KlimLandRP

Klima- und Landschaftswandel
in Rheinland-Pfalz

Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft und den Weinbau in Rheinland-Pfalz

Schlussbericht Modul Landwirtschaft

Laufzeit:	01.04.2008-30.09.2011 (3,5 Jahre)
Berichtszeitraum:	April 2008 - Mai 2010
Homepage:	www.kwis-rlp.de

Projektpartner:

Autorenverzeichnis

Modul Landwirtschaft

Dr. Matthias Trapp

RLP Agroscience GmbH, Institut für Agrarökologie
Breitenweg 71, 67435 Neustadt an der Weinstraße
E-mail: matthias.trapp@agroscience.rlp.de
Telefon: +49 (0) 6321-671-426

Gregor Tintrup gen. Suntrup

RLP Agroscience GmbH, Institut für Agrarökologie
Breitenweg 71, 67435 Neustadt an der Weinstraße
E-mail: gregor.tintrup@agroscience.rlp.de
Telefon: +49 (0) 6321-671-424

Christian Kotremba

RLP Agroscience GmbH, Institut für Agrarökologie
Breitenweg 71, 67435 Neustadt an der Weinstraße
E-mail: christian.kotremba@agroscience.rlp.de
Telefon: +49 (0) 6321-671-481

Zitierhinweis:

TRAPP, M., TINTRUP gen. SUNTRUP, G. und KOTREMBA, C. (2013): Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft und den Weinbau in Rheinland-Pfalz. – RHEINLAND-PFALZ KOMPETENZZENTRUM FÜR KLIMAWANDELFOLGEN [Hrsg.]: Schlussberichte des Landesprojekts Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz (KlimLandRP), Teil 3, Modul Landwirtschaft 170 S.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **3**

Abbildungsverzeichnis **6**

Tabellenverzeichnis **9**

1 Einleitung **10**

2 Zielsetzung und Forschungsfragen **13**

3 Stand des Wissens **15**
3.1 Klimawandel und Landwirtschaft 15
3.2 Geoinformationssysterme in der Landwirtschaft 18

4 Klima und Klimaänderung in Rheinland-Pfalz **20**

5 Material **29**
5.1 Geo (-basis) daten 29
5.1.1 Vektordaten 29
5.1.2 Katasterdaten (ALK/ ALKIS) 30
5.1.3 Bodendaten 30
5.1.4 Hochauflösende Anbaudaten 31
5.1.5 Ertragsdaten: Zuckerrüben 32
5.2 Rasterdaten 32
5.2.1 Digitale Höhenmodelle 32
5.3 Klimadaten 34
5.3.1 Stationsdaten 35
5.3.2 Interpolierte Klimadaten für flächenbezogene Auswertungen 36
5.4 Software 37
5.4.1 Geoinformationssysteme 37
5.4.2 Programmiersprache und Softwareumgebung „R“ 38

6 Methoden I – Übergeordnete Ansätze **39**
6.1 Geodatenbasis und GIS-basierte Standortanalysen 40
Was ist ein Standort? – Basisgeometrie ALK Folie 21 40
6.2 Charakterisierung eines Standorts – Geodatenprozessierungen zur Schaffung einer geeigneten Geodatenbasis 41
6.2.1 Reliefanalyse 41
6.2.2 Einbindung von Bodendaten 42
6.3 Zeitreihenanalysen von Klimadaten 45
6.3.1 Repräsentanz der interpolierten Klimadaten – Index zur Abschätzung der Reliefvariabilität 46

7 Methoden II – Weitergehende Fragestellungen **51**
7.1 Zusammenwirken naturräumlicher Standortfaktoren im Klimawandel – Ableitung einer Basistoleranz gegenüber reduzierten Niederschlägen 51
Normierung und Ermittlung der Klassengrenzen 52
7.2 Verknüpfung statischer und dynamischer Standortfaktoren – Ableitung eines Standortklimaindex unter Berücksichtigung der klimatischen Wasserbilanz 53
7.3 Weinbau 55
7.3.1 Rieslingmodell nach Hoppmann & Berkelmann-Löhnertz 56

Die Auswertungen liegen für die oben genannten Stationen für die Zeitreihen 1971-2100 (WETTREG2006) und 1971-2060 (STAR) vor. Dabei liegen dem Zeitraum 1971-2000 gemessene Werte zugrunde. Die Zeiträume 2001-2100 (WETTREG2006) und 2001-2060 (STAR) stützen sich auf simulierte Klimawerte der genannten Klimamodelle. Für WETTREG2006 wurden die Szenarien A1B-normal, A1B-trocken, A2-normal, A2-trocken und für STAR die Szenarien A1B-normal und A1B-trocken analysiert ... 57
7.3.2 Huglin-Index ... 57
7.4 Grünland ... 58
7.4.1 Veränderung des Verlaufs und der Länge der Vegetationsperiode ... 58
7.4.2 Toleranz von Grünlandstandorten gegenüber veränderten hygrischen Verhältnissen ... 59
7.4.3 Klimawandelfolgen für Grünlandflächen – Umsetzung einer GIS-basierten Ertragsmodellierung auf rheinland-pfälzische Verhältnisse ... 60
7.5 Ackerbau ... 61
7.5.1 Vernalisation ... 62
7.5.2 Kulturspezifische Charakterisierung ackerbaulich genutzter Standorte hinsichtlich ihrer Wasserversorgung ... 63
7.5.3 Auftreten ertragsschwacher Jahre bei der Zuckerrübe ... 63

8 Ergebnisse ... 65
8.1 Standortcharakterisierung auf Basis der Geodatenbasis ALK++ ... 65
8.2 Standortindex der Basistoleranz gegenüber reduzierten Niederschlägen - landwirtschaftliche Standorte in Rheinland-Pfalz ... 71
8.3 Standortklimaindex – Toleranz landwirtschaftlicher Standorte in Rheinland-Pfalz gegenüber einem veränderten Wasserhaushalt ... 74
8.4 Weinanbau – Großer Gewinner des Klimawandels? ... 77
8.4.1 Hoher thermischer Anspruch - Weinbauklima ... 79
8.4.2 Huglin-Index – Einteilung verschiedener Rebsorten hinsichtlich ihres Wärmebedarfs ... 80
8.4.3 Rebphänologie – Verfrühung der Eintrittszeitpunkte wichtiger phänologischer Phasen ... 86
8.4.4 Klimatische Kenngrößen unter Betrachtung veränderter Eintrittszeitpunkte phänologischer Phasen ... 88
8.4.5 Wasserversorgung der Rebe ... 95
8.4.6 Entwicklung von Starkniederschlägen ... 97
8.4.7 Zwischenfazit für den Weinbau ... 98
8.5 Grünlandbewirtschaftung – Großer Verlierer des Klimawandels? ... 100
8.5.1 Veränderung des Verlaufs und der Länge der Vegetationsperiode an repräsentativen Standorten ... 101
8.5.2 Veränderung des Verlaufs und der Länge der Vegetationsperiode – flächenbasierte Auswertungen ... 105
8.5.3 Aufwuchsdauer und Schnitthäufigkeit ... 108
8.5.4 Grünlandstandorte – Toleranz gegenüber veränderten hygrischen Verhältnissen ... 109
8.5.5 Zwischenfazit für die Grünlandbewirtschaftung ... 113
8.6 Ackerbau – Wer sind die Gewinner und Verlierer des Klimawandels? ... 113
8.6.1 Winterweizen ... 115

8.6.2 Winterraps ... 124
8.6.3 Sommergerste ... 128
8.6.4 Mais ... 130
8.6.5 Zuckerrübe ... 134
8.6.6 Fazit für den Ackerbau ... 145

9 Diskussion ... 146
9.1 Aufbau einer Geodatenbasis (ALK++) ... 146
9.2 Standortindex Basistoleranz ... 147
9.3 Standortklimaindex ... 147
9.4 Weinbau im Klimawandel ... 149
9.5 Grünland im Klimawandel ... 152
9.6 Ackerbau im Klimawandel ... 156

10 Zusammenfassung und Ausblick ... 159

Literatur ... 165

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Landwirtschaftliche Nutzungen in Rheinland-Pfalz (eigene Darstellung, Datengrundlage: LVermGeo RLP 2010) 11
Abb. 2: Klimadiagramm von Bernkastel (eigene Darstellung, Datengrundlage DWD) 20
Abb. 3: Temperaturverhältnisse in Rheinland-Pfalz für den Referenzzeitraum 1971-2000 (eigene Darst., Datengrundlage DWD, LUWG) 21
Abb. 4: Jahresniederschlag und Evapotranspiration in RHEINLAND-PFALZ für den Referenzzeitraum 1971-2000 (eigene Darst., Datengrundlage DWD, LUWG) 22
Abb. 5: Luv-Lee-Index (eigene Darst., Datengrundlage NASA) 23
Abb. 6: Entwicklung der zukünftigen thermischen und hygrischen Verhältnisse am Standort Mainz als Abweichung vom Mittelwert des Referenzzeitraums (1971-2000), Szenario: WETTREG2006 A1B-trocken 25
Abb. 7: Entwicklung der zukünftigen Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse im Sommerhalbjahr (April-September) als Abweichung vom Mittelwert des Referenzzeitraums (1971-2000), Projektion WETTREG2006 A1B-trocken 26
Abb. 8: Klimatische Wasserbilanz während der Hauptvegetationsperiode (Mai – Oktober) für landwirtschaftlich genutzte Standorte (eigene Darst., Datengrundlage DWD) 27
Abb. 9: Klimatische Wasserbilanz auf landwirtschaftlich genutzten Standorten während der Hauptvgetationsperiode (Mai – Oktober) für die nahe und für die ferne Zukunft, Szenario: WETTREG2006 A1B-trocke 28
Abb. 10: Kombination verschiedener Geoinformationen mit gleichem Raumbezug im GIS (Quelle: ESRI 2010) 29
Abb. 11: Elemente von Vektorgeometrien (Quelle: ERDAS Field Guide 2010) 30
Abb. 12: Formen rasterbasierter Geoinformation (Quelle: ESRI 2012, verändert) 32
Abb. 13: Digitales Geländemodell (DTM: englisch digital terrain model) mit Ableitungen 34
Abb. 14: SRES-Emissionsszenarien für das 21. Jahrhundert – globale Erwärmung (IPCC 2007) 36
Abb. 15: Übertragung von Werten kontinuierlicher Rasterinformationen in die Datenbank diskreter Objekte 42
Abb. 16: Berechnung des arithmetischen (oben) und des flächengewichteten Mittels (unten) 43
Abb. 17: Prozesskette zur Berechnung flächengewichteter statistischer Kennwerte 44
Abb. 18: Reliefvariabilität in Rheinland-Pfalz (eigene Darst.) 48
Abb. 19: Statistische Auswertung zur Reliefvariabilität in Rheinland-Pfalz 49
Abb. 20: Reliefvariabilität an Mittelrhein (links) und Mittelmosel (rechts) (eigene Darst.) 49
Abb. 21: Hangneigung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Rheinland-Pfalz nach Klassen 66
Abb. 22: Hangneigung weinbaulich genutzter Standorte in Rheinland-Pfalz 66
Abb. 23: Beispiel der Hangneigung von Weinanbauflächen an der Mittelmosel (Datengrundlage LVermGeo Rheinland-Pfalz) 67
Abb. 24: Nutzbare Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraumes (in mm) auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in Rheinland-Pfalz 68
Abb. 25: Nutzbare Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraumes (in mm) auf ackerbaulich genutzten Teilflurstücken 69
Abb. 26: nutzbare Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraumes (in mm) auf ackerbaulich genutzten Flächen in Rheinhessen (Datengrundlage LVermGeo Rheinland-Pfalz) 70
Abb. 27: Standortindex zur Basistoleranz gegenüber reduzierten Niederschlägen an der Mittelmosel (Datengrundlage LVermgeo Rheinland-Pfalz) 72
Abb. 28: Standortindex der Basistoleranz gegenüber reduzierten Niederschlägen – landwirtschaftliche Standorte in Rheinland-Pfalz / Naheeinzugsgebiet (Datengrundlage LVermGeo Rheinland-Pfalz) 73
Abb. 29: Standortklimaindex für den Zeitraum 1971–2000 auf landwirtschaftlich genutzten Standorten an der Mittelmosel (Datengrundlage LVERMGEO Rheinland-Pfalz & DWD) 75

Abb. 30: Standortklimaindex für die nahe Zukunft (2021–2050) auf landwirtschaftlich genutzten Standorten an der Mittelmosel (Datengrundlage LVERMGEO Rheinland-Pfalz, Projektion: WETTREG 2006 A1B-trocken) 76
Abb. 31: Standortklimaindex für die ferne Zukunft (2071–2100) auf landwirtschaftlich genutzten Standorten der Mittelmosel (Datengrundlage LVERMGEO Rheinland-Pfalz, Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken) 77
Abb. 32 Weinanbauflächen in Rheinland-Pfalz (Datengrundlage Lvermgeo Rheinland-Pfalz) 78
Abb. 33: Zeitschnitte für die zukünftige Entwicklung des Huglin-Index in Rheinland-Pfalz (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken) 81
Abb. 34: Entwicklung des Huglin Index an Weinbaustandorten in Rheinland-Pfalz (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken) 82
Abb. 35: Entwicklung des Huglin-Index am Standort Koblenz nach ausgewählten Klimasimulationen (Szenarien: STAR und WETTREG2006) 83
Abb. 36: Entwicklung des Huglin-Index am Beispiel des 30-jährigen gleitenden Mittels am Standort Bad Neuenahr (Projektionen: STAR und WETTREG2006) 84
Abb. 37: Eintrittszeitpunkte der wichtigsten phänologischen Phasen am Standort Trier (WETTREG2006 A1B-trocken) 87
Abb. 38: Entwicklung der radiativen Spätfrostgefährdung am Standort Alzey (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken) 90
Abb. 39: Entwicklung der thermischen Spätfrostgefährdung am Standort Alzey (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken) 91
Abb. 40: Thermische Wachstumsbedingungen während der Phase Blüte-Reifebeginn am Standort Roxheim (Projektion: WETTREG 2006 A1B-trocken) 92
Abb. 41: Thermische nächtliche Wachstumsbedingungen während der Reifezeit am Standort Roxheim (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken) 93
Abb. 42: Thermische Wachstumsbedingungen tagsüber während der Reifezeit am Standort Roxheim (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken) 94
Abb. 43: Anzahl möglicher Eisweintage am Standort Bernkastel-Kues (Mosel) am Beispiel der Projektion WETTREG2006 A1B-trocken 95
Abb. 44: Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz der rheinland-pfälzischen Weinbaustandorte während der Hauptvegetationsperiode (Mai-Oktober) für drei Zeitscheiben (Projektion: WETTREG 2006 A1B-trocken) 97
Abb. 45: Anzahl der Starkniederschläge (Juni – September) pro Dekade am Beispiel der rheinhessischen Weinbaustandorte Mainz und Worms (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken) 98
Abb. 46: Verbreitung der Grünlandbewirtschaftung in Rheinland-Pfalz (eigene Darst., Datengrundlage: LVERMGEO Rheinland-Pfalz) 100
Abb. 47: Verlauf und Länge der Vegetationsperiode am Beispiel von Nürburg (Projektion WETTREG2006 A1B-trocken) 102
Abb. 48: Verlauf und Länge der Vegetationsperiode am Beispiel von Pirmasens (Projektion STAR A1B-normal) 103
Abb. 49: Flächenhafter Vegetationsbeginn im Grünland (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken) 105
Abb. 50: Flächenhafte Vegetationsdauer im Grünland (Szenario WETTREG2006 A1B-trocken) 107
Abb. 51: Schnittregime für verschiedene Zeiträume (eigene Darst, Projektion WETTREG2006 A1B-trocken) 108
Abb. 52: Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz der Dauergrünlandflächen während der Hauptvegetationsperiode (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken) 111
Abb. 53: Klimatische Wasserbilanz auf Grünlandstandorten in Rheinland-Pfalz (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken) 112
Abb. 54: Zeitliche Entwicklung von positiver und negativer KWB auf Grünlandstandorten in Rheinland-Pfalz (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken) 112

Abb. 55: Ackerbaulich genutzte Standorte in Rheinland-Pfalz (Datengrundlage: LVERM Geo Rheinland-Pfalz) ... 114
Abb. 56: Winterweizenstandorte in Rheinland-Pfalz (Datengrundlage: LBD Rheinland-Pfalz 2010) ... 116
Abb. 57: Mittlere Vernalisationsdauer für Winterweizen pro Dekade am Standort Koblenz (Projektionen: WETTREG2006 und STAR) ... 117
Abb. 58: Veränderung der klimatischen Wasserbilanz während der Hauptvegetationsperiode Mai bis Oktober (Flächenanteil in %) auf Winterweizenstandorten (eigene Darst., Projektion WETTREG2006 A1B-trocken) ... 121
Abb. 59: Zeitliche Entwicklung der Trockenstresstoleranz auf Winterweizenstandorten südlich des Koblenzer Beckens auf Basis des Standortklimaindex (Datengrundlage: LBD Rheinland-Pfalz 2010, Projektion WETTREG2006 A1B-trocken) ... 123
Abb. 60: Winterrapsanbau in Rheinland-Pfalz (Datengrundlage: LBD Rheinland-Pfalz 2010) ... 125
Abb. 61: Veränderung der klimatischen Wasserbilanz während der Hauptvegetationsperiode Mai–Oktober auf Winterrapsstandorten (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken) ... 127
Abb. 62: Sommergersteanbau in Rheinland-Pfalz (Datengrundlage: LBD Rheinland-Pfalz 2010) ... 128
Abb. 63: Veränderung der klimatischen Wasserbilanz während der Hauptvegetationsperiode Mai – Oktober (Flächenanteil in %) auf Sommergersteflächen (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken) ... 130
Abb. 64: Räumliche Verteilung des Maisanbaus nach Sorten in Rheinland-Pfalz (LBD Rheinland-Pfalz) ... 132
Abb. 65: Klimatische Wasserbilanz des Maisanbaus in Rheinland-Pfalz (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken) ... 134
Abb. 66: Zuckerrübenanbau in Rheinland-Pfalz (Datengrundlage: LBD Rheinland-Pfalz) ... 135
Abb. 67: Entwicklung der Zuckerrübenerträge in Mainz, Worms und Frankenthal (1949-2006). (Darst. nach Kremer 2011, Datengrundlage: Verband der Hessisch-Pfälzischen Zuckerrübenanbauer e.V. (1949-2006)) ... 137
Abb. 68: Real erzielter Ertrag, 0,75 % züchtungsbereinigter Ertrag, 0,9 % züchtungsbereinigter Ertrag in Mainz 1949-2006 (Darst. nach Kremer 2011, Datengrundlage: Verband der hessischpfälzischen Zuckerrübenanbauer e.V.). ... 139
Abb. 69: Zusammenhang des um 0,75 % züchtungsbereinigten Ertrags (t/ha) und der Niederschlagssumme (in mm) von Juni bis September in Mainz 1961-2000, Darstellung nach Kremer (2011), Datengrundlage: Verband der hessisch-pfälzischen Zuckerrübenanbauer e.V.; DWD). ... 140
Abb. 70: Tagesmitteltemperatursumme über die Vegetationsperiode 1961-2000 in Mainz und Worms; durchgezogene, farbige Linien: Lineartrends; schwarze durchgezogene Linie: 2.900 K Schwellenwert nach Röstel (1999), Darstellung nach Kremer (2011), Datengrundlage: DWD ... 141
Abb. 71: 0,9 % züchtungsbereinigter Ertrag in Abhängigkeit von der Tagesmaximumtemperatursumme der Monate Juli plus August in Worms 1951-2003 (Darst. nach Kremer 2011, Datengrundlage: Verband der hessisch pfälzischen Zuckerrübenanbauer e.V., DWD ... 142

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Landwirtschaftlich genutzte Fläche nach Sektoren (STATISTISCHES LANDESAMT 2012) 11
Tab. 2: Zusammenfassung möglicher Auswirkungen einer Temperaturerhöhung auf Pflanzen (verändert und ergänzt nach Hertstein et al. 1994) 17
Tab. 3: Klasseneinteilung der verwendeten Parameter (eigene Darst.) 52
Tab. 4: Klassifizierung der klimatischen Wasserbilanz der HVP zur Entwicklung des SKI 53
Tab. 5: Einteilung des Huglin-Index mit Rebsorteneignung (eigene Darst., verändert nach Stock et al. 2007) 57
Tab. 6: Statistik zum Standortindex Basistoleranz 73
Tab. 7: Veränderung des Standortklimaindex (SKI) auf landwirtschaftlichen Standorten in Rheinland-Pfalz für drei Zeitscheiben (Flächenanteil in %) 74
Tab. 8: Weinanbaugebiete in Rheinland-Pfalz nach bestockter Rebfläche der Keltertrauben 2010 (eigene Darstellung, verändert nach STATISTISCHES LANDESAMT 2010) 79
Tab. 9: Entwicklung des Huglin-Index (Dekadenmittel) nach ausgewählten Klimasimulationen an allen untersuchten Klimastationen unter Berücksichtigung der Standardabweichung (in Klammern) 85
Tab. 10: Überblick über die Eintrittszeitpunkte der wichtigsten phänologischen Phasen nach Dekaden und ausgewählten Klimasimulationen für weinbaurelevante Standorte 88
Tab. 11: Toleranz von Weinbaustandorten in Rheinland-Pfalz gegenüber Trockenstress auf Basis des Standortindex Basistoleranz (BTW) 96
Tab. 12: Verlauf und Länge der Vegetationsperiode als Dekadenmittel an ausgewählten Grünlandstandorten für verschiedene Szenarien 104
Tab. 13: Trockenstresstoleranz auf Dauergrünlandflächen 110
Tab. 14: Kulturarten nach Flächengröße (eigene Darst., verändert nach Statistisches Landesamt 2010) 115
Tab. 15: Anzahl der Unterschreitungen der kritischen 40-Tage-Marke pro Dekade in Koblenz 118
Tab. 16: Vernalisationsdauer (Dekadenmittel) an Winterweizenstandorten nach ausgewählten Szenarien (Standardabweichung in Klammern) 119
Tab. 17: Toleranz der Winterweizenstandorte gegenüber reduzierten Sommerniederschlägen (Flächenanteil in %) auf Basis des Standortindex Basistoleranz 120
Tab. 18: zeitliche Entwicklung des Standortklimaindex für Winterweizenflächen [ha] in Prozent zur Gesamtfläche 122
Tab. 19: Toleranz von Winterrapsstandorten gegenüber Trockenstress 126
Tab. 20: Standortklimaindex auf Winterrapsflächen in Prozent zur Gesamtfläche 127
Tab. 21: Toleranz gegenüber Trockenstress auf Sommergersteflächen [in %] an der Gesamtfläche 129
Tab. 22: Toleranz der Maisstandorte gegenüber Trockenstress 133
Tab. 23: Erfüllungshäufigkeit des Fingerabdrucks für potenziell ertragsschwache Jahre pro Dekade in Mainz und Worms (Darst. nach Kremer 2011, Projektionen WETTREG2006 und STAR) 143

1 Einleitung

Aktuelle und zu erwartende Klimaänderungen werden auf die Ökosysteme und die Landnutzung einen erheblichen Einfluss nehmen (MINISTERIUM FÜR UMWELT, FORSTEN UND VERBRAUCHERSCHUTZ RHEINLAND-PFALZ, 2007; SCHÄR et al., 2004). Im Bereich der Landnutzung stellt die Landwirtschaft in besonderem Maße eine Schnittstelle aller betroffenen Bereiche dar. Die Landwirtschaft hängt direkt vom Wetter bzw. vom Klima ab und ist damit besonders vulnerabel gegenüber klimatischen Änderungen (SCHÄR et al. 2004; WEISHEIMER & PALMER 2005). Die Landwirtschaft muss sich an die klimatischen Gegebenheiten und den Verlauf von Wetter und Witterung einschließlich Extremereignissen anpassen (CHMIELEWSKI 2007). Die Zeichen eines bereits stattfindenden Klimawandels werden auch im Bereich der Landwirtschaft immer deutlicher. Dieser zeigt sich beispielsweise positiv durch eine verlängerte Vegetationsperiode oder im verstärkten Anbau von Wärme liebenden Rebsorten. Auffallend sind aber vor allem negative Begleiterscheinungen des stattfindenden klimatischen Wandels, wie der Hitzesommer 2003 gezeigt hat. Hier kam es in fast allen landwirtschaftlichen Wirtschaftszweigen zu erheblichen Problemen aufgrund lang anhaltender Schönwetterperioden mit Extremtemperaturen und geringen Niederschlägen. Das Resultat war verstärkt auftretender Trockenstress und dadurch bedingte Ertragseinbußen. Für Mitteleuropa gab dieser Sommer einen ersten Eindruck, wie das künftige Klima aussehen könnte. Aktuelle Klimaprojektionen gehen davon aus, dass ein Sommer wie 2003 im Jahre 2100 mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 30 % oder sogar noch höher auftreten kann. Dies würde bedeuten, dass zukünftig jeder dritte Sommer ähnlich verlaufen könnte wie der Extremsommer 2003 (SCHÄR et al. 2004; WEISHEIMER & PALMER 2005). Für die Landwirtschaft hätte dies schwerwiegende Folgen. Die Landwirtschaft besitzt seit jeher eine herausragende Stellung in Rheinland-Pfalz. „Das milde Klima, fruchtbare Böden, Bewässerungsmöglichkeiten, wüchsige Grünlandstandorte und die Nähe zu den Verbrauchermärkten bieten für die Landwirtschaft in Rheinland-Pfalz gute Produktions- und Vermarktungsmöglichkeiten“ (STATISTISCHES LANDESAMT 2012). Etwa 36 % der Landesfläche (1.985.336 ha) werden landwirtschaftlich genutzt, das sind ca. 705.000 ha, die sich auf insgesamt etwas mehr als 20.500 landwirtschaftliche Betriebe verteilen (STATISTISCHES LANDESAMT 2012).

Den dominierenden Sektor stellt der Ackerbau mit 400.000 ha und seinen zahlreichen Kultur- und Fruchtarten dar. Der zweite große landwirtschaftliche Zweig in Rheinland-Pfalz ist die Dauergrünlandbewirtschaftung mit etwa 233.000 ha, gefolgt von Weinbau mit knapp über

66.000 ha und dem flächenmäßig mit ca. 5.000 ha vertretenen Obstbau (STATISTISCHES LANDESAMT 2012) (siehe auch folgende Tabelle).

Tab. 1: Landwirtschaftlich genutzte Fläche nach Sektoren (STATISTISCHES LANDESAMT 2012)

Sektor	***Fläche [ha]***
Ackerland	400.000
Dauergrünland	233.000
Weinbau	63.000
Obstbau	5000
Gesamt	***705.000***

Die landwirtschaftlich genutzten Flächen verteilen sich nach der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) des Landes fast flächendeckend über Rheinland-Pfalz (siehe folgende Abbildung).

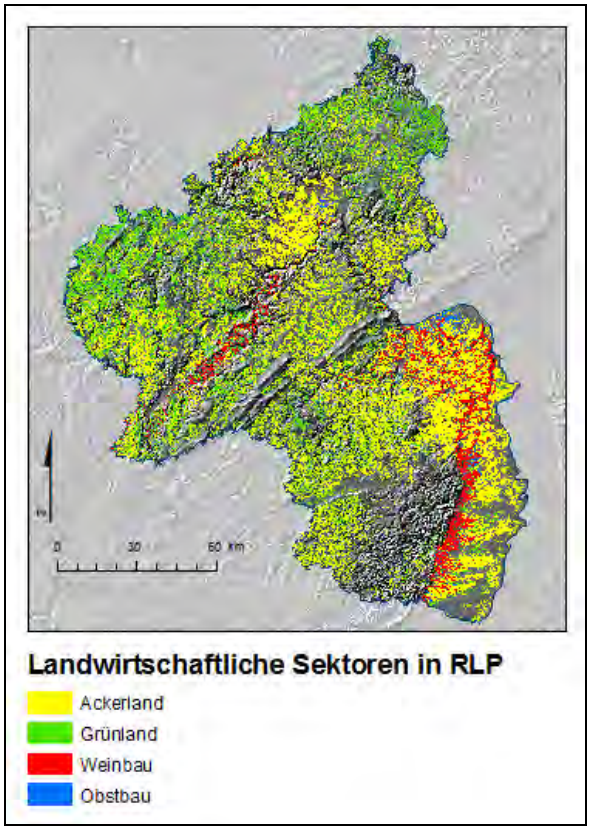


Abb. 1: Landwirtschaftliche Nutzungen in Rheinland-Pfalz (eigene Darstellung, Datengrundlage: LVermGeo RLP 2010)

Bereiche ohne landwirtschaftliche Nutzung finden sich vor allem im Pfälzerwald, im Bereich der Kaiserslauterer Senke und auf den Hunsrückhöhen. Ackerbau wird flächendeckend in ganz Rheinland-Pfalz betrieben, wobei sich Rheinhessen flächenmäßig besonders hervorhebt. Grünlandbewirtschaftung findet man verstärkt in den klimatisch ungünstigeren Mittelgebirgsregionen des Hunsrücks, der Eifel und des Westerwaldes. Weinbau wird aufgrund

seines klimatischen Anspruchs vorwiegend in den Gunsträumen der größeren Flusstäler angebaut. Hierzu zählen Rheintal, Mosel, Nahe und Ahr. Weinbauliche Nutzungen in Höhen oberhalb 300 m findet man aufgrund der thermischen Ansprüche der Weinreben praktisch nicht mehr. Obstbau wird verstärkt zwischen Bingen und Mainz, der Vorderpfalz sowie dem Koblenzer Becken betrieben (siehe obige Abbildung).

Sofern der Klimawandel so eintritt, wie es die Szenarien des IPCC projizieren, ist mit deutlichen Veränderungen in der landwirtschaftlichen Nutzung zu rechnen (BINDI & HOWDEN 2004; STOCK et al. 2007; ZEBISCH et al. 2005). Um die Folgen einer Klimaänderung besser abschätzen zu können und mögliche Handlungsoptionen zur Sicherung und Anpassung der rheinland-pfälzischen Landwirtschaft zu erschließen, wurden im Modul Landwirtschaft zahlreiche Analysen an landwirtschaftlich relevanten Standorten und in der Fläche durchgeführt.

2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Die Untersuchungen gliedern sich in die beiden Hauptkomponenten der geodatenbasierten Standortanalysen und der Zeitreihenanalysen von landesweiten Klimadaten.

Eine zentrale Stellung nimmt in diesem Zusammenhang der Begriff „Standort“ ein. Von den Eigenschaften eines Standortes hängt seine Eignung für die landwirtschaftliche Nutzung ab. Wichtige Standortparameter sind direkt an das Klima gebunden und können durch Klimaveränderung beeinflusst werden (OLESEN & BINDI 2003). Eine der dringendsten Fragen im Zusammenhang von Landwirtschaft und Klimawandel ist die einer ausreichenden Wasserversorgung der Standorte (STAKEHOLDERANALYSE KlimLandRP 2009). Diese Zielgröße nimmt in den laufenden landesweiten Untersuchungen eine Vorrangstellung ein.

Unabhängig von klimatischen Verhältnissen erfasst die Arbeit des Moduls durch eine landesweite detaillierte Analyse der naturräumlichen Ausstattung (Boden, Relief) der landwirtschaftlichen Standorte deren Toleranz bzw. Vulnerabilität gegenüber klimatischen Veränderungen räumlich und qualitativ. Durch Verknüpfung der standörtlichen Eigenschaften mit zukünftigen Klimaszenarien werden zukünftige Entwicklungen auch unter kulturspezifischem Blickwinkel entworfen. Mit der Schaffung einer geeigneten landesweiten Geodatengrundlage wurde die Voraussetzung für die eigentlichen Analysen und somit eines der zentralen Ziele der Arbeiten erfüllt.

Neben der Untersuchung der standörtlichen Bedingungen stehen Fragestellungen im Vordergrund, die durch die Suche nach bestimmten Witterungsmustern gelöst und deren Veränderungen vor dem Hintergrund verschiedener zukünftiger Klimaprojektionen analysiert werden. Dabei handelt es sich um kulturspezifische, klimasensitive Vorgänge und Zielgrößen. Als Beispiele sind hier die Temperatursumme 200, die den Vegetationsbeginn im Grünland beschreibt, Vernalisationsphasen bestimmter Feldfrüchte, oder die Veränderung sortenspezifischer Gunstbereiche bestimmter Klimafaktoren (z. B. Weinbau: Huglin Index) zu nennen. Zusätzlich sind Witterungsmuster, die Rückschlüsse auf Extremereignisse wie Starkniederschläge erlauben, sowie die Eintrittstermine phänologischer Phasen im Fokus der Untersuchungen. Letztere sind besonders im Zusammenhang mit möglichen Spätfrostschäden zu sehen.

Der Zweck der hier durchgeführten Untersuchungen ist zum einen, durch die Verwendung und Abbildung mehrerer Klimaprojektionen und Modelle den Bereich der möglichen Entwicklungen im Klimawandel aufzuzeigen. Zum anderen soll die naturräumliche Ausstattung der

landwirtschaftlichen Standorte im Hinblick auf Veränderungen im Klimawandel flächendeckend erfasst und charakterisiert werden.

3 Stand des Wissens

3.1 Klimawandel und Landwirtschaft

Die Landwirtschaft ist als großflächige Landnutzung einer der sensitivsten klimaabhängigen Wirtschaftszweige (EITZINGER et al. 2009). Nach ADAMS et al. (1998) ist das Klima der bestimmende Faktor für landwirtschaftliche Produktivität. „Jede Änderung im Klima wird wichtige Auswirkungen auf das Produktionspotenzial und das Produktionsrisiko haben, je nach Verwundbarkeit oder Sensitivität des Rezeptors“ (EITZINGER et al. 2009). Die Wissenschaft diskutiert die mannigfaltigen Auswirkungen des Klimawandels. Folgen ergeben sich vor allem aus den sich ändernden klimatischen Faktoren Niederschlag und Temperatur oder dem Auftreten bzw. der Schwere von Extremereignissen, wie Trockenperioden, Überflutungen, Stürmen oder Starkniederschlagsereignissen. Der Wasserhaushalt wird sich durch das zunehmende Verdunstungspotenzial deutlich verändern. Durch die veränderten Temperatursummen werden sich Klimazonen und agrarökologische Potenziale, Nischen für Schädlinge, Krankheiten und Unkräuter räumlich verschieben (EITZINGER et al. 2009).

Die landwirtschaftlichen Standorte sind eng mit dem Klima verbunden. Das Standortklima wird maßgeblich durch dessen Energiehaushalt bestimmt. Dieser ist u. a. das Resultat der eingestrahlten Sonnenenergie. Für die Pflanzen ist der sichtbare Teil des elektromagnetischen Spektrums und hiervon der Wellenlängenbereich 350-780 nm von besonderer Bedeutung. Nur dieser Wellenlängenbereich kann von der Pflanze für photosynthetische Prozesse genutzt werden. Das Lichtklima eines Standorts ist damit ein Ertrag begrenzender Faktor, weil Stoffbildungsprozesse, Wachstum und Entwicklung lichtabhängig sind (DIEPENBROCK et al. 2009).

Neben dem Lichtklima eines Standortes ist vor allem die Temperatur von enormer Wichtigkeit (DIEPENBROCK et al. 2009). Eine Veränderung der Temperatur wirkt sich auf alle Organisationsebenen der Pflanzenproduktion aus (ARBOL & INGRAM 1996). Höhere Temperaturen fördern allgemein betrachtet Wachstum und Substanzbildung, da sich die Reaktionsgeschwindigkeit biochemischer Prozesse im Bereich zwischen 0 – 30 °C durch eine Temperaturerhöhung um etwa 10 °C verdoppelt (DIEPENBROCK et al. 2009). Minimum- und Maximumtemperaturen bestimmen die Photosynthese bzw. pflanzenphysiologische Prozesse und werden zusammen mit den Optimumtemperaturen als Kardinaltemperaturen bezeichnet (FITTER & HAY 1987). Diese sind artspezifisch und unterscheiden sich zudem nach Standort und Herkunft sehr stark voneinander (EVANS 1993). In den mittleren Breiten liegt der Opti-

malbereich für photosynthetische Prozesse für den überwiegenden Teil der Pflanzen zwischen 18 – 25 °C (CHMIELEWSKI 2007). Die Sensitivität gegenüber niedrigen Temperaturen ist bei den meisten Pflanzenarten noch stärker ausgeprägt (KÖRNER 2006; CHMILIEWSKI 2007). Aus pflanzenbaulicher Sicht besitzen deshalb auch die Minimumtemperaturen einen ähnlichen Stellenwert. Sie bestimmen die Vegetationsperiode und damit die Anbaufähigkeit der jeweiligen Kultur. Bestimmte Arten benötigen im Winter eine längere Zeitspanne mit niedrigen Temperaturen, um im Frühjahr in die generative Phase übertreten zu können. Dieser Prozess wird als Vernalisation bezeichnet (DIEPENBROCK et al. 2009). Die höheren Temperaturen im Winter könnten daher für einige Kulturen zu Vernalisationsproblemen führen (EVANS 1993). Einen weiteren zu erwartenden Stressfaktor des Klimawandels für Kulturpflanzen stellt ein mögliches verstärktes Auftreten von Hitzestress dar. Die Empfindlichkeit der Pflanze gegenüber Hitzestress hängt dabei vor allem vom jeweiligen Entwicklungsstadium ab (ROSENZWEIG & HILLEL 1998; ARBOL & INGRAM 1996). Hitzestress ist meist gekoppelt mit Trockenstress, welcher die Transpirationskühlung drosselt. Wassermangel verursacht ein Schließen der Stomata und ein Ansteigen der Blatttemperatur. Bei hohen Temperaturen (ab etwa 35 bis 40 °C) werden nicht nur die Pflanzenblätter geschädigt, auch die Wurzeln reagieren empfindlich auf hohe Bodentemperaturen, da diese meist geringere Temperaturoptima haben und außerdem weniger an extreme und ständig wechselnde Temperaturen angepasst sind. Hitze beeinträchtigt zusätzlich die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen und die Verlagerung von Kohlenhydraten in die Wurzeln. Bei längerem Einwirken kann so das gesamte Wurzelwachstum zum Erliegen kommen (ROSENZWEIG & HILLEL 1998; ARBOL & INGRAM 1996). Die folgende Tabelle fasst die möglichen Auswirkungen einer Temperaturerhöhung für Pflanzen zusammen.

Tab. 2: Zusammenfassung möglicher Auswirkungen einer Temperaturerhöhung auf Pflanzen (verändert und ergänzt nach HERTSTEIN et al. 1994)

Charakteristikum	***Pflanzliche Reaktion***
Vegetationsperiode	Verlängerung
Vegetationsbeginn	Verfrühung
Vegetationsende	Verspätung
Vernalisation	vernalisationsrelevante Temperaturen werden seltener erreicht
Winterfestigkeit	Bedarf an winterfesten Arten geht zurück
Hitzestress	Hitzeschäden treten vermehrt auf
Ertrag	Zunahme bei ausreichender Wasserversorgung, verstärkte Zunahme bei Kulturen mit hohen Temperaturansprüchen
Verdunstung	Anstieg um ca. 5 % pro Grad Temperaturerhöhung
Zellteilung	Verkürzung des Zellzyklus und Erhöhung der Zellteilungsrate
Photosynthese	Zunahme der Photosyntheserate im unteren Temperaturbereich bis ein artenspezifischer Maximalwert erreicht wird
CO_2-Assimilation	Zunahme bei C4-Pflanzen, bei C3-Pflanzen nur geringe Zunahme
Respiration	Zunahme
Keimung	Gleichmäßig und schneller
Wachstumsrate	höher
Frostgefahr	reduziert
Frostresistenz	Abnahme

Neben Licht und Temperatur spielt die Wasserversorgung in der Landwirtschaft eine entscheidende Rolle (DIEPENBROCK et al. 2009). Der Wasserhaushalt bestimmt, welche Kultur erfolgreich angebaut werden kann. Dabei können sich bereits geringste Niederschlagsänderungen auf die Produktivität von landwirtschaftlich genutzten Ökosystemen auswirken (DAVIES 2006). Der Wasserhaushalt stellt damit einen entscheidenden landwirtschaftlichen Produktionsfaktor dar (HERTSTEIN et al. 1994; PEREIRA et al. 2006). Er setzt sich aus Niederschlagsmenge und –verteilung sowie Abfluss und Verdunstung zusammen, falls keine Beeinflussung durch das Grundwasser vorliegt (AG BODEN 2005). Wasser wird von den Pflanzen als Stoffkomponente sowie als Transport und Lösungsmittel verwendet. Nahe 1 % wird Wasser durch die Photosynthese zusammen mit CO_2 in Kohlenhydrate eingebaut, der mit Ab-

stand größte Teil dient der Transpiration. Als Transpirationskoeffizient wird dabei die Masse an Wasser bezeichnet, die eine Pflanze benötigt, um 1 kg Trockenmasse zu produzieren. Die Effizienz der Wasserausnutzung variiert dabei zwischen den Kulturarten sehr stark (DIEPENBROCK et al. 2009). Gründe für die stark unterschiedlichen Transpirationskoeffizienten der einzelnen Kulturarten liegen in der jeweiligen Wachstumszeit und -dauer begründet. Wintergetreidearten, welche einen Teil ihrer Entwicklung in den kühleren Monaten (Herbst, Frühjahr) vollziehen, haben z. B. einen geringeren Wasserverbrauch als die entsprechenden Sommerkulturen. Auf der anderen Seite haben zum Beispiel Kartoffeln und Zuckerrüben einen höheren Wasserbedarf als Getreide aufgrund ihrer verhältnismäßig langen Vegetationszeit. Die höchsten Transpirationskoeffizienten verzeichnen langlebige Futterpflanzen (Rotklee, Luzerne) und Grünland (CHMILIEWSKI 2007). Eine entscheidende Größe für den Pflanzenbau stellt die Wasserbilanz dar. Überwiegen die Niederschläge gegenüber der Evapotranspiration, so spricht man von einer positiven Wasserbilanz. Im umgekehrten Fall ist die Wasserbilanz negativ (DIEPENBROCK et al. 2009). Für die Pflanze entscheidend sind dabei vor allem die klimatischen Wasserbilanzen während der Hauptvegetationsperiode von Mai bis Oktober, die in Verbindung mit der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes und der kapillaren Nachlieferung aus dem Grundwasser die Gefährdung der Vegetation durch Trockenheit charakterisieren (AG BODEN 2005). Daneben spielt auch die Relieflage eines landwirtschaftlichen Standortes eine signifikante Rolle im Wasserhaushalt. KOFALK (1998) stellt expositionsbedingte Unterschiede in der Evapotranspiration (10 Grad Neigung) von bis zu 15 % fest. Oberflächliche und laterale Zuflüsse begünstigen Standorte in Hangfuß- oder Tallage, während Standorte in Kuppen- oder Oberhanglage eher durch Abflüsse gekennzeichnet sind.

Für landwirtschaftliche Kulturen sind besonders Regionen kritisch, deren Böden über eine schlechte Wasserspeicherkapazität verfügen oder die in Räumen mit ausgesprochener Wasserknappheit, z. B. dem Oberrheingraben, liegen.

Die landwirtschaftliche Nutzung der jeweiligen Standorte hat sich über längere Zeiträume hin an die klimatischen Bedingungen vor Ort angepasst. Die Nutzung wird dabei neben anderen Faktoren maßgeblich durch das Klima bestimmt. Energiehaushalt, Temperatur und Niederschläge regeln die Standortwahl landwirtschaftlicher Nutzungen. Die beiden zuletzt genannten Klimaelemente unterliegen dabei, wie aufgezeigt, ständigen Veränderungen.

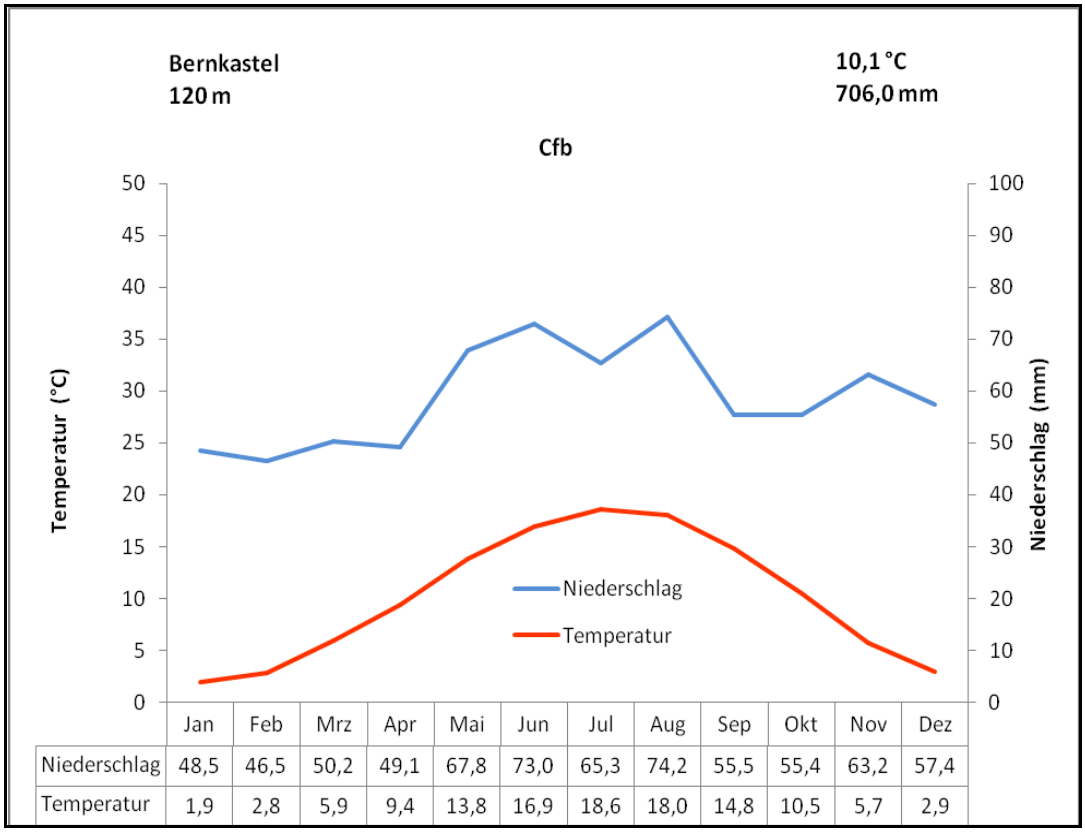
3.2 Geoinformationssysterme in der Landwirtschaft

In der Landwirtschaft finden heute Geoinformationssysteme eine breite Palette an Einsatzmöglichkeiten. „Geoinformationssysteme sind digitale Informationssysteme zur Erfassung, Verwaltung, Analyse, Modellierung und Visualisierung von Geodaten mit dem Ziel der Gewinnung von Geoinformationen“ (STREIT 2004). In der Landwirtschaft werden GIS-Technologien und Geodaten bei betrieblichen, regionalen oder landesweiten Monitoring-, Planungs-, Entscheidungs- und Produktionsprozessen eingesetzt. Über 80 % aller landwirtschaftlichen Entscheidungen sind raumbezogen und zeigen, welchen Stellenwert GIS heute einnehmen. Besondere Anwendung finden sie auch im sog. Precision Farming. Durch hoch-

auflösende Fernerkundungsdaten, Geobasisdaten (Digitale Höhenmodelle), Geofachdaten (Ertragsdaten, digitale Bodendaten) und praxistaugliche GPS-Geräte kann so eine teilflächen- und standortpezifische Bewirtschaftung von Schlägen oder Pflanzenbeständen vorgenommen werden. Ein entscheidender Impuls für den Einsatz von GIS-Technologien in der Landwirtschaft wurde durch die Einführung eines integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems (InVeKoS) für landwirtschaftliche Beihilfen gesetzt, welche durch die Bundesländer umgesetzt werden sollen. Auch hier kommen GIS-Technologien, hochauflösende Geodaten und Fernerkundungsverfahren zur Erfassung und Abgrenzung von beihilfefähigen Flächen und Landschaftselementen zum Einsatz. Die Anwendung von GIS in der Landwirtschaft zeigt aber auch deren Defizite auf. Geodaten stellen z. B. immer noch ein Problem hinsichtlich ihrer Qualität und Genauigkeit dar. Des Weiteren fehlen häufig wichtige Informationen (Datum, Referenzsystem, Erhebungsmethode), wodurch ein Großteil der Daten unbrauchbar wird (STREIT 2004). Ein weiteres Problem stellen die enormen Anschaffungskosten von Hard- und Software sowie Geodaten dar, wodurch sich in den letzten Jahren verstärkt auch OpenSourceGIS auf dem Markt etablieren konnten. Trotz all der Defizite und Probleme haben sich Geoinformationssysteme dennoch als erfolgversprechende Hilfsmittel in der Landwirtschaft etabliert.

4 Klima und Klimaänderung in Rheinland-Pfalz

Im Folgenden werden die für die Landwirtschaft in Rheinland-Pfalz relevanten klimatischen Verhältnisse und mögliche Änderungen näher aufgeführt. Im vorherigen Kapitel wurde bereits thematisiert, dass die Klimavariablen Temperatur und Niederschlag wichtige Größen in der Landwirtschaft darstellen. Das folgende Klimadiagramm zeigt die Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse exemplarisch am Beispiel der Klimastation Bernkastel (Mosel).



	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Niederschlag	48,5	46,5	50,2	49,1	67,8	73,0	65,3	74,2	55,5	55,4	63,2	57,4
Temperatur	1,9	2,8	5,9	9,4	13,8	16,9	18,6	18,0	14,8	10,5	5,7	2,9

Abb. 2: Klimadiagramm von Bernkastel (eigene Darstellung, Datengrundlage DWD)

Bernkastel zählt aufgrund seiner jährlichen Durchschnittstemperatur von 10,1 °C im Bezugszeitraum 1961-1990 und 10,5 °C zwischen 1971-2000 zu den wärmsten Regionen in Deutschland. Den kältesten Monat stellt der Januar mit 1,9 °C dar. Die höchsten monatlichen Durchschnittswerte werden im Juli mit 18,6 °C gemessen. Dadurch ergibt sich eine Tempe-

raturamplitude von 16,7 K. Die geringe Amplitude ist auf die relativ maritimen Verhältnisse von Bernkastel zurückzuführen. Bernkastel weist einen Jahresdurchschnittsniederschlag von 706 mm auf. Die Niederschläge fallen gleichmäßig über das ganze Jahr verteilt mit einem Maximum in den Sommermonaten Juni (73 mm) und August (74,2 mm). Bernkastel zeigt einen für die Westwindzone typischen annuellen Verlauf der Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse. Aufgrund der ausgeprägten orographischen Differenzierung in Rheinland-Pfalz können die klimatischen Verhältnisse mehr oder weniger stark von den beschriebenen Verhältnissen abweichen.

Die folgende Grafik zeigt die Temperaturverteilung für Rheinland-Pfalz im 30-jährigen Bezugszeitraum 1971-2000 auf. Die folgenden klimatischen Karten basieren auf Zellen von 1 x 1 km, welche in Auflösung und Lage der im Projekt KlimLandRP mithilfe der Software INTERMET (LUWG) durchgeführten Regionalisierung von Klimadaten entsprechen.

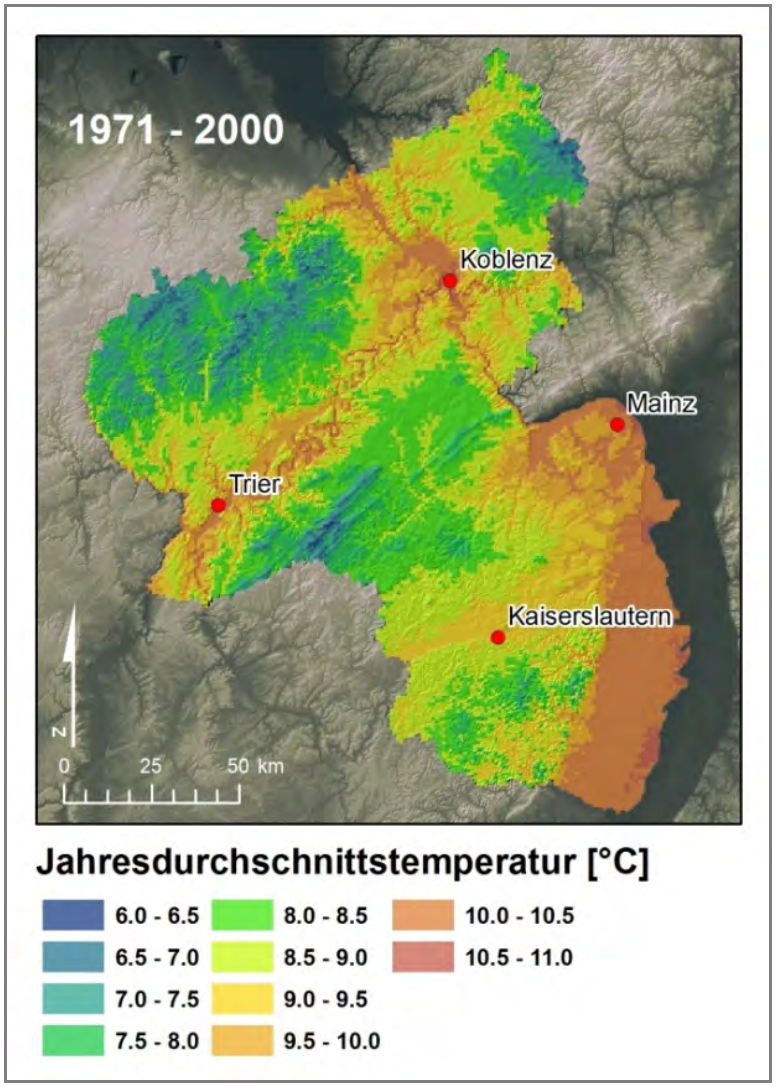


Abb. 3: Temperaturverhältnisse in Rheinland-Pfalz für den Referenzzeitraum 1971-2000 (eigene Darst., Datengrundlage DWD, LUWG)

Auffallend sind starke räumliche Unterschiede, resultierend aus den orographischen Gegebenheiten. So reicht die Jahresdurchschnittstemperatur von 6 °C in den höchsten Mittelgebirgsregionen bis nahe 11 °C in den klimatischen Gunsträumen der größeren Flusstäler.

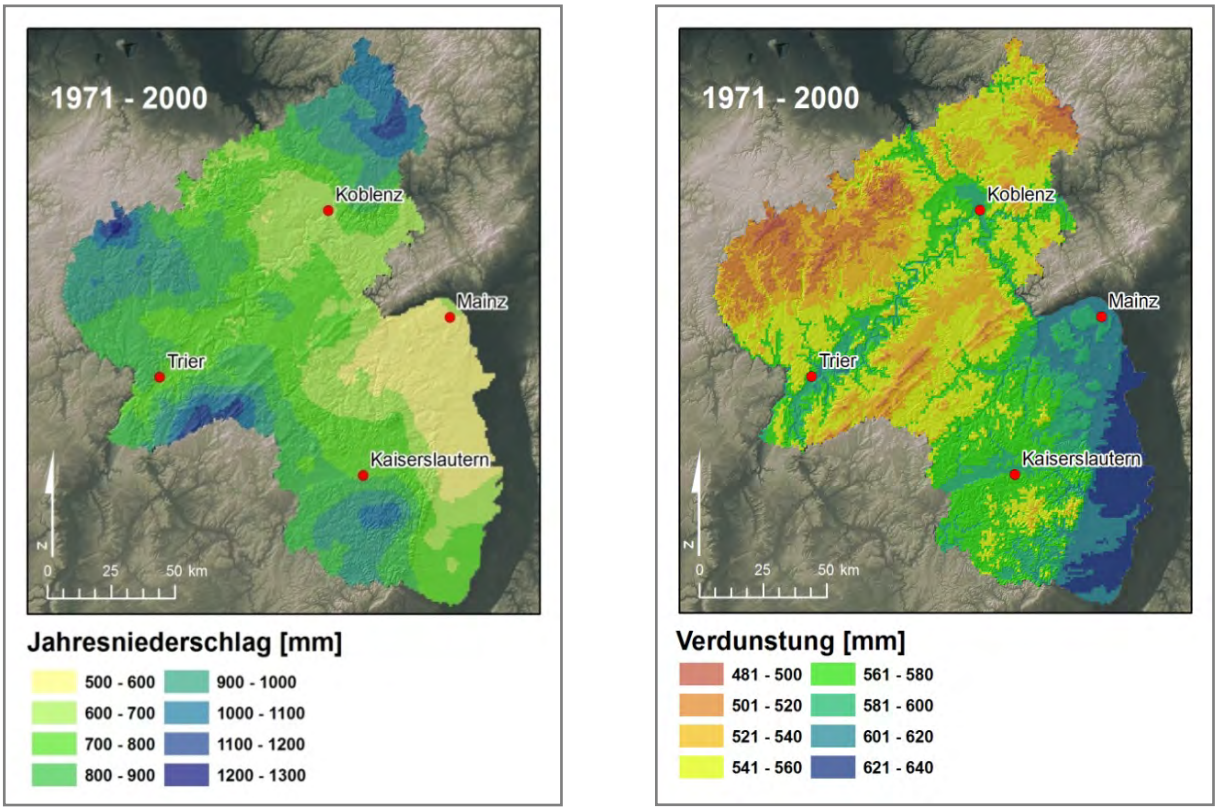


Abb. 4: Jahresniederschlag und Evapotranspiration in RHEINLAND-PFALZ für den Referenzzeitraum 1971-2000 (eigene Darst., Datengrundlage DWD, LUWG)

Auch der Niederschlag zeigt deutliche räumliche Differenzen. In den Mittelgebirgsregionen Westerwald, Eifel und Hunsrück werden mit über 1000 mm die höchsten jährlichen Niederschläge verzeichnet. Im Lee der Mittelgebirge nimmt die jährliche Niederschlagssumme deutlich ab, sodass in Rheinhessen beispielsweise nur noch knapp über 500 mm Niederschlag fallen. Die Karte zeigt den starken Einfluss der Mittelgebirge, welche Lee- und Luveffekte bedingen und dadurch den Niederschlag bestimmen. Die Verdunstung wird durch die Meereshöhe (Temperatur) beeinflusst. So nimmt die Evapotranspiration mit zunehmender Temperatur zu. Die geringsten jährlichen Verdunstungsraten sind deshalb in den höchsten Mittelgebirgsregionen zu finden. Sie liegen hier bei etwa 500 mm. In den klimatischen Gunsträumen der größeren Täler werden die höchsten Verdunstungsraten verzeichnet (über 600 mm, siehe auch obige Abbildung).

Für eine feiner auflösende Darstellung der Lee- und Luvregionen in Rheinland-Pfalz soll an dieser Stelle ein Index dargestellt werden, welcher sich rein aus dem Relief errechnet. Es handelt sich hierbei um einen Indexwert, der anzeigt, wie sich die Umgebung zu einer Ausgangszelle verhält (MUES 2000). Zur Berechnung des Index wurde das SRTM-Höhenmodell (Shuttle Radar Topography Mission) mit einer Auflösung von 90 x 90 m für Rheinland-Pfalz verwendet. Anschließend wurde von jeder Rasterzelle aus ein Fächer von 50 km in West-

richtung mit einem Winkel von 112-248 Grad aufgespannt, um orographische, witterungsbeeinflussende Hindernisse in Bezug zur Ausgangszelle auszumachen. Eine bezüglich der Höhenlage der Ausgangszelle vorgelagerte höhere Erhebung innerhalb des Fächers in westlicher Richtung der Ausgangszelle würde für diese einen Lee-Effekt bedeuten. Er dient also der Charakterisierung von Luv- und Lee-Lagen. Generell gilt: je höher der Indexwert, desto größer ist der Lee-Effekt für den betrachteten Standort. Er spiegelt sehr gut die realen Verhältnisse wider und kann die Aussagekraft interpolierter Werte verbessern.

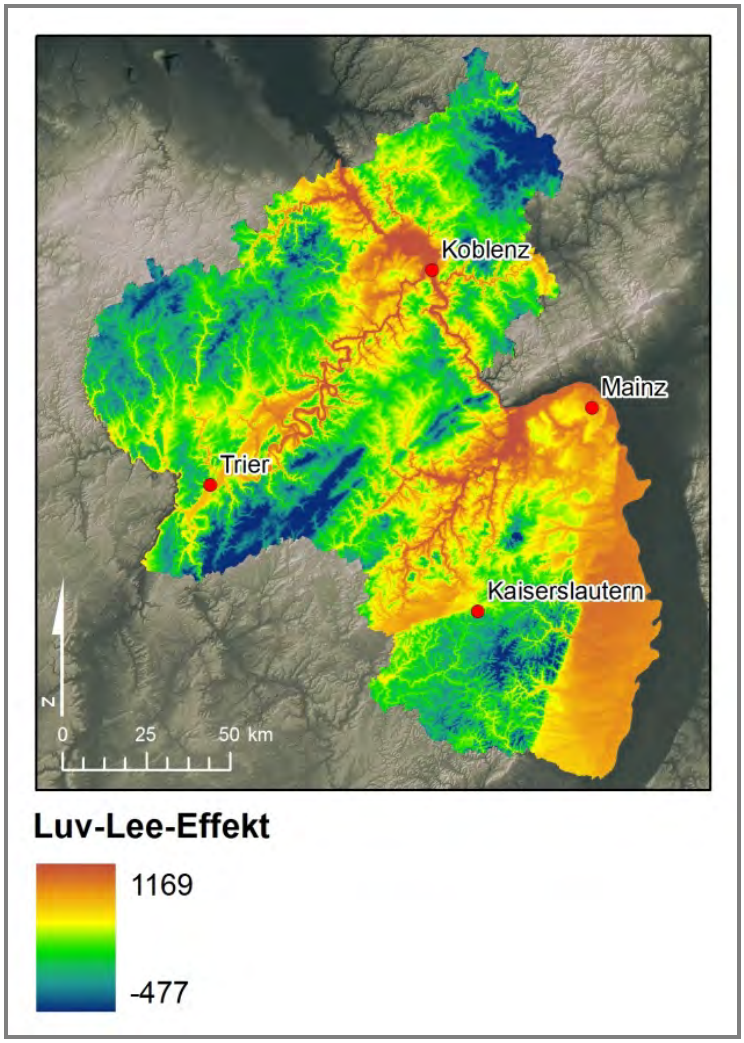


Abb. 5: Luv-Lee-Index (eigene Darst., Datengrundlage NASA)

Die zukünftigen klimatischen Verhältnisse werden sich durch den Klimawandel deutlich verändern. Stellvertretend für die erwartete Entwicklung des Klimas in den nächsten 100 Jahren wird hier verstärkt auf das SRES-Szenario A1B zurückgegriffen, das in der internationalen Klimaforschung zurzeit als ein „mittleres“ Szenario verstanden wird (LATIF 2012) und dessen projizierter Verlauf der Treibhausgasemissionen sich an der tatsächlichen Treibhausgasentwicklung orientiert. Grundsätzlich besteht eine Vielzahl von Möglichkeiten, wie sich das Klima der kommenden Jahrzehnte bis Jahrhunderte entwickeln könnte. Eine vollständige oder zumindest umfassendere Darstellung aller Projektionen der verschiedenen in der Wissenschaft verwendeten Szenarien und Klimamodelle kann zum Beispiel über so genannte En-

sembledarstellungen erfolgen, wie sie im Deutschen Klimaatlas des DWD vorgenommen werden (www.dwd.de/klimaatlas). An Stelle von beispielhaften Szenarien und Simulationen werden hier alle Simulationen in einer Verteilung zusammengefasst und die Klimaentwicklungen entsprechend der Simulationshäufigkeit dargestellt. Auf eine solche Darstellung wurde in diesem Rahmen aufgrund der Datenverfügbarkeit und des Umfangs der Arbeit verzichtet.

Die folgende Abbildung zeigt eine mögliche zukünftige thermische und hygrische Entwicklung auf Basis eines Thermopluviogramms im Vergleich zum Referenzzeitraum (1971-2000) am Beispiel des Standorts Mainz (Szenario: WETTREG2006 A1B-trocken). Es zeigt sich eine deutliche Erwärmung in praktisch allen Monaten, mit deutlicher Differenzierung zwischen naher und ferner Zukunft. In der nahen Zukunft erwärmen sich die meisten Monate im Mittel um 0-1 °C. Die Monate März und April zeigen sogar eine leichte Abkühlung im Vergleich zu den Jahren 1971-2000. In der fernen Zukunft beschleunigt sich die Erwärmung deutlich, so dass dann alle Monate im Mittel um 1-3 °C über den Mittelwerten des Referenzzeitraums liegen. Bei den Niederschlägen zeigt sich bei beiden Zeitscheiben eine deutliche Reduzierung der Niederschläge gegenüber 1971-2000 mit deutlich negativer Tendenz in Richtung ferner Zukunft. Auffallend ist eine Niederschlagserhöhung in den Wintermonaten Januar und Februar, sowie in abgeschwächter Form im April für die ferne Zukunft.

Als Fazit lässt ich festhalten, dass bei Eintreten der zugrunde gelegten Projektion fast alle Monate im Verhältnis zu 1971-2000 wärmer werden und sich vor allem in den Sommermonaten eine deutliche Reduzierung der Niederschläge abzeichnet. In der fernen Zukunft kommt es bei dieser Projektion vermehrt zu feuchteren Wintern.

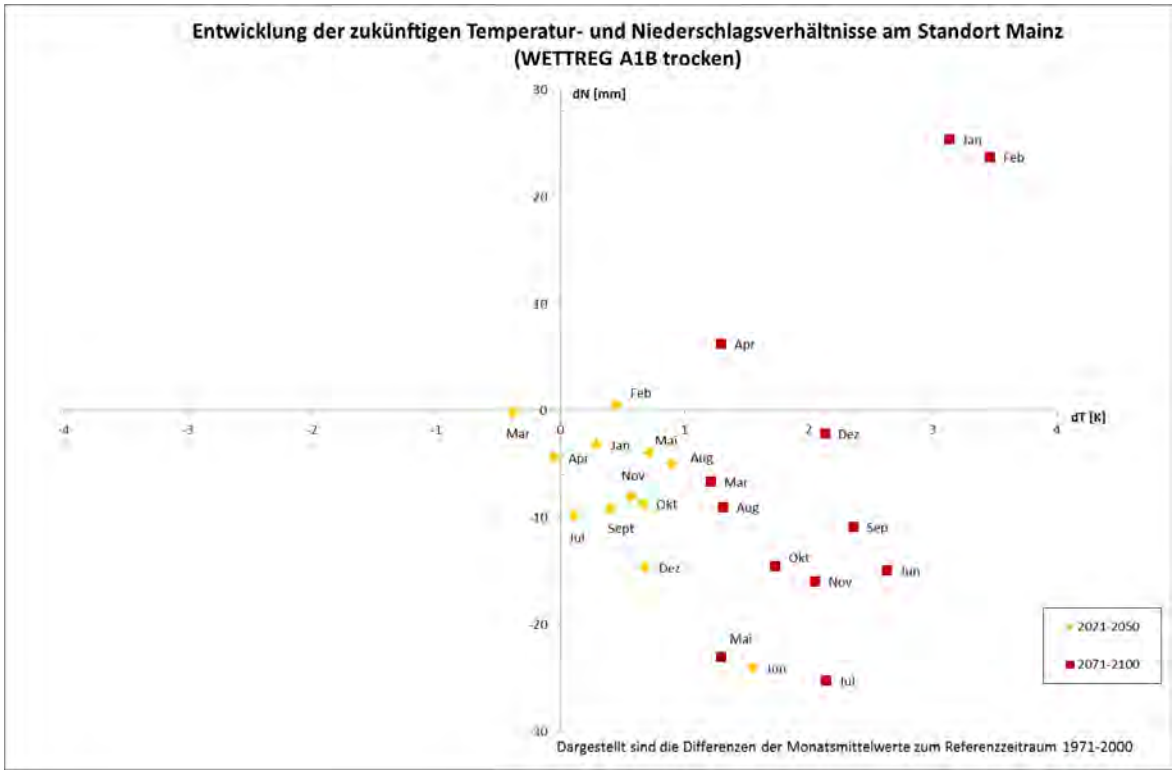


Abb. 6: Entwicklung der zukünftigen thermischen und hygrischen Verhältnisse am Standort Mainz als Abweichung vom Mittelwert des Referenzzeitraums (1971-2000), Szenario: WETTREG2006 A1B-trocken

Aufgrund der landwirtschaftlichen Relevanz konzentrieren sich die folgenden Untersuchungen auf die Vegetationsperiode. Die folgende Abbildung zeigt die mögliche Entwicklung der Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse während des Sommerhalbjahres von April bis September für die beiden zukünftigen Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100 in Bezug zum Referenzzeitraum 1971-2000 am Beispiel der Station Mainz (ProjektionSzenario: WETTREG2006 A1B-trocken).

