. Standardabweichungen für 30-jährige Zeiträume. Die gestrichelten Linien zeigen zum Vergleich die Mittelwerte bzw. Standardabweichungen für den Zeitraum von 1961-1990 der Beobachtungsdaten der entsprechenden DWD-Stationen.

2.6.2 REMO und CLM

Die anderen drei Modelle sind dynamische Modelle, welche auf der Basis von Gleichungen, die die physikalischen Austauschprozesse von Energie und Masse beschreiben, Daten für Gitterboxen berechnen. Für die dynamischen Modelle wurden zusätzlich von der INKLIM-A Daten-AG Bias-korrigierte Daten bereitgestellt (Blümel und Chmielewski, 2010; erkennbar an der Endung „K“ statt „U“ des Modellkürzels). Die in 0,1° Auflösung vorliegenden REMO-UBA Daten wurden im Zuge der Bias-Korrektur zusätzlich auf räumlich einheitliche Gitter umgerechnet und lagen in der korrigierten Version auch in 0,2° Auflösung vor, wobei in dieser Arbeit nur die 0,1° Version verwendet wurde.

Bei der Bias-Korrektur ist zu beachten, dass die Korrektur am Flächenmittel der Gitterboxen erfolgte, die aus Beobachtungsdaten gewonnen wurden. Das heißt, dass die klimatischen Unterschiede innerhalb eines von einer Box eingefassten Bereichs nicht erfasst, sondern gemittelt wurden. Diese können aber z. B. beim Anbau von Weinreben so deutlich ausfallen, dass sowohl Toplagen als auch aus klimatischen Gründen (z. B. durch Winter- oder Spätfröste) weinbaulich nicht geeignete Standorte in einer Gitterbox vorkommen können. Dadurch können auch die so erzeugten korrigierten Daten zum Teil sehr deutlich von der Klimatologie einzelner Stationen, welche innerhalb der Box liegen, abweichen.

Tabelle 3 Auflistung der verwendeten regionalen Klimamodelle. Die räumliche Auflösung bezieht sich auf die Abstände der Längen- bzw. Breitengrade der Gitterpunkte, woraus die Distanz der Gitterpunkte in Nord-Süd bzw. Ost-West Richtung in der untersuchten Region folgt.

RCM-Kürzel	Regionalmodell	Globalmodell	Räumliche Auflösung	Distanz Nord-Süd	Distanz Ost-West
WETTREG2010	WETTREG2010	ECHAM5/OM	stationsbasiert		
EH-CLM_U	CLM	ECHAM5/OM	0,2°	14,4 km	22,2 km
HadCM3-CLM_U	CLM	HadCM3	0,2°	14,4 km	22,2 km
REMO-UBA_U	REMO	ECHAM5/OM	0,1°	7,2 km	11,1 km
EH-CLM_K	CLM	ECHAM5/OM	0,2°	14,4 km	22,2 km
HadCM3_CLM_K	CLM	HadCM3	0,2°	14,4 km	22,2 km
REMO-UBA_K	REMO	ECHAM5/OM	0,1°	7,2 km	11,1 km

2.7 Analyse des Trockenstressrisikos

2.7.1 Analyse für die drei Versuchsstandorte

Projektionen der zukünftigen Entwicklung des Wasserhaushalts der drei Versuchsstandorte wurden berechnet, indem Modellläufe des Wasserhaushaltsmodells mit den Daten der regionalen Klimamodelle durchgeführt wurden. Dabei wurden die gleichen Eingangsparameter für das Modell benutzt, die auch zur Modellvalidierung verwendet wurden und den Gegebenheiten vor Ort (Geometrie, Hangneigung und Exposition) entsprachen oder aus Messdaten (Bodenfeuchte) abgeleitet wurden.

Auswahl der Gitterbox

Aufgrund der lokalen Orographie und der damit verbundenen hohen kleinräumlichen Niederschlagsvariabilität, die von den dynamischen Klimamodellen nicht reproduziert wird, wurden die Zeitreihen von 9 Gitterboxen verwendet, welche den Bereich der experimentellen Standorte abdecken (eine Box, die die Standorte einschließt, und die acht umgebenden).

2.8 Risikoanalyse der Weinbaugebiete Rheingau und Hessische Bergstraße

Im Gegensatz zu anderen flächenbezogenen geographischen Anwendungen wurde entschieden, die Analyse nicht als kleinräumliches Raster durchzuführen sondern auf der Ebene einzelner Flurstücke, wie sie in Katastern erfasst sind. In der Praxis entsprechen den Flurstücken einzelne Weinbergspartellen, die in der Regel einheitlich bewirtschaftet werden. Mit dieser Skalierung sind nicht nur die Winzer vertraut, die Kommunikation der Ergebnisse wird durch den unmittelbaren vor Ort Bezug deutlich erleichtert und auch praxisbezogene Weiterentwicklungen des Modells, z. B. zur Steuerung von Bewässerungsmaßnahmen, werden vereinfacht.

In der Weinbaukartei, die für die hessischen Weinbaugebiete vom Weinbauamt in Eltville geführt wird, sind zu jedem Flurstück weitere Informationen (z. B. Bewirtschafter, Vermarkter, Pflanzjahr, angepflanzte Rebsorte, Unterlage, Flächengröße, Zeilenbreite) erfasst. Der Raumbezug der Flurstücke ist in digitaler Form als Shapefile (raumbezogene Vektordatei) vorhanden. Die Flurstücke (die Weinbergspartellen) sind darin als Polygone mit räumlichen Koordinaten gespeichert. Die Daten der Flurstücke aus der Weinbaukartei wurden vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie in Zusammenarbeit mit dem Weinbauamt in Eltville mit den Daten aus einem digitalen Höhenmodell (zur

Bestimmung der Hangneigung und Exposition der Flächen) und der Bodenkarte für weinbauliche Nutzflächen (BFD5W; HLNUG, 2008) ergänzt und eindeutig verknüpft.

Die Berechnung des Wasserhaushalts wurde wie folgt durchgeführt:

1. Festlegung der Geometrie (Reihenabstand, Laubwandhöhe und -breite der Weinberge):

Es wurde mit einem einheitlichen Reihenabstand von 200 cm gerechnet. Der Grund dafür ist, dass erst seit dem Jahr 2002 bei der Neuanlage eines Weinbergs der Reihenabstand in nennenswerter Anzahl in der Weinbaukartei erfasst wird. Viele ältere Weinberge haben zwar einen geringeren Reihenabstand, jedoch fehlen hierzu genaue Aufzeichnungen. In den zwölf Jahren von 2002-2013 wurden 938 ha Weinberge neu gepflanzt (26 % der Weinbaufläche Hessens), 771 ha (82 %) davon mit einem Reihenabstand von 180-200 cm. Es ist davon auszugehen, dass auch in Zukunft Reihenabstände von 180-200 cm bei der Neuanlage von Weinbergen dominieren werden, weil sie aus dem Anforderungsmix aus Bewirtschaftung (Mechanisierbarkeit), Ertrag und Qualität einen guten Kompromiss darstellen.

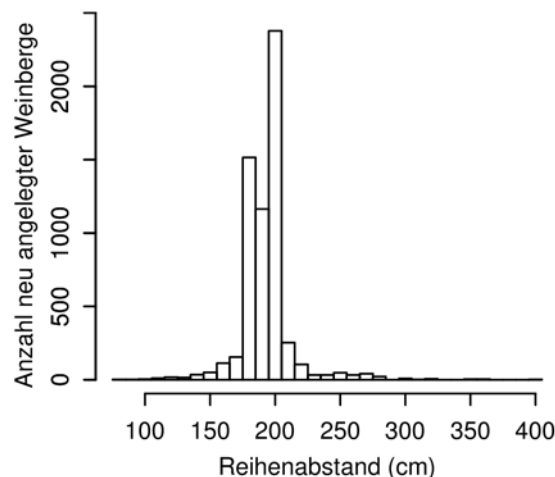


Abbildung 7 Die Anzahl der im Zeitraum von 2002-2013 in Hessen neu angelegten Weinberge, aufgeschlüsselt nach dem Abstand der Reihen (Datenquelle: Weinbauamt Eltville, Regierungspräsidium Darmstadt).

2. Auswahl der Gitterbox der Klimamodelle zur flächenhaften Hochrechnung des Trockenstressrisikos:

Die Klimamodelle liegen als Gitterpunktdaten vor und die Daten der einzelnen Wetterelemente sind als Flächenmittel der zugehörigen Gitterbox aufzufassen. Allein schon aufgrund der begrenzten räumlichen Auflösung, weichen die Klimamodelle mehr oder weniger stark von den entsprechenden Werten stationsbasierter

Beobachtungsdaten ab. Zudem sind die regionalen Klimamodelle auch nur bedingt in der Lage räumliche Muster der Klimaelemente, z. B. des Niederschlags, entsprechend der beobachteten räumlichen Muster wiederzugeben. Klimamodellierer empfehlen daher einige benachbarte Gitterboxen, welche die Region von Interesse abdecken, zu berücksichtigen und dann eine räumliche Mittelung der Resultate des Impact-Modells vorzunehmen. Da die Wasserhaushaltsberechnung auf ortsspezifischen Eigenschaften einzelner Weinbergspartellen beruht, ist eine räumliche Mittelung der Ergebnisse einer Modellrechnung nicht sinnvoll. Aus diesem Grund, und auch um den Aufwand der Analysen in einem vertretbaren Rahmen zu halten, wurde folgendermaßen vorgegangen: Ausgehend von den Weinbergen, welche von einer Gitterbox abgedeckt werden, wurden von den zusätzlichen 8 umgebenden Gitterboxen (also insgesamt 9) der mittlere Jahresniederschlag von 1961-1990 berechnet und mit dem mittleren Jahresniederschlag von 1961-1990 der Stationsdaten verglichen. Die Klimadaten der Box, welche dann für den Niederschlag die kleinste Abweichung zu den Beobachtungsdaten aufwies, wurden für die Hochrechnung des Wasserhaushalts verwendet. Dazu wurden die DWD-Stationen rausgesucht, welche sich in der entsprechenden Box befinden und der Mittelwert über die Stationen gebildet, oder, falls im Gebiet der Box keine Stationsdaten erhoben wurden, die Daten der nächstgelegenen Station verwendet.

3. Einteilung der Weinberge in Klassen, entsprechend der Hangneigung und Exposition: Die potenzielle Evapotranspiration eines Standorts wird auch von der Hangneigung und der Exposition beeinflusst. Nach der Auswahl der Klimazeitreihe kann für die Weinbergspartellen, die in eine bestimmte Neigungs- und Expositions-kategorie fallen, die potenzielle Evapotranspiration berechnet werden.
4. Einteilung der Bodeneigenschaften der Weinberge in Klassen: Zur Berechnung des Wasserhaushalts wurden folgende Daten aus der Bodenkarte (BFD5W) herangezogen. Zur Bestimmung des $TTSW_{cc}$ der Begrünung wurde die nutzbare Feldkapazität (nFK) bis 1 m Bodentiefe und für das $TTSW$ (gesamtes Reservoir) die nFK bis 2 m Bodentiefe verwendet. Das TEW (maximale Wassermenge, die aus der Verdunstungsschicht des offenen Bodens verdunstet kann) kann nach Allen et al. (1998) aus der Differenz des Wassergehalts bei Feldkapazität (FK) und die Hälfte des Wassergehalts beim permanenten Welkepunkt (dem sogenannten „Totwasser“), bezogen auf die oberste Bodenschicht von 0,10-0,15 m, berechnet werden. Die BFD5W enthält dazu Daten zum Rigolhorizont. Zur

Bestimmung der Feldkapazität und des Totwassergehalts wurde die in der „Ableitung der FK für Acker aus dem Klassenzeichen der Bodenschätzung“ (Vorderbrügge, 2006) beschriebene Methode verwendet und das *TEW* für eine Schicht von 0,10 m bestimmt.

5. Festlegung der Form der Bodenbewirtschaftung:

Ob der Boden offen gehalten oder begrünt wird, ist eine Entscheidung des Winzers. Letztlich ist häufig in trockenstressgefährdeten Bereichen eine alternierende Begrünung anzutreffen, die einen Kompromiss aus den positiven Eigenschaften (Humuserhalt, Erosionsschutz) und den negativen Eigenschaften (Wasser Konkurrenz) darstellt, während ganzflächige Begrünungen eher in nicht trockenstressgefährdeten Bereichen vorkommen. Daher wurde die Risikoabschätzung nur unter der Annahme einer alternierenden Begrünung berechnet.

Mit diesen Schritten ist es möglich die Simulation des Wasserhaushalts für die beiden Anbaubereiche in Verbindung mit verschiedenen Klimaprojektionen durchzuführen. Die Ergebnisse wurden den entsprechenden Weinbergspartellen zugeordnet und ausgewertet.

Tabelle 4 Eingangsparameter des Wasserhaushaltsmodells und Herkunft der verwendeten Daten.

Eingangsparameter	Datenherkunft der drei Versuchsf lächen	Datenherkunft für Rheingau und Hessische Bergstraße
Standorteigenschaften		
Reihenabstand	Standortspezifisch	Fester Wert (2,00 m)
Laubwandhöhe	Standortspezifisch	Fester Wert (1,30 m)
Laubwandbreite	Standortspezifisch	Fester Wert (0,40 m)
Stammhöhe	Standortspezifisch	Fester Wert (0,80 m)
Porosität der Laubwand (Minimum)	Standortspezifisch	0,25
Hangneigung	Standortspezifisch	Mittel über die Parzelle, aus Höhenmodell, Einteilung in 7 Klassen
Exposition	Standortspezifisch	Mittel über die Parzelle, aus Höhenmodell, Einteilung Klassen (45° Breite)
Total evaporable water (<i>TEW</i> , offener Boden)	Messdaten	Bodenkarte (BFD5W), Ableitung nach Vorderbrügge (2006); Einteilung in Klassen á 2,5 mm
<i>TTSW</i> (total transpirable soil water) des gesamten Bodenreservoirs	Messdaten	nFK bis 2m Bodentiefe, Bodenkarte (BFD5W), Einteilung in Klassen á 20 mm
<i>TTSW</i> der Begrünung	Messdaten	nFK bis 1 m Bodentiefe, Bodenkarte (BFD5W), Einteilung in Klassen á 20 mm
Flächenanteil des begrün ten Bodens	Standortspezifisch	Festlegung auf alternierende Begrünung
Allgemeine Eigenschaften / Wetterdaten		
Albedo der Blätter	0,22 (Gates, 1980)	0,22
Albedo des Bodens	0,18 (Gates, 1980)	0,18
Beginn Laubfall	Fester Wert (15. Okt)	15. Okt
Ende Laubfall	Fester Wert (29. Okt)	29. Okt
Wetterdaten auf Tageswertbasis (Temperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Niederschlag, Globalstrahlung)	Messdaten, Klimamodelle	Klimamodelle

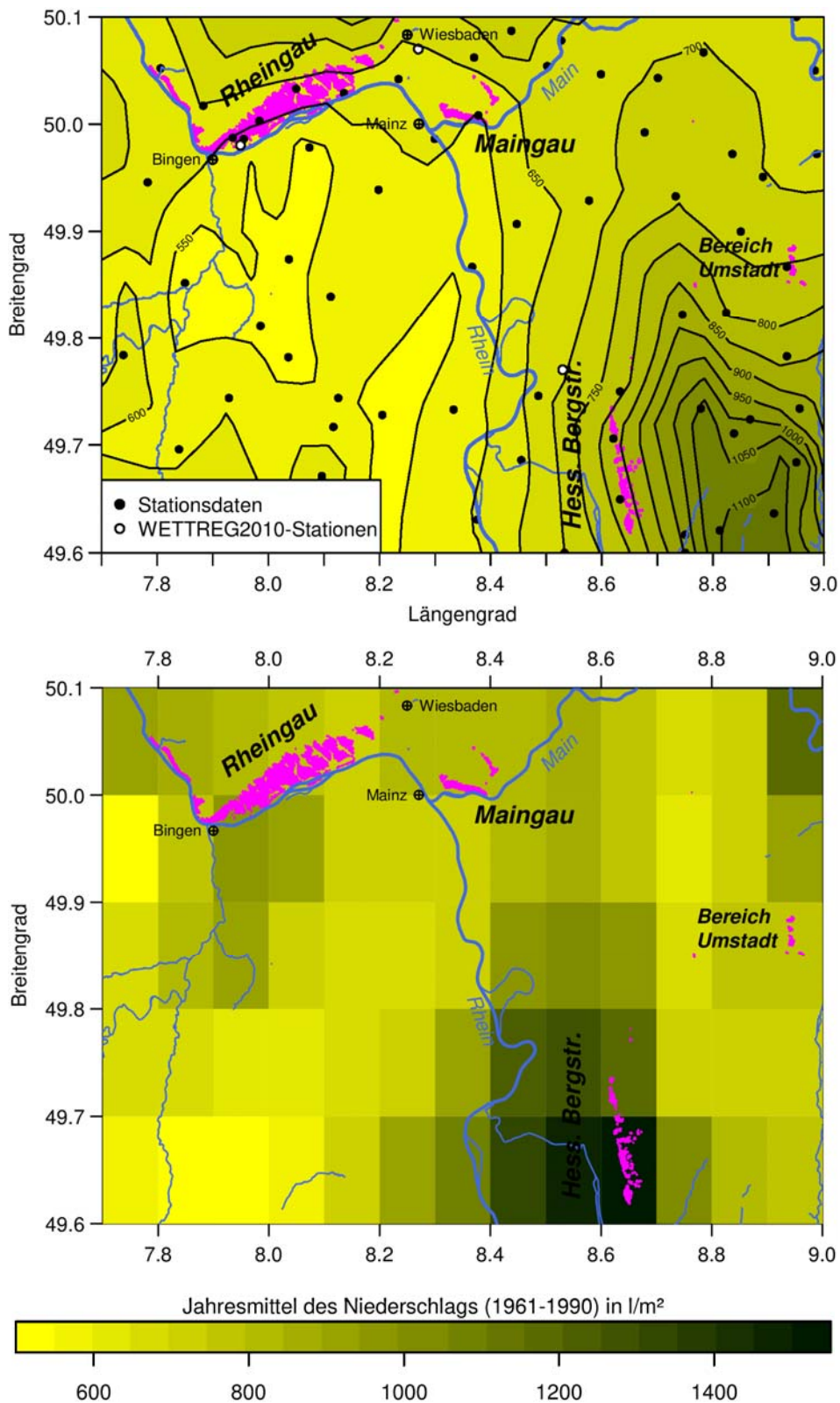


Abbildung 8 Obere Abbildung: Niederschlagsverteilung der Untersuchungsregion auf Basis des langjährigen Mittels (1961-1990) der Stationsdaten des DWD (schwarze Punkte). Die hessischen Weinbauregionen Rheingau (inkl. Maingau) und Hessische Bergstraße (inkl. Bereich Umstadt) sind in magenta dargestellt. Die drei im Projekt verwendeten Stationen des Klimamodells WETTREG2010 sind als weiße Punkte eingezeichnet. Untere Abbildung: Das Niederschlagsmuster des Modells REMO-UBA (Variable „precipitot“, ohne Driftberücksichtigung).

2.8.1 Bewertung des Trockenstressrisikos

Die Ergebnisse der Modellläufe wurden dahingehend untersucht, ob das Risiko für das Auftreten von Trockenstress in Zukunft zunehmen könnte. Die Bewertung ob und wie stark Trockenstress auftritt basiert auf einem Zusammenhang zwischen *FTSW* und dem Pflanzenparameter frühmorgendliches Wasserpotenzial (ψ_{pd}) (Lebon et al., 2003; Pellegrino et al., 2004; Gruber und Schultz, 2005; Schultz und Lebon, 2005). Das frühmorgendliche Wasserpotenzial ψ_{pd} ist ein weitverbreiteter Parameter, um den Wasserversorgungsstatus von Pflanzen zu quantifizieren und steht in Zusammenhang mit vielen physiologischen Reaktionen des vegetativen und generativen Pflanzenwachstums (Williams und Matthews, 1990). Es bietet daher für die Abschätzung zukünftiger Entwicklungen die Möglichkeit, den Wasserstatus der Pflanzen an den des Bodens zu koppeln. Die Beziehung zwischen *FTSW* und ψ_{pd} zeigte sich über einen weiten Bereich unterschiedlicher Wasserspeichervermögen der Böden und für verschiedene Weinberge als stabil. Aus den Daten der obigen Autoren folgt, dass der übliche Schwellenwert für starken Trockenstress von $\psi_{pd} = -0,6$ MPa mit einem Wert für das *FTSW* im Bereich $0 \leq FTSW \leq 0,2$ korrespondiert. Der Schwellenwert für das Einsetzen von starkem Stress wurde auf $FTSW \leq 0,15$ gesetzt, weil es, aufgrund der limitierten Verfügbarkeit und Genauigkeit der Messdaten von Feldexperimenten, nicht möglich ist zu bewerten, ob das Wasserhaushaltsmodell kleine Änderungen in diesem Extrembereich korrekt berechnet. Mit diesem Schwellenwert ist es möglich, die Wasserverfügbarkeit für jeden Tag bezüglich physiologischer Konsequenzen zu klassifizieren, und die Anzahl der Tage im Bereich des starken Trockenstress während der Vegetationsperiode (1. Mai – 30. September) aufzusummieren.

2.9 Messungen zur Validierung des Wasserhaushaltsmodells

2.9.1 Messungen der Bodenfeuchte

Die Messungen der Bodenfeuchte wurden mit einem tragbaren Kapazitätsmesssystem durchgeführt (Diviner 2000, Sentek, Australia), welches durch Änderungen der Dielektrizitätszahl im Boden die Bestimmung des volumetrischen Bodenwassergehalts misst. In jedem Weinberg wurden bis zu einer Tiefe von 1,60 m mindestens sechs Bodenfeuchtemessrohre installiert. Die Messrohre wurden lotrecht positioniert und maßen daher horizontale Äquivalente der Bodenfeuchte. Wegen der teilweise geringen Bodenschicht über dem Festgestein, konnten in den Weinbergen Ehrenfels und Burgweg nicht alle Rohre bis zu einer Tiefe von 1,60 m installiert werden. Das *TTSW* von Ehrenfels und Burgweg

wurde aus der Differenz zwischen maximalem und minimalem Wassergehalt mehrerer Jahre über das gesamte Boden- und Durchwurzelungsprofil bestimmt (Sinclair und Ludlow, 1986). Für den Standort Wilgert wurde das *TTSW* mit zusätzlichen Messungen des frühmorgendlichen Wasserpotenzials und der etablierten Beziehung aus *FTSW* und ψ_{pd} (veröffentlicht von Lebon et al., 2003; Gruber und Schultz, 2005) abgeschätzt, weil ein minimaler Bodenfeuchtegehalt während des Messzeitraums nicht erreicht wurde. Daher ist es auch für diesen Standort zweifelhaft, ob mit der auf 1,60 m Bodentiefe limitierten Messtechnik, die gesamte Durchwurzelungstiefe erfasst wurde. Jedoch ist sicherlich davon auszugehen, dass das Hauptreservoir, von dem die Reben Wasser extrahieren, abgedeckt wurde.