Die Abbildung verdeutlicht bei Eintreten der verwendeten Projektion eine deutliche Tendenz hin zu wärmeren und trockeneren Verhältnissen im Sommer. In der nahen Zukunft (2021 2050) zeigt sich hier eine moderate Erwärmung um bis zu 1 °C in den Sommermonaten. Die Niederschläge reduzieren sich meist um bis zu 100 mm. In der fernen Zukunft verschärft sich in dieser Simulation die klimatische Situation für die Landwirtschaft zunehmend. Die Erwärmung schwankt nun in den einzelnen Jahren meist zwischen 1 bis 3 °C. Auch die Niederschläge fallen noch geringer aus und nehmen im Vergleich zum Referenzzeitraum meist um 100 bis knapp 200 mm ab. Dennoch wird es auch in der Zukunft noch vereinzelte Jahre mit verhältnismäßig feuchten Sommern geben, jedoch mit deutlich nachlassender Tendenz für die fernere Zukunft. Hinsichtlich der Temperatur zeigt nur die nahe Zukunft vereinzelte kühlere Sommer als im Mittel. In der fernen Zukunft fallen alle Sommerhalbjahre dann deutlich zu warm aus.

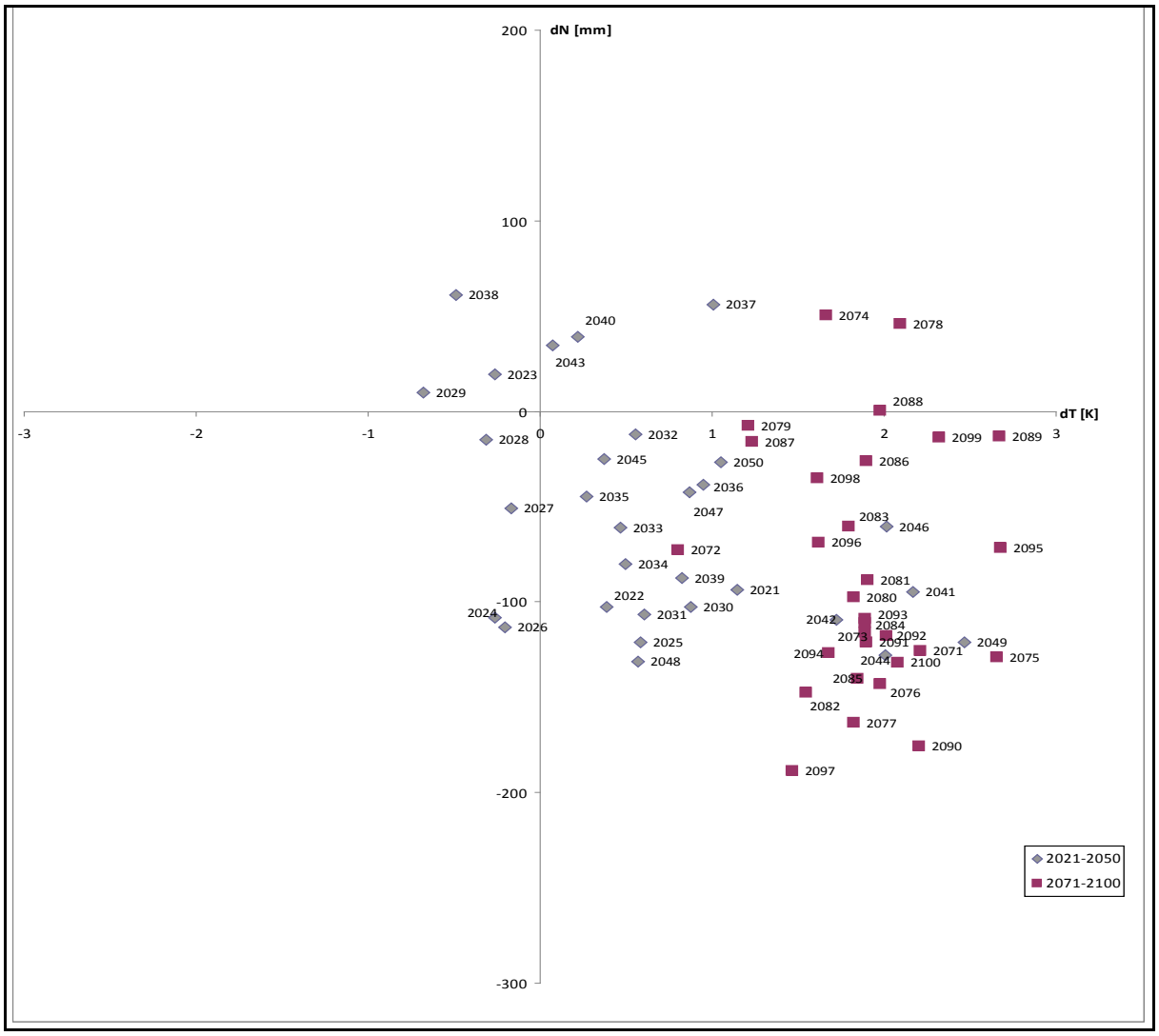


Abb. 7: Entwicklung der zukünftigen Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse im Sommerhalbjahr (April-September) als Abweichung vom Mittelwert des Referenzzeitraums (1971-2000), Projektion WETTREG2006 A1B-trocken

Die zukünftige Entwicklung hin zu deutlich trockeneren Sommern zeigt sich auch bei Betrachtung der klimatischen Wasserbilanz. Als wichtige Kenngröße des Wasserhaushaltes ist sie für landwirtschaftliche Fragestellungen von großer Relevanz. Sie errechnet sich aus der Differenz von Niederschlag und potentieller Evapotranspiration. Positive Werte bedeuten einen Überschuss von Wasser für den Standort, negative einen Wassermangel (AG Boden 2005). Die folgenden Grafiken zeigen die KWBv (Klimatische Wasserbilanz während der Hauptvegetationsperiode von Anfang Mai bis Ende Oktober) für landwirtschaftlich genutzte Standorte. Dafür wurde die KWB in einem 1 x 1 km-Gitter berechnet. Die Werte der Gitterzellen wurden dann auf die in ihrem Bereich befindlichen landwirtschaftlich genutzten Flächen übertragen, weshalb diese Werte nur näherungsweise die tatsächlichen Verhältnisse am Standort wiedergeben (eine Einschätzung über die Repräsentativität der hier verwendeten Klimadaten gibt die weiter unten beschriebene Reliefvariabilität).

Die erste Abbildung zeigt für den Referenzzeitraum 1971-2000 einen Großteil der Standorte mit leicht positiven Wasserbilanzen. In den höheren Mittelgebirgsregionen zeigen sich sogar positive Wasserbilanzen bis zu 200 mm pro Jahr. Im Lee der Mittelgebirge (Rheinhessen, Pfalz) sind leicht negative Bilanzen auszumachen.

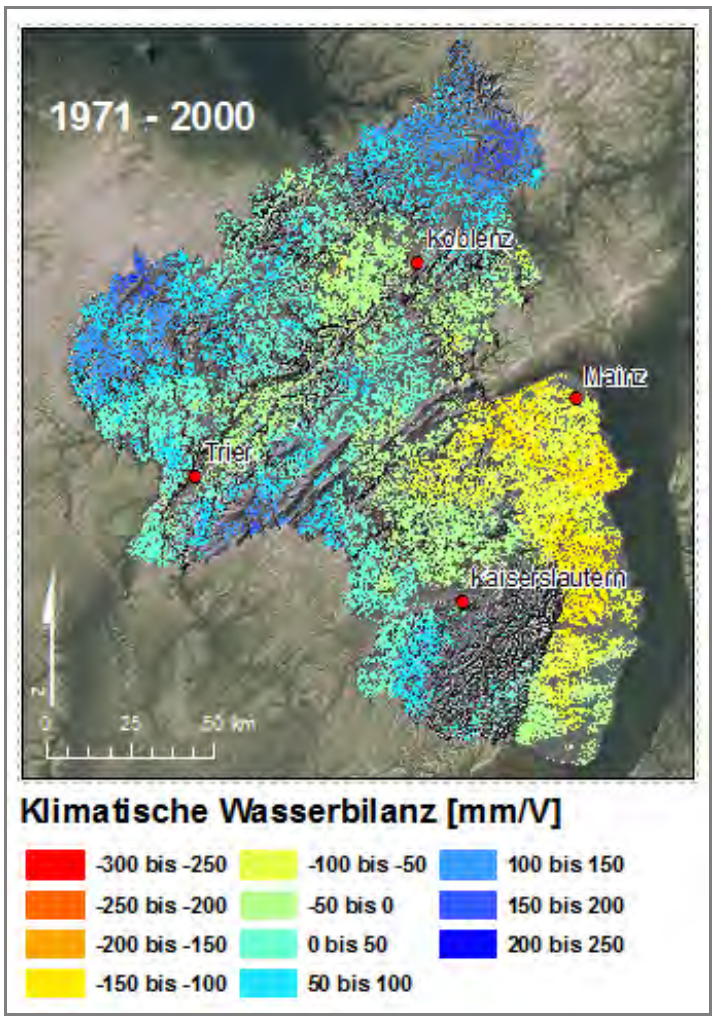


Abb. 8: Klimatische Wasserbilanz während der Hauptvegetationsperiode (Mai – Oktober) für landwirtschaftlich genutzte Standorte (eigene Darst., Datengrundlage DWD)

Für die Zukunft würden sich bei Eintreten der verwendeten Projektion die klimatischen Wasserbilanzen für landwirtschaftliche Standorte hin zu deutlich trockeneren Verhältnissen ändern.

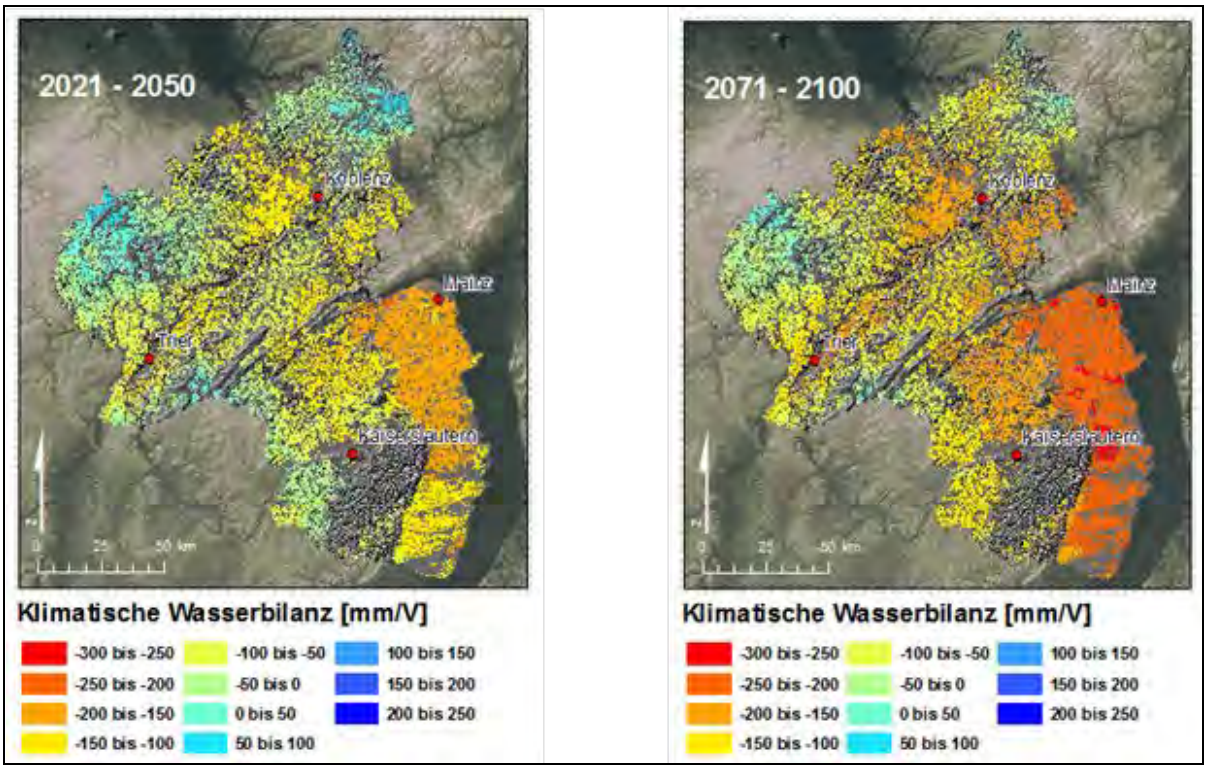


Abb. 9: Klimatische Wasserbilanz auf landwirtschaftlich genutzten Standorten während der Hauptvgetationsperiode (Mai – Oktober) für die nahe und für die ferne Zukunft, Szenario: WETTREG2006 A1B-trocke

In der nahen Zukunft zeigen sich in den höheren Mittelgebirgsregionen noch leicht positive Wasserbilanzen. Ein Großteil der Standorte befindet sich in dieser Periode bereits in Bereichen mit einer leicht negativen Wasserbilanz. In der betrachteten Simulation werden in der fernen Zukunft praktisch keine landwirtschaftlich genutzten Flächen mehr über eine positive Wasserbilanz verfügen. Es kommt fast flächendeckend zu stark negativen Bilanzen. Selbst in den Mittelgebirgsregionen werden deutlich negative Werte erreicht. In Rheinhessen und der Pfalz als ausgesprochene Trockenregionen werden im betrachteten Szenario negative klimatische Wasserbilanzen zwischen -200 bis -300 mm/KWBv berechnet.

Es lässt sich festhalten, dass sich die klimatischen Verhältnisse voraussichtlich deutlich verändern werden. Für die Landwirtschaft werden diese Änderungen einen Wandel mit sich bringen. Besonders negativ auswirken dürften sich die verringerten Niederschläge, die zusammen mit einer bedingt durch höhere Temperaturen erhöhten Evapotranspiration eine deutliche Verschlechterung der klimatischen Wasserbilanz in den Sommermonaten bewirken. Die deutlich geringeren Sommerniederschläge könnten verstärkt zu Trockenstress führen. Hiervon sind fast alle Kulturarten betroffen, da eine ausreichende Wasserversorgung in der Landwirtschaft von substanzieller Bedeutung ist.

.

5 Material

5.1 Geo (-basis) daten

Unter Geodaten versteht man Daten, die Informationen über geographische Verhältnisse an der Erdoberfläche enthalten, die über eine Koordinate eindeutig verortet sind. Die Koordinate bildet als Georeferenz dabei einen räumlichen Schlüssel, mit dem selbst thematisch zusammenhanglose Erscheinungen durch die räumliche Koinzidenz miteinander in Beziehung gesetzt werden können. Dieser räumliche Schlüssel ist das methodische Grundkonzept von Geographischen Informationssystemen. Geodaten bestehen analog zu der Teilung der Grundfunktionalitäten von GIS aus Sach- und Geoinformationen (BLASCHKE & LANG 2007). Geodaten im engeren bzw. eigentlichen Sinne liegen elektronisch in Form von Vektor- oder Rasterdaten vor.

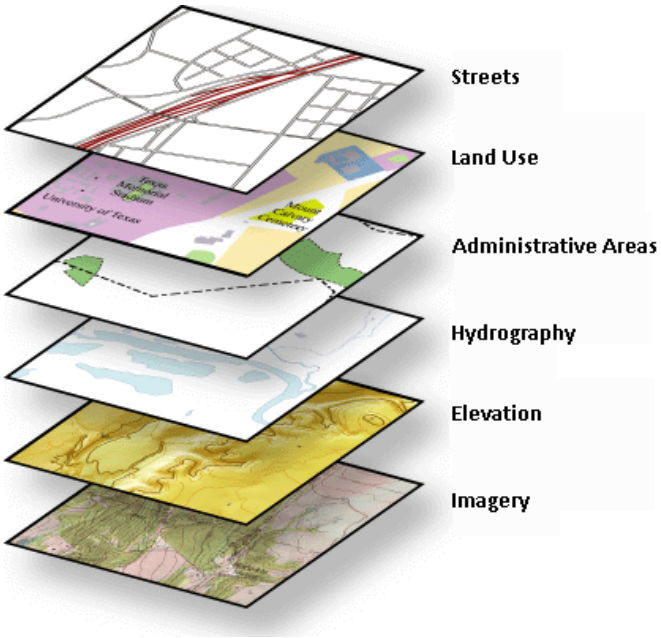


Abb. 10: Kombination verschiedener Geoinformationen mit gleichem Raumbezug im GIS (Quelle: ESRI 2010)

5.1.1 Vektordaten

Vektordaten in Geoinformationssystemen beschreiben geographische Objekte mit Hilfe von Punkten in einem Koordinatensystem. Je nach Art des darzustellenden Objekts werden die-

se Punkte in unterschiedliche räumliche Zusammenhänge gebracht, d. h. durch „gedachte“ Linien untereinander verbunden. Punktförmige Objekte werden durch die Position des Objektes als einfache Koordinate dargestellt (Punktvektor), linienförmige Objekte zu Linien (Linienvektor) verbunden und flächenhafte Objekte zu Polygonen (Polygonvektor).

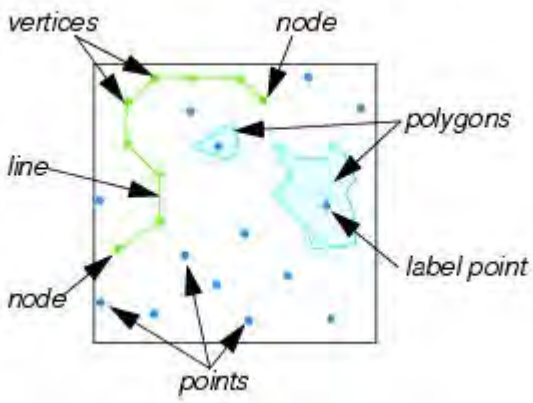


Abb. 11: Elemente von Vektorgeometrien (Quelle: ERDAS Field Guide 2010)

Jede so entstandene Vektorgeometrie eines Objektes wird mit einem Eintrag in einer dazugehörigen Datenbank mit Hilfe von Attributen näher beschrieben (Sachdaten). Die Möglichkeiten, ein Objekt mit Zusatzinformationen in der Datenbank zu beschreiben, sind nahezu unbegrenzt.

5.1.2 Katasterdaten (ALK/ ALKIS)

Zu den verwendeten Geobasisdaten gehört die Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK). Sie ermöglicht die Identifizierung von landwirtschaftlich genutzten Flächen (Folie 21, „tN“) in Rheinland-Pfalz über einen Objektartenkatalog, in dem alle beinhalteten Geoobjekte aufgelistet sind. Dieser Datensatz repräsentiert die gesamte Landesfläche von Rheinland-Pfalz und enthält flächendeckend auf (Teil-) Flurstücksbasis eine Angabe über die Nutzung der jeweiligen Fläche (Vermessungs- und Katasterverwaltung Rheinland-Pfalz 2008). Durch die ihm im Projektmodul Landwirtschaft zugewiesene Rolle als Referenzdatum in Bezug auf Maßstab und Geometrie, bildete er die Grundlage für einen Großteil der durchgeführten GIS-basierten Analysen. Den Einzelgeometrien dieses Datensatzes wurden über Verschneidungsprozesse standortortrelevante Informationen in Form von Attributen (Datenbank) für weitere Untersuchungsschritte angehängt (z. B. Boden- und Reliefparameter).

5.1.3 Bodendaten

Als Quelle für Wasser und Nährstoffe spielt der Boden eine der Schlüsselrollen bei der Charakterisierung eines Standortes. Mächtigkeit und Korngrößenverteilung steuern (u. a.) die Fähigkeit zur Bindung eines mehr oder weniger großen Vorrats pflanzenverfügbaren Wassers zur Überbrückung von Perioden mit fehlenden oder geringen Niederschlägen. Diese Fähigkeit findet ihren Ausdruck in der sogenannten nutzbaren Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraums (nFK).

Die in dieser Arbeit verwendeten Bodendaten sind eine Synthese aus den in der Automatisierten Liegenschaftskarte Rheinland-Pfalz enthaltenen hochauflösenden Daten der Bodenschätzung (BFD 5, Folie 42) und der Weinbergsbodenkartierung des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz. Beide Kartierungen liegen als Vektordaten vor und wurden GIS-basiert in einem Datensatz zusammengeführt. Die Angabe der nutzbaren Feldkapazität wurde über Verschneidungsprozesse als Attribut an den ALK-Datensatz angebunden, so dass diese Standorteigenschaft in der Angabe des flächengewichteten Mittels für jedes landwirtschaftlich genutzte (Teil-) Flurstück zur Verfügung steht.

5.1.4 Hochauflösende Anbaudaten

Im Jahr 1992 wurde von der Europäischen Union mit der Verordnung (EWG) Nr. 1765/92 eine Reform der gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) eingeleitet, welche die wichtigsten landwirtschaftlichen Kulturpflanzen sowie bestimmte Futteranbauflächen betrifft. Mit der Reform wurde eine Reihe direkter hektarbezogener Beihilfen eingeführt. Dabei wurde ein integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem (InVeKoS) für die gemeinschaftlichen Beihilferegelungen geschaffen. Dieses System sieht für die Landwirte in allen Mitgliedstaaten eine einheitliche Regelung jährlich einzureichender Beihilfeanträge, eine digitale Datenbank, Systeme zur Identifizierung der gemeldeten landwirtschaftlichen Flächen und der Tiere sowie ein integriertes Kontrollsystem vor, das innerhalb einer Übergangsfrist bis zum Januar 2005 als computergestütztes geographisches Flächeninformationssystem aufgebaut werden sollte. Das System zur Identifizierung landwirtschaftlicher Parzellen beruht auf Katasterplänen und -unterlagen in digitaler Form sowie auf weiteren Geodaten. Hier werden computergestützte Techniken eingesetzt, insbesondere spielen Geoinformationssysteme und die Verwendung fernerkundlicher Methoden und Daten eine Rolle.

Für das vorliegende Projekt konnte auf anonymisierte und thematisch aggregierte Anbaudaten der landwirtschaftlichen Betriebsdatenbank Rheinland-Pfalz (LBD Rheinland-Pfalz) aus den Jahren 2006 - 2009 zurückgegriffen werden. Die als Geodatum vorliegenden Daten stammen aus den jährlichen flächenbezogenen Antragsverfahren im Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem (InVeKoS), über das Landwirte nutzungsbezogene Flächenbeihilfen der EU in Anspruch nehmen können.

Die Systeme zur Beantragung der Beihilfen unterscheiden sich in Deutschland je nach Bundesland. Daraus ergeben sich einige Besonderheiten, was die Flächenschärfe der Anbauinformation betrifft. Die Beantragung erfolgt in Rheinland-Pfalz jeweils bezogen auf ein ganzes Flurstück. Es wird in der Fläche des Flurstücks nicht weiter differenziert, welchen genauen Bereich eine bestimmte Nutzung einnimmt. Unter Umständen verteilen sich mehrere Nutzungen auf die Fläche eines Flurstücks. In der Folge kommt es zu Mehrfachbelegungen der Flurstücksgeometrie mit verschiedenen Nutzungen. Dieser Unsicherheit der Zuordnung kann durch die Einbeziehung der Folie 21 „tatsächliche Nutzung“ der ALK (jetzt ALKIS) zumindest teilweise begegnet werden, mit deren Informationen in bestimmten Fällen die Verortung der Nutzungen auf dem jeweiligen Flurstück möglich ist.

Die Nutzungsinformation konnte über Verschneidungsprozesse als Attribut an den ALK-Datensatz angebunden werden und steht flurstückscharf für jede landwirtschaftlich genutzte Parzelle zur Verfügung.

5.1.5 Ertragsdaten: Zuckerrüben

Innerhalb einer internen Studie zum Auftreten von ertragsschwachen Jahren bei der Zuckerrübe wurde auf Zuckerrübenertragsdaten zurückgegriffen. Diese Daten stammen aus dem jährlich erscheinenden Geschäftsbericht des Verbandes der Hessisch-Pfälzischen Zuckerrübenanbauer e.V. Der Untersuchung lagen die Ertragsdaten auf Landkreisebene für den Zeitraum 1949 - 2006 zugrunde. Angegeben sind die durchschnittlich erzielten Masseerträge pro Hektar (in Tonnen) in der betrachteten kreisfreien Stadt. Es wurden Ertragsdatenreihen der kreisfreien Städte Mainz, Worms und Frankenthal verwendet. 1969 fand in RHEINLAND-PFALZ eine Kreisreform statt, bei der sich die Verwaltungsgliederung änderte. Hierdurch hat sich das Bezugsgebiet der in den Geschäftsberichten angegebenen durchschnittlichen Hektarerträge der genannten kreisfreien Städte ab 1970 leicht verändert. Dennoch konnten in der vorliegenden Studie durchgehende plausible Ertragsdatenreihen der Zuckerrübe verwendet werden (Verband der Hessisch-Pfälzischen Zuckerrübenanbauer e.V.: 1949 - 2010).

5.2 Rasterdaten

Rasterdaten sind Geodaten, die im Unterschied zu Vektordaten den Raum nicht in Form von Einzelobjekten unregelmäßiger Form und Lage darstellen, sondern diesen flächendeckend in ein Gitter aus einzelnen Rasterzellen einer definierten einheitlichen Größe auflösen. Rasterdaten können einerseits sich kontinuierlich im Raum verändernde Eigenschaften und Verhältnisse wiedergeben (z. B. Geländehöhe, Farbwerte von Bildern), andererseits den Raum durch die Zuordnung der Rasterzellen zu bestimmten thematischen Klassen beschreiben. Im vorliegenden Projekt wurde insbesondere auf digitale Höhenmodelle und daraus abgeleitete kontinuierliche Rauminformation zurückgegriffen.

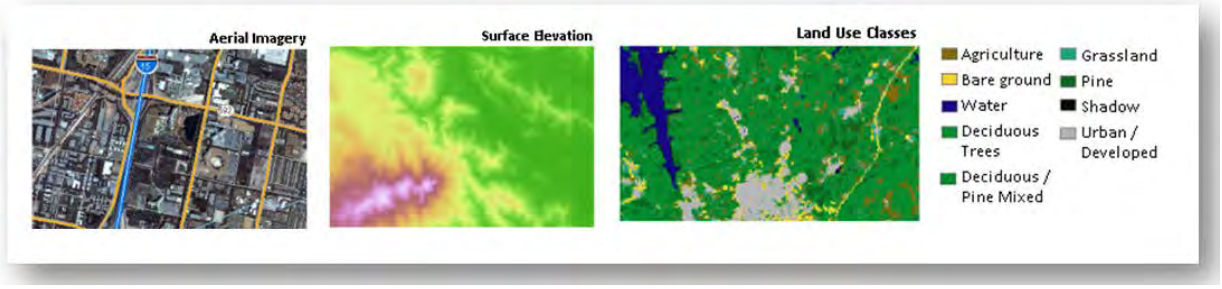


Abb. 12: Formen rasterbasierter Geoinformation (Quelle: ESRI 2012, verändert)

5.2.1 Digitale Höhenmodelle

Unter einem Digitalen Höhenmodell (DHM) versteht man ein digitalisiertes Modell einer Geländeoberfläche. DHM beschreiben die Reliefoberfläche durch eine Menge von regelmäßig

oder unregelmäßig verteilten Messpunkten (BARTELME 2006). Diese enthalten neben den zweidimensionalen Koordinaten auch die Höhenlage über NN. Aus Rohdaten mit oft unregelmäßig im Raum verteilten Höheninformationen werden durch räumliche Interpolationsverfahren (z. B. Dreiecksvermaschung / Triangulation, Inverse Distance Weighted) gleichmäßig gerasterte digitale Geländemodelle abgeleitet (STREIT 2004). Diese liegen ähnlich wie digitale Fotos in Form von Datensätzen aus Pixeln vor, die jedoch keine optische Information, sondern Werte zur Höhe eines Raumes im Verhältnis zu einer Bezugsebene beinhalten (PIKE; EVANS & HENGL 2009). Da Definitionen und Begrifflichkeiten im wissenschaftlichen und fachlichen Kontext sehr unterschiedlich gehandhabt werden, wird hier von Digitalen Höhenmodellen (DHM) bzw. synonym auch von Digitalen Geländemodellen (DGM, *engl. DTM digital terrain model*) gesprochen. Innerhalb der Forschungsarbeit wurden Digitale Höhenmodelle von Rheinland-Pfalz mit Auflösungen von 20 bzw. 90 m (*SRTM; Shuttle Radar Topography Mission*) verwendet. Die Höhenmodelle dienten vor allem zur Ableitung wichtiger Reliefparameter, wie der relativen Höhe (Höhe über Tiefenlinie), der Hangneigung, der Einstrahlung oder topographischen Feuchteindizes (siehe folgende Abbildung). Diese Rasterinformationen wurden später über eine GIS-basierte Prozesskette zur Erstellung zonaler Statistiken als Attribut an Vektordaten (ALK / ALKIS) angebunden.

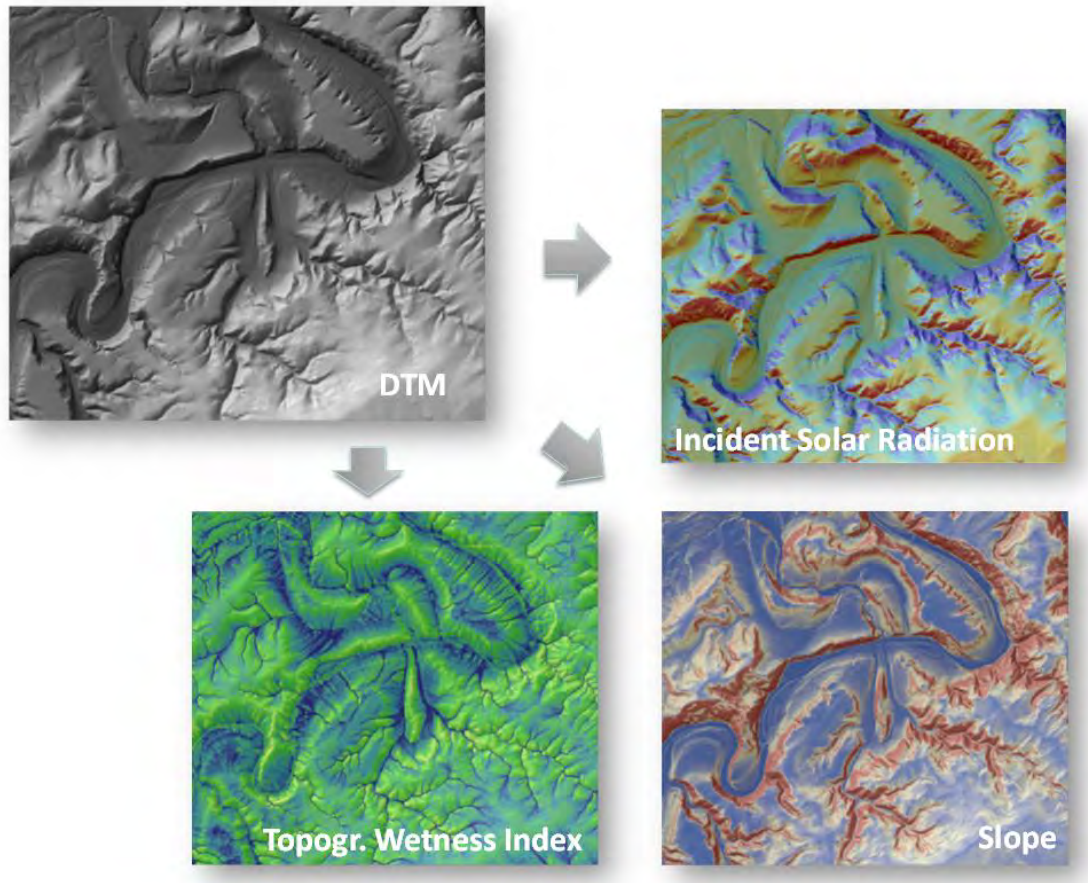


Abb. 13: Digitales Geländemodell (DTM: englisch digital terrain model) mit Ableitungen

5.3 Klimadaten

Die Ziele des Projektes KlimlandRP erforderten sowohl die Nutzung von Klimadaten aus den Simulationen regionaler Klimamodelle als auch die Arbeit mit Klimamessdaten eines als Referenzperiode genutzten 30-jährigen Zeitraums der jüngsten Vergangenheit (1971-2000). Die zur Verfügung stehenden Simulationsdaten stammen aus den regionalen Klimamodellen WETTREG2006, STAR, COSMO-CLM und REMO. In den vorliegenden Untersuchungen wurde auf Daten der Modelle WETTREG und STAR zurückgegriffen. Bei diesen Modellen handelt es sich nicht wie bei REMO und COSMO-CLM um dynamische Modelle, die flächenhaft in einer bestimmten Gitterweite Simulationsdaten erzeugen, sondern um statistische Klimamodelle, die die Messdaten bestimmter Klimastationen den Szenarien des *Special Report on Emission Scenarios* (*SRES*) des Weltklimarates folgend in die Zukunft extrapolieren. Der Umfang der in diesen Modellen verwendeten Klimastationen gibt auch den Umfang der Stationen vor, von denen Messdaten des Referenzzeitraums verwendet wurden.

Bestimmte Fragestellungen machten die Verfügbarkeit flächenhafter Klimadaten in einer vergleichsweise hohen Auflösung erforderlich. Zu diesem Zweck wurden stationsgebundene Simulationen des Modells WETTREG2006 sowie Messdaten des Referenzzeitraums mit geostatistischen Methoden in die Fläche interpoliert.

5.3.1 Stationsdaten

Die stationsgebundenen Untersuchungen basieren auf Klimadaten, welche durch das LUWG (Landesamt für Umweltschutz, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz) zur Verfügung gestellt wurden. Zusammen mit den Klimadaten wurde dem Projekt die Nutzung des Interaktiven Diagnose- und Präsentationstools (IDP) ermöglicht. Das im Auftrag mehrerer Länder und des Umweltbundesamtes von der Firma Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH entwickelte Programmpaket IDP ist ein Werkzeug zur explorativen Datenanalyse, mit dem die Resultate von Klimarechnungen unterschiedlicher Modelle (WETTREG2006, STAR, REMO, CLM) ausgewertet und anhand von Tabellen, Diagrammen und Karten visualisiert werden können. Datenreihen von Einzelstationen können aufbereitet und in ihrem zeitlichen Verlauf dargestellt und exportiert werden (KREIENKAMP & SPEKAT 2008). Für die nachfolgenden punktbasierten Analysen wurden mithilfe des IDP-Tools für unterschiedliche regionale Klimamodelle, Szenarien und Realisationen kontinuierliche Zeitreihen exportiert und aufbereitet.

Für die Punktanalysen wurden zwei regionale Klimamodelle ausgewählt. Regionale Klimamodelle betrachten einen Ausschnitt der Atmosphäre und benötigen hierzu Randbedingungen an den Rändern des Simulationsgebietes. Diese stammen aus Simulationen von Globalmodellen, sie werden also durch globale Modelle angetrieben. Man spricht von sogenannten „Downscaling“ Prozessen, die das Einbetten eines hochaufgelösten regionalen Modells in ein globales Klimamodell mit geringerer räumlicher Auflösung beschreiben. Die Downscaling-Prozesse basieren entweder auf dynamischen oder statistischen Methoden (GERSTENGABE & WERNER 2007). Das für die in dieser Arbeit verwendeten regionalen Klimamodelle relevante globale Modell ist das am Max-Planck-Institut für Meteorologie entwickelte „ECHAM 5“.

Das regionale Klimamodell WETTREG2006 wurde von der Firma Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH auf Grundlage von Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) über statistische Methoden entwickelt und ist in das Globalmodell ECHAM 5 eingebettet. WETTREG2006 basiert auf einer objektiven Wetterlagen-basierten Regionalisierungsmethode. Die Simulationen wurden auf Basis der SRES-Emissionsszenarien A1B, A2 und B1 des IPCC durchgeführt (UBA, 2007).

Das Regionalmodell STAR ist ebenfalls ein statistisches Klimamodell. Es wurde durch das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) entwickelt, um regionale Klimaprojektionen der nahen Zukunft (50-60 Jahre) erzeugen zu können, und basiert auf langjährigen Messreihen von Tagesmittelwerten an Messstationen innerhalb eines Untersuchungsgebietes. Den Projektionen liegen ebenfalls das globale Atmosphären-Zirkulationsmodell „ECHAM 5“ und das Emissionsszenario A1B des Weltklimarates zugrunde (PIK 2007).

In Rheinland-Pfalz stehen für ca. 20 Klimastationen längere Klimazeitreihen zur Verfügung. Das Klimamodell WETTREG2006 bildet hierbei den Zeitraum 2001-2100 ab, das Klimamodell STAR den Zeitraum 2001-2060. Der rückliegende Zeitraum 1971-2000 stützt sich auf Messdaten der Einzelstationen.

Die Zeitreihenanalysen an Einzelstationen basieren auf folgenden Klimasimulationen: WETTREG2006 mit den Szenarien A1B-normal, A1B-trocken, A2-normal und A2-trocken sowie auf STAR mit den Szenarien A1B-normal und A1B-trocken. Im Forschungsprojekt wird verstärkt auf das Szenario A1B zurückgegriffen. Im Rahmen der verfügbaren Szenarien spiegelt es die aktuell beobachtete Entwicklung der atmosphärischen CO_2-Konzentration und damit indirekt auch der Temperatur annähernd wider (siehe auch folgende Abbildung). Es kann deshalb nach jetzigem Stand als vergleichsweise realitätsnahes Szenario interpretiert werden.

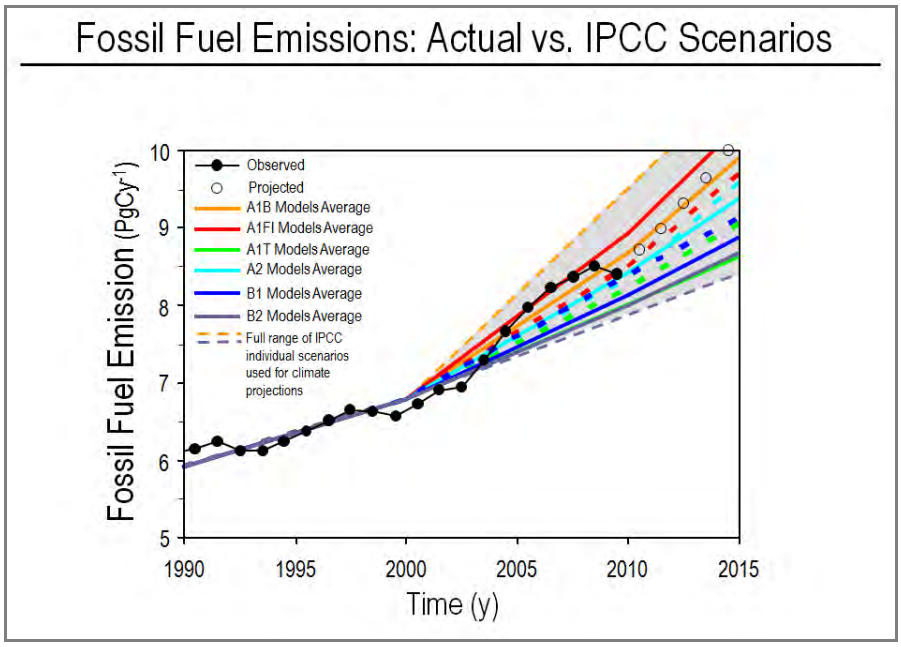


Abb. 14: SRES-Emissionsszenarien für das 21. Jahrhundert – globale Erwärmung (IPCC 2007)

5.3.2 Interpolierte Klimadaten für flächenbezogene Auswertungen

Im vorliegenden Projekt wurden neben Klimazeitreihen an Messstationen auch in die Fläche gerechnete (interpolierte) Klimadaten verwendet. Hierzu wurden die punktbasierten Klimaprojektionen des regionalen Klimamodells WETTREG2006 mit Methoden der Geostatistik regionalisiert, so dass sie für Rheinland-Pfalz flächendeckend vorliegen (1 x 1 km Raster). Hierzu wurde die Software INTERMET verwendet. Die regionalisierten Klimadaten bilden die Zeitschienen 1971-2000, 2021-2050 und 2071-2100 ab, so dass keine durchgängigen Zeitreihen zur Verfügung stehen. Der Zeitraum 1971-2000 basiert auf Messwerten, die beiden Zukunftszeitschienen stellen Klimasimulationen dar. Als interpolierte Klimadaten stehen die beiden Szenarien WETTREG2006 A1B-trocken und A1B-normal zur Verfügung. In der zeitlichen Auflösung werden Monats- und Tageswerte unterschieden. Innerhalb dieses Moduls finden verstärkt Tageswerte Betrachtung. Folgende Parameter standen für Analysen zur Verfügung: Niederschlag, mittlere Temperatur, Minimum- und Maximumtemperatur, relative Luftfeuchte, Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit. Die Ergebnisse der interpolierten Monats- und Tageswerte lagen als Binärdaten vor (HYDRON GmbH 2009) und konnten mit

Hilfe der objekt-orientierten Programmiersprache „R“ verarbeitet und für spätere GIS-Analysen aufbereitet werden.

Klimadaten in dieser Auflösung werfen die Frage nach der Repräsentativität des jeweiligen Wertes für den ihm zugewiesenen Raum auf. Die ermittelten Klimawerte sind Werte für die Mitte der 1 x 1 km Zellen und müssen auch als solche verstanden werden. Um die Aussagekraft dieses Wertes für den ihm zugewiesenen Raum (1 x 1 km-Kachel) aufzuzeigen, wurde ein eigener Index, welcher sich spezifisch mit dieser Fragestellung beschäftigt, entwickelt. Dieser wird ausführlich im Methodenteil besprochen.

5.4 Software

Innerhalb des Moduls Landwirtschaft wurden in besonderem Maße die Möglichkeiten geographischer Informationssysteme (GIS) genutzt. Hier sind als wichtigste Softwareprodukte ESRI ArcGIS und SAGA GIS zu nennen. Neben der GIS-Software wurde vor allem auf die objekt-orientierte Programmiersprache und Softwareumgebung „R“ zurückgegriffen. Für statistische Auswertungen wurden je nach Erfordernissen Microsoft Excel und R verwendet.

5.4.1 Geoinformationssysteme

Mit Geoinformationssystemen (GIS) können raumbezogene Daten digital erfasst, gespeichert, verwaltet, aktualisiert, analysiert und modelliert sowie grafisch (z. B. in Form von Karten) präsentiert werden (DE LANGE 2006).

ESRI – ArcGIS

In dieser Forschungsarbeit wurde ArcGis Desktop in den Versionen ArcView 9.3 und ArcInfo 9.3 verwendet.

SAGA GIS

SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) ist ein quelloffenes Geoinformationssystem und dient ebenfalls der Analyse raumbezogener Daten. Es wurde an den Universitäten Göttingen und Hamburg entwickelt. SAGA beinhaltet alle Basisfunktionen eines kommerziellen GIS und bietet darüber hinaus umfangreiche Funktionen und Methoden in Analyse- und Darstellung von Geodaten, z. B. der Reliefanalyse, der Geostatistik, der Bildklassifizierung oder der Vektordatenanalyse an. In der zum jetzigen Zeitpunkt aktuellen Version 2.0.8 stehen über 300 Module zur Verfügung. Der Schwerpunkt des Programms liegt auf physisch-geographischen Berechnungen und Darstellungen, welche meist auf der Basis von Rasterdaten, insbesondere digitalen Höhendaten, durchgeführt werden. Darüber hinaus können auch Bilddaten in Form von Luft- und Satellitenbildern, thematische Daten sowie Vektordaten und Tabellen verarbeitet werden (BÖHNER 2006). SAGA unterstützt verschiedene Formate im Bereich der Geodaten und erlaubt den Datentransfer unter Geographischen Informationssystemen (z. B. ESRI – ArcGIS).

5.4.2 Programmiersprache und Softwareumgebung „R“

„R“ ist eine objekt-orientierte Programmiersprache und eine plattformunabhängige Open Source Software für statistische Analysen und grafische Darstellungen von Daten (IHAKA & GENTLEMAN 1996). Es besteht zudem die Möglichkeit, Daten aus Geoinformationssystemen wie z. B. ArcGIS zu importieren und nach GIS zu exportieren (BIGLER & WUNDER 2003). Innerhalb dieses Projektes wurde „R“ für das Einlesen von großen als Binärdaten vorliegenden interpolierten Klimadatensätzen verwendet. Weitere Anwendung fand R in der Programmierung spezifischer Fragestellungen bzw. Abfragemasken hinsichtlich dieser Klimadaten. Zudem diente die Programmiersprache „R“ zur Umsetzung eines Grünland-Ertragsmodells auf rheinland-pfälzische Verhältnisse innerhalb einer projektinternen Studie.

6 Methoden I – Übergeordnete Ansätze

Die im Modul Landwirtschaft angewendeten Methoden beziehen sich auf die Beschreibung landwirtschaftlicher Standorte sowie die Untersuchung von Klimazeitreihen verschiedener Zeiträume im Hinblick auf Fragestellungen, die aus landwirtschaftlicher Sicht im Klimawandel von Interesse sind. Bei der Standortbeschreibung geht es nicht um die modellhafte Erfassung von Beispielstandorten und deren möglichst umfassende Modellierung (z. B. Erträge). Der Fokus liegt bei den vorliegenden Arbeiten vielmehr auf der Bereitstellung von Informationen für reale und verortbare landwirtschaftliche Standorte, und zwar in Form von Merkmalskombinationen unterschiedlicher Geofaktoren. Mit Hilfe dieser Informationen soll eine Einschätzung von Chancen und Risiken ermöglicht werden, denen dieser spezielle Standort im Klimawandel ausgesetzt ist. Gleichzeitig sollte durch die Arbeit aber auch eine umfassende, landesweite Aussage für die Landwirtschaft in Rheinland-Pfalz möglich sein. Aus diesem Grund wurden im Laufe der Arbeiten für dieses Projekt sämtliche landwirtschaftlich genutzten Flächen in Rheinland-Pfalz mit einer Anzahl von Eigenschaften beschrieben, die in Fragen des Klimawandels bedeutsam sind. Es ging um die Ausstattung jedes einzelnen Standortes in Bezug auf die Herausforderungen des Klimawandels. Grundlage für diese Aufgaben war der Einsatz von landesweit verfügbaren Geodaten in Geoinformationssystemen.

Die Untersuchung von Klimazeitreihen im Hinblick auf landwirtschaftlich relevante Fragestellungen bildete den zweiten methodischen Kern der Arbeiten. Wie weiter oben beschrieben, wurden die Zeitreihen von Simulations- und Messdaten an bestimmten Klimastationen analysiert. Außerdem wurden aus diesen Stationsdaten interpolierte flächenhafte Klimadaten ausgewertet. Die Ergebnisse lieferten Antworten auf Fragestellungen, die sich rein aus Klimadaten ableiten lassen und für die Landwirtschaft allgemein oder für bestimmte Kulturen wichtig sind.

Standort und Klima bilden die Grundvoraussetzungen für den erfolgreichen Anbau einer Nutzpflanze. In einem dritten Schritt wurden die hochauflösenden Informationen zu den nichtklimatischen Standortfaktoren mit flächenhaften Klimadaten kombiniert. Durch die Einbeziehung der zeitlich variablen Klimainformation konnte so eine Abschätzung über die mögliche zukünftige Entwicklung von klimawandelbedingten Risiken getroffen werden.

6.1 Geodatenbasis und GIS-basierte Standortanalysen

Landwirtschaftlich genutzte Räume werden sich aufgrund des Klimawandels voraussichtlich verändern. Wie angesprochen, geht es dabei um die Verarbeitung bzw. Erzeugung von Informationen mit einem klaren Raumbezug (Georeferenz). Dieser wird durch den Einsatz von Geo-Informationssystemen (GIS) erreicht, mit deren Hilfe die Darstellung, Analyse und Modellierung raumbezogener Daten (Geodaten) erfolgt. Über eine Zusammenführung standortrelevanter Geoinformationen zu Boden, Klima und Relief in einer geeigneten Datenbank und die Verknüpfung mit hochaufgelösten Anbauinformationen werden in einem dreistufigen Ansatz Geodatenanalysen durchgeführt. Die Schaffung der Voraussetzungen dafür, d. h. die Erzeugung geeigneter Daten und die dafür notwendige Entwicklung und Bereitstellung geeigneter Workflows und Tools, war ebenso Teil der Arbeit.

Was ist ein Standort? – Basisgeometrie ALK Folie 21

Zur Durchführung von GIS-basierten Standortanalysen ist es notwendig, räumlich repräsentative Standorte zu definieren. In diesem Zusammenhang steht vorab die Frage nach dem verwendeten Datenformat, also die Wahl einer raster- oder einer vektorbasierten Arbeitsweise.

Es wurde eine vektorbasierte Arbeitsweise gewählt. Die Gründe dafür liegen in den flexibleren Nutzungsmöglichkeiten der angeschlossenen Datenbank in Form von Abfragen, Berechnungen und Statistiken sowie den Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Geodaten durch Verschneidungs- und Verknüpfungsprozesse.

Die die landwirtschaftlichen Standorte repräsentierende Basisgeometrie für die durchgeführten Berechnungen und Analysen sollte

a) einen Bezug zu tatsächlichen bewirtschafteten räumlichen Einheiten besitzen, und
b) eine Einordnung der erzeugten Informationen in offizielle Datenbestände ermöglichen.

Diese Voraussetzungen werden von den Geometrien des Automatisierten Liegenschaftskatasters ALK, Folie 21, „tatsächliche Nutzung“ (tN) erfüllt. Dieser Datensatz repräsentiert die gesamte Landesfläche von Rheinland-Pfalz und enthält auf (Teil-) Flurstücksbasis eine Information über die Nutzung der jeweiligen Fläche.

Der Datensatz, der die Gesamtheit der rheinland-pfälzischen Landesfläche lückenlos abdeckt, wurde auf die landwirtschaftlich genutzten Flächen beschränkt. Die Geometrien dienten so als Basis für die landesweiten vektorbasierten Analysen.

6.2 Charakterisierung eines Standorts – Geodatenprozessierungen zur Schaffung einer geeigneten Geodatenbasis

6.2.1 Reliefanalyse

Zahlreiche standortrelevante Informationen stehen in direktem oder indirektem Zusammenhang mit der Reliefsituation des jeweiligen Standorts. HENGL & MACMILLAN (2009 weisen mit Bezug auf ROWE (1996) weisen darauf hin, dass Energie- und Feuchtigkeitsregime die beiden bestimmenden Variablen in Ökosystemen sind, welche wiederum primär durch die topographischen Verhältnisse gesteuert werden. Das Relief nimmt also Einfluss auf Energiegenuss und Wasserversorgung eines Standortes, jenen Eigenschaften, denen auch in Fragen des Klimawandels eine herausgehobene Bedeutung zukommt.

Zwei für das Land Rheinland-Pfalz flächendeckend vorliegende digitale Höhenmodelle mit Auflösungen von 90 m und 20 m wurden deshalb einer GIS-basierten Reliefanalyse unterzogen, in der verschiedene geomorphometrische Parameter landesweit auf Rasterbasis berechnet wurden. Die Neuberechnungen ergänzen oder ersetzen Daten der DGMK 20+ des Geodatenbestandes des Landes Rheinland-Pfalz, in der bereits zahlreiche Ableitungen aus dem entsprechenden Höhenmodell vorliegen. Flächendeckend liegen u. a. vor:

- Topographischer Feuchteindex
- SAGA-Wetness Index
- Potentielle Sonneneinstrahlung (Jahr)
- Höhe über Tiefenlinie
- Konvergenzindex
- Großräumige Leelage
- Kleinräumige Leelage

Auf eine detaillierte Beschreibung der hier verwendeten, aus digitalen Höhenmodellen abgeleiteten oder ableitbaren Parameter soll hier verzichtet werden. Diese finden sich beispielsweise bei BEHRENS (2003), WILSON & GALLANT (2000) oder HENGL & REUTER (2009).

6.2.2 Einbindung von Bodendaten

Wie bereits erwähnt, spielt der Boden eine der Schlüsselrollen bei der Charakterisierung eines Standortes. Mächtigkeit und Korngrößenverteilung steuern (u. a.) die Fähigkeit zur Bindung eines mehr oder weniger großen Vorrats pflanzenverfügbaren Wassers zur Überbrückung von Perioden mit fehlenden oder geringen Niederschlägen. Diese Fähigkeit findet ihren Ausdruck in der sogenannten nutzbaren Feldkapazität des Bodenraums. Als Geodatum liegt diese Angabe flurstücksscharf in einer Bearbeitung der Bodenschätzungsdaten (als ALK Folie 42) und der Weinbergsbodenkartierung des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz vor. Diese Informationen wurden in einem Datensatz zusammengeführt.

Vorgehensweise zur Integration von Relief- und Bodendaten in die Geometrien der ALK Folie 21 (tN)

Das Ziel einer landesweiten Charakterisierung aller landwirtschaftlich genutzten Flächen im Hinblick auf Toleranz und Risiko im Klimawandel macht die Zusammenführung umfangreicher Geoinformationen erforderlich. Hier müssen die oben beschriebenen vektor- und rasterbasierten Daten als Zusatzinformation in die Datenbank der Geometrien der Folie 21 der ALK integriert werden.

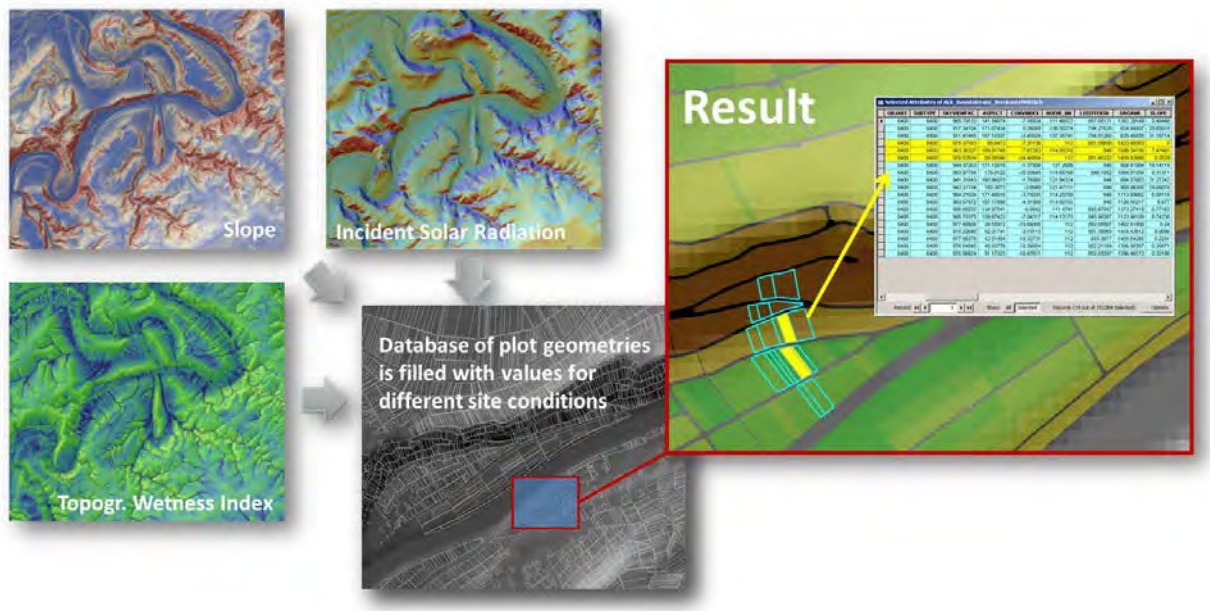


Abb. 15: Übertragung von Werten kontinuierlicher Rasterinformationen in die Datenbank diskreter Objekte

Die Übertragung rasterbasierter Information auf Geometriedaten geschieht im GIS in der Regel über sogenannte „Zonale Statistik“. Hier werden für eine Geometrie statistische Kennwerte über die Werte der Zellen eines Rasterdatensatzes berechnet, die von ihr räumlich überlagert werden. So kann zum Beispiel die mittlere Hangneigung eines Flurstücks errechnet und als objektbezogene Information in die Datenbank übernommen werden. Die Nutzung eines statistischen Wertes im Zuge dieses Bearbeitungsschrittes ist notwendig, da

hier in den meisten Fällen eine sich kontinuierlich im Raum verändernde Information für ein klar begrenztes Objekt (die Vektorgeometrie des Teilflurstücks) diskretisiert werden muss. Die Bearbeitung eines natürlichen Raumes, in diesem Falle einer Geländeoberfläche, die einer Vielzahl von reliefbildenden Einflüssen unterworfenen ist, führt dazu, dass die Veränderung einer Eigenschaft im Raum nicht unbedingt einem stetigen Trend unterliegt, sondern abrupte Wechsel, z. B. hervorgerufen durch Geländekanten, aufweist. Konkret kann das zum Beispiel dazu führen, dass ein Teil eines Flurstücks in einem stark geneigten Hangbereich liegt und der Rest im flachen Talboden. Solchen Wechseln und den daraus resultierenden, im Bereich einer Flurstücksgeometrie ungleich verteilten Verhältnissen wird mit der flächengewichteten Berechnung statistischer Werte, z. B. des Mittelwertes, begegnet.

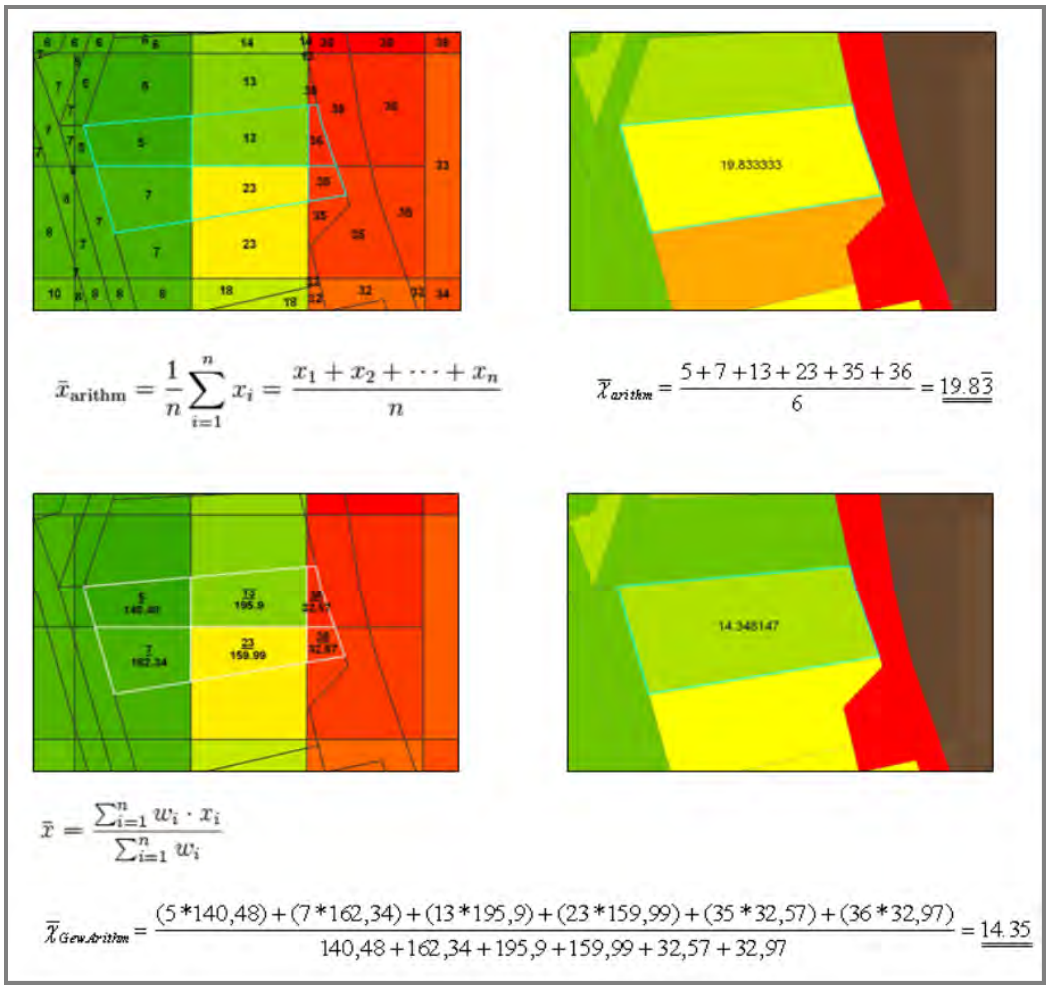


Abb. 16: Berechnung des arithmetischen (oben) und des flächengewichteten Mittels (unten)

Die Standard-Funktionalität der verwendeten GIS-Software ArcGIS 9.3 stellt Tools zur Berechnung zonaler Statistiken zur Verfügung. Durch den Umfang der zu prozessierenden Daten (ca. 2,6 Mio. Polygone) und den Bedarf nach einer flächenbezogenen Gewichtung statistischer Kennwerte (stabilere Aussage) war deren Nutzung jedoch nicht möglich. Ein eigenes Tool wurde entwickelt und in einer automatisierten Prozesskette flurstücksbezogen flächengewichtete statistische Kennwerte für sehr große Datenmengen errechnet. Realisiert wurde dieses Tool in ESRI ArcGIS 9.3.1 unter Verwendung des ArcGIS Model Builders.

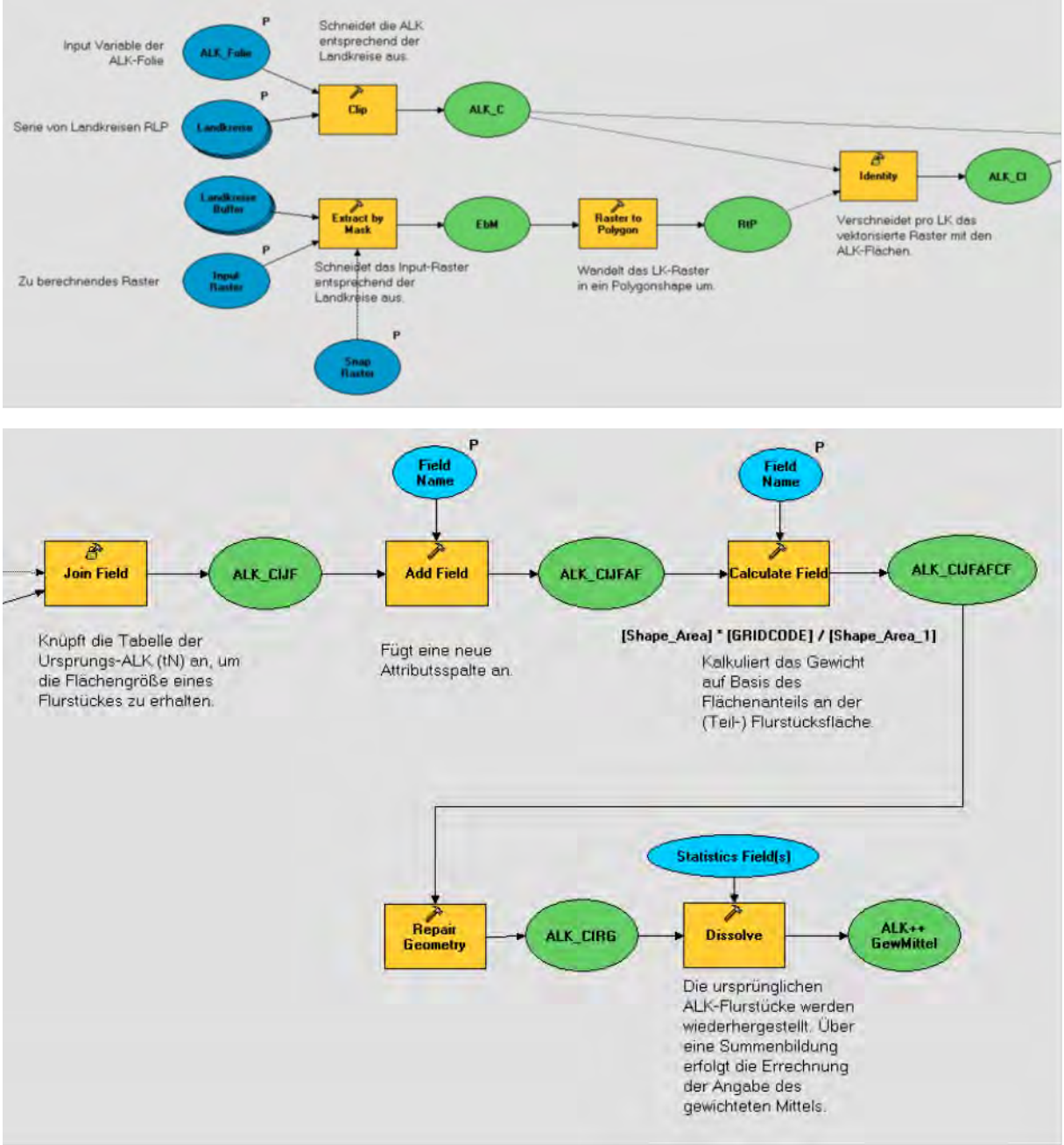


Abb. 17: Prozesskette zur Berechnung flächengewichteter statistischer Kennwerte

Dadurch wurden die technischen Voraussetzungen zur GIS-basierten Übertragung von Geoinformation verschiedener Formate auf Vektorgeometrien geschaffen. Unter Verwendung dieses Tools wurden daraufhin die oben beschriebenen Relief- und Bodenparameter in die Datenbank der ALK Folie 21 integriert. Somit erhielt jeder landwirtschaftliche Standort eine individuelle Charakterisierung, die weitergehende datenbankgestützte Analysen erlaubt.

6.3 Zeitreihenanalysen von Klimadaten

Die durchgeführten Untersuchungen von Zeitreihen beschäftigen sich mit klima- und witterungsabhängigen landwirtschaftlichen Fragestellungen, die sich in Zeitreihen aus Klimadaten in Form bestimmter Muster niederschlagen.

Klimatische Einflüsse besitzen einen sehr großen Einfluss auf Erfolg oder Misserfolg in der landwirtschaftlichen Produktion. Dabei stehen mehrere Aspekte der klimatischen Entwicklung im Interesse der Untersuchungen, die sich im Hinblick auf ihre zeitlichen Dimensionen und die daraus resultierenden ökonomischen Auswirkungen unterscheiden. Letztlich spiegeln sich darin die zeitlichen Dimensionen der Begriffe Wetter, Witterung und Klima wider.

Zu den Haupteigenschaften der Landwirtschaft im Zusammenhang mit den erwarteten Entwicklungen des Klimas gehören ihre Saisonalität und Sensitivität gegenüber Einzelereignissen. Der kurzfristigste Einfluss atmosphärischer Verhältnisse, der in den vorliegenden Untersuchungen näher beleuchtet wird, spielt sich auf der Ebene der Wettererscheinungen ab. Deren vergleichsweise punktuelles Eintreten über die Dauer von wenigen Minuten bis zu mehreren Tagen kann direkten Einfluss auf den kurzfristigen landwirtschaftlichen Erfolg haben, wie es zum Beispiel bei Starkregenereignissen und Spät- oder Winterfrösten der Fall ist. Weiterhin im Fokus steht auf der Witterungsebene das Auftreten und Zusammenspiel von günstigen oder ungünstigen Verhältnissen während einer gesamten Anbauperiode. Als Beispiele können hier die Beschreibung der weinbaulichen thermischen Verhältnisse mit dem Huglin-Index dienen oder der Beginn und die Dauer der Vegetationszeit im Grünland.

Zeitlich übergeordnet, und letztendlich entscheidend, steht immer die Untersuchung der Verhältnisse in langjährigen, klimatisch und wirtschaftlich relevanten Zeiträumen, an denen sich ablesen lässt, ob und wie stark sich klimatische Produktionsverhältnisse ändern bzw. eine gerichtete Entwicklung auf einen neuen Zustand hin stattfindet.

An diesem Punkt kommt wiederum die Besonderheit der landwirtschaftlichen Produktionsweise zum Ausdruck: Eine erfolgreiche Ernte hängt stark von den Bedingungen während der laufenden Vegetationsperiode ab. Die Witterung steuert dabei u. a. Zuwachs, Qualität und Schädlingsbefall. Diese Bedingungen schwanken von Jahr zu Jahr. Die Eintrittshäufigkeit günstiger und weniger günstiger Verhältnisse entscheidet mit ihren Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit direkt über den mittel- bis langfristigen Erfolg einer Kultur. In Fragen der Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft ist es deshalb wichtig, neben den sich über die Zeit ändernden mittleren (klimatischen) Verhältnissen insbesondere die Häufigkeit bestimmter Phänomene zu betrachten: Bei vielen Fragen des Klimawandels im Zusammenhang mit der Landwirtschaft handelt es sich um Frequenzprobleme.

Bei den verwendeten Klimadaten handelt es sich um Zeitreihen von tagesbezogenen Werten für verschiedene klimatische Parameter, die entweder gemessene oder anhand verschiedener Szenarien mit regionalen Klimamodellen simulierte Werte enthalten.

Vereinfachend gesagt, werden diese Zeitreihen nach Mustern bzw. Merkmalskombinationen durchsucht, deren Auftreten Aussagen im Zusammenhang mit den Witterungs- und Klimaverhältnissen des Anbaus einer oder mehrerer landwirtschaftlicher Kulturen erlaubt. Zum Teil

handelt es sich dabei um aus eigenen Datenanalysen gewonnene Ableitungen von Zusammenhängen, z. B. den Fingerabdruck klimatisch bedingt ertragsschwacher Jahrgänge bei der Zuckerrübe. Zum Teil wird auch auf bestehende Informationen, Modelle oder Indikatoren zurückgegriffen, wie zum Beispiel das Geisenheimer Riesling-Modell, den Huglin-Index oder Angaben zum Vernalisationsbedürfnis von Wintergetreide.

Die Analysen setzen entweder die Berechnungsalgorithmen von Modellen oder Indikatoren um oder durchsuchen die Zeitreihen mit Hilfe von Abfragemasken. Dabei sind die eingesetzten Mittel und die sich daraus ergebende Vorgehensweise abhängig vom Datenumfang der Analyse und der Komplexität der Umsetzung. Es ist dabei von Bedeutung ob eine Fragestellung anhand von stationsgebundenen Daten beantwortet werden soll, oder ob eine flächendeckende Aussage gebraucht wird, die den Einsatz von interpolierten Klimadaten erfordert. Die Auswertung von Klimadaten einzelner Stationen funktioniert durch die geringe Datenmenge in den meisten Fällen gut mit einfachen Tabellenkalkulationsprogrammen. Der Raumbezug spielt bei den stationsgebundenen Untersuchungen eine geringere Rolle. Trotzdem wurde durch die Auswahl der verwendeten Zeitreihen sowie durch Vergleiche der Daten mehrerer Stationen die Möglichkeit angestrebt, die gewonnenen Ergebnisse auf einen größeren Raum zu verallgemeinern.

Abfragen in flächenhaft vorliegenden, aus interpolierten Klimadaten bestehenden Datensätzen müssen in einer geeigneten Umgebung programmiert und bearbeitet werden. Bei diesen Daten handelt es sich, grob gesagt, um Zeitreihen tagesbezogener Daten (in drei „Zeitscheiben“ zwischen 1971 und 2100) für jede von insgesamt über 20.000 Gitterzellen, die sich in einer Ausdehnung von je 1 x 1 km über ganz Rheinland-Pfalz erstrecken. Sie liegen im Binärformat vor und können aufgrund ihres Umfangs nicht in den Standardfunktionalitäten von Geoinformationssystemen oder anderer verfügbarer Software verarbeitet und analysiert werden. Die im vorliegenden Projekt zu Aufbereitung und Analyse solcher Daten genutzte Software ist das freie Statistik-Paket „R“, in dem sowohl Programmierung als auch Datenverarbeitung umgesetzt werden konnten. Beispielhaft können hier die flächenhafte Entwicklung des Huglin-Index im Weinbau und die flächendeckende Modellierung des Vegetationsbeginns beim Grünland genannt werden.

6.3.1 Repräsentanz der interpolierten Klimadaten – Index zur Abschätzung der Reliefvariabilität

Im Projekt wurden punktbasierte Klimaprojektionen des regionalen Klimamodells WETTREG2006 mit Methoden der Geostatistik regionalisiert. Einen wichtigen Aspekt bildeten hierbei Arbeiten zur Repräsentanz der im vorliegenden Projekt verwendeten interpolierten Klimadaten.

Die Gitterweite der aus der Regionalisierung hervorgegangenen interpolierten Daten für verschiedene Klimaparameter beträgt 1 x 1 km. Die Nutzung solcher Daten wirft u. a. die Frage nach der Repräsentativität des jeweiligen Wertes für den ihm zugewiesenen Raum auf (DALY 2006). Je nach betrachtetem Parameter können bei großer Variabilität des Reliefs z. B. durch den Einfluss von Sonn- und Schattenlagen, Höhenlage, unterschiedliche Hangneigun-

gen oder die Bildung von Kaltluftseen und -abflüssen mehr oder weniger große räumliche Schwankungen innerhalb des Raumes einer Gitterzelle auftreten. Die Aussagefähigkeit eines Wertes ist in solchen Fällen eingeschränkt. Sollen regionalisierte Klimadaten in der vorliegenden Auflösung genutzt werden, besteht bei darauf aufbauenden Analysen die Gefahr einer nur scheinbaren Genauigkeit der Ergebnisse in Bereichen mit ausgeprägtem Relief (DALY 2006, STOCK, mündl. 2009).

Im Projekt wurde ein Werkzeug in Form eines Geodatensatzes entwickelt, das eine Abschätzung der Repräsentanz und damit der Aussagefähigkeit eines für eine bestimmte räumliche Einheit (hier: 1 x 1 km – Gitterzelle) errechneten Klimawertes in Abhängigkeit von der Variabilität ihres Reliefs erlaubt. Für jede Zelle des Interpolationsgitters wurde anhand mehrerer Reliefparameter ein Variationskoeffizient abgeleitet. Diese Angabe liegt für alle Gitterzellen des Interpolationsrasters landesweit in Form eines Vektordatensatzes vor und kann im GIS mit anderen Daten verarbeitet werden. Beispielsweise können gezielt Räume für Analysen ausgesucht oder ausgeschlossen oder bestimmte Zellen in Bezug auf ihr Relief verglichen werden.

Als Grundlage wurden die Höhe über NN und die Incoming Solar Radiation (potentielle Sonneneinstrahlung Zeitraum: 1 Jahr) ausgewählt, wobei die Sonneneinstrahlung als Funktion aus Hangneigung und Exposition diese beiden Grundparameter des Reliefs repräsentiert. Zudem handelt es sich bei der Meereshöhe und der Sonneneinstrahlung um maßgebliche Einflussgrößen für die Temperatur.

Für jede Gitterzelle wurden flächengewichtet Mittelwert und Standardabweichung ausgerechnet sowie daraus der Variationskoeffizient bestimmt. Die Variationskoeffizienten beider Parameter wurden gemittelt. Die Angabe erfolgt in Prozent.

$$V_{terr} = \left(\frac{s_{alt}}{\overline{x}_{alt}} + \frac{s_{incsol}}{\overline{x}_{incsol}} \right) / 2$$

Die Berechnung wurde im Geoinformationssystem unter Verwendung einer modifizierten Form der weiter oben beschriebenen Prozesskette zur Berechnung des flächengewichteten Mittelwertes durchgeführt. Darüber hinaus wurden im ArcGIS Model Builder weitere Schritte zur Berechnung der flächengewichteten Standardabweichung angehängt.

Die folgende Abbildung zeigt die Abschätzung der landesweiten Repräsentanz der zugrunde liegenden interpolierten Klimadaten (1 x 1 km).

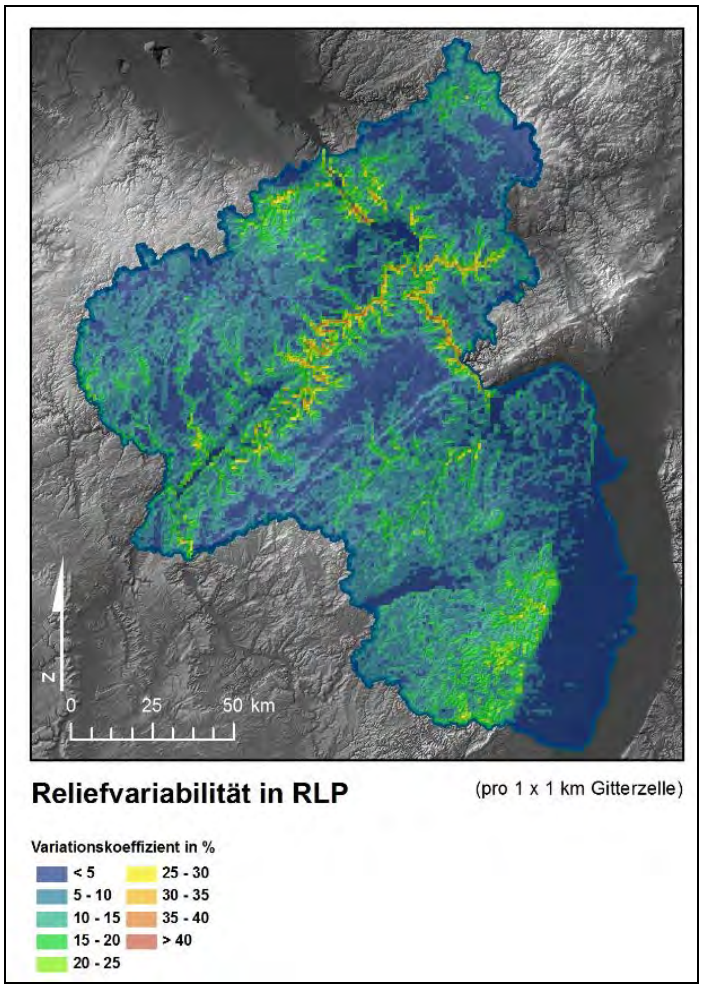


Abb. 18: Reliefvariabilität in Rheinland-Pfalz (eigene Darst.)

Die Reliefvariabilität in Rheinland-Pfalz zeigt Variationskoeffizienten zwischen 0-42,8 %. Starke Reliefvariabilitäten treten erwartungsgemäß vor allem in den tief eingeschnittenen Tälern von Mosel, Mittelrhein, Ahr und Lahn auf. In diesen Regionen ist die Repräsentativität von interpolierten Werten reliefsensitiver Klimaparameter unter Umständen stark reduziert. Geringere Reliefvariabilitäten treten vor allem im Vorderpfälzer Tiefland, dem Nördlichen Oberrheintiefland, dem Mittelrheinischen Becken, den Hunsrückhochflächen und der Kaiserslauterer Senke auf. Hier kann die Sicherheit von Klimawerten hinsichtlich des Reliefs als hoch bezeichnet werden. Auffallend sind Bereiche mit geringen Variationskoeffizienten in Regionen, die erwartungsgemäß durch höhere Reliefvariabilitäten geprägt sein müssten. Solche Regionen finden sich lokal begrenzt in den Mittelgebirgsregionen der Pfalz, des Westerwaldes, der Eifel, des Taunus und des Hunsrücks.

Die folgende statistische Auswertung zeigt eine deutliche Tendenz hin zu einer geringeren Anzahl an Gitterzellen bei höherem Variationskoeffizienten. Insgesamt besitzen 13.811 Gitterzellen (67,5 %) geringe Reliefvariabilitäten mit Variationskoeffizienten bis 10 %. 5771 Gitterzellen (28,2 %) weisen Variationskoeffizienten zwischen 10-20 % auf. Starke Reliefvariabilitäten über 20 % kommen in 4,3 % (889) der Gitterzellen vor.

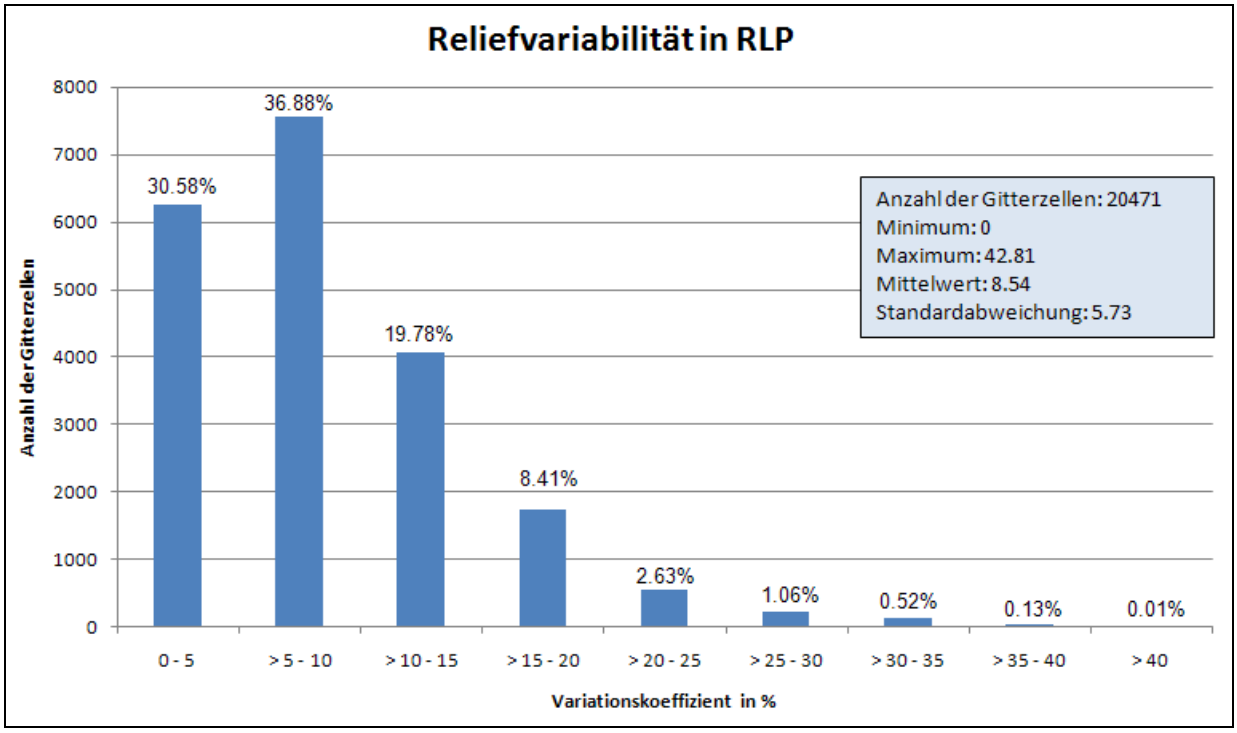
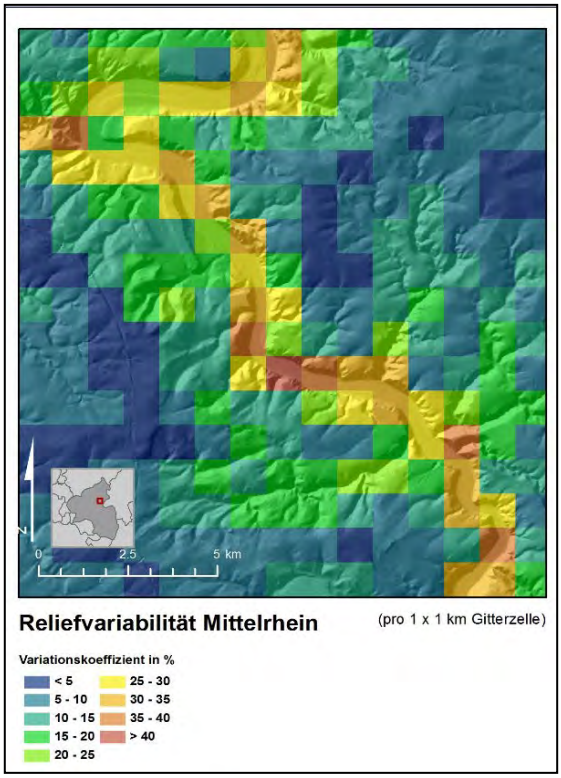


Abb. 19: Statistische Auswertung zur Reliefvariabilität in Rheinland-Pfalz

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Reliefvariabilität an Beispielgebieten an Mittelrhein und Mittelmosel auf.



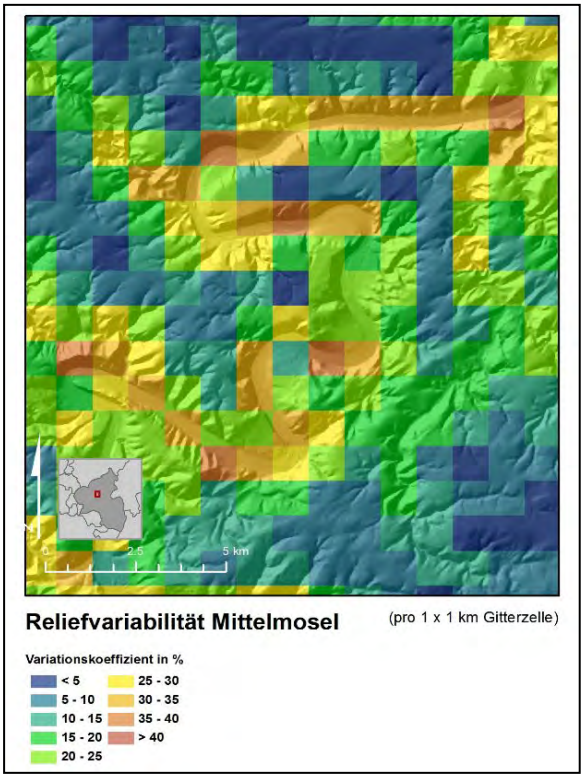


Abb. 20: Reliefvariabilität an Mittelrhein (links) und Mittelmosel (rechts) (eigene Darst.)

Die Abbildungen zeigen zwei Ausschnitte der Reliefvariabilität an Mittelrhein und Mittelmosel. Auffallend sind die starken Reliefvariabilitäten im Bereich der tief eingeschnittenen Täler. Diese sind auf die unterschiedlichen Höhenlagen, auf die Exposition und die Hangneigung innerhalb der Gitterzellen zurückzuführen. Das Relief ist in diesen Regionen sehr heterogen. Geringe Reliefvariabilitäten treten vermehrt auf den flach geneigten Hochflächen von Hunsrück, Eifel und Taunus auf. Die Reliefsituation ist hier deutlich homogener.

7 Methoden II – Weitergehende Fragestellungen

Nachdem im vorangegangenen Kapitel übergeordnete methodische Ansätze aufgeführt wurden, soll in den folgenden Abschnitten im Speziellen auf die angewandte Methodik landwirtschaftlicher Fragestellungen eingegangen werden. Der Abschnitt befasst sich zuerst mit der für alle landwirtschaftlichen Sektoren wichtigen Fragestellung einer ausreichenden Wasserversorgung. Im Zentrum dieses Kontextes steht eine von zahlreichen regionalen Klimamodellen projizierte Reduzierung der Niederschläge in den Sommermonaten und damit einhergehend ein zunehmendes Auftreten von Trockenstress. Zur Bestimmung der Toleranz landwirtschaftlicher Standorte gegenüber einer reduzierten Wasserversorgung wurden von der RLP Agroscience GmbH im Zuge dieses Projektes entwickelte Indizes verwendet. Diese werden im Folgenden beschrieben. Anschließend folgt eine detaillierte methodische Betrachtung der einzelnen Landwirtschaftssektoren unter Berücksichtigung der jeweils wichtigsten kulturspezifischen Fragen.

7.1 Zusammenwirken naturräumlicher Standortfaktoren im Klimawandel – Ableitung einer Basistoleranz gegenüber reduzierten Niederschlägen

Als eine der zentralen Herausforderungen des Klimawandels in Rheinland-Pfalz zeichnet sich in weiten Bereichen eine Reduzierung der Niederschläge im Sommerhalbjahr ab (Klimabericht Rheinland-Pfalz 2007). Eine ausreichende Wasserversorgung ist eine der Hauptvoraussetzungen für eine erfolgreich betriebene Landwirtschaft. Die Fähigkeit der Standorte, Zeiträume mit geringen Niederschlägen durch ausreichende Vorräte an pflanzenverfügbarem Wasser zu überbrücken, wird voraussichtlich an Wichtigkeit zunehmen. Diese Fähigkeit hängt neben dem Boden insbesondere von der Reliefsituation ab. Die wesentlich von der eingebrachten Energie in Form direkter Sonneneinstrahlung mitbestimmte Verdunstungsrate spielt hier eine Rolle, ebenso wie die Möglichkeit eines Standortes, durch seine Lage über eingetragenes Wasser aus oberflächlichem oder lateralem Abfluss von anderen Standorten zu profitieren.

Alle drei beschriebenen Eigenschaften sind in Form der Boden- und Reliefparameter „nutzbare Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraums“ (nFKdB), „Incoming Solar Radiation“ (IncSol) und „Topographischer Feuchteindex“ (TFI) für jeden Standort in seiner Geodaten-

bank verfügbar und wurden in Form einer Kennzahl für die Basistoleranz eines Standortes gegenüber reduzierten Niederschlägen zusammengefasst.

Der Antrieb für die Entwicklung einer solchen Kennzahl war der Gegensatz zwischen sich dynamisch verändernden (klimatischen) und sich nur sehr langsam verändernden, quasi statischen (nicht klimatischen) Standortfaktoren. Im Zusammenwirken von Boden und Relief bildet der Standort die Ressource der Landwirtschaft, die auch in zukünftigen Klimaten erhalten bleibt. Im Standortindex Basistoleranz sollten bewusst die vergleichsweise „festen“ Voraussetzungen der landwirtschaftlichen Standorte charakterisiert und vergleichbar gemacht werden.

Der Standortindex Basistoleranz (BTW) beschreibt die durch Boden und Relief vorgegebene Toleranz eines Standortes gegenüber reduzierten Niederschlägen auf einer Skala von 0-100 Punkten. Diese Skala gliedert sich wiederum in fünf Stufen. Zur Erstellung des Index wurden die Werte der drei Einzelparameter nFKdB, Topographischer Feuchteindex (beschreibt die Tendenz einer Zelle unter Berücksichtigung der beitragenden Fläche und des lokalen Gefälles Wasser zu akkumulieren) und der Topographischen Sonneneinstrahlung (aus dem Relief errechnete potentiell mögliche Sonneneinstrahlung bei wolkenlosen Verhältnissen) zuvor auf 100 Punkte normiert. Die jeweils pro Parameter erhaltenen Indexwerte wurden dann gemittelt (siehe folgende Formel und anschließende Tabelle).

$$\mathbf{BTW} = \frac{\text{normierte nFKdB [mm]} + \text{normierte IncSol [KwH/m}^2\text{]} + \text{normierter TFI}}{3}$$

Tab. 3: Klasseneinteilung der verwendeten Parameter (eigene Darst.)

Basistoleranz		Nutzbare Feldkapazität*	Topogr. Feuchteindex	Incoming Solar Radiation
Toleranzstufe	Indexpunkte	[mm]	[Wert]	[kWh/m²]
sehr gering	0 - 20	< 60	< 8.5	> 1500
gering	20 - 40	60 - 140	8.5 - 10	1350 - 1500
mittel	40 - 60	140 - 220	10 - 11.5	1200 - 1350
hoch	60 - 80	220 - 300	11.5 - 13	1050 - 1200
sehr hoch	80 - 100	> 300	> 13	< 1050

* des durchwurzelbaren Raums

Normierung und Ermittlung der Klassengrenzen

Die fünfstufige Aufteilung orientiert sich beim Parameter der nutzbaren Feldkapazität (nFKdB) an der Methodenentwicklung der Bodenflächendaten des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz und des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie bzw. der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (1994).

Die Klasseneinteilungen des Topographischen Feuchteindex (TFI) und der Sonneneinstrahlung (IncSol) orientieren sich an reliefbestimmten Wertebereichen. So beschreiben Werte des TFI von über 13 und somit sehr hoher Toleranzstufe Bereiche in Tallagen im Umkreis von Gewässern, Werte von unter 8,5 finden sich in geneigten Kuppenbereichen oder an stark geneigten Oberhängen. Die Wertebereiche der Sonneneinstrahlung orientieren sich bei

niedrigen Toleranzstufen an den hohen potenziellen Einstrahlungswerten von stärker geneigten Hängen mit südlicher Ausrichtung, während stärker geneigte aber eher nordexponierte Hänge eine hohe Toleranzstufe aufweisen. Eine schwach ausgeprägte Hangneigung sowie Ost- oder Westexpositionen wirken sich nivellierend in mittleren Toleranzstufen aus.

7.2 Verknüpfung statischer und dynamischer Standortfaktoren – Ableitung eines Standortklimaindex unter Berücksichtigung der klimatischen Wasserbilanz

In einem zweiten Schritt wurden zusätzlich Klimadaten einbezogen und mit dem Standortindex Basistoleranz (BTW) gekoppelt.

In diesem Zusammenhang wichtig ist die Sichtweise auf die hier erzeugten Daten. Es handelt sich um eine Kombination aus interpolierten Klimadaten mit einem Wert pro Quadratkilometer und den Standortinformationen der jeweils in den 1 x 1 km Gitterzellen lokalisierten landwirtschaftlich genutzten Flächen. Hier handelt es sich um ein Klimadatum, dessen (im Vergleich) grobe Auflösung durch das „Unterschieben“ von hochauflösender Boden- und Reliefinformation verfeinert wird. Je nach Variabilität des Reliefs innerhalb einer Rasterzelle nähert sich der Klimawert dabei mehr oder weniger gut an die tatsächlichen (bzw. standörtlich erwartbaren) Verhältnisse der einzelnen Fläche an. Es ist also wichtig zu betonen, dass hier keine klimatischen Wasserbilanzen für jeden einzelnen Standort modelliert wurden. Um zusätzlich den Eindruck der Modellierung „realer“ Klimawerte zu vermeiden, wurde die Kombination der Standort- und Klimadaten mit normierten Werten durchgeführt.

Der sogenannte Standortklimaindex (SKI) gibt auf einer Skala von 0–100 Indexpunkten Auskunft über die Wasserversorgung landwirtschaftlicher Flächen für heutige klimatische Verhältnisse und für die nahe und für die ferne Zukunft. Als Klimaparameter beinhaltet der Standortklimaindex die Klimatische Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode von Mai bis Oktober (Szenario: WETTREG 2006 A1B-trocken) für die drei Zeitschienen 1971-2000, 2021-2050 und 2071-2100. Die KWB [mm/V] wurde hierzu auf 100 Punkte normiert, welche sich nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (2005) in 5 Stufen gliedern, siehe auch folgende Tabelle.

Tab. 4: Klassifizierung der klimatischen Wasserbilanz der HVP zur Entwicklung des SKI

KWB in mm	Indexpunkte
-300 bis -150	0 - 20
-150 bis - 50	20 - 40
-50 bis 50	40 - 60
50 bis 150	60 - 80
150 bis 300	80 - 100

Die normierte KWB [mm/V] und der Standortindex Basistoleranz wurden anschließend gemittelt. Beide Faktoren fließen mit einem Verhältnis von 1:1 in den Standortklimaindex ein (siehe folgende Formel).

$$SKI = \frac{\mathbf{BTW} + normierte\ \mathbf{KWB}\ [\mathbf{V}]}{\mathbf{2}}$$

Der Standortklimaindex gibt also eine Abschätzung über die heutige und zukünftige Wasserversorgung landwirtschaftlicher Standorte. Als besonders geeignet erscheint hierfür die Einbeziehung der Klimatischen Wasserbilanz (KWB), welche sich aus den beiden Klimaelementen Niederschlag und Verdunstung zusammensetzt und somit die hygrischen Verhältnisse sehr gut repräsentiert.

Zur Berechnung der klimatischen Wasserbilanz wurde auf das Konzept der Referenzverdunstung (ET_0) nach dem Bewässerungs- und Entwässerungsbericht 56 (ALLEN et al. 1998) zurückgegriffen – einem Konzept, welches von der FAO (Food and Agriculture Organization) in den 1990er Jahren eingeführt wurde. Es definiert das Verdunstungspotenzial einer reichlich mit Wasser versorgten Standardvegetation (idealisierter Grasbestand) und wird auf Basis der sog. Penman-Monteith-Gleichung (siehe folgende Formel) errechnet.

<u>Die Penman-Monteith-Formel lautet:</u>

$$ETa = \frac{1}{L^*} * \frac{s * (R_n - G) + \frac{p * c_p}{r_a} * (e_s\ (T) - e)}{s + y * (1 + \frac{r_s}{r_a})}$$

L*	spezifische Verdunstungswärme für 1 mm Verdunstungshöhe [J/kg]
s	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [hPa/k]
R_n	Strahlungsbilanz [W/m²]
G	Bodenwärmestrom [W/m²]
p	Luftdichte [kg/cm³]
c_p	spezifische Wärme der Luft [J/(kg K)]
r_a	aerodynamischer Widerstand [s/m]
e_s (T)* e	Sättigungsdefizit
y	Psychrometerkonstante [hPa/K]
r_s	Stomatawiderstand [s/m]

Zur Berechnung einer international standardisierten und damit weitgehend vergleichbaren Referenzverdunstung wird auf einen idealisierten Grasbestand mit folgenden bestimmten (hypothetischen) Eigenschaften und unter Annahme einer ausreichenden Wasserversorgung zurückgegriffen. Es wurden eine Graslänge von 0,12 m, ein Stomatawiderstand von 100 s/m, ein aerodynamischer Widerstand von $208/u_2$ s/m und eine Albedo von 0,23 (23 %) festgelegt.

Setzt man die Vorgaben für die Gras-Referenzverdunstung ein, ergibt sich:

$$ET_0 = \frac{0{,}408 * s * (R_n - G) + \frac{900}{(T + 273)} * u_2 * (e_s(T) - e)}{s + y * (1 + 0{,}34 * u_2)}$$

u_2 Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe [m/sek]

weitere Größen siehe Penman-Monteith-Gleichung

Die Ableitung der Evaporation auf anderen Vegetationsflächen kann über die Einbindung von Vegetationskoeffizienten k_c aus der Gras-Referenzverdunstung erfolgen. Dabei kann die reale Evapotranspiration von Pflanzenbeständen sowohl oberhalb als auch unterhalb der Gras-Referenzverdunstung liegen. Für Pflanzenbestände mit großem Blattflächenindex kann bei ausreichender Wasserversorgung eine höhere Verdunstung angenommen werden. Eine Grasdecke mit kurzem Bewuchs und ohne ausreichende Wasserversorgung verdunstet weniger als der Wert der Gras-Referenzverdunstung (CALANCA et al. 2011; SCHÖNIGER & DIETRICH 2009).

Aufgrund der großen Bandbreite an sich ständig ändernden Klimasimulationen ist die Einbeziehung nur eines Szenarios mit Unsicherheiten behaftet. Deshalb ist die Aussage des Standortklimaindex eingeschränkt, da sie nur eine von vielen möglichen zukünftigen Entwicklungen darstellt. Dennoch wurde mit dem Standortklimaindex ein Instrumentarium entwickelt, welches dynamische Klimadaten mit Standorteigenschaften koppelt und so Entwicklungen der Wasserversorgung landwirtschaftlicher Standorte aufzeigen kann. Der Index kann jederzeit mit aktualisierten Klimadaten berechnet und so an sich verändernde Klimaentwicklungen angepasst werden.

Durch den Index lassen sich besonders vulnerable Standorte bzw. Risikogebiete mit schlechter Wasserversorgung für heutige und zukünftige Verhältnisse lokalisieren. Innerhalb dieses Forschungsprojektes wird der SKI u. a. für kulturspezifische Abschätzungen der Wasserversorgung verwendet.

7.3 Weinbau

Die angewandten Methoden unterteilen sich in punktbasierte Zeitreihenanalysen an weinbaurelevanten Klimastationen und flächenhafte landesweite Auswertungen interpolierter Klimadaten. Die punktbasierten Zeitreihenanalysen stützen sich dabei zum Großteil auf ein Modell zur Berechnung von Eintrittszeitpunkten der wichtigsten phänologischen Phasen im Weinbau und daraus abgeleiteter weinbaulich relevanter Klimagrößen. Die landesweiten Auswertungen interpolierter Klimadaten beziehen sich auf thermische Größen (Huglin-Index, Winterfrostgefährdung) und wurden mithilfe der Programmiersprache „R“ hinsichtlich spezifischer Fragestellungen mit entsprechenden Abfragemasken untersucht.

7.3.1 Rieslingmodell nach Hoppmann & Berkelmann-Löhnertz

Für weinbaurelevante Stationsauswertungen (Stationen Alzey, Bernkastel, Koblenz, Neuenahr, Roxheim und Trier) wurde auf ein Phänologiemodell nach HOPPMANN & BERKELMANN-LÖHNERTZ (2000) zurückgegriffen. Das Modell wurde zur Beschreibung der Phänologie der Rebsorte Riesling im Rheingau entwickelt. Es berechnet neben den Eintrittszeitpunkten der wichtigsten phänologischen Phasen auch weitere, daraus abgeleitete weinbaulich relevante Klimagrößen. Das Modell Phenology vinifera 1.0 wurde zur Beschreibung der Phänologie von Riesling unter Beobachtungen der Lage Fuchsberg (Geisenheim) im Rheingau entwickelt (STOCK et al. 2007).

Den größten Einfluss auf das Wachstum von Reben übt die Temperatur aus, weshalb das Phänologiemodell vor allem auf mit unterschiedlichen Funktionen berechneten Wärme- und Kältesummen basiert. Die thermischen Verhältnisse bestimmen also maßgeblich den Ablauf der phänologischen Phasen. Die übrigen Einflussgrößen modifizieren diesen nur. Als Eingangsgrößen wurden die Tageswerte der folgenden meteorologischen Größen verwendet: Minimum und Maximum der Lufttemperatur [°C], Mittel der relativen Luftfeuchte [%], Mittel des Dampfdrucks [hPa], Summe des Niederschlags [mm], Summe der Globalstrahlung [J/m²] (KROPP et al. 2009).

Das Modell ist aufgrund der räumlichen Nähe oder standörtlichen Ähnlichkeit zu seiner räumlichen Validierung (Rheingau) zur Abschätzung möglicher Verschiebungen phänologischer Phasen aufgrund klimatischer Änderungen in weiten Teilen auf die rheinland-pfälzischen Weinbauregionen übertragbar. Die Berechnungen wurden durch das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) durchgeführt. Die späteren statistischen Auswertungen und graphischen Darstellungen wurden mithilfe von Microsoft Excel erzeugt.

<u>Folgende Kenngrößen konnten für die oben genannten Stationen erzeugt werden:</u>

1) Eintrittszeitpunkte der wichtigsten phänologischen Phasen (Austrieb, Blühbeginn, Reifebeginn und Lesereife)
2) Spätfrost:
   a) thermisch: T_{min} < 0°C nach Austrieb und vor Blühbeginn
   b) radiativ: T_{min} < 2°C, Bewölkung <= 4/8, Wind <= 1,5 m s^{-1} nach Austrieb und vor Blühbeginn
3) Thermische Wachstums- und Reifebedingungen innerhalb der wichtigsten Phasen (Austrieb-Blüte, Blüte-Reife und Reifephase)
4) Eiswein (Anzahl möglicher Eisweintage, T_{min} <= -7°C)
5) Dauer der Vegetationsperiode (Austrieb-Lesereife)
6) Anzahl von Trockentagen innerhalb der Vegetationsperiode (Niederschlag = 0 mm / min. 2 aufeinanderfolgende Tage)
7) Starkniederschläge (> 20 mm pro Tag)

Die Auswertungen liegen für die oben genannten Stationen für die Zeitreihen 1971-2100 (WETTREG2006) und 1971-2060 (STAR) vor. Dabei liegen dem Zeitraum 1971-2000 gemessene Werte zugrunde. Die Zeiträume 2001-2100 (WETTREG2006) und 2001-2060 (STAR) stützen sich auf simulierte Klimawerte der genannten Klimamodelle. Für WETTREG2006 wurden die Szenarien A1B-normal, A1B-trocken, A2-normal, A2-trocken und für STAR die Szenarien A1B-normal und A1B-trocken analysiert.

7.3.2 Huglin-Index

Der Huglin-Index ist ein Parameter zur Bestimmung des thermischen Gunstbereichs von Rebsorten für einen Standort (PETGEN 2007). Er wurde von HUGLIN im Jahre 1983 entwickelt und ist als Wärmesumme über Tagesmittel- und Tagesmaximumwerte der Lufttemperatur im Zeitraum Anfang April bis Ende September (abzüglich einer Basistemperatur von 10°) definiert (STOCK et al. 2007):

$$HI = k^* \sum_{30.09.}^{01.04.} \frac{Tmit - Tmax}{2} - 10$$

Die Summe wird anschließend mit einem breitengradabhängigen Faktor k (k (40°) =1,02 und k (50°) =1,06 multipliziert, der die im Sommer größeren Tageslängen nördlicher Breiten berücksichtigt (SCHULTZ; HOPPMANN; HOFMANN 2006).

Der Huglin-Index erlaubt die Einteilung verschiedener Rebsorten hinsichtlich ihres Wärmebedarfs und die Einschätzung eines Standorts im Hinblick auf geeignete Rebsorten (siehe auch folgende Abbildung).

Tab. 5: Einteilung des Huglin-Index mit Rebsorteneignung (eigene Darst., verändert nach STOCK et al. 2007)

ausgewählte anbauwürdige Rebsorten			
HI ≤ 1500	kein Anbau empfohlen	1900 < HI ≤ 2000	Chinon blanc, Cabernet sauvignon, Merlot
1500 < HI ≤ 1600	Müller-Thurgau	2000 < HI ≤ 2100	Ugni blanc
1600 < HI ≤ 1700	Weißer Burgunder, Gamay noir	2100 < HI ≤ 2200	Grenache noir, Syrah
1700 < HI ≤ 1800	Riesling, Chardonnay, Spätburgunder	2200 < HI ≤ 2300	Carignan
1800 < HI ≤ 1900	Cabernet franc	2400 < HI ≤ 2500	Aramon

Er bewertet die Anbauwürdigkeit der Rebsorten über eine Indexskala, wobei sich an der Höhe des Wertes die thermischen Anforderungen der Rebe ablesen lassen. Hohe Indizes zeigen günstige Verhältnisse für thermisch anspruchsvolle Rebsorten an, schließen allerdings die thermisch weniger anspruchsvollen mit ein (STOCK et al. 2007). Die angegebenen Index-Intervalle müssen als Richtwerte für ebene Flächen im mittleren regionalen Maßstab (1 x 1 km) interpretiert werden. Hanglagen (insbesondere Südlagen) erreichen, je nach Neigungswinkel, thermisch anspruchsvollere Klassen, als durch den Huglin-Index ausgewiesen (STOCK et al. 2007). Er eignet sich zudem zur Abschätzung möglicher Klimaänderungen und gibt Empfehlungen zur zukünftigen Eignung von Rebsorten. Bei Lagen mit Indexwerten unter 1500 wird aufgrund der niedrigen Temperaturen kein Weinbau empfohlen.

Insgesamt wurde für acht Klimastationen in Rheinland-Pfalz der Huglin-Index für die Referenzperiode 1971-2000 und für zukünftige Zeiträume bis maximal 2100 berechnet und ausgewertet. Hierzu zählen die weinbaurelevanten Stationen Mainz, Alzey, Bergzabern, Bernkastel, Roxheim, Neuenahr, Koblenz und Trier. Datengrundlage bildeten die beiden regionalen Klimamodelle WETTREG2006 (2001-2100) und STAR (2001-2060). Für WETTREG2006 wurden die Szenarien A1B-normal, A1B-trocken, A2-normal, A2-trocken und für STAR die Szenarien A1B-normal und A1B-trocken analysiert.

Neben diesen punktbasierten Stationsauswertungen wurde der Huglin-Index auf Basis interpolierter Klimadaten flächenhaft für die beiden Zukunftszeiträume 2021-2050 und 2071-2100 für ganz Rheinland-Pfalz berechnet. Damit wurde beispielhaft die räumliche Entwicklung des Huglin-Index in RHEINLAND-PFALZ auf Basis der Klimasimulationen WETTREG2006 A1B-normal und A1B-trocken dargestellt.

7.4 Grünland

Im Bereich des Grünlandes wurden Auswertungen zur Veränderung des Verlaufs und der Länge der Vegetationsperiode vorgenommen. Die Länge der Vegetationsperiode ist vor allem für die Schnittanzahl wichtig und damit ein entscheidender ertragsbestimmender Faktor. Die Analysen hierzu unterscheiden sich wiederum in zeitreihenbasierte Auswertungen an grünlandrelevanten Klimastationen und in flächenhafte Auswertungen interpolierter Klimadaten. Innerhalb der Vegetationsperiode spielt die Wasserversorgung für die Ertragsbildung eine wichtige Rolle. Die Grünlandstandorte wurden deshalb einer Untersuchung zur Toleranz gegenüber veränderten hygrischen Verhältnissen unterzogen. Besondere Berücksichtigung fanden hierbei die klimatische Wasserbilanz und die beiden entwickelten Indizes „Basistoleranz Wasserversorgung“ und „Standortklimaindex“ zur Abschätzung der Toleranz gegenüber reduzierten Niederschlägen. Ein dritter Schwerpunkt im Bereich Grünlandnutzung behandelt die Umsetzung eines österreichischen GIS-basierten Grünland-Ertragsmodells nach SCHAUMBERGER (2010) auf die Verhältnisse in Rheinland-Pfalz, unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Veränderungen.

7.4.1 Veränderung des Verlaufs und der Länge der Vegetationsperiode

Für Ertragsabschätzungen spielt die Länge der Vegetationsperiode eine entscheidende Rolle, da sie maßgeblichen Einfluss auf die Anzahl der Grünland-Schnitte hat. Der Verlauf und die Länge der Vegetationsperiode sind stark von der jeweiligen Höhenlage der Grünlandstandorte abhängig. Allgemein verkürzt sich die Vegetationsperiode mit zunehmender Höhe über NN. Zur Abschätzung des Verlaufs und der Länge der Vegetationsperiode wurden zeitreihenbasierte und flächenhafte Auswertungen vorgenommen. Die Zeitreihenanalysen konzentrieren sich auf die Klimastationen Deuselbach, Herstein, Hilgenroth, Nürburg, Pirmasens und Simmern. Untersucht wurden die Projektionen WETTREG2006 A1B-normal, A1B-trocken, A2-normal, A2-trocken, sowie STAR A1B-normal und STAR A1B-trocken. Für flächenhafte Aussagen wurden die Klimasimulationen WETTREG2006 A1B-normal und WETTREG2006 A1B-trocken berücksichtigt.

Als Maßstab für eine annähernde Bestimmung des Vegetationsbeginns im Grünland kann die Temperatursumme 200 angesehen werden. Diese errechnet sich durch die Aufsummierung aller positiven Tagesmitteltemperaturen ab dem 01. Januar eines Jahres. Die einzelnen Monate werden dabei aufgrund ihres Einflusses auf den Vegetationsbeginn unterschiedlich stark gewichtet. Der Januar wird mit dem Faktor 0.5, der Februar mit dem Faktor 0.75 und die Monate ab März mit dem Faktor 1 multipliziert, bis die Temperatursumme 200 erreicht wird (ERNST & LOEPER 1976).

$$T\,200 = (Tmit\,(Jan)*0.5) + (Tmit\,(Feb)*0.75) + (Tmit\,(März - Vegbeginn))$$

Das Vegetationsende ist definiert als erster Tag des Zeitraums ab dem 01. August eines Jahres, während dem an mindestens 5 aufeinanderfolgenden Tagen die durchschnittliche Lufttemperatur < 5 °C beträgt. Die Vegetationsdauer errechnet sich aus der Differenz von Vegetationsende und Vegetationsbeginn. Eine Schnittnutzung wird in der Regel im Grünland nicht bis zum letztmöglichen Zeitpunkt vorgenommen. Deshalb wird die eigentliche Schnittnutzungszeit um einen sogenannten Offsetwert von 21 Tagen gegen Ende der Vegetationsperiode verkürzt (SCHAUMBERGER et al. 2010). Die graphischen und statistischen Auswertungen hierzu werden im Ergebnisteil aufgezeigt.

7.4.2 Toleranz von Grünlandstandorten gegenüber veränderten hygrischen Verhältnissen

Eine zweite Herausforderung im Zuge des Klimawandels ergibt sich durch die veränderten hygrischen Verhältnisse. Durch den projizierten Klimawandel werden in Zukunft deutlich trockenere Sommer erwartet. Da Grünland auf eine ständige Wasserzufuhr für die Transpiration der Pflanzen während der gesamten Vegetationsperiode angewiesen ist, könnten sich hier Probleme ergeben.

Das Pflanzenwachstum verläuft in der Vegetationsperiode nicht linear. Die Wachstumskurve hängt stark von den gegebenen Standortfaktoren, Umweltbedingungen und der Bewirtschaftung ab. Für die Ertragsbildung von 1 kg Trockenmasse benötigt Grünland 500 Liter Wasser (BUCHGRABER & GINDL 2004), intensiv genutztes Grünland mit drei bis fünf Schnitten sogar 600 bis 900 L/kg gebildeter Trockensubstanz. Dies wäre in etwa das Doppelte der üblichen Getreidesorten (EITZINGER et al. 2009). Damit stellt der Wasserhaushalt bzw. die Wasserverfügbarkeit die entscheidende Größe zur Biomassebildung dar. Auf trockenen Standorten führen ausbleibende Niederschläge zu unmittelbaren Ertragseinbußen bzw. bei ausgesprochenem Trockenstress in Extremfällen auch zu Ertragsausfällen (BUCHGRABER & GINDL 2004). Die hygrischen Ansprüche der einzelnen Grasarten sind insgesamt jedoch sehr unterschiedlich und reichen von geringen Ansprüchen (beispielsweise Glatthafer, Rotschwingel) bis zu mittleren bis hohen Ansprüchen (z. B. Deutsches Weidelgras). Die Grünlandstandorte wurden hinsichtlich ihrer heutigen und zukünftigen Wasserversorgung untersucht. Den Schwerpunkt dieser Untersuchung stellt die klimatische Wasserbilanz dar. Außerdem wurden die beiden Standortindizes „Basistoleranz Wasserversorgung“ und „Standortklimaindex“ zu dieser Analyse herangezogen.

7.4.3 Klimawandelfolgen für Grünlandflächen – Umsetzung einer GIS-basierten Ertragsmodellierung auf rheinland-pfälzische Verhältnisse

Das übergeordnete Ziel der Forschungsstudie stellte die Übertragung und Anpassung eines österreichischen GIS-basierten Grünlandertragsmodells (nach SCHAUMBURGER 2010) auf rheinland-pfälzische Verhältnisse und die Ableitung der Vulnerabilität von Grünlandstandorten gegenüber klimawandelinduziertem Trockenstress dar. Den ersten Schwerpunkt dieser Arbeit bildete hierbei die räumliche Modellierung von Jahreserträgen der Grünlandflächen in Rheinland-Pfalz mit Hilfe des Grassland Statistical Model (GRAM). Die Datengrundlage der Modellierung stellten dabei interpolierte Klimadaten (Auflösung: 1 x 1 km) des Regionalmodels WETTREG2006 dar. Es wurde das Klimaszenario A1B-trocken für die Zeiträume 1971-2000 (REF), 2021-2050 (1ZS) und 2071-2100 (2ZS) einbezogen. Außerdem wurden Bodendaten der landwirtschaftlichen Nutzfläche von Rheinland-Pfalz (nutzbare Feldkapazität bzw. Durchwurzelungstiefe), deren Auflösung der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) von Rheinland-Pfalz entsprechen, integriert. Die für die Modellierung zusätzlich benötigten Bewirtschaftungsfaktoren Schnittregime und quantitative N-Düngung wurden über die vorliegenden Klimadaten aus der Arbeit von SCHAUMBERGER (2010) abgeleitet bzw. entsprechen der rechtlich maximal zulässigen Menge.

Zweites Ziel ist die Bestimmung und Visualisierung der Vulnerabilität von Grünlandstandorten in Rheinland-Pfalz gegenüber Trockenstress. Über Änderungen der berechneten, relativen Jahreserträge über die betrachteten Zeiträume (REF, 1ZS und 2ZS; zur Erläuterung s.o.) sind qualitative Abschätzungen der lokalen Variabilität und somit die Bestimmung des Gefährdungspotenzials der Standorte möglich. Die Visualisierung erfolgt in Form von Karten.

Die Beschreibung der Vorgehensweise zur Umsetzung dieser Zielvorstellungen wird im Folgenden etwas detaillierter ausgeführt. Die Methodik dieser Arbeit orientiert sich an den Arbeiten "A simple statistical model for predicting herbage production from permanent grassland" von TRNKA et al. 2006 und der „FAO-Richtlinie Nr. 56" von ALLEN et al. (1998), die von SCHAUMBERGER (2010) umgesetzt und in der Arbeit „Räumliche Modellierung von Grünlanderträgen unter Berücksichtigung von Witterungseinflüssen" durch die österreichische höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt Raumberg-Gumpenstein (HBLFA) im Jahr 2010 publiziert wurde. Im Vergleich zu SCHAUMBERGERS Umsetzung wurden in dieser Arbeit verschiedene Modifikationen bei der Umsetzung des Modells vorgenommen. Der grundlegendste Unterschied besteht darin, dass die vorliegende Arbeit Standort (entsprechend der ALK) basiert gerechnet wird, wohingegen die Studie Schaumbergers Ergebnisse auf Rasterbasis liefert.

Grassland Statistical Model – GRAM:

Basis der Modellierung ist das statistische Modell GRAM zur räumlichen Implementierung von Grünlandertragsprognosen nach TRNKA et al. (2006), welches über langjährige Grünlandversuche für Österreich validiert wurde. Es ermöglicht, die Komplexität der Interaktionen von Standort- und Bewirtschaftungsfaktoren abzubilden und unterteilt sich in vier Arbeitsschritte:

1) Modellierung der Wasserverfügbarkeit

Auf Basis eines einfachen Bodenwasserbilanzmodells nach der FAO-Methode von ALLEN et al. (1998) wird die Wasserverfügbarkeit für die beiden für Grünlandpflanzen maßgeblichen Tiefenklassen des Bodens (Topsoil: 0 bis 20 cm und Subsoil: 20 bis 40 cm) berechnet. Abschließendes Ziel der Bodenwasserbilanzierung ist die Bestimmung des Wachstumsfaktors gs und der resultierenden schnittspezifischen effektiven Temperatur Te bzw. Globalstrahlung Ge, welche als Parameter in die abschließende Ertragsmodellierung eingehen.

2) Modellierung des (thermischen) Vegetationsbeginns, Vegetationsende und Vegetationsperiode

3) Modellierung der Aufwuchsdauer und der Schnitthäufigkeit

4) Abschließende Ertragsmodellierung

Abschließend wird der Ertrag (in dt TM pro ha und a), über die bisher ermittelten Modellparameter und die angenommene quantitative N-Düngung, auf verschiedenen Ebenen berechnet. Die Berechnungen erfolgen in Form einer multiplen Regression.

Ebenen der Ertragsmodellierung sind:

• Absolute Erträge pro Aufwuchs

• Relative Erträge pro Aufwuchs in Bezug auf einen mehrjährigen Ertragsdurchschnitt

• Absolute Erträge pro Jahr (Summe von mehreren Einzelaufwuchserträgen)

• Relative Erträge pro Jahr in Bezug auf einen mehrjährigen Ertragsdurchschnitt

Zur abschließenden Vulnerabilitätsanalyse wird die relative Ertragsänderung gegenüber dem Referenzzeitraum jedes Standortes (ALK-Teilflurstück) für beide betrachteten Zeitschienen berechnet. Durch die Visualisierung in Form von Karten soll es ermöglicht werden, trockenstresssensitive Grünlandstandorte auszumachen und darzustellen.

Die GRAM-Berechnungen wurden mit dem Statistikprogram R 13.0 durchgeführt. Anschließend wurden die Ergebnisse graphisch mit Hilfe des Geoinformationssystems ArcGis 9.3 dargestellt.

7.5 Ackerbau

Die im ackerbaulichen Kontext im Projekt KlimLandRP durchgeführten Arbeiten beziehen sich auf einige im Zusammenhang mit dem Klimawandel relevante Themenkomplexe. Ackerbauliche Fragestellungen wurden kulturspezifisch behandelt oder mit dem Fokus auf Standorteigenschaften zunächst unabhängig von einer Kulturart als flächendeckende Analyse hochauflösender Geodaten bearbeitet.

Die Methoden teilen sich auf in Zeitreihenanalysen (Vernalisation von Wintergetreide; Zuckerrübenerträge) an ackerbaulich relevanten Klimastationen sowie eine flächendeckende hochauflösende Charakterisierung der ackerbaulich genutzten Standorte hinsichtlich ihrer Wasserversorgung unter besonderer Betrachtung von Trockenstress. Letzteres beinhaltet

auch sortenspezifische Auswertungen der wichtigsten in Rheinland-Pfalz vorkommenden ackerbaulichen Nutzungen in Bezug auf die genannten Risiken bzw. Parameter. Die Zeitreihenanalysen befassen sich zum einen mit der Betrachtung der rezenten Klimaentwicklung im Zusammenhang mit der Ertragsentwicklung der Zuckerrübe. Hier werden insbesondere das Auftreten ertragsschwacher Jahre und deren Ursachen analysiert. Die Erstellung eines Fingerabdrucks ermöglicht es, in den Zeitreihen von Zukunftssimulationen regionaler Klimamodelle nach ähnlichen, zu ertragsschwachen Jahren führenden Mustern zu suchen. Zum anderen wird vor dem Hintergrund möglicherweise steigender Temperaturen im Winterhalbjahr in den Zeitreihenanalysen eine Abschätzung zur zukünftigen Erfüllung des Vernalisationsbedürfnisses beim Wintergetreide durchgeführt.

7.5.1 Vernalisation

Vernalisation ist bei Pflanzen die Bezeichnung für eine Blühinduktion durch eine art- und sortenspezifische, meist mehrwöchige Kälteperiode im Winter. Die Temperaturhöhe und die Einwirkungsdauer steuern dabei die Vernalisation. Für die Wirksamkeit der Vernalisation wird keine geschlossene Periode benötigt. Auch kurze Phasen mit Vernalisationstemperaturen erfüllen das Kältebedürfnis der Pflanze, sofern eine ausreichende „Kältesumme“ erreicht wird. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, dass in den Vernalisationsphasen physiologische Prozesse stattfinden. Tiefe Temperaturen in Frostperioden (unter -4 °C) sind nicht wirksam. Ebenso können Temperaturen > 15 °C zu Devernalisationswirkungen führen (GEISLER, 1980). Bei Winterweizen können Temperaturen von 0-5 °C und eine Einwirkungsdauer von ca. 40-80 Tagen angesetzt werden (OEHMICHEN 1986; REINER et al. 1988; MÜNZER et al. 1991; GEISLER 1983; DIE LANDWIRTSCHAFT 1998).

Aufgrund der erwarteten Klimaerwärmung können in Zukunft Situationen auftreten, die zu Schwierigkeiten hinsichtlich der Erfüllung des Vernalisationsbedürfnisses verschiedener Kulturpflanzen führen. Fehlende Kältereize können sich verzögernd auf die Pflanzenentwicklung im Frühjahr auswirken. Ein verzögerter Eintritt der generativen Phase kann zu einer Verkürzung der Kornfüllungsphase und damit letztendlich auch zu Ertragseinbußen führen (EITZINGER 2009).

Die Vernalisation für Winterweizen wurde an vier Standorten in Winterweizenanbaugebieten (Mainz, Koblenz, Simmern und Bergzabern) in Rheinland-Pfalz hinsichtlich unterschiedlicher Klimaprojektionen genauer untersucht. Hierzu wurden wiederum die beiden regionalen Klimamodelle WETTREG2006 und STAR verwendet. Hinsichtlich des Klimamodells WETTREG2006 wurden folgende Szenarien genauer analysiert: A1B-normal, A1B-trocken, A2-normal und A2-trocken. Als weitere Szenarien wurden STAR A1B-normal und A1B-trocken berücksichtigt. Aufgezeigt werden die Zeiträume 1971-2100 (WETTREG2006) und 1971-2060 (STAR).

Die Analysen wurden in einem Tabellenkalkulationsprogramm (MS Excel) durchgeführt. Hier wurden Suchfilter erstellt, die die Datenreihen der betreffenden Zeiträume (Wintermonate) der Fragestellung entsprechend halbautomatisch sichteten. Der im Zusammenhang mit dem Vernalisationsbedürfnis von Winterweizen relevante Temperaturbereich reicht von 0-5 °C

mittlerer Tagestemperatur. Durch die Anwendung der Filter konnten die Erfüllungshäufigkeit und Intensität pro Winter festgestellt werden.

7.5.2 Kulturspezifische Charakterisierung ackerbaulich genutzter Standorte hinsichtlich ihrer Wasserversorgung

Die Wasserversorgung spielt in der Landwirtschaft eine entscheidende Rolle (DIEPENBROCK et al. 2009). Insbesondere im Ackerbau ist eine ausreichende Wasserversorgung von essentieller Bedeutung. Die einzelnen Feldfrüchte verfügen hierbei über unterschiedliche Ansprüche. Diese sind abhängig von Wachstumszeit und -dauer der jeweiligen Kulturart. Die wichtigsten Kulturarten in Rheinland-Pfalz wurden deshalb hinsichtlich ihrer Wasserversorgung und Trockenstresstoleranz für heutige und zukünftige Verhältnisse auf Basis der beiden zuvor beschriebenen Indizes „Basistoleranz Wasserversorgung“ (BTW) und „Standortklimaindex“ (SKI) sowie ihrer klimatischen Wasserbilanz (KWB) auf Standortebene analysiert und statistisch ausgewertet.

7.5.3 Auftreten ertragsschwacher Jahre bei der Zuckerrübe

Das den Arbeiten zum Zuckerrübenanbau im Klimawandel grundsätzlich zugrunde liegende Problem ist die Frage nach den zukünftigen klimatischen Produktionsbedingungen. Damit zusammenhängend stellt sich die Frage, ob vor dem erwarteten Hintergrund steigender Sommertemperaturen und sinkender Sommerniederschläge mit einem häufigeren Auftreten ertragsmindernder Witterungsverhältnisse gerechnet werden muss. Zur Beantwortung dieser Frage wurde ein statistisch belastbarer Zusammenhang zwischen Witterung/Klima und Ertrag gefunden, der sich in Form eines wiederholbaren Musters ausdrückt und nach welchem - in Form eines Fingerabdrucks - in den Zeitreihen von Zukunftssimulationen regionaler Klimamodelle gesucht werden kann. Auch die Frage, ob in der rezenten Entwicklung sowohl des Klimas als auch der Erträge bereits ein Trend feststellbar ist und ob sich dieser Trend in Zukunftsprojektionen fortsetzt, kann in diesem Kontext beantwortet werden.

Die für die Untersuchung zur Verfügung stehenden Ertragsdaten liegen für mehrere Jahrzehnte auf Gemeindebasis vor. Eine Auswertung der Daten erfolgte aufgrund der geringen räumlichen Auflösung nicht mit interpolierten Klimadaten, sondern stationsgebunden. Überdies hätte eine Auswertung flächenhaft vorliegender Klimazeitreihen den Rahmen dieser Untersuchung überschritten. Aus den zur Verfügung stehenden Klimaprojektionen wurde das Szenario A1B mit einer jeweils am Mittel aller Simulationen orientierten Realisation (A1B-normal) und einer mit besonders trockener Ausprägung (A1B-trocken) ausgewählt. Es wurden hier jeweils Läufe der regionalen Klimamodelle WETTREG2006 und STAR verwendet.

Die Analyse erfolgte für drei Gemeinden der Anbauregion Rheinhessen/Pfalz jeweils an den Klimastationen Mainz, Worms und Frankenthal. Die Auswahl dieser Bereiche begründet sich auf die zur Verfügung stehenden Klimadaten und auf der Repräsentativität dieser Stationen für den zu beschreibenden Raum.

Bevor die Ertragsdaten zur Auffindung eines Zusammenhanges zwischen Klimaparametern und Zuckerrübenerträgen einer Korrelationsanalyse mit Klimadaten des entsprechenden Zeitraums (1961-2000) unterzogen wurden, wurden mit Hilfe von Zinseszinsformeln jährliche, durch Züchtungsfortschritt begründete Ertragszuwächse (0,75 % und 0,9 %) aus der Ertragsentwicklung rechnerisch entfernt. Dieser Schritt erfolgte, um den Zusammenhang zwischen Witterung/Klima und Erträgen möglichst von Fremdeinflüssen zu befreien (LOEL et al. 2011).

Vorgehensweise

Sowohl die bereinigten als auch die unbereinigten Jahresfelderträge der Zuckerrübe wurden mit Niederschlags- und Temperatursummen über verschiedene Zeiträume in einer Korrelationsanalyse miteinander verglichen (Pearson-Korrelation). Die höchsten Korrelationen ergaben sich dabei zwischen züchtungsbereinigten Erträgen und Klimadaten des Zeitraums Juni-August/September. Dies begründet sich dadurch, dass die Zuckerrübe während dieser Periode besonders empfindlich auf ungünstige Bedingungen in Form einer eingeschränkten Wasserversorgung oder zu hohen Temperaturen reagiert.

Anschließend wurde nach einem Muster bzw. Fingerabdruck zur Identifizierung ertragsmindernder Witterungsverhältnisse gesucht. Eine Kombination aus geringen Niederschlägen und hohen Temperaturen in der Periode Juni-August wirkt sich besonders negativ aus. Als ertragsschwach gelten Jahre mit einem Massenertrag von unter 32 t/ha. Im Zusammenhang damit stehen Niederschlagssummen im genannten Zeitfenster von kleiner 110 mm und Temperatursummen von über 1200 K. Diese Kombination wurde als Identifikationsmuster (Fingerabdruck) für ertragsschwache Jahre angenommen.

Mithilfe einer Abfrage wurden daraufhin Zeitreihen der Klimaprojektionen aus WETTREG2006 und STAR im Hinblick auf diesen Fingerabdruck ausgewertet. Zielfragestellung war die Erfüllungshäufigkeit des Fingerabdrucks im Zeitraum bis 2100 (WETTREG2006) bzw. 2060 (STAR).

8 Ergebnisse

8.1 Standortcharakterisierung auf Basis der Geodatenbasis ALK++

Das Ergebnis der GIS-basierten Charakterisierung landwirtschaftlicher Flächen in Rheinland-Pfalz ist ein landesweiter Datensatz, der für jedes landwirtschaftlich genutzte Teilflurstück eine Auswahl an Eigenschaften bereitstellt, die jede für sich oder untereinander kombiniert den jeweiligen Standort in Bezug auf verschiedene Fragestellungen beschreiben können. Eine detaillierte Beschreibung der landwirtschaftlich genutzten Flächen entsprechend der entstandenen Datenbank ALK++ war im Rahmen dieser Arbeit kaum zu leisten und nicht sinnvoll. Stattdessen werden im Folgenden beispielhaft einige Eigenschaften in der landesweiten Statistik dargestellt, um einen Eindruck der topographischen Situation der rheinland-pfälzischen Landwirtschaft zu vermitteln. Insbesondere wird auf Kombinationen mehrerer Parameter eingegangen, die sich auf Risiken beziehen, die der Landwirtschaft in Rheinland-Pfalz zukünftig durch den Klimawandel begegnen können.

Der entstandene Datensatz ALK++ beinhaltet Parameter, durch welche landwirtschaftliche Standorte charakterisiert werden können und stellt den Ausgangsdatensatz für zahlreiche weitere Analysen und die Entwicklung standortrelevanter Indizes dar. Alle landwirtschaftlichen Flächen bzw. Teilflurstücke der ALK, Folie 21 (tN) (Anzahl: 2.579.799) in Rheinland-Pfalz sind durch die Berechnung des gewichteten Mittels der wichtigsten landwirtschaftlich relevanten Parameter erfasst. Einige dieser landwirtschaftlichen Parameter werden im Folgenden näher aufgeführt.

Die landwirtschaftlichen Flächen in Rheinland-Pfalz befinden sich auf Höhen zwischen 52 und knapp 720 m über NN. In Rheinland-Pfalz wird also in allen Höhenlagen Landwirtschaft betrieben. Bei den niedrigen Flächen handelt es sich um Grünlandnutzung entlang des Rheins an der Grenze zu Nordrhein-Westfalen. Die höheren Bereiche umfassen ebenfalls Grünlandnutzung auf den Hunsrückhochflächen. Im Mittel liegen die landwirtschaftlich genutzten Flächen auf 257 m über NN mit einer Standardabweichung von 120 m. Landwirtschaftlich genutzte Flächen in Rheinland-Pfalz weisen starke Unterschiede hinsichtlich ihrer Hangneigung auf. Es treten Neigungen zwischen 0 und 54° auf. Die durchschnittliche Hangneigung aller Flächen liegt bei 5,6°.

Die Hangneigung kann in 7 Stufen eingeteilt werden. Die folgende Abbildung zeigt die in Klassen eingeteilte Hangneigung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Rheinland-Pfalz.