Die Bodenfeuchtemessungen wurden im wöchentlichen Zeitabstand durchgeführt. Nur im Winter wurden 2-4 wöchentliche Messintervalle gewählt, um die Wiederauffüllung der Böden und das Erreichen der Feldkapazität zu erfassen. Zwei zusätzliche Bodenfeuchtemessrohre im Weinberg Ehrenfels wurden mit einer permanenten Messtechnik ausgestattet (Enviroscan, Sentek, Australien), welche die Bodenfeuchte in fünf Messtiefen aufzeichnete, um mehr Information in höherer zeitlicher Auflösung zu erhalten.

2.9.2 Saftflussmessungen

Der Saftfluss wurde in jedem Weinberg von Juni bis zum Ende der Vegetationsperiode an sechs Reben mit selbstgefertigten Granier-Saftflusssensoren gemessen. Dazu werden zwei dünne Nadeln in einem vertikalen Abstand von ca. 15 cm in den Rebstamm eingebracht, von denen die obere mit einer konstanten Leistung beheizt wird. Die Änderung der Temperaturdifferenz zwischen der beheizten und der unbeheizten Nadel dient als Maß für den Saftfluss. Diese Messtechnik wurde von Braun und Schmid (1999) für Reben angepasst und validiert.

2.9.3 Messungen der Porosität

Die Porosität der Laubwand der Reben ist ein wichtiger Parameter, um die Verteilung der Strahlung im Weinberg und folglich dessen Wasserverbrauch zu berechnen. Daher wurde die Porosität der Laubwände in den Jahren 2011 und 2012 wenige Wochen vor der Lese bei voll entwickelter Laubwand bestimmt. Dazu wurden digitale RGB Bilder (jeweils ein Kanal für die Farben rot, grün, und blau) der Laubwände der Weinstöcke aufgenommen (im rechten Winkel zu einer vertikalen Laubwandseite), die auch für die Saftflussmessungen verwendet wurden. Eine weiße Abschirmung diente als Hintergrund der fotografierten Laubwandreihe. Durch die Verwendung chromatischer Koordinaten (Farbwertanteile) (Sonnentag et al., 2012)

und geeigneter Schwellenwerte, die mit Kerndichteschätzern einfach zu ermitteln sind, konnte jeder Pixel des Bildes klassifiziert und damit die Porosität berechnet werden (Abbildung 9). RGB Bilder wurden auch genutzt, um die Gültigkeit der Beziehung zwischen der Porosität und der Wegstrecke der Strahlung in der Laubwand zu überprüfen, die von Gleichung A4 beschrieben wird. Dazu wurde ein Ausschnitt von 70 x 70 cm einer vertikalen Laubwandseite aus einem Abstand von 5 m aus verschiedenen Blickwinkeln entlang eines horizontalen Halbkreises fotografiert, woraus verschiedene Wegstrecken resultierten, die das Licht durch die Laubwand zurücklegen musste.

Für die Bildverarbeitung wurde das R Paket `biOps` (Bordese und Alini, 2012) verwendet.

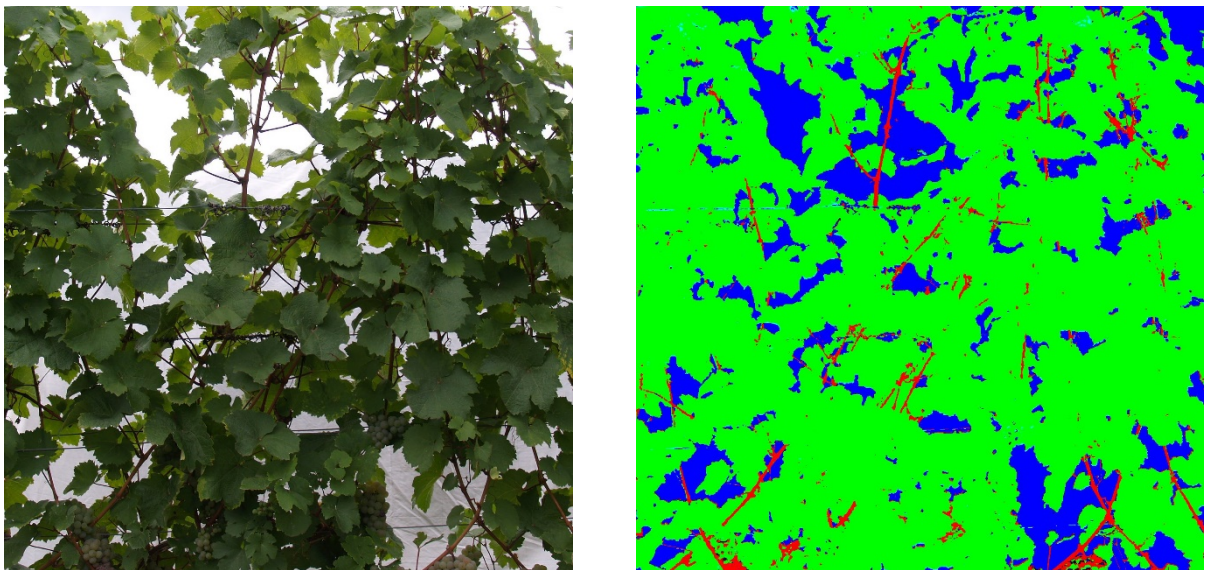


Abbildung 9 Beispiel für eine Bildanalyse zur Bestimmung der Porosität der Laubwand, bei der die Gruppenbildung mit Hilfe chromatischer Koordinaten zur Beschreibung des Farbraums durchgeführt wurde. Die Porosität berechnet man im rechten Bild aus der Summe der blauen Pixel geteilt durch die gesamte Anzahl der Pixel.

3 Ergebnisse

3.1 Strahlungsaufteilung im Weinberg

Ein Vergleich zwischen dem früheren Modell von Riou et al. (1989) und dem neuen Monte-Carlo Ansatz zeigte für eine Porosität von 0,25, welche für durchschnittliche bis wüchsige Wachstumsbedingungen typisch ist, vergleichbare Ergebnisse für die von den Reben absorbierte Strahlung (Abbildung 10A, C). Für Bedingungen mit geringerer Wüchsigkeit (Porosität = 0,5) ist die nach Riou et al. (1989) berechnete absorbierte Strahlung höher als die der Monte-Carlo Simulation (Abbildung 10B, D). Das resultiert sehr wahrscheinlich daher,

dass die horizontalen Flächen im Modell von Riou et al. (1989) opak behandelt werden, wodurch die berechnete von Reben absorbierte Strahlung bei kleinen Verhältnissen des Reihenabstands zur Laubwandbreite künstlich erhöht wird.

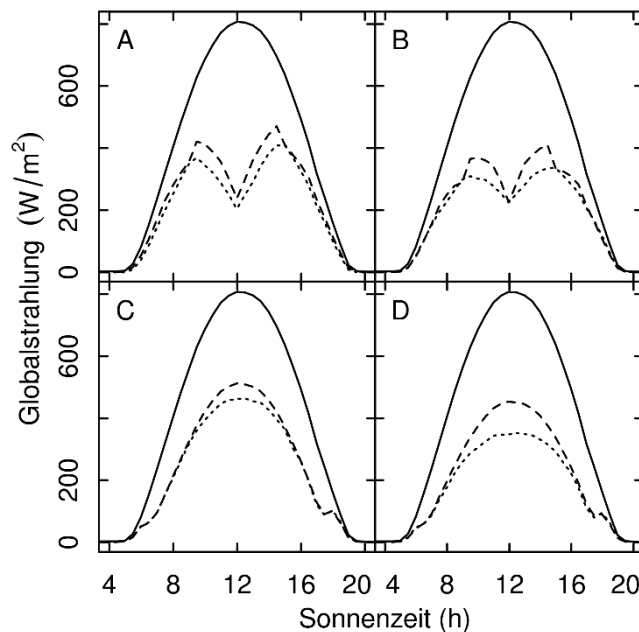


Abbildung 10 Globalstrahlung und die berechnete, von Reben absorbierte, Strahlung für Weinberge (in Reihenstruktur, Reihenabstand 1,60 m, Laubwandbreite 0,40 m, -höhe 1,10 m, 0,80 m über dem Boden) mit unterschiedlicher Porosität und Orientierung der Reihen: Für in Nord-Süd (A, B) und in Ost-West (C, D) Richtung gezeigte Reihen mit einer Porosität der Laubwände von 0,25 (A, C) und 0,5 (B, D). Durchgezogene Linien zeigen den Tagesgang der Globalstrahlung an einem Strahlungstag in Geisenheim (20. August 2011), gestrichelte Linien die im Tagesverlauf berechnete von Reben absorbierte Strahlung nach dem Modell von Riou et al. (1989) und gepunktete Linien die absorbierte Strahlung nach einem Monte-Carlo Modell.

3.2 Messungen der Porosität in Abhängigkeit von der Wegstrecke des Lichts in der Laubwand

Die in Abhängigkeit von der Wegstrecke des Lichts in der Laubwand gemessenen Porositätswerte wurden mit denen nach Gleichung A4 berechneten Werten verglichen (Abbildung 11). Das Ergebnis zeigt, dass die Abnahme der Porosität mit zunehmender Wegstrecke gut mit Gleichung A4 approximiert werden kann. Verbesserungen dieses Ansatzes können eventuell durch die Einbeziehung real gemessener Verteilungen der Blattfläche (Schultz, 1995; Gladstone und Dokoozlian, 2003) oder der inhomogenen Streuung der Blattwinkel, z. B. als Folge unterschiedlicher Erziehungssysteme und Triebpositionierungen, erzielt werden (Poni et al., 1996).

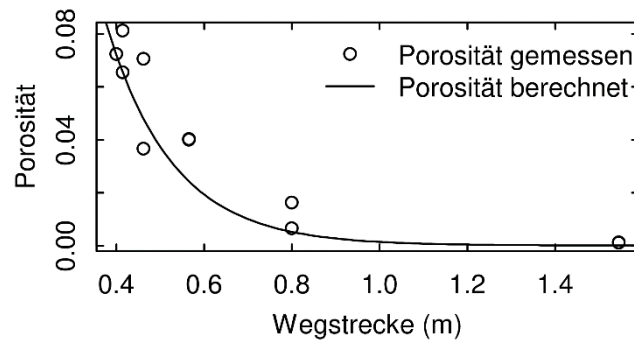


Abbildung 11 Die Porosität einer Rebenlaubwand in Abhängigkeit von der in der Laubwand zurückgelegten Wegstrecke des Lichts.

3.3 Charakteristische Standorteigenschaften

Unterschiede des *TTSW* der Weinberge verursachten auch unterschiedliche gemessene Transpirationsraten der Reben. Die Unterschiede (ausgedrückt als relative Transpiration, $T_{a,v}/T_{0,v}$) waren im Jahr 2012 stärker ausgeprägt als im Jahr 2011 (Abbildung 12). In 2011 war das Verhältnis von $T_{a,v}/T_{0,v}$ am Standort Ehrenfels (niedrigstes *TTSW*) im Vergleich zu Burgweg und Wilgert in der ersten Julihälfte signifikant niedriger (getestet mit einem paarweisen Vergleich ($p < 0,1$) einer Varianzanalyse der relativen Transpiration von sechs Reben pro Standort für jeden Tag). Das lag sehr wahrscheinlich an einer kurzen Periode mit geringen Niederschlägen Ende Juni 2011 und der Abnahme der Bodenfeuchte (Abbildung 15 A-D). Hohe Niederschläge in August und September 2011 führten zu einem Anstieg der Bodenfeuchte in allen Weinbergen und einer Erholung der relativen Transpirationsraten von Ehrenfels und Burgweg (Abbildung 12). Während dieser Phase waren die Mittelwerte von $T_{a,v}/T_{0,v}$ für den Weinberg Wilgert zwar niedriger aber signifikante Unterschiede zwischen den Standorten traten nur an wenigen Tagen auf. Im Jahr 2012 war $T_{a,v}/T_{0,v}$ des Burgwegs in der ersten Julihälfte signifikant höher als von Ehrenfels und Wilgert (Abbildung 12B). Danach nahm $T_{a,v}/T_{0,v}$ zuerst am Standort Ehrenfels gefolgt vom Burgweg ab, wahrscheinlich aufgrund der Abnahme der Bodenfeuchte in beiden Weinbergen (Abbildung 15). Im Wilgert (hohes *TTSW*) blieb das Verhältnis während beider Vegetationsperioden nahezu konstant und war während des Augusts und Septembers 2012 auch signifikant höher als in Ehrenfels und Burgweg, mit Ausnahme kurzfristiger Erholungen der relativen Transpiration, die durch zwischenzeitliche Niederschläge verursacht wurden.

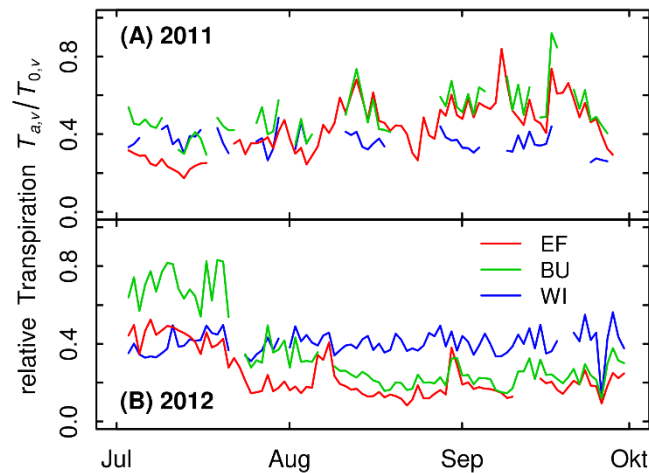


Abbildung 12 Der Verlauf des Verhältnisses von gemessener aktueller Transpiration der Reben (Saftflussmessungen) zur berechneten potenziellen Transpiration für drei Weinberge (EF, BU, WI) mit unterschiedlicher Wasserspeicherfähigkeit während der Jahre 2011 (A) und 2012 (B).

3.4 Evaluation von Modellparametern

3.4.1 Der rebenspezifische Transpirationskoeffizient $k_{c,v}$

Wenn der Bodenwassergehalt die Transpiration nicht reduziert ($k_s = 1$), ist der Transpirationskoeffizient $k_{c,v}$ von Gleichung 8 gleich dem Verhältnis aus aktueller zu potenzieller Transpiration der Reben ($T_{a,v}/T_{0,v}$). Die Einführung des rebenspezifischen Transpirationskoeffizienten $k_{c,v}$ wurde notwendig, weil die gemessene aktuelle Transpiration immer deutlich niedriger als die berechnete potenzielle Transpiration war, obwohl vorhergehende Versionen des Wasserhaushaltsmodells die Dynamik der Bodenfeuchte adäquat beschrieben haben (Lebon et al., 2003; Pellegrino et al., 2005). Allerdings wurden die individuellen Modellkomponenten (Rebentranspiration und Evapotranspiration des Bodens) bisher noch nicht überprüft. Daher wurden die $k_{c,v}$ Werte für jeden der drei Weinberge bestimmt, indem die Mittelwerte der täglichen Verhältnisse $T_{a,v}/T_{0,v}$ unter Bedingungen ohne Trockenstress ($FTSW > 0,4$) der Jahre 2011 und 2012 berechnet wurden. Im Modell wurde dann der Mittelwert der drei standortspezifischen $k_{c,v}$ Werte verwendet (Tabelle 5).

Tabelle 5 Verhältnisse von aktueller zu potenzieller Transpiration der Reben für drei Weinberge während Phasen mit guter Wasserversorgung. Fehlerwerte sind Mittelwerte der Konfidenzintervalle ($p < 0,05$) von täglichen Saftflusswerten von sechs Reben pro Weinberg.

Weinberg	$k_{c,v}$
EF (Ehrenfels)	$0,50 \pm 0,12$
BU (Burgweg)	$0,56 \pm 0,27$
WI (Wilgert)	$0,41 \pm 0,21$
Mittelwert	$0,49 \pm 0,18$

3.4.2 Einfluss der Wasserverfügbarkeit auf die Transpiration der Reben

Die Saftfluss- und Bodenfeuchtedaten wurden herangezogen, um zu validieren ob 1) die Abhängigkeit der relativen Transpiration $T_{a,v}/T_{0,v}$ von der Wasserverfügbarkeit ($FTSW$) mit der bilinearen Gleichung 9 beschrieben werden kann und ob 2) der Schwellenwert $p_{FTSW} = 0,4$ (Lebon et al., 2003), der zwischen den die Transpiration limitierenden und nicht limitierenden Bedingungen der Wasserversorgung differenziert, die Situation der Versuchsstandorte zutreffend wiedergibt. Um zusätzliche $FTSW$ Daten, die wöchentlich gemessen wurden, verwenden zu können, wurden Daten für jeden Tag durch lineare Interpolation zwischen aufeinander folgenden Messungen bestimmt. Die Abbildung 13 zeigt das Verhältnis der aktuellen zur potenziellen Transpiration der Reben $T_{a,v}/T_{0,v}$ als Funktion von $FTSW$ für die drei Versuchsweinberge. Aus Gleichung 8 folgt, dass das Verhältnis von $T_{a,v}/T_{0,v}$ gleich dem Produkt des rebenspezifischen Transpirationskoeffizienten $k_{c,v}$ und dem Wasserstresskoeffizienten k_s ist. Da $k_{c,v}$ konstant ist (Tabelle 5), kennzeichnet eine Abweichung von diesem Wert das Einsetzen von Wassermangel, der durch eine Abnahme von k_s auf Werte < 1 verursacht wird. Der Wert für $FTSW$, bei dem dies feststellbar ist, markiert den Schwellenwert p_{FTSW} . Der Schwellenwert wurde von den $FTSW$ Werten anhand des Bereichs abgeschätzt, an dem $T_{a,v}/T_{0,v}$ unter den unteren Bereich des Konfidenzintervalls von $k_{c,v}$ fällt, und damit das Einsetzen von Wassermangel anzeigt. Abbildung 13 zeigt, dass für alle der drei Versuchsstandorte ein Wert von $p_{FTSW} = 0,4$ nachvollziehbar den Punkt wiedergibt, an dem die Abweichung feststellbar ist und damit den Ansatz von Lebon et al. (2003) (bestimmt durch Messungen der stomatären Leitfähigkeit) mit Saftflussdaten bestätigt.

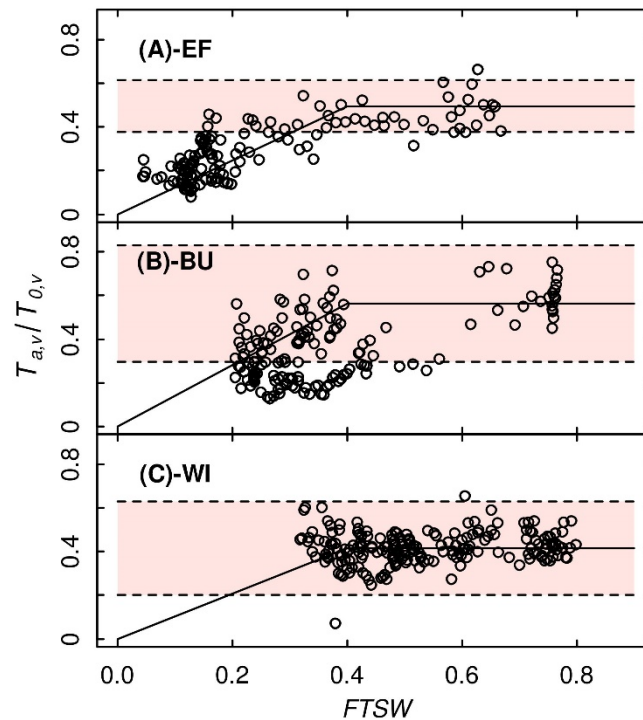


Abbildung 13 Das Verhältnis von aktueller (bestimmt durch Saftflussmessungen) zu potenzieller Transpiration der Reben $T_{a,v}/T_{0,v}$ in Abhängigkeit vom relativen Gehalt transpirierbaren Wassers ($FTSW$) für drei Weinberge. Der farbige Hintergrund beschreibt die Konfidenzintervalle von $T_{a,v}/T_{0,v}$, in denen kein limitierender Einfluss der Wasserversorgung auf die Transpiration feststellbar ist. Der Schwellenwert von 0,4 wurde durch den Punkt abgeschätzt, an dem das Verhältnis von $T_{a,v}/T_{0,v}$ mit abnehmendem $FTSW$ unter die untere Grenze des Konfidenzintervalls sinkt.

3.5 Einfluss von Hangneigung und Exposition auf die potenzielle Evapotranspiration

Für einen um 30° nach Süden geneigten Standort steigt die potenzielle Evapotranspiration um ca. 25 % (+212 mm) an (Tabelle 6). Die Zunahme hat zwei Ursachen, zum einen steigt pro Flächeneinheit die solare Einstrahlung, zum anderen wird durch die Neigung gegenüber der Horizontalen die Wasser verdunstende Oberfläche größer. Steillagenstandorte unterliegen daher unabhängig von den Bodeneigenschaften einer höheren Anfälligkeit für Wassermangel. Im Jahresverlauf hat die tägliche Differenz der ET_0 zwei Maxima (Abbildung 14), einmal gegen Anfang April und einmal gegen Mitte September. In trockenen Frühjahren kann dadurch eine Begrünung auf flachgründigen Standorten schon einen großen Teil der im Winter gespeicherten Bodenwasservorräte aufbrauchen, wie man auch an Abbildung 3A erkennen kann.

Tabelle 6 Berechnung der Jahressumme des horizontalen Äquivalents der potenziellen Evapotranspiration (ET_0), für unterschiedliche Neigungs- und Expositionswinkel für das Jahr 2012 (Wetterstation Geisenheim, DWD).

Exposition Hangneigung	ET_0 (mm/Jahr)				
	S	SW/SO	W/E	NW/NO	N
0° (0%)	800	800	800	800	800
5° (9%)	823	818	802	786	779
10° (17%)	850	840	811	777	762
15° (25%)	882	868	825	771	748
20° (33%)	919	902	846	771	737
25° (41%)	961	942	874	776	731
30° (48%)	1012	991	910	789	729

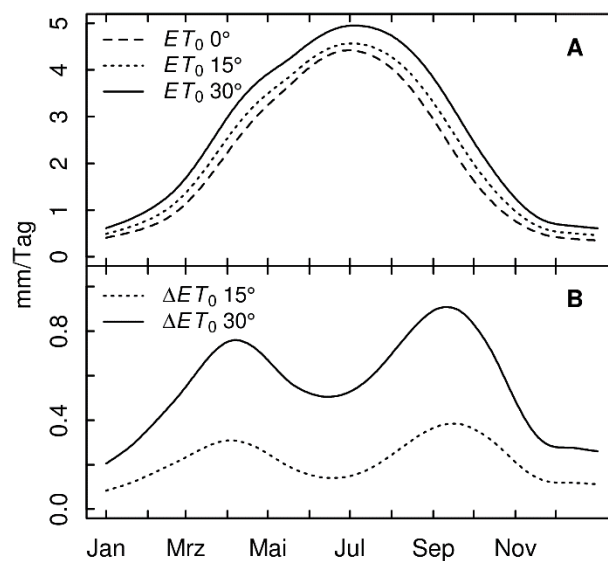


Abbildung 14 (A) Tagesmittel der potenziellen Evapotranspiration ET_0 (horizontales Äquivalent, basierend auf Daten der Wetterstation Geisenheim von 2000-2013) für eine horizontale Fläche und zwei um 15° und 30° geneigte Flächen. (B) Die tägliche Differenz der ET_0 der beiden geneigten Flächen zur horizontalen Fläche.

3.6 Validierung des Wasserhaushaltsmodells

3.6.1 Simulation des Wasserhaushalts

Ein Vergleich der Simulationsrechnungen des Wasserhaushaltsmodells mit der gemessenen Bodenfeuchte zeigt, dass das Modell die Dynamik des Wasserhaushalts der drei Versuchsstandorte sehr gut reproduzieren kann (Abbildung 15). Aufgrund des niedrigen $TTSW$ des Weinbergs Ehrenfels verursachten Niederschläge dort stärkere Änderungen des $FTSW$ im Vergleich zu Burgweg und Wilgert. Diese Dynamik wird auch von einem kontinuierlich messenden Bodenfeuchtemessrohr am Standort Ehrenfels beschrieben. Das verdeutlicht, dass das Modell bis auf wenige Ausnahmen am Standort Wilgert, wo das $FTSW$

in beiden Jahren im Frühjahr leicht unterschätzt wird, auch kurzfristige Änderungen des Wasserhaushalts korrekt beschreibt. Unterschiedliche Phasen der Wasserdynamik, wie die Wiederauffüllung im Winter oder der Übergang der Evaporation zur Evapotranspiration im Frühjahr, werden in guter Übereinstimmung mit den Messdaten modelliert. Das belegt, dass das Modell in der Lage ist, den Einfluss unterschiedlicher Standortfaktoren auf den Wasserhaushalt (Wasserspeicherfähigkeit, Bodenbewirtschaftung, Hangneigung, Exposition), die physiologischen Reaktionen von Begrünungspflanzen und Reben auf Wassermangel und Änderungen der Evapotranspiration, die durch den Vegetationszyklus von Reben und Begrünungspflanzen bedingt sind, zu erfassen.

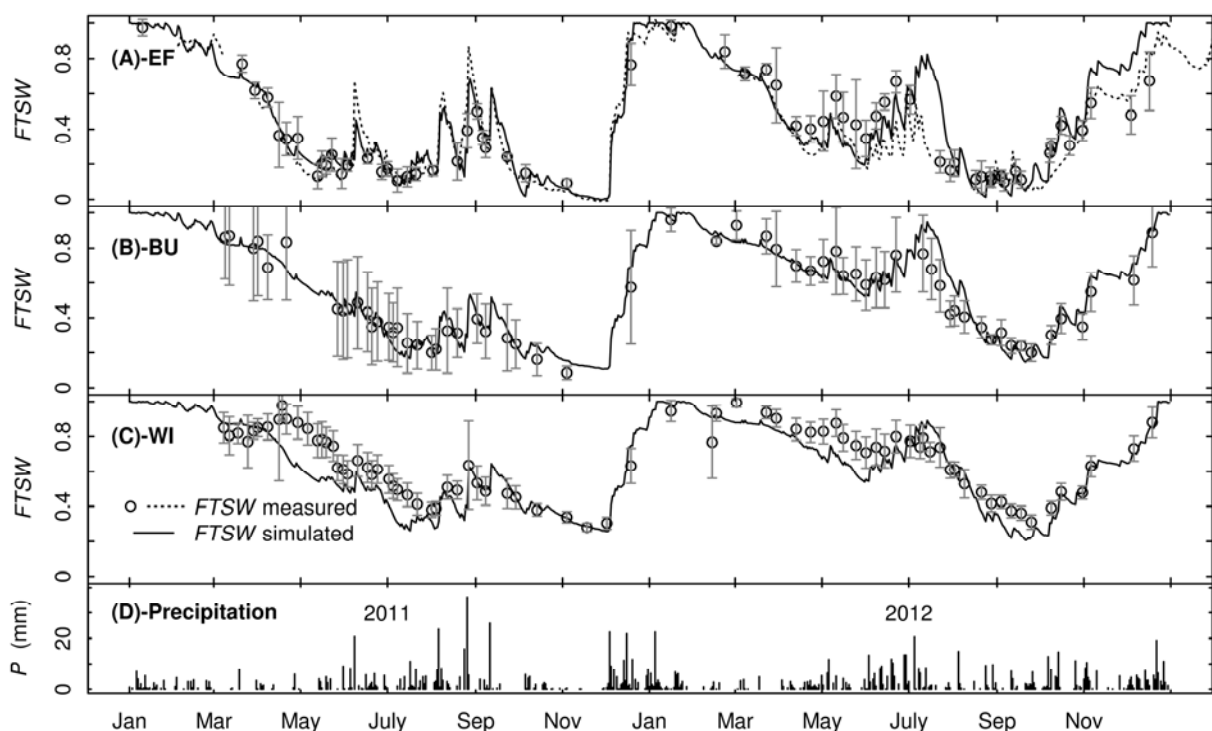


Abbildung 15 Jahresverläufe des Niederschlags (D) und des relativen Gehalts an transpirierbarem Wasser (*FTSW*, A-C) von drei Versuchsstandorten für die Jahre 2011 und 2012. Durchgezogene Linien zeigen das simulierte *FTSW*, Kreise (Mittelwerte von mindestens fünf Messrohren pro Weinberg, Fehlerbalken zeigen das Konfidenzintervall, $p < 0,05$) und die gepunktete Linie (ein Messrohr am Standort Ehrenfels) das gemessene *FTSW*.

3.6.2 Simulation der Transpiration der Reben

Die in Abbildung 16 dargestellten berechneten Saftflusswerte basieren auf den Ergebnissen der Modellläufe, die mit dem einheitlichen Transpirationskoeffizienten von $k_{c,v} = 0,49$ durchgeführt wurden (Tabelle 5). Der Vergleich der simulierten und der gemessenen Transpiration der Reben zeigt, dass das Modell größtenteils in der Lage ist den Saftfluss im Bereich der gemessenen Konfidenzintervalle zu reproduzieren. Deutliche Abweichungen

zeigen sich für den Burgweg im Jahr 2012. Hier liegen die im Zeitraum der Überschätzung von Mitte Juli bis Ende August 2012 simulierten Transpirationsraten in der Summe um 21 mm über den Messdaten. Das zeigt sich auch in den simulierten Bodenfeuchtwerten (Abbildung 15B) durch einen stärkeren Abfall der simulierten gegenüber der gemessenen Bodenfeuchte, die aber noch im Bereich der Konfidenzintervalle liegt. Die Auswirkungen von Abweichungen der Simulation der Transpiration auf die berechnete Bodenfeuchte, werden größer, je höher der Anteil der Transpiration an der Gesamttranspiration ist. Aufgrund der engen Reihen und der zum Teil offenen Bodenbewirtschaftung ist dieser Anteil beim Burgweg relativ groß (Tabelle 7). Daraus kann man schließen, dass Abweichungen der Saftflussmessungen in der Größenordnung, wie sie beim Burgweg im Jahr 2012 berechnet werden, insgesamt noch toleriert werden können. Die fast durchgängige leichte Überschätzung der Transpiration beim Standort Wilgert, kann auch damit erklärt werden, dass der in der Simulationsrechnung verwendete Transpirationskoeffizient etwas größer als der standortspezifische Transpirationskoeffizient ist. Bei den anderen Standorten ist im Gegensatz zum Wilgert auch der Einfluss von Wassermangel auf die Transpiration bemerkbar (Abbildung 12, Abbildung 16), der aber bis auf den Standort Burgweg im Jahr 2012 gut wiedergegeben wird.

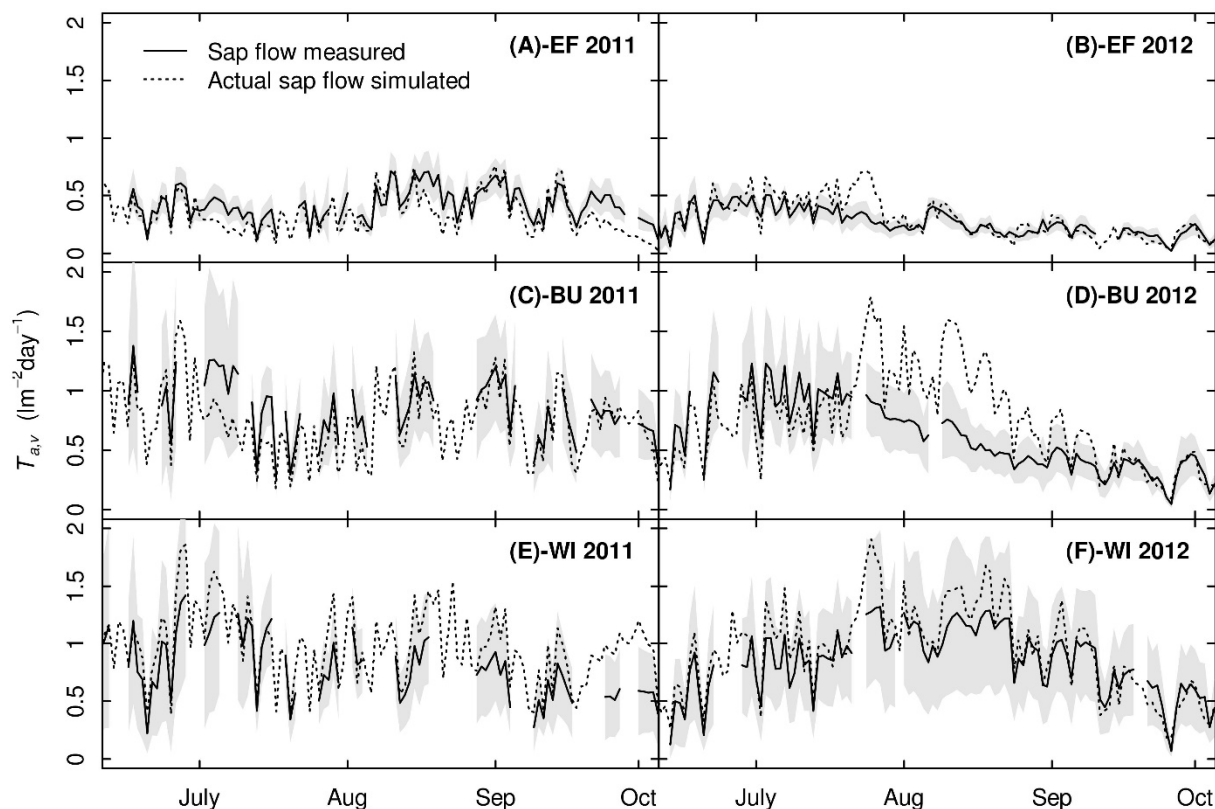


Abbildung 16 Jahresverläufe der aktuellen Transpiration der Reben für drei verschiedene Weinberge für die Jahre 2011 und 2012. Durchgezogene Linien zeigen die gemessene Transpiration (Saftflussdaten von sechs Reben pro Weinberg), graue Flächen das Konfidenzintervall ($p < 0,05$) und die gepunktete Linien die simulierte Transpiration der Reben.

Tabelle 7 Vergleich von aktueller Evapotranspiration und Transpiration der Reben (Messdaten) und potenzieller Evapotranspiration für drei Weinberge in den Jahren 2011 (Juli-September) und 2012 (Juni-September). Die aktuelle Evapotranspiration resultiert aus Messungen des Niederschlags und der Bodenfeuchte, die Transpiration der Rebe aus Saftflussmessungen.

Jahr	Standort	ET_a (mm/Tag)	ET_0 (mm/Tag)	$T_{a,v}$ (mm/Tag)	$T_{a,v}/ET_a$
2011	EF	2,49	4,07	0,53	21 %
2012	EF	2,23	4,56	0,35	16 %
2011	BU	2,40	3,70	0,90	38 %
2012	BU	2,37	3,98	0,71	30 %
2011	WI	2,63	3,47	0,80	31 %
2012	WI	2,56	3,83	0,88	35 %

3.7 Vergleich verschiedener berechneter Wasserflüsse

Ein Vergleich der simulierten Wasserflüsse der Versuchsstandorte für das Jahr 2012 zeigte die Auswirkungen unterschiedlicher Reihenabstände und Bodenbewirtschaftung (Tabelle 1) auf den Wasserhaushalt. Der Anteil des Wasserverbrauchs der Reben an der aktuellen Evapotranspiration der Weinberge war während der Phase vollentwickelter Laubwände 18 %

für Ehrenfels (2,50 m Reihenabstand), 38 % für Burgweg und 45 % für Wilgert (jeweils 1,60 m Reihenabstand). Die relative Evapotranspiration (das Verhältnis ET_a/ET_0) war maximal während der Wintermonate aufgrund feuchter Böden und feuchten Wetters, nahm aber im Februar in allen Weinbergen rapide ab. Die Absolutwerte für die Evapotranspiration des begrünten Bodens im Weinberg Wilgert lag im Bereich 1-4 mm/Tag nachdem sich die Begrünung im Frühjahr erholt hat und von Juni bis Ende August bei 1-2 mm/Tag in Verbindung mit voll entwickelten Laubwänden der Reben und hohen ET_0 Werten. Die Werte für Ehrenfels waren während dieser Phase aufgrund des weiten Reihenabstands etwas höher (0,5-3 mm/Tag). Die Evaporation des offenen Bodens war über das Jahr gesehen der größte Wasserverlustprozess für den Standort Burgweg.

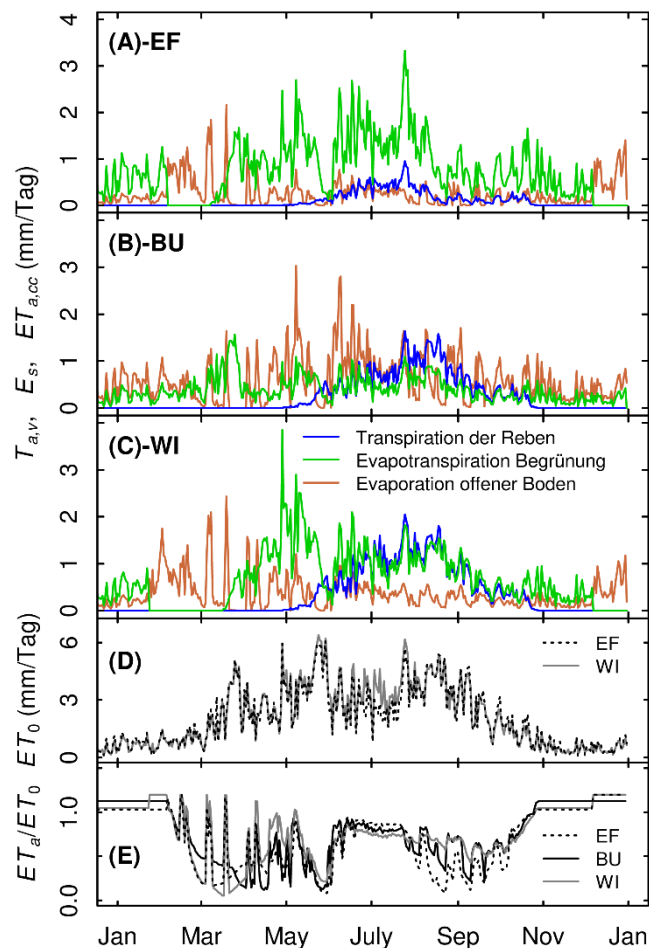


Abbildung 17 Simulationsbeispiel für die Transpiration der Reben, die Evapotranspiration der Begrünung und Evaporation des offenen Bodens für drei Weinberge für das Jahr 2012 (A-C). Die Entwicklung der Begrünungspflanzen ist in Wachstumsphasen eingeteilt. Es wird angenommen, dass die Begrünungspflanzen bei mäßigem Frost erfrieren und während des Frühjahrs wieder auflaufen.

3.8 Abschätzung des Einflusses des Klimawandels auf den Wasserhaushalt für drei Versuchsstandorte

Modellläufe mit den Originaldaten zeigen, dass die Anzahl der Tage mit Trockenstress zwischen dem 1. Mai und dem 30. September (152 Tage) für die Standorte Ehrenfels und Burgweg signifikant (Mann-Kendall Trend Test; McLeod, 2013) zugenommen hat. Für den Wilgert (gute Wasserversorgung) ist kein signifikanter Trend nachweisbar. In 69 % der Jahre von 1955-2012 trat kein einziger Tag mit Trockenstress ($FTSW < 0,15$) auf. 17 % der Jahre hatten mehr als 20 Tage mit Trockenstress. Bei den Projektionen für das Auftreten von Trockenstress in der Zukunft, wird der mit Abstand stärkste Anstieg von WETTREG2010 projiziert. Das Modell stellt zehn Modellläufe zur Verfügung, die alle in Abbildung 18 dargestellt sind. Im Gegensatz zu den anderen Modellen projiziert WETTREG2010 nicht nur einen Anstieg der Temperatur und eine Abnahme der Niederschläge, sondern auch eine starke Zunahme der Globalstrahlung, was dazu führen würde, dass in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts heiße und trockene Wetterbedingungen vorherrschen. Lange Trockenperioden, deren Dauer an die Länge der untersuchten Vegetationsperiode von 152 Tagen heranreicht, könnten häufiger auftreten. Für die dynamischen Modelle werden die Ergebnisse der Zeitreihe der jeweils neun Gitterboxen gezeigt, deren langjähriges Niederschlagsmittel (1971-2000) die geringste Differenz zu den Beobachtungsdaten aufweist. Alle Modelle zeigen einen signifikanten Anstieg der Tage mit Trockenstress nach dem Mann-Kendall Trend Test.

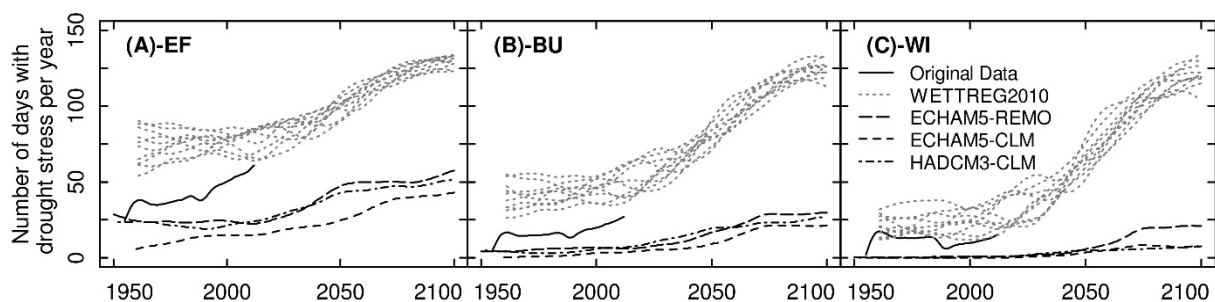


Abbildung 18 Anzahl der Trockenstresstage pro Jahr für drei Weinberge mit unterschiedlicher Wasserspeicherfähigkeit der Böden, berechnet mit einem Wasserhaushaltsmodell, Originaldaten und den Projektionen regionaler Klimamodelle. Die Linien zeigen 30-jährige gleitende Mittel (geglättet).

Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass die Modelle nicht in der Lage sind die Anzahl der Trockenstresstage aus dem Beobachtungszeitraum (1955-2010) zu reproduzieren. Daraus folgt, dass die berechneten Absolutwerte der Trockenstresstage nicht aussagekräftig sind. Eine Möglichkeit zur Datenanalyse besteht darin, modellspezifische Änderungssignale zu bewerten (Kreienkamp et al., 2012), indem die Ergebnisse zukünftiger 30-jähriger Zeiträume

mit denen aus dem 20. Jh. (z. B. von 1971-2000) des Klimamodells verglichen werden. Kreienkamp et al. (2012) empfehlen die Änderungssignale als signifikant zu bezeichnen, wenn sie größer sind als die Standardabweichung der Größe des Vergleichszeitraums aus dem 20. Jahrhundert. Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse für die in Abbildung 18 berechneten Trockenstresstage. Die Zunahme der Trockenstresstage ist unter den dynamischen Modellen vergleichbar. Mit zunehmender Anfälligkeit für Wassermangel (geringerem Wasserspeichervermögen), fällt die Zunahme etwas stärker aus. Der Anstieg ist gegen Ende des Jahrhunderts für die meisten Modelle und die Standorte Ehrenfels und Burgweg weniger ausgeprägt und stärker in der ersten Hälfte des Jahrhunderts (siehe auch Abbildung 18). Für die nahe Zukunft (2011-2040) zeigen die dynamischen Modelle eine sehr moderate Zunahme der Trockenstresstage. Das Modell WETTREG2010 verhält sich etwas anders. Zum einen projizieren einzelne Modellläufe auch eine sehr geringfügige Abnahme der Trockenstresstage für die nahe Zukunft, zum andern wirkt sich diese relativ trockene Klimaprojektion auf den Standort mit guter Wasserspeicherfähigkeit (Wilgert) stärker aus als auf die ohnehin schon trockeneren Standorte Ehrenfels und Burgweg.