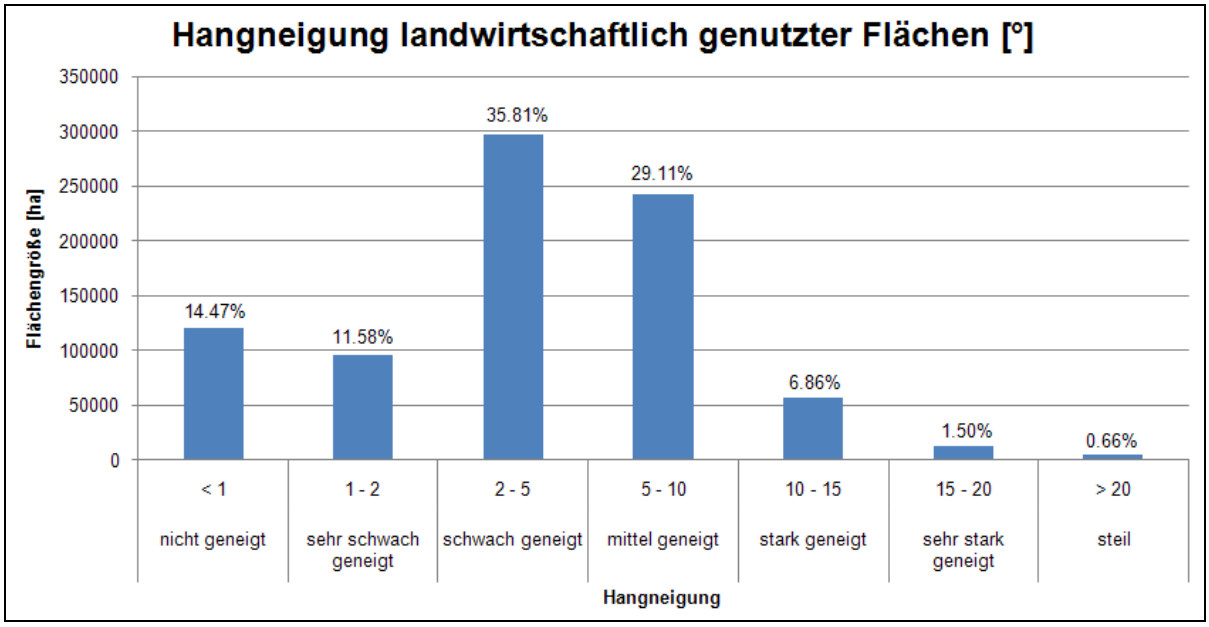


Abb. 21: Hangneigung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Rheinland-Pfalz nach Klassen

Ein Großteil der Teilflurstücke befindet sich demnach in schwach bis mittel geneigten Regionen. Zusammen nehmen diese beiden Klassen gut zwei Drittel (65 %) der Gesamtfläche (705.000 ha) ein. Stark geneigte, sehr stark geneigte und steile Flächen umfassen 9 % der Gesamtfläche. Nicht geneigte Flächen bzw. sehr schwach geneigte Flächen (bis 2°) machen gut ein Viertel (26.1 %) der Gesamtfläche aus. Das Spektrum der Hangneigungen spiegelt den Mittelgebirgscharakter des Landes Rheinland-Pfalz deutlich wider. In Rheinland-Pfalz wird Landwirtschaft auf allen Hangneigungsstufen betrieben. Die folgende Abbildung verdeutlicht dies durch den Blick auf eine Kulturart (Wein), bei der die Hangneigung neben der Exposition die entscheidende Rolle spielt.

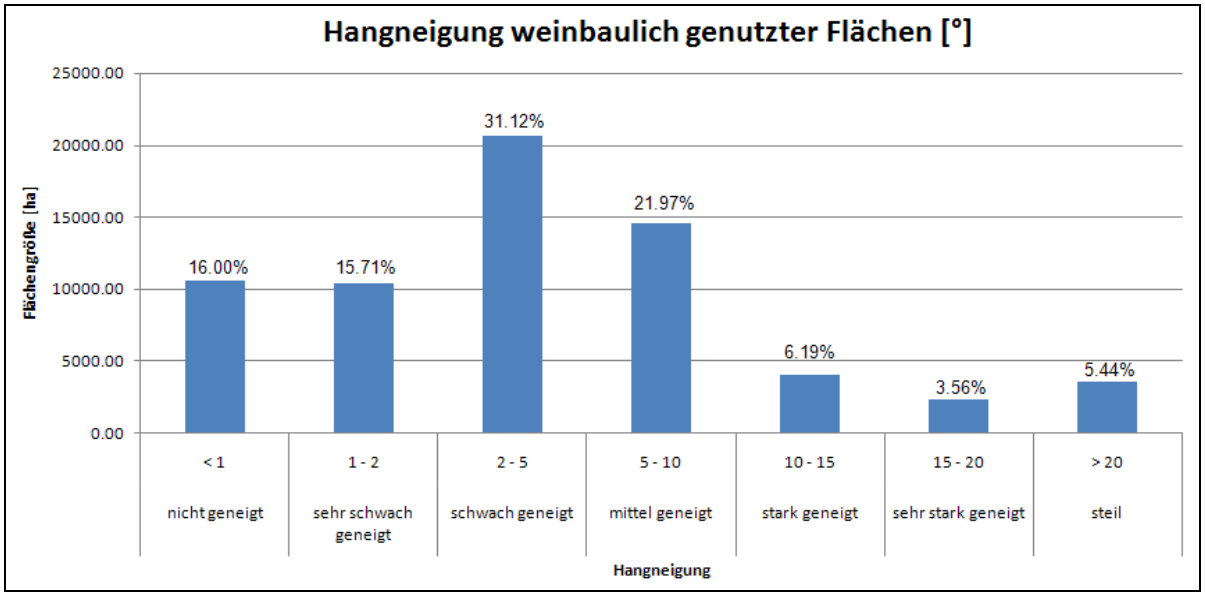


Abb. 22: Hangneigung weinbaulich genutzter Standorte in Rheinland-Pfalz

Hier zeigt sich ein erhöhter Anteil der Klasse mit Hangneigungen > 20°, der auf den besonders an der Mosel stark ausgeprägten Weinbau an steilen Hängen zurückzuführen ist. Besonders prägend sind Weinberge in Steillagen über 30° Hangneigung (MWVLW Rheinland-Pfalz, 2005).

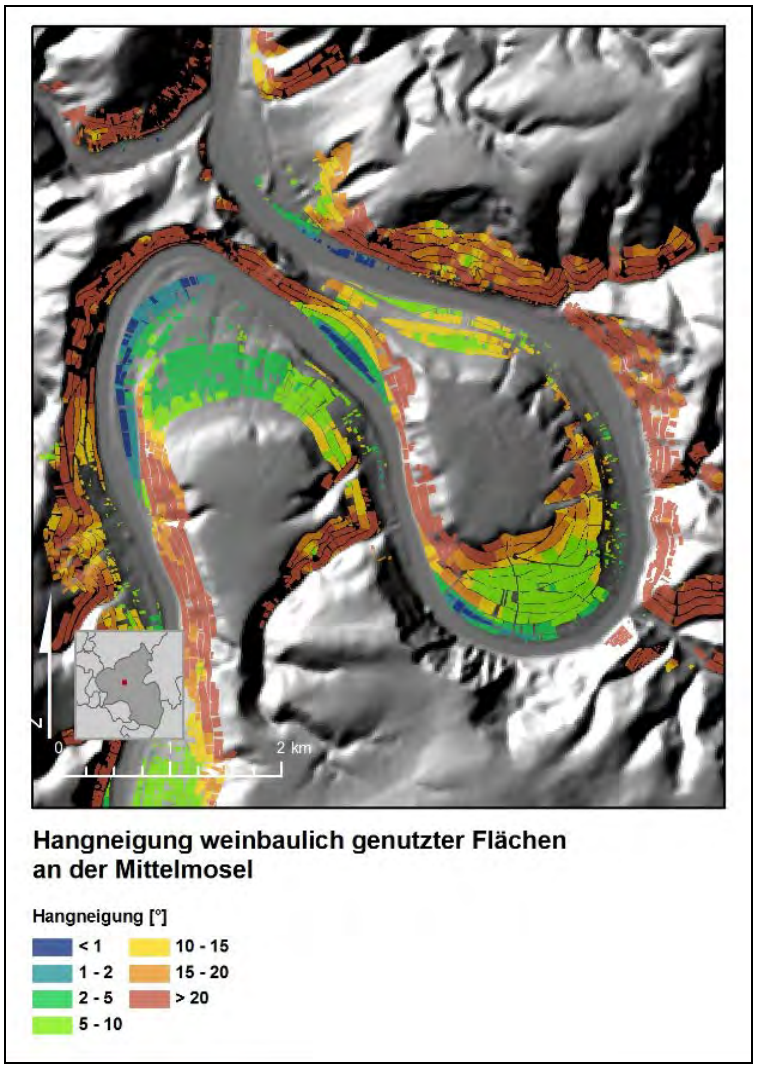


Abb. 23: Beispiel der Hangneigung von Weinanbauflächen an der Mittelmosel (Datengrundlage LVermGeo Rheinland-Pfalz)

Ein zweiter, insbesondere für die Wasserversorgung wichtiger Parameter ist die nutzbare Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraumes, welche die Wasserspeicherfähigkeit eines Bodens beschreibt. Als wichtiger Bodenparameter übt er bei grundwasserfreien Böden einen großen Einfluss auf die pflanzenverfügbare Bodenwassermenge aus (AG Boden 1994). Vor allem hinsichtlich zukünftiger Veränderungen des Wasserhaushalts spielt dieser Parameter eine bedeutende Rolle. Die nFkdB landwirtschaftlich genutzter Flächen liegt in Rheinland-Pfalz zwischen 1,86 mm und 474,1 mm.

Die vorliegenden Daten zur nFK des durchwurzelbaren Bodenraumes (nFKdB) wurden nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung in fünf Klassen (sehr gering, gering, mittel, hoch, sehr hoch) eingestuft (AG Boden 2005). In Rheinland-Pfalz besitzen 52.67 % der landwirtschaftli-

chen Flächen eine mittlere Feldkapazität zwischen 90-140 mm. Mit einem Flächenanteil von etwas über 30 % wird ein ebenfalls großer Anteil der Landwirtschaft auf Böden mit einer hohen nutzbaren Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraumes betrieben. Flächen mit einer sehr hohen nFKdB machen 12,7 % der Gesamtfläche aus (siehe auch folgende Abbildung). Landwirtschaftlich genutzte Flächen mit einer geringen nFKdB machen 4,1 % der Gesamtfläche aus. Flächen mit nFKdB-Werten unter 50 treten nur sporadisch auf.

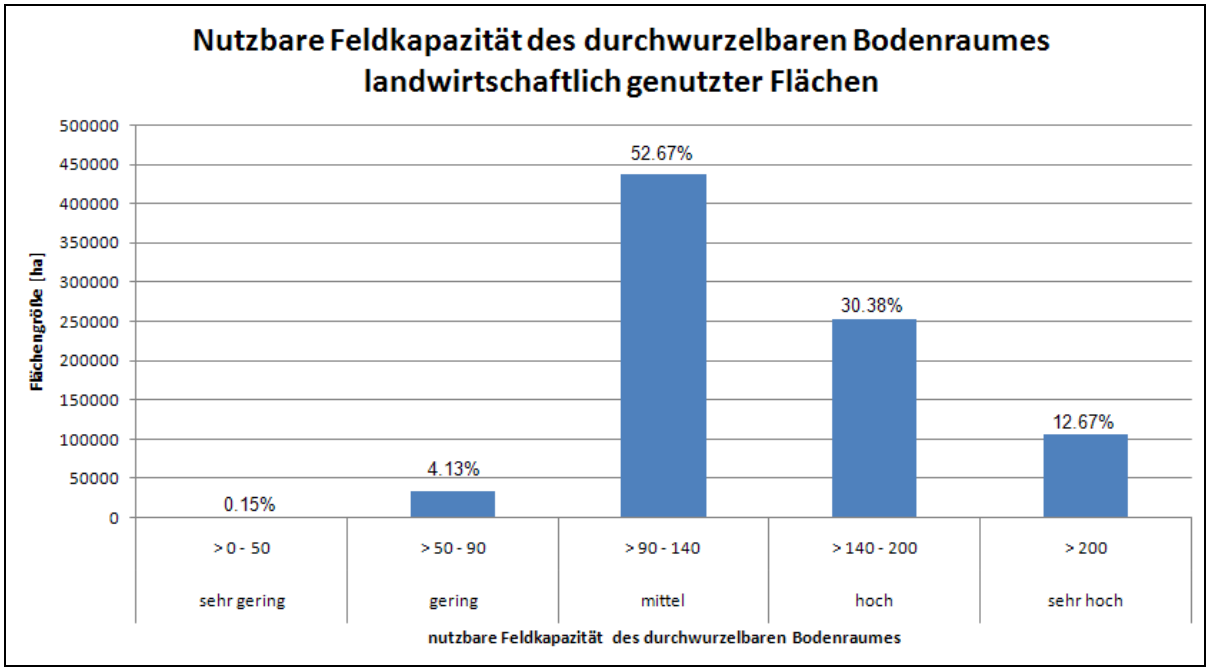


Abb. 24: Nutzbare Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraumes (in mm) auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in Rheinland-Pfalz

Eine ähnliche flächenhafte Verteilung zeigen als Beispiel auch die ackerbaulich genutzten Flächen. Ebenfalls befinden sich große Flächenanteile (81.3 %) des Ackerbaus auf Böden mit einer mittleren bzw. hohen nFKdB. Durch eine sehr hohe Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraumes von über 200 mm sind immerhin noch 15,6 % der Flächen ausgezeichnet. Ackerbaulich genutzte Flächen auf Böden mit geringer nFKdB kommen nur auf 3 % der Ackerfläche vor.

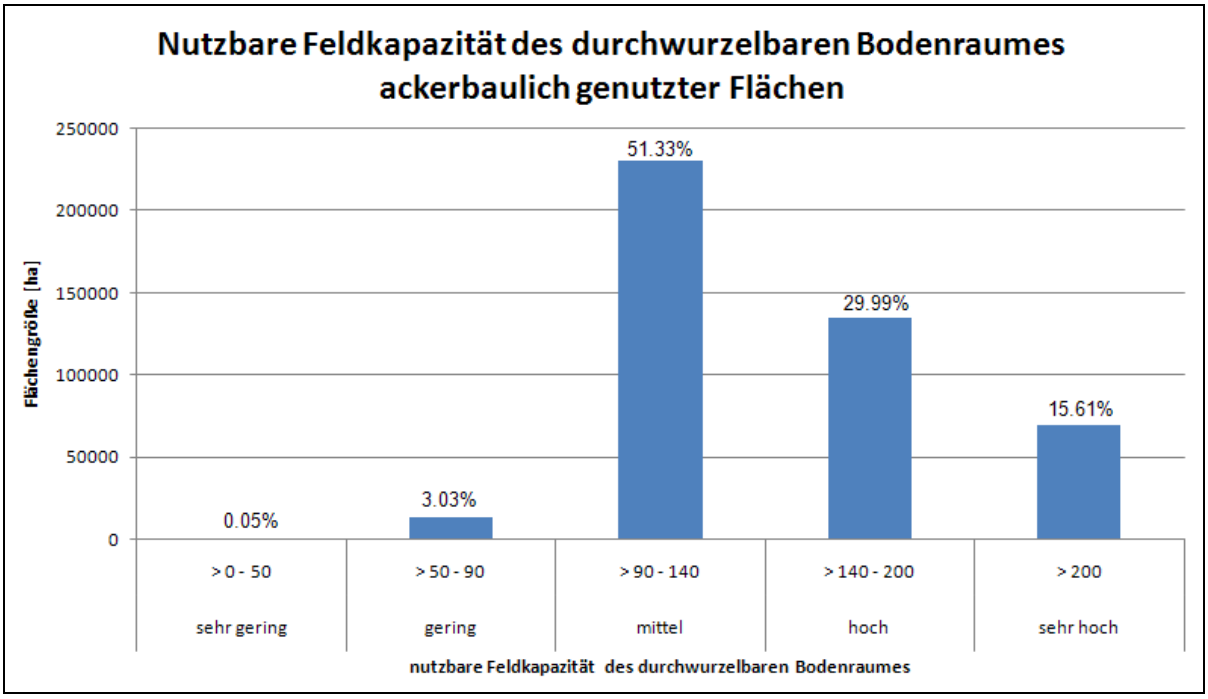


Abb. 25: Nutzbare Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraumes (in mm) auf ackerbaulich genutzten Teilflurstücken

Abb. 26 zeigt die nFK des durchwurzelbaren Bodenraumes ackerbaulich genutzter Flächen in Rheinhessen auf. Flächen mit geringer und sehr geringer nFKdB kommen nur sporadisch vor. Fast das gesamte rheinhessische Tafel- und Hügelland weist hohe bis sehr hohe nFK-Werte des durchwurzelbaren Bodenraumes der Ackerflächen auf. Der Ackerbau im angrenzenden Nordpfälzer Bergland und im Naheland weist meist eine mittlere bis hohe nutzbare Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraumes auf.

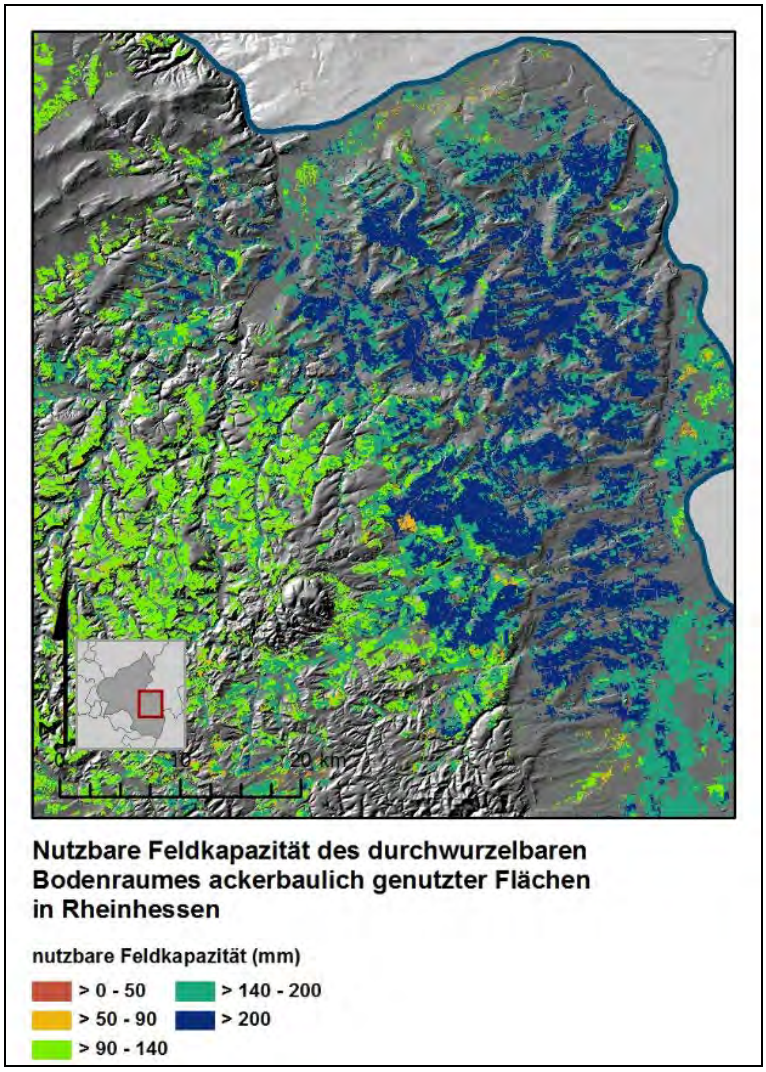


Abb. 26: nutzbare Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraumes (in mm) auf ackerbaulich genutzten Flächen in Rheinhessen (Datengrundlage LVermGeo Rheinland-Pfalz)

Neben diesen aus landwirtschaftlicher Sicht sehr wichtigen Standorteigenschaften beinhaltet die ALK++ weitere Parameter, die hier nicht näher betrachtet, aber dennoch aufgeführt werden sollten. Hierzu zählen z. B. die relative Höhe, topographische Einstrahlung, Konvergenzindex, Sky-View-Faktor, Feuchteindizes und Luv-Lee-Lage. Darüber hinaus beinhaltet die Datenbank aus diesen Parametern abgeleitete Standortindizes zur Beschreibung des Trockenstressrisikos, welche bereits im Methodikteil erläutert wurden und im Folgenden aufgezeigt werden.

8.2 Standortindex der Basistoleranz gegenüber reduzierten Niederschlägen - landwirtschaftliche Standorte in Rheinland-Pfalz

Der Standortindex Basistoleranz setzt sich aus den abiotischen Standortfaktoren der Bereiche Boden (nutzbare Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraumes) und Relief (Topographischer Feuchteindex, Incoming Solar Radiation) zusammen und ermöglicht die Einschätzung der Fähigkeit landwirtschaftlich genutzter Flächen, Perioden mit reduzierten Niederschlägen durch die Bereitstellung pflanzenverfügbaren Wassers zu überbrücken.

Das folgende Beispiel zeigt zur besseren Verständlichkeit die Basistoleranz gegenüber reduzierten Niederschlägen von landwirtschaftlich genutzten Flächen an der Mittelmosel. Auffallend ist eine geringe Toleranz entlang stark geneigter südlich exponierter Hänge. Aufgrund intensiver Sonneneinstrahlung muss hier vor allem in den Sommermonaten mit hohen Verdunstungsraten gerechnet werden. Außerdem können diese Bereiche nur in geringem Maße von Oberflächenabfluss oder Interflow aus höher gelegenen Flächen profitieren. Treffen diese Eigenschaften nun auf Regionen mit geringer nutzbarer Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraumes, so ergeben sich geringe Werte für die Basistoleranz. Es kann so von einer hohen Vulnerabilität gegenüber reduzierten Niederschlägen ausgegangen werden. Auf der anderen Seite stellen vor allem landwirtschaftlich genutzte Flächen auf leicht geneigten Nordhängen und in Tallagen aufgrund geringerer Verdunstungsraten und verstärktem Oberflächenzufluss bei hohen nFK-Werten des durchwurzelbaren Bodenraumes stark tolerante Lagen gegenüber reduziertem Wasserangebot durch Niederschlag dar.

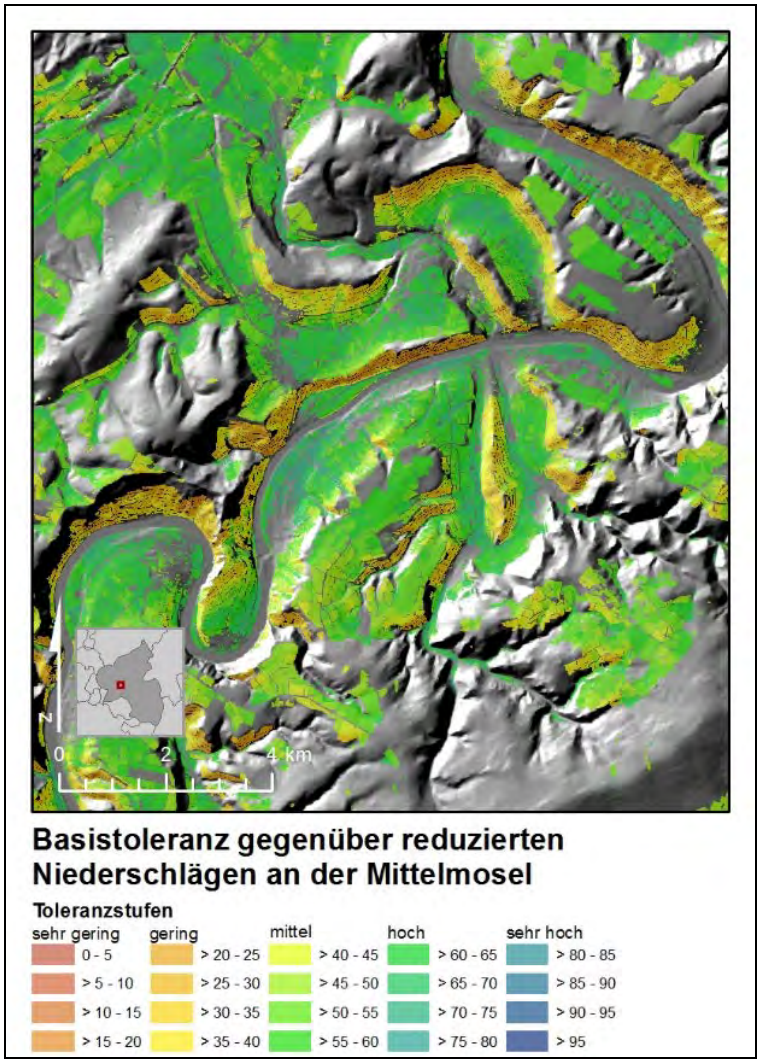


Abb. 27: Standortindex zur Basistoleranz gegenüber reduzierten Niederschlägen an der Mittelmosel (Datengrundlage LVERMGEO Rheinland-Pfalz)

Abbildung 28 und Tabelle 6 geben Aufschluss über die Basistoleranz landwirtschaftlich genutzter Standorte in Rheinland-Pfalz.

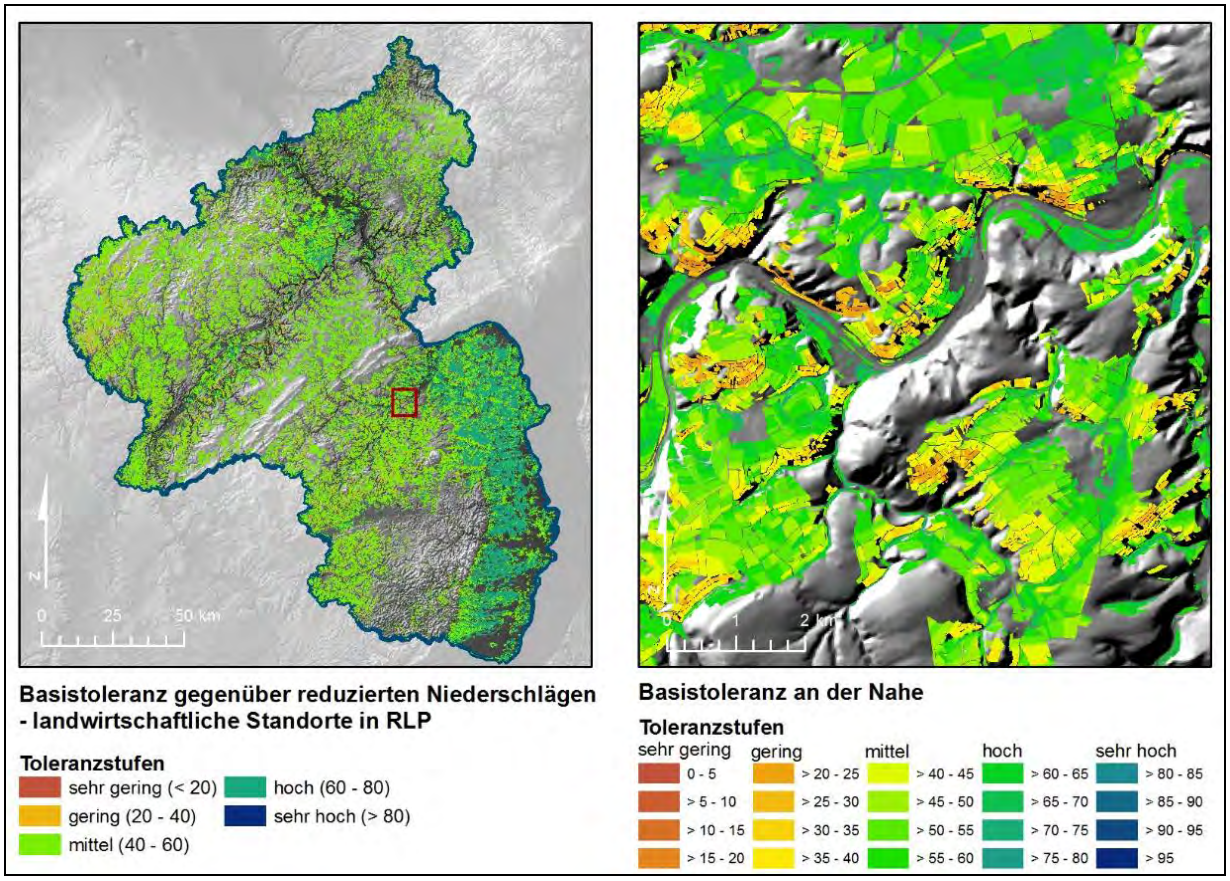


Abb. 28: Standortindex der Basistoleranz gegenüber reduzierten Niederschlägen – landwirtschaftliche Standorte in Rheinland-Pfalz / Naheeinzugsgebiet (Datengrundlage LVERMGEO Rheinland-Pfalz)

Ein Großteil der landwirtschaftlichen Anbauflächen in Rheinland-Pfalz (69,64 %) zeigt mit Indexwerten zwischen 40 und 60 Punkten eine mittlere Toleranz gegenüber reduzierten Niederschlägen. Flächenmäßig folgen mit 22.23 % landwirtschaftliche Standorte mit Indexwerten zwischen 60 und 80 Punkten (hohe Toleranz) und 20 bis 40 Punkten (geringe Toleranz 8.07 %). Standorte mit einer sehr geringen Basistoleranz gegenüber verminderten Niederschlägen machen mit 0.06 % an der Gesamtfläche einen sehr geringen Anteil aus. Flächen mit über 80 Indexpunkten, also sehr hoher Toleranz, kommen in Rheinland-Pfalz landesweit praktisch nicht vor.

Tab. 6: Statistik zum Standortindex Basistoleranz

Toleranzstufen	Werte	Anzahl der Flurstücke	Anteil in %	Fläche in ha	Anteil in %
sehr gering	0 - 20	7.501	0.29	467.69	0.06
gering	20 - 40	258.837	10.03	67020.56	8.07
mittel	40 - 60	1.665.442	64.56	578413.96	69.64
hoch	60 - 80	648.012	25.12	184648.89	22.23
sehr hoch	80 - 100	7	0.00	0.39	0.00

8.3 Standortklimaindex – Toleranz landwirtschaftlicher Standorte in Rheinland-Pfalz gegenüber einem veränderten Wasserhaushalt

Der Standortklimaindex zeigt die Toleranz landwirtschaftlich genutzter Flächen gegenüber veränderten hygrischen Verhältnissen für heutige und zukünftige klimatische Verhältnisse. Es zeigt sich bei Eintreten der zugrunde gelegten Klimasimulation (WETTREG2006 A1B-trocken) eine deutliche Verschlechterung der Wasserversorgung auf allen Standorten, welche auf die schlechter werdenden klimatischen Wasserbilanzen in den Sommermonaten zurückzuführen ist. Im Mittel verschlechtert sich der Standortklimaindex, welcher sich aus statischen (Topographische Sonneneinstrahlung, Topographischer Feuchteindex und nutzbare Feldkapazität) und dynamischen (klimatische Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode) Standortfaktoren zusammensetzt, zwischen dem Referenzzeitraum (1971-2000) und der fernen Zukunft (2071-2100) auf den landwirtschaftlich genutzten Standorten zum Teil deutlich (im Mittel um 14 Indexpunkte). Die geringste Abnahme eines landwirtschaftlichen Standorts liegt bei 5,6 Indexpunkten. Die deutlichste Abnahme liegt bei 24 Indexpunkten und damit einer massiv schlechteren Toleranz gegenüber reduzierten Sommerniederschlägen.

Die folgende Tabelle zeigt die veränderte Toleranz auf landwirtschaftlichen Standorten gegenüber reduzierten Niederschlägen auf Basis des Standortklimaindex für heutige und zukünftige Verhältnisse. Heute ist auf über 8 % der Flächen ein Indexwert < 40 festzustellen. In der fernen Zukunft werden dann über 85 % der Flächen einen Wert kleiner 40 Indexpunkte verzeichnen und damit eine geringe bzw. sehr geringe Toleranz gegenüber Trockenstress aufweisen. Diese Flächen erscheinen besonders vulnerabel gegenüber Trockenstress und stellen Risikogebiete für eine erfolgreiche, ohne künstliche Bewässerung betriebene Landwirtschaft dar.

Tab. 7: Veränderung des Standortklimaindex (SKI) auf landwirtschaftlichen Standorten in Rheinland-Pfalz für drei Zeitscheiben (Flächenanteil in %)

Klassen	***Toleranz***	***SKI 1971-2000***	***SKI 2021-2050***	***SKI 2071-2100***
0 - 20	sehr gering (0 - 20)	0.00	0.04	0.29
20 - 40	gering (> 20 - 40)	8.12	58.14	85.31
40 - 60	mittel (> 40 - 60)	87.61	41.81	14.40
60 - 80	hoch (> 60 - 80)	4.26	0.01	0.00
80 - 100	sehr hoch (> 80 - 100)	0.00	0.00	0.00

Im Folgenden soll der Standortklimaindex für einen exemplarischen Ausschnitt an der Mittelmosel abgebildet werden. Die folgende Grafik zeigt den Standortklimaindex für heutige Klimaverhältnisse. Im Bezugszeitraum 1971-2000 ist ein Großteil der Flächen mit einer mittleren Wasserversorgung ausgestattet. Geringe Indexwerte zeigen sich vor allem im Bereich der südlich ausgerichteten Hanglagen. Hohe Werte sind vermehrt in den Niederungen und Tälern auszumachen.

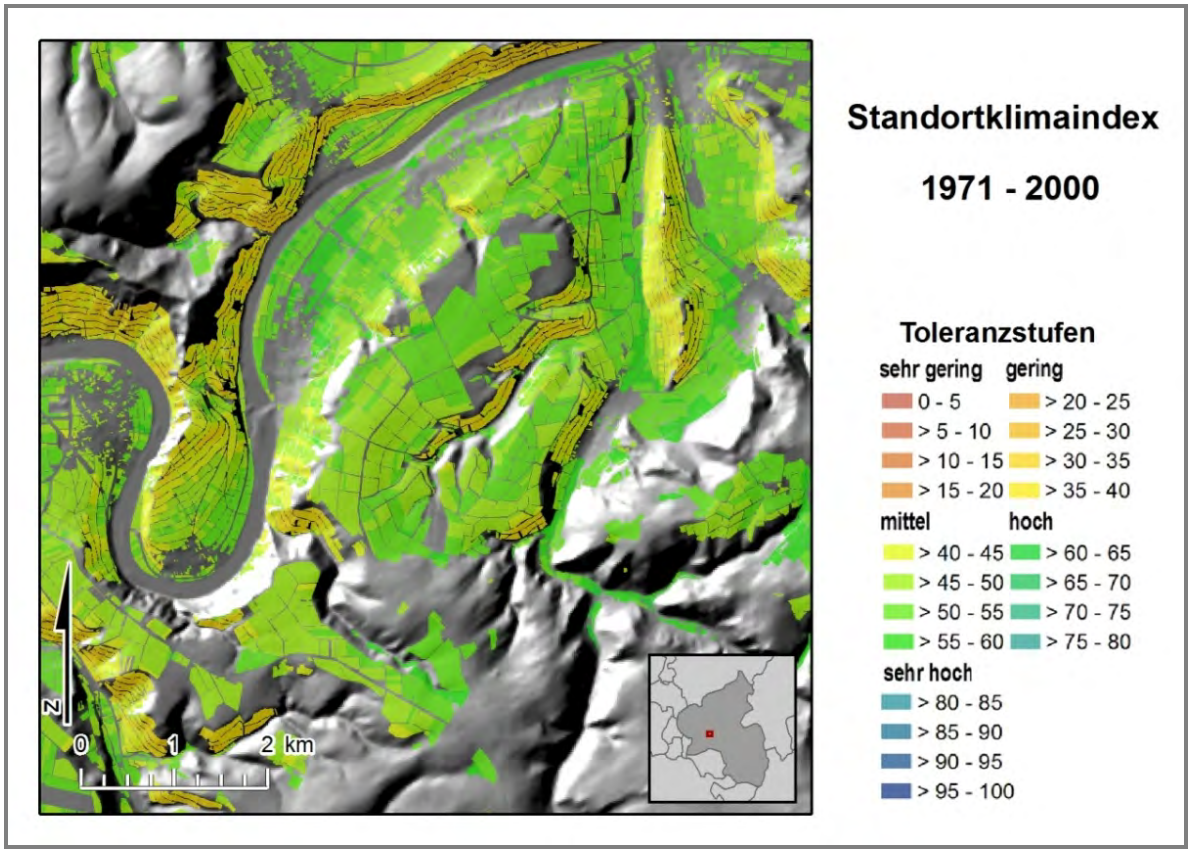


Abb. 29: Standortklimaindex für den Zeitraum 1971–2000 auf landwirtschaftlich genutzten Standorten an der Mittelmosel (Datengrundlage LVERMGEO Rheinland-Pfalz & DWD)

Bereits in der nahen Zukunft verschlechtern sich die hygrischen Verhältnisse deutlich. Ein Großteil der Flächen würde bei Eintreten der zugrunde gelegten Klimaprojektion WETTREG2006 A1B-trocken in den Jahren 2021-2050 deutlich schlechtere Indexwerte und damit eine erhöhte Trockenstressgefährdung aufweisen. Nur in den feuchteren Talauen sind noch mittlere Indexwerte anzutreffen.

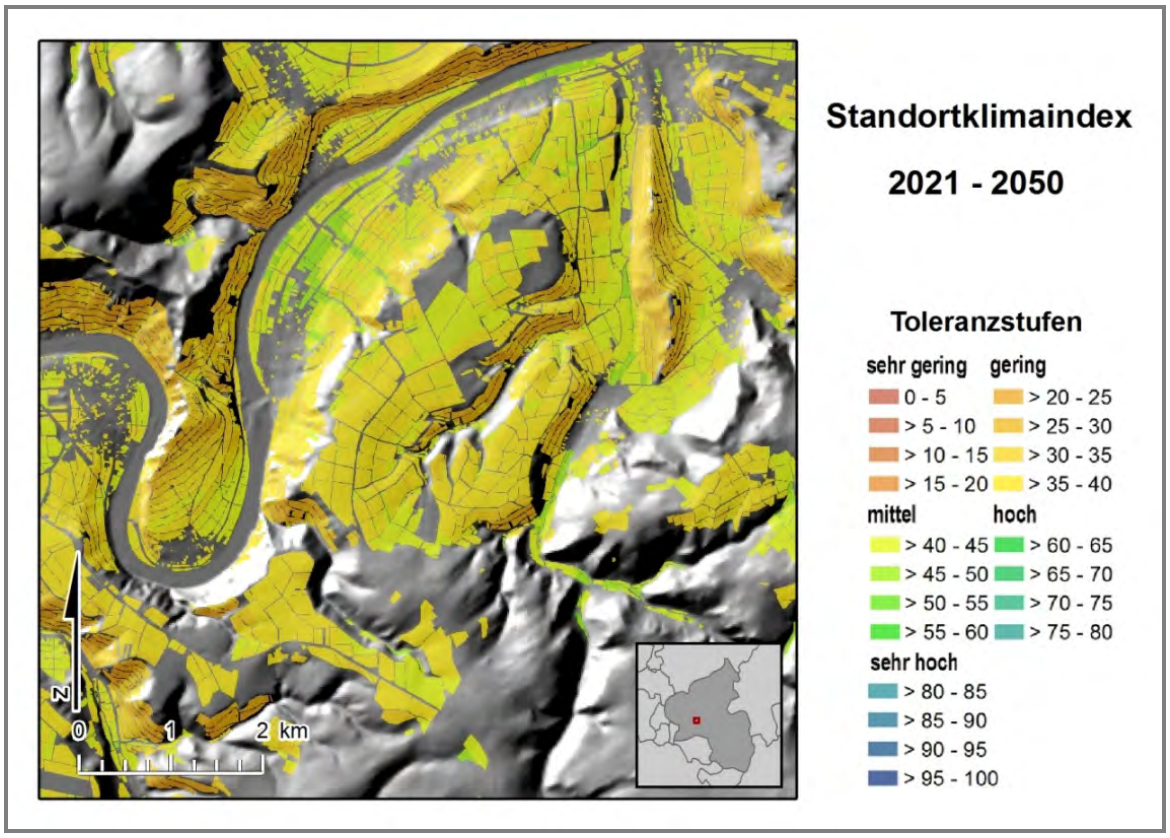


Abb. 30: Standortklimaindex für die nahe Zukunft (2021–2050) auf landwirtschaftlich genutzten Standorten an der Mittelmosel (Datengrundlage LVERMGEO Rheinland-Pfalz, Projektion: WETTREG 2006 A1B-trocken)

Für den Zeitraum 2071-2100 verschlechtert sich die Wasserversorgung auf den landwirtschaftlichen Standorten weiter. Im Bereich steiler südlicher Hanglagen wird bei Eintreten der zugrunde gelegten Projektion (WETTREG 2006 A1B-trocken) dann sogar nur noch eine geringe bzw. sehr geringe Wasserversorgung verzeichnet. In den Tälern finden sich geringe bis mittlere Indexwerte.

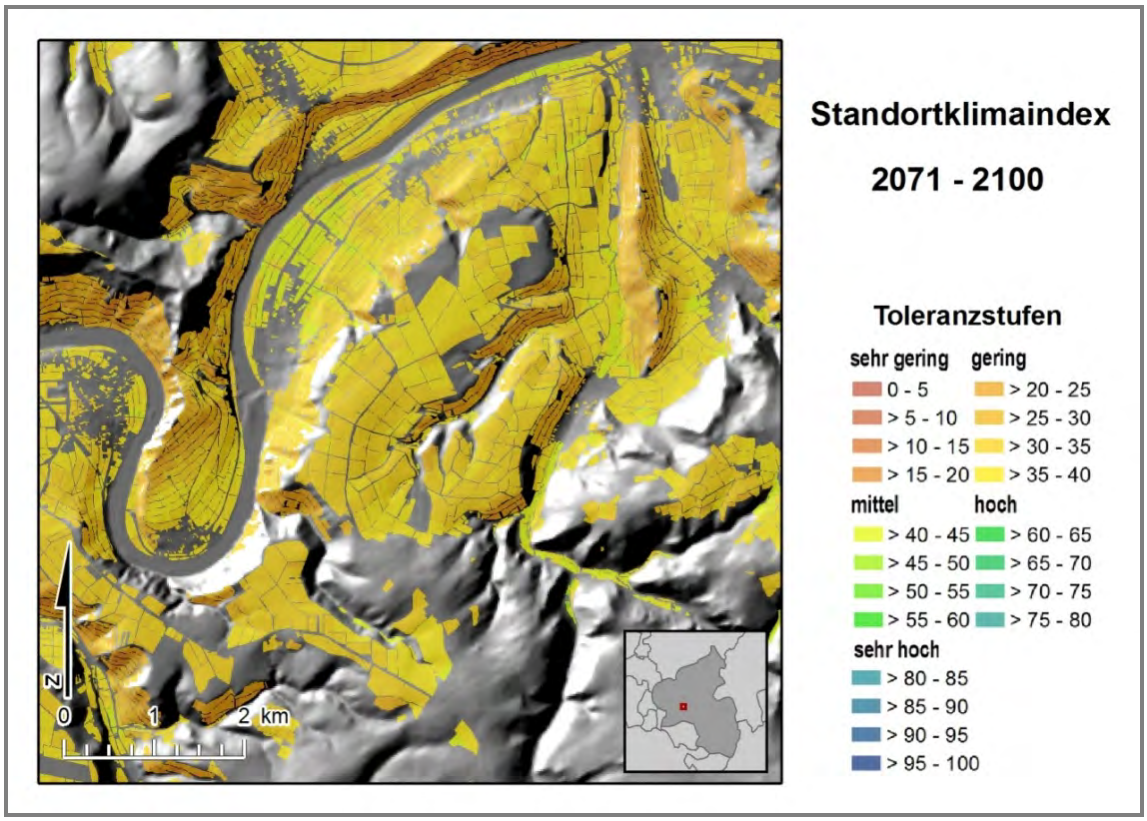


Abb. 31: Standortklimaindex für die ferne Zukunft (2071–2100) auf landwirtschaftlich genutzten Standorten der Mittelmosel (Datengrundlage LVERMGEO Rheinland-Pfalz, Projektion: WETT-REG2006 A1B-trocken)

8.4 Weinanbau – Großer Gewinner des Klimawandels?

Der Weinanbau spielt seit jeher eine tragende Rolle in der rheinland-pfälzischen Landwirtschaft. Als intensive mehrjährige Dauerkultur wird der Weinanbau in Rheinland-Pfalz laut Statistischem Landesamt 2012 auf knapp 64.000 ha bestockter Rebfläche betrieben (STATISTISCHES LANDESAMT 2012). In Rheinland-Pfalz beschränkt sich der Weinanbau aufgrund seiner besonderen klimatischen Ansprüche auf die thermischen Gunstregionen der größeren Flusstäler von Rhein, Mosel, Nahe und Ahr (siehe auch folgende Abb.).

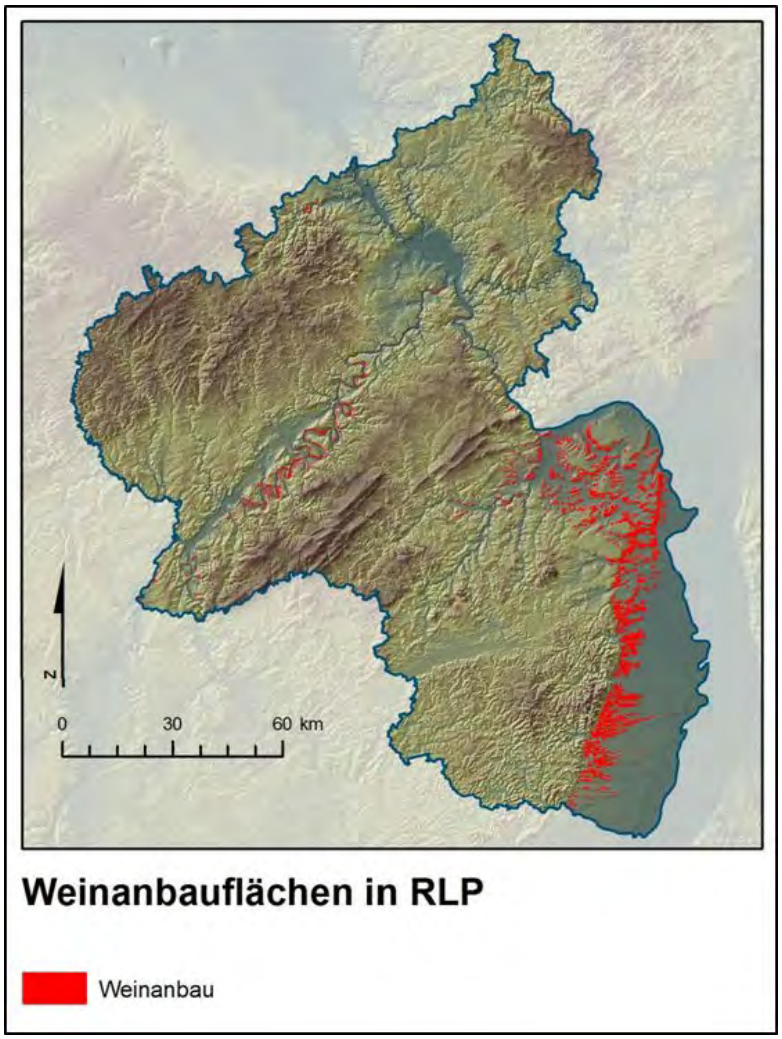


Abb. 32 Weinanbauflächen in Rheinland-Pfalz (Datengrundlage LVERMGEO Rheinland-Pfalz)

Es werden sechs größere Anbauregionen unterschieden. Tab. 1 zeigt die besondere Stellung der beiden großen Anbaugebiete Rheinhessen und Pfalz, die mit insgesamt knapp 50.000 ha über 78 % des Weinanbaus in Rheinland-Pfalz vereinen. Als nächst größere Anbaugebiete folgen die Mosel mit knapp 9.000 ha und die Nahe mit ca. 4.000 ha. Die beiden kleinen Anbaugebiete Ahr und Mittelrhein besitzen zusammen nur etwa 1.000 ha bestockte Rebfläche. In fast allen Anbaugebieten dominiert der Anbau von Weißweinsorten gegenüber Rotweinen. Nur an der Ahr wird mehr Rot- als Weißwein produziert; dies ist insbesondere im Anbau des Spätburgunders mit ca. 350 ha begründet. An der Mosel ist der Anbau von Weißweinsorten traditionsreich, so dass sich hier ein Großteil der Weingüter auf den Anbau von Riesling konzentriert, der sich hier besonders auf den exponierten, sonnenbestrahlten Steilhängen eignet. Der Rieslinganbau macht beispielsweise. an der Mosel mit über 5.000 ha von insgesamt knapp 8.800 ha bestockter Rebfläche gut 60 % des dortigen Anbaus aus. Auch im Mittelrhein dominiert der Anbau des Riesling. In Rheinhessen überwiegt der Anbau von Müller-Thurgau (etwa 4.400 ha), gefolgt von Riesling (knapp 4.000 ha) und der Rotweinsorte Dornfelder (ca. 3.400 ha). Die Pfalz ist charakteristisch für Riesling (über 5.500 ha)

und Müller-Thurgau (knapp 2.300 ha), sowie für die roten Sorten Dornfelder (über 3000 ha) und Portugieser (ca. 2.000 ha) (STATISTISCHES LANDESAMT 2010).

Tab. 8: Weinanbaugebiete in Rheinland-Pfalz nach bestockter Rebfläche der Keltertrauben 2010 (eigene Darstellung, verändert nach STATISTISCHES LANDESAMT 2010)

Anbaugebiet	Fläche [ha]	Weißweinrebsorten [ha]	Rotweinrebsorten [ha]
Ahr	559	83	476
Mittelrhein	436	370	66
Mosel	8.768	7.959	809
Nahe	4.155	3.119	1.036
Rheinhessen	26.523	18.352	8.171
Pfalz	23.445	14.466	8.979
Rheinland-Pfalz	***63.886***	***44.350***	***19.536***

8.4.1 Hoher thermischer Anspruch - Weinbauklima

Dauerkulturen unterscheiden sich gegenüber einjährigen Nutzpflanzen vor allem durch die erhöhte Verwundbarkeit gegenüber klimatischen Änderungen. Wein ist der ganzjährigen Witterung ausgesetzt und deshalb besonders anfällig (EITZINGER et al. 2009). Für die generelle Anbaufähigkeit von Wein müssen bestimmte klimatische Mindestanforderungen erfüllt sein:

- 9 °C mittlere Jahrestemperatur
- mittlere Temperatur des wärmsten Monats (Juli) um oder über 18 °C
- um oder mehr als 1300 Sonnenstunden pro Jahr
- direkte Sonnenstrahlung von April bis Oktober > 155 KJ/cm²
- Mindest-Vegetationszeit von 180 frostfreien Tagen
- Summe der mittleren Tagestemperaturen über 0 °C in der Vegetationszeit von mindestens 2800 Stunden
- Summe der mittleren Tagestemperaturen über 10 °C in der Vegetationszeit um oder über 1000 Stunden
- Mittlere Wintertemperatur > -0,3 °C, absolute Minima nicht unter -18 °C
- Jahresniederschlag 600-700 mm (HERMANN 2007 & HARLFINGER et al. 2002)

Die obigen Kennwerte zeigen vor allem hohe thermische Ansprüche der Rebe und erklären den ausschließlichen Anbau von Wein in Wärme begünstigten Regionen. Alleine betrachtet können sie allerdings nur als Orientierung dienen und reichen somit für die Einschätzung einer Region als Weinbaustandort nicht aus (HERMANN 2007). Für diese Einschätzung müssen vor allem lokalklimatische Aspekte neben nicht klimatischen Faktoren untersucht werden.

Die folgenden Analysen sollen Aufschluss über mögliche weinbaurelevante klimatische Veränderungen geben und die wichtigsten klimatischen Kennwerte betrachten.

8.4.2 Huglin-Index – Einteilung verschiedener Rebsorten hinsichtlich ihres Wärmebedarfs

Die folgende Abbildung zeigt die zukünftige räumliche Entwicklung des Huglin-Index in Rheinland-Pfalz. Als Klimaprojektion wurde WETTREG2006 A1B-trocken gewählt. Diese Klimasimulation weist vor allem für die ferne Zukunft die stärkste Erwärmung aller berücksichtigten Projektionen auf. Zu Beginn der Entwicklung (2021-2030) ist eine Eignung für Weinanbau ausschließlich in den wärmebegünstigten Regionen der Flusstäler möglich. In Zukunft dehnt sich die temperaturbedingte Eignung einer Region für Weinanbau immer weiter in höher gelegene Bereiche aus, so dass gegen Ende des Untersuchungszeitraums Weinbau aus thermischer Sicht, bis auf die höheren Mittelgebirgsregionen, überall in Rheinland-Pfalz theoretisch möglich wäre. Diese räumliche Ausdehnung der Anbaueignung ist in der projizierten Temperaturerhöhung im Zuge des stattfindenden Klimawandels begründet. Hier muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass es sich beim Huglin-Index um eine grobskalige Betrachtung handelt, bei der lokale Faktoren nicht berücksichtigt werden. Der Huglin-Index beschreibt ausschließlich die Eignung einer Region für Rebsorten auf Basis deren Wärmeanspruchs. Weitere wichtige Weinbaukriterien, wie beispielsweise die Frostgefährdung durch Winter- und Spätfröste, Sonnenscheindauer oder Bodenverhältnisse finden keine Berücksichtigung. Die realistischen Huglin-Indexwerte dürften generell etwas über den simulierten Werten liegen, was auf die ausschließliche Berechnung des Huglin-Index für ebene Standorte zurückzuführen ist. Auf stark geneigten Südhängen dürften diese demnach teils sogar um 100-200 Punkte höher liegen.

In der fernen Zukunft zeigen sich in den Wärme begünstigten Regionen Huglin-Werte von nahe 2200 Indexpunkten, welche den Anbau von wärmeliebenden Rebsorten aus ursprünglich südlicheren Weinbauregionen ermöglichen würden. Eine detaillierte Untersuchung folgt im Anschluss durch punktbasierte Analysen an repräsentativen Klimastationen.

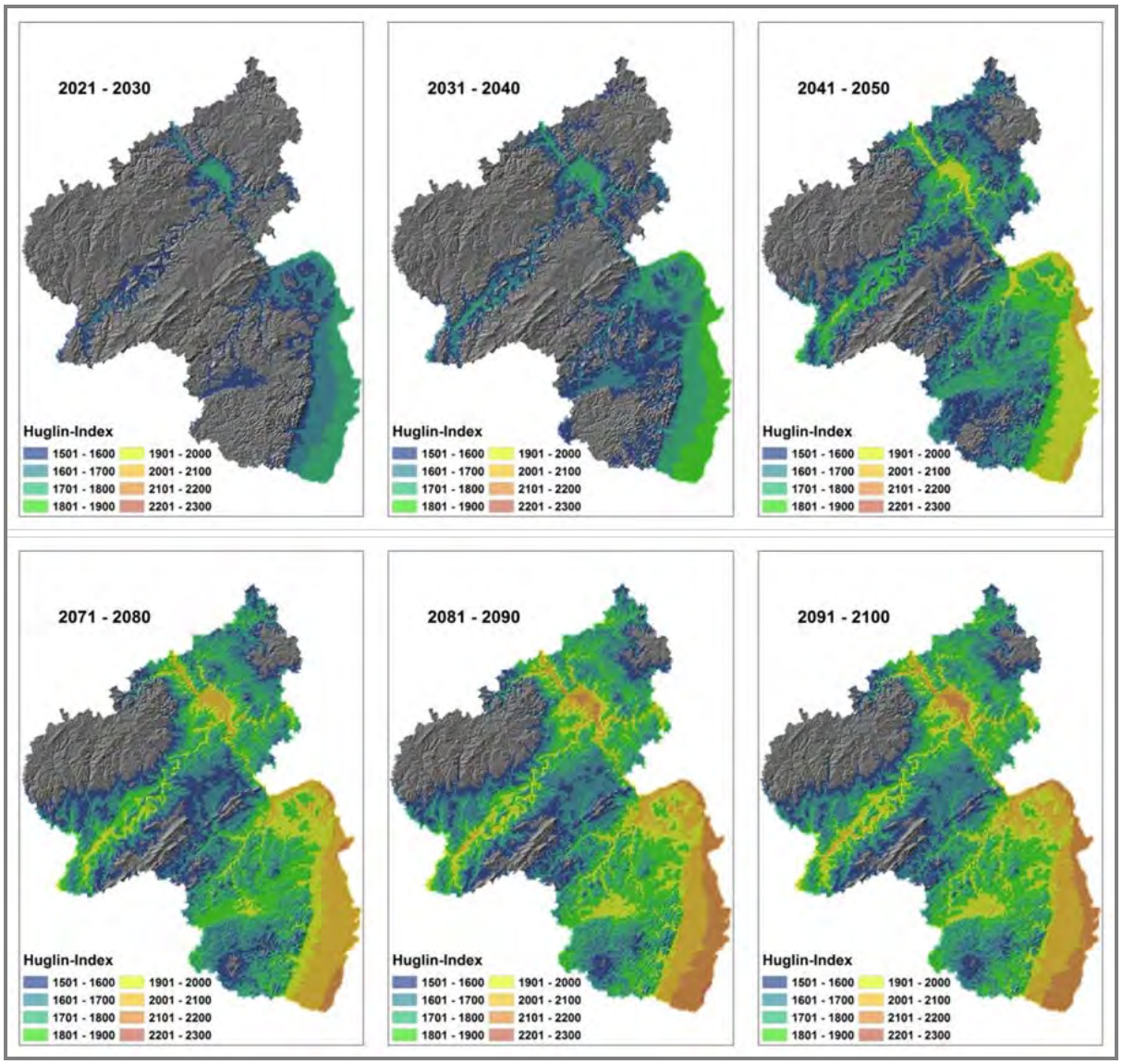


Abb. 33: Zeitschnitte für die zukünftige Entwicklung des Huglin-Index in Rheinland-Pfalz (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken)

Die folgenden Untersuchungen basieren auf Zeitreihen weinbaurelevanter Klimastationen. Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung des Huglin Index in Rheinland-Pfalz anhand eines Stationsvergleichs 8 ausgewählter Klimastationen. Die hier aufgeführte Station Trier-Petrisberg (265m) zeigt aufgrund ihrer Höhenlage und ihrer nördlichen Exposition von allen untersuchten Stationen die niedrigsten Werte. Die Klimastationen Mainz und Koblenz weisen die höchsten Werte auf. Für alle Weinbaustandorte zeigt sich ein ähnlicher Verlauf des Huglin Index auf unterschiedlichem Niveau. Von 1971-1980 bis zur Dekade 1991-2000 kam es zu einem Anstieg des Huglin Index. Nachfolgend zeigt sich an allen Stationen ein leicht rückläufiger Trend bis zur Dekade 2021-2030. Anschließend folgt ein kontinuierlicher Anstieg der Huglin Werte. Insgesamt steigt der Huglin Index im Mittel für jede Station von 1971-1980 bis zur Dekade 2091-2100 um ca. 500 Punkte an. Hierdurch verändert sich das potenziell geeignete Rebsortenspektrum (siehe farbliche Hintergrundabstufung) an den jeweiligen Stationen deutlich.

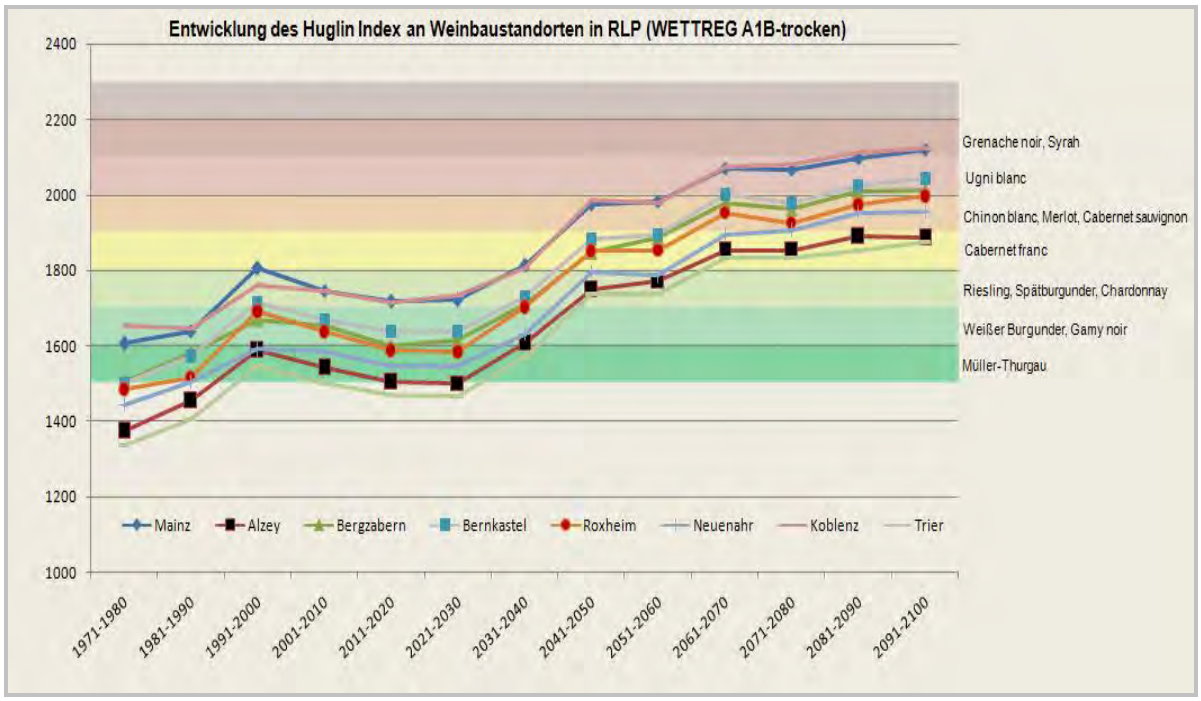


Abb. 34: Entwicklung des Huglin Index an Weinbaustandorten in Rheinland-Pfalz (Projektion: WETT-REG2006 A1B-trocken)

Abbildung 35 zeigt die Entwicklung des Huglin-Index am Beispiel der Klimastation Koblenz, die hier stellvertretend für die beiden Anbaugebiete Mittelrhein und Mosel ausgewählt wurde. Die Grafik verdeutlicht einen deutlichen stärkeren Anstieg des Huglin-Index durch die beiden STAR-Szenarien. Innerhalb des Klimamodells STAR steigt der Huglin-Index kontinuierlich von etwa 1600 während den beiden Dekaden 1971-1980 und 1981-1990 auf Werte von knapp 2200 in der Dekade 2051-2060 (STAR A1B-trocken) an. Innerhalb des Klimamodells WETTREG2006 zeigt sich zu Beginn der Projektion bei allen Szenarien ein leicht rückläufiger Trend bis zur Dekade 2021-2030. Nachfolgend zeichnet sich ein sehr markanter Anstieg bis zur Dekade 2051-2060 ab. Danach stagniert der Huglin-Index mit leicht positivem Trend auf sehr hohem Niveau, so das letztendlich auch hier ein markanter Anstieg des Huglin-Index von knapp über 1600 (1971-1980, 1981-1990) auf 2000-2100 (Dekade 2091-2100) je nach Projektion stattfindet. Dieser Anstieg hat deutliche Auswirkungen auf das bevorzugte Rebsortenspektrum. Zu Beginn empfiehlt sich aus thermischer Sicht vor allem der Anbau der bekannten Weißweinsorten Müller-Thurgau, Weißer Burgunder und Riesling. In den projizierten Zukunftsdekaden folgt eine Veränderung des bevorzugten Rebsortenspektrums hin zu vermehrt wärmeliebenden Rotweinsorten, wie Cabernet sauvignon, Merlot sowie Grenache noir und Syrah. Weiterhin müssten Chinon blanc und Ugni blanc als prägnante Weißweinsorten aus thermischer Sicht bevorzugt werden.

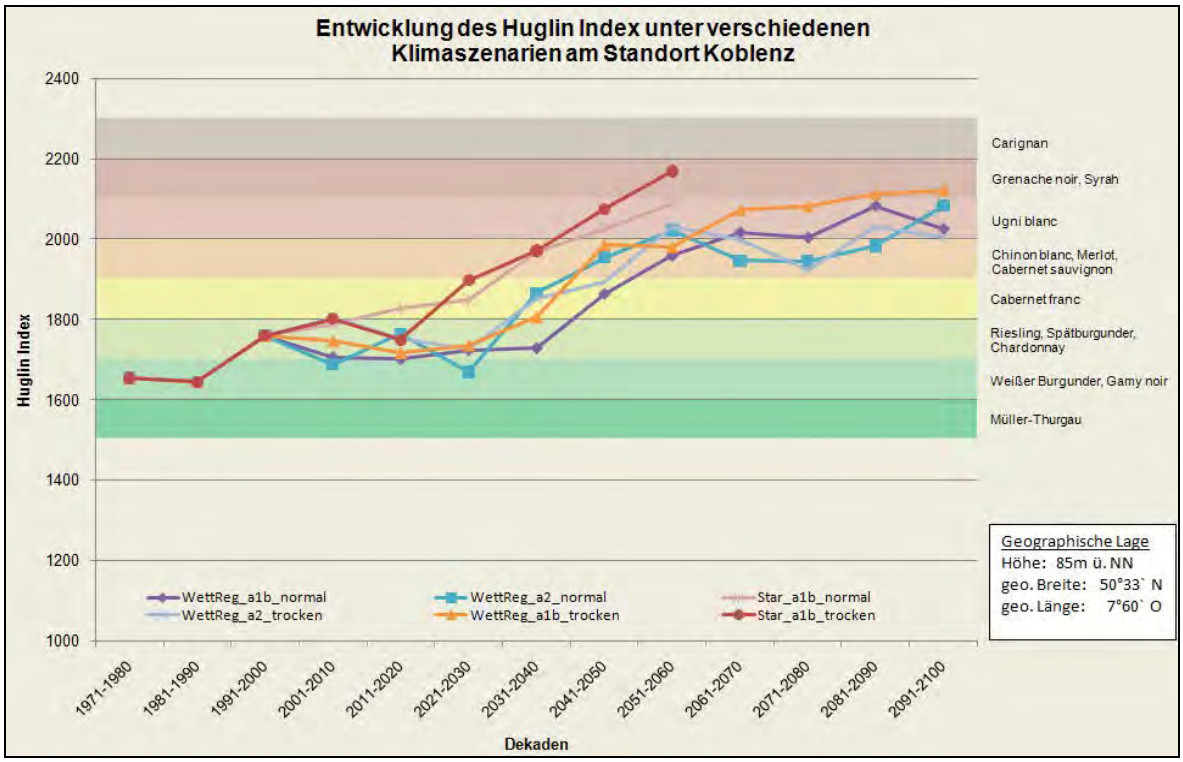


Abb. 35: Entwicklung des Huglin-Index am Standort Koblenz nach ausgewählten Klimasimulationen (Szenarien: STAR und WETTREG2006)

Abb. 36 zeigt, stellvertretend für das Anbaugebiet Ahr, die Entwicklung des Huglin-Index am Standort Bad Neuenahr, auf Basis des 30-jährigen gleitenden Mittels. Die Einbeziehung des gleitenden 30-jährigen Mittels führt zu einer Glättung der zukünftigen Entwicklungen. Bad Neuenahr weist aufgrund seiner geographischen Lage im Schnitt geringere Temperaturen als die wärmebegünstigte Station Koblenz auf. Der Huglin-Index zeigt jedoch auch hier eine deutliche Zunahme von 1500 auf etwa 1900 bei STAR und von 1500 auf etwa 1850-1950 bei den einzelnen WETTREG2006-Projektionen. Ein deutlicher Anstieg wird, wie auch in Koblenz, vor allem zur Mitte dieses Jahrhunderts erwartet. Gegen Ende des Jahrhunderts flacht die Entwicklung dann wieder deutlich ab. Auch hier zeigt sich ein stärkerer Anstieg des Huglin-Index der STAR-Projektionen im Vergleich zu WETTREG2006. In Bad Neuenahr verschieben sich die Temperaturbedingungen hin zu einem Bereich stärker wärmeliebender Rebsorten. Das Spektrum der Indexwerte der unterschiedlichen Projektionen ist relativ eng, was auf ein schmaleres Spektrum der diesen Temperaturbereich bevorzugenden Rebsorten schließen lässt.