Tabelle 8 Änderungssignale bezüglich der projizierten jährlichen Summe der Trockenstresstage (Apr.-Sep.) von vier regionalen Klimamodellen, berechnet mit einem Wasserhaushaltsmodell für drei Weinberge. Signifikante Änderungssignale (die Differenz ist größer als die modellspezifische Standardabweichung der Trockenstresstage von 1971-2000) sind in kursiv gedruckt. Für das WETTREG2010 Modell sind in Klammern je das kleinste und größte Änderungssignal der 10 Läufe dargestellt.

Weinberg	RCM	2011-2040 minus 1971-2000	2041-2070 minus 1971-2000	2071-2100 minus 1971-2000
EF	REMO-UBA_U	2	24	24
EF	EH-CLM_U	4	14	27
EF	HADCM3-CLM_U	10	19	24
EF	WETTREG2010	9 (-2; 20)	25 (9; 38)	42 (34; 53)
BU	REMO-UBA_U	2	18	25
BU	EH-CLM_U	6	14	26
BU	HADCM3-CLM_U	6	20	26
BU	WETTREG2010	15 (-3; 30)	41 (22; 59)	68 (57; 80)
WI	REMO-UBA_U	3	14	26
WI	EH-CLM_U	5	10	21
WI	HADCM3-CLM_U	6	16	21
WI	WETTREG2010	17 (-1; 33)	50 (29; 78)	83 (66; 96)

3.9 Abschätzung der Modellsensitivität

Die Analyse der Änderungssignale bietet auch eine Möglichkeit zu bewerten, inwieweit sich der Bias der Klimamodelle auf den Indikator (Anzahl der Trockenstresstage) auswirkt. Dazu

wurden die Niederschläge des Modell EH-CLM_U mit verschiedenen Faktoren multipliziert und mit den so veränderten Zeitreihen die Änderung der Trockenstresstage berechnet. Die Zeitreihen enthalten daher in gewisser Weise noch die Signale des projizierten Klimawandels, auch wenn natürlich die physikalische Konsistenz der Modelldaten nicht mehr gegeben ist. Die projizierten Absolutwerte der Trockenstresstage unterscheiden sich dementsprechend sehr deutlich voneinander (Abbildung 19). Die modellspezifischen Änderungssignale sind jedoch deutlich robuster (Tabelle 9), so dass man davon ausgehen kann, dass die Modelle durchaus in der Lage sein können den Klimawandel zu projizieren, auch wenn die Rekonstruktionen der Vergangenheit von Beobachtungsdaten abweichen.

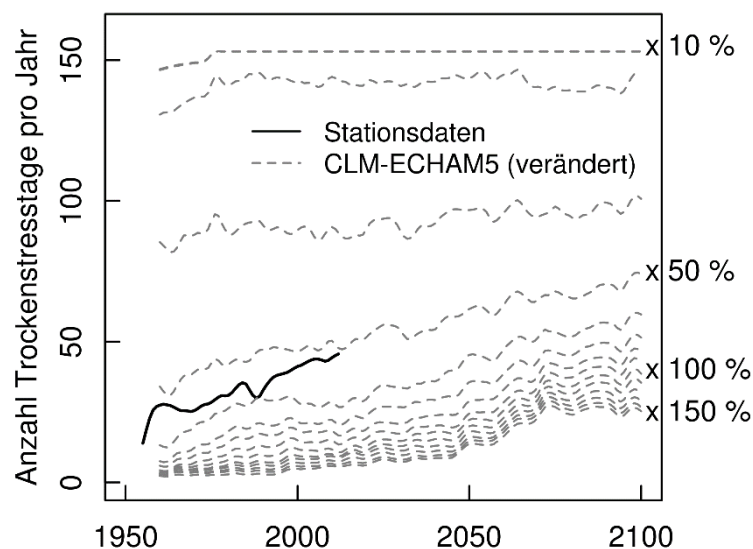


Abbildung 19 Anzahl der Trockenstresstage (30-jährige gleitende Mittel) für den Standort Burgweg, berechnet mit dem Klimamodell EH-CLM_U, wobei die Niederschläge um den Faktor 10 bis 150 % verändert wurden.

Tabelle 9 Die Änderung der Trockenstresstage berechnet mit dem Modell EH-CLM_U für den Standort Burgweg, wobei der Niederschlag mit Faktoren von 50 bis 150 % multipliziert wurde.

Niederschlagsfaktor	2011-2040	2041-2070	2071-2100
	minus 1971-2000	minus 1971-2000	minus 1971-2000
150 %	6	11	23
140 %	6	11	23
130 %	6	12	24
120 %	7	13	25
110 %	7	14	27
100 %	7	14	28
90 %	7	14	28
80 %	6	15	28
70 %	8	17	29
60 %	8	17	27
50 %	14	18	24

3.10 Hochrechnung des Wasserhaushalts für den Rheingau und die Hessische Bergstraße

Die folgenden Abbildungen zeigen die Vergleiche der modellspezifischen Änderungssignale für die Modelle in Tabelle 3. Die Berechnungen wurden unter der Annahme einer alternierenden Begrünung (eine Gasse offen, eine Gasse begrünt) durchgeführt, welche weit verbreitet ist und einen Kompromiss aus den positiven Eigenschaften (Humuserhalt, Erosionsschutz, Biodiversität, gleichmäßige Nährstoffkonkurrenz, Befahrbarkeit der Gassen) und den negativen Eigenschaften (Wasserkonkurrenz) einer Begrünung darstellt. Dazu wurden jeweils die 30-jährigen Mittelwerte der Trockenstresstage pro Jahr der zukünftigen Zeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 mit dem Zeitraum 1971-2000 verglichen und eine Zunahme von Trockenstresstagen in parzellengerauer Auflösung dargestellt. Die Zunahmen wurden in fünf Klassen à 7 Tage eingeteilt, womit sich eine gesamte Bandbreite von 0-35 Trockenstresstagen ergibt. Für das Modell WETTREG2010 wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit die oberste Klasse (28-35 Tage) nach oben offen gehalten, weil die Änderungssignale deutlich über denen der dynamischen Modelle lagen. Für die nahe Zukunft (2011-2040) projizieren die Modelle HadCM3-CLM_U und EH-CLM_U eine Zunahme in der Klasse 7 bis 14 Tage im Steillagenbereich bei Rüdesheim im östlichen Rheingau (etwa 7,9° O / 49,98° N). Weiter werden vereinzelte Parzellen in den Gemarkungen Rauenthal und Martinsthal (etwa 8,1° O / 50,04° N), in denen auch einige steilere Bereiche vorkommen, in dieser Klasse eingeteilt. REMO-UBA zeigt eine Zunahme von 7-14 Tagen für einige Parzellen bei Assmannshausen. Für die Hessische Bergstraße und den Zeitraum 2011-2014 zeigt REMO-UBA_U für keine Fläche einen Anstieg der Trockenstresstage um mehr als 7 Tage an, HadCM3-CLM_U und EH-CLM_U für einige vereinzelte Parzellen mit einer leichten Konzentration bei Bensheim-Auerbach (8,64° O / 49,69° N). Im Zeitraum 2041-2070 und 2071-2100 treten die Gebiete, die von einer Zunahme des Trockenstressrisikos betroffen sein könnten, deutlicher hervor. Es sind dies im Rheingau die Steillagenbereiche bei Rüdesheim und Assmannshausen, einige Parzellen um das Schloss Johannisberg (7,98° O / 50,0° N) und ein Teil der Flächen in den Gemarkungen Rauenthal und Martinsthal. Für weite Teile des Rheingaus wird aufgrund der im Allgemeinen guten Wasserspeicherfähigkeit der Böden keine Zunahme des Trockenstressrisikos projiziert. Aber auch an der Hessischen Bergstraße könnten neben einigen vereinzelten Parzellen die Weinberge bei Bensheim-Auerbach von einer Zunahme des Trockenstressrisikos betroffen sein, da sich hier einige Weinberge befinden, die nur geringe nutzbare Feldkapazitäten aufweisen. Die Bias-korrigierten Versionen der Klimamodelle zeigen eine leicht stärkere Zunahme gegenüber

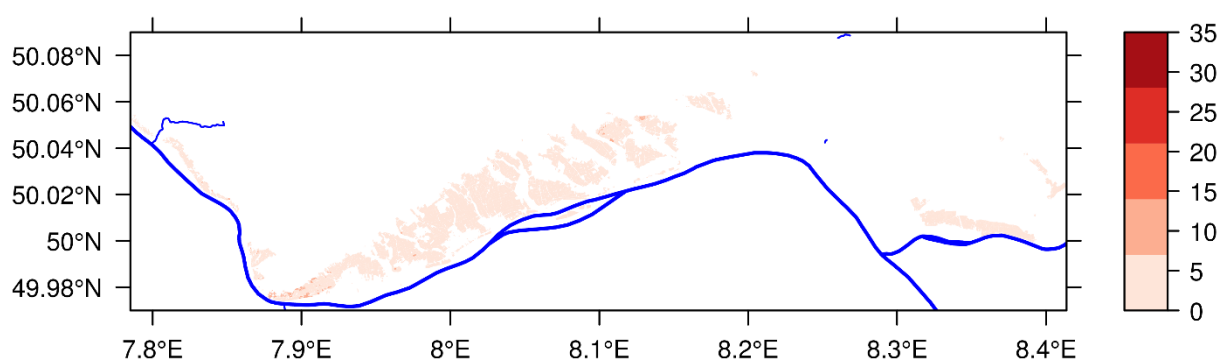
den nicht korrigierten Versionen, ohne sich jedoch qualitativ deutlich zu unterscheiden. Insgesamt zeigen alle drei dynamischen Klimamodelle vergleichbare Resultate.

Die Projektionen des Modells WETTREG2010 weichen hingegen deutlich von den dynamischen Modellen ab und zeigen einen stärkeren Anstieg der Trockenstresstage. Auffallend ist dabei der große Unterschied zwischen den Stationen Wiesbaden (Süd) und Geisenheim. Die Daten letzterer Station projizieren den stärksten Zuwachs an Trockenstresstagen. Schon in der nahen Zukunft würde der Trockenstress zu einem Problem für den gesamten Rheingau werden. Die Projektion der Station Wiesbaden (Süd) ist deutlich moderater und projiziert für die nahe Zukunft (2011-2040) einen Anstieg, der mit den Projektionen der dynamischen Modelle für den Zeitraum 2041-2070 vergleichbar ist. Im weiteren Verlauf des Jahrhunderts wird aber auch für die Station Wiesbaden (Süd) eine sehr starke Zunahme der Trockenstresstage projiziert, welche den gesamten Rheingau betreffen würde. Für die Hessische Bergstraße lassen sich die mit den Daten der Station Gernsheim berechneten Projektionen ähnlich interpretieren. In der nahen Zukunft wären nur einige Flächen betroffen, aber im weiteren Verlauf würde auf nahezu allen Flächen zeitweise Trockenstress auftreten.

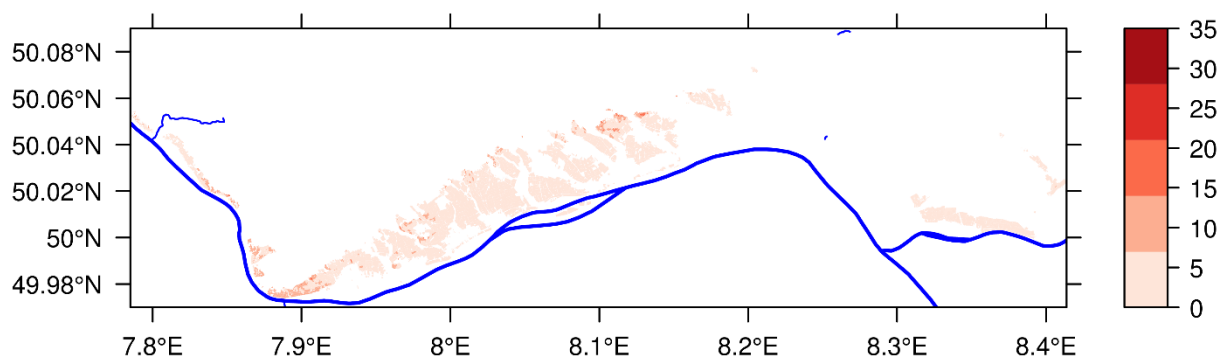
3.10.1 Änderungssignale Modell EH-CLM_U

3.10.1.1 Rheingau

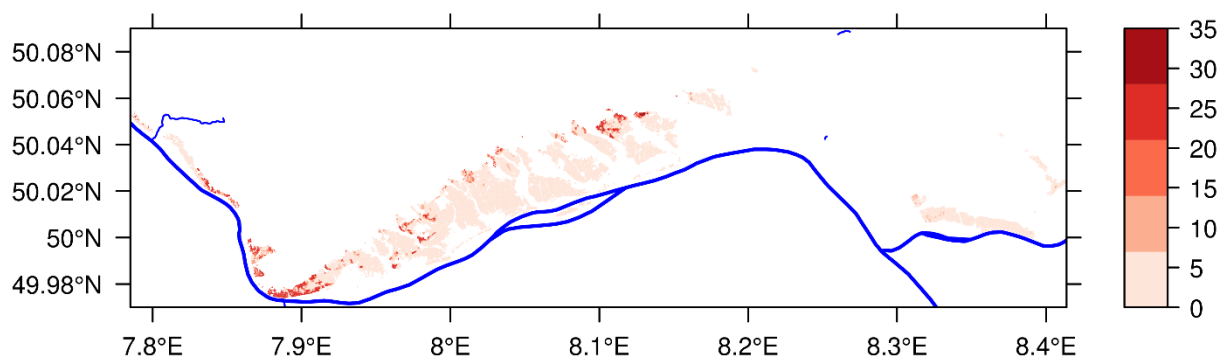
EH-CLM_U, 2011-2040 minus 1971-2000, Rheingau



EH-CLM_U, 2041-2070 minus 1971-2000, Rheingau



EH-CLM_U, 2071-2100 minus 1971-2000, Rheingau

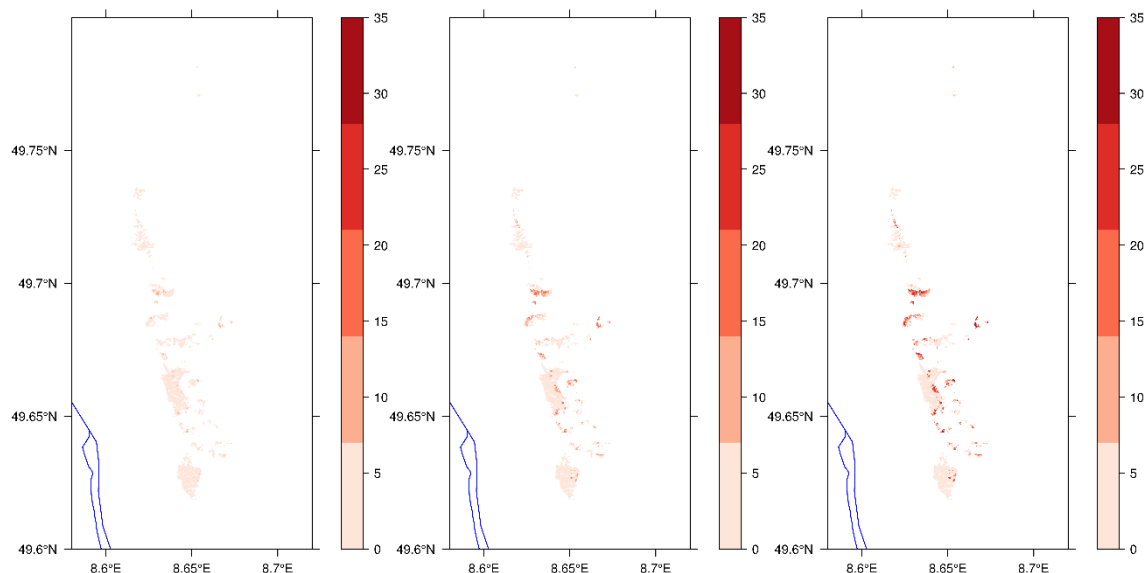


3.10.1.2 Hessische Bergstraße

EH-CLM_U, 2011-2040 minus 1971-2000, Hess. Bergstr.

EH-CLM_U, 2041-2070 minus 1971-2000, Hess. Bergstr.

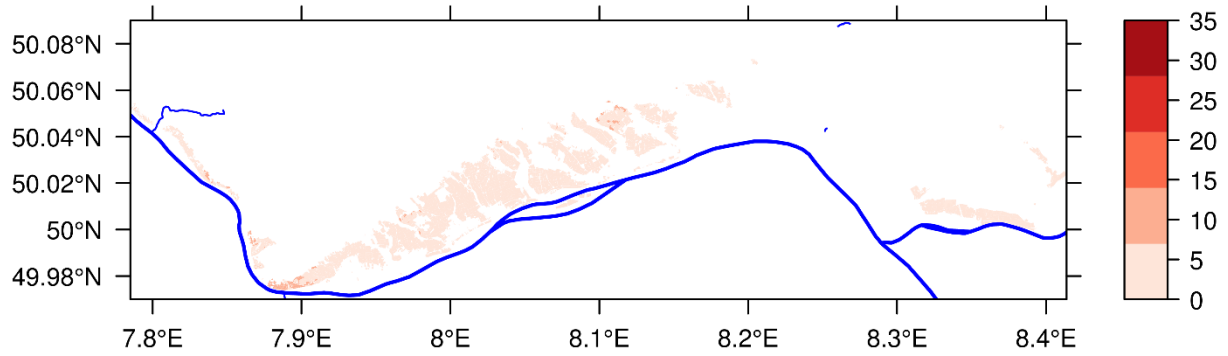
EH-CLM_U, 2071-2100 minus 1971-2000, Hess. Bergstr.



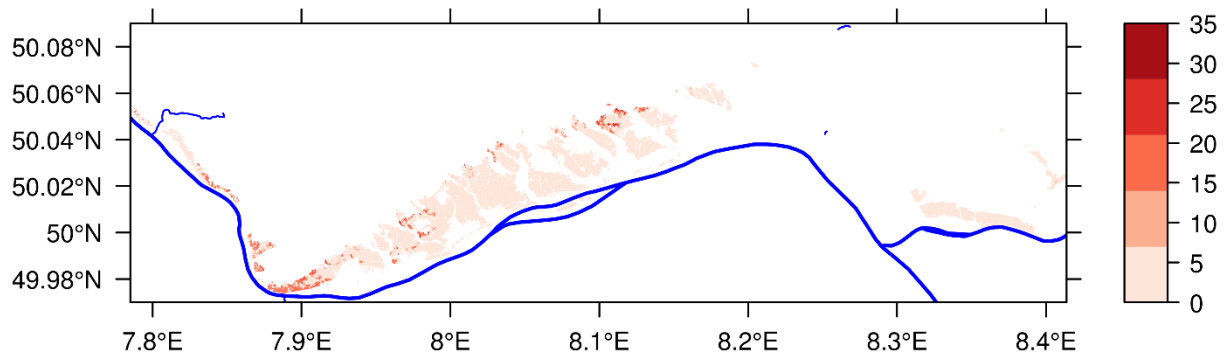
3.10.2 Änderungssignale Modell HadCM3-CLM_U

3.10.2.1 Rheingau

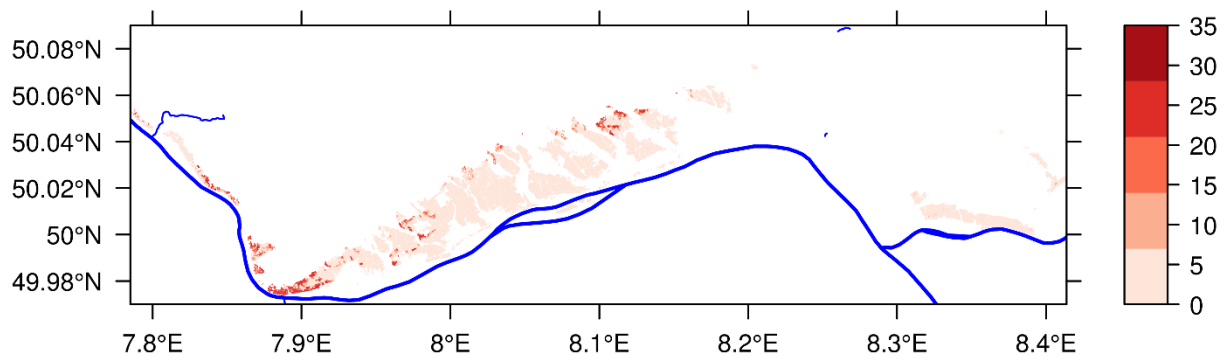
HadCM3-CLM_U, 2011-2040 minus 1971-2000, Rheingau



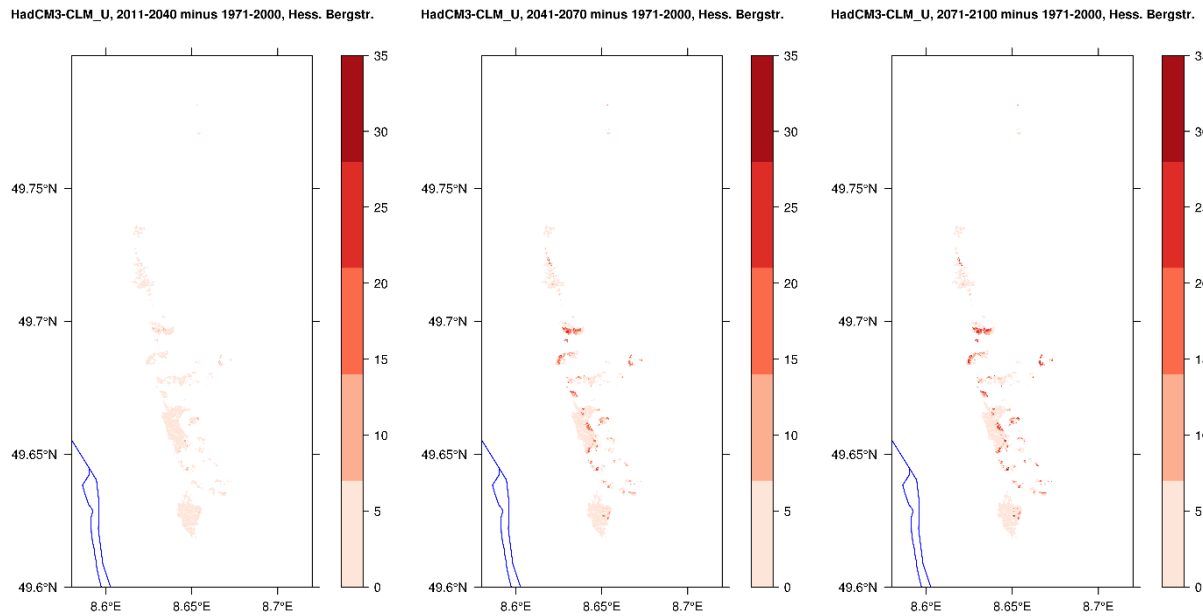
HadCM3-CLM_U, 2041-2070 minus 1971-2000, Rheingau