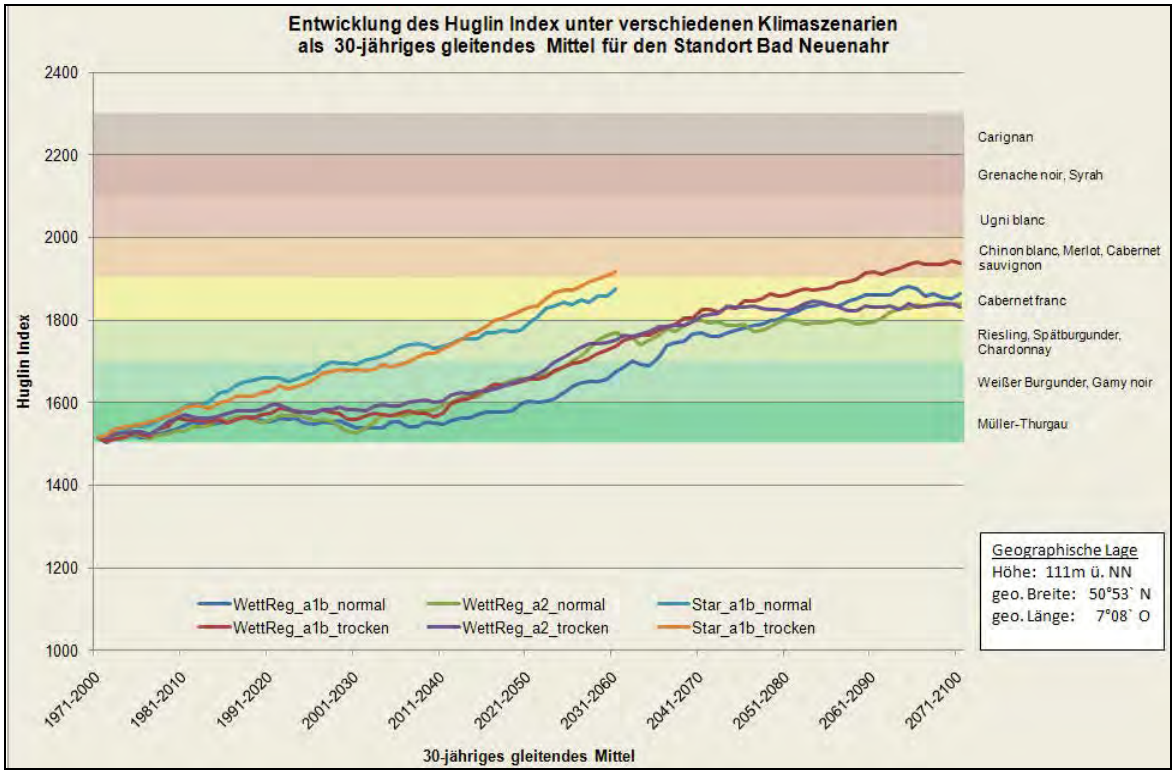


Abb. 36: Entwicklung des Huglin-Index am Beispiel des 30-jährigen gleitenden Mittels am Standort Bad Neuenahr (Projektionen: STAR und WETTREG2006)

Die nachfolgende Tabelle zeigt die landesweite Entwicklung des Huglin-Index zusammenfassend für alle 8 weinbaurelevanten Klimastationen in Rheinland-Pfalz und den 6 unterschiedlichen Klimaprojektionen der beiden regionalen Klimamodelle WETTREG2006 und STAR am Beispiel von ausgewählten Dekaden. Insgesamt wurden 7 Dekaden gewählt, die den gesamten gemessenen und projizierten Zeitraum abdecken. Bei allen Stationen zeigen sich ähnliche Verläufe. Während bei STAR ein kontinuierlicher Anstieg von 1971-2060 verzeichnet wird, kommt es bei WETTREG 2006 zu Beginn dieses Jahrhunderts zu einem leichten Rückgang und einem nachfolgenden steilen Anstieg des Huglin-Index. Innerhalb der einzelnen Dekaden zeigen sich zum Teil deutliche annuelle Unterschiede des Huglin-Index (siehe Standardabweichungen in Klammern), so dass eine genaue zukünftige Aussage schwierig ist.

Tab. 9: Entwicklung des Huglin-Index (Dekadenmittel) nach ausgewählten Klimasimulationen an allen untersuchten Klimastationen unter Berücksichtigung der Standardabweichung (in Klammern)

Station:	Modell:	Szenario	1971 - 1980	1991 - 2000	2011 - 2020	2031 - 2040	2051 - 2060	2071 - 2080	2091 - 2100
Alzey	WETTREG	a1b normal	1375 (179)	1589 (110)	1478 (133)	1532 (191)	1730 (148)	1802 (131)	1780 (137)
		a1b trocken	1375 (179)	1589 (110)	1542 (174)	1657 (211)	1797 (93)	1719 (129)	1849 (154)
		a2 normal	1375 (179)	1589 (110)	1504 (162)	1607 (90)	1774 (159)	1851 (97)	1886 (81)
		a2 trocken	1375 (179)	1589 (110)	1538 (155)	1646 (147)	1813 (106)	1707 (130)	1749 (83)
	STAR	a1b normal	1375 (179)	1589 (110)	1708 (168)	1843 (204)	1947 (144)	-	-
		a1b trocken	1375 (179)	1589 (110)	1638 (102)	1842 (236)	2033 (68)	-	-
Bergzabern	WETTREG	a1b normal	1505 (185)	1670 (119)	1578 (139)	1631 (200)	1861 (139)	1906 (133)	1909 (129)
		a1b trocken	1505 (185)	1670 (119)	1642 (173)	1748 (195)	1923 (111)	1816 (121)	1936 (167)
		a2 normal	1505 (185)	1670 (119)	1602 (146)	1710 (93)	1886 (151)	1962 (93)	2012 (81)
		a2 trocken	1505 (185)	1670 (119)	1650 (158)	1740 (141)	1921 (115)	1789 (125)	1859 (81)
	STAR	a1b normal	1505 (185)	1670 (119)	1795 (184)	1925 (197)	2031 (148)	-	-
		a1b trocken	1505 (185)	1670 (119)	1727 (128)	1924 (239)	2127 (65)	-	-
Bernkastel	WETTREG	a1b normal	1499 (201)	1714 (102)	1626 (129)	1656 (194)	1871 (134)	1910 (137)	1942 (139)
		a1b trocken	1499 (201)	1714 (102)	1678 (179)	1774 (227)	1937 (102)	1860 (128)	1989 (166)
		a2 normal	1499 (201)	1714 (102)	1639 (164)	1731 (94)	1893 (156)	1979 (96)	2042 (91)
		a2 trocken	1499 (201)	1714 (102)	1674 (159)	1765 (147)	1938 (123)	1842 (129)	1904 (95)
	STAR	a1b normal	1499 (201)	1714 (102)	1827 (182)	1955 (213)	2085 (164)	-	-
		a1b trocken	1499 (201)	1714 (102)	1731 (110)	1946 (235)	2143 (70)	-	-
Koblenz	WETTREG	a1b normal	1654 (196)	1760 (115)	1701 (133)	1729 (189)	1959 (150)	2003 (137)	2026 (131)
		a1b trocken	1654 (196)	1760 (115)	1764 (185)	1865 (232)	2022 (109)	1945 (132)	2083 (164)
		a2 normal	1654 (196)	1760 (115)	1716 (163)	1806 (92)	1980 (143)	2082 (110)	2122 (90)
		a2 trocken	1654 (196)	1760 (115)	1753 (159)	1853 (159)	2031 (125)	1923 (142)	2003 (95)
	STAR	a1b normal	1654 (196)	1760 (115)	1828 (186)	1969 (216)	2089 (164)	-	-
		a1b trocken	1654 (196)	1760 (115)	1749 (111)	1971 (248)	2169 (70)	-	-
Mainz	WETTREG	a1b normal	1606 (202)	1805 (116)	1697 (143)	1732 (201)	1953 (141)	2009 (127)	2025 (135)
		a1b trocken	1606 (202)	1805 (116)	1762 (185)	1865 (217)	2005 (110)	1949 (137)	2074 (165)
		a2 normal	1606 (202)	1805 (116)	1717 (160)	1812 (84)	1984 (155)	2066 (104)	2120 (87)
		a2 trocken	1606 (202)	1805 (116)	1751 (155)	1855 (150)	2021 (112)	1929 (131)	1986 (100)
	STA	a1b normal	1606 (202)	1805 (116)	1824 (189)	1965 (205)	2077 (164)	-	-
		a1b trocken	1606 (202)	1805 (116)	1742 (135)	1948 (249)	2166 (71)	-	-
Roxheim	WETTREG	a1b normal	1485 (174)	1690 (93)	1569 (135)	1625 (198)	1818 (137)	1879 (130)	1890 (138)
		a1b trocken	1485 (174)	1690 (93)	1641 (182)	1732 (215)	1889 (101)	1801 (128)	1939 (153)
		a2 normal	1485 (174)	1690 (93)	1587 (166)	1702 (88)	1852 (151)	1926 (82)	1996 (74)
		a2 trocken	1485 (174)	1690 (93)	1631 (159)	1722 (149)	1903 (117)	1802 (129)	1847 (93)
	STAR	a1b normal	1485 (174)	1690 (93)	1763 (177)	1907 (216)	2015 (161)	-	-
		a1b trocken	1485 (174)	1690 (93)	1695 (111)	1911 (243)	2089 (82)	-	-
Neuenahr	WETTREG	a1b normal	1445 (170)	1591 (144)	1535 (137)	1561 (196)	1760 (128)	1835 (138)	1858 (137)
		a1b trocken	1445 (170)	1591 (144)	1586 (178)	1696 (221)	1828 (88)	1783 (130)	1922 (153)
		a2 normal	1445 (170)	1591 (144)	1548 (171)	1631 (105)	1786 (117)	1905 (100)	1955 (89)
		a2 trocken	1445 (170)	1591 (144)	1574 (144)	1676 (159)	1838 (114)	1774 (125)	1850 (89)
	STAR	a1b normal	1445 (170)	1591 (144)	1707 (165)	1813 (201)	1942 (163)	-	-
		a1b trocken	1445 (170)	1591 (144)	1622 (102)	1823 (245)	2010 (70)	-	-
Trier	WETTREG	a1b normal	1338 (237)	1546 (103)	1460 (136)	1489 (199)	1720 (129)	1749 (145)	1768 (147)
		a1b trocken	1338 (237)	1546 (103)	1529 (186)	1609 (229)	1783 (111)	1702 (129)	1815 (176)
		a2 normal	1338 (237)	1546 (103)	1469 (164)	1570 (88)	1736 (156)	1833 (104)	1875 (99)
		a2 trocken	1338 (237)	1546 (103)	1533 (163)	1599 (148)	1784 (130)	1691 (118)	1738 (86)
	STAR	a1b normal	1338 (237)	1546 (103)	1641 (201)	1759 (234)	1885 (159)	-	-
		a1b trocken	1338 (237)	1546 (103)	1544 (123)	1777 (260)	1969 (80)	-	-

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Zunahme des Huglin-Index in allen untersuchten Regionen und an allen Standorten. Diese Zunahme könnte in Zukunft Auswirkungen auf den Anbau von Rebsorten in Rheinland-Pfalz haben, so dass sich der Anbau hin zu Wärme liebenden Anbausorten verschieben könnte. Eine genaue zukünftige Aussage über ein mögliches Rebsortenspektrum ist dennoch sehr schwierig, da sich die beiden verwendeten Modelle (WETTREG2006, STAR) hinsichtlich einer möglichen Entwicklung stark voneinander unterscheiden und auch innerhalb der einzelnen Modellszenarien und Realisationen Unterschiede auftreten. Diese Aussage wird noch dadurch verstärkt, dass ausgeprägte annuelle Unterschiede auftreten. Durch die Klimaerwärmung werden in Zukunft Standorte in Frage kommen, die bisher aufgrund zu kühler Temperaturen für den Anbau von Wein nicht geeignet waren. Es lässt sich abschließend festhalten, dass die Weinkultur in Rheinland-Pfalz, die sich an die jeweiligen Standorte und das Klima angepasst hat, bei Eintritt der zugrunde liegenden Projektionen Änderungen unterliegen wird. Für die Winzer wird es wichtig sein, sich hinsichtlich neuer Rebsorten anzupassen, um etwaigen Gefahren durch Ertrags- oder Qualitätseinbußen besser entgegenwirken zu können.

8.4.3 Rebphänologie – Verfrühung der Eintrittszeitpunkte wichtiger phänologischer Phasen

Unter Phänologie versteht man die zeitliche Abfolge einzelner Entwicklungsstadien und deren Eintrittszeitpunkte bei annuellen und perennialen Pflanzen. Innerhalb der Vegetationsperiode kommt dieser biologischen Uhr eine entscheidende Rolle bei der Aktivierung bzw. Deaktivierung wichtiger Prozesse zu (STOCK et al. 2007).

Die folgenden Untersuchungen basieren auf einem Phänologiemodell nach HOPPMANN & BERKELMANN-LÖHNERTZ 2000, das bereits im Methodenteil näher beschrieben wurde. Es berechnet neben den Eintrittszeitpunkten der wichtigsten phänologischen Phasen auch weitere daraus abgeleitete weinbaulich relevante Klimagrößen (STOCK et al. 2007).

An allen Stationen zeigt sich in allen zugrunde gelegten Simulationen eine deutliche Verfrühung der wichtigsten phänologischen Phasen Austrieb, Blühbeginn, Reifebeginn und Lesereife (siehe Beispiel Trier Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken, folgende Abb.). Die Verfrühung zeigt jedoch keinen kontinuierlichen Verlauf. Innerhalb der ersten drei Dekaden verfrühen sich alle wichtigen phänologischen Phasen, danach folgt sogar eine über drei Dekaden (2001-2030) dauernde leichte zeitliche Verzögerung. Ab der Dekade 2031-2040 zeigt sich dann jedoch bis zum Ende des Betrachtungszeitraums eine meist stetige Verfrühung. Der Austrieb verfrüht sich an allen Stationen und in allen Simulationen im betrachteten Zeitraum zwischen 1971-1980 und 2091-2100 im Mittel meist um 25-30 Tage. Auffallend ist ein deutlicher zeitlicher Sprung nach vorne in den beiden letzten Dekaden. Hier kommt es bereits an allen Standorten und Simulationen Mitte bzw. Ende März zum Knospenaustrieb, wodurch sich die Anzahl von Spätfrostereignissen erhöhen kann. Betrachtet man die weiteren wichtigen phänologischen Phasen, so zeigt sich eine abschwächende Tendenz einer Verfrühung. Verfrühen sich Blühbeginn und Reifebeginn meist im Mittel um 20–25 Tage, so zeigt die Lesereife meist nur noch eine Verfrühung um gemittelt 15-20 Tage. Die Lese findet

zu Beginn der Betrachtung meist Mitte bzw. Ende Oktober statt und verfrüht sich in der fernen Zukunft je nach Lage und Höhe der Weinbaustandorte auf Mitte bzw. Ende September. Hier muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass sich eine Verfrühung der phänologischen Phasen in einzelnen Extremjahren hiervon deutlich abheben kann. Eine Verfrühung der Lesereife birgt ebenfalls Risiken, wie z. B. ein erhöhtes Fäulnisrisiko durch feuchtere Verhältnisse in der noch wärmeren Jahreszeit. Hier könnten Pilze und Bakterien verstärkt zu Fäulnisbefall führen.

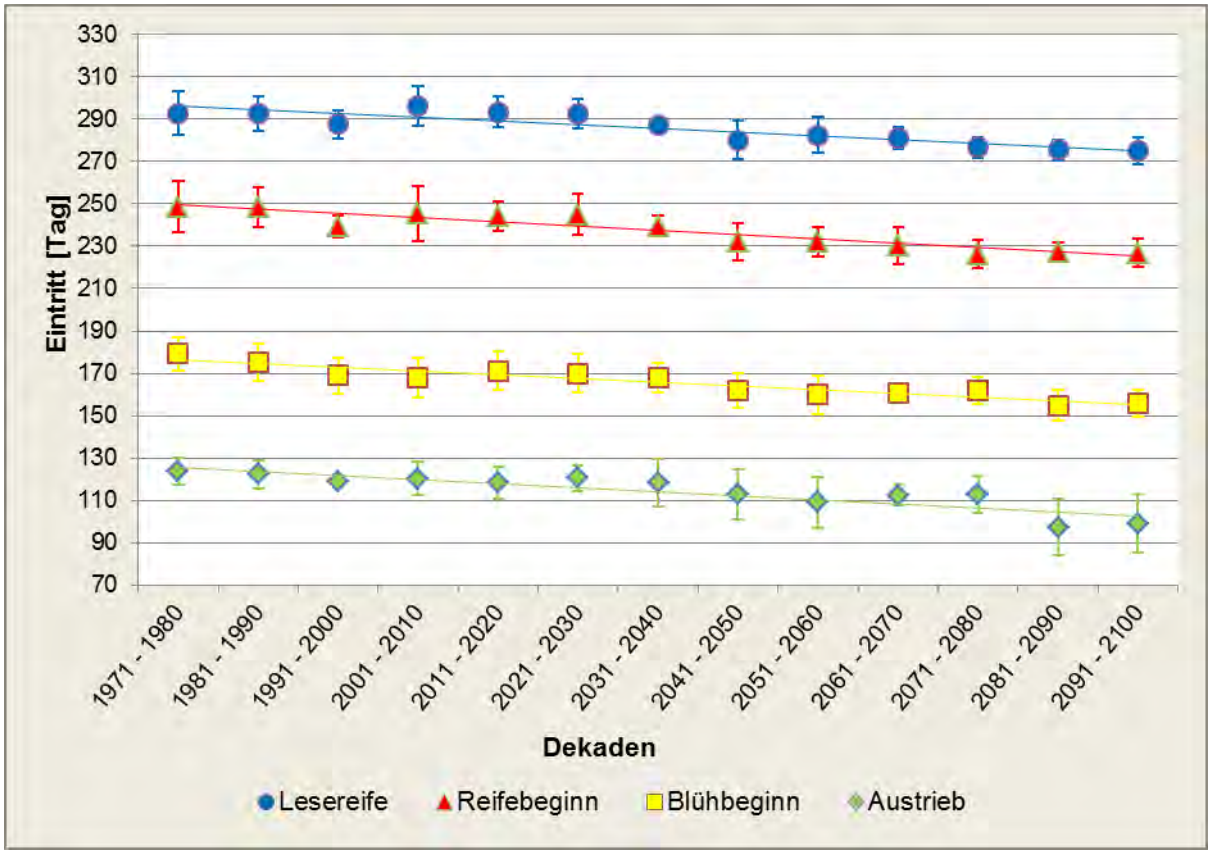


Abb. 37: Eintrittszeitpunkte der wichtigsten phänologischen Phasen am Standort Trier (WETTREG2006 A1B-trocken)

Die folgende Tabelle zeigt abschließend die Entwicklung der wichtigsten phänologischen Phasen für 5 repräsentative Standorte in Rheinland-Pfalz. Dargestellt sind die gemittelten Eintrittszeitpunkte für 7 Dekaden. An allen Standorten zeigt sich in allen Simulationen eine ähnliche Entwicklung, welche bereits zuvor näher beschrieben wurde.

Tab. 10: Überblick über die Eintrittszeitpunkte der wichtigsten phänologischen Phasen nach Dekaden und ausgewählten Klimasimulationen für weinbaurelevante Standorte

Station:	Modell:	Szenario	1971 - 1980				1991 - 2000				2011 - 2020				2031 - 2040				2051 - 2060				2071 - 2080				2091 - 2100			
			Austrieb	Blüh-beginn	Reife-beginn	Lese-reife	Austrieb	Blüh-beginn	Reife-beginn	Lese-reife	Austrieb	Blüh-beginn	Reife-beginn	Lese-reife	Austrieb	Blüh-beginn	Reife-beginn	Lese-reife	Austrieb	Blüh-beginn	Reife-beginn	Lese-reife	Austrieb	Blüh-beginn	Reife-beginn	Lese-reife	Austrieb	Blüh-beginn	Reife-beginn	Lese-reife
Alzey	WETTREG	a1b normal	125	178	252	297	119	170	240	288	121	175	244	293	119	175	246	290	119	164	234	282	116	166	234	279	106	164	232	279
		a1b trocken	125	178	252	297	119	170	240	288	120	173	243	292	120	169	241	287	115	162	233	280	113	163	226	277	111	161	230	276
		a2 normal	125	178	252	297	119	170	240	288	118	172	242	289	117	168	238	286	117	164	232	280	116	165	236	281	115	162	233	280
		a2 trocken	125	178	252	297	119	170	240	288	119	169	243	292	121	170	238	288	116	162	229	278	117	166	235	282	117	168	236	280
	STAR	a1b normal	125	178	252	297	119	170	240	288	112	162	235	283	105	155	225	279	102	148	222	275								
		a1b trocken	125	178	252	297	119	170	240	288	108	162	236	286	113	160	228	279	96	147	219	274								
Bernkastel	WETTREG	a1b normal	119	171	242	285	115	164	233	280	117	167	237	283	115	168	237	282	114	159	228	275	110	160	227	272	94	154	223	271
		a1b trocken	119	171	242	285	115	164	233	280	112	165	238	285	116	163	233	278	107	154	227	274	107	158	222	270	92	149	219	267
		a2 normal	119	171	242	285	115	164	233	280	112	166	235	282	113	163	231	276	114	159	227	274	110	158	229	274	107	157	226	273
		a2 trocken	119	171	242	285	115	164	233	280	115	163	235	283	117	164	231	279	110	157	224	272	111	160	228	275	111	162	229	273
	STAR	a1b normal	119	171	242	285	115	164	233	280	108	157	229	276	96	148	220	273	96	142	217	271								
		a1b trocken	119	171	242	285	115	164	233	280	102	156	231	280	109	157	224	274	94	143	214	269								
Koblenz	WETTREG	a1b normal	115	165	236	278	114	162	231	276	116	165	234	279	113	164	235	279	111	155	225	272	107	157	224	268	92	152	221	268
		a1b trocken	115	165	236	278	114	162	231	276	110	162	234	281	114	159	230	275	102	151	224	271	105	154	217	265	86	145	215	263
		a2 normal	115	165	236	278	114	162	231	276	106	161	230	276	111	160	228	273	110	155	224	272	108	155	225	269	104	154	223	269
		a2 trocken	115	165	236	278	114	162	231	276	112	161	231	278	113	160	229	275	107	153	221	268	108	157	225	270	107	159	226	270
	STAR	a1b normal	115	165	236	278	114	162	231	276	107	156	226	272	100	148	217	269	96	142	213	265								
		a1b trocken	115	165	236	278	114	162	231	276	102	155	226	274	108	154	221	269	93	142	211	264								
Neuenahr	WETTREG	a1b normal	120	174	247	291	116	168	240	287	118	169	243	289	115	171	242	288	115	161	233	283	110	162	229	277	93	157	227	277
		a1b trocken	120	174	247	291	116	168	240	287	112	167	244	293	116	166	238	284	106	157	231	281	107	158	224	275	92	151	222	272
		a2 normal	120	174	247	291	116	168	240	287	112	169	240	288	114	165	235	282	113	161	230	282	110	161	232	280	107	158	229	278
		a2 trocken	120	174	247	291	116	168	240	287	116	167	242	289	117	166	235	284	109	158	227	279	111	162	231	279	109	162	231	277
	STAR	a1b normal	120	174	247	291	116	168	240	287	110	162	235	282	102	155	226	279	96	146	221	276								
		a1b trocken	120	174	247	291	116	168	240	287	105	160	234	285	111	159	229	279	96	148	219	275								
Trier	WETTREG	a1b normal	124	179	249	293	119	169	239	288	120	174	244	292	119	175	244	291	118	162	233	284	115	166	233	280	103	162	231	281
		a1b trocken	124	179	249	293	119	169	239	288	118	171	244	294	118	168	240	287	109	160	232	283	113	162	226	277	99	156	227	275
		a2 normal	124	179	249	293	119	169	239	288	117	173	242	290	117	168	238	285	117	164	231	283	115	164	235	283	113	161	232	282
		a2 trocken	124	179	249	293	119	169	239	288	117	168	241	291	120	169	238	287	115	162	229	280	114	165	234	283	116	167	234	282
	STAR	a1b normal	124	179	249	293	119	169	239	288	113	164	238	286	105	156	229	283	105	150	224	281								
		a1b trocken	124	179	249	293	119	169	239	288	109	164	239	290	114	162	231	282	97	149	220	279								

8.4.4 Klimatische Kenngrößen unter Betrachtung veränderter Eintrittszeitpunkte phänologischer Phasen

Die folgenden Analysen basieren auf dem Phänologiemodell nach HOPPMANN & BERKELMANN-LÖHNERTZ (2000) und greifen auf die Berechnung der phänologischen Phasen zurück.

Spätfrostgefährdung

In der Literatur werden aufgrund ihres zeitlichen Auftretens drei Frostarten (Frühfröste, Winterfröste und Spätfröste) unterschieden. Frühfröste treten in den Herbstmonaten, also zu Ende der Rebentwicklung, auf und spielen aufgrund ihres seltenen Auftretens in rheinland-pfälzischen Anbaugebieten nur eine untergeordnete Rolle. Einen höheren Stellenwert besitzen die sogenannte Winterfröste (Schadfröste). Im Winter befindet sich die Rebe in einer Art abgehärtetem Zustand. Durch die tiefen Temperaturen in den Wintermonaten sind die Lebensfunktionen des Rebstockes in einer Ruhephase und dadurch deutlich widerstandsfähiger gegen Frost geworden (BAUER 1994). Erst ab Temperaturen von unter -15 Grad Celsius kann es zu Schädigungen am Rebstock kommen (TROUGHT 1999). Schadfrostereignisse in Rheinland-Pfalz sind eher die Ausnahme und treten meist lokal begrenzt in ungünstigen Lagen (Frostmulden) auf. Für den Weinanbau weitaus relevanter sind die sogenannten Spätfröste, welche im Folgenden näher dargestellt und analysiert werden sollen.

Spätfröste treten in den Frühjahrsmonaten April und Mai auf. Es werden thermische und radiative Spätfröste unterschieden. Unter thermischen Spätfrösten versteht man ein Absinken der Lufttemperatur in 2 m Höhe auf unter 0 °C. Radiative Spätfröste können bereits bei Lufttemperaturen < 2 °C, einem Bewölkungsgrad von <= 4/8 und einer Windgeschwindigkeit von <= 1,5 m s^{-1} auftreten.

Im Frühjahr wird durch die einsetzende Erwärmung die Ruhephase beendet. Die Knospen und Triebe beginnen zu wachsen und Xylem bildet sich aus. In den entstandenen Leitgefäßen werden die Zellen der wachsenden Pflanzenteile mit dem Rest der Pflanze verbunden, wodurch sie ihre Abgeschlossenheit verlieren. Durch diesen Prozess geht die Fähigkeit verloren, die es der Zellflüssigkeit erlaubt, bei unterkühltem Zustand nicht zu gefrieren. In der Zellflüssigkeit sind nun Ionen gelöst, deren Gefrierpunkt nur etwas unter dem von Wasser liegt. Vor allem junge Triebe, Blüten, Knospen und Blätter sind stark frostgefährdet, weil bei ihnen die Oberfläche im Vergleich zum Volumen sehr groß ist. Umso größer die Angriffsfläche und je höher der Flüssigkeitsgehalt, desto anfälliger reagieren die Pflanzenteile auf Frost (TROUGHT 1999).

Spätfrostereignisse können auf lokaler Ebene aufgrund ihrer Reliefabhängigkeit deutlich differenziert ausfallen. Dies hängt mit ihrer Entstehung zusammen. Spätfrostgefährdete Lagen stellen vor allem Mulden, Senken und die tiefsten Hangbereiche dar, da sich hier die nächtlich gebildete Kaltluft verstärkt sammeln kann. In Weinbergen zeigt sich nach einem Spätfrostereignis deshalb meist ein sehr differenziertes Bild mit unterschiedlichem Schädigungsgrad der Reben auf engstem Raum. Meist entscheiden wenige Zehntel Grad bereits über das Ausmaß der Schädigung. Die nachfolgenden Analysen müssen deshalb mit Vorsicht betrachtet werden, weil sie die Situation nur im unmittelbaren Bereich der Klimastation erfassen. In der nahen Umgebung kann sich die kleinklimatische Situation bereits wieder stark unterscheiden.

Die folgenden Auswertungen zeigen die Entwicklung der thermischen und radiativen Spätfrostgefährdung nach dem Knospenaustrieb. An allen Stationen zeigt sich eine ähnliche Entwicklung. Auch in Zukunft besteht weiterhin ein potenzielles Risiko für Spätfröste. Aufgrund des zu erwartenden Temperaturanstiegs müsste sich die Spätfrostgefährdung in Zukunft eher reduzieren. Dieser Rückgang wird jedoch durch den immer früher stattfindenden Knospenaustrieb kompensiert. Die Simulationen zeigen an allen Standorten ein gleich bleibendes Gefährdungspotenzial bzw. einen leichten Anstieg in der fernen Zukunft. Die beiden folgenden Grafiken sollen diese Entwicklung am Beispiel von Alzey demonstrieren.

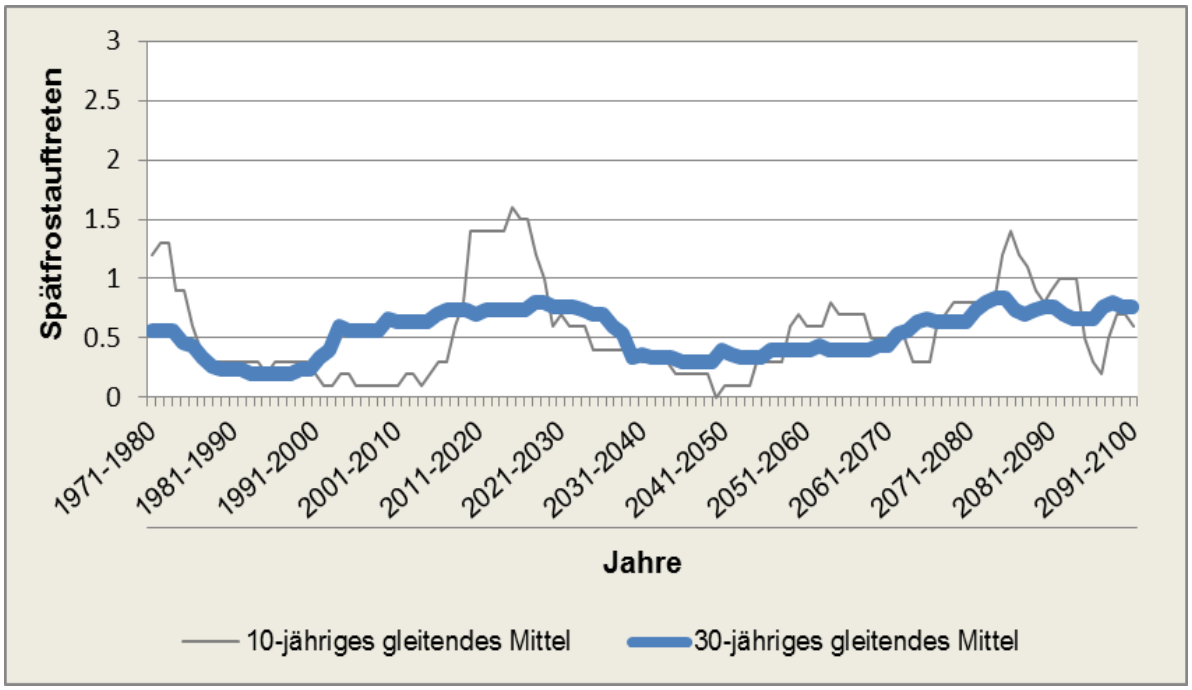


Abb. 38: Entwicklung der radiativen Spätfrostgefährdung am Standort Alzey (Projektion: WETT-REG2006 A1B-trocken)

Abbildung 38 zeigt ein Auf und Ab der über 10 bzw. 30 Jahre gemittelten Spätfrostgefährdung auf eher niedrigem Niveau. In einem Großteil der untersuchten Jahre finden keine Spätfrostereignisse statt. Auf der anderen Seite treten auch vereinzelte Jahre mit mehreren Frostereignissen auf, welche meist auf länger andauernde Kaltlufteinbrüche zurückzuführen sind.

Abbildung 39 zeigt die Entwicklung des thermischen Auftretens von Spätfrösten in Alzey. Aufgrund der oben bereits aufgeführten Kriterien der beiden Frostarten lässt sich erklären, warum thermische Fröste im Mittel seltener auftreten als Radiativfröste. Auch hier zeigt sich bei den gemittelten Auswertungen eine eher gleich bleibende Tendenz auf niedrigem Niveau.

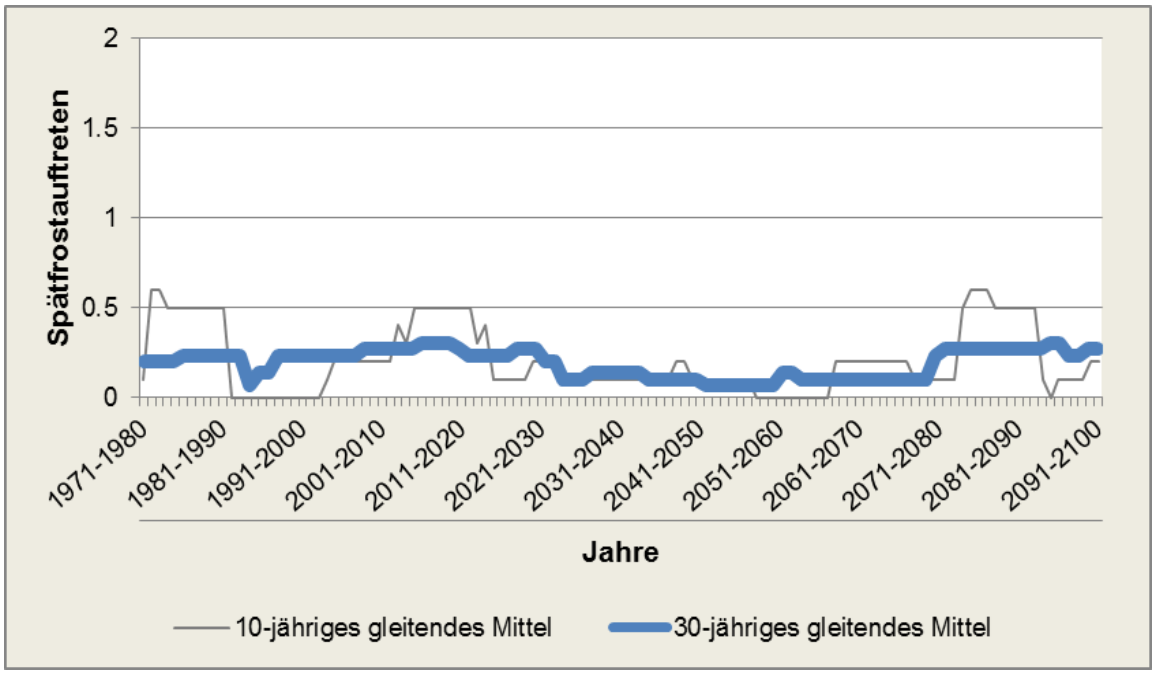


Abb. 39: Entwicklung der thermischen Spätfrostgefährdung am Standort Alzey (Projektion: WETT-REG2006 A1B-trocken)

Es lässt sich abschließend festhalten, dass trotz der deutlich zu erwartenden Klimaerwärmung das Potenzial für Spätfröste nicht absinkt. Vor allem früh austreibende Sorten besitzen eine höhere Frostgefährdung als spät austreibende Sorten. Deshalb bleibt hier abzuwarten, inwieweit sich der Rebsortenspiegel in Zukunft verändern wird. Auch in der fernen Zukunft besteht ein Risiko für Spätfröste, welches aufgrund des dann deutlich früher stattfindenden Knospenaustriebs insgesamt sogar leicht erhöht sein kann. Trotz der eher selten zu erwartenden Spätfrostereignisse muss hier noch einmal auf deren Relevanz hingewiesen werden. Denn bereits eine frostige Strahlungsnacht kann zu erheblichen Ernteausfällen und Ertragseinbußen führen.

Thermische Wachstumsbedingungen

Die thermischen Entwicklungsbedingungen während der Vegetationsperiode werden in den folgenden Untersuchungen in die beiden Phasen Blüte-Reifebeginn und Reifephase unterschieden. Innerhalb des Zeitraumes Austrieb bis Blüte ändern sich die thermischen Wachstumsbedingungen kaum, so dass auf diese Phase in den Analysen nicht näher eingegangen wird.

Die thermischen Wachstumsbedingungen werden sich in der Phase Blüte-Reifebeginn in den nächsten Jahrzehnten deutlich verändern. Die Anzahl der Tage mit schnellem Rebwachstum (T_{max} 20 °C bis < 25 °C) wird deutlich abnehmen, da sich die Tage mit optimalem (T_{max} 25 °C bis < 30 °C) und suboptimalem (T_{max} 30 °C bis < 35 °C) Rebwachstum deutlich erhöhen werden. Diese Entwicklung ist für das Wachstum eher als positiv zu bewerten. Negativ wirken sich verstärkt Maximumtemperaturen von über 35 °C aus, die in der fernen Zukunft verstärkt auftreten können. Durch sie könnte sich das Wachstum verzögern. Die fol-

gende Abbildung zeigt die thermische Entwicklung in der Phase Blüte-Reifebeginn am Beispiel der Station Roxheim (Rheinhessen) als Dekadenmittelwerte.

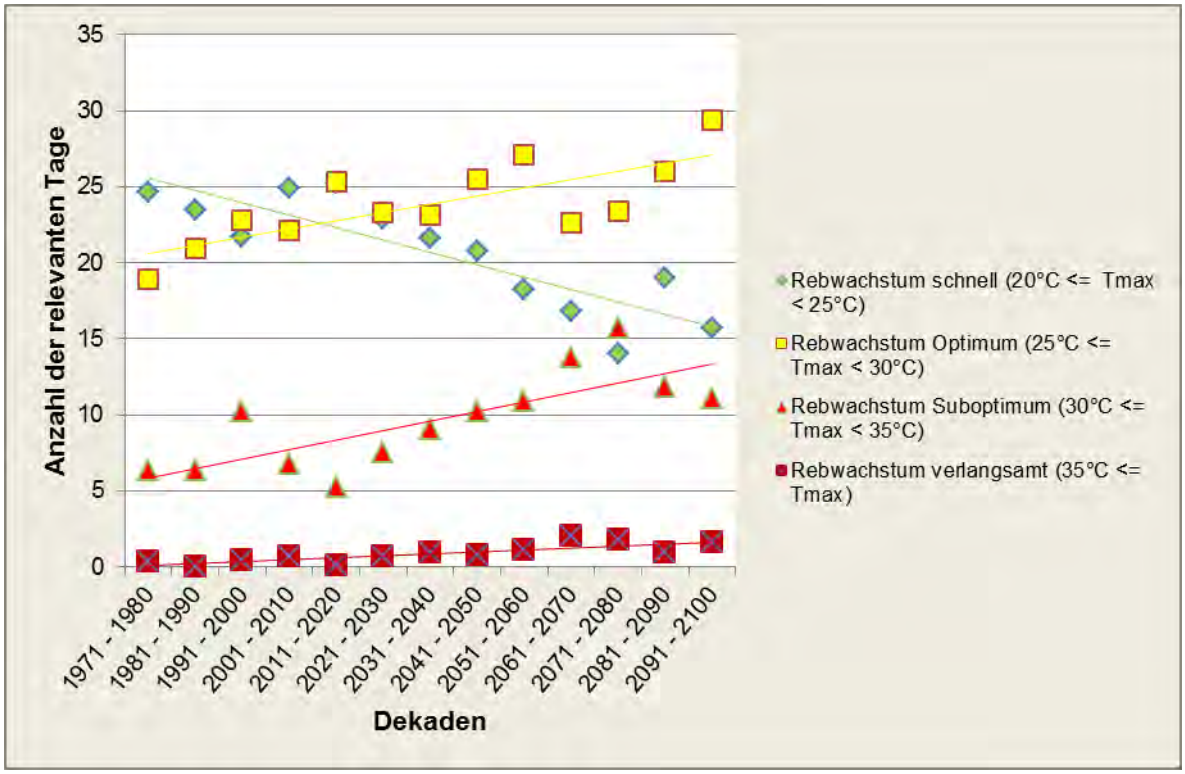


Abb. 40: Thermische Wachstumsbedingungen während der Phase Blüte-Reifebeginn am Standort Roxheim (Projektion: WETTREG 2006 A1B-trocken)

In der Reifephase werden sich die nächtlichen Temperaturbedingungen deutlich verbessern. Niedrige nächtliche Temperaturminima <= 7 °C werden in den nächsten Jahrzehnten deutlich zurückgehen. Es zeigt sich eine selbstkompensierende Verschiebung zwischen den einzelnen Typen des Wachstums hin zu einer Verbesserung der Wachstumsbedingungen, da günstige nächtliche Reifebedingungen (7 °C < T_{min} <= 20 °C) deutlich ansteigen werden. Eine Zunahme ungünstiger Reifebedingungen aufgrund verstärkt auftretender Tropennächte (T_{min} > 20 °C), wie beispielsweise im Hitzesommer 2003, ist nicht festzustellen. Die nächste Grafik zeigt die Entwicklung der nächtlichen thermischen Wachstumsbedingungen am Standort Roxheim (Rheinhessen), der exemplarisch für die anderen untersuchten Weinbauregionen gelten kann.

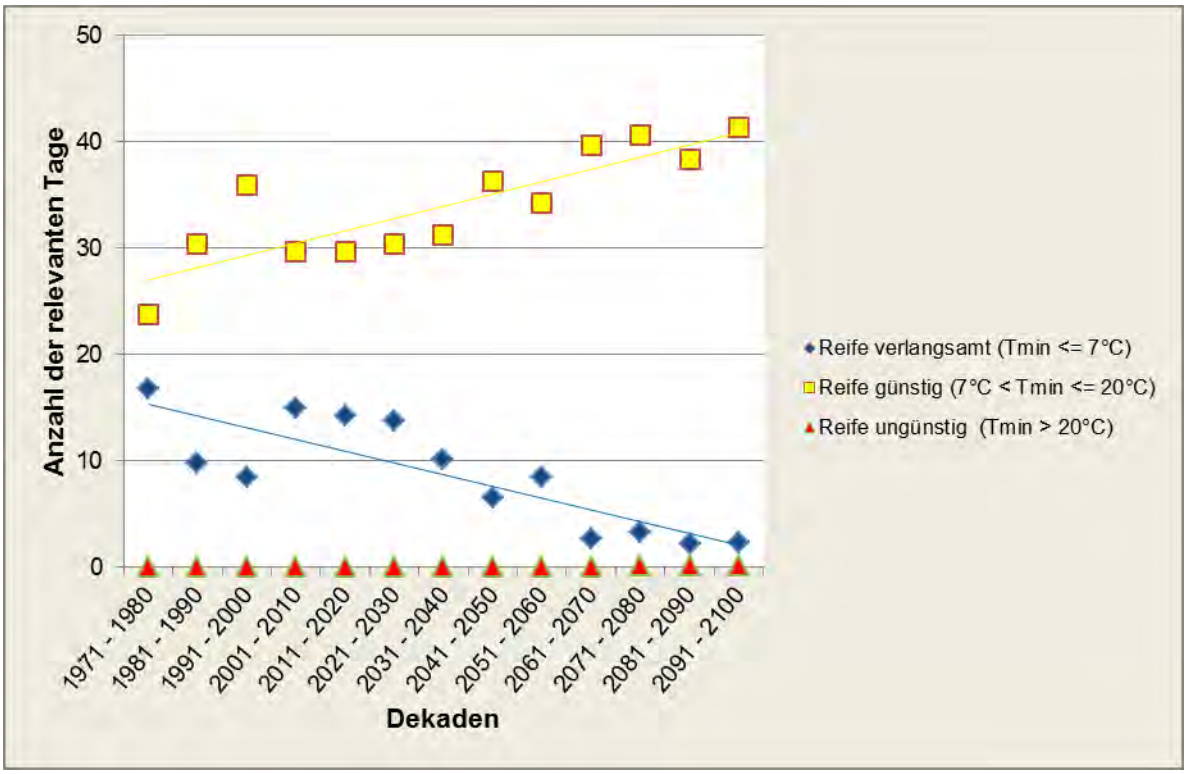


Abb. 41: Thermische nächtliche Wachstumsbedingungen während der Reifezeit am Standort Roxheim (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken)

Auch am Tage (Abb. 42) führt der erwartete Temperaturanstieg während der Reifezeit zu besseren Wachstumsbedingungen. Ungünstige Reifebedingungen treten ab Maximumtemperaturen von über 35 °C auf. Hier ist gegen Ende des Zeitraums ein leichtes Ansteigen bei den WETTREG2006-Simulationen zu beobachten. In der Projektion STAR A1B-trocken (Projektion mit der stärksten Erwärmung) deuten sich in der Zukunft ab der Dekade 2041-2050 verstärkt längere Hitzeperioden mit derart hohen Maximumtemperaturen an. Bei Eintreten dieser Projektion wäre verstärkt mit Reifeverzögerungen aufgrund ausgeprägter Hitzeperioden zu rechnen.

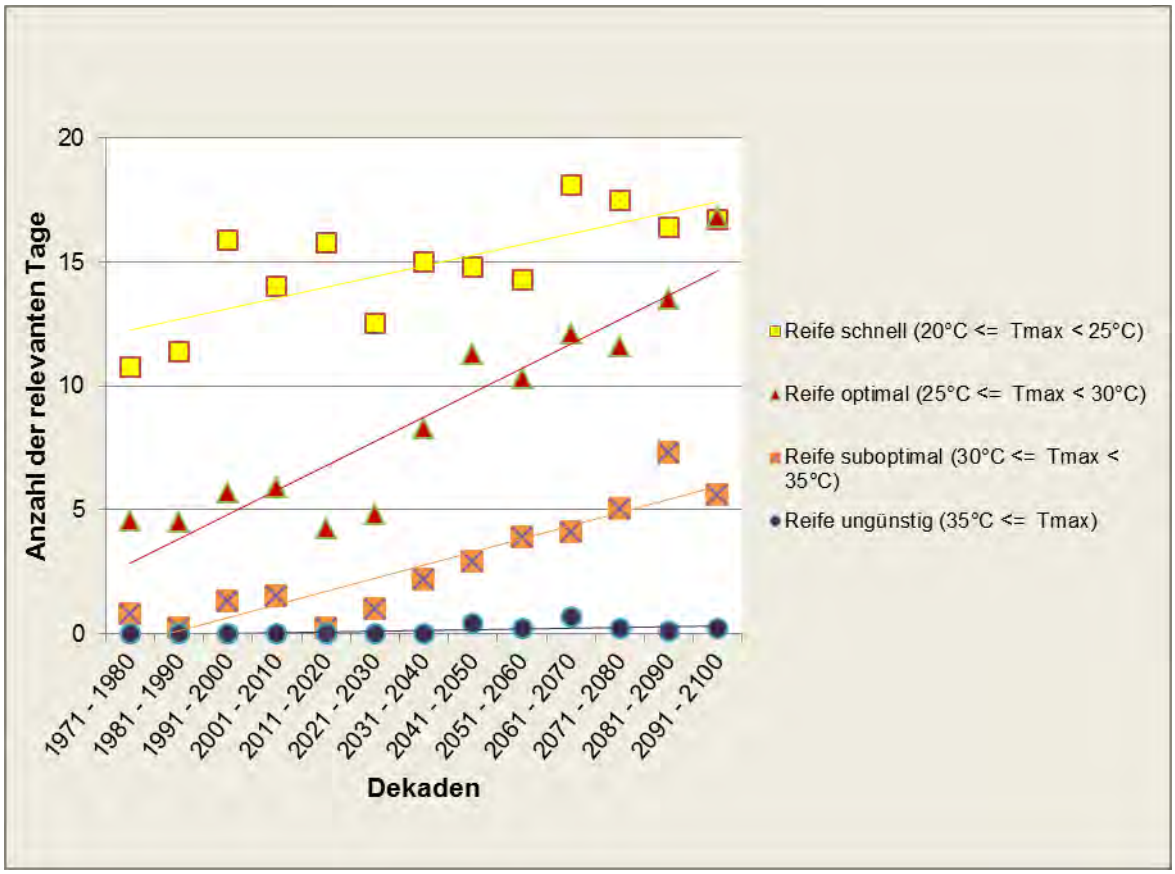


Abb. 42: Thermische Wachstumsbedingungen tagsüber während der Reifezeit am Standort Roxheim (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken)

Es lässt sich festhalten, dass sich die thermischen Wachstumsbedingungen in allen wichtigen Entwicklungsphasen an allen untersuchten Standorten und Simulationen in den nächsten Jahrzehnten bei Eintreten der zugrunde gelegten Klimaprojektionen deutlich verbessern dürften.

Eisweinernte

Die Eisweinlese stellt eine besondere Ernteform der Winzer dar. Eisweine zählen zu den Qualitätsweinen und werden in den Wintermonaten ab November bis in den Februar hinein bei Temperaturen von < = -7°C geerntet. Ab dieser Temperatur kristallisiert das in den Beeren enthaltene Wasser größtenteils aus, so dass nur noch der in den Trauben enthaltene Zucker nicht kristallisiertes Wasser und Fruchtsäuren bindet. Hierdurch können deutlich höhere Zuckerkonzentrationen der Trauben erreicht werden. Das Resultat sind sehr süßlich schmeckende säurehaltige Weine.

Die Auswertungen der Simulationen zeigen, dass die Anzahl der potentiellen Eisweintage in Zukunft deutlich zurückgehen wird (siehe auch folgende Abb., exemplarisch für Bernkastel an der Mosel). Bis Mitte dieses Jahrhunderts scheint eine Eisweinernte prinzipiell möglich, danach dürfte das Risiko für Winzer Eiswein zu produzieren zu hoch werden, da die benötigten Minimumtemperaturen dann nur noch sporadisch auftreten. Das wirtschaftliche Risiko

des Winzers Eisweine zu produzieren, könnte deshalb bei Eintreten der zugrunde gelegten Klimasimulationen zu groß werden.

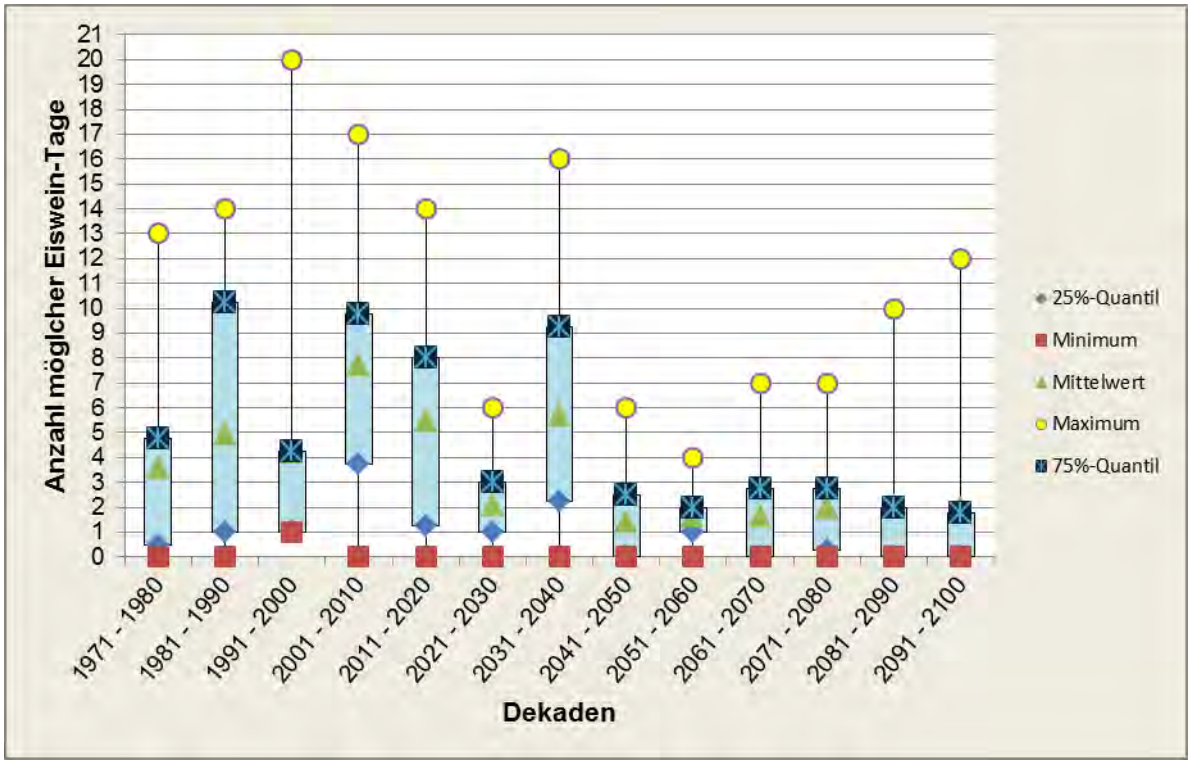


Abb. 43: Anzahl möglicher Eisweintage am Standort Bernkastel-Kues (Mosel) am Beispiel der Projektion WETTREG2006 A1B-trocken

8.4.5 Wasserversorgung der Rebe

Die Rebe benötigt während der gesamten Vegetationsperiode insbesondere zwischen Blüte und Reifebeginn ausreichende Niederschläge. Der Wasserbedarf variiert dabei je nach Rebsorte. Bei regional deutlich abnehmenden Sommerniederschlägen ist verstärkt mit Wasserstress im Weinbau zu rechnen (EITZINGER et al. 2009). Ein Großteil (knapp über 72 %) der Flächen verfügt unter Betrachtung des Standortindex Basistoleranz über eine mittlere Toleranz gegenüber reduzierten Sommerniederschlägen. Hohe Toleranzen gegenüber Trockenstress besitzen noch knapp über 13 % der Flächen. Knapp 14 % der Flächen verzeichnen geringe Toleranzen gegenüber reduzierten Niederschlägen in den Sommermonaten. Besonders gefährdet ist knapp 1 % der Flächen mit sehr geringer Toleranz gegenüber Trockenstress, siehe folgende Abbildung.

Tab. 11: Toleranz von Weinbaustandorten in Rheinland-Pfalz gegenüber Trockenstress auf Basis des Standortindex Basistoleranz (BTW)

Toleranzstufen (BTW)	Bezeichnung	Flächenanteil [in %]
0 -10	sehr gering	0
10 - 20		1
20 - 30	gering	4
30 - 40		10
40 - 50	mittel	27
50 - 60		45
60 - 70	hoch	13
70 - 80		0
80 - 90	sehr hoch	0
90 - 100		0

Aufgrund seines klimatischen Anspruchs befinden sich die Weinbaustandorte ausschließlich in den heute noch als thermische Gunsträume bezeichneten größeren Flusstälern. Diese weisen im Vergleich zu den umliegenden Mittelgebirgsregionen im Mittel deutlich niedrigere Niederschlagsmengen auf. Die höheren Temperaturen führen zudem zu einer potentiell höheren Verdunstung (siehe Kapitel 4). Dies hat zur Folge, dass die Weinbaustandorte im Vergleich zu den meisten anderen Kulturen in Rheinland-Pfalz über deutlich schlechtere klimatische Wasserbilanzen verfügen. Im Referenzzeitraum liegen bereits über 83 % der Flächen in Lagen mit negativen Wasserbilanzen < -50 mm/KWBv. Für die Zukunft deutet sich bei Eintreten der Klimaszenarien eine Entwicklung hin zu extrem trockenen Verhältnissen an. In der fernen Zukunft werden dann knapp 98 % der Flächen eine negative Wasserbilanz < - 50 mm/KWBv aufweisen (siehe folgende Abb.).

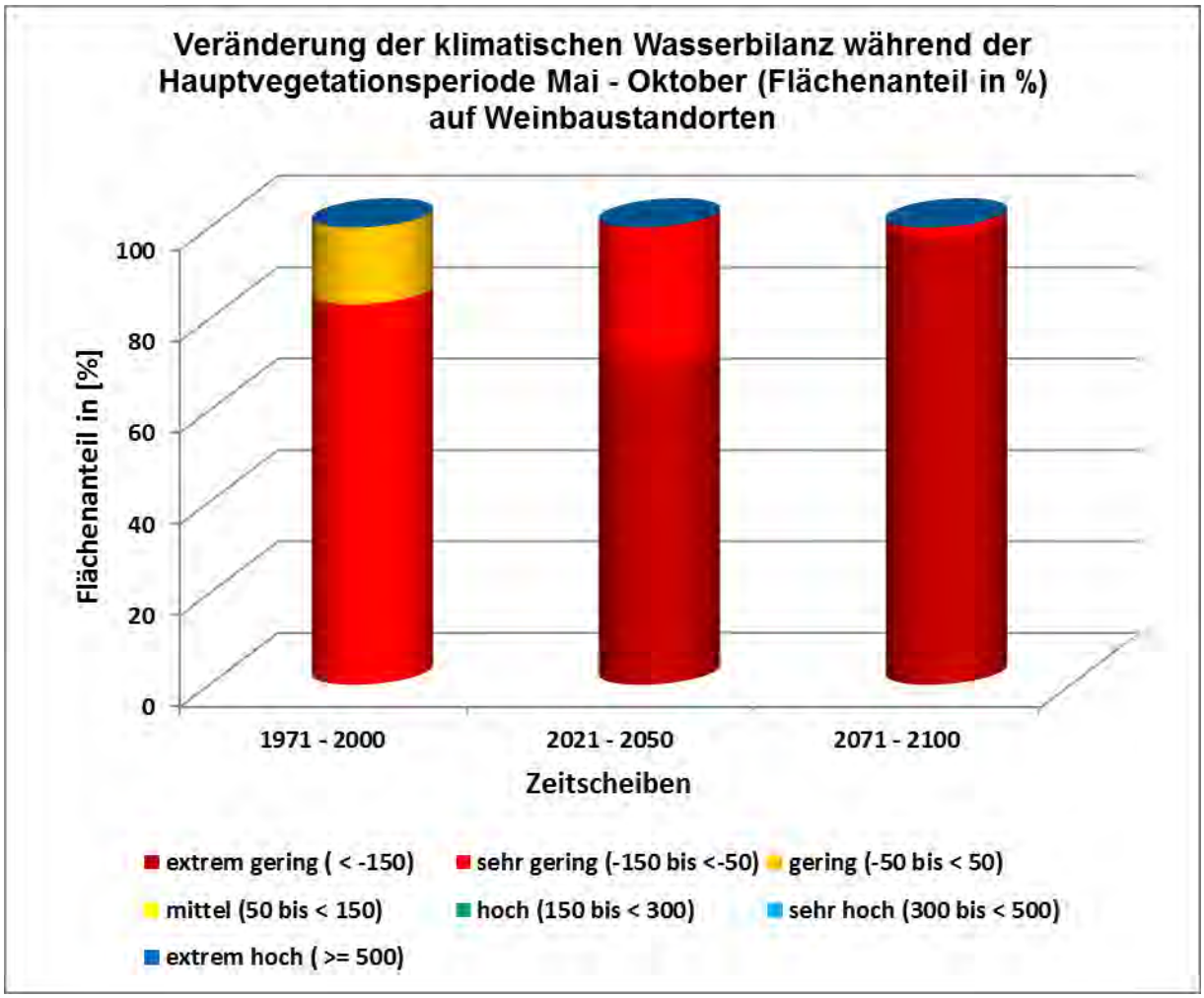


Abb. 44: Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz der rheinland-pfälzischen Weinbaustandorte während der Hauptvegetationsperiode (Mai-Oktober) für drei Zeitscheiben (Projektion: WETT-REG 2006 A1B-trocken)

8.4.6 Entwicklung von Starkniederschlägen

Als Starkniederschläge werden Niederschläge > 20 mm innerhalb von 24 Stunden bezeichnet (ARBEITSKREIS KLIWA 2006). Außer in stabilen, großräumigen Zirkulationsmustern treten sie in den Sommermonaten vor allem kleinräumig durch konvektive Niederschlagszellen auf und können mit Hagelschlag einhergehen. Starkniederschläge können sich negativ auf den Weinbau auswirken. Zum einen kann es durch Hagelschlag zu direkten Schädigungen an der Rebe kommen. Ein zweites Problem stellt eine verstärkte Bodenerosionsgefährdung in den Hanglagen und bei unbedeckten Böden zwischen den Reben dar.

Die folgende Analyse beschränkt sich auf die Simulation WETTREG2006 A1B-trocken und zeigt den Verlauf der Starkniederschläge von Juni bis September am Beispiel der beiden Weinbaustandorte Mainz und Worms. Tendenziell zeigt sich an beiden Stationen ein rückläufiger Trend der Starkniederschlagsereignisse. Dieser Trend ist konträr zu den Entwicklungen in großen Teilen von Rheinland-Pfalz. Hier wird generell eher eine Zunahme der Starkniederschläge für die Zukunft projiziert. Die Anzahl der Starkniederschlagsereignisse ist insge-

samt für Worms höher, was auf die unterschiedliche klimatische Raumausstattung der beiden Standorte zurückzuführen ist. In der nahen Zukunft (2011-2040) zeigt sich vor allem für Worms trotz des rückläufigen Trends eine leichte Zunahme von Starkniederschlägen. In der fernen Zukunft sinkt die Anzahl dann jedoch wieder deutlich ab. In Mainz wird ein stetiger negativer Trend verzeichnet.

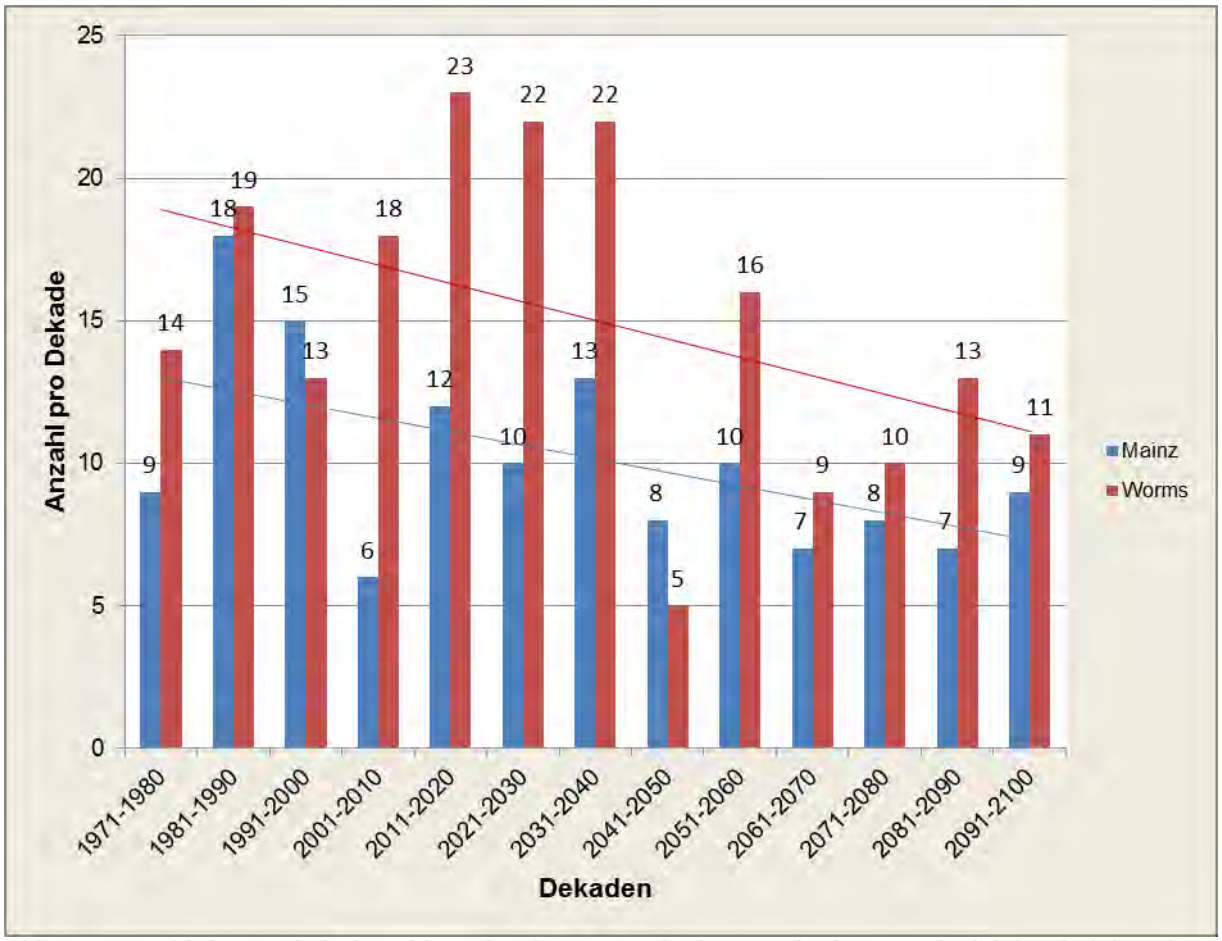


Abb. 45: Anzahl der Starkniederschläge (Juni – September) pro Dekade am Beispiel der rheinhessischen Weinbaustandorte Mainz und Worms (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken)

8.4.7 Zwischenfazit für den Weinbau

Zusammenfassend lässt sich für den Weinanbau festhalten, dass bei Eintreten der zugrunde gelegten Klimaszenarien deutliche Änderungen erwartet werden können. Die bisher traditionelle Weinkultur könnte sich in den rheinland-pfälzischen Anbauregionen deutlich verändern. Allgemein gefasst wird der anthropogene Klimawandel sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf den rheinland-pfälzischen Weinbau ausüben. Der erwartete Temperaturanstieg und eine mögliche Liberalisierung des Weinmarktes ab 2016 bzw. auf Länderebene ab 2018 könnten zu einer Ausweitung des Weinanbaus in Rheinland-Pfalz führen. Die Rebsorteneignung würde sich vermehrt hin zu Wärme liebenden Rebsorten (Cabernet sauvignon, Syrah, Merlot, Grenache) verändern und könnte zu einer Zunahme des Rotweinanbaus in den bereits etablierten Weinbauregionen führen. Durch die veränderten klimatischen Bedingungen könnten sich die Weinqualitäten verändern. Für einige Rebsorten (z. B. Riesling)

würde das Klimaoptimum überschritten werden, so dass hier z. B. eine Ausweitung in höher gelegene Lagen stattfinden könnte.

Eine Verfrühung aller wichtigen phänologischen Phasen wird simuliert. Der Knospenaustrieb würde sich bei Eintreten der zugrunde gelegten Klimaprojektionen bis 2100 z. B. um 25-30 Tage nach vorne verlagern. Hierdurch könnte es insbesondere in der fernen Zukunft zu einer erhöhten Spätfrostgefährdung kommen. Allgemein gesehen wird sich die Spätfrostgefährdung trotz des höheren Temperaturniveaus aufgrund des kompensierenden früheren Austriebs nicht reduzieren. Die Reifezeit wird ebenfalls früher stattfinden, so dass hier bei entsprechender Feuchte oder Blattnässe die Gefahr eines verstärkten Fäulnisbefalls durch Pilze und Bakterien bestehen könnte (EITZINGER et al. 2009).

Innerhalb der einzelnen phänologischen Phasen verbessern sich die thermischen Wachstumsbedingungen aufgrund des allgemein höheren Temperaturniveaus. Reifeverzögerungen durch zu hohe Maximumtemperaturen (> 35 °C) oder durch zu hohe nächtliche Temperaturen (> 20° C) sind eher selten zu erwarten.

Spezialprodukte, wie z. B. Eiswein, werden wegen zu hoher Temperaturen in den Wintermonaten in der fernen Zukunft kaum noch herzustellen sein, da die Anzahl der Tage mit für die Eisweinernte notwendigen Tagesminimumtemperaturen <= -7°C in allen Klimaszenarien deutlich zurückgehen wird.

Eine Gefährdung (Hagelschlag, Bodenerosion) durch häufiger auftretende Starkniederschläge ist trotz der höheren Temperaturen und des damit gekoppelten höheren Wasserdampfgehaltes der Luft bei Eintreten der zugrunde liegenden Klimasimulationen eher nicht zu erwarten.

Neben den untersuchten Auswirkungen könnte es beispielsweise zu abiotischen Schäden aufgrund extremer Hitze kommen. Es besteht die Möglichkeit einer Zunahme von Sonnenbrandschäden an den Trauben (EITZINGER et al. 2009). Das Auftreten von Sonnenbrand ist dabei auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. Hierzu zählt insbesondere ein abrupter Witterungswechsel von kühlen bedeckten Tagen hin zu heißen und strahlungsintensiven Tagen (PETGEN 2008).

Aufgrund des erhöhten Verdunstungspotenzials bedingt durch höhere Temperaturen und des projizierten Niederschlagsrückgangs in den Sommermonaten kann es im Weinbau verstärkt zu Trockenstresssituationen kommen. Besonders gefährdet dürften hierbei die Weinbaustandorte Rheinhessens und der Pfalz sein, welche bereits heute in ausgesprochen trockenen Regionen (Oberrheingraben) liegen.

Das Auftreten neuer Krankheiten und Schädlinge ist ebenfalls denkbar (EITZINGER et al. 2009).

8.5 Grünlandbewirtschaftung – Großer Verlierer des Klimawandels?

Dauergrünlandbewirtschaftung findet man laut STATISTISCHEM LANDESAMT RHEINLAND-PFALZ (2010) auf insgesamt 233.327 Hektar. Grünland wird in Rheinland-Pfalz fast flächendeckend betrieben, mit deutlichem Schwerpunkt auf den klimatisch ungünstigeren Standorten der Mittelgebirgsregionen des Hunsrücks, der Eifel und des Westerwaldes.

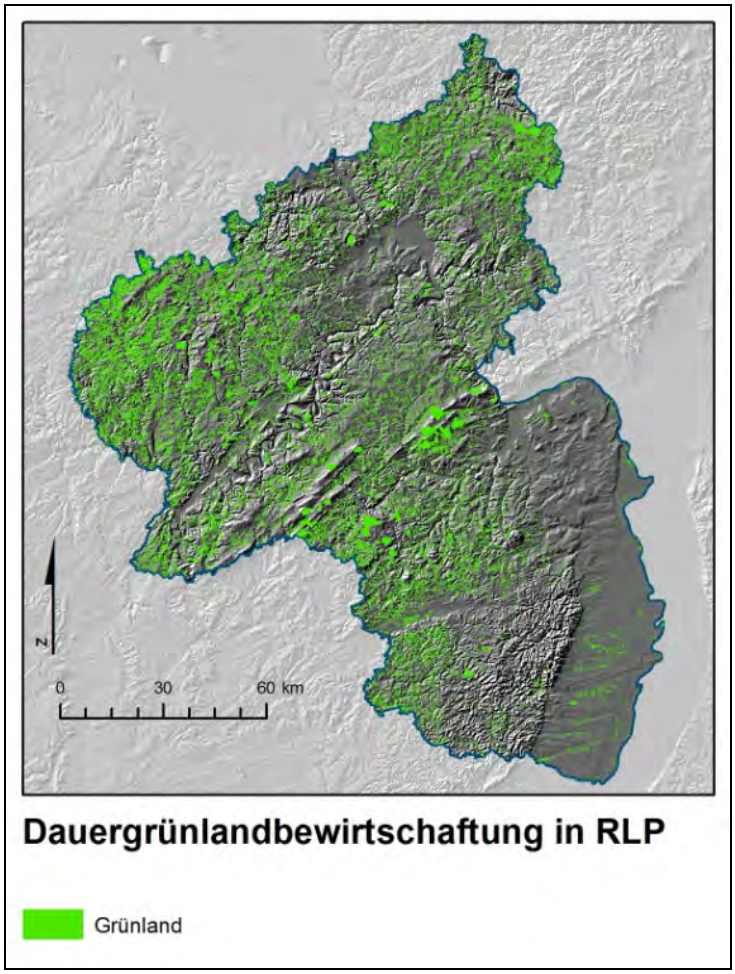


Abb. 46: Verbreitung der Grünlandbewirtschaftung in Rheinland-Pfalz (eigene Darst., Datengrundlage: LVERMGEO Rheinland-Pfalz)

Aufgrund der lokalen Standortbedingungen und aus wirtschaftlichen Gründen wird zwischen absolutem und fakultativem Grünland unterschieden. Absolutes Grünland, das auch als Zwangsgrünland bezeichnet wird, umfasst vor allem ungünstige Lagen mit schlechtem Bodenwasserhaushalt, wie Staunässe, Trockenheit oder Überflutungsgefahr, sowie erschwerter Bodenbearbeitung durch Hangneigung, Erosion oder Steinbesatz und schlechten klimatischen Verhältnissen, wie verkürzte Vegetationszeiten und hohe Niederschläge aufgrund der Höhenlage. Fakultatives Grünland, das auch als Wahlgrünland bezeichnet wird, ist zwar prinzipiell ackerfähig, wird aber aus ökonomischen Gründen als Grünland genutzt. Ökonomische Gründe sind beispielsweise die Betriebsgröße und –struktur, die Flurzersplitterung oder

günstige Erzeugungs- und Absatzbedingungen von Nutztieren oder tierischen Produkten (DIEPENBROCK 2009).

Grünland umfasst im Gegensatz zum Ackerland eine Vergesellschaftung verschiedener Arten und besteht daher meist aus Gräsern, Leguminosen und Kräuterarten. Als Nutzungsformen werden Wiesen und Weiden unterschieden. Wiesen dienen dabei vor allem der Heu- und Silagebereitung durch Mahd und zur Frischverfütterung im Stall bei intensiver Bewirtschaftung. Weiden werden von Weidetieren benutzt. Auf Mähweiden wechselt sich die Nutzung zwischen Beweidung und Mahd ab. Sonstige Nutzungsformen sind z. B. Streuwiesen, Hutungen, Almen und Ödlandrasen (DIEPENBROCK 2009). Diese Nutzungsformen sind in Rheinland-Pfalz flächenmäßig zu vernachlässigen.

Für die Grünlandbestände sind vor allem Temperatur, Wasserverfügbarkeit, Licht und das Nährstoffangebot für die Entwicklung wichtig. „In Bezug auf die Wasser- und Wärmeversorgung gilt die Faustregel, dass Höchsterträge bei warmem Frühjahr und feuchtem Sommer erwirtschaftet werden, niedrige Erträge im gegenteiligen Fall“ (SCHALLER & WEIGEL 2007). Aufgrund der ganzjährigen Bodenbedeckung hat Grünland einen deutlich größeren Wasserbedarf als Ackerkulturen. Die Biomassebildung wird dabei durch die Höhe des Wasserangebotes und die zeitliche Verteilung der Wasserzufuhr bestimmt. Trockenstress wirkt sich negativ auf die Biomasseproduktion aus (DIEPENBROCK 2009). Als wichtige Mindest-Kennzahlen können 400-500 mm Jahresniederschlag oder 2,2 bis 3,1 mm mittlerer Tagesverbrauch während der Vegetationsperiode angesehen werden. Die Tagesverbrauch-Extreme liegen zwischen 1,1 bis 15,5 mm (VOIGTLÄNDER & JACOB 1987). Als wichtige Wachstumstemperatur kann der Wertebereich zwischen 8-10 °C angesetzt werden, bei der ein Großteil der Gräser deutlich an Biomasse zunimmt. Die optimalen Wachstumstemperaturen liegen zwischen 17-25 °C. Als weitere Umweltfaktoren können der Boden, die Höhenlage (bezüglich einer verkürzten Vegetationsperiode) und das Geländeklima (z. B. Hangneigung, Exposition) gelten (DIEPENBROCK 2009).

Durch den Klimawandel wird es wahrscheinlich auch im Grünland zu größeren Veränderungen kommen. Die bereits aufgeführten klimatischen Einflussgrößen werden im Zuge dessen einem Wandel unterliegen. Ein großes Problem wird sich durch die aus den Klimasimulationen hervorgehenden reduzierten Sommerniederschläge ergeben, da Grünland (siehe oben) auf eine stetige Wasserzufuhr während der Vegetationsperiode angewiesen ist. Eine zweite größere Herausforderung ergibt sich durch die Veränderung der thermischen Verhältnisse. Der projizierte Temperaturanstieg wird sich u. a. auf den Verlauf der Vegetationsperiode auswirken. Beide beschriebenen Faktoren werden sich in den zukünftigen Erträgen widerspiegeln. Im Folgenden sollen diese Veränderungen genauer analysiert werden.

8.5.1 Veränderung des Verlaufs und der Länge der Vegetationsperiode an repräsentativen Standorten

Der Verlauf und die Länge der Vegetationsperiode sind stark von der jeweiligen Höhenlage der Grünlandstandorte abhängig. Allgemein verkürzt sich die Vegetationsperiode mit zuneh-

mender Höhe über NN. Die Länge der Vegetationsperiode ist vor allem für die Schnittanzahl wichtig und damit ein entscheidender ertragsbestimmender Faktor.

Die folgenden Analysen unterscheiden sich in zeitreihenbasierte und in flächenhafte Auswertungen interpolierter Klimadaten. Die Zeitreihenanalysen konzentrieren sich auf die folgenden grünlandrelevanten Klimastationen: Deuselbach, Herstein, Hilgenroth, Nürburg, Pirmasens und Simmern. Untersucht wurden die Projektionen WETTREG2006 A1B-normal, WETTREG2006 A1B-trocken, WETTREG2006 A2-normal, WETTREG2006 A2-trocken, sowie STAR A1B-normal und STAR A1B-trocken. Als flächenhafte Klimadaten wurden WETTREG2006 A1B-normal und WETTREG2006 A1B-trocken berücksichtigt.

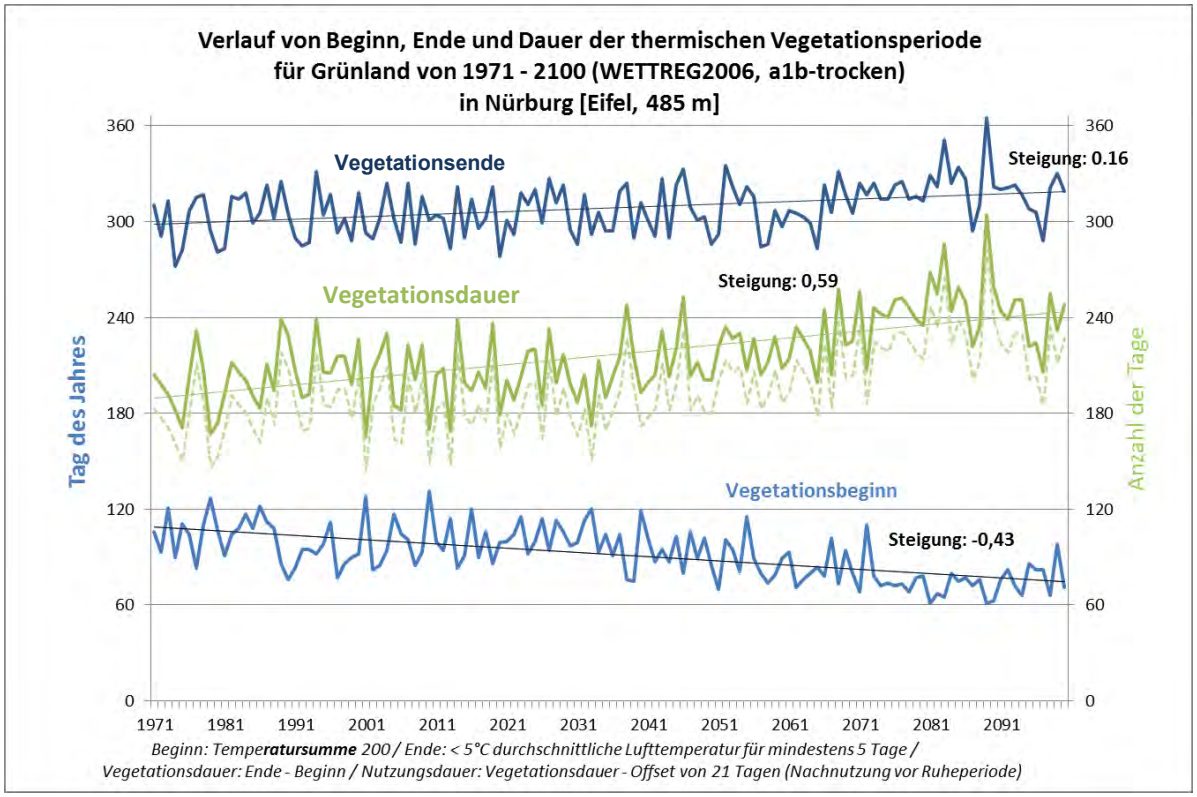


Abb. 47: Verlauf und Länge der Vegetationsperiode am Beispiel von Nürburg (Projektion WETTREG2006 A1B-trocken)

Die Abbildung 47 zeigt beispielhaft den Verlauf von Beginn, Ende und Dauer der thermischen Vegetationsperiode für die Projektion WETTREG2006 A1B-trocken. Es zeigt sich ein deutlicher Trend hin zu einem früheren Vegetationsbeginn. Im Mittel verfrüht sich der April hin zu Anfang/Mitte März. Das Vegetationsende verlagert sich um etwa 10-20 Tage nach hinten. Fällt das Ende zu Beginn des untersuchten Zeitraums in Nürburg meist noch in den Oktober, verschiebt sich das Vegetationsende in der fernen Zukunft in den November hinein. Hier muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass die Vegetationsperiode sehr stark von der jeweiligen Höhenlage abhängig ist, so dass die Zeitpunkte von Vegetationsbeginn und Vegetationsende in niedrigeren Grünlandregionen von den oben genannten abweichen können. Die Verfrühung des Vegetationsbeginns und der spätere Eintritt des Vegetationsendes führen zu einer deutlich längeren Vegetationsperiode. Diese verlängert sich im Mittel um

40-60 Tage. Alle drei Vegetationskenngrößen zeigen dabei deutliche annuelle Unterschiede, vor allem die Vegetationsperiode unterliegt größeren jährlichen Schwankungen (gleiches gilt für die Aufwuchsdauer). An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass es sich bei der obigen Darstellung um eine jährliche Darstellung handelt. Da sämtliche Analysen auf zukünftigen Emissionsannahmen beruhen, stellt die obige Jahresdarstellung eine von vielen möglichen Entwicklungen dar und darf unter keinen Umständen als reale Entwicklung interpretiert werden. Eine gemittelte Darstellung würde die starken annuellen Schwankungen verwischen, weshalb in diesem expliziten Fall auf eine jährliche Darstellung zurückgegriffen wurde. In einzelnen Jahren kommt es in der ferneren Zukunft vor, dass das Kriterium (<5 °C durchschnittliche Lufttemperatur an 5 aufeinanderfolgenden Tage) zur Bestimmung des Vegetationsendes nicht erreicht wird. In diesem Fall ist der letzte Tag des Jahres (365) als Vegetationsende definiert.

Die Abbildung 48 zeigt die vier Vegetationskenngrößen am Beispiel der Station Pirmasens, die etwa 200 m niedriger liegt als die zuvor betrachtete Station Nürburg und die Verhältnisse für die flacheren Grünlandregionen repräsentieren soll. Als Projektion wird STAR A1B-normal aufgeführt, deren zukünftige Entwicklung bis in das Jahr 2060 reicht. Die Verläufe ähneln sich und zeigen bereits gegen Ende des Zeitraums (2060) ähnliche Verhältnisse wie das regionale Klimamodell WETTREG2006 und die zuvor betrachtete Simulation A1B-trocken im Jahre 2100. Auch hier tretenn starke annuelle Schwankungen auf.

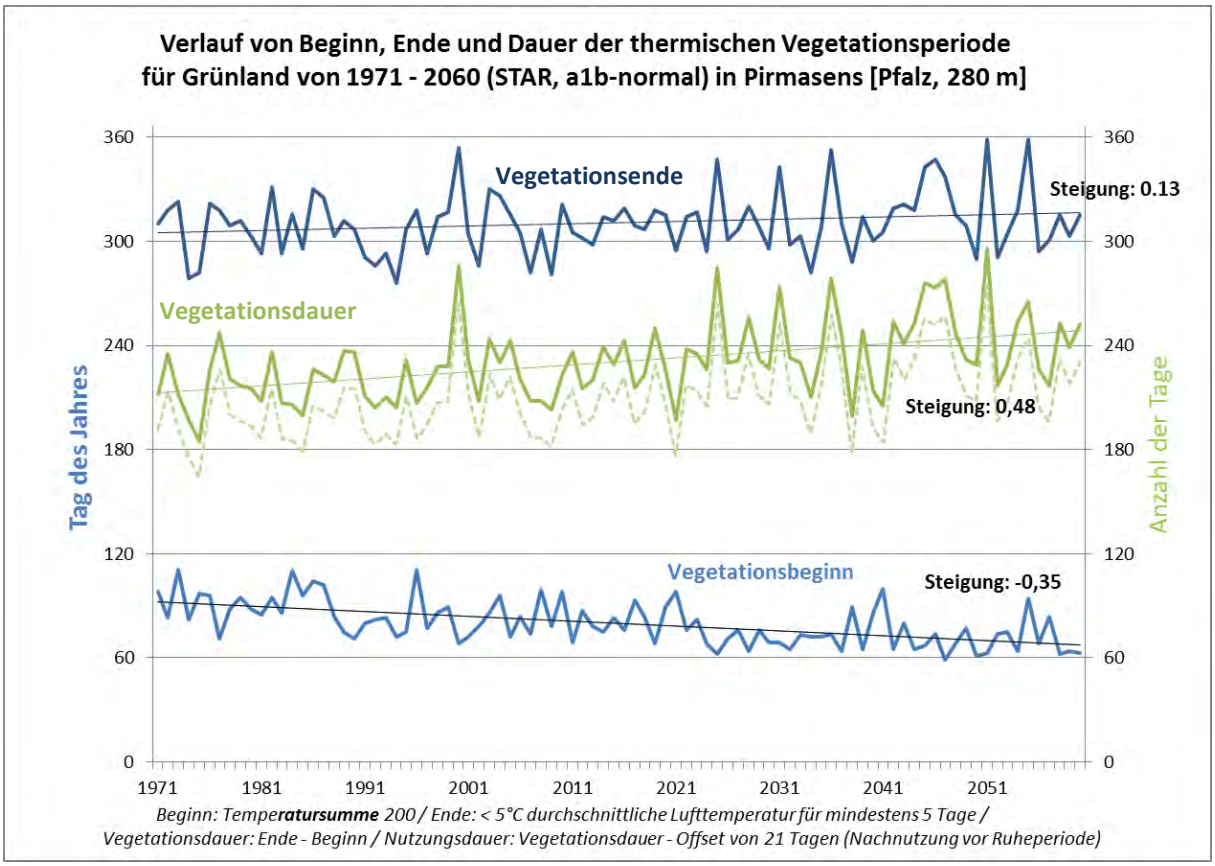


Abb. 48: Verlauf und Länge der Vegetationsperiode am Beispiel von Pirmasens (Projektion STAR A1B-normal)

Die folgende Übersichtstabelle zeigt abschließend den Vegetationsbeginn, das Vegetationsende (jeweils Tag des Jahres) und die Vegetationsdauer (Anzahl der Tage) als Dekadenmittel für alle 6 untersuchten Grünlandstandorte in Rheinland-Pfalz.

Tab. 12: Verlauf und Länge der Vegetationsperiode als Dekadenmittel an ausgewählten Grünlandstandorten für verschiedene Szenarien

Station:	Modell:	Szenario	1971 - 1980			1991 - 2000			2011 - 2020			2031 - 2040			2051 - 2060			2071 - 2080			2091 - 2100		
			VBeginn	VEnde	VDauer	VBeginn	VEnde	VDauer	VBeginn	VEnde	VDauer	VBeginn	VEnde	VDauer	VBeginn	VEnde	VDauer	VBeginn	VEnde	VDauer	VBeginn	VEnde	VDauer
Deuselbach	WETTREG	a1b normal	92	305	212	82	311	229	89	313	224	80	317	237	81	313	233	77	319	243	63	323	260
		a1b trocken	92	305	212	82	311	229	88	306	218	84	316	232	78	314	237	66	325	259	66	317	251
		a2 normal	92	305	212	82	311	229	86	316	231	82	312	230	81	312	231	71	318	247	70	315	245
		a2 trocken	92	305	212	82	311	229	88	311	223	87	314	226	78	324	245	73	317	244	74	323	249
	STAR	a1b normal	92	305	212	82	311	229	79	310	231	72	312	240	71	319	248						
		a1b trocken	92	305	212	82	311	229	79	308	229	84	314	230	71	321	250						
Herstein	WETTREG	a1b normal	91	307	216	91	310	219	88	311	223	82	310	228	79	306	226	76	319	243	63	312	248
		a1b trocken	91	307	216	91	310	219	86	303	217	87	315	228	79	314	236	67	325	258	65	323	257
		a2 normal	91	307	216	91	310	219	85	316	231	83	315	232	79	314	235	68	316	247	70	331	261
		a2 trocken	91	307	216	91	310	219	88	307	219	88	312	224	77	320	242	73	317	244	73	320	246
	STAR	a1b normal	91	307	216	91	310	219	77	313	237	70	317	247	68	319	251						
		a1b trocken	91	307	216	91	310	219	77	313	237	80	325	245	69	328	259						
Hilgenroth	WETTREG	a1b normal	87	311	224	78	319	240	85	316	231	78	315	238	78	310	231	74	324	250	60	326	266
		a1b trocken	87	311	224	78	319	240	85	309	224	83	324	241	77	320	243	65	330	266	63	328	265
		a2 normal	87	311	224	78	319	240	82	317	235	80	315	235	77	320	243	67	324	257	66	330	264
		a2 trocken	87	311	224	78	319	240	86	310	224	85	315	230	76	324	248	68	317	249	70	329	259
	STAR	a1b normal	87	311	224	78	319	240	76	313	237	71	314	243	69	320	251						
		a1b trocken	87	311	224	78	319	240	77	311	234	81	312	231	69	324	255						
Nürburg	WETTREG	a1b normal	105	298	193	92	302	210	97	303	206	92	304	211	94	297	203	87	309	223	75	307	232
		a1b trocken	105	298	193	92	302	210	98	301	203	99	303	204	87	307	220	77	318	241	78	315	237
		a2 normal	105	298	193	92	302	210	93	307	214	93	309	215	89	303	214	84	315	231	78	314	236
		a2 trocken	105	298	193	92	302	210	96	306	210	97	305	208	89	318	228	85	308	223	84	319	234
	STAR	a1b normal	105	298	193	92	302	210	91	305	214	82	307	225	78	315	237						
		a1b trocken	105	298	193	92	302	210	88	303	215	93	310	218	79	320	241						
Pirmasens	WETTREG	a1b normal	91	308	217	82	305	223	87	312	225	81	314	233	81	305	224	76	321	245	65	329	264
		a1b trocken	91	308	217	82	305	223	87	309	222	87	314	227	80	316	236	66	317	251	66	318	252
		a2 normal	91	308	217	82	305	223	86	315	229	82	312	229	80	316	235	71	319	248	72	324	252
		a2 trocken	91	308	217	82	305	223	89	310	221	88	314	226	78	320	242	76	316	240	77	320	243
	STAR	a1b normal	91	308	217	82	305	223	80	310	230	73	310	237	71	316	245						
		a1b trocken	91	308	217	82	305	223	79	311	232	84	312	228	71	324	253						
Simmern	WETTREG	a1b normal	87	308	221	80	306	226	86	317	231	78	315	237	78	309	231	74	316	242	58	324	265
		a1b trocken	87	308	221	80	306	226	85	307	222	84	317	233	76	320	244	63	327	264	61	320	259
		a2 normal	87	308	221	80	306	226	83	312	229	80	316	236	77	317	240	67	320	253	67	323	256
		a2 trocken	87	308	221	80	306	226	87	312	225	85	312	227	76	325	249	70	317	247	70	323	254
	STAR	a1b normal	87	308	221	80	306	226	77	314	237	71	314	244	69	319	250						
		a1b trocken	87	308	221	80	306	226	76	311	236	82	326	245	69	328	258						

8.5.2 Veränderung des Verlaufs und der Länge der Vegetationsperiode – flächenbasierte Auswertungen

Neben den zeitreihenbasierten Stationsauswertungen wurden flächenhafte Vegetationsanalysen vorgenommen. Die folgende Abbildung zeigt den Beginn der Vegetationsperiode als Dekadenmittel für drei Zeitschienen (Simulation: WETTREG2006 A1B-trocken).

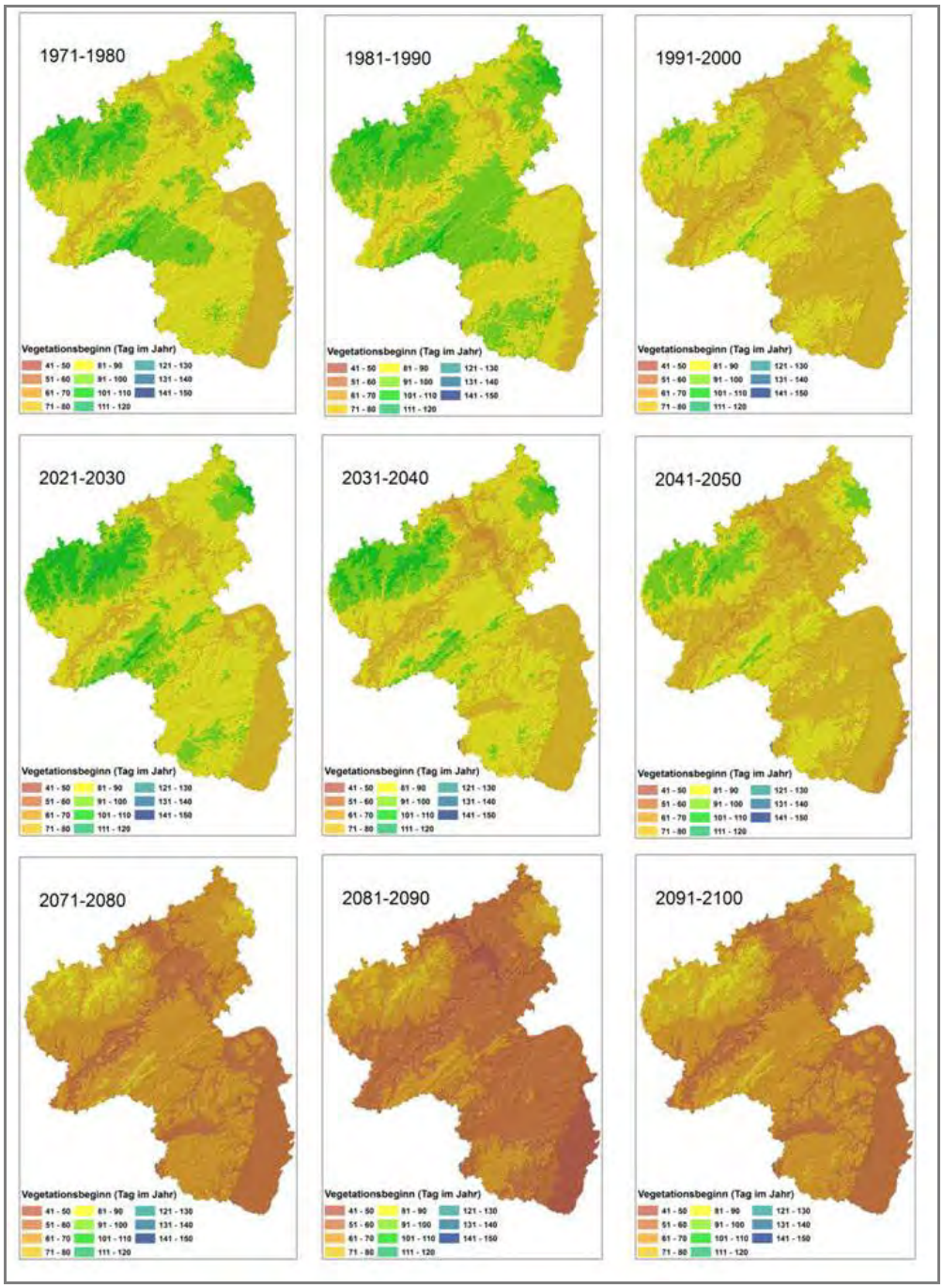


Abb. 49: Flächenhafter Vegetationsbeginn im Grünland (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken)

Die Abbildung zeigt bei Eintreten der zugrunde gelegten Projektion eine deutliche Verfrühung des Vegetationsbeginns in den ersten drei Dekaden. Für die Dekade 2021-2030 deuten sich

dann wieder ein späteres Einsetzen der Vegetationsperiode an und anschließend ein durchgehender Trend einer Verfrühung bis zur Dekade 2081-2090. Der Vegetationsbeginn wird in der Dekade 2091-2100 im Mittel wieder etwas später stattfinden. Der zeitliche Sprung zwischen der ersten und zweiten Zeitschiene ist auf die zugrunde liegenden Klimadaten zurückzuführen. Die Werte zwischen 1971-2000 stellen gemessene Werte dar. Ab 2021 werden simulierte Werte berücksichtigt. WETTREG2006 simuliert für die ersten Jahre bis etwa 2030 einen leichten Temperaturrückgang und danach erst einen fortwährenden Anstieg der Temperaturen. Dies ist der wahrscheinlichste Grund der Rückverspätung des Vegetationsbeginns zwischen den Dekaden 1991-2000 und 2021-2030. Deutlich auffallend ist die starke Höhenabhängigkeit des Vegetationsbeginns. Zwischen den niedrigen Flusstälern und den Mittelgebirgshöhen liegen meist 30–40 Tage zeitliche Verzögerung des Vegetationsbeginns.

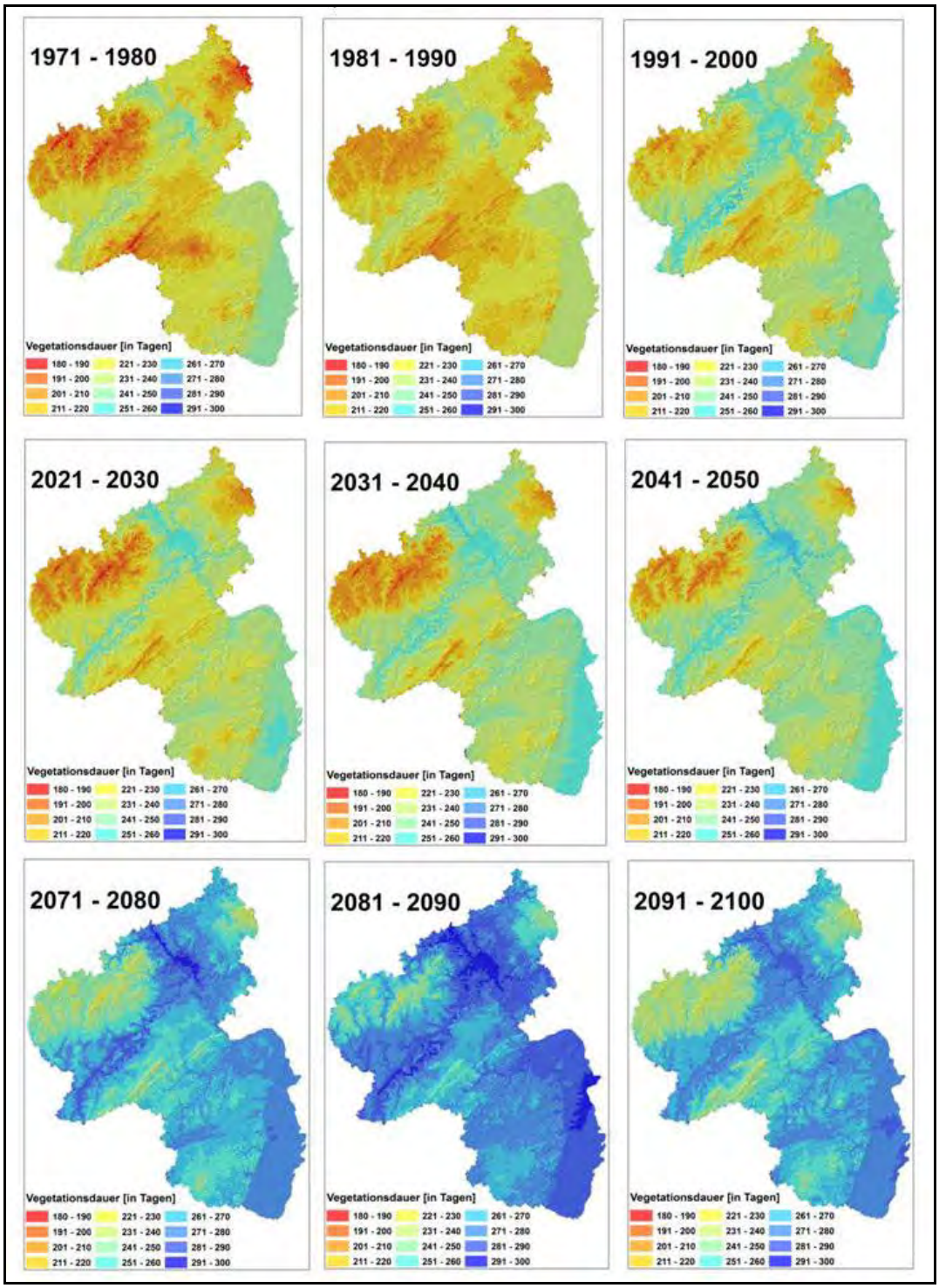


Abb. 50: Flächenhafte Vegetationsdauer im Grünland (Szenario WETTREG2006 A1B-trocken)

Die zeitliche Entwicklung der Vegetationsdauer im Grünland (siehe Abb. 50) spiegelt den zuvor bereits aufgezeigten Trend hin zu einer deutlich verlängerten Vegetationsperiode in der Zukunft wider. Auch hier zeigt sich der bereits erläuterte Sprung zwischen der ersten und zweiten Zeitschiene. Eine deutliche Verlängerung der Vegetationsperiode deutet sich vor allem zwischen der zweiten und der dritten Zeitschiene an. In der letzten Dekade 2091-2100

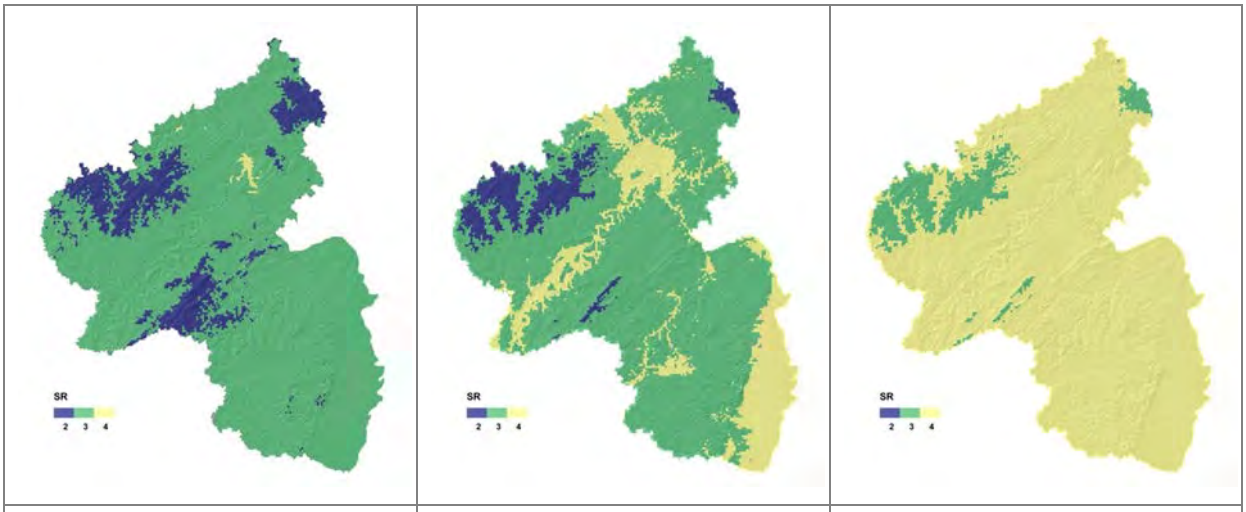
ist die Vegetationsdauer im Vergleich zur vorherigen Dekade 2081-2090 wieder leicht rückläufig.

Die Auswertungen zeigen, dass sich die Vegetationsperiode im Grünland in Zukunft deutlich verlängern wird. Hierdurch wird es möglich sein, eine größere Anzahl an Schnitten durchzuführen, welche bei entsprechender kontinuierlicher Wasserversorgung während der gesamten Vegetationsperiode zu einer positiven Ertragsentwicklung führen könnte. Die Veränderung der hygrischen Verhältnisse im Grünland wird im Folgenden aufgeführt.

8.5.3 Aufwuchsdauer und Schnitthäufigkeit

Die folgenden Ergebnisse basieren auf dem Grassland Statistical Model (GRAM) zur räumlichen Implementierung von Grünlandertragsprognosen nach TRNKA et al. (2006), welches im Methodenteil schon näher erläutert wurde.

Die folgende Abbildung stellt die Zeitraummittelwerte der aus der effektiven Aufwuchsdauer abgeleiteten jährlichen Schnittregime der Rasterzellen für die betrachteten Zeiträume Referenzzeitraum (REF), nahe Zukunft (1ZS) und ferne Zukunft (2ZS) flächendeckend für Rheinland-Pfalz dar. Es ist eine starke räumliche Differenzierung zu erkennen. Das indirekt aus dem Vegetationsparameter abgeleitete Schnittregime nimmt einheitlich (REF, 1ZS und 2ZS) mit zunehmender Höhenlage ab. Die chronologische Betrachtung verdeutlicht dabei den Einfluss der vorab festgestellten projizierten Zunahme der Vegetationsperiode bzw. der effektiven Aufwuchsdauer auf die potentielle Schnitthäufigkeit.



Referenzzeitraum (1971-2000)	Nahe Zukunft (2021-2050)	Ferne Zukunft (2071-2100)

Abb. 51: Schnittregime für verschiedene Zeiträume (eigene Darst, Projektion WETTREG2006 A1B-trocken)

Für den Referenzzeitraum ist landesweit für den überwiegenden Anteil der Grünlandstandorte ein Schnittregime mit drei möglichen Aufwüchsen, einen vergleichsweise hohen Anteil mit zwei Aufwüchsen in den Höhenlagen der Mittelgebirgsregionen und für eine geringe Anzahl im oberen Mittelrheintal ein Vierschnittregime festzustellen. Die Verteilung des Schnittregimes in der nahen Zukunft zeigt gegenüber dem Referenzzeitraum, dass sich das Schnitt-

regime in den Tieflagen der großen Flusstäler und dem Oberrheingraben zu einer Vierschnittnutzung entwickelt. Die Grünlandstandorte mit zwei möglichen Aufwüchsen im Hunsrück und im Westerwald reduzieren sich, wohingegen für die Höhenlagen der Eifel eine mehrheitliche Zweischnittnutzung modelliert wurde. Weiterhin ist ein landesweit überwiegendes Schnittregime mit drei möglichen Aufwüchsen festzustellen. Für die ferne Zukunft sind ausschließlich in den Bereichen, für die in der nahen Zukunft eine potentielle Zweischnittnutzung modelliert wurde, Flächen zu identifizieren, die ein Schnittregime mit ausschließlich drei möglichen Aufwüchsen aufweisen. Alle übrigen Flächen, für die in den ersten beiden Zeiträumen noch eine mögliche Schnittnutzung mit maximal zwei bzw. drei Aufwüchsen modelliert wurde, weisen in der fernen Zukunft ein Schnittregime mit potentiell vier Aufwüchsen auf.

Die allgemeine Entwicklung des Parameters Schnittregime über die drei Zeiträume entspricht demnach der für die Zeitraummittelwerte der Vegetationsperiode der Rasterzellen für Rheinland-Pfalz festgestellten Tendenz. Wiederum ist die Entwicklung nicht kontinuierlich zwischen den drei Zeiträumen, sondern maßgeblich zwischen der nahen Zukunft und der fernen Zukunft festzustellen; jedoch ist die quantitative Zunahme des Schnittregimes zwischen den Zeiträumen auf Grund dessen Beschränkung auf ausschließlich drei Klassen gering. Die für die Implementierung von GRAM überdies notwendigen durchschnittlichen Schnitttermine und die resultierende schnittspezifische Aufwuchsdauer einer Rasterzelle leiten sich direkt aus dem festgelegten Verhältnis des Schnittregimes zur totalen Aufwuchsdauer ab. Die generelle Tendenz der räumlichen Differenzierung und die chronologische Entwicklung über den totalen betrachteten Zeitraum entsprechen demnach der vorab beschriebenen Tendenz beider Parameter.

8.5.4 Grünlandstandorte – Toleranz gegenüber veränderten hygrischen Verhältnissen

Die zweite große Herausforderung des Grünlandes im Zuge des Klimawandels ergibt sich durch die sich ändernden hygrischen Verhältnisse. Durch den projizierten Klimawandel werden in Zukunft deutlich trockenere Sommer erwartet, welche das Grünland vor größere Probleme stellen könnten, da Grünland auf eine ständige Wasserzufuhr für die Transpiration der Pflanzen während der gesamten Vegetationsperiode angewiesen ist. Das Pflanzenwachstum verläuft in dieser Zeit nicht linear. Die Wachstumskurve hängt stark von den gegebenen Standortfaktoren, Umweltbedingungen und der Bewirtschaftung ab. Für die Ertragsbildung von 1 kg Trockenmasse benötigt Grünland als Beispiel 500 Liter Wasser (BUCHGRABER & GINDL 2004), intensiv genutztes Grünland mit drei bis fünf Schnitten sogar 600 bis 900 l/kg gebildeter Trockensubstanz. Dies wäre in etwa das Doppelte der üblichen Getreidesorten (EITZINGER et al. 2009). Damit stellt der Wasserhaushalt bzw. die Wasserverfügbarkeit die entscheidende Größe zur Biomassebildung dar. Auf trockenen Standorten führen ausbleibende Niederschläge zu unmittelbaren Ertragseinbußen bzw. bei ausgesprochenem Trockenstress in Extremfällen auch zu Ertragsausfällen (BUCHGRABER & GINDL 2004). Die hygrischen Ansprüche der einzelnen Grasarten sind insgesamt jedoch sehr unterschiedlich und

reichen von geringen Ansprüchen (z. B. Glatthafer, Rotschwingel) bis zu mittleren bis hohen Ansprüchen (z. B. Deutsches Weidelgras) (RICHTER 2002).

Vulnerabilität von Grünlandstandorten auf Basis des Standortindex Basistoleranz

Zur Abschätzung der Toleranz von Grünlandstandorten gegenüber reduzierten Sommerniederschlägen und damit einhergehenden länger andauernden Trockenperioden fällt das erste Augenmerk auf die Betrachtung von statischen Standortfaktoren. Besonders eignet sich für diese Abschätzung der Standortindex Basistoleranz. Die statistische Auswertung des BTW zeigt, dass knapp 70 % der Flächen über eine mittlere Toleranz gegenüber reduzierten Sommerniederschlägen verfügen. Eine hohe Toleranz zeichnet etwas mehr als 1 % der Grünlandflächen aus. Eine geringe Toleranz findet sich auf ca. 30 % der Flächen (siehe Abb. 13). Demnach ist ein Großteil der Grünlandstandorte in Rheinland-Pfalz hinsichtlich ihrer Relief- und Bodeneigenschaften positiv gegenüber schlechter werdenden hygrischen Verhältnissen ausgestattet.

Tab. 13: Trockenstresstoleranz auf Dauergrünlandflächen

Toleranzstufen	Bezeichnung	Fläche [in %]
0 -10	sehr gering	0
10 - 20		0
20 - 30	gering	3
30 - 40		26
40 - 50	mittel	51
50 - 60		19
60 - 70	hoch	1
70 - 80		0
80 - 90	sehr hoch	0
90 - 100		0

Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz auf Grünlandstandorten

Für die Untersuchung der zukünftigen Entwicklung der hygrischen Verhältnisse im Grünland wird im Folgenden auf die klimatische Wasserbilanz während der Hauptvegetationsperiode (Mai-Oktober) zurückgegriffen. Aufgrund ihres verstärkten Anbaus in den Mittelgebirgsregionen verfügen die meisten Grünlandstandorte während des Referenzzeitraums 1971-2000 im Gegensatz zu den meisten Acker- und Weinbaustandorten in Rheinland-Pfalz über verhältnismäßig positive Werte. Ein Großteil des Grünlandanbaus befindet sich auf Standorten mit

ausgeglichener bzw. sogar leicht positiver Wasserbilanz während des Sommers. Selbst Standorte mit Wasserbilanzen zwischen +150 und +300 mm/KWBv machen noch über 4 % der Flächen aus (siehe auch Abb. 52)

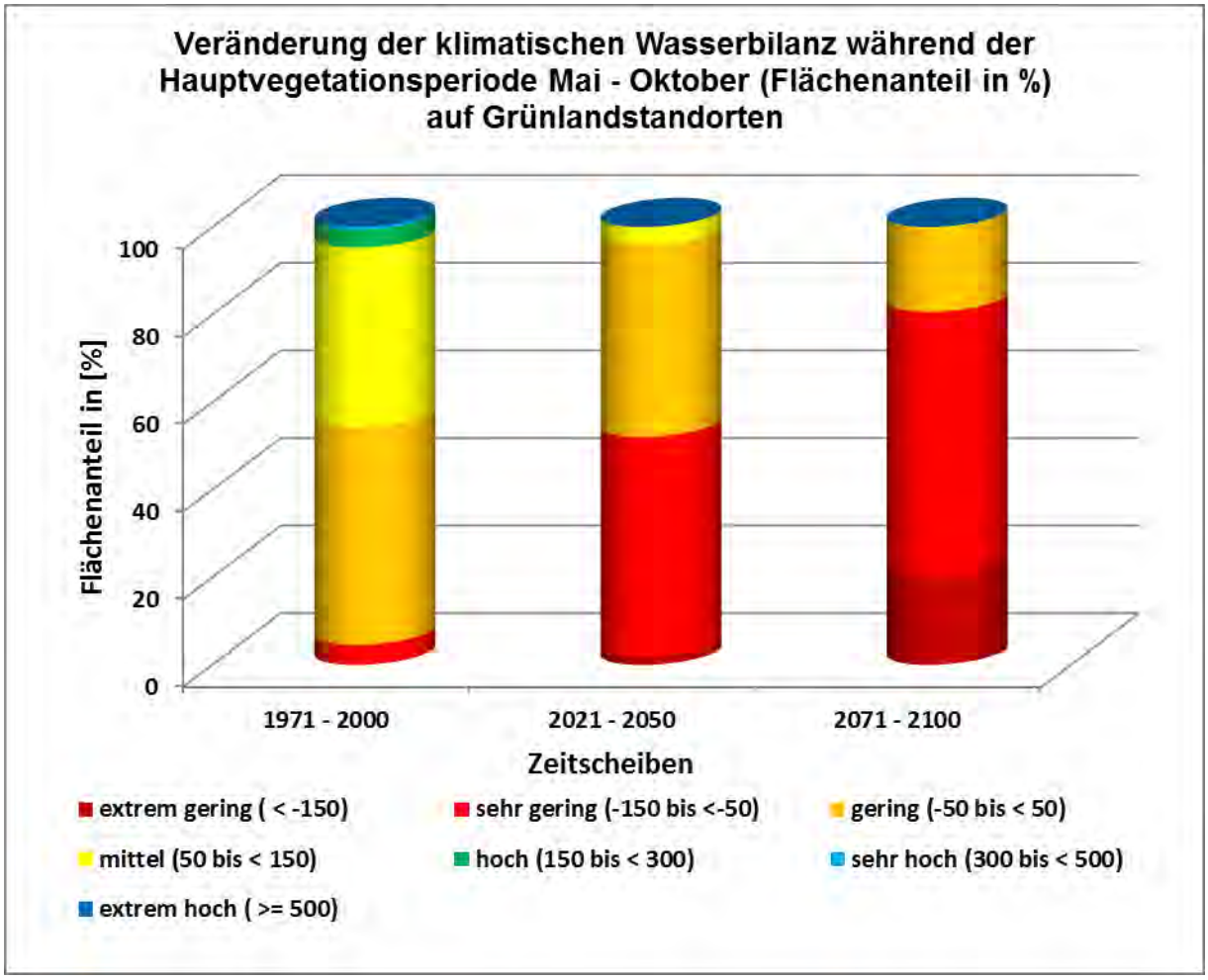


Abb. 52: Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz der Dauergrünlandflächen während der Hauptvegetationsperiode (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken)

In Zukunft verschlechtert sich bei Eintreten der zugrunde gelegten Projektion (WETTREG2006 A1B-trocken) die Situation der Grünlandstandorte jedoch deutlich. Bereits in der nahen Zukunft (2021-2050) fällt ein Großteil der Flächen in den Bereich negativer Wasserbilanzen in den Sommermonaten. In der fernen Zukunft (2071-2100) werden sich dann sogar über 80 % der Flächen auf Standorten mit Wasserbilanzen kleiner -50 mm/KWBv befinden (siehe auch folgende Abbildung zur räumlichen Verteilung der klimatischen Wasserbilanz in Rheinland-Pfalz).

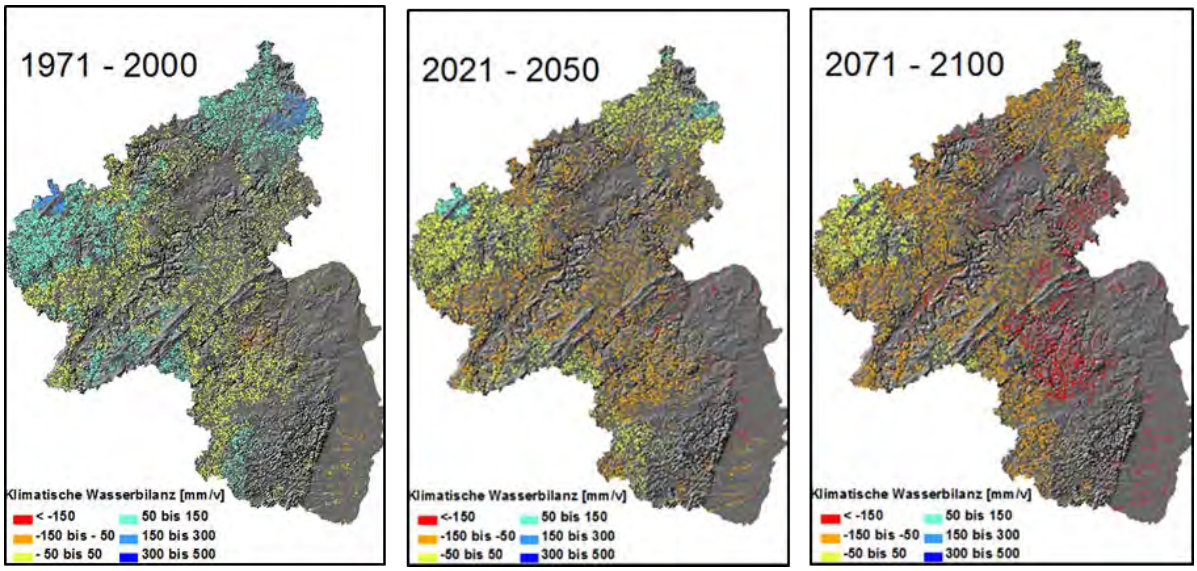


Abb. 53: Klimatische Wasserbilanz auf Grünlandstandorten in Rheinland-Pfalz (Projektion: WETT-REG2006 A1B-trocken)

Die folgende Abbildung zeigt die zeitliche Entwicklung von positiven und negativen Wasserbilanzen auf Grünlandstandorten. Auffallend ist eine dramatische Verschiebung hin zu Standorten mit negativen Wasserbilanzen. Sind während des Referenzzeitraums noch weite Bereiche von Rheinland-Pfalz mit einer positiven Wasserbilanz ausgestattet, so zeigt sich in der nahen Zukunft bereits in fast ganz Rheinland-Pfalz eine negative Wasserbilanz im Sommer. Nur die höheren Bereiche von Hunsrück, Eifel und Westerwald sind noch mit positiven Bilanzen während der Sommermonate ausgestattet. In der fernen Zukunft beschränken sich Lagen mit positiver KWB auf die Gipfellagen von Eifel und Westerwald.

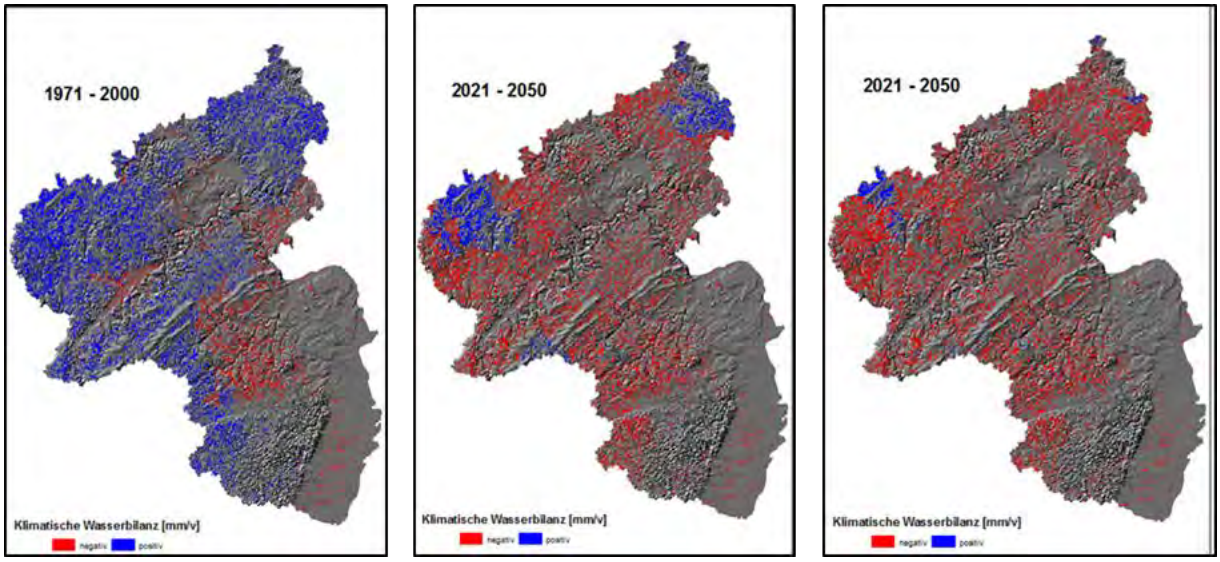


Abb. 54: Zeitliche Entwicklung von positiver und negativer KWB auf Grünlandstandorten in Rheinland-Pfalz (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken)

8.5.5 Zwischenfazit für die Grünlandbewirtschaftung

Die Auswertungen zeigen, dass bei Eintritt der zugrunde gelegten Klimaprojektionen zahlreiche Änderungen auf die Grünlandbewirtschaftung zukommen. Der Klimawandel wird bei Eintreten der zugrunde gelegten Klimaprojektionen überwiegend negative Folgen für das Grünland mit sich bringen, denn die direkten und indirekten Wirkungen der zukünftig verstärkt auftretenden Sommertrockenheit könnten die positiven Wirkungen eines verlängerten Grünlandwachstums überlagern. Die Analysen zeigen eine deutliche Verfrühung des Vegetationsbeginns und damit einhergehend eine deutlich verlängerte Vegetationsperiode auf allen Grünlandstandorten. Dieser positive und ertragssteigernde Effekt steht im Gegensatz zur zukünftigen Entwicklung des Wasserhaushaltes auf Grünlandstandorten. Im Referenzzeitraum befindet sich ein Großteil der Flächen in Rheinland-Pfalz noch auf günstigen hygrischen Standorten. Aufgrund der projizierten verringerten Sommerniederschläge und einer gleichzeitig ansteigenden Evapotranspiration durch höhere Temperaturen verschlechtern sich die Wasserbilanzen in ganz Rheinland-Pfalz bei Eintreten der zugrunde gelegten Klimaprojektion dramatisch. Hierdurch fällt eine Vielzahl der Grünlandstandorte in den Bereich negativer Wasserbilanzen. Das Grünlandproduktionspotenzial dürfte dann vor allem auf den heute schon trockenen Grünlandstandorten gefährdet sein. Besondere Risikogebiete stellen Räume mit derzeitigen Jahresniederschlägen von unter ca. 800 mm dar (EITZINGER et al. 2009), dies sind vor allem Lagen außerhalb der höheren Mittelgebirgsräume, insbesondere in den größeren Flusstälern oder dem Naheeinzugsgebiet. Weiter werden verstärkt Grünlandstandorte mit einer geringen Toleranz gegenüber Trockenstress leiden. Dies wären nach der obigen Auswertung etwa 30 % der als Grünland genutzten Flächen. Hier treffen ein geringes Wasserspeichervermögen, intensive Verdunstung durch hohe Einstrahlungswerte und Verlustlagen aufgrund von verstärktem Wasseraustrag durch oberflächlichen oder lateralen Abfluss aufeinander. Diese Standorte verteilen sich uneinheitlich über ganz Rheinland-Pfalz. Es bleibt abzuwarten, inwieweit weniger Trockenstress anfällige Standorte die deutlich schlechter werdenden Wasserbilanzen kompensieren können. Prinzipiell sind diese hinsichtlich ihrer räumlichen Ausstattung besser geeignet Trockenphasen zu überbrücken. Ob sie allerdings die in Zukunft erwarteten schlechten hygrischen Verhältnisse abfangen können, bleibt abzuwarten.

8.6 Ackerbau – Wer sind die Gewinner und Verlierer des Klimawandels?

In Rheinland-Pfalz ist der Ackerbau im Vergleich zu den anderen landwirtschaftlichen Sektoren flächenmäßig der am weitesten verbreitete Agrarsektor. Laut STATISTISCHEM LANDESAMT wurden 2010 auf 401.788 ha Ackerkulturen angebaut. Ein Großteil des Ackerbaus befindet sich in Rheinhessen und der Pfalz, sowie im Bereich südwestlich des Koblenzer Beckens. Weitere Ackerflächen finden sich meist in den mittleren Höhenlagen (siehe folgende Abb.).

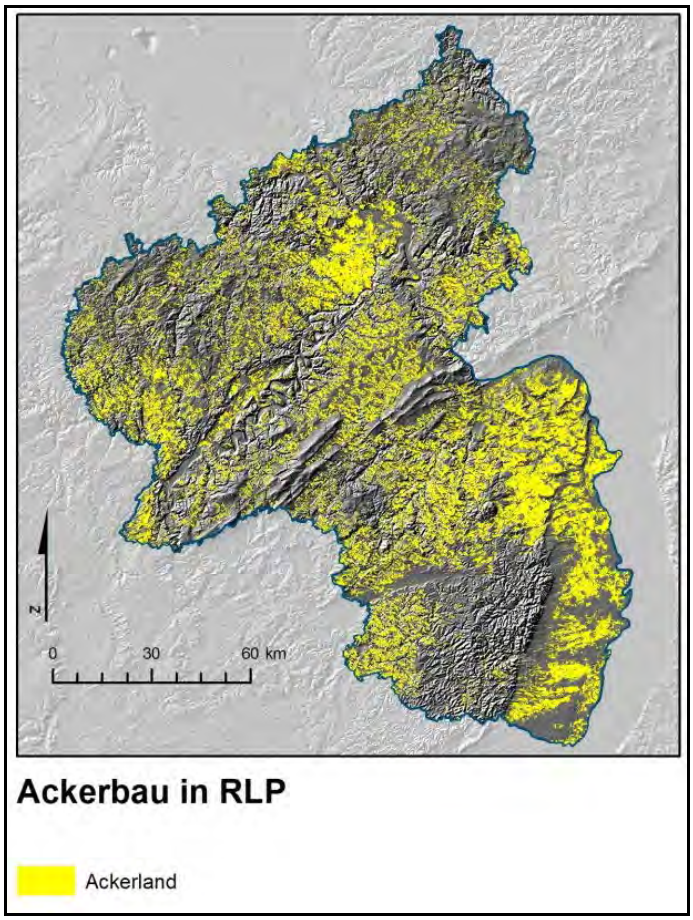


Abb. 55: Ackerbaulich genutzte Standorte in Rheinland-Pfalz (Datengrundlage: LVERM Geo Rheinland-Pfalz)

In Rheinland-Pfalz wird ein sehr breites Spektrum an Ackerkulturen und Feldfrüchten angebaut. Die wichtigsten Kulturen werden nach ihrer Flächengröße in der folgenden Tabelle dargestellt. Aufgrund ihres Flächenanteils können hier laut STATISTISCHEM LANDESAMT Rheinland-Pfalz 2010 vor allem Winterweizen (119.917 ha), Sommergerste (41.063 ha) und Wintergerste (35.582 ha) als wichtige Getreidesorten genannt werden. Als Hackfrüchte sind vor allem Zuckerrüben (18.033 ha) zu nennen. Weitere wichtige Kulturen sind Winterraps (45.712 ha) und Silomais mit 28.904 ha.

Tab. 14: Kulturarten nach Flächengröße (eigene Darst., verändert nach Statistisches Landesamt 2010)

Kulturart	Fläche [in ha]
Winterweizen	119.917
Sommergerste	41.063
Wintergerste	35.582
Triticale	17.114
Roggen und Wintermengetreide	11.235
Hafer	6.180
Kartoffeln	7.581
Zuckerrüben	18.033
Winterraps	45.712
Silomais	28.904
Gemüse, Erdbeeren und sonstige Gartengewächse	14.071
Ackerbau gesamt	***401.788***

Die wichtigsten Kulturen sollen im Folgenden hinsichtlich ihrer Toleranz bzw. Vulnerabilität gegenüber klimatischen Änderungen untersucht werden. Im Fokus stehen hierbei Analysen zur Toleranz gegenüber reduzierten Sommerniederschlägen und einer damit einhergehenden Verschlechterung des Wasserhaushalts während der Hauptwachstumsphase der Ackerkulturen. Neben diesen kulturübergreifenden Analysen zur Wasserversorgung sollen spezielle kulturspezifische Fragen beantwortet werden.

8.6.1 Winterweizen

Winterweizen stellt aufgrund seiner Fläche die wichtigste ackerbauliche Kulturart in Rheinland-Pfalz dar. Winterweizen wird laut STATISTISCHEM LANDESAMT Rheinland-Pfalz 2010 auf insgesamt 119.917 ha angebaut. Winterweizenstandorte finden sich fast in ganz Rheinland-Pfalz, aber verstärkt in Rheinhessen, entlang der Nahe und südwestlich des Koblenzer Beckens. Aufgrund seiner hohen Standortansprüche wird der Winterweizen meist in agrarischen Gunstlagen kultiviert.

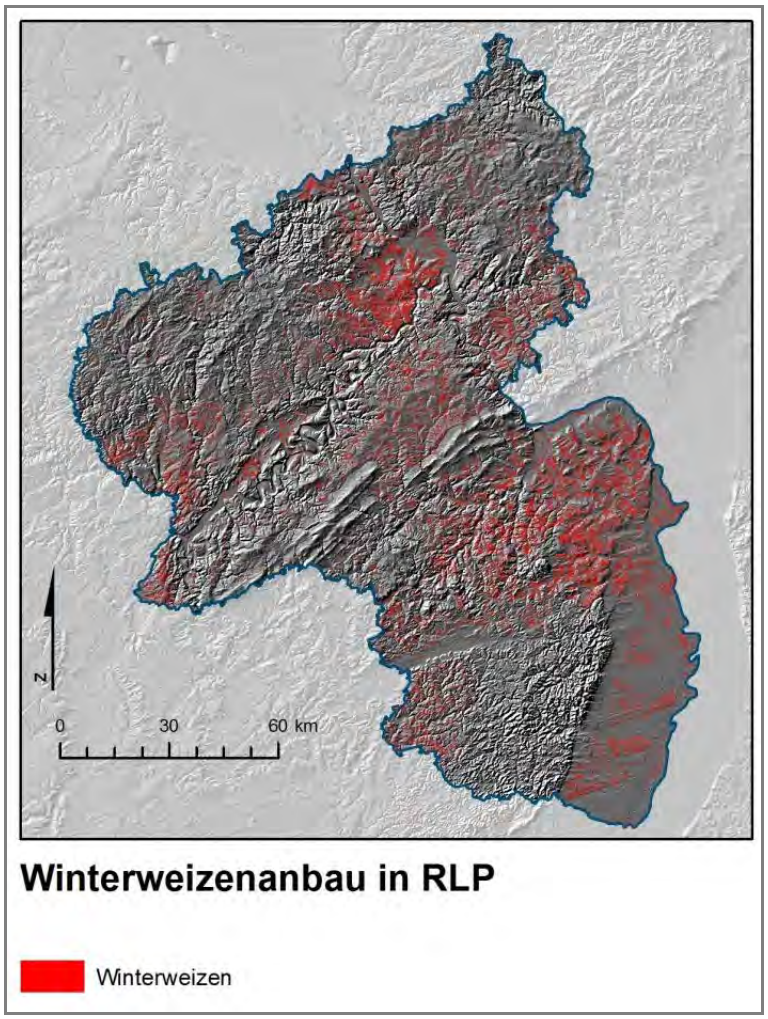


Abb. 56: Winterweizenstandorte in Rheinland-Pfalz (Datengrundlage: LBD Rheinland-Pfalz 2010)

Als Klimaelemente werden vor allem Temperatur und Niederschlag ertragswirksam. Winterweizen bevorzugt ein wintermildes, sommerwarmes und strahlungsintensives Klima (HAUMANN & DIETZSCH 2000). Als typische Winterungskultur wird er im Herbst angebaut, überwintert und startet dann bei entsprechenden Temperaturbedingungen schon als Jungpflanze in die Wachstumsperiode. Gegenüber Sommerungskulturen besitzt Winterweizen hierdurch einen Vegetationsvorsprung und somit eine frühere Reife und Ernte (EITZINGER et al. 2009). Als eine von vielen Winterungsarten benötigt der Winterweizen im Sämlingsstadium (Winter) niedrige Temperaturen, um im Frühjahr Schossen und Blühen zu können (Vernalisation) (z. B. OEHMICHEN 1986).

Das optimale Niederschlagsangebot liegt zwischen 500-600 mm im Jahr. In der Hauptwachstumsphase während des Schossens werden bis zu 5 mm täglich beansprucht (DIEPENBROCK et al. 2009). Die Phase vom Schossen bis zur Blüte ist hinsichtlich der Wasserversorgung am kritischsten. Während der Reifephase kann Wassermangel zu geringeren Tausendkornmassen führen. Winterweizen besitzt einen hohen Transpirationskoeffizienten von 500, der in seiner verhältnismäßig späten Massenentwicklung und im verstärkten Anbau in Gebieten mit hohen Sommertemperaturen begründet ist (SCHALLER & WEIGEL 2007). Bei

trockenen Verhältnissen im Frühjahr wird das Bodenwasser auf vielen Standorten meist zu einem ertragsbegrenzenden Faktor (DIEPENBROCK et al. 2009).