HadCM3-CLM_U, 2071-2100 minus 1971-2000, Rheingau



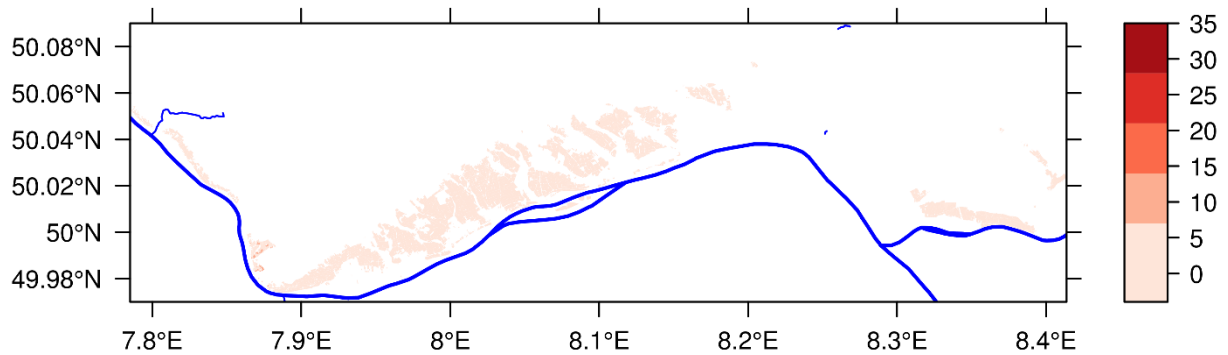
3.10.2 Hessische Bergstraße



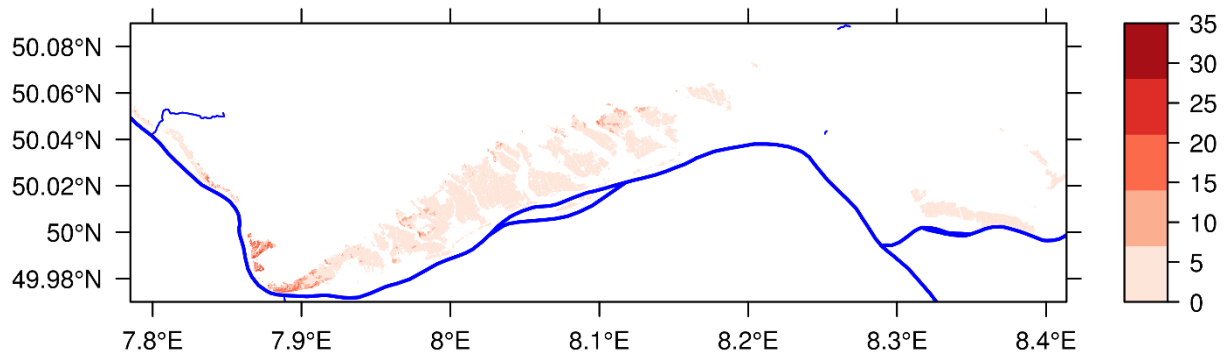
3.10.3 Änderungssignale Modell REMO-UBA_U

3.10.3.1 Rheingau

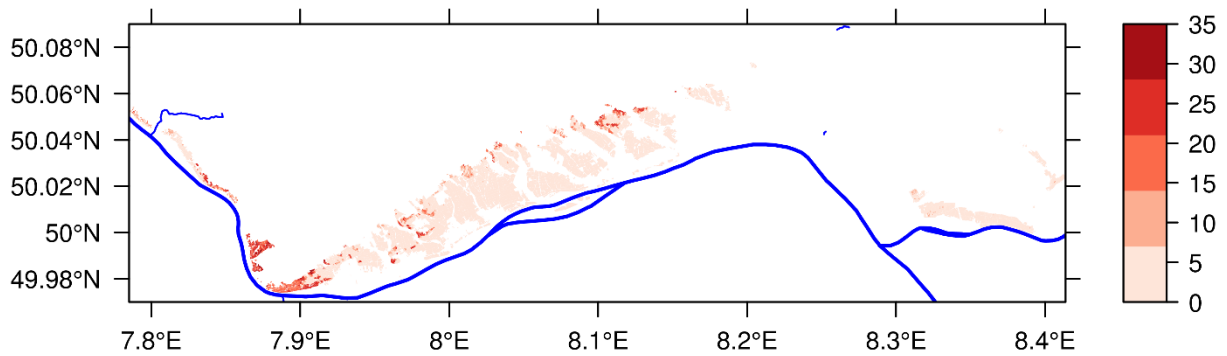
REMO-UBA_U, 2011-2040 minus 1971-2000, Rheingau, alternierend



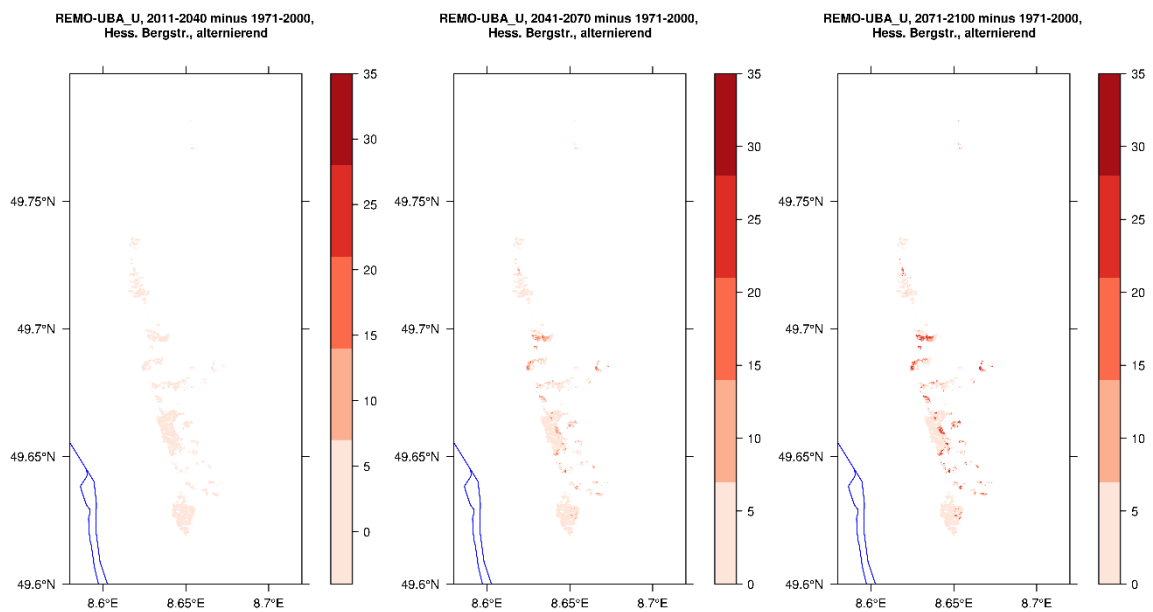
REMO-UBA_U, 2041-2070 minus 1971-2000, Rheingau, alternierend



REMO-UBA_U, 2071-2100 minus 1971-2000, Rheingau, alternierend



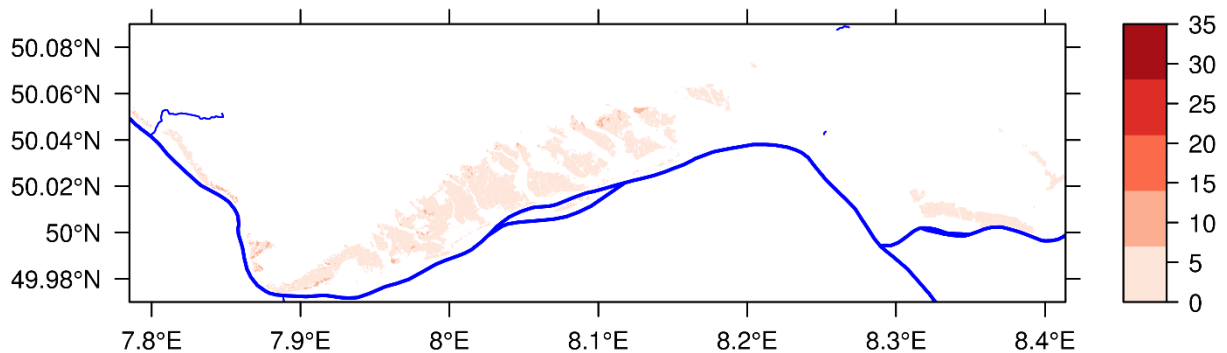
3.10.3.2 Hessische Bergstraße



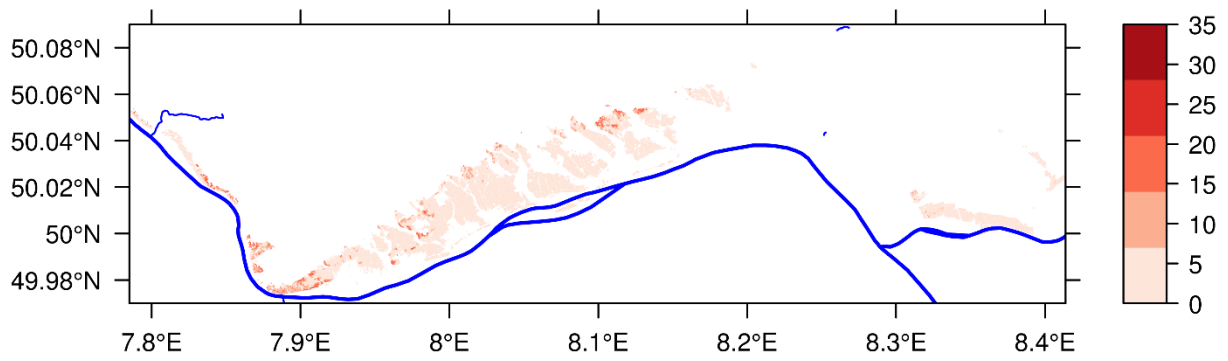
3.10.4 Änderungssignale Modell EH-CLM_K

3.10.4.1 Rheingau

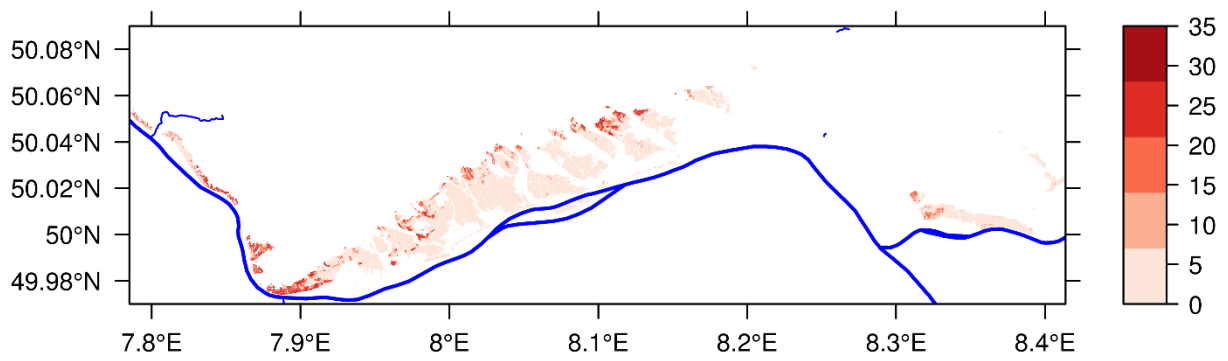
EH-CLM_BIAS_KORR, 2011-2040 minus 1971-2000, Rheingau



EH-CLM_BIAS_KORR, 2041-2070 minus 1971-2000, Rheingau

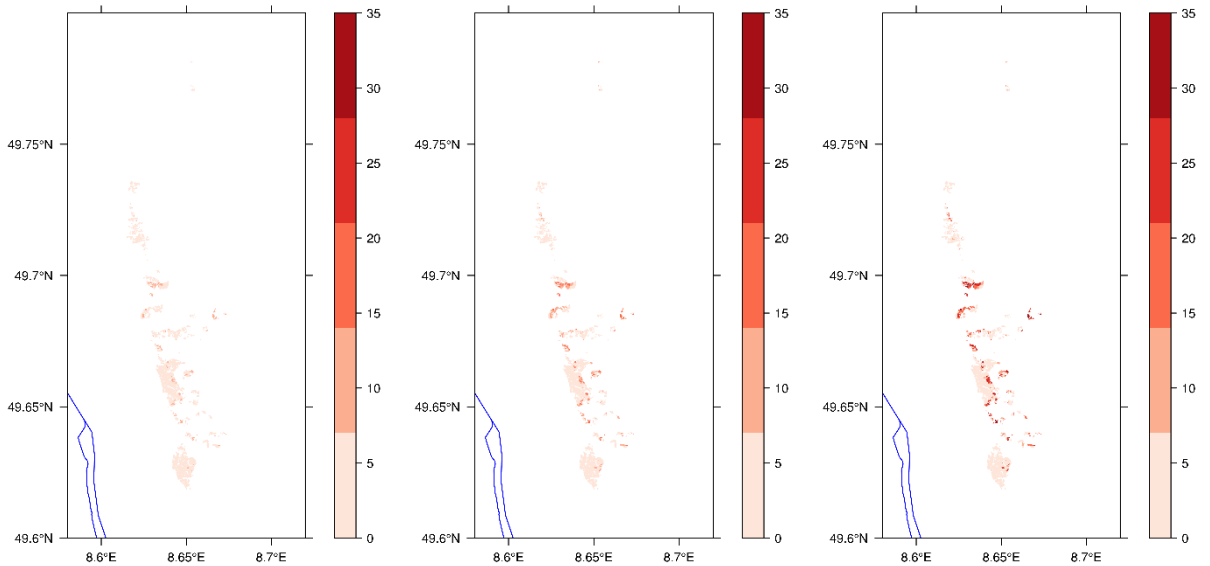


EH-CLM_BIAS_KORR, 2071-2100 minus 1971-2000, Rheingau



3.10.4.2 Hessische Bergstraße

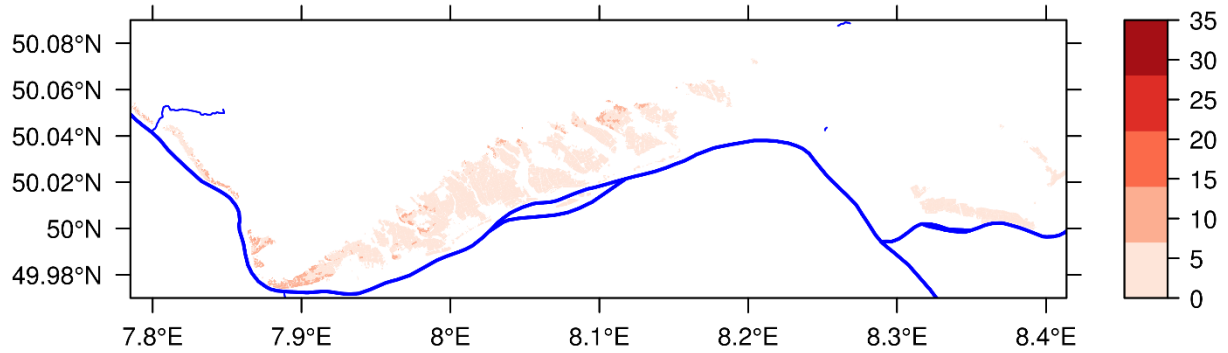
EH-CLM_BIAS_KORR, 2011-2040 minus 1971-2000, Hess. Bergstr. EH-CLM_BIAS_KORR, 2041-2070 minus 1971-2000, Hess. Bergstr. EH-CLM_BIAS_KORR, 2071-2100 minus 1971-2000, Hess. Bergstr.



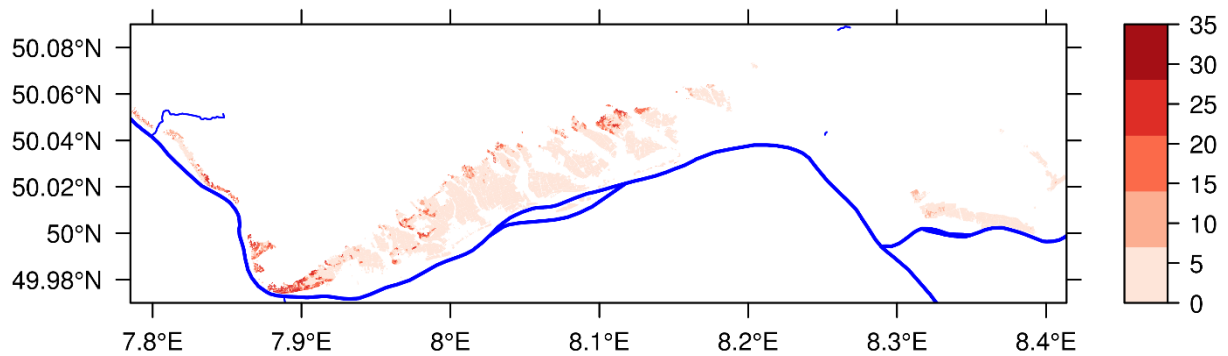
3.10.5 Änderungssignale Modell HadCM3-CLM_K

3.10.5.1 Rheingau

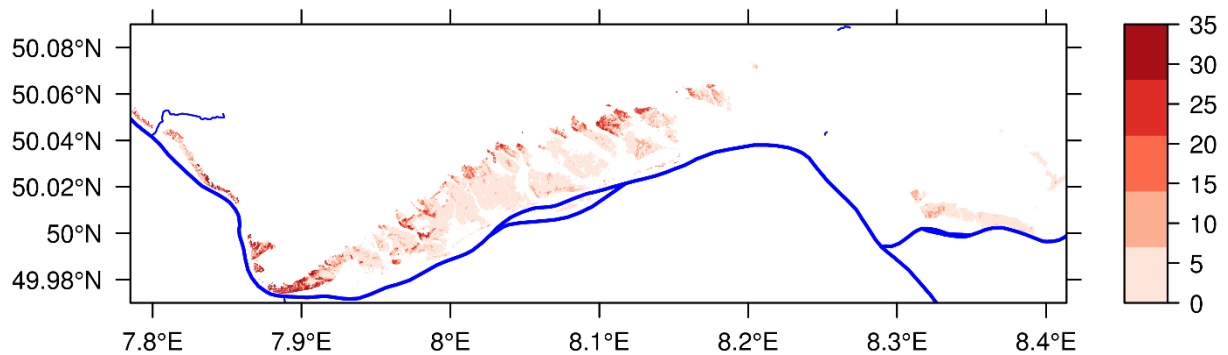
HadCM3-CLM_BIAS_KORR, 2011-2040 minus 1971-2000, Rheingau



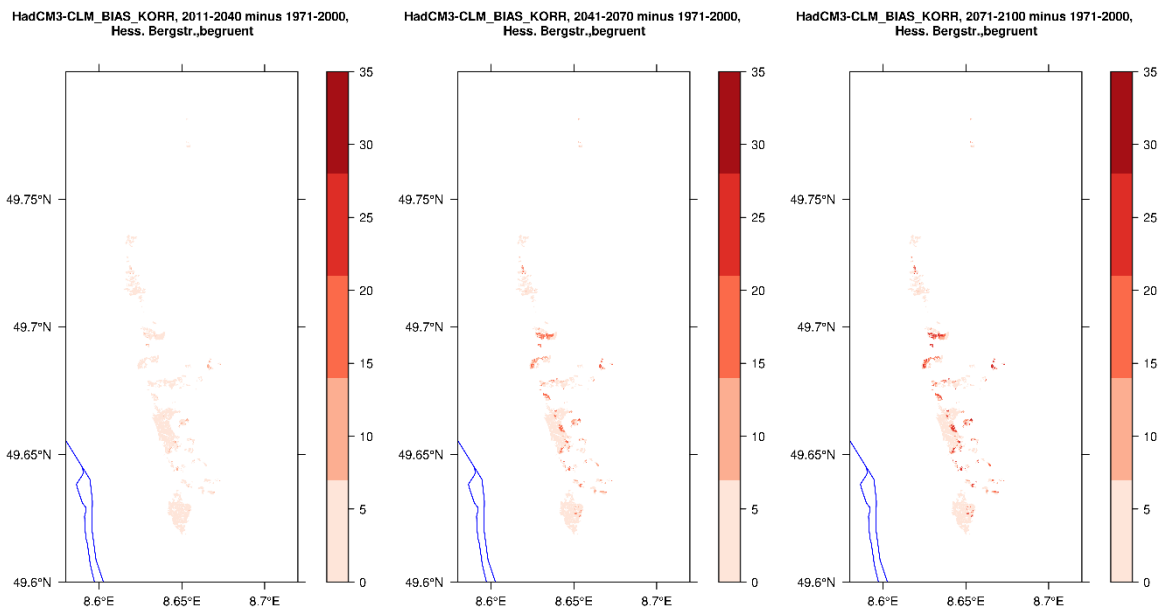
HadCM3-CLM_BIAS_KORR, 2041-2070 minus 1971-2000, Rheingau