Vernalisation bei Winterweizen

Als Vernalisation wird eine Blühinduktion durch eine art- und sortenspezifische, meist mehrwöchige Kälteperiode im Winter bezeichnet (GEISLER 1980). Bei Winterweizen können Temperaturen von 0-5° und eine Einwirkungsdauer von ca. 40-80 Tagen als Vernalisationsvoraussetzungen angenommen werden (OEHMICHEN 1986; REINER et al. 1988; MÜNZER et al. 1991; GEISLER 1983; DIE LANDWIRTSCHAFT 1998). Bei den vier untersuchten Standorten (Mainz, Koblenz, Simmern und Bergzabern) zeigt sich für alle Szenarien ein deutlich negativer Trend der Vernalisationsdauer. Aufgrund des allgemein niedrigeren Temperaturniveaus in Simmern (Hunsrück) wird hier die kritische 40-Tage-Grenze nicht nennenswert unterschritten. In Mainz und Bergzabern kommt es gegen Ende des Zeitraums bei allen Szenarien vermehrt zu Unterschreitungen der optimalen Vernalisationsdauer von mindestens 40 Tagen. Die stärkste Abnahme verzeichnet der Referenzstandort Koblenz. Die folgende Abbildung macht den starken Rückgang am Beispiel von Dekaden und die Unterschreitung der kritischen 40-Tage-Grenze in Koblenz deutlich.

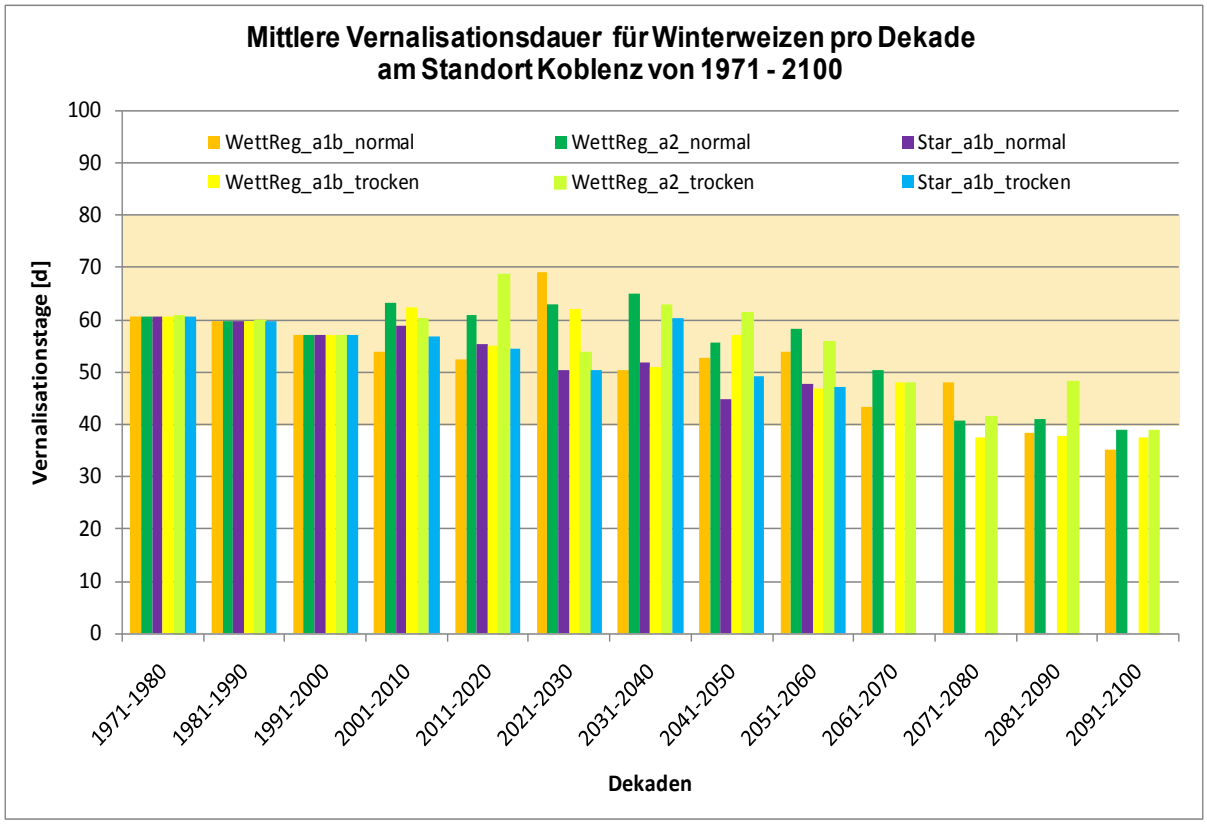


Abb. 57: Mittlere Vernalisationsdauer für Winterweizen pro Dekade am Standort Koblenz (Projektionen: WETTREG2006 und STAR)

In Koblenz kommt es in der Simulation WETTREG2006 A1B-normal in insgesamt 19 Wintern zu Unterschreitungen der optimalen Vernalisationsdauer von 40 Tagen. Eine deutliche Häufung tritt hierbei, wie bereits aufgezeigt, zum Ende des Projektionszeitraums auf (siehe auch folgende Tabelle). Im Szenario WETTREG2006 A1B-trocken wird sogar in 23 Wintern keine ausreichende Einwirkungsdauer erreicht. Hier häufen sich die Unterschreitungen ebenso gegen Ende des Jahrhunderts. Dieser Trend wird durch die Szenarien A2-normal und A2-trocken bestätigt. Auffallend sind die hohen Unterschreitungen der kritischen 40-Tage-Marke bei der Projektion STAR A1B-normal schon in den frühen Dekaden 2040-2050 und 2050-2060.

Tab. 15: Anzahl der Unterschreitungen der kritischen 40-Tage-Marke pro Dekade in Koblenz

	Szenarien					
	WettReg				***STAR***	
Dekade	**a1b normal**	**a1b trocken**	**a2 normal**	**a2 trocken**	**a1b normal**	**a1b trocken**
1971 - 1980	0	0	0	0	0	0
1981 - 1990	0	0	0	0	0	0
1991 - 2000	0	0	0	0	0	0
2001 - 2010	0	0	0	0	0	0
2011 - 2020	0	1	2	0	0	2
2021 - 2030	0	0	0	1	1	2
2031 - 2040	2	1	0	0	2	0
2041 - 2050	0	0	0	0	4	2
2051 - 2060	0	3	1	1	4	1
2061 - 2070	3	2	3	1		
2071 - 2080	2	4	3	4		
2081 - 2090	5	7	4	3		
2091 - 2100	7	5	5	4		
Gesamt	19	23	18	14	11	7

In der folgenden Tabelle werden abschließend die Entwicklungen hin zu einer verkürzten Vernalisationsdauer für alle vier untersuchten Standorte am Beispiel von ausgewählten Dekaden aufgeführt. In Klammern werden die jeweiligen Standardabweichungen abgebildet. Durch die Einbeziehung der Standardabweichungen kann aufgezeigt werden, dass es selbst in Dekaden mit mittleren Vernalisationsdauern von über 40 Tagen in vereinzelten Wintern zu Unterschreitungen der kritischen 40-Tage-Grenze kommen kann.

Tab. 16: Vernalisationsdauer (Dekadenmittel) an Winterweizenstandorten nach ausgewählten Szenarien (Standardabweichung in Klammern)

Station:	Modell:	Szenario	1971 - 1980	1991 - 2000	2011 - 2020	2031 - 2040	2051 - 2060	2071 - 2080	2091 - 2100
Bergzabern	WettReg	a1b normal	76,4 (10,6)	62,1 (5,9)	60,1 (7,8)	62,2 (9,8)	63,5 (8,3)	59,4 (9,6)	49,5 (7,0)
		a1b trocken	76,4 (10,6)	62,1 (5,9)	67,0 (11,0)	63,7 (8,7)	57,7 (10,7)	52,0 (7,0)	48,1 (8,1)
		a2 normal	76,4 (10,6)	62,1 (5,9)	68,7 (9,4)	72,2 (11,2)	65,0 (10,6)	55,1 (7,6)	53,6 (14,4)
		a2 trocken	76,4 (10,6)	62,1 (5,9)	74,1 (16,5)	71,0 (13,8)	68,0 (11,5)	56,9 (11,9)	57,7 (9,1)
	Star	a1b normal	76,4 (10,6)	62,1 (5,9)	61,3 (7,2)	61,0 (14,9)	55,2 (11,4)	-	-
		a1b trocken	76,4 (10,6)	62,1 (5,9)	59,3 (17,0)	64,5 (7,0)	51,0 (13,7)	-	-
Koblenz	WettReg	a1b normal	60,8 (7,9)	57,1 (7,2)	52,4 (9,6)	50,5 (10,6)	54,0 (12,4)	48,1 (7,6)	35,1 (7,5)
		a1b trocken	60,8 (7,9)	57,1 (7,2)	55,0 (11,7)	51,1 (12,0)	46,9 (12,5)	37,6 (9,0)	37,5 (7,6)
		a2 normal	60,8 (7,9)	57,1 (7,2)	60,8 (14,1)	64,9 (12,3)	58,4 (14,1)	40,6 (4,1)	39,1 (12,4)
		a2 trocken	60,8 (7,9)	57,1 (7,2)	68,8 (14,7)	62,8 (14,0)	55,9 (9,1)	41,6 (9,8)	38,8 (10,6)
	Star	a1b normal	60,8 (7,9)	57,1 (7,2)	55,4 (5,8)	51,9 (15,5)	47,8 (14,0)	-	-
		a1b trocken	60,8 (7,9)	57,1 (7,2)	54,6 (15,3)	60,4 (7,6)	47,2 (11,1)	-	-
Mainz	WettReg	a1b normal	73,6 (8,4)	65,8 (6,9)	62,4 (9,4)	62,3 (12,0)	66,1 (9,6)	60,2 (13,8)	47,0 (7,5)
		a1b trocken	73,6 (8,4)	65,8 (6,9)	66,7 (10,3)	64,8 (11,7)	59,1 (11,8)	52,7 (8,8)	49,6 (8,6)
		a2 normal	73,6 (8,4)	65,8 (6,9)	72,5 (9,8)	73,3 (12,8)	66,6 (11,1)	53,6 (6,3)	50,9 (14,4)
		a2 trocken	73,6 (8,4)	65,8 (6,9)	78,1 (16,5)	70,8 (15,7)	66,8 (11,7)	56,2 (10,4)	54,7 (7,7)
	Star	a1b normal	73,6 (8,4)	65,8 (6,9)	59,5 (6,7)	59,0 (15,6)	52,8 (11,1)	-	-
		a1b trocken	73,6 (8,4)	65,8 (6,9)	59,3 (14,7)	64,9 (4,4)	53,1 (13,3)	-	-
Simmern	WettReg	a1b normal	80,7 (18,6)	70,1 (14,7)	64,1 (12,8)	70,5 (12,4)	70,9 (8,8)	68,9 (9,4)	56,0 (8,8)
		a1b trocken	80,7 (18,6)	70,1 (14,7)	70,1 (10,5)	69,8 (7,1)	64,9 (9,9)	59,6 (9,0)	57,5 (10,5)
		a2 normal	80,7 (18,6)	70,1 (14,7)	73,9 (6,5)	70,4 (11,5)	72,3 (10,8)	61,6 (9,6)	61,0 (13,6)
		a2 trocken	80,7 (18,6)	70,1 (14,7)	73,0 (14,4)	75,0 (11,2)	74,2 (11,4)	66,7 (6,4)	64,3 (11,8)
	Star	a1b normal	80,7 (18,6)	70,1 (14,7)	69,4 (10,0)	71,1 (15,0)	64,7 (15,0)	-	-
		a1b trocken	80,7 (18,6)	70,1 (14,7)	65,9 (15,7)	69,0 (10,0)	58,8 (14,8)	-	-

Es lässt sich festhalten, dass die für Winterweizen dringend benötigten blühbeschleunigenden Vernalisationsreize gegen Ende des untersuchten Zeitraums häufiger die optimalen Einwirkungsdauern von 40 Tagen bei Temperaturen zwischen 0-5 °C unterschreiten. Hierdurch kann es zu negativen Begleiterscheinungen, wie eine verkürzte Kornfüllungsphase, kommen. Schlechtere Vernalisationsbedingungen könnten deshalb in der ferneren Zukunft auch zu Ertragseinbußen führen, falls die zugrunde liegenden Klimaszenarien zutreffen. Eine genaue Abschätzung der zukünftigen Vernalisationsverhältnisse bei Winterweizen ist schwierig, da sich die verwendeten Klimasimulationen zum Teil deutlich voneinander unterscheiden. Dennoch zeichnet sich in allen Projektionen eine deutliche Verkürzung der benötigten Einwirkungsdauern mit kühlen Temperaturen ab.

Wasserversorgung auf Winterweizenstandorten

Zur Abschätzung der Toleranz von Winterweizenstandorten gegenüber einer sich verschlechternden Wasserversorgung wurden die Anbaustandorte einer dreistufigen Analyse unterzogen. In einem ersten Schritt wurden die Standorte hinsichtlich ihrer Vulnerabilität gegenüber Trockenstress auf Basis des Standortindex Basistoleranz untersucht, welcher die natürliche Ausstattung der kultivierten Parzellen gegenüber Trockenstress betrachtet. In einem zweiten Schritt wurden dynamische Klimasimulationen einbezogen. Besonderes Augenmerk findet hierbei die Betrachtung der klimatischen Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode (HVP) von Anfang Mai bis Ende Oktober. Hierbei werden die klimatischen Aus-

sagen auf Basis eines flächendeckenden 1 x 1 km Rasters auf hochauflösende Winterweizenstandorte auf Flurstücksebene übertragen. Abschließend wurden beide Methoden im so genannten Standortklimaindex zusammengefasst und für Winterweizenstandorte analysiert.

Die Auswertung der natürlichen Toleranz gegenüber Trockenstress auf Basis des Standortindex Basistoleranz zeigt eine verhältnismäßig positive natürliche Ausstattung der Winterweizenstandorte. Ein Großteil der Flächen (ca. 77 %) zeigt eine mittlere Toleranz gegenüber reduzierten Niederschlägen (siehe auch Tabelle 17). Über eine hohe Toleranz gegenüber zu erwartendem Trockenstress verfügen noch knapp 7 % der Flächen. Eine geringe Toleranz gegenüber Trockenstress findet sich auf etwa 15 % der Flächen. Sehr hohe und sehr geringe Toleranzen kommen nicht vor.

Tab. 17: Toleranz der Winterweizenstandorte gegenüber reduzierten Sommerniederschlägen (Flächenanteil in %) auf Basis des Standortindex Basistoleranz

Toleranzstufen	Bezeichnung	Flächenanteil [in %]
0 -10	sehr gering	0
10 - 20		0
20 - 30	gering	0
30 - 40		15
40 - 50	mittel	45
50 - 60		32
60 - 70	hoch	7
70 - 80		0
80 - 90	sehr hoch	0
90 - 100		0

Die klimatische Wasserbilanz während der Hauptvegetationsperiode (Mai-Oktober) verschlechtert sich bei Eintreten der zugrunde gelegten Klimaprojektion (WETTREG2006 A1B-trocken) auf allen Standorten deutlich. Im Zeitraum 1971-2000 zeigen über 90 % der Flächen sehr geringe (-150 bis < -50 mm) bis geringe (-50 bis < 50 mm) Wasserbilanzen. Extrem geringe (<-50 mm) Wasserbilanzen kommen auf keinen Standorten vor. Knapp 10 % der Flächen verfügen über positive Wasserbilanzen > 50 mm. In der nahen Zukunft (2021-2050) verschlechtern sich die Bedingungen der Standorte bereits deutlich. Über 90 % der Flächen könnten dann sehr geringe bzw. extrem geringe Wasserbilanzen verzeichnen. In der fernen Zukunft (2071-2100) könnten bei Auftreten der projizierten klimatischen Verhältnisse etwa drei Viertel der Winterweizenstandorte Wasserbilanzen während der Sommermonate von < 150 mm verzeichnen (siehe folgende Abb.).

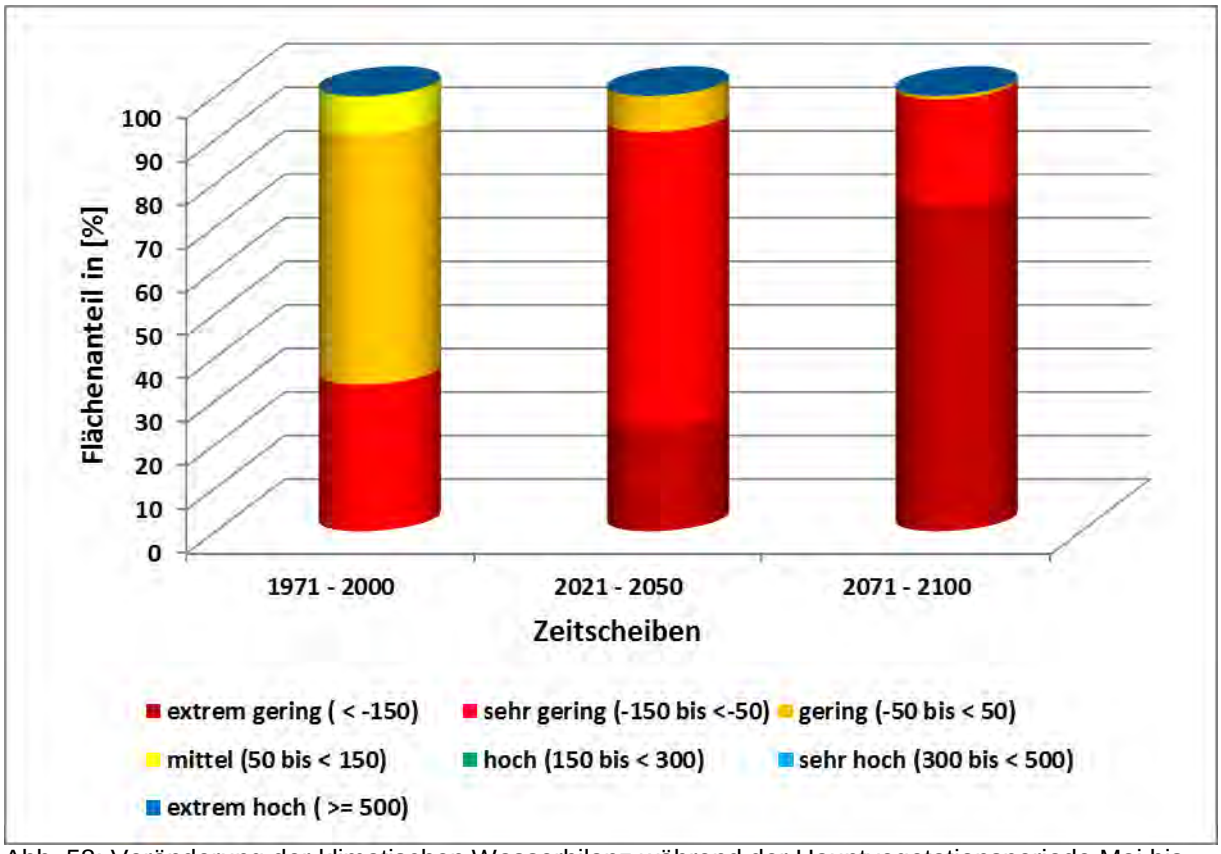


Abb. 58: Veränderung der klimatischen Wasserbilanz während der Hauptvegetationsperiode Mai bis Oktober (Flächenanteil in %) auf Winterweizenstandorten (eigene Darst., Projektion WETTREG2006 A1B-trocken)

Bei Betrachtung des Standortklimaindex der Winterweizenanbauflächen zeigt sich bedingt durch die schlechter werdenden sommerlichen Wasserbilanzen eine deutliche Verschlechterung der Trockenstresstoleranz für die Zukunft. In der 3er-Dekade 1971–2000 zeigt ein Großteil der Weizenanbauflächen eine mittlere Toleranz gegenüber reduzierten Sommerniederschlägen. In der nahen Zukunft verschieben sich die Standorte hin zu weniger toleranten Verhältnissen. In der fernen Zukunft werden dann fast alle Winterweizenstandorte nur noch eine geringe Toleranz gegenüber Sommertrockenheiten verzeichnen, welche auf die sich verschlechternde klimatische Wasserbilanz zurückzuführen ist. Tabelle 18 verdeutlicht diesen Trend hin zu geringeren Trockenstresstoleranzen.

Tab. 18: zeitliche Entwicklung des Standortklimaindex für Winterweizenflächen [ha] in Prozent zur Gesamtfläche

Klassen	***Toleranz***	***SKI 1971 - 2000***	***SKI 2021 - 2050***	***SKI 2071 - 2100***
0 - 20	sehr gering (0 - 20)	0.00	0.00	0.03
20 - 40	gering (> 20 - 40)	6.68	70.98	95.53
40 - 60	mittel (> 40 - 60)	92.61	29.02	4.44
60 - 80	hoch (> 60 - 80)	0.72	0.00	0.00
80 - 100	sehr hoch (> 80 - 100)	0.00	0.00	0.00

Die Abbildung 59 präsentiert die Entwicklung der Trockenstresstoleranzen am Beispiel von Winterweizenstandorten südlich des Koblenzer Beckens. Auch hier wird die deutliche Abnahme der Trockenstresstoleranz in den Sommermonaten für die beiden Zukunftszeiträume nachdrücklich aufgezeigt.

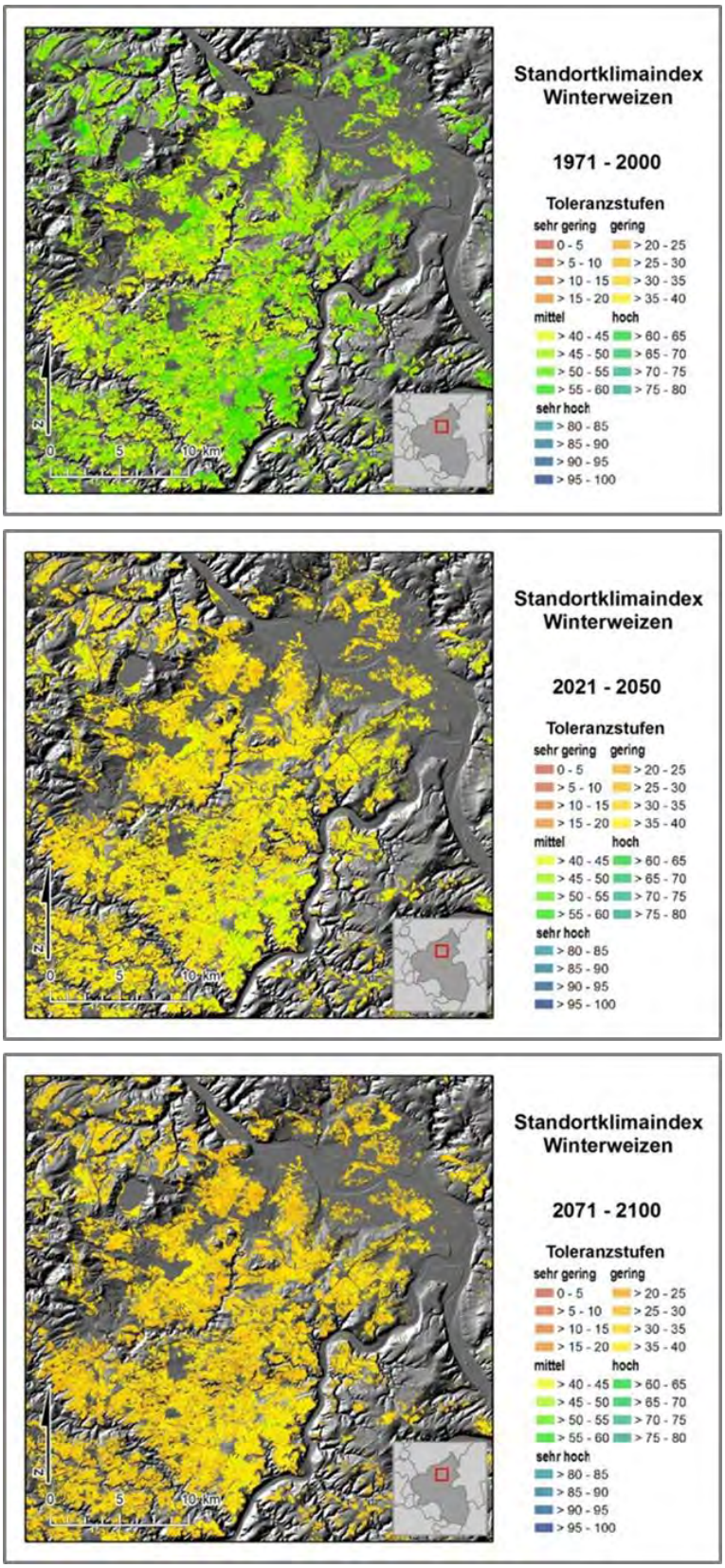


Abb. 59: Zeitliche Entwicklung der Trockenstresstoleranz auf Winterweizenstandorten südlich des Koblenzer Beckens auf Basis des Standortklimaindex (Datengrundlage: LBD Rheinland-Pfalz 2010, Projektion WETTREG2006 A1B-trocken)

8.6.2 Winterraps

Winterraps ist die bedeutsamste Ölfrucht der mittleren Breiten und dient hauptsächlich zur Speiseöl- und Margarineherstellung, sowie zur Gewinnung von Schmier-, Hydraulik- und Schalungsöl sowie zur Kraftstofferzeugung (DIEPENBROCK et al. 2009). In den vergangenen Jahren wird Winterraps auch verstärkt als Energiepflanze verwendet. Winterraps besitzt eine geringe Winterfestigkeit (SCHALLER & WEIGEL 2007), wodurch die zukünftige projizierte Zunahme der Temperaturen die Winterrapsentwicklung verbessern könnte. Die höheren Temperaturen im Frühsommer könnten allerdings zu einer Beschleunigung der Abreife und damit auch zu Ertragseinbußen führen. Weiter negativ auf den Ertrag könnten sich die in den letzten Jahren verstärkt auftretenden Frühjahrstrockenheiten auswirken. Auch die Sommertrockenheit könnte den Winterraps vor Probleme stellen, da zu trockene Bodenverhältnisse das Auflaufen und Etablieren des Bestandes vor dem Winter behindern könnten. Winterraps könnte nach Abschätzungen in Hessen als einer der großen Verlierer des Klimawandels bei den Feldfrüchten hervorgehen (EITZINGER et al. 2009). Im Hitzesommer 2003 erlitt der Winterraps deutschlandweit Ertragseinbußen von 16 % im Vergleich zum langjährigen Durchschnitt (SCHALLER & WEIGEL 2007). Winterraps ist nach seiner Anbaufläche die zweitwichtigste Kulturart in Rheinland-Pfalz und wird laut STATISTISCHEM LANDESAMT 2010 auf 45.712 ha kultiviert. Schwerpunkte des Anbaus befinden sich im Bereich der Nahe, südwestlich von Koblenz und im Hunsrück.

Abb. 60: Winterrapsanbau in Rheinland-Pfalz (Datengrundlage: LBD Rheinland-Pfalz 2010)

Wasserversorgung auf Winterrapsstandorten

Die Analyse baut auf einem dreistufigen Ansatz auf, der bereits zuvor bei der Betrachtung der Wasserversorgung auf Winterweizenstandorten angewendet wurde. Auch hier wird zuerst die natürliche Ausstattung gegenüber Trockenstress auf Basis des Standortindex Basistoleranz analysiert.

Die Verteilung der Standorte verhält sich ähnlich der zu Winterweizen. Ein Großteil (knapp 75 %) des Winterrapses befindet sich auf Flächen mit mittlerer Toleranz gegenüber Trockenstress. Winterrapsflächen mit geringer Toleranz gegenüber reduzierten Sommerniederschlägen machen noch etwa 24 % des gesamten Winterrapsanbaus aus. Flächen mit hoher Toleranz kommen nur sporadisch vor.

Tab. 19: Toleranz von Winterrapsstandorten gegenüber Trockenstress

Toleranzstufen	Bezeichnung	Flächenanteil [in %]
0 -10	sehr gering	0
10 - 20		0
20 - 30	gering	1
30 - 40		23
40 - 50	mittel	57
50 - 60		17
60 - 70	hoch	1
70 - 80		0
80 - 90	sehr hoch	0
90 - 100		0

Auf den Winterrapsflächen wird sich die Wasserversorgung in den Sommermonaten bei Eintreten der zugrunde gelegten Projektionen deutlich verschlechtern. Die folgende Abbildung verdeutlicht einen klaren Trend hin zu trockeneren Verhältnissen der Winterrapsstandorte. Bereits in der nahen Zukunft (2021-2050) werden bei Eintreten der verwendeten Klimaszenarien über 80 % der Flächen über negative Wasserbilanzen in den Sommermonaten von -50 bis -150 mm/KWBv verfügen. In der fernen Zukunft verschlechtert sich die Situation dahingehend, dass mehr als die Hälfte der Flächen eine klimatische Wasserbilanz von < -50 mm/KWBv besitzen könnten.

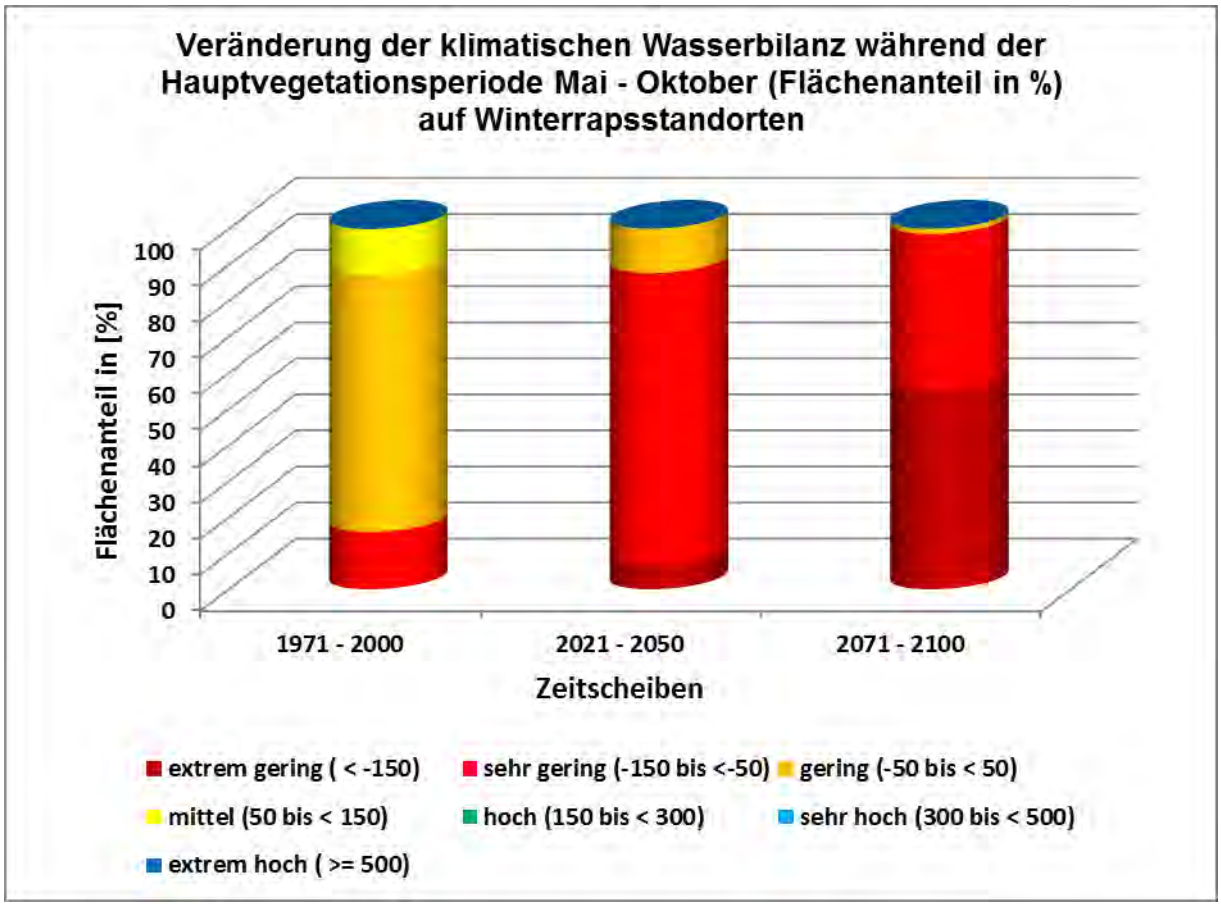


Abb. 61: Veränderung der klimatischen Wasserbilanz während der Hauptvegetationsperiode Mai–Oktober auf Winterrapsstandorten (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken)

Auch der Standortklimaindex zeigt eine deutliche Verschlechterung der hygrischen Verhältnisse auf Winterrapsstandorten für die nahe und ferne Zukunft. Die sich verschlechternde Toleranz gegenüber Trockenstress kann für die einzelnen Zeiträume der folgenden Tabelle entnommen werden. Im Referenzzeitraum weisen über 90 % der Standorte mittlere Toleranzen gegenüber reduzierten Sommerniederschlägen auf. In der fernen Zukunft werden dann bei Eintreten der zugrunde gelegten Klimasimulation WETTREG2006 A1B-trocken über 96 % der Flächen geringe Toleranzen aufweisen.

Tab. 20: Standortklimaindex auf Winterrapsflächen in Prozent zur Gesamtfläche

Klassen	***Toleranz***	***SKI 1971 - 2000***	***SKI 2021 - 2050***	***SKI 2071 - 2100***
0 - 20	sehr gering (0 - 20)	0.00	0.00	0.02
20 - 40	gering (> 20 - 40)	7.42	73.14	96.11
40 - 60	mittel (> 40 - 60)	91.81	26.86	3.88
60 - 80	hoch (> 60 - 80)	0.77	0.00	0.00
80 - 100	sehr hoch (> 80 - 100)	0.00	0.00	0.00

8.6.3 Sommergerste

Sommergerste wird in Rheinland-Pfalz auf insgesamt 41.063 ha angebaut und zählt damit zu den flächenmäßig wichtigsten Kulturarten. Sommergerste wird größtenteils für die Malz- und Brauindustrie verwendet (DIEPENBROCK et al. 2007). Die Standorte befinden sich schwerpunktmäßig in Rheinhessen und verteilen sich ansonsten flächenmäßig in geringerem Umfang über die gesamte Landesfläche (siehe auch untere Karte).

Abb. 62: Sommergersteanbau in Rheinland-Pfalz (Datengrundlage: LBD Rheinland-Pfalz 2010)

Wasserversorgung auf Sommergerstestandorten

Neben einer frühen Aussaat benötigt Sommergerste insbesondere in der Bestockungsphase eine gute Wasserversorgung bei kühleren Temperaturen. Eine ebenfalls ausreichende Feuchtigkeit wird während der Schossphase und der Kornfüllungsphase bei nicht zu hohen Temperaturen benötigt. Es wird projiziert, dass die Sommergersteerträge in Zukunft aufgrund der zunehmenden Wasserknappheit bedingt durch die zunehmende Sommertrockenheit abnehmen könnten. Simulationen zeigen eine umso stärkere Ertragsabnahme, je weniger Wasserspeichervermögen der Boden besitzt (vgl. Auswertungen im Marchfeld; EITZINGER et al. 2009).

In Rheinland-Pfalz verhält sich die Toleranz gegenüber Trockenstress ähnlich jener der anderen untersuchten Kulturarten. Der überwiegende Teil der Flächen (ca. 74 %) ist mit einer mittleren Toleranz gegenüber Trockenstress ausgestattet. Geringe Toleranzen gegenüber reduzierten Niederschlägen finden sich auf ca. 17 % der Sommergersteflächen. Eine hohe Toleranz zeigt sich bei etwa 9 % der Flächen.

Tab. 21: Toleranz gegenüber Trockenstress auf Sommergersteflächen [in %] an der Gesamtfläche

Toleranzstufen	Bezeichnung	Fläche [in%]
0 -10	sehr gering	0
10 - 20		0
20 - 30	gering	0
30 - 40		17
40 - 50	mittel	40
50 - 60		34
60 - 70	hoch	9
70 - 80		0
80 - 90	sehr hoch	0
90 - 100		0

Die klimatische Wasserbilanz auf Sommergerstestandorten während der Hauptvegetationsperiode zeigt eine Entwicklung von leicht negativen Wasserbilanzen während des Referenzzeitraums (1971-2000) hin zu schlechten hygrischen Bilanzen in der fernen Zukunft (2071-2100). Dann werden über 93 % der Flächen eine klimatische Wasserbilanz von kleiner - 50 mm/KWBv aufweisen (siehe auch Abb.63).

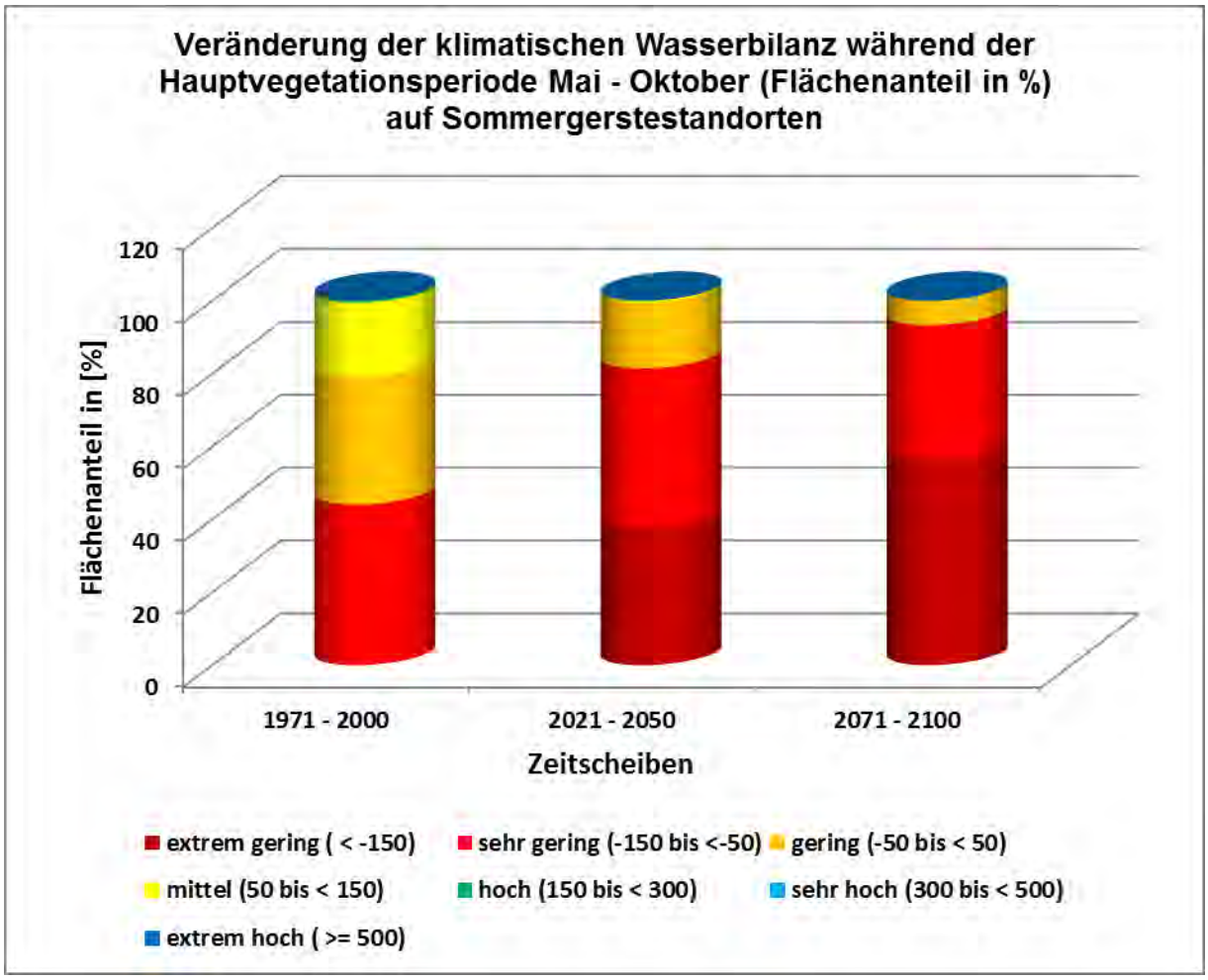


Abb. 63: Veränderung der klimatischen Wasserbilanz während der Hauptvegetationsperiode Mai – Oktober (Flächenanteil in %) auf Sommergersteflächen (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken)

8.6.4 Mais

Die wärmeliebende Maispflanze besitzt einen hohen Temperaturanspruch. In Deutschland zählt ein Großteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche zu den Grenzlagen des Maisanbaus, weswegen meist der Silomais überwiegt, bei dem die volle Kornreife nicht abgewartet werden muss. Mais hat bedeutende thermische Ansprüche, sogar frühreifende Hybriden (Körnermais) benötigen mehr als 13,5 °C Durchschnittstemperatur zwischen den Monaten Mai und September und/oder mindestens 900 Sonnenstunden für eine vollständige Ausreife. Auch das Minimum zum Keimen liegt mit 8 bis 10 °C vergleichsweise hoch. Das Wachstum setzt bei Temperaturen oberhalb von 14 bis 15 °C ein. Die volle Photosynthese benötigt sogar Temperaturen über 25 °C. Ein weiteres Indiz seines hohen thermischen Anspruchs ist die starke Frostempfindlichkeit. So können beispielsweise. schon ab -3 °C Blätter erfrieren (DIEPENBROCK et al. 2009). Mais als wärmeliebende C4-Pflanze zeigt sich in zahlreichen Studien als Gewinner des Klimawandels. Die erwarteten höheren Temperaturen dürften sich positiv auf den Maisanbau auswirken. Das projizierte wärmere Klima mit höheren Temperatursummen kann den Anbau spätreifender und ertragreicherer Sorten ermöglichen. Höhere Bodentemperaturen in den Frühjahrsmonaten können zu einer schnelleren Jugendentwick-

lung führen. Außerdem könnte durch höhere Temperaturen Körnermais in Regionen vordringen, in denen bisher nur der Anbau von Silomais möglich war. Aufgrund seiner hohen Temperaturverträglichkeit dürfte Hitzestress in Zukunft kein größeres Problem darstellen. Andere klimatische Extrema könnten allerdings zu größeren Problemen führen. Zum Beispiel kann die Kombination aus Trockenstress und hohen Temperaturen während der Blühphase zu einer schlechteren Befruchtung führen, was deutliche Ertragseinbußen mit sich bringen könnte. Auch Schädigungen der Pflanze selbst, beispielsweise durch Hagelschlag oder Windeinwirkung, können einen Fusariumbefall (Schimmelpilz) bewirken, wodurch die Toxinbelastung des Ernteprodukts erhöht wird. Eine größere Gefahr stellen zusätzlich Starkniederschläge und höhere Winterniederschläge dar, weil es hierdurch verstärkt in hügeligem Gelände zu einem höheren Bodenerosionsrisiko kommen könnte (EITZINGER et al. 2009).

Der Maisanbau findet fast flächenhaft in Rheinland-Pfalz statt. Deutlich auffallend ist die starke räumliche Abgrenzung von Körnermais, der aufgrund seines hohen thermischen Anspruchs nur in den klimatischen Gunsträumen (Südpfalz, Koblenzer Becken, Nahe) angebaut wird. Silomais hingegen wird in fast ganz Rheinland-Pfalz kultiviert. Die übrigen Maissorten werden nur sporadisch angebaut, wie in Karte 64 zu sehen ist.

Abb. 64: Räumliche Verteilung des Maisanbaus nach Sorten in Rheinland-Pfalz (LBD Rheinland-Pfalz)

Wasserversorgung auf Maisstandorten

Hinsichtlich ihrer Ausstattung gegenüber reduzierten Sommerniederschlägen verfügt ein Großteil der Maisanbauflächen (> 72 %) über eine mittlere Toleranz. Knapp 25 % sind schlecht ausgestattet und besitzen damit nur eine geringe Toleranz gegenüber erwarteten Sommertrockenheiten. Eine hohe Toleranz zeigt sich auf knapp 3 % der Flächen (siehe Abb 22).

Tab. 22: Toleranz der Maisstandorte gegenüber Trockenstress

Toleranzstufen	Bezeichnung	Fläche [in%]
0 -10	sehr gering	0.00
10 - 20		0.00
20 - 30	gering	0.77
30 - 40		24.01
40 - 50	mittel	46.96
50 - 60		25.38
60 - 70	hoch	2.87
70 - 80		0.00
80 - 90	sehr hoch	0.00
90 - 100		0.00

Auf den Maisstandorten verschlechtert sich die klimatische Wasserbilanz ähnlich drastisch wie bei den anderen untersuchten Kulturen. Aufgrund des flächendeckenden Anbaus von Mais in Rheinland-Pfalz, also auch in den Mittelgebirgsregionen, zeigt sich im Dreißig-Jahres-Zeitraum 1971-2000 eine vergleichsweise positive Verteilung der Anbauflächen in Bezug zu den hygrischen Verhältnissen. Diese verschlechtert sich in den beiden untersuchten Zukunftszeiträumen dann aber deutlich, so dass in der fernen Zukunft ein Großteil der Standorte (> 85 %) klimatische Wasserbilanzen während der Hauptvegetationsperiode von < -50 mm verzeichnet. Besonderes Augenmerk sollten in Zukunft die Körnermaisflächen erhalten, da diese in heute bereits eher trockenen Räumen (z. B. Südpfalz) kultiviert werden.

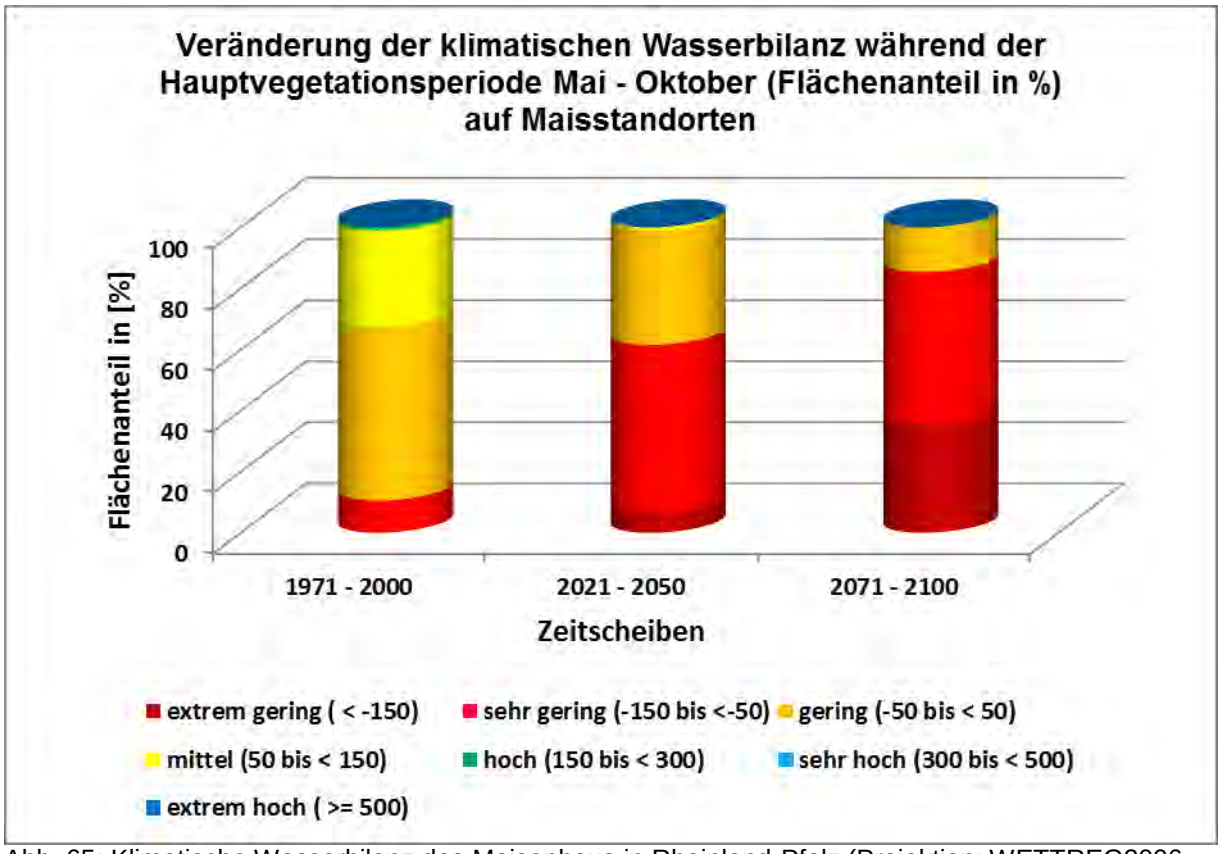


Abb. 65: Klimatische Wasserbilanz des Maisanbaus in Rheinland-Pfalz (Projektion: WETTREG2006 A1B-trocken)

8.6.5 Zuckerrübe

Die Zuckerrübe zählt zu den Fuchsschwanzgewächsen und hier zur Familie der *Chenopodiaceen* (Gänsefußgewächse) (KELLER 1999). Sie ist eine zweijährige Pflanze, bei der sich im ersten Wachstumsjahr nur der Rübenkörper und im zweiten Jahr die Samenträger entwickeln (HERRMANN & MEYER-ÖTTING 1981). In Rheinland-Pfalz wird die Zuckerrübe auf insgesamt 18.033 ha (Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz 2010) angebaut. Der Schwerpunkt des Anbaus liegt in Rheinhessen und der Pfalz (siehe Abb. 66).

Abb. 66: Zuckerrübenanbau in Rheinland-Pfalz (Datengrundlage: LBD Rheinland-Pfalz)

Die Zuckerrübe ist während ihrer gesamten Vegetationsperiode sehr stark witterungsabhängig. Der Jahresverlauf der Witterung mit Temperaturverlauf, Niederschlagsmenge und Niederschlagsverteilung hat neben den Standorteigenschaften (Boden etc.) den größten Einfluss auf den Rübenertrag. Die Rübe benötigt in 180 bis 220 Vegetationstagen eine Wärmesumme von 2500-2900 °C (RÖSTEL 1999). Neben der Temperatur entscheiden jedoch vor allem die Niederschlagsmenge sowie die Niederschlagsverteilung über Ertrag und Qualität der Zuckerrübe. Die Zuckerrübe besitzt nach HOFFMANN & MÄRLANDER 2001 einen geringen Transpirationskoeffizienten von 200 l/kg TM, hat aber aufgrund der hohen Biomasseerzeugung einen relativ hohen Wasserbedarf. Fehlender Niederschlag wird deshalb häufig zum ertragsbegrenzenden Faktor, was sich in niedrigen Zuckererträgen widerspiegelt. Während der Hauptwachstumsphase ist eine kontinuierlich hohe Wasserversorgung Voraussetzung für hohe Zuckerrübenerträge. In dieser Phase erträgt die Zuckerrübe jedoch auch kurzzeitige Trockenperioden. Infolge dessen kann das sog. ‚Schlafen‘ der Rübe aufgrund mangelnder Turgeszenz auftreten. Auf länger anhaltende Trockenheit reagiert sie allerdings mit dem Abwerfen älterer Blätter bzw. mit dem Welken der Rübenblätter. Welke Blätter werden ebenfalls abgeworfen und treiben auf Kosten des Zuckergehalts der Rübe neu aus, weshalb sich län-

gere Trockenheit negativ auf den Ertrag auswirkt (HANNEN 1992). Je besser die Zuckerrübe mit Wasser versorgt ist, desto besser kann sie grundsätzlich auch die übrigen Wachstumsfaktoren nutzen. Insgesamt löst der Faktor Witterung Ertragsschwankungen von bis zu 40-50 % aus (RÖSTEL 1999).

Im Folgenden sollen einige Ergebnisse der projektinternen Fallstudie von KREMER (2011) mit dem Titel: „***Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Zuckerrübenerträge in ausgewählten Regionen in Rheinhessen und der Pfalz***“ vorgestellt werden. Ziel der Untersuchung war es, den empirischen Zusammenhang zwischen Witterung bzw. Klima und den erzielten Zuckerrübenerträgen herzustellen. Im nächsten Schritt wurde die rezente Entwicklung analysiert und daraus eine mögliche zukünftige regionale Auswirkung mithilfe von Klimamodellen projiziert.

Für das Untersuchungsgebiet (Rheinhessen, Pfalz) konnte ein signifikanter Zusammenhang zwischen Zuckerrübenertrag und Witterung korrelationsanalytisch nachgewiesen werden. Um den Einfluss des Faktors Züchtung, welcher maßgeblich für den Produktionsfortschritt verantwortlich ist und somit den Zusammenhang zwischen Ertrag und Witterung bzw. Klima verfälschen würde, auszublenden, wurden die Erträge um den Züchtungsfortschritt bereinigt (Züchtungsfortschrittsbereinigung). Die Zuckerrübenerträge auf den landwirtschaftlichen Flächen der kreisfreien Städte Mainz, Worms und Frankenthal aus den Jahren 1951-2003 wurden mit ausgewählten Witterungsparametern korreliert. Zur Analyse der Häufigkeit zukünftig potentiell ertragsschwacher Jahre wurden verschiedene regionale Zukunftsprojektionen auf die Erfüllungshäufigkeit eines zweifaktoriellen, zuvor gewonnenen Fingerabdrucks hin untersucht.

Einfluss der Züchtung auf die Zuckerrübenerträge

Die Analysen zeigen, dass die durchschnittlichen Zuckerrübenerträge pro Hektar bezogen auf die Fläche der jeweiligen kreisfreien Stadt (siehe Abb. 67) zum einen durch enorme interannuelle Ertragsschwankungen gekennzeichnet sind, welche auf die Jahreswitterung zurückgeführt werden können. Zum anderen ist ein stark ausgeprägter Produktionsfortschritt feststellbar. Dieser beinhaltet die beiden Faktoren: veränderte Anbauverfahren und Züchtung (KREMER 2011). Durch verbesserte Anbauverfahren konnten die Erträge im Laufe der Zeit sukzessive gesteigert werden. Die Züchtung, welche am Produktionsfortschritt wohl den größten Anteil hat, brachte Sorten hervor, die ein breiteres Spektrum an Umweltbedingungen tolerieren sowie gegen Schädlinge toleranter bzw. resistenter sind und somit insgesamt ein gesteigertes Ertragspotenzial aufweisen (LOEL et al. 2011).

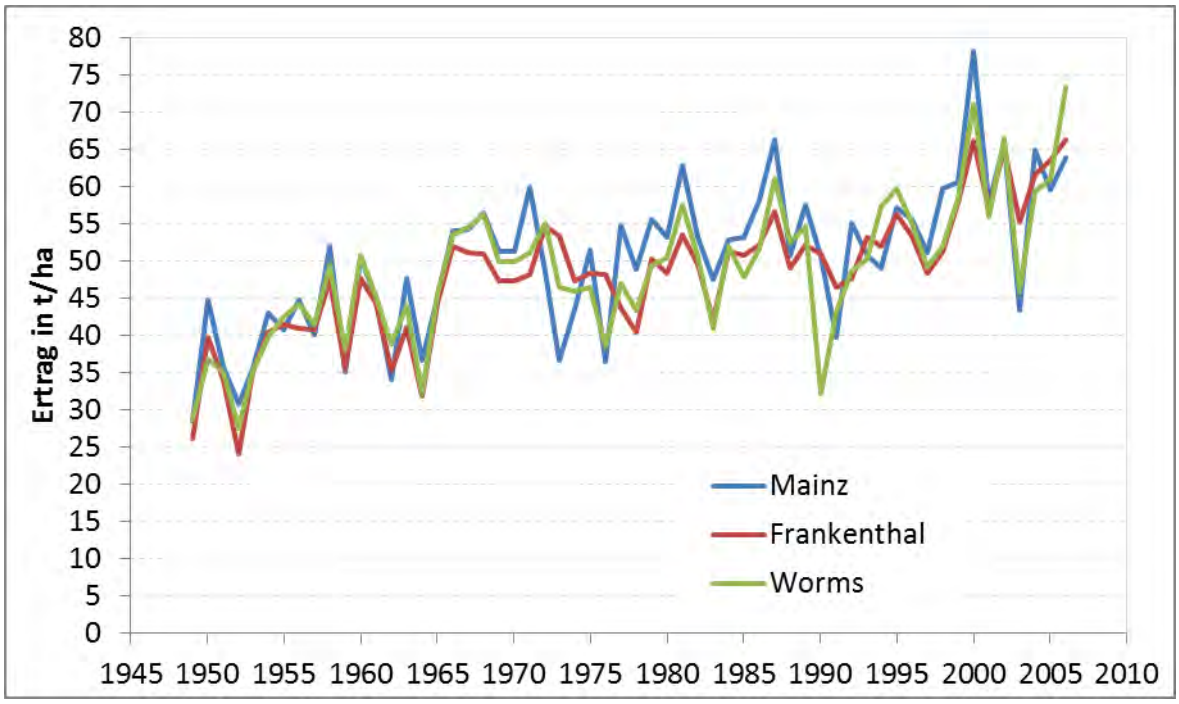


Abb. 67: Entwicklung der Zuckerrübenerträge in Mainz, Worms und Frankenthal (1949-2006). (Darst. nach KREMER 2011, Datengrundlage: Verband der Hessisch-Pfälzischen Zuckerrübenanbauer e.V. (1949-2006))

Da der Faktor Züchtung einen Ertragszuwachs generierte, der nicht durch klimatische Einflüsse bzw. eine veränderte Jahreswitterung erklärt werden kann, muss aus dem real erzielten durchschnittlichen Hektarertrag der züchterische Fortschritt durch die sog. Züchtungsfortschrittsbereinigung (Methode nach KREMER 2011) herausgerechnet werden. Des Weiteren müsste der real erzielte Ertrag vom anbautechnischen Fortschritt bereinigt werden, um ausschließlich Rückschlüsse auf den Einfluss des Klimas bzw. der Witterung auf die Erträge ziehen zu können. Zur Größe des anbautechnischen Fortschritts lagen jedoch keine Untersuchungen vor, sodass die Erträge davon nicht bereinigt werden konnten. Da durch den anbautechnischen Fortschritt die Erträge tendenziell gesteigert werden konnten, ist davon auszugehen, dass der Züchtungsfortschrittsbereinigungsfaktor um den Faktor des anbautechnischen Fortschritts erhöht werden müsste und somit die bereinigten Erträge etwas niedriger ausfallen würden.

LOEL et al. (2011) ermittelten am Institut für Zuckerrübenforschung in Göttingen in einem vollständig randomisierten Feldversuch, bei dem Sorten aus den Zulassungsjahren 1964 bis 2003 angebaut wurden, einen Zuchtfortschritt des bereinigten Zuckerertrages von 0,9 % pro Jahr. KOCH (2006, zit. nach: LOEL et al. 2011) stellte anhand von Feldversuchen, durchgeführt an drei Standorten mit Sorten der Zulassungsjahre 1966 bis 2005, einen Zuchtfortschritt von 0,75 % pro Jahr fest. Im Rahmen der Studie von KREMER (2011) wurde der erzielte durchschnittliche Massenertrag züchtungsbereinigt und der daraus resultierende züchtungsbereinigte Ertrag anschließend mit den Witterungsfaktoren korreliert. LOEL et al. (2011) und KOCH (2006) geben in ihren Untersuchungen den Zuchtfortschritt bezogen auf den bereinigten Zuckerertrag an. Da jedoch der gemessene durchschnittliche prozentuale Zuckergehalt

in den Zuckerrübenfabriken des Untersuchungsgebietes im Untersuchungszeitraum, abgesehen von den normalen, witterungsbedingten interannuellen Schwankungen, auf einem nahezu unveränderten Niveau blieb, bleibt die Proportionalität der Zuordnung ‚Bereinigter Zuckerertrag - Masseertrag' gewahrt. Somit können die von LOEL et al. (2011) und KOCH (2006) angegebenen Zuchtfortschritte auch zur Züchtungsfortschrittsbereinigung der Massenerträge verwendet werden.

Mithilfe der folgenden negativen Zinseszinsformeln wurden die real erzielten durchschnittlichen Hektarerträge um 0,9 % bzw. 0,75 % vom Zuchtfortschritt bereinigt (Methode nach KREMER 2011):

$$0{,}75\ \%: E_z = E * (1 - 0{,}75/100)^n$$

$$0{,}9\ \%: E_z = E * (1 - 0{,}9/100)^n$$

E_z = züchtungsbereinigter Ertrag; E = real erzielter Durchschnittsertrag;
n = Anzahl der geltenden Jahre

Der real erzielte Ertrag wird mit dieser Methode auf den Ertrag, wie er 1949 (Basisjahr der Züchtungsfortschrittsbereinigung) ohne züchterischen Fortschritt wohl erzielt worden wäre, zurückgerechnet. Die Züchtungsfortschrittsbereinigung, dargestellt am Beispiel Mainz, bewirkt durch die beschriebene mathematische Vorgehensweise, dass die züchtungsfortschrittsbereinigten Erträge deutlicher geringer ausfallen als die real erzielten Erträge (vgl. Abb. 68).

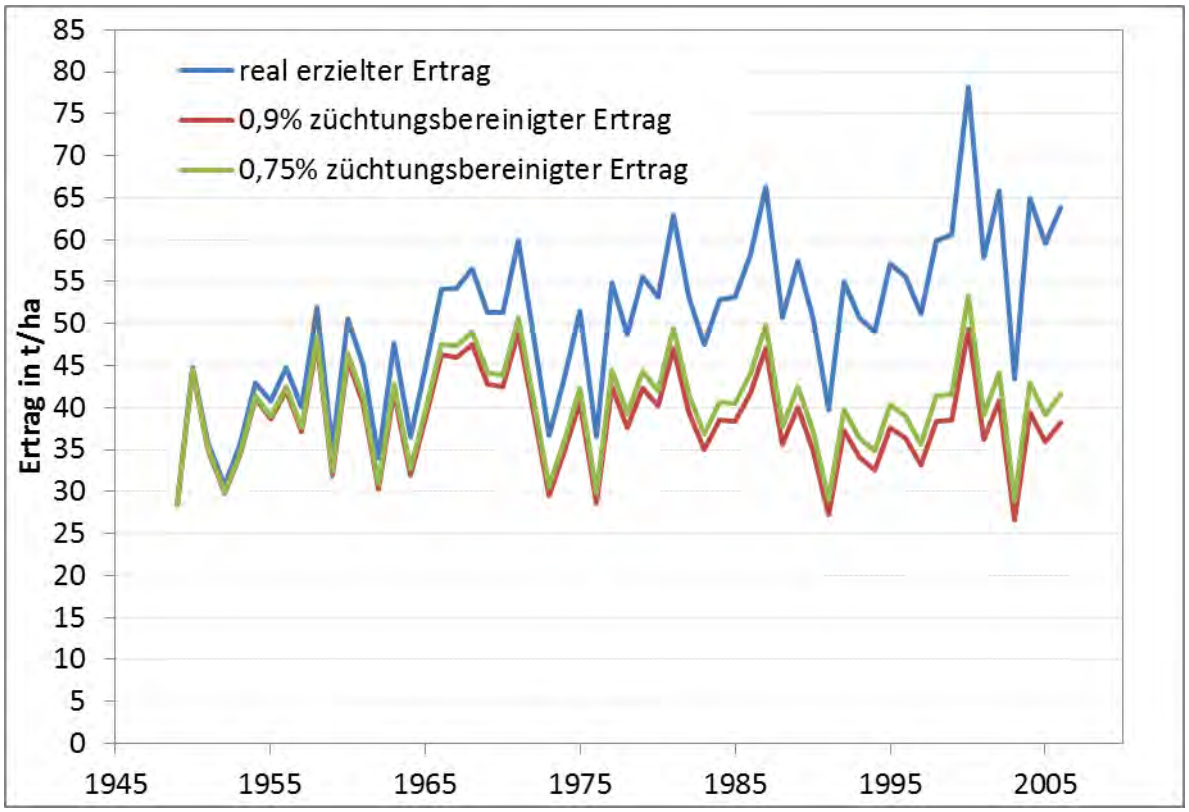


Abb. 68: Real erzielter Ertrag, 0,75 % züchtungsbereinigter Ertrag, 0,9 % züchtungsbereinigter Ertrag in Mainz 1949-2006 (Darst. nach KREMER 2011, Datengrundlage: Verband der hessischpfälzischen Zuckerrübenanbauer e.V.).

Einfluss von Temperatur und Niederschlag auf den Ertrag

Um den Einfluss des Faktors Klima bzw. der Jahreswitterung auf den Ertrag in Rheinhessen und der Pfalz zu untersuchen, wurde in der Studie von KREMER (2011) eine Vielzahl an Korrelationen der Erträge mit den gemessenen Klimaelementen der Stationen Mainz, Worms und Frankenthal durchgeführt. Die züchtungsbereinigten Erträge korrelieren dabei deutlich höher mit den einzelnen Witterungsparametern. Diese Feststellung legitimiert die Züchtungsfortschrittsbereinigung der real erzielten Erträge und zeigt, welche Fehlschlüsse gezogen werden können, würde der Produktionsanstieg ausschließlich auf klimatische Einflüsse zurückgeführt werden.

Der Niederschlag korreliert in allen Abschnitten der Vegetationsperiode positiv mit dem real erzielten als auch mit den züchtungsbereinigten Erträgen. Die Erträge sind tendenziell umso höher ausgefallen, je höher die Niederschlagssumme im betrachteten Jahresabschnitt war und umgekehrt. Die höchsten Zusammenhänge der Erträge mit der über einen mehrmonatigen Zeitraum erzielten Niederschlagssumme konnten für die Hauptwachstumsphase der Zuckerrübe zwischen Juni bis September festgestellt werden. Hier zeigten sich Korrelationskoeffizienten von bis zu 0,77, bei dem um 0,75 % züchtungsbereinigten Ertrag in Mainz (siehe auch folgende Abbildung). Die Korrelation der Niederschlagssumme der Monate Juni bis August mit dem 0,9 % züchtungsbereinigten Ertrag ergab folgende Koeffizienten: Mainz: 0,75;

Worms: 0,62; Frankenthal: 0,56. Es handelt sich hierbei um sehr hohe Werte im Bereich Pflanzenbau. Eine ausreichende Wasserversorgung während der Hauptwachstumsphase, vor allem im Juli und August, ist für die Ertragsbildung enorm wichtig, da die Pflanze in diesem Vegetationsabschnitt u. a. zur Aufnahme von Nährstoffen für das Wachstum viel Wasser braucht. Zudem sind die unproduktive sowie die potentielle Verdunstung wegen der hohen Temperaturen meistens hoch, wodurch nur ein Teil des Niederschlags pflanzenverfügbar ist. Die Niederschlagskoeffizienten sind für Mainz am höchsten, gefolgt von Worms und Frankenthal. Die Differenz ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass in Worms etwa 20 % und in Frankenthal sogar nahezu 100 % der Anbaufläche beregnungsfähig sind. In Mainz hingegen wird die Zuckerrübe kaum bis gar nicht künstlich bewässert.

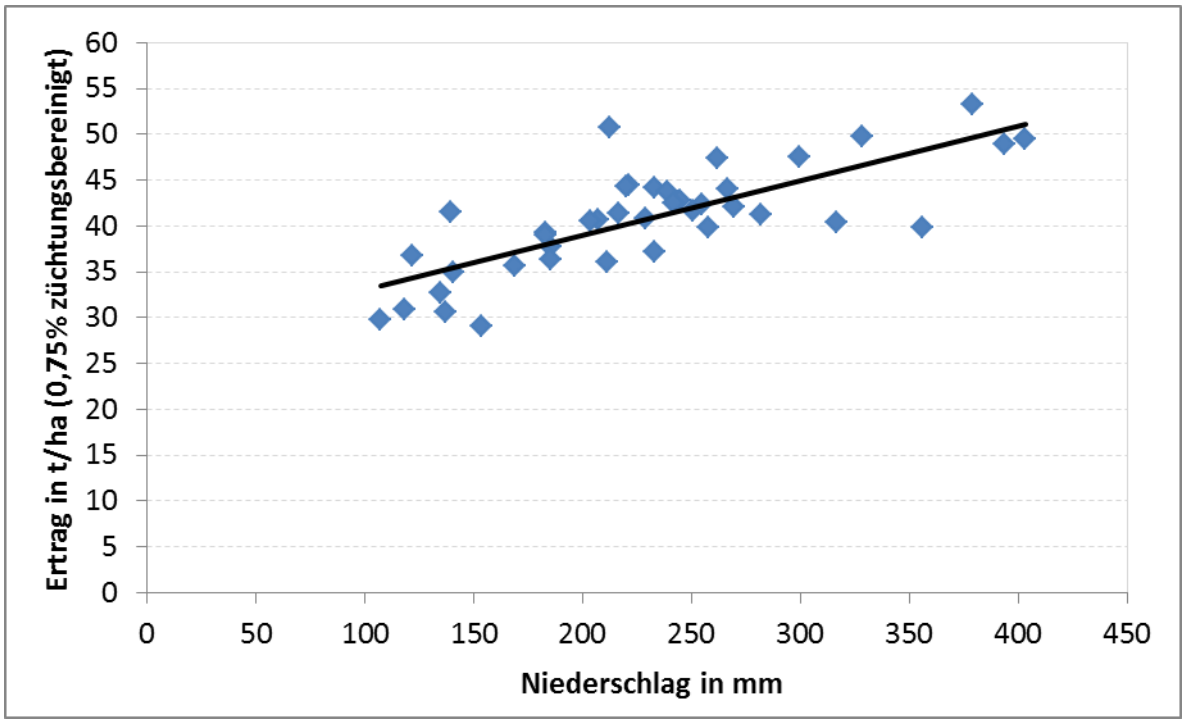


Abb. 69: Zusammenhang des um 0,75 % züchtungsbereinigten Ertrags (t/ha) und der Niederschlagssumme (in mm) von Juni bis September in Mainz 1961-2000, Darstellung nach KREMER (2011), Datengrundlage: Verband der hessisch-pfälzischen Zuckerrübenanbauer e.V.; DWD).

Im Gegensatz zu den Niederschlagssummenwerten korrelieren die Temperatursummenwerte bezogen auf die gleichen Jahresabschnitte nicht so hoch mit den Erträgen. Zudem ergeben alle Korrelationen der züchtungsbereinigten Erträge mit Temperatursummen einen negativen Korrelationskoeffizienten. Das bedeutet, dass die Erträge tendenziell umso niedriger ausfielen, je höher die Temperatursummen über den betrachteten Jahresabschnitt waren. Zu begründen ist dies mit der Überschreitung der von RÖSTEL (1999) angegebenen optimalen Wärmesumme von 2500-2900 K zwischen Aufgang und Ernte der Zuckerrübe im Untersuchungsgebiet (siehe auch folgende Abbildung).

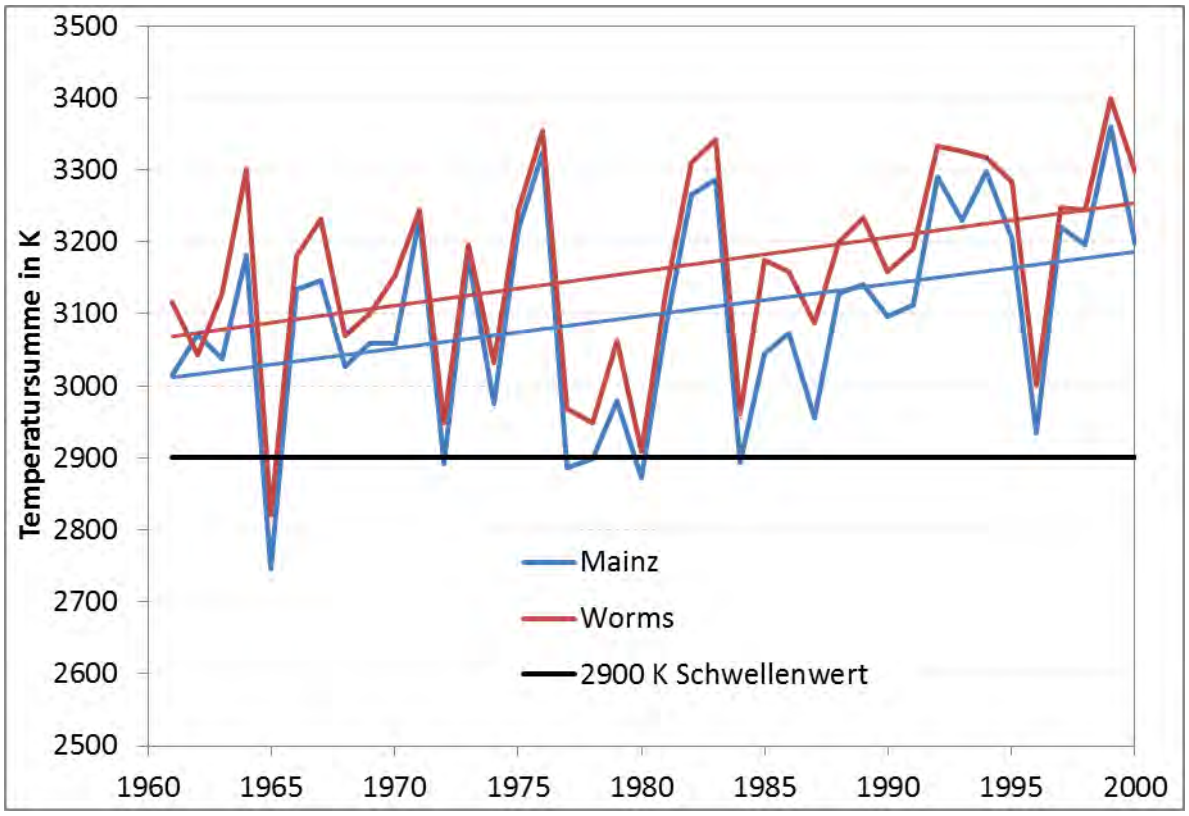


Abb. 70: Tagesmitteltemperatursumme über die Vegetationsperiode 1961-2000 in Mainz und Worms; durchgezogene, farbige Linien: Lineartrends; schwarze durchgezogene Linie: 2.900 K Schwellenwert nach RÖSTEL (1999), Darstellung nach KREMER (2011), Datengrundlage: DWD

Die Korrelationen der Tagesmaximumtemperatursumme der Monate Juli und August mit dem 0,9 % züchtungsbereinigten Ertrag ergab in allen drei untersuchten Gebieten die höchsten Korrelationskoeffizienten: Mainz: -0,54; Worms: -0,56; Frankenthal: -0,44. Insgesamt korrelierten die gebildeten Temperatursummen der Hauptwachstumsmonate Juni bis August am höchsten mit den Ertragskennzahlen. Umso stärker speziell in dieser Phase der Optimumsbereich überschritten wird, desto größer wird der auf die Pflanze wirkende Temperaturstress mit negativen Auswirkungen auf die Ertragsbildung.

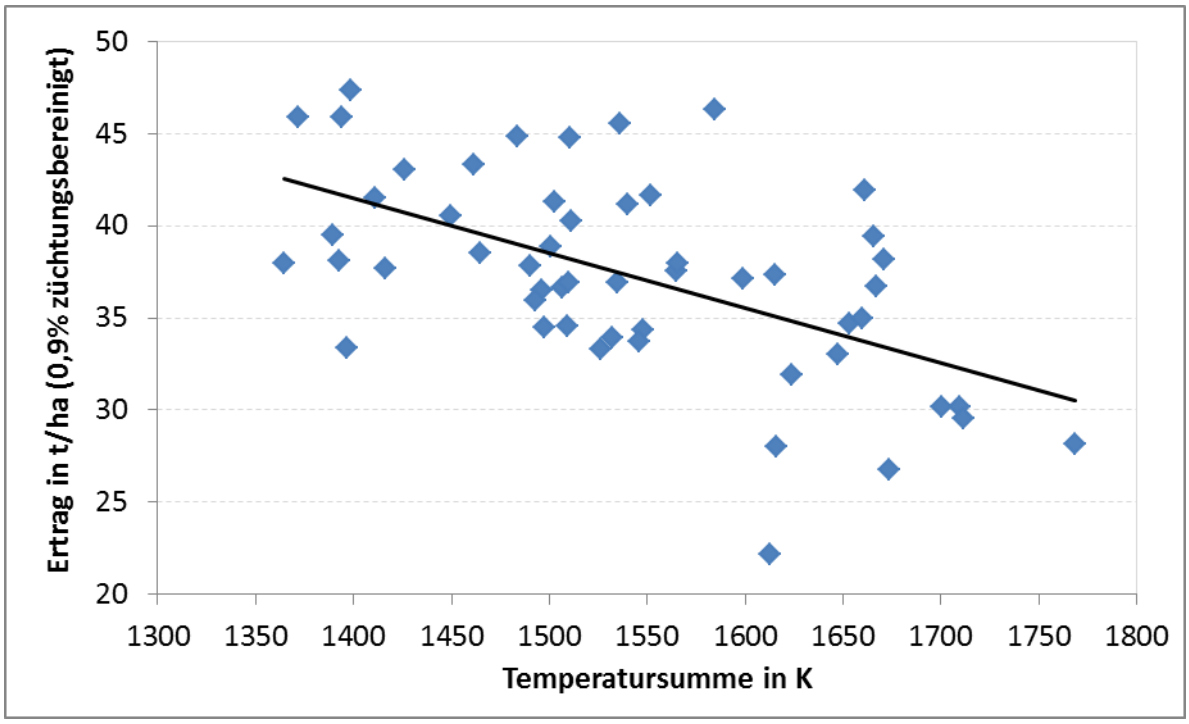


Abb. 71: 0,9 % züchtungsbereinigter Ertrag in Abhängigkeit von der Tagesmaximumtemperatursumme der Monate Juli plus August in Worms 1951-2003 (Darst. nach KREMER 2011, Datengrundlage: Verband der hessisch pfälzischen Zuckerrübenanbauer e.V., DWD

Entwicklung eines Fingerabdrucks zur Ermittlung zukünftiger potentiell ertragsschwacher Jahre

Bereits in der Vergangenheit zeigte der stattfindende Klimawandel negative Auswirkungen auf die erzielten Zuckerrübenerträge. Auch in Zukunft könnten bei Eintreten der zugrunde gelegten Szenarien, welche einen deutlichen Niederschlagsrückgang in den Sommermonaten und höhere Temperaturen berechnen, verstärkt ertragsschwache Jahre auftreten. Für eine bessere Zukunftsabschätzung wurde ein Fingerabdruck für potentiell ertragsschwache Jahre innerhalb der Studie entwickelt (KREMER 2011).

Zunächst wurden hierzu jene Jahre als ertragsschwach eingestuft, in denen ein 0,9 % züchtungsbereinigter Ertrag von unter 32 t/ha erzielt wurde. Die Auswertung beschränkt sich auf die beiden Stationen Mainz und Worms, da in Frankenthal nahezu 100 % bewässert wird, wodurch Ertragseinbußen besser kompensiert werden konnten. In Mainz trifft dies im Zeitraum 1961-2000 auf sechs, in Worms im Zeitraum 1951-2003 auf acht Jahre zu. Anschließend wurden die hoch mit dem 0,9 % züchtungsbereinigten Ertrag korrelierenden Witterungsparameter der Hauptwachstumsphase hinsichtlich markanter Schwellenwerte untersucht, an deren Unter- bzw. Überschreitung die geringen Erträge festgemacht werden konnten. Die Analyse ergab für Mainz, dass mit Ausnahme von 1991 in ertragsschwachen Jahren die Niederschlagssumme der Monate Juni-August kleiner war als 110 mm. Zudem weisen alle ertragsschwachen Jahre mit Ausnahme von 1962 (1174 K) in den Monaten Juli und August eine Tagesmitteltemperatursumme von über 1200 K auf. Die multiple Regression beider

Parameter mit dem um 0,9 % züchtungsbereinigten Ertrag ergab für Mainz einen multiplen Korrelationskoeffizienten von 0,75, was einem Bestimmtheitsmaß von 0,57 entspricht. Die genannten Schwellenwertunter- bzw. -überschreitungen konnten auch in Worms während ertragsschwacher Jahre festgestellt werden, sodass sie auch dort zur Charakterisierung zukünftig potenziell ertragsschwacher Jahre herangezogen wurden.

„Fingerabdruck“ für potenziell ertragsschwache Jahre (nach KREMER 2011)

„Fingerabdruck“	N (Juni-August) < 110 mm
	T (Juli/August) > 1200 K

Im Zeitraum 1961-2006 wurde der Fingerabdruck für Mainz sechsmal erfüllt. Bezogen auf 100 (60) Jahre entspräche dies einer Erfüllungshäufigkeit von 13 (7,8 %?). Zwischen 1951-2003 wurde der Fingerabdruck in Worms siebenmal erfüllt, was auf 100 (60) Jahre hochgerechnet einer Erfüllungshäufigkeit von 13,7 (8,2 %?) entspricht.

Tab. 23: Erfüllungshäufigkeit des Fingerabdrucks für potenziell ertragsschwache Jahre pro Dekade in Mainz und Worms (Darst. nach KREMER 2011, Projektionen WETTREG2006 und STAR)

Dekade	**WETTREG 2006 A1B-trocken**		**WETTREG 2006 A1B-normal**		**STAR II A1B-trocken**		**STAR II A1B-normal**	
Station	**Mainz**	**Worms**	**Mainz**	**Worms**	**Mainz**	**Worms**	**Mainz**	**Worms**
2001 - 2010	3	2	1	2	2	2	2	1
2011 - 2020	5	1	4	2	0	1	3	2
2021 - 2030	5	2	0	1	1	1	1	4
2031 - 2040	0	2	1	1	2	3	1	1
2041 - 2050	4	5	1	4	2	4	3	4
2051 - 2060	6	2	6	2	5	3	3	0
2061 - 2070	5	3	7	3				
2071 - 2080	6	3	4	5				
2081 - 2090	5	3	4	3				
2091 - 2100	5	4	7	3				
∑	**44**	**27**	**35**	**26**	**12**	**14**	**13**	**12**

Für die zweite Hälfte von 2051-2100 des Jahrhunderts werden durch die beiden WETTREG2006-Projektionen für mehr als jedes zweite Jahr Witterungsverläufe für Mainz projiziert, die auf potentiell ertragsschwache Jahre schließen lassen. Im Modelllauf WETTREG2006 A1B-trocken wird eine Erfüllungshäufigkeit des Fingerabdrucks von 44 für das 21. Jahrhundert simuliert. Im Vergleich zum Referenzzeitraum bedeutet dies eine Häufigkeitszunahme um mehr als das Dreifache.

Ähnliche Tendenzen zeigen sich auch für Worms. Die Kriterien des Fingerabdrucks werden in allen vier untersuchten Datenreihen durchweg häufiger erfüllt als im Referenzzeitraum. In den WETTREG2006-Modellläufen wird der Fingerabdruck 27 mal (A1B-trocken) bzw. 26 mal (A1B-normal) und damit im Vergleich zu Mainz deutlich seltener erfüllt. Speziell gegen Ende des 21. Jahrhunderts ist laut den WETTREG2006-Szenarien in Worms mit weniger potentiell ertragsschwachen Jahren im Vergleich zu Mainz zu rechnen, was auf die höheren für Worms projizierten Niederschlagsmengen zurückzuführen ist. Im Vergleich zum Referenzzeitraum werden durch die WETTREG2006-Modelläufe doppelt so viele Jahre als potentiell ertragsschwach ausgewiesen, sodass bezogen auf das gesamte 21. Jahrhundert etwa jedes vierte Jahr als potentiell ertragsschwach – bei steigender Tendenz im Verlauf des Jahrhunderts – simuliert wird. Auch bei den beiden ausgewählten STAR-Szenarien, welche bis in das Jahr 2060 reichen, zeichnet sich eine steigende Tendenz potentiell ertragsschwacher Jahre ab.

Abschlussbetrachtungen zur Zuckerrübe (nach KREMER 2011)

Es konnte gezeigt werden, dass die Ausprägung der Witterungsparameter Temperatur und Niederschlag in den Monaten Juni, Juli und August – der Hauptwachstumsphase der Zuckerrübe – den größten Teil der Ertragsvarianz erklären. Der Einfluss der untersuchten Witterungsparameter auf den Ertrag ist in Mainz, Worms und Frankenthal unterschiedlich stark ausgeprägt. Zu einem kleinen Teil ist dies auf das unterschiedliche Mesoklima in Mainz und Worms bzw. Frankenthal zurückzuführen. Einen deutlich größeren Anteil daran hat die künstliche Bewässerung, durch die der Zusammenhang der natürlichen Witterungsfaktoren mit dem Ertrag verfälscht wird. Die steigenden Zuckerrübenerträge sind auf die neueren Anbaumaßnahmen und den züchterischen Fortschritt zurückzuführen. Durch die entwickelte Züchtungsfortschrittsbereinigung konnte gezeigt werden, dass die Zuckerrübenerträge ohne Züchtungsfortschritt in den letzten Jahren bereits zurückgegangen wären. Vor allem in Jahren mit geringen Niederschlägen und hohen Temperaturen während der Hauptvegetationsperiode Juni-August zeigten sich deutliche Ertragseinbußen.

Die Zukunft zeigt eine deutliche Verschlechterung der klimatischen Bedingungen für die Zuckerrübe. Für ertragsschwache Jahre konnte ein Fingerabdruck erstellt werden, welcher bei Eintreten der zugrunde gelegten Simulationen in Zukunft verstärkt erfüllt werden könnte. Dies könnte auch in Zukunft verstärkt zu Ertragseinbußen durch Trockenstress und zu hohen Temperaturen führen. Am Beispiel Frankenthal konnte gezeigt werden, dass durch künstliche Bewässerung die Erträge gesichert und in gewissen Grenzen somit die negativen Auswirkungen des Klimawandels kompensiert werden können. Dementsprechend wird wahrscheinlich die künstliche Bewässerung für die Ertragssicherung in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Ein Ausbau der Bewässerungskapazitäten in Gebieten, in denen noch Potenzial vorhanden ist, erscheint folglich sinnvoll. Auch trockenstresstolerante Sorten können zur Ertragssicherung beitragen.

8.6.6 Fazit für den Ackerbau

Bei Eintreten der zugrunde gelegten Klimaszenarien könnten vor allem die reduzierten Sommerniederschläge und die höheren Temperaturen mit gleichzeitig größerer Verdunstung eine Herausforderung für den Ackerbau darstellen. Besonders vulnerabel werden sich Regionen und Standorte zeigen, welche in niederschlagsarmen Perioden nur bedingt pflanzenverfügbares Wasser bereitstellen können. Dies sind verstärkt Standorte mit schlechten Böden, hohen Verdunstungsraten durch intensive Sonneneinstrahlung und Verlustlagen, deren Wasseraustrag größer als der Eintrag ist. Vulnerabel sind weiterhin Standorte, welche bereits heute über schlechte klimatische Wasserbilanzen in den Sommermonaten verfügen. Dies sind hauptsächlich Standorte in den Leelagen der Mittelgebirge, wie beispielsweise in Rheinhessen, der Pfalz oder im Naheeinzugsgebiet. Hinsichtlich ihrer Trockenstressempfindlichkeit sind die Winterkulturen von den Sommerungskulturen zu unterscheiden. Prinzipiell ist die Vulnerabilität der Winterkulturen gegenüber Trockenstress weniger stark ausgeprägt, da sie die Winterfeuchte in den Böden besser nutzen können. Bei den Sommerkulturen muss wiederum unterschieden werden zwischen Sommerkulturen mit geringen Wärmeansprüchen und verstärkter Trockenstressempfindlichkeit sowie Wärme liebenden Kulturarten. Sommerkulturen mit geringen Wärmeansprüchen könnten verstärkt unter Wassermangel und Hitzestress leiden, falls keine Bewässerung vorgenommen wird. Hierzu zählen u. a. Sommergetreide, Zuckerrüben und Kartoffeln. Weniger empfindlich gegenüber steigenden Temperaturen und Hitzestress sind Wärme liebende Pflanzen wie Mais, Sojabohne oder Sonnenblume, allerdings nur bei ausreichender Wasserversorgung (EITZINGER et al. 2009). Insgesamt dürfte bei Eintreten der Klimaszenarien der Wasserbedarf der einzelnen Kulturen deutlich ansteigen, weshalb mit einer zunehmenden Bewässerung zu rechnen ist. Diese könnte auch Kulturen betreffen, welche heute noch nicht bewässert werden. Als besonderer Gewinner des Klimawandels könnte sich der Mais als C_4-Pflanze erweisen. Durch die höheren Temperaturen könnte es in Zukunft möglich sein, spätreifende und ertragreichere Sorten anzubauen. Außerdem ist es denkbar, dass sich durch die höheren Temperaturen der Anbau von Körnermais ausweitet (EITZINGER et al. 2009). Dieser wird unter den aktuellen klimatischen Verhältnissen nur in den Gunstregionen der größeren Täler angebaut. Im Großteil der rheinland-pfälzischen Maisstandorte überwiegt der Anbau von Silomais, da hier die eigentliche Kornreife nicht abgewartet werden muss. Auch im Ackerbau könnten sich durch die veränderten Klimaverhältnisse verstärkt Schädlinge und Krankheiten ausbreiten. Probleme könnten sich durch neue Schädlinge, höhere Überwinterungsraten von Schädlingen und eine raschere Ausbreitung ergeben (EITZINGER et al. 2009). In den Wintermonaten könnten die veränderten klimatischen Verhältnisse ebenfalls zu Änderungen führen. Hier sind insbesondere die höheren Temperaturen zu nennen, welche bei Wintergetreide verstärkt zu Vernalisationsproblemen führen könnten. Für die Zukunft wird beispielsweise für Winterweizen an allen untersuchten Standorten ein häufiges Unterschreiten der für das Schossen und Blühen im Frühjahr benötigten 40 Tage mit Temperaturen zwischen 0-5 °C projiziert. Dies könnte verstärkt zu einer verkürzten Kornfüllungsphase führen und damit ertragsmindernde Folgen haben. Hiervon könnten als erstes die thermischen Gunsträume der Täler und in der ferneren Zukunft auch höher gelegene Anbaugebiete in den Mittelgebirgsregionen betroffen sein.

9 Diskussion

Im folgenden Abschnitt sollen die Methoden und Ergebnisse der Arbeit diskutiert werden. Diese gliedern sich in die beiden Bereiche der standortbezogenen Untersuchungen und der auf Zeitreihen basierenden Klimadatenanalysen. Die standortbezogenen Analysen bauen hierbei auf hochauflösenden Geodaten auf (Teil)-Flurstücksbasis und auf räumlich geringer auflösenden interpolierten Klimadaten (1 x 1 km) auf. Die Zeitreihenanalysen stützen sich auf Klimazeitreihen an ausgewählten kulturspezifisch repräsentativen Klimastationen.

9.1 Aufbau einer Geodatenbasis (ALK++)

Zur Gewinnung flächenhafter, auf Rheinland-Pfalz bezogener Klimaaussagen steht die Einbindung von hochauflösenden Geodaten und interpolierten räumlich geringer auflösenden Klimadaten im Vordergrund. Die Entwicklung einer Möglichkeit zur automatisierten Verarbeitung hochauflösender, d. h. in diesem Falle flächenscharfer Geoinformationen in überregionaler bzw. landesweiter Ausdehnung stellt einen entscheidenden Schritt in der vorliegenden Arbeit dar. Landesweite Betrachtungen können nun neben Analysen für sehr kleine räumliche Einheiten auf derselben Datengrundlage stattfinden. Eine Konzentration auf Beispielregionen, die aus Gründen der Handhabbarkeit der Datensätze und der Menge der Daten erfolgen müsste, konnte so entfallen. Die Aussagefähigkeit und Wirklichkeitsnähe der durchgeführten Geodatenanalysen nimmt dadurch wesentlich zu.

Jede Geodatenanalyse ist nur so gut wie Ihre Datengrundlage. Für die hier durchgeführten Analysen wurden die in Auflösung und Qualität besten, während der Bearbeitung verfügbaren Basisdaten verwendet. Erweiterte und verbesserte Messungen, höher auflösende digitale Geländemodelle und neuere Klimadaten werden in Zukunft die Eigenschaften von Boden, Klima und Relief noch besser wiedergeben, so dass der jetzige Stand der Arbeiten bei der Charakterisierung der landwirtschaftlichen Nutzflächen nur einen Zwischenstand darstellen kann. Voraussetzung für eine weitere Verbesserung der Datengrundlagen im landwirtschaftlichen Bereich ist vor allem eine konsequente Nachführung der bestehenden Daten.

Die Konzentration auf das ALK-Teilflurstück als Basisgeometrie der Analysen schafft einen Bezugsrahmen mit Aussagefähigkeit für die landwirtschaftliche Praxis. Gleichwohl bedingt sie unter Umständen, insbesondere bei der Einarbeitung von Rasterdaten, eine Verallgemeinerung und damit einen Informationsverlust am Standort. Alle nach der ALK (Folie 21, „tN“) als landwirtschaftliche Flächen ausgewiesenen Standorte konnten mit hochauflösenden Re-

liefaussagen ausgestattet werden. Hierzu zählen beispielsweise. Hangneigung [°], Höhe über NN [m], relative Höhe [m], topographische Einstrahlung [kWh/m²], topographischer Feuchteindex, nutzbare Feldkapazität [mm] und weitere wichtige Standort charakterisierende Größen. Diese Informationen konnten u. a. zur Gewinnung eigens entwickelter Indizes verwendet werden.

9.2 Standortindex Basistoleranz

Wie im Methodenteil beschrieben, soll der Standortindex Basistoleranz die Eigenschaften eines Standortes zusammenführen, die unabhängig von tatsächlichen oder projizierten Klimaverhältnissen seine Fähigkeit beschreiben, Perioden mit geringen Niederschlägen zu überbrücken. Er basiert auf den zugrunde gelegten Standortparametern topographische Einstrahlung, topographischer Feuchteindex und der nutzbaren Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraumes. Der Index macht Standorte untereinander vergleichbar und ermöglicht es, die naturräumlichen Gegebenheiten von Räumen in Bezug auf die erwartete Klimaerwärmung einzuschätzen. Gegenstand der Analyse war hierbei ein Gesamtüberblick über alle landwirtschaftlich genutzten Parzellen in Rheinland-Pfalz und eine individuelle kulturspezifische Betrachtung der wichtigsten in Rheinland-Pfalz kultivierten Anbauarten.

Die Ergebnisse einer landesweit durchgeführten Analyse zur Basistoleranz der landwirtschaftlichen Nutzflächen zeigen, dass nach der vorgenommenen Klassifizierung ein Großteil der Flächen in Rheinland-Pfalz eine mittlere bis gute Fähigkeit besitzt, Trockenperioden zu überbrücken. 8 % der Flächen haben eine eher ungünstige naturräumliche Ausstattung mit weniger als 40 Indexpunkten. Der Index liefert hier erste Aussagen über vulnerable Bereiche. Mit ihm ist es möglich, Räume zu markieren und zu quantifizieren, in denen es in Zukunft besonders zu Problemen mit Wasserstress kommen kann.

In einem zweiten Schritt diente der Standortindex Basistoleranz zur Abschätzung der Toleranz wichtiger Kulturen gegenüber Trockenperioden. Dies wurde durch die Einbindung und Verschneidung des ALK-Datensatzes mit ebenfalls hochauflösend vorliegenden Anbaudaten des integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems (InVeKoS) ermöglicht. Die kulturspezifischen Toleranzen der einzelnen Kulturen können im Ergebnisteil ausführlich eingesehen werden.

Die auf den ersten Blick unspezifische Aussage des Toleranzindex gewinnt bei näherer Betrachtung an Tiefe, wenn sie in Bezug zu projizierten Klimadaten gesetzt wird. Mit dem Standortindex Basistoleranz wird keine Modellierung betrieben, sondern die Koinzidenz relevanter Einflüsse realitätsnah angezeigt und verglichen. Es wird nicht auf Zukunftsprojektionen mit einer großen Spannweite möglicher Realisationen zurückgegriffen.

9.3 Standortklimaindex

Der sogenannte Standortklimaindex stellt eine Weiterentwicklung des Standortindex Basistoleranz, dar. Die hier berücksichtigten interpolierten Klimadaten liegen auf Basis eines flächendeckenden 1 x 1 km auflösenden Rasters vor. Die interpolierten Klimawerte wurden hier

auf hochauflösende Geometrien heruntergebrochen. Die Werte der Zellen repräsentieren den Wert des Mittelpunktes der jeweiligen Zelle. Die Nutzung dieser Klimadaten wirft u. a. die Frage nach der Repräsentativität des jeweiligen Wertes für den ihm zugewiesenen Raum auf (DALY 2006). Je nach Variabilität des Reliefs innerhalb der dem jeweiligen Wert zugewiesenen Gitterzelle können mehr oder weniger große räumliche Schwankungen innerhalb des Raumes einer Gitterzelle auftreten. Diese Variationen ergeben sich beispielsweise durch unterschiedliche Einstrahlungsverhältnisse auf Sonn- und Schattlagen, die Höhenlage, unterschiedliche Hangneigungen oder durch lokale Kaltluftdynamik mit der Bildung von Kaltluftabflüssen oder -seen. Die Aussagefähigkeit eines Wertes kann in Fällen mit ausgeprägter Reliefstruktur daher eingeschränkt sein (DALY 2006; STOCK, mündl. 2009). Interpolierte Klimadaten wurden neben der Berechnung des Standortklimaindex zur Errechnung des flächenhaften Huglin-Index und zur Bestimmung der Winterfrostgefährdung im Weinbau, sowie zur Ermittlung des Vegetationsbeginns, -endes und der –dauer im Grünland angewendet. Im Fokus der flächenhaften Klimadatenauswertungen stand jedoch die Bestimmung der klimatischen Wasserbilanz während der Hauptvegetationsperiode (Anfang Mai bis Ende Oktober). Als wichtige Größe beinhaltet die klimatische Wasserbilanz neben dem Niederschlag die Evaporation. Zur Berechnung der Verdunstung wurde im Kontext dieser Arbeit auf das Konzept der sogenannten Grasreferenzverdunstung nach ALLEN et al. (1998) zurückgegriffen. Es definiert das Verdunstungspotenzial über die Standardvegetation einer reichlich mit Wasser versorgten Grasfläche (idealisierter Grasbestand) und wird auf Basis der sog. Penman-Monteith–Gleichung errechnet. Auf den Einbezug eines kulturspezifischen Vegetationskoeffizienten kc wurde in dieser Arbeit verzichtet, so dass in der ausgewählten Periode (HVP) die realistischen Vegetationseigenschaften und damit auch die Verdunstungsraten bestimmter Kulturen, insbesondere der Ackerkulturen, von den hier angenommenen standardisierten Verhältnissen eines idealisierten Grasbestandes abweichen können. Ziel dieser Arbeit ist nicht die exakte Bestimmung der realen kulturspezifischen Verdunstung, sondern die Abschätzung von möglichen klimawandelbedingten relativen Änderungen der Wasserversorgung in der Landwirtschaft von heutigen zu zukünftigen Klimaverhältnissen.

Ein zusätzliches Problem ergibt sich durch die Einbeziehung nur einer von vielen möglichen klimatischen Zukunftsentwicklungen. Aufgrund der breiten Bandbreite sich ständig ändernder Klimasimulationen ist die Einbeziehung nur einer Projektion und einer Realisation mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Die zugrunde liegende Projektion A1B kann als vergleichsweise realitätsnahes Szenario interpretiert werden, da es die derzeitige CO_2-Entwicklung am besten abbildet. Hier muss dennoch festgehalten werden, dass es nur eine von vielen möglichen Klimaentwicklungen darstellt. Die Projektion des zukünftigen Witterungs- und Klimaverlaufs ist naturgemäß mit großen Unsicherheiten behaftet, weshalb eine Darstellung des zukünftigen Klimas am sinnvollsten durch die Abbildung des gesamten Korridors aller verfügbaren Simulationsläufe pro Projektion erfolgen sollte. Auf diese Vorgehensweise konnte im Kontext dieser Arbeit u. a. aufgrund der fehlenden Datenbasis nicht zurückgegriffen werden. Die flächenhaften Klimaanalysen stützen sich daher auf den Simulationslauf WETTREG2006 A1B-trocken. Die Realisation „trocken“ stellt den trockensten simulierten Modelllauf dar und zeigt die stärkste Erwärmung aller 10 gerechneten Realisationen (Simulationsläufe) auf.

Der Standortklimaindex beinhaltet neben gewissermaßen statischen, vom Relief abgeleiteten Standortfaktoren zusätzlich sich dynamisch verändernde Klimadaten. Er erlaubt die Abschätzung der Fähigkeit landwirtschaftlicher Standorte, Trockenperioden in heutigen und zukünftigen Klimaverhältnissen zu überbrücken und ermöglicht eine stetige Anpassung an sich ändernde Klimasimulationen. Er kann so mit den jeweils neuesten Klimarechnungen „gefüttert“ werden. Der Standortklimaindex wurde im Kontext dieser Arbeit zur allgemeinen Abschätzung der Vulnerabilität landwirtschaftlicher Standorte in Rheinland-Pfalz sowie für spezielle kulturspezifische Bewertungen verwendet.

Die beispielhaft für WETTREG2006 A1B-trocken landesweit durchgeführte Analyse zur Entwicklung der landwirtschaftlichen Nutzflächen auf Basis des Standortklimaindex zeigt eine sich deutlich verschlechternde potentielle Wasserversorgung der Standorte. Im Zeitraum 1971-2000 verfügen knapp 88 % der Flächen über mittlere Werte. Diese verschlechtern sich in der nahen Zukunft (2021-2050) dahingehend, dass bei Eintreten der verwendeten Klimasimulation dann nur noch knapp 42 % über eine mittlere potentielle Wasserversorgung im Sinne des Index verfügen werden. Bereits über 58 % der Flächen verzeichnet geringe Werte. In der fernen Zukunft (2071-2100) könnten über 85 % der landwirtschaftlichen Standorte nur noch eine geringe potentielle Wasserversorgung verzeichnen. Diese negative Entwicklung ist auf die sich deutlich verschlechternden klimatischen Wasserbilanzen für ganz Rheinland-Pfalz in den Sommermonaten zurückzuführen. Räumlich gesehen, dürften die heute schon trockenen Gebiete entlang des Oberrheingrabens besonders vulnerabel gegenüber ausbleibenden Sommerniederschlägen und sich damit verlängernden Trockenperioden sein. Die Bewässerungsbedürftigkeit könnte sich durch die projizierten Verhältnisse deutlich erhöhen, so dass deren Einschätzung zunehmend an Gewicht gewinnen könnte.

9.4 Weinbau im Klimawandel

Der Weinbau wird bei Eintreten der zugrunde gelegten Klimaprojektionen deutlichen Änderungen unterliegen. Zur Bestimmung der Eignung einer Region oder Lage für Weinbau wurde der sog. Huglin-Index errechnet, welcher sich zudem zur Abschätzung möglicher Klimaänderungen eignet. Er errechnet sich aus der Wärmesumme über Tagesmittel- und Tagesmaximumwerte der Lufttemperatur im Zeitraum Anfang April bis Ende September und ist der im Weinbau am meisten angewandte Index zur Weinbaueignung. Gegenüber anderen vereinfachten Indizes, wie beispielsweise dem Winkler Index oder dem Heliothermischen Index von BRANAS, zeigt er deutliche Vorteile. Diese liegen zum einen in der Einbeziehung eines bereitengradabhängigen Faktors begründet, der die im Sommer längeren Tageslängen nördlicher Breiten berücksichtigt, zum anderen bildet er den phänologisch wichtigen Zeitraum besser ab und gibt direkte thermische Empfehlungen hinsichtlich geeigneter Rebsorten. Jedoch besitzt auch er gewisse Einschränkungen. Er stellt nur eine Minimalbedingung dar, ob ein Anbau spezifischer Sorten aus thermischer Sicht potentiell sinnvoll ist. Aus ihm lassen sich keine Aussagen zu anderen Einflüssen (Schaderregerprognose, Bodeneigenschaften, Qualitätsmerkmale) machen oder etwaige Anbauempfehlungen ableiten (PIK 2007). Lokale Effekte, wie der Effekt von Hanglagen auf das Mikroklima, winterliche Tiefsttemperaturen,

Spätfrostgefährdung in Tallagen, Sonnenscheindauer und die saisonale Variabilität der Witterung bleiben unberücksichtigt (EITZINGER 2009).

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Zunahme des Huglin-Index in der Fläche, sowie an allen untersuchten Standorten. Diese Zunahme kann in Zukunft Auswirkungen auf den Anbau von Rebsorten in Rheinland-Pfalz haben, so dass sich bei Eintreten der zugrunde gelegten Klimaprojektionen der Anbau hin zu wärmeliebenden Anbausorten, wie beispielsweise. Cabernet sauvignon, Merlot, Syrah oder sogar Carignan verschieben kann. Dies würde bedeuten, dass in Rheinland-Pfalz zukünftig Weine angebaut werden könnten, welche heute noch in südeuropäischen Weinanbaugebieten beheimatet sind. Negativ könnte sich hingegen eine Überschreitung des Wärmeoptimums für bestimmte weniger Wärme liebende Rebsorten, wie z. B. Müller-Thurgau oder Riesling, auswirken. Eine genaue zukünftige Aussage über ein mögliches Rebsortenspektrum ist dennoch sehr schwierig, da sich die beiden verwendeten Modelle (WETTREG2006 und STAR) hinsichtlich einer möglichen Entwicklung stark voneinander unterscheiden und auch innerhalb der einzelnen Modellszenarien und Realisationen Unterschiede auftreten. Diese Aussage wird noch dadurch verstärkt, dass ausgeprägte annuelle Unterschiede auftreten. Dennoch lässt sich festhalten, dass in allen Simulationen ein deutlicher Anstieg des Huglin-Index verzeichnet wird. Eine mögliche Liberalisierung des Weinmarktes ab 2016 bzw. auf Länderebene ab 2018 könnte die herkömmliche und traditionelle Weinkultur in Rheinland-Pfalz deutlich verändern. Die projizierten höheren Temperaturen könnten dann zu einer deutlichen Ausweitung des Weinanbaus in höhere Lagen und in heute noch nicht weinbaulich genutzten Regionen führen. Das Entfallen der Pflanzrechte würde bei einer Ausweitung des Weinanbaus auch enorme wirtschaftliche Folgen mit sich bringen.

Zur Berechnung der Eintrittszeitpunkte der wichtigsten phänologischen Phasen (Austrieb, Blühende, Reifebeginn und Lesereife) und weiterer klimatischer Kenngrößen (siehe Methoden, Seite 1) im Weinbau wurde auf das Phänologiemodell nach HOPPMANN & BERKELMANN-LÖHNERTZ (2000) zurückgegriffen. Die Berechnung wurde durch das Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK) durchgeführt. Das Phänologiemodell wurde zur Beschreibung der Phänologie von Riesling in Geisenheim (Rheingau) entwickelt und validiert. Die Nähe zu den rheinland-pfälzischen Weinbaugebieten erlaubt daher eine sinngemäße Übertragung des Modells auf den Weinbau in Rheinland-Pfalz. Die Temperatur ist der Klimafaktor, welcher auf das Wachstum der Rebe den größten Einfluss ausübt. Das Modell basiert daher in erster Linie auf Wärme- und Kältesummen, welche mit verschiedenen Funktionen berechnet werden. Hierdurch wird die Berechnung des Temperatureinflusses auf die jeweilige phänologische Phase der Rebe optimiert. In den Funktionen werden zudem obere und untere Schwellenwerte definiert, wodurch nur die für das Rebwachstum bedeutsamen Temperaturbereiche berücksichtigt werden (SCHULTZ et al. 2006). Für alle Standorte wurde eine deutliche Verfrühung der phänologischen Eintrittszeitpunkte ermittelt. Der Austrieb könnte sich demnach bis zum Jahr 2100 um etwa 25-30 Tage verfrühen. Die Verfrühung der weiteren wichtigen Phasen nimmt tendenziell etwas ab und liegt zwischen 15-25 Tagen. Die Verfrühung der Eintrittszeitpunkte könnte negative Folgen für die Rebe mit sich bringen. Der zeiti-

gere Austrieb im Frühjahr könnte zu einer Erhöhung der Spätfrostgefährdung führen. Die früher einsetzende Lese könnte das Fäulnisrisiko durch feuchtere Verhältnisse in der noch wärmeren Jahreszeit erhöhen, und es könnte dann verstärkt zu Pilz- und Bakterienbefall kommen.

An allen untersuchten Standorten zeigt sich trotz der deutlich zu erwartenden Klimaerwärmung keine Reduzierung des Spätfrostpotenzials. Der frühere Austrieb und die damit einhergehende größere Wahrscheinlichkeit eines potentiellen Kaltlufteinbruchs mit kritischen Minimumtemperaturen scheint die Klimaerwärmung diesbezüglich nahezu zu kompensieren. Bei Eintreten der zugrunde gelegten Projektionen würde das Spätfrostrisiko an den meisten Standorten auf niedrigem Niveau stagnieren. Die Winterfrostgefährdung hingegen würde bei Eintreten der berücksichtigten Klimaprojektionen deutlich zurückgehen. Neueste Klimaberichte gehen hingegen von einer deutlichen Häufung von kälteren Wintern in Mitteleuropa im Zuge eines verstärkten Abtauens des arktischen Meereises in der Zukunft aus. Das arktische Meereis nimmt eine besondere Rolle in der globalen atmosphärischen Zirkulation ein. Durch eine Veränderung der Eisbedeckung auf der Nordhalbkugel könnte es zu Änderungen und Verschiebungen der nordhemisphärischen Luftdruckverteilung kommen, wodurch verstärkt kalte kontinentale Luftmassen nach Mitteleuropa vordringen könnten (BUDIKOVA et al. 2009 und JAISER et al. 2012). Diese Entwicklung würde eine deutliche Erhöhung von Schadfrösten in den Wintermonaten bedeuten. Welche Auswirkungen eine veränderte Luftdruckverteilung im Winter für das Auftreten von Spätfrösten haben könnte, muss abgewartet werden. Die Anzahl von winterlichen Schadfrösten (<-18 °C) könnte dadurch deutlich ansteigen und den gesamten rheinland-pfälzischen Weinbau auch in den heutigen Gunstlagen in Frage stellen. Diese zur allgemeinen klimawandelbedingten Temperaturerhöhung konträre Entwicklung sollte in den kommenden Jahren weiter verfolgt und gegebenenfalls durch neueste Klimarechnungen analysiert werden.

Weitere weinbauliche Analysen zeigen auf Basis der Klimasimulationen der regionalen Klimamodelle WETTREG2006 und STAR eine deutliche Verbesserung der thermischen Wachstumsbedingungen in allen wichtigen Entwicklungsphasen an allen untersuchten Standorten und Simulationen in den nächsten Jahrzehnten. Negativ dürften sich die projizierten höheren Wintertemperaturen für die Eiswein-Lese auswirken. Die Auswertung von Klimazeitreihen an ausgewählten Weinbaustandorten zeigt eine mögliche Eisweinernte bis Mitte dieses Jahrhunderts, danach nehmen die potentiellen Eisweintage mit Minimumtemperaturen < -7 °C deutlich ab. Die Wasserversorgung spielt im Weinbau eine entscheidende Rolle. Die heutige Produktion von Wein findet in Rheinland-Pfalz ausschließlich in den thermischen Gunsträumen der größeren Flusstäler statt. Diese Regionen, insbesondere das Oberrheintal, verzeichnen heute bereits schlechte hygrische Verhältnisse in den Sommermonaten. Diese werden sich in Zukunft weiterhin verschlechtern, weshalb mit zunehmendem Trockenstress im Weinbau zu rechnen ist. Bereits heute verzeichnen über 80 % der weinbaulich genutzten Standorte klimatische Wasserbilanzen < -50 mm in der Hauptvegetationsperiode von Anfang Mai bis Ende Oktober. In der nahen Zukunft (2021-2050) werden bei Eintreten der Klimaprojektionen bereits knapp 70 % der Flächen klimatische Wasserbilanzen < -

150 mm aufweisen. In der fernen Zukunft könnten dann knapp 98 % der Flächen mit extrem niedrigen Wasserbilanzen < -150 mm ausgestattet sein. Diese negative Entwicklung wirft Fragen der zukünftigen Bewässerungsmöglichkeiten im Weinbau auf. Der Bewässerungsbedarf könnte demnach auf nahezu allen Standorten deutlich ansteigen. Eine besondere Rolle wird daher auch den Standorteigenschaften beigemessen, welche Aussagen über die Toleranz der Weinbaustandorte und deren Potenzial niederschlagsarme Phasen überbrücken zu können. Ein Großteil (etwa 72 %) der Rebflächen verfügt unter Betrachtung des Standortindex Basistoleranz über eine mittlere Toleranz gegenüber Trockenperioden. Eine hohe Toleranz gegenüber Trockenstress weisen noch knapp über 13 % der Flächen aus. Besonders gefährdet sind knapp 15 % der Flächen mit geringen bzw. sehr geringen Toleranzen gegenüber Trockenstress.

Weitere klimawandelbedingte Probleme im Weinbau könnten sich durch die Möglichkeit einer Zunahme von Sonnenbrandschäden an den Trauben ergeben. Das Auftreten von Sonnenbrand ist auf den abrupten Witterungswechsel von kühlen bedeckten Tagen hinzu heißen und strahlungsintensiven Tagen zurückzuführen. Untersuchungen konnten diese Witterungsmuster in den Klimazeitreihen nicht nachweisen. Dennoch zeigte sich in den vergangenen Jahren ein verstärktes Auftreten von abiotischen Schäden durch Sonnenbrand (PETGEN 2008), weshalb auch diese Entwicklung durch neuere Klimarechnungen untersucht werden sollte.

Die Auswertung zeigt für den Weinbau sowohl positive Wirkungen als auch negative Folgen im Zuge des Klimawandels. Die traditionelle Weinkultur würde sich bei Eintreten der verwendeten Klimaprojektionen verändern. Neben zusätzlichen Weinbaustandorten in höheren Lagen und in bisher nicht erschlossenen Regionen könnten in den herkömmlichen Anbaugebieten neue Weine produziert werden. Das potentielle Weinangebot könnte sich hierdurch ausweiten. Auf der anderen Seite könnten heutzutage traditionelle Rebsorten an Ansehen verlieren bzw. ganz vom Markt verschwinden. Klimatisch könnten sich insbesondere durch die schlechte Wasserversorgung in den Sommermonaten oder durch Hitze- und Sonnenbrandschäden Probleme ergeben. All diese Entwicklungen müssen jedoch im Kontext der Unsicherheit der Klimaabschätzung behandelt werden und unterliegen den nicht vorhersagbaren chaotischen Abläufen des dynamischen Klimasystems.

9.5 Grünland im Klimawandel

Das Grünland zählt in Rheinland-Pfalz aufgrund seiner räumlichen Verbreitung zu den wichtigsten landwirtschaftlichen Wirtschaftszweigen. Grünland wird in Rheinland-Pfalz vorwiegend in den klimatisch ungünstigeren Regionen der Mittelgebirge betrieben. Auch im Grünland wird es in Rheinland-Pfalz bei Eintreten der zugrunde gelegten Klimaprojektionen zu deutlichen Änderungen kommen. Das Grünland könnte sogar aufgrund des stetigen Wasserbedarfs während der gesamten Vegetationsperiode in Verbindung mit zu erwartenden geringeren Sommerniederschlägen und verstärkt auftretenden Trockenperioden zu den großen Verlierern des Klimawandels zählen. Konträr zu dieser Entwicklung steht aufgrund des zu erwartenden Temperaturanstiegs eine verlängerte Vegetationsperiode. Diese Entwicklung

würde, eine stetige Wasserzufuhr vorausgesetzt, zu einer Ertragssteigerung führen. Die Entwicklung im Grünland wird also entscheidend von den zukünftigen hygrischen Verhältnissen abhängen. Der Wasserhaushalt wird zum Ertrag bestimmenden Faktor im Grünland werden. Auch hier stellt sich die Frage, welche Standorte Perioden mit geringer Wasserzufuhr am besten überbrücken können und welche Standorte besonders vulnerabel gegenüber einem rückgängigen Wasserangebot erscheinen.

Die Analyse zur Veränderung des Verlaufs und der Länge der Vegetationsperiode zeigt eine deutliche Tendenz hin zu einem früher einsetzenden Vegetationsbeginn, einem verspäteten Vegetationsende und einer damit einhergehenden verlängerten Vegetationsperiode. Die Bestimmung des Vegetationsbeginns erfolgte durch die sog. „korrigierte T-Summe 200“. Diese wird errechnet, indem alle positiven Tagesmitteltemperaturen ab dem 01. Januar mit unterschiedlicher Gewichtung aufsummiert werden, bis der Wert 200 erreicht wird. Bei der Berechnung werden die Tagesmittelwerte im Januar zur Hälfte, im Februar zu 75 % und ab 01.03. bis zum Vegetationsbeginn voll berücksichtigt. In Feldversuchen in Infeld (Niedersachsen) zeigte sich in den 70er Jahren eine mittlere T-Summe zum Vegetationsbeginn von 198 °C und einer Streuung von ± 15 °C in den 6 untersuchten Jahren zwischen 1970 und 1975. Diese Streuung würde bei normalen Witterungsverhältnissen zur Zeit des Wachstumsbeginns einer Abweichung von ± 2 bis 3 Tagen entsprechen. Die Methode kann also als Maßstab für den Vegetationsbeginn im Frühjahr angesehen werden (ERNST & LOEPER 1976). Sie weist gegenüber anderen Methoden deutliche Vorteile auf. In der einschlägigen Literatur (z. B. SCHAUMBERGER 2005) werden weitere Methoden zur Bestimmung des Vegetationsbeginns aufgeführt und diskutiert. Der Vegetationsbeginn definiert sich demnach z. B. durch eine Tagesminimumtemperatur ab 2 °C über einen durchgehenden Zeitraum von 5 Tagen. Weitere Alternativen sind z. B. eine Tagesmitteltemperatur von 2 °C über 5 Tage oder eine Tagesmitteltemperatur von 5 °C über 5 Tage (SCHAUMBERGER 2005). Diese Varianten zur Bestimmung des Vegetationsbeginns wurden in Österreich validiert und sind für maritime klimatische Verhältnisse, wie sie in Rheinland-Pfalz vorherrschen, nicht geeignet. Durch die vorrangige Westwinddrift mit warmen atlantischen Luftmassen über die Dauer von mehreren Tagen können diese Temperaturschwellenwerte bereits zu sehr frühen Zeitpunkten im Jahr in Rheinland-Pfalz erreicht werden. Die Anwendung dieser Kriterien zeigte in eigenen Analysen eine starke räumliche Streuung des Vegetationsbeginns mit einem stark abweichenden Datum des Erreichens des benötigten Schwellenwertes. Die Festlegung des Vegetationsbeginns erfolgte daher auf Basis der Temperatursumme 200. Das Vegetationsende ermittelt sich als erster Tag des Zeitraums ab dem 01. August, ab dem an mindestens 5 aufeinanderfolgenden Tagen die durchschnittliche Lufttemperatur < 5 °C beträgt. Diese Methode bezieht sich auf die Arbeiten nach SCHAUMBERGER (2010). Das Ausschluss-Kriterium einer negativen Beeinflussung durch warme maritime Luftmassen entfällt bei Betrachtung dieses Kriteriums. Dennoch zeigen sich auch hier teils deutliche räumliche Unterschiede bei der Betrachtung des flächenhaften Zeitpunktes des Vegetationsendes. Diese zeitlichen Unterschiede wurden dennoch akzeptiert und als tolerabel eingestuft. Gegen Ende des untersuchten Zeitraums wird in thermischen Gunstlagen bis zum Ende des jeweiligen Jahres das obige Kriterium zur Bestimmung des Vegetationsendes in einzelnen Jahren nicht erreicht. Das Vegetationsende

wurde in diesen Fällen auf den 31.12. des jeweiligen Jahres gesetzt. Dennoch muss in Betracht gezogen werden, dass aufgrund der zu erwartenden Klimaerwärmung in der fernen Zukunft mit einer über den Winter durchlaufenden Vegetationsperiode zu rechnen sein kann. Hier muss jedoch beachtet werden, dass in die angewandte Methode keine weiteren wachstumsfördernden Größen, wie z. B. die Sonneneinstrahlung, einfließen. Die Vegetationsperiode ergibt sich aus der Differenz von Vegetationsende und Vegetationsbeginn.

Der Vegetationsbeginn verfrüht sich demnach in allen Klimasimulationen und an allen untersuchten Stationen und in der Fläche bis zum Jahr 2100 um durchschnittlich 30-40 Tage und verschiebt sich dabei je nach Höhenlage von Anfang/Mitte April hin zu Anfang/Mitte März. Die annuellen Unterschiede variieren dabei sehr stark und sind das Resultat der vorangegangenen Luftmassen und ihren Witterungsmustern. Das Vegetationsende verlagert sich im Mittel um 10-20 Tage nach hinten und fällt damit je nach Höhenlage von September/Oktober in den Oktober bzw. November. Dies ergibt eine verlängerte Vegetationsperiode im Mittel um 40-60 Tage. Eine verlängerte Vegetationsperiode bedeutet bei ausreichender Wasserzufuhr eine zusätzliche Anzahl von Schnitten.

Zur Ertrags- und Vulnerabilitätsabschätzung im Grünland wurde innerhalb des KlimLandRP-Projektes eine projektinterne Studie durchgeführt, welche auf Basis des Grassland Statistical Model (GRAM) absolute und relative Erträge auf Flurstücksebene berechnet. Diese Arbeit sollte besonders vulnerable Bereiche im Grünland auf der Basis einer Ertragsschätzung zeigen. Die Modellierung von Jahreserträgen auf Grünland mit GRAM wurde auf Basis einer Vielzahl von Vereinfachungen und Approximationen realisiert. Die implementierten Methoden weisen in manchen Bereichen ein erhebliches Optimierungspotenzial auf. Insbesondere die durch die langen betrachteten Zeiträume und den für den hochauflösenden Betrachtungsmaßstab großen Raum bedingte Menge der zu verrechnenden Daten führte zu langen Prozessierungszeiten und einer damit verbundenen Beschränkung in der zeitlichen Taktung der Betrachtung. Diese hatte zur Folge, dass es insbesondere bei der Modellierung der Wasserverfügbarkeit zu einer Ausmittelung von niederschlagsarmen Zeiträumen und der Modellierung eines relativ konstanten Wassereintrags über den Betrachtungszeitraum kam. In Kombination mit der ebenfalls im Vergleich weniger stark schwankenden Evapotranspiration muss daher von einer Unterschätzung des Wasserstresses und einer Überbewertung des Einflusses der Schnittregime ausgegangen werden. Dies zeigte sich in vorläufigen Modellierungsergebnissen, die starke Ertragssteigerungen und geringe Vulnerabilitäten insbesondere in der fernen Zukunft projizieren.

Zum Zeitpunkt des Abschlusses dieses Berichtes lagen für die Ertrags- und Vulnerabilitätsabschätzung noch keine abschließenden Ergebnisse vor. Aus diesem Grunde beschränken sich die zuvor präsentierten Ergebnisse auf das jeweils errechnete Schnittregime. Hier zeigt sich eine durch die Verlängerung der Vegetationsperiode bereits erwartete Tendenz zu größeren Schnitthäufigkeiten. Bei einer ausreichenden Wasserversorgung könnte in diesem Fall mit Ertragssteigerungen zu rechnen sein. Jedoch besteht auch hier Optimierungsbedarf. Kombinierte Ansätze, wie beispielsweise in einem alternativen Grünlandertragsmodell "FOPROQ" (KORNHER et al. 1995) umgesetzt, die eine praxisnahe Nutzungsfrequenz über

die angestrebte Ertragsquantität innerhalb der Berechnung indirekt determinieren, stellen möglicherweise einen interessanten Ansatz zur Optimierung der Ergebnisse dar. Für die Zukunft verstärkt projizierte Phasen starker Trockenheit und dementsprechend eingeschränkter Biomassenproduktion infolge des Klimawandels (über die effektive Aufwuchsdauer) würden entsprechend über eine verlängerte schnittspezifische Aufwuchsdauer berücksichtigt.

Die Arbeiten zur Umsetzung des Ertragsmodells GRAM haben gezeigt, dass die projizierte zukünftige Ausdehnung der Vegetationsperiode durch eine erhöhte Schnitthäufigkeit einen stark positiven Effekt auf das Ertragspotenzial von Grünland haben könnte. Voraussetzung dafür ist jedoch eine ausreichende Wasserversorgung. Hier liegt einer der Hauptansatzpunkte für eine Fortführung der Umsetzung von GRAM in Rheinland-Pfalz.

Die Kernfrage der Wasserversorgung im Bereich der Grünlandnutzung wurde unabhängig von GRAM auf Basis eines zweistufigen Ansatzes analysiert. Die Grünlandstandorte wurden zuerst hinsichtlich ihrer Toleranz gegenüber Wassermangel/Trockenstress auf Basis des Standortindex Basistoleranz untersucht. Anschließend wurden die Standorte hinsichtlich ihrer klimatischen Wasserbilanz während der Hauptvegetationsperiode von Anfang Mai bis Ende Oktober analysiert. Ziel stellte die Erfassung besonders durch Wassermangel gefährdeter Räume dar. Die Auswertung auf Grundlage des Standortindex Basistoleranz zeigte eine Gefährdung auf etwa 30 % der Standorte. Diese weisen geringe Indexwerte <40 Punkten auf. Ein Großteil der Flächen (ca. 70 %) zeigt hinsichtlich ihrer natürlichen Relief- und Bodenausstattung eine mittlere Toleranz gegenüber Wassermangel in den Sommermonaten. Die Untersuchung der Grünlandstandorte hinsichtlich ihrer klimatischen Wasserbilanz ergab für den Referenzzeitraum 1971-2000 von allen geprüften Kulturen die beste Wasserversorgung. Dies hängt damit zusammen, dass sich die als Grünland genutzten Flächen meist in klimatisch ungünstigen Räumen befinden. Die Mittelgebirgsräume sind durch deutlich höhere Niederschläge und geringere Verdunstungsraten gekennzeichnet und weisen so deutlich bessere Wasserbilanzen als die thermischen Gunsträume in den größeren Flusstälern mit vorwiegendem Acker-, Obst- und Weinanbau auf.

Im Zeitraum 1971-2000 verzeichnen knapp 50 % der Standorte geringe Wasserbilanzen zwischen -50 und 50 mm während den Monaten Mai bis Oktober. Über 40 % der Standorte befinden sich in Lagen mit mittleren Wasserbilanzen zwischen 50 bis 150 mm. Selbst hohe Wasserbilanzen zwischen 150 und 300 mm werden noch auf über 4 % der Flächen verzeichnet. Sehr geringe Wasserbilanzen < -150 mm sind auf knapp 5 % der Flächen anzutreffen. Diese Flächen befinden sich zum Großteil entlang des Oberrheingrabens. Das Bild für die nahe Zukunft (2021-2050) könnte sich bei Eintreten der zugrunde gelegten Projektion schon deutlich verschlechtern. Über 50 % der Flächen würden demnach geringe Wasserbilanzen zwischen -50 und -150 mm während der Hauptvegetationsperiode verzeichnen. Geringe Wasserbilanzen zwischen - 50 und 50 mm werden noch auf knapp 44 % der Flächen erzielt werden. Die ferne Zukunft (2071-2100) zeigt eine weitere Verschlechterung der Wasserbilanzen auf den Grünlandstandorten. Dann werden über 20 % der Flächen extrem geringe Wasserbilanzen < -150 mm verzeichnen. Über 60 % der Standorte wird über negative Wasserbilanzen zwischen -50 mm und -150 mm verfügen. Dies bedeutet, dass über 80 %

der Standorte als Risikoflächen mit einer sehr hohen Gefährdung durch Wassermangel und Trockenstress einzuschätzen sind. Insbesondere im Naheeinzugsgebiet zeigen sich neben den heute schon gefährdeten Gebieten der größeren Flusstäler besonders schlechte hygrische Verhältnisse. Auch Grünlandstandorte im Taunus und der Osteifel könnten dann verstärkt Trockenstress aufzeigen. Ändern sich die klimatischen Verhältnisse, wie sie in den Projektionen simuliert werden, würde dies für die Grünlandnutzung in Rheinland-Pfalz in weiten Teilen gravierende Folgen mit sich bringen. Trockenstress dürfte zum Kernproblem auf Grünlandstandorten werden. Neben direkten Ertragseinbußen und einer zunehmenden Ertragsvariabilität könnte das Grünland bei Trockenstressschäden vermehrt unter Bodenerosion leiden. Im Grünland würden bei Eintreten der Klimaprojektionen vermehrt trockenstresstolerante Sorten zum Einsatz kommen, was mit einer geringeren Quantität und minderen Qualität einhergeht. Zudem könnten sich thermophile Schadinsekten (z. B. Engerlinge) ausbreiten (EITZINGER et al. 2009). Das Grünland würde demnach zu den großen Verlierern des Klimawandels zählen.

Dennoch muss festgehalten werden, dass all die beschriebenen Entwicklungen im Bereich des Grünlandes eine Abschätzung der Zukunft darstellen und auf Annahmen zu möglichen zukünftigen klimatischen Verhältnissen beruhen. Die Berechnung der klimatischen Wasserbilanz bezieht sich auf die Berücksichtigung nur eines einzigen Modelllaufs (WETTREG2006 A1B-trocken) und stellt damit eine von vielen möglichen zukünftigen Entwicklungen dar. Das Hauptaugenmerk für zukünftige Analysen sollte daher auf eine breitere und damit besser abgesicherte Basis (z. B. Ensemble-Analysen) gelegt werden.

9.6 Ackerbau im Klimawandel

Die Untersuchungen der Auswirkungen des Klimawandels im Ackerbau wurden kulturspezifisch für die wichtigsten Anbausorten in Rheinland-Pfalz vorgenommen. Auch im Ackerbau stellt die zukünftige Wasserversorgung der Standorte die größte Herausforderung im Klimawandel dar. Der Wasserbedarf innerhalb der Wachstumsperiode fällt hierbei je nach Kultur sehr unterschiedlich aus, weshalb die wichtigsten Kulturen jeweils separat voneinander betrachtet werden. Neben der kulturübergreifenden Frage einer ausreichenden Wasserversorgung wurden weitere individuelle kulturspezifische Fragestellungen, wie die einer ausreichenden Vernalisation bei Winterweizen oder Analysen zu ertragsmindernden Witterungskomponenten bei der Zuckerrübe, beantwortet und sollen im Folgenden diskutiert werden.

Zukünftige Ertragsabschätzungen für Ackerkulturen unter Berücksichtigung von einschlägigen Ertragsmodellen wurden im Kontext dieser Arbeit nicht vorgenommen. Gründe hierfür liegen zum einen im generellen Aufbau der Arbeit. Hier konzentrierten sich die Arbeiten vermehrt auf Standortanalysen, deren Geodatengrundlage aus Feldkartierungen und Reliefanalysen stammt, deren Informationsgehalt über die Dauer der betrachteten Zeiträume relativ wenig natürlichen Veränderungen unterliegt. Im Laufe des Projektes wurden dann Klimadaten, insbesondere Zukunftsprojektionen, eingebunden, deren Zeitreihen in einem breiten Korridor möglicher Entwicklungen verlaufen. Diese Variabilität findet ihren Ausdruck darin, dass der internationale Klimarat (IPCC) ein Spektrum an Emissionsszenarien für Treibhaus-

gase entwickelt hat, die auf unterschiedlichen Entwicklungspfaden der Weltgesellschaft basieren (sogenannte storylines). Klimaprojektionen sind daher immer als Wenn-dann-Aussagen zu verstehen. Sie haben nicht den Anspruch die Zukunft zu zeigen, sondern stellen mögliche Zukünfte dar. Neben weiteren Unsicherheiten der Klimamodelle selbst summieren sich die Fehler durch gewisse Unsicherheiten der Ertragsmodelle auf.

Winterweizen stellt hinsichtlich seiner Flächengröße die wichtigste ackerbauliche Kultur in Rheinland-Pfalz dar. Er besitzt besondere Ansprüche an das Klima, das bedeutet, er benötigt im Winter tiefe Temperaturen für eine uneingeschränkte Entwicklung der Pflanze im folgenden Frühjahr (Vernalisation). Die durchgeführten Analysen zeigen an den 4 untersuchten Standorten eine deutlich verringerte Vernalisationsdauer. In wärmebegünstigten Regionen werden in ferner Zukunft die als kritisch angesehenen 40 Einwirkungstage kalter Temperaturen (0-5 °C) im Winter zum Teil deutlich unterschritten. Hier muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass für die Untersuchung Tagesmitteltemperaturen in 2 m Höhe verwendet wurden. Diese geben zwar die lokalen Temperaturverhältnisse sehr gut wieder, dennoch liegen diese in den Wintermonaten im Mittel etwa 0 bis 1 °C über den gemessenen bodennahen Temperaturen in 20 cm Höhe. Diese Höhe ist für den sich im Sämlingsstadium befindlichen Winterweizen ausschlaggebend, so dass es hier zu einer leichten Relativierung der Ergebnisse kommen kann. Eine Verallgemeinerung der Ergebnisse auf die Fläche ist aufgrund der Heterogenität des Reliefs in Rheinland-Pfalz schwierig. Dennoch lässt sich festhalten, dass bei einem Eintritt der projizierten Temperaturverhältnisse nur in wärmebegünstigten Lagen in Zukunft mit Vernalisationsproblemen zu rechnen sein wird, während höher gelegene Standorte von diesen voraussichtlich nicht betroffen sein werden. Die Wasserversorgung würde sich nach den Auswertungen der beiden Indizes Standortindex Basistoleranz und Standortklimaindex sowie der klimatischen Wasserbilanz auf den Winterweizenstandorten deutlich verschlechtern. Grund hierfür ist die saisonale Verlagerung der Niederschläge vom Sommer in den Winter bei gleichzeitigem Temperaturanstieg und höherer Verdunstung. Neben Vernalisationsproblemen beim Winterweizen könnte es also zu einer vermehrten Gefährdung durch Trockenstress kommen.

Die weiteren untersuchten Feldfrüchte zeigen ähnliche Entwicklungen hinsichtlich ihrer zukünftigen Wasserversorgung und sollen daher hier nicht näher analysiert werden. Besonderes Augenmerk fiel bei den Untersuchungen auf die Zuckerrübe. Diese erweist sich als besonders witterungsanfällig. Zwischen 40-50 % der jährlichen Ertragsschwankungen sind auf die Witterung während der Hauptvegetationsperiode in den Sommermonaten zurückzuführen (RÖSTEL 1999). Um die Zusammenhänge zwischen Witterung und Ertrag besser erklären zu können, wurden mit Hilfe einer eigens entwickelten Zinseszinsformel die Erträge züchtungsbereinigt. Ohne Züchtungsfortschritt würden die ermittelten Zuckerrübenerträge bereits in der Vergangenheit eine negative Tendenz zeigen. Besonders ertragsschwache Jahre konnten durch einen Fingerabdruck ermittelt werden. Ertragsschwache Jahre zeigten meist Niederschlagssummen < 110 mm (Juni-August) und Temperatursummen der Tagesmitteltemperatur > 1200 K (Juli-August). Diese Muster treten verstärkt in zukünftigen Klimazeitreihen auf. Dies würde bedeuten, dass bei Eintreten der zugrunde gelegten Klimaprojektionen mit einer

erhöhten Ertragsvariabilität und ertragsschwachen Jahren zu rechnen sein dürfte. Kritisch ist zu betrachten, dass die Vorgehensweise keinen anbautechnischen Fortschritt beinhaltet. Zur Größe des anbautechnischen Fortschritts lagen jedoch keine Untersuchungen vor, sodass dessen