HadCM3-CLM_BIAS_KORR, 2071-2100 minus 1971-2000, Rheingau



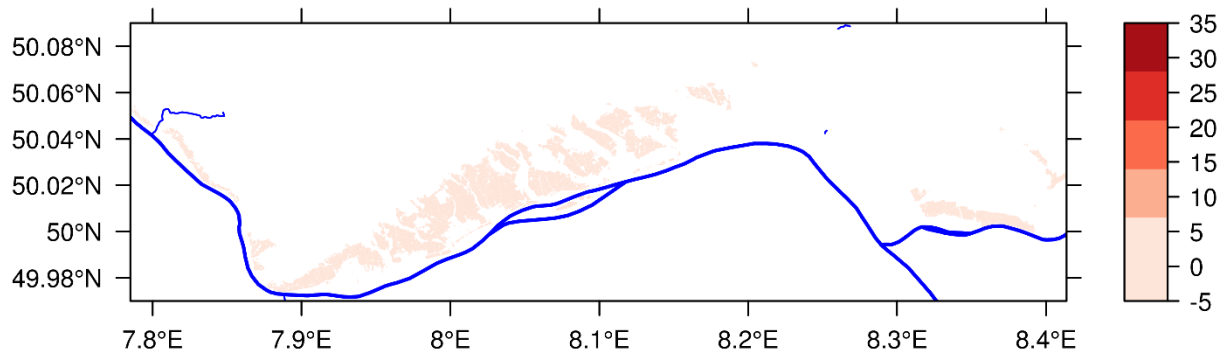
3.10.5.2 Hessische Bergstraße



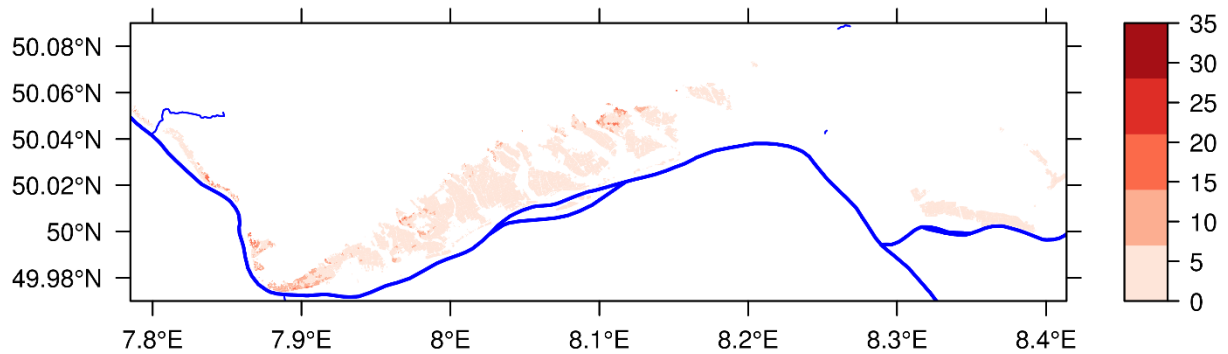
3.10.6 Änderungssignale Modell REMO-UBA_K

3.10.6.1 Rheingau

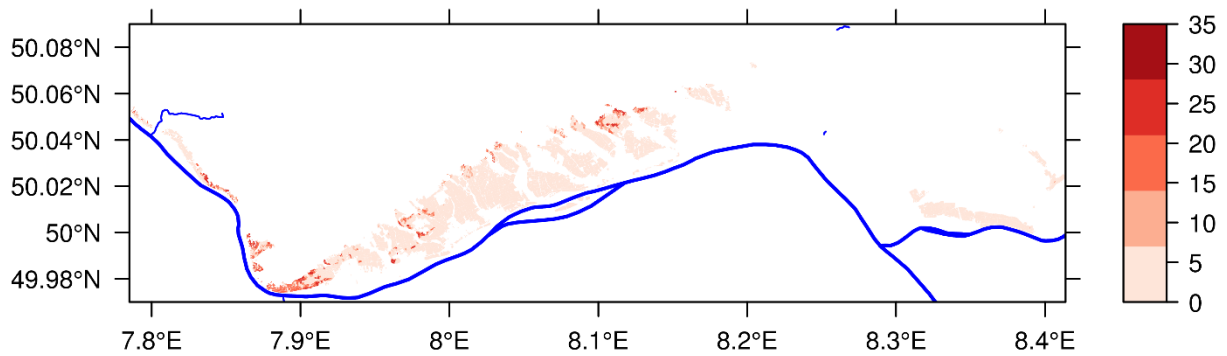
REMO-UBA_BIAS_KORR, 2011-2040 minus 1971-2000, Rheingau



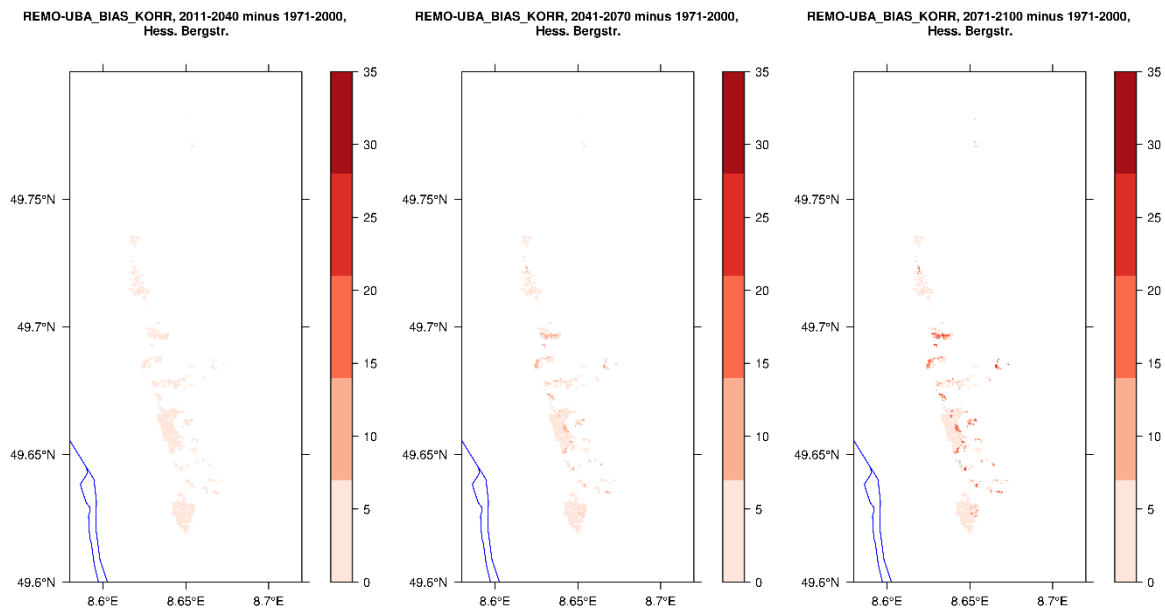
REMO-UBA_BIAS_KORR, 2041-2070 minus 1971-2000, Rheingau



REMO-UBA_BIAS_KORR, 2071-2100 minus 1971-2000, Rheingau



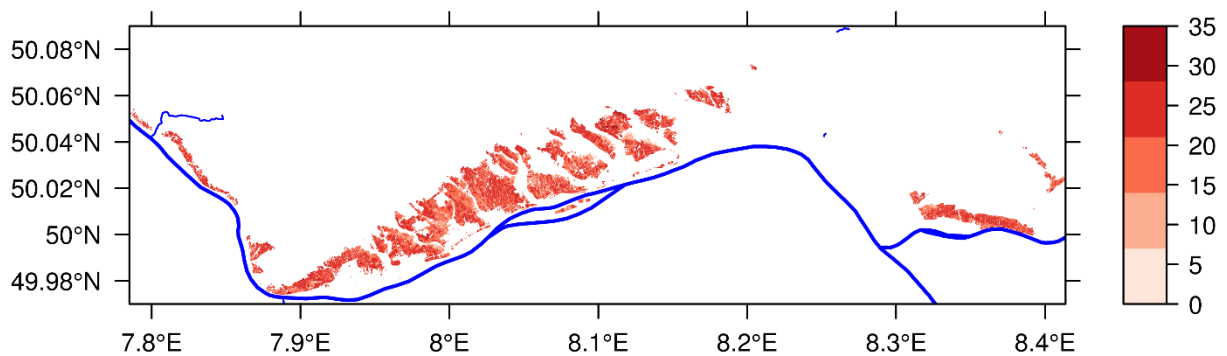
3.10.6.2 Hessische Bergstraße



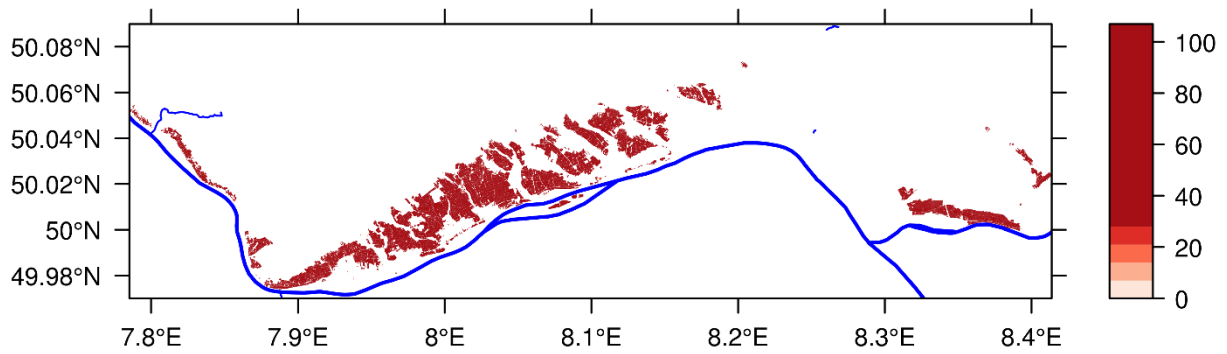
3.10.7 Änderungssignale Modell WETTREG2010

3.10.7.1 Rheingau, Station Geisenheim

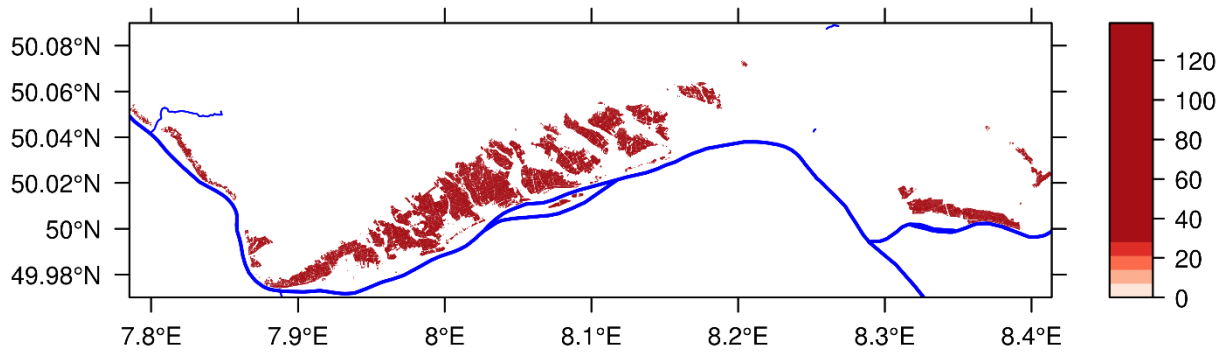
WETTREG2010 (Geisenheim), 2011-2040 minus 1971-2000, Rheingau, alternierend



WETTREG2010 (Geisenheim), 2041-2070 minus 1971-2000, Rheingau,alternierend

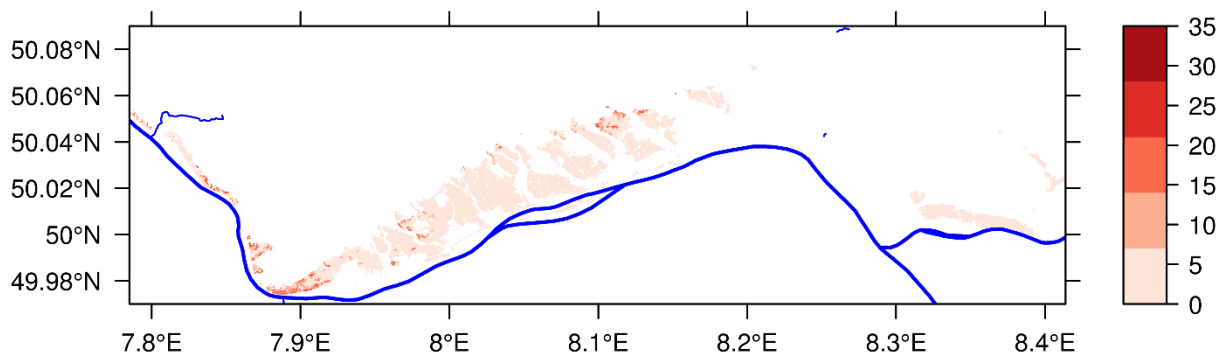


WETTREG2010 (Geisenheim), 2071-2100 minus 1971-2000, Rheingau,alternierend

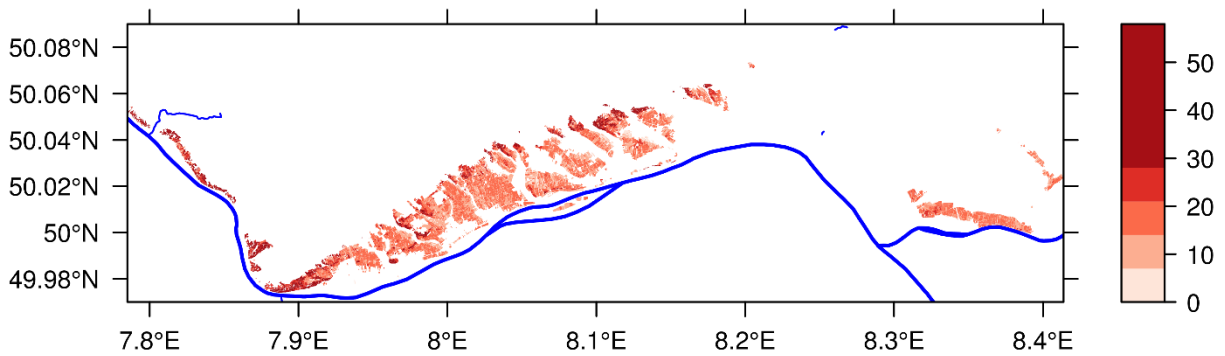


3.10.7.2 Rheingau, Station Wiesbaden (Süd)

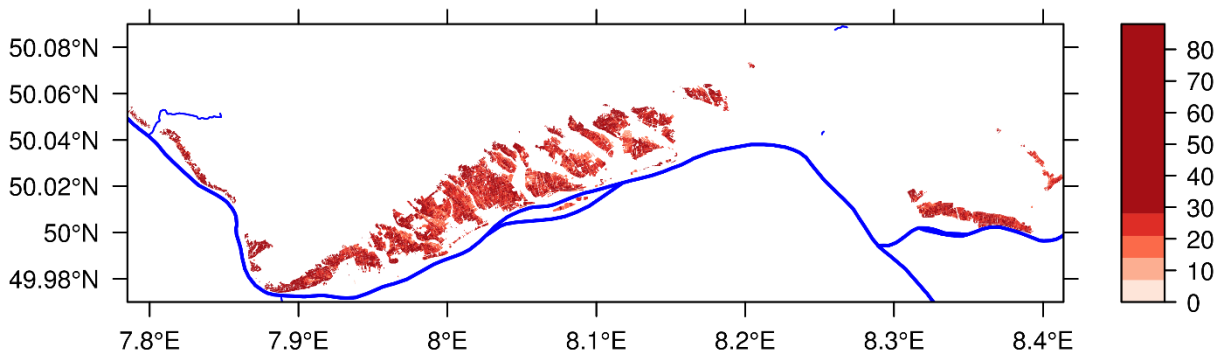
WR2010 (Wiesbaden), 2011-2040 minus 1971-2000, Rheingau,alternierend



WR2010 (Wiesbaden), 2041-2070 minus 1971-2000, Rheingau,alternierend



WR2010 (Wiesbaden), 2071-2100 minus 1971-2000, Rheingau,alternierend



3.10.7.3 Hessische Bergstraße, Station Gernsheim

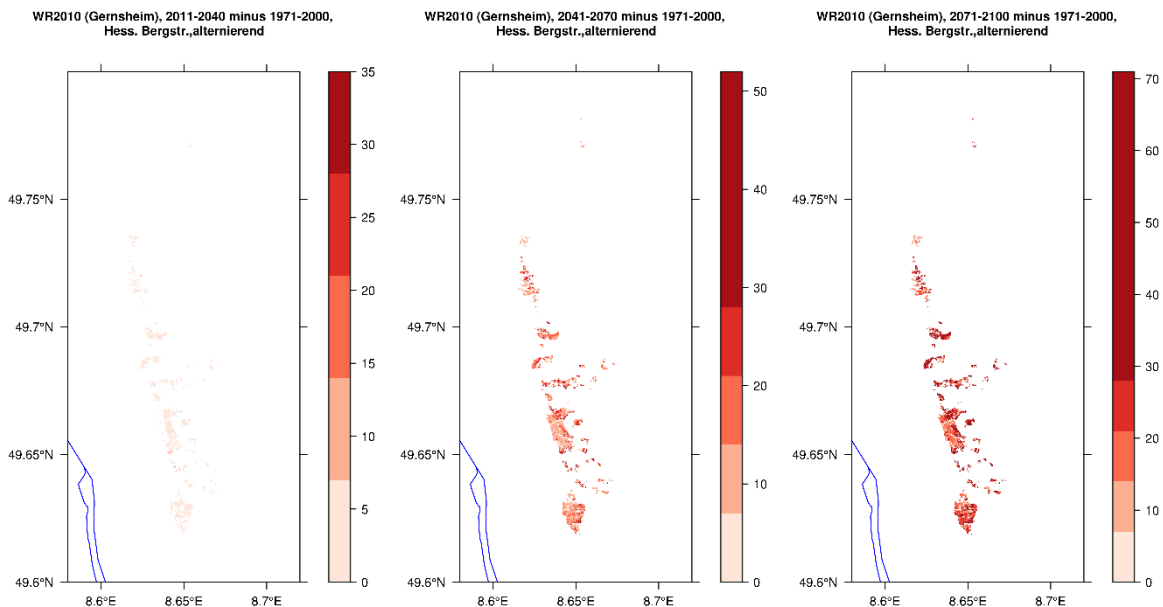


Abbildung 20 Die in den Abschnitten 3.10.1-3.10.7 dargestellten Karten zeigen die mögliche zukünftige Zunahme der Trockenstresstage pro jährliche Vegetationsphase (1. Mai – 30. Sept.) für die Weinbergspartellen des Rheingaus und der Hessischen Bergstraße. Die Zunahme ist als Differenz des Mittels der Trockenstresstage der Zeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 zum Zeitraum 1971-2000 dargestellt und wurde mit einem Wasserhaushaltsmodell für Weinberge und verschiedenen regionalen Klimamodellen (siehe Tabelle 3) berechnet.

4 Diskussion

4.1 Das Wasserhaushaltsmodell

Das überarbeitete und modifizierte Wasserhaushaltsmodell für Weinberge ist ein Beispiel für einen „sandwich“ Ansatz, wobei ein Modell, welches die in Weinbergen auftretenden Wasserflüsse beschreibt, mit Standorteigenschaften verknüpft wird, um in Verbindung mit Klimaprojektionen Risikoanalysen für einzelne Weinberge durchzuführen. Im nächsten Schritt wurden die Analyse für alle mit Reben bestockten Weinbergspartellen Hessens, wie sie in der EU-Weinbergskartei erfasst sind, durchgeführt. Damit wurden die beiden Anbaugebiete Hessens, der Rheingau und die Hessische Bergstraße, abgedeckt. Während der Modellentwicklung wurde es notwendig ein vollständig neues Modell für die Strahlungsverteilung in Weinbergen auf Basis einer Monte Carlo Simulation zu entwickeln. Das Vorgängermodell von Riou et al. (1989) behandelt die horizontalen Flächen der Laubwände als opak, wodurch im Fall von lichten Laubwänden die von den Reben absorbierte Strahlung und damit die potenzielle Transpiration der Reben überschätzt wird. Das neue Modell ermöglichte eine genauere Bestimmung des Transpirationskoeffizienten und des Wasserverbrauchs der Reben.

Bisher beinhaltet das Modell noch keine Anpassung der stomatären Leitfähigkeit an erhöhte CO₂ Konzentrationen, welches für eine genauere Bestimmung des Einflusses des Klimawandels wichtig wäre (Yin, 2013). Eine generelle Studie zur Reaktion der Spaltöffnungen auf eine Erhöhung der CO₂ Konzentration auf 560 µmol/mol (ausgehend von 380 µmol/mol, Ainsworth und Rogers, 2007) verschiedener Pflanzenarten zeigte einen Rückgang der stomatären Leitfähigkeit um 20 %. Experimente an Reben haben diesen Wert bestätigt (Schultz und Stoll, 2010), aber neben der Reduzierung der stomatären Leitfähigkeit und möglicherweise des Grenzwerts des *FTSW* (ab dem die Stomata beginnen die Transpiration zu regulieren), könnte sich auch das Sättigungsdefizit bedingt durch den Klimawandel ändern. Neuere Untersuchungen verschiedener Modelle, welche den physiologischen Einfluss des CO₂ auf Pflanzen berücksichtigen, deuten darauf hin, dass durch den CO₂ Anstieg die Verdunstung der Ozeane ansteigt, was zu einem erhöhten absoluten Wassergehalt der Luft führen würde. Über Land jedoch könnte die Abnahme der Evapotranspiration (aufgrund des Rückgangs der stomatären Leitfähigkeit) zu einer Erhöhung des Sättigungsdefizits führen (Boucher et al., 2009).

Die Aufteilung der Wasserflüsse auf Boden, Begrünung und Reben zeigte, dass im Jahresverlauf jeweils unterschiedliche Teilgrößen dominieren und dass die Art der

Bodenbewirtschaftung einen großen Einfluss auf die Größe der jeweiligen Komponente hat. Die Größe der berechneten Verdunstungsraten für den offenen sowie den begrüntem Boden war dabei in guter Übereinstimmung mit den in Geisenheim direkt gemessenen Werten (Uliarte et al., 2013) und mit denen von Celette et al. (2010) für einen Weinberg mit Dauerbegrünung und vergleichbarem Reihenabstand. Der starke, vom Modell simulierte Abfall der Verdunstungsraten des offenen Bodens innerhalb weniger Tage nach einem Regenereignis (Abbildung 17), wurde ebenso von Uliarte et al. (2013) unter vergleichbaren Bedingungen beobachtet.

Lebon et al. (2003) diskutierten auch die Rolle des Interzeptionswassers (Anteil des Niederschlags, der an Pflanzenteilen haften bleibt und nicht in den Boden eindringt) als mögliche Fehlerquelle. Um den Einfluss des Interzeptionswassers auf die Verdunstung abzuschätzen, wurde der Ansatz aus dem Modul für den offenen Boden, der dem Boden eine zusätzliche oberste Schicht hinzufügt von der das Wasser nach Niederschlägen verdunstet, auch auf die begrüntem Flächen übertragen. Das führte jedoch nur zu einer geringfügigen Reduzierung der Bodenfeuchte, die von der Genauigkeit der gemessenen Daten nicht aufgelöst wurde und auf Situationen, in denen die Niederschläge auf tendenziell trockenen Boden fielen, beschränkt war. Eine weitere Anpassung des Modells an die Klimabedingungen des Rheingaus oder der Hessischen Bergstraße bestand in der Einführung von Wachstumsstadien, um die Entwicklung der Begrünungspflanzen im Jahresverlauf zu beschreiben (Allen et al., 1998).

Weitere Fehler können auftreten, wenn an den Standorten laterale Wasserflüsse auftreten, weil vom Modell nur vertikale Wasserflüsse berechnet werden. An Hanglagen kann generell durch das Auftreten von Steigungsregen eine variable Verteilung der Niederschläge vorherrschen. Bewegt man sich vom Rheingau nur wenige Kilometer nach Norden Richtung Taunus steigt der Jahresniederschlag um ca. 250 mm (Abbildung 8). Einige der Bodenfeuchtemessrohre zeigten zu bestimmten Zeiten einen Anstieg der Bodenfeuchte in bestimmten Schichten, der möglicherweise durch Wasser verursacht wurde, welches sich lateral hangabwärts bewegte. Dies trat jedoch nur während der Phase der Wiederauffüllung der Böden im Winter und zeitigem Frühjahr auf und es ist letztlich nicht möglich eindeutig zwischen lateralen und vertikalen Wasserflüssen zu unterscheiden. Zudem war der Anstieg auf bestimmte Schichten beschränkt und nach Sättigung der Schicht würde der laterale Fluss als Durchfluss auftreten. Daher ist der Fehler insgesamt wahrscheinlich nicht sehr groß, könnte aber die Unterschätzung der Bodenfeuchte des Standorts Wilgert im Frühjahr erklären.

Bisherige Studien zur Untersuchung der Auswirkung des Klimawandels auf den Weinbau basierten weitgehend auf der Auswertung meteorologischer Daten, wobei Berechnungen des Wasserhaushalts entweder auf groben Bodenfeuchtedaten in geringer räumlicher Auflösung basierten (Malheiro et al., 2010; auf Basis von Tonietto und Carbonneau, 2004), feste Werte für die Wasserspeicherfähigkeit für alle Regionen verwendeten, oder mit Submodellen Wasserstressindizes errechneten, deren Anwendbarkeit für Weinbaustandorte nicht überprüft wurde (Hannah et al., 2013 basierend auf Alcamo et al., 2003 und Pfister et al., 2009).

Weil viele der europäischen Weinbaugebiete sich auf Hang- oder Steillagen befinden, die häufig aufgrund tendenziell steiniger oder flachgründiger Böden einem erhöhten Risiko für Trockenstress ausgesetzt sind, wurde der durch Hangneigung und Exposition veränderte Strahlungseintrag und dessen Auswirkung auf den Wasserhaushalt im Modell berücksichtigt. Die Studie von Pieri und Lebon (2014) zur klimawandelbedingten Änderung des regionalen Wasserhaushalts in verschiedenen Regionen Frankreichs berücksichtigte nicht die Hangneigung und wurde unter der Annahme offener Böden durchgeführt. Sie ist daher für eine grobe Abschätzung geeignet ohne den großen Unterschieden innerhalb der Regionen Rechnung zu tragen.

4.2 Bewertung und Interpretation der Ergebnisse

Die in den Risikogebieten von den dynamischen Modellen projizierte Zunahme der Trockenstresstage um etwa 7-14 Tage pro Jahr im Mittel für die nahe Zukunft kann man als eine leichte Verschärfung der Probleme auffassen, die durch Wassermangel in der jüngeren Vergangenheit aufgetreten sind. Auch wenn diese Zahl die Standardabweichung der Trockenstresstage 30-jähriger Zeiträume nicht übersteigt (siehe Tabelle 8) und man daher nicht von einem signifikanten Änderungssignal sprechen kann, zeigt der Trend in den Risikogebieten im weiteren Verlauf des Jahrhunderts eindeutig in die Richtung zu stärkerem Trockenstress. Das heißt, dass als tendenziell trocken einzustufende Jahre auch in naher Zukunft etwas häufiger vorkommen werden und dass die Trockenheit in diesen Jahren etwas stärker ausfallen könnte. Eine Zunahme von 7-14 Tagen im Jahr würde für die Flächen, welche schon bewässert werden ein bis zwei zusätzliche Bewässerungstermine pro Jahr bedeuten. Der gewählte Schwellenwert von $FTSW < 0,15$ (entsprechend einem frühmorgendlichen Wasserpotenzial von $-0,6$ MPa) für die Einstufung eines Tages als Trockenstresstag gilt gemeinhin auch als starker Trockenstress und bedeutet u. a. eine starke Einschränkung der Assimilationsleistung und des vegetativen Wachstums (Schultz und Hofmann, 2008). Die weinbaulichen Folgen des Wassermangels hängen auch davon ab, zu

welchem Zeitpunkt der Wassermangel auftritt und wie lange er andauert. So ist im Zeitraum vor der Blüte (ca. Mitte Juni) wahrscheinlich auch ein moderater Trockenstress als eher negativ einzustufen, weil er dann in der Hauptwachstumsphase der Reben auftritt. Das konnte man sehr gut im Jahr 2015 erkennen, in dem die deutliche Frühjahrstrockenheit auf vielen Standorten zu vergleichsweise lichten Laubwänden führte. Nach Matthews et al. (1987) wirkt sich früher Wassermangel bei der Rebsorte Cabernet franc stärker limitierend auf den Ertrag aus als später. Ebenso hat früher Wassermangel einen stärkeren Einfluss auf die finale Beerengröße bei der Rebsorte Syrah (Ojeda et al., 2001). Wassermangel beeinflusst nicht nur den Primär- (Zucker und Säuren) sondern auch den Sekundärstoffwechsel, der einen starken Einfluss auf die spätere Weinqualität hat. Bei weißen Rebsorten ist hierüber noch wenig bekannt (Savoi et al., 2016), während bei roten Rebsorten durch kleinere Beeren die Konzentration von phenolischen Komponenten, wie z.B. Anthocyane, steigt und als positiv für die Weinqualität angesehen wird. Dass die Gemeinde Assmannshausen die Rotweininsel des Rheingaus darstellt, wo der Spätburgunder auf ca. 90 % der Rebfläche dominiert, erscheint vor diesem Hintergrund schon als eine sinnvolle Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel.

Im weiteren Verlauf des Jahrhunderts nimmt der Trockenstress in den Risikogebieten weiter zu und könnte die Ergreifung intensiver Anpassungsmaßnahmen zur Folge haben. Für die Projektionen des Modells WETTREG2010 überraschen die starken Unterschiede zwischen den Stationen Geisenheim und Wiesbaden (Süd). Da das Modell WETTREG2010 ohnehin schon als trockene Klimaprojektion einzustufen ist, ist es die Frage, ob die Projektion der Station Geisenheim als ein Ausreißer gewertet werden kann, da schon in naher Zukunft der gesamte Rheingau von einer starken Zunahme des Trockenstressrisikos betroffen wäre, was von den anderen Modellen übereinstimmend nicht projiziert wird. WETTREG2010 basiert auf statistischen Regressionsbeziehungen zwischen großräumlichen Wetterlagen und den an Stationen gemessenen Wetterdaten. Es erscheint naheliegend anzunehmen, dass die statistischen Regressionsbeziehungen in der nahen Zukunft eher Gültigkeit besitzen, als in der fernen, wenn aufgrund des Klimawandels möglicherweise größere Änderungen im Klimasystem aufgetreten sind.

Letztlich ist für die Winzer die wichtige Frage, wie häufig trockene Jahre vorkommen, in denen eine Bewässerung sinnvoll wäre. Eine Möglichkeit, um der Beantwortung der Frage näher zu kommen, wäre die berechneten Änderungssignale der Klimamodelle, z. B. das Signal 2041-2070 minus 1971-2000, auf die mit Beobachtungsdaten bestimmten Trockenstresstage des Zeitraums 1971-2000 aufzuaddieren und so Absolutwerte für die

Trockenstresstage zu erhalten. Mit einem Schwellenwert für die Anzahl der Trockenstresstage pro Jahr könnte die Anzahl der trockenen oder bewässerungswürdigen Jahre eines 30-jährigen Zeitraum bestimmt werden. Dieses Vorgehen setzt jedoch voraus, dass die regionalen Klimamodelle in der Lage sind die Variabilität des Klimas von Jahr zu Jahr gut zu beschreiben. Zudem würde das Resultat auch stark vom gewählten Schwellenwert abhängen, so dass letztlich die Belastbarkeit einer solchen Untersuchung in Frage gestellt ist.

4.2.1 Anpassungsmaßnahmen

In Schultz und Hofmann (2008) sind bereits verschiedene Anpassungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile diskutiert worden. Dazu zählen neben der Bewässerung als die wirkungsvollste Maßnahme, Bodenabdeckungen (z. B. durch Stroh oder Rindenmulch) und die Wahl der Unterlage bei Neuanpflanzungen, durch die auch Trockenstress gemindert werden kann (Berdeja et al., 2014). Der Blick in die ganze Region in diesem Projekt zeigt, dass sich die Steillagenregionen, vor allem der Bereich bei Rüdesheim, Assmannshausen und Lorch, spätestens ab der Mitte des Jahrhunderts als Risikogebiete herauskristallisieren könnten. Da die Steillagenregionen wiederum sehr prägend für die Landschaft sind und neben dem Weinbau auch für den lokalen Tourismus große Bedeutung haben und eine hohe Biodiversität aufweisen, könnte langfristig die Schaffung einer geeigneten Bewässerungsinfrastruktur Bedeutung erlangen, die dem ganzen Risikogebiet zu Gute käme. Die Winzer, die vor Ort ihre Flächen kennen, sind wahrscheinlich in der Lage aus den Erfahrungen der letzten Jahre und der projizierten Tendenz der Zunahme der Trockenheit einzuschätzen, ob schon in naher Zukunft die Etablierung von Bewässerungssystemen sinnvoll sein könnte. Das ist auch ein Beispiel für die Kosten, die auftreten können, wenn der Klimawandel so wie von den Modellen projiziert wird, fortschreitet.

Verfolgt man die Wetterverläufe der vergangenen Jahre, so wird klar, dass der Weinbau nicht nur mit vereinzelt trockenen Jahren zurecht kommen muss, sondern auch mit zum Teil hohem Niederschlagsaufkommen während der Vegetationsperiode, wodurch aufgrund der nun höheren Temperaturen die Gefahr von Fäulniskrankheiten steigt. Gerade bei steigenden Temperaturen wird deshalb die Bedeutung der Begrünung in Zukunft zunehmen, da sie einem verstärkten Humusabbau entgegenwirkt, einen wirkungsvollen Erosionsschutz bietet und die Befahrbarkeit der Gassen für die Ausbringung des Pflanzenschutzes sichert. Damit geht einher, dass das Begrünungsmanagement in Zukunft wichtiger wird, angepasste Systeme entwickelt werden müssen und eventuell auch wassersparende Begrünungspflanzen (C₄ Pflanzen) an Bedeutung gewinnen (Uliarte et al., 2013). Mit steigenden Temperaturen und Niederschlägen im Winter wird auch die Winterbegrünung wichtiger werden. Da sich bei ausbleibendem

Winterfrost die Begrünung im Frühjahr schneller etabliert, kann in trockenen Frühjahren, wie z. B. im Jahr 2015, die Begrünung besonders auf flachgründigen Anlagen schon einen großen Teil der Bodenwasservorräte aufbrauchen. Das zeigt, dass der Weinbau in vielerlei Hinsicht gefordert ist, sich auf die verändernden Klimabedingungen einzustellen.

5 Fazit und Ausblick

Im Laufe des Projekts wurden die Fragen nach dem Umgang mit Klimamodelldaten in der Klimafolgenabschätzung deutlich und während der Projektlaufzeit diskutiert. Die Aufgabe bestand zunächst darin ein Impaktmodell zu entwickeln, welches die beobachtete Wirklichkeit gut reproduzieren kann. Dabei wurde auf Tageswerte von an Stationen gemessenen Wetterdaten zurückgegriffen, die als Eingangsdaten das Modell antrieben. Da es sich bei den Klimamodelldaten nicht um stationsbezogene Daten handelte und auch das stationsbezogene statistische Klimamodell die Klimatologie der Stationsdaten nicht reproduzieren konnte, bestand die nächste Aufgabe darin, die in den Modellen enthaltene Information zum Klimawandel in Hinblick auf das Projektziel herauszuarbeiten. In vielen spannenden Diskussionen mit Nutzern regionaler Klimamodelle auf der einen und Klimamodellierern auf der anderen Seite zeigte sich, dass neben der Verbesserung der Klimamodelldaten auch die Impaktmodelle möglicherweise so angepasst werden können, dass sie besser die belastbaren Ergebnisse und Signale der Klimamodelle verwenden können. Beide Möglichkeiten können dazu beitragen, die Verantwortungskette zwischen den Erzeugern der Klimamodelldaten und deren Nutzern weiter zu verbessern, Unsicherheiten der Projektionen deutlich zu machen und zu kommunizieren.

Die Ergebnisse des Projekts verdeutlichen mögliche zukünftige klimatische Entwicklungen des Trockenstressrisikos und unterstützen die Erarbeitung und Erforschung von geeigneten Anpassungsmaßnahmen. Der Klimawandel wirkt dabei in vielfältiger Weise auf den Weinbau ein und die Risiken ergeben sich zum Teil auch aus bisher selten auftretenden Witterungsbedingungen in Verbindung mit einem bestimmten Entwicklungszustand der Reben. Warm-feuchte Bedingungen während der Reifephase haben z. B. in den letzten Jahren deutlich zugenommen (Schultz und Hofmann, 2016; Cook und Wolkovich, 2016).

Die Einbindung des CO₂-Effekts auf den Wasserhaushalt der Reben ist eines der nächsten Vorhaben. Dazu werden in der Geisenheimer FACE-Anlage im Jahr 2016 erstmals Saftflussmessungen an Reben unter erhöhten CO₂ Bedingungen durchgeführt. Das Wasserhaushaltsmodell selbst bietet auch vielfältige Einsatzmöglichkeiten für weitere

Projekte. Wie schon bei der Projektplanung bedacht, könnte die Kopplung des Bodenwasserhaushalts an ein Modell zur Beschreibung der Stickstoffdynamik in Weinbergböden Abschätzungen zur Nitratauswaschung verbessern. Das ist insofern vielversprechend, weil das Wasserhaushaltsmodell verschiedene Formen der Bodenbewirtschaftung berücksichtigt. Der Wassergehalt spielt auch bei der Bodenatmung und der Frage der CO₂ Freisetzung aus Böden eine wichtige Rolle, gerade im Zusammenhang mit gestiegenen Bodentemperaturen. Im Rheingau wird vom Rheingauer Weinbauverband und der Hochschule Geisenheim ein Messnetz aus 10 Wetterstationen betrieben. Das bietet die Möglichkeit, die auf einzelne Weinbergparzellen abzielende Berechnung des Wasserhaushalts zur Bewässerungssteuerung einzusetzen, wobei die Integration von Bewässerungsmaßnahmen in die Modellierung des Wasserhaushalts noch überprüft werden muss.

6 Anhang

A Modell zur Berechnung der Strahlungsaufteilung in einem Weinberg

Die Monte-Carlo Simulation dient als ein numerisches Experiment, um die Strahlungsaufteilung innerhalb der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Geometrie zu lösen, wobei die kurzwellige Strahlung durch eine Stichprobe von Photonen dargestellt wird (Modest, 2003). Die Spur jedes Photons von der Emission bis zur Absorption oder der Rückstreuung zum Himmel wird durch die Berechnung der Orte der Wechselwirkung und der entsprechenden Wahrscheinlichkeiten der möglichen Wechselwirkungen (Transmission, Reflexion, Absorption) und unter Verwendung von Zufallszahlen, die über die jeweilige Wechselwirkung entscheiden, verfolgt. Die Aufteilung der Strahlung innerhalb des Weinbergs hängt folglich von der Richtung der Strahlung ab. Die gerichtete Strahlung wurde durch eine statistisch relevante Zahl gleichmäßig zwischen den Rebzeilen verteilter Photonen modelliert, welche im Intervall $-D/2 \leq x \leq D/2$ in definierten Intervallschritten der Größe Δx in der Höhe $z = S + H$ mit einer bestimmten Richtung emittiert wurden. $S + H$ ist hierbei gleich dem Abstand der Oberseite der Laubwand vom Boden (Abbildung 2). Die Orte der Wechselwirkung und die möglichen Längen der Wegstrecken innerhalb einer Laubwand wurden durch Vektorrechnung in drei Dimensionen bestimmt. Es wurde angenommen, dass Absorption und Reflexion nur in den äußeren Flächen des Quaders oder an der Bodenoberfläche stattfindet. Jeder geometrische Punkt der Absorption eines Photons wurde abgespeichert. Zufallszahlen wurden auch verwendet, um die Richtung diffuser Reflexionen zu bestimmen. Die Oberflächen wurden als ideal diffus reflektierend angenommen. Für das kurzwellige Reflexionsvermögen der Blätter ($\rho_l = 0,22$) und des Bodens ($\rho_s = 0,18$) wurden Literaturwerte verwendet (Gates, 1980). Zur Berechnung der Strahlungsaufteilung wurde nicht zwischen begrüntem oder offenem Böden unterschieden.

Um die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten für die Interaktion eines Photons mit der Laubwand zu berechnen, wurde die Transmission der Laubwand nach dem Lambert-Beerschen Gesetz in Abhängigkeit von Porosität und der möglichen Wegstrecke innerhalb der Laubwand parametrisiert (Sinoquet und Bonhomme, 1991). Unter der Annahme, dass die Blätter in der Laubwand gleichmäßig verteilt sind, kann die Porosität als das Verhältnis der Strahlungsflussdichte I zur Strahlungsflussdichte I_0 der auftreffenden Strahlung ausgedrückt werden:

$$I(x)/I_0 = p(x) \quad (\text{A1})$$

wobei x die zurückgelegte Wegstrecke der Strahlung in der Laubwand ist. Die äquivalente Gleichung basierend auf dem Beer-Lambertschen Gesetz lautet:

$$I(x)/I_0 = e^{-kx} \quad (\text{A2})$$

mit k als dem Extinktionskoeffizienten. Für die Porosität rechtwinklig zu einer Laubwand p_{\perp} lässt sich mit der Breite der Laubwand L und Gleichung A2 schreiben:

$$I(L)/I_0 = p_{\perp} \quad (\text{A3})$$

Aus der Kombination der Gleichungen A2 – A3 resultiert:

$$\tau(x) = p(x) = \exp(\ln(p_{\perp}) \frac{x}{L}) = p_{\perp}^{\frac{x}{L}} \quad (\text{A4})$$

wobei τ die Transmission der Laubwand bedeutet, die gleich der Porosität der Laubwand ist, wenn die Transmission einzelner Blätter vernachlässigt wird. Für ein einzelnes Photon ist die Porosität gleichbedeutend mit der Wahrscheinlichkeit dafür, dass keine Wechselwirkung stattfindet, also für Transmission (Sinoquet und Bonhomme, 1991). Da die Summe aller Wahrscheinlichkeiten der möglichen Interaktionen gleich eins sein muss folgt:

$$\tau + \rho_l(1 - \tau) + \alpha_v = 1 \quad (\text{A5})$$

Die Transmission τ ist hier durch Gleichung A4 bestimmt, $\rho_l(1 - \tau)$ ist die Wahrscheinlichkeit für Reflexion und α_v ist die resultierende Wahrscheinlichkeit der Absorption an der Laubwand der Reben. Im Fall der Interaktion eines Photons mit der Bodenoberfläche, ist die Transmission gleich 0. Mit der Albedo des Bodens ρ_s folgt für die Absorptionswahrscheinlichkeit α_s :

$$\alpha_s = 1 - \rho_s \quad (\text{A6})$$

Im Rahmen der Wasserhaushaltsmodellierung ist nur die Aufteilung der Strahlung auf die Laubwand und den Boden von Interesse. Es ist zweckmäßig, die Richtung der einfallenden Strahlung in sphärischen Koordinaten mit dem Polarwinkel θ und dem Azimutwinkel φ anzugeben. Die Summe der aus der Richtung θ, φ einfallenden Photonen $N(\theta, \varphi)$ kann, je nachdem ob die Photonen von den Reben (N_v) oder vom Boden (N_s) absorbiert oder zum Himmel rückreflektiert wurden (N_{vy}), aufgeteilt werden. Die Absorptionskoeffizienten für direkte Strahlung der Reben (a_v) und des Bodens (a_s), sowie die Albedo des Weinbergs ρ_{vy} ergeben sich somit aus den Quotienten:

$$a_v = \frac{N_v}{N(\theta, \varphi)}, a_s = \frac{N_s}{N(\theta, \varphi)}, \rho_{vy} = \frac{N_{vy}}{N(\theta, \varphi)} \quad (\text{A7})$$

Um die entsprechenden Koeffizienten für die diffuse Strahlung zu berechnen, ist zu beachten,

dass die diffuse Bestrahlungsstärke R_{dif} (in Wm^{-2}), die von einer horizontalen Fläche empfangen wird, aus dem Integral der Strahldichte L_e (in $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$), die aus einem Raumwinkelbereich $d\Omega$ ausgesendet wird, über den Halbraum resultiert:

$$R_{dif} = L_e \int_{2\pi} \cos \theta d\Omega \quad (\text{A8})$$

wobei $\cos\theta$ die Projektion des Raumwinkels in die Horizontale ist und die Strahldichte der diffusen Strahlung L_e unter der Annahme, dass die diffuse Strahlung isotropisch ist, nicht von der Richtung abhängt. Um den diffusen Strahlungsanteil zu berechnen, der von den Reben absorbiert wird ($R_{dif,v}$), muss der richtungsabhängige Absorptionskoeffizient der direkten Strahlung $a_v(\theta, \varphi)$ mit der Strahldichte L_e multipliziert und über den Halbraum integriert werden. Ausgedrückt in sphärischen Koordinaten folgt:

$$R_{dif,v} = R_{dif} a_{dif,v} = L_e \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} a_v(\theta, \varphi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi \quad (\text{A9})$$

dabei ist $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$ die Größe des Raumwinkeldifferentials in sphärischen Koordinaten und $a_{dif,v}$ der Absorptionskoeffizient der Reben für diffuse Strahlung. Um alle Richtungen der Strahlung aus dem Halbraum abzudecken, werden im numerischen Experiment die Ergebnisse für eine bestimmte Anzahl von n äquidistanten Elementen der Intervalle $0 \leq \theta \leq \pi/2$ und $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ mit den Abständen $\Delta\theta$ und $\Delta\varphi$ bestimmt. Mit den Gleichungen A8 und A9 und den Resultaten $a_v(\theta, \varphi)$ der Simulation kann $a_{dif,v}$ berechnet werden:

$$a_{dif,v} = \frac{R_{dif,v}}{R_{dif}} = \frac{\sum_{i,j=1}^n a_v(\theta_i, \varphi_j) \cos \theta_i \sin \theta_i \Delta\theta \Delta\varphi}{n \sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sin \theta_i \Delta\theta \Delta\varphi} \quad (\text{A10})$$

Mit den Absorptionskoeffizienten kann die solare Strahlung, die von den Reben R_v oder vom Boden R_s absorbiert wird, bestimmt werden:

$$R_v = a_{dif,v} R_{dif} + a_{dir,v} R_{dir} \quad (\text{A11})$$

$$R_s = a_{dif,s} R_{dif} + a_{dir,s} R_{dir} \quad (\text{A12})$$

B Anpassung des Strahlungsmodells an Steillagen

Die Aufteilung der direkten Sonnenstrahlung innerhalb des Weinbergs hängt von deren Richtung relativ zu den Reihen der Reben ab. Daher muss die Position der Sonne in einem Koordinatensystem bestimmt werden, welches fest mit dem Weinberg verbunden ist, dem Hangsystem K' (körperfestes Bezugssystem). Die Lage von K' (und damit des Weinbergs) relativ zu einem raumfesten horizontalen Bezugssystem K kann mit Eulerschen Winkeln beschrieben werden, mit denen auch die Koordinaten eines Punktes im K -System nach K' transformiert werden können. Die folgende Beschreibung ist auf Weinberge, deren Reihen hangabwärts verlaufen (der Normalfall), angepasst, wodurch die Koordinatentransformation vereinfacht wird. Die kartesischen Koordinatenachsen des K -Systems (x, y, z) sind dabei so festgelegt, dass die z -Achse Richtung Zenit, die y -Achse nach Süden und die x -Achse nach Westen zeigt. Im Hangsystem K' entspricht z' der Normalen des Weinbergs, y' zeigt hangabwärts in Richtung der Reihen und x' liegt in der Fläche des Weinbergs senkrecht zur Richtung der Reihen. Die Lage des Hangsystems kann in diesem Fall durch zwei Drehungen des horizontalen K -Systems festgelegt werden, so dass die x, y, z Achsen des gedrehten K -Systems mit den x', y', z' Achsen zur Übereinstimmung gelangen. Die erste Drehung ist um die z Achse mit dem Winkel γ und entspricht der Exposition des Weinbergs. Die zweite Drehung ist um die x' Achse (die aus der x -Achse nach der ersten Drehung hervorgeht) mit dem Winkel β und entspricht der Hangneigung. Die Drehungen müssen in positiver Drehrichtung erfolgen.

Die Winkel β und γ entsprechen Eulerschen Winkeln mit denen die Richtungskosinusse berechnet werden können, welche die Elemente einer Drehmatrix darstellen (Bronstein et al., 1999) mit der ein Punkt in x, y, z Koordinaten nach x', y', z' Koordinaten transformiert werden kann:

$$\begin{aligned}x' &= x \cos \gamma - y \cos \beta \sin \gamma + z \sin \beta \sin \gamma \\y' &= x \sin \gamma + y \cos \beta \cos \gamma - z \sin \beta \cos \gamma \\z' &= y \sin \beta + z \cos \beta\end{aligned}\tag{A13}$$

Die Position der Sonne wird durch den Zenitwinkel θ_z (Winkel zwischen der Richtung zur Sonne und der Vertikalen) und dem Azimutwinkel γ_s (Winkel zwischen der Projektion der Richtung zur Sonne in die Horizontale und Süden; Duffie und Beckmann, 2006) angegeben. Zur Bestimmung der Position der Sonne in Koordinaten des Hangsystem K' , müssen die Winkel θ_z und γ_s in x, y, z Koordinaten transformiert werden, um Gleichung A13 anwenden zu können. Die abgeleiteten x', y', z' Koordinaten können wieder transformiert werden und analog zu θ_z und γ_s als Einfallswinkel θ (Winkel zwischen der Sonnenrichtung und der

Normalen des Weinbergs) und dem Weinbergs-Azimutwinkel der Sonne γ_v (Winkel zwischen Projektion der Richtung zur Sonne in die Ebene des Weinbergs und der y' -Achse) angegeben werden. Aufgrund der Ähnlichkeit von θ_z und γ_s mit sphärischen Koordinaten werden diese Rechenschritte nicht im Detail beschrieben.

C Abschätzung der diffusen und direkten Strahlungsanteile der Solarstrahlung

Die Berechnung der diffusen und direkten Anteile der Solarstrahlung basierte auf einer Korrelation zwischen der Globalstrahlung und einem Trübungsindex nach Duffie und Beckman (2006). Die berechneten Regressionskoeffizienten basierten auf Messungen der globalen und diffusen Strahlung der Station Geisenheim des DWD von 2007-2012. Der diffuse Strahlungsanteil wurde mit einem Pyranometer und einem Schattenring gemessen. Der Einfluss des Schattenrings auf die Messwerte wurde entsprechend den Angaben des Herstellers (Kipp und Zonen B. V., Delft, Niederlande) korrigiert. Für Stundenwerte erhält man die Korrelation:

$$\frac{R_{dif}}{R_{glob}} = \begin{cases} 1.0 - 0.065k_t & (k_t \leq 0.22) \\ 1.2103 - 1.9287k_t + 7.30k_t^2 - 16.1542k_t^3 + 10.0073k_t^4 & (0.22 < k_t \leq 0.8) \\ 0.1675 & (k_t > 0.8) \end{cases} \quad (A14)$$

und für Tageswerte:

$$\frac{R_{dif}}{R_{glob}} = \begin{cases} 1.0 - 0.039k_t & (k_t \leq 0.22) \\ 0.8501 + 2.4950k_t - 12.2301k_t^2 + 16.8298k_t^3 - 8.7824k_t^4 & (0.22 < k_t \leq 0.8) \\ 0.1727 & (k_t > 0.8) \end{cases} \quad (A15)$$

wobei der Trübungsindex $k_t = R_{glob}/R_0$ das Verhältnis der Globalstrahlung R_{glob} zur extraterrestrischen Strahlung R_0 und R_{dif} die Diffusstrahlung ist.

7 Literatur

- Ainsworth, E. A., and Rogers, A. (2007). The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. *Plant, Cell & Environment* 30, 258–270. doi: 10.1111/j.1365-3040.2007.01641.x
- Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rösch, T., and Siebert, S. (2003). Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability. *Hydrological Sciences Journal* 48, 317-337. doi: 10.1623/hysj.48.3.317.45290.
- Allen, R.G. (2011). Skin layer evaporation to account for small precipitation events—An enhancement to the FAO-56 evaporation model. *Agricultural Water Management* 99, 8-18.
- Allen, R.G., Trezza, R., and Tasumi, M. (2006). Analytical integrated functions for daily solar radiation on slopes. *Agricultural and Forest Meteorology* 139, 55-73.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. Rome: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Allen, R.G., Walter, I.A., Elliot, R., Howell, T., Itenfisu, D., and Jensen, M. (2005). The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. *ASCE-EWRI Task Committee Report*.
- Berdeja, M., Hilbert, G., Dai, Z.W., Lafontaine, M., Stoll, M., Schultz, H.R., and Delrot, S. (2014). Effect of water stress and rootstock genotype on Pinot Noir berry composition. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 20, 409-421.
- Blümel, K. und Chmielewski, F.M. (2010). Rasterung der neuen DWD-Stationsdaten und „BIAS“-Korrektur der Modelle. INKLIM-A Daten AG, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden
- Bordese, M., and Alini, W. (2012). biOps: Image processing and analysis. R package version 0.2.2, <http://CRAN.R-project.org/package=biOps>.
- Boucher, O., Jones, A., and Betts, R.A. (2009). Climate response to the physiological impact of carbon dioxide on plants in the Met Office Unified Model HadCM3. *Climate Dynamics* 32, 237-249. doi: 10.1007/s00382-008-0459-6.
- Braun, P., and Schmid, J. (1999). Sap flow measurements in grapevines (*Vitis vinifera* L.) 2. Granier measurements. *Plant and Soil* 215, 47-55.
- Brisson, N., and Perrier, A. (1991). A Semiempirical Model of Bare Soil Evaporation for Crop Simulation Models. *Water Resources Research* 27(5), 719-727.
- Bronstein, I.N., Semendjajew, K.A.G., and Hühlig, H. (1999). *Taschenbuch der Mathematik*. Thun und Frankfurt am Main: Harri Deutsch.

Celette, F., Gaudin, R., and Gary, C. (2008). Spatial and temporal changes to the water regime of a Mediterranean vineyard due to the adoption of cover cropping. *European Journal of Agronomy* 29, 153-162.

Celette, F., Ripoche, A., and Gary, C. (2010). WaLIS--A simple model to simulate water partitioning in a crop association: The example of an intercropped vineyard. *Agricultural Water Management* 97, 1749-1759.

Cook, B.I., and Wolkovich, E.M. (2016). Climate change decouples drought from early wine grape harvests in France. *Nature Climate Change* advance online publication. doi: 10.1038/nclimate2960

Cronshey, R., Mccuen, R.H., Miller, N., Rawls, W., Robbins, S., and Woodward, D. (1986). "Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55", (ed.) United States Department of Agriculture - NRCS.

Duffie, J.A., and Beckman, W.A. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken: John Wiley & Sons.

Ebrahimian, M., Nuruddin, A.a.B., Soom, M., Sood, A.M., and Neng, L.J. (2012). Runoff Estimation in Steep Slope Watershed with Standard and Slope-Adjusted Curve Number Methods. *Polish Journal of Environmental Studies* 21, 1191-1202.

Emde, K. (1992). Experimentelle Untersuchungen zu Oberflächenabfluß und Bodenaustrag in Verbindung mit Starkregen bei verschiedenen Bewirtschaftungssystemen in Weinbergsarealen des oberen Rheingaus. *Geisenheimer Berichte* 12.

Gates, D.M. (1980). *Biophysical Ecology*. New York: Springer-Verlag.

Gaudillère, J.P., Van Leeuwen, C., and Ollat, N. (2002). Carbon isotope composition of sugars in grapevine, an integrated indicator of vineyard water status. *Journal of Experimental Botany* 53, 757-763. doi: 10.1093/jexbot/53.369.757.

Gaudin, R., Celette, F., and Gary, C. (2010). Contribution of runoff to incomplete off season soil water refilling in a Mediterranean vineyard. *Agricultural Water Management* 97, 1534-1540. doi: 10.1016/j.agwat.2010.05.007.

Gladstone, E.A., and Dokoozlian, N.K. (2003). Influence of leaf area density and trellis/training system on the light microclimate within grapevine canopies. *Vitis* 42, 123-131.

Granier, A. (1985). Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des sciences forestières* 42, 193-200.

Gruber, B.R., and Schultz, H.R. (2005). Coupling of plant to soil water status at different vineyard sites. *Acta Hort. (ISHS)* 689, 381-390.

Hannah, L., Roehrdanz, P.R., Ikegami, M., Shepard, A.V., Shaw, M.R., Tabor, G., Zhi, L., Marquet, P.A., and Hijmans, R.J. (2013). Climate change, wine, and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, 6907-6912. doi: 10.1073/pnas.1210127110.

- Hirose, T. (2005). Development of the Monsi-Saeki theory on canopy structure and function. *Annals of Botany* 95, 483-494. doi: 10.1093/aob/mci047.
- Hofmann, M. und Schultz, H.R. (2010). Warum es seit 1989 wieder heller wird. *Der Deutsche Weinbau* 16-17, 32-34.
- Hofmann, M., and Schultz, H.R. (2015). "Modeling the water balance of sloped vineyards under various climate change scenarios", in: *BIO Web of Conferences - 38th World Congress of Vine and Wine*. (ed.) J.-M. Aurand. (Mainz). doi: 10.1051/bioconf/20150501026.
- Hofmann, M., Lux, R., and Schultz, H.R. (2014). Constructing a framework for risk analyses of climate change effects on the water budget of differently sloped vineyards with a numeric simulation using the Monte Carlo method coupled to a water balance model. *Frontiers in Plant Science* 5, 1-22. doi: 10.3389/fpls.2014.00645.
- Hofmann, M., Stoll, M. und Schultz, H.R. (2016). Klimawandel und Weinbau. *Geographische Rundschau* 3, 20-26.
- Hoppmann, D. (2010). *Terroir: Wetter, Klima und Boden im Weinbau*. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer Verlag.
- Huang, M., Gallichand, J., Wang, Z., and Goulet, M. (2006). A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. *Hydrological Processes* 20, 579-589. doi: 10.1002/hyp.5925.
- HLNUG (2008), Bodenflächendaten weinbauliche Nutzfläche 1:5000 BFD5W, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden.
- Jacob, D. (2005). REMO A1B SCENARIO RUN, UBA PROJECT, 0.088 DEGREE RESOLUTION, RUN NO. 006211, 1H DATA. World Data Center for Climate. CERA-DB "REMO_UBA_A1B_1_R006211_1H"
http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=REMO_UBA_A1B_1_R006211_1H
- Jones, G., White, M., Cooper, O., and Storchmann, K. (2005a). Climate Change and Global Wine Quality. *Climatic Change* 73, 319-343.
- Jones, G.V., Duchène, E., Tomasi, D., Yuste, J., Bratislavská, O., Schultz, H.R., Martínez, C., Boso, S., Langellier, F., Perruchot, C., and Guimberteau, G. (2005b). "Changes in European Winegrape Phenology and Relationships with Climate", in: *XIV International GESCO-Viticulture-Congress*, ed. H.R. Schultz (Geisenheim: Gesellschaft zur Förderung der Forschungsanstalt Geisenheim), 55-61.
- Kreienkamp, F., Enke, W., and Spekat, A. (2010). WR2010_EH5_1_A1B: UBA-WETTREG ECHAM5/OM 20C + A1B Lauf 1 realization run 1961-2100. World Data Center for Climate. CERA-DB "WR2010_EH5_1_A1B"
http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=WR2010_EH5_1_A1B
- Kreienkamp, F., Huebener, H., Linke, C., and Spekat, A. (2012). Good practice for the usage of climate model simulation results - a discussion paper. *Environmental Systems Research* 1, 1-13. doi: 10.1186/2193-2697-1-9.

- Lautenschlager, M., Keuler, K., Wunram, C., Keup-Thiel, E., Schubert, M., Will, A., Rockel, B., and Boehm, U. (2009). Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no.1, Data Stream 3: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. doi:DOI:10.1594/WDCC/CLM_A1B_1_D3. http://dx.doi.org/DOI:10.1594/WDCC/CLM_A1B_1_D3
- Lebon, E., Dumas, V., Pieri, P., and 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., and Zimmer, T. (2004). Die Standortkartierung der hessischen Weinbaugebiete. *Geologische Abhandlungen Hessen* 114.
- Malheiro, A.C., Santos, J.A., Fraga, H., and Pinto, J.G. (2010). Climate change scenarios applied to viticultural zoning in Europe. *Climate Research* 43, 163-177. doi: 10.3354/cr00918.
- Maniak, U. (2010). *Hydrologie und Wasserwirtschaft*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Matthews, M.A., Anderson, M.M., and Schultz, H.R. (1987). Phenologic and growth responses to early and late season water deficits in Cabernet franc. *Vitis* 26, 147-160.
- McLeod, A.I. (2013). Kendall: Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test. R package version 2.2. <http://CRAN.R-project.org/package=Kendall>.
- Modest, M.F. (2003). *Radiative Heat Transfer*. Oxford: Elsevier Science.
- Moriondo, M., Jones, G.V., Bois, B., Dibari, C., Ferrise, R., Trombi, G., and Bindi, M. (2013). Projected shifts of wine regions in response to climate change. *Climatic Change* 119, 825-839. doi: 10.1007/s10584-013-0739-y.
- Nakićenović, N., Alcamo, J., and Davis, G. (2000). *Special Report on Emissions Scenarios*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Ojeda, H., Deloire, A., and Carbonneau, A. (2001). Influence of water deficits on grape berry growth. *Vitis* 40, 141-145.
- Pellegrino, A., Lebon, E., Voltz, M., and Wery, J. (2004). Relationship between plant and soil water status in vine (*Vitis vinifera* L.). *Plant and Soil* 266, 129-142.
- Pfister, S., Koehler, A., and Hellweg, S. (2009). Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA. *Environmental Science & Technology* 43, 4098-4104. doi: 10.1021/es802423e.
- Pieri, P., and Lebon, E. (2014). Modelling the future impacts of climate change on French vineyards. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* Special Issue Laccave, 35-43.
- Poni, S., Rebucci, B., Magnanini, E., and Intrieri, C. (1996). Preliminary results on the use of a modified point quadrat method for estimating canopy structure of grapevine training systems. *Vitis* 35, 23-28.

- R development core team. (2012). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing
- Reindl, D.T., Beckman, W.A., and Duffie, J.A. (1990). Evaluation of hourly tilted surface radiation models. *Solar Energy* 45, 9-17.
- Riou, C., Valancogne, C., and Pieri, P. (1989). Un modèle simple d'interception du rayonnement solaire par la vigne - vérification expérimentale. *Agronomie* 9, 441-450.
- Ritchie, J.T. (1972). Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research* 8, 1204-1213.
- Rockel, B., Will, A., and Hense, A. (2008). The Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift* 17, 347-348.
- Savoi, S., Wong, D.C.J., Arapitsas, P., Miculan, M., Bucchetti, B., Peterlunger, E., Fait, A., Mattivi, F., and Castellarin, S.D. (2016). Transcriptome and metabolite profiling reveals that prolonged drought modulates the phenylpropanoid and terpenoid pathway in white grapes (*Vitis vinifera* L.). *Bmc Plant Biology* 16. doi: 10.1186/s12870-016-0760-1.
- Schaer, Ch., and Christensen, O.B. (2013). RT3_ETHZ-CLMHadCM3Q0. World Data Center for Climate. CERA-DB "RT3_ETHZ-CLMHadCM3Q0"
http://cera-www.dkrz.de/WDC/compact.jsp?acronym=RT3_ETHZ-CLMHadCM3Q0
- Schultz, H.R. (1995). Grape canopy structure, light microclimate and photosynthesis. 1. A two-dimensional model of the spatial distribution of surface area densities and leaf ages in two canopy systems. *Vitis* 34, 211-215.
- Schultz, H.R., and Lebon, E. (2005). Modeling the effect of climate change on grapevine water relations. *Acta Horticulturae* 689, 71-78.
- Schultz, H.R. und Hofmann, M. (2008). Einfluss der Klimaentwicklung auf den Wasserhaushalt von Rebstandorten - Möglichkeiten der Modellierung von Steillagenregionen. Abschlussbericht zum Integrierten Klimaschutzprogramm des Landes Hessen (Inklim 2012 II plus). Wiesbaden, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie.
- Schultz, H.R., and Jones, G.V. (2010). Climate Induced Historic and Future Changes in Viticulture. *Journal of Wine Research* 21, 137 - 145.
- Schultz, H.R., and Stoll, M. (2010). Some critical issues in environmental physiology of grapevines: future challenges and current limitations. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 16, 4-24.
- Schultz, H.R., and Hofmann, M. (2016). "The ups and downs of environmental impact on grapevines" in *Grapevine in a Changing Environment: A Molecular and Ecophysiological Perspective*, 18-37. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester, UK. doi: 10.1002/9781118735985.ch2.

- Sinclair, T.R., and 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.
- Sinoquet, H., and Bonhomme, R. (1991). A theoretical analysis of radiation interception in a two-species plant canopy. *Mathematical Biosciences* 105, 23-45.
- Sonnentag, O., Hufkens, K., Teshera-Sterne, C., Young, A.M., Friedl, M., Braswell, B.H., Milliman, T., O'Keefe, J., and Richardson, A.D. (2012). Digital repeat photography for phenological research in forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology* 152, 159-177.
- Tonietto, J., and Carbonneau, A. (2004). A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology* 124, 81-97. doi: 10.1016/j.agrformet.2003.06.001
- Trambouze, W., and Voltz, M. (2001). Measurement and modeling of the transpiration of a Mediterranean vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology* 107, 153-166.
- Uliarte, E.M., Schultz, H.R., Frings, C., Pfister, M., Parera, C.A., and Del Monte, R.F. (2013). Seasonal dynamics of CO₂ balance and water consumption of C₃ and C₄-type cover crops compared to bare soil in a suitability study for their use in vineyards in Germany and Argentina. *Agricultural and Forest Meteorology* 181, 1-16. doi: 10.1016/j.agrformet.2013.06.019.
- Ward, A.D., and Trimble, S.W. (2003). *Environmental Hydrology*. Boca Raton London New York: CRC Press.
- Wild, M., Gilgen, H., Roesch, A., Ohmura, A., Long, C.N., Dutton, E.G., Forgan, B., Kallis, A., Russak, V., and Tsvetkov, A. (2005). From Dimming to Brightening: Decadal Changes in Solar Radiation at Earth's Surface. *Science* 308, 847-850. doi: 10.1126/science.1103215.
- Williams, L.E., and Matthews, M.A. (1990). "Grapevine" in *Irrigation of Agricultural Crops*, eds. B.A. Stewart & D.R. Nielsen. Agronomy Monograph No. 30 (Madison, WI: ASA-CSSA-SSSA), 1019-1055.
- Yin, X. (2013). Improving ecophysiological simulation models to predict the impact of elevated atmospheric CO₂ concentration on crop productivity. *Annals of Botany* 112, 465-475. doi: 10.1093/aob/mct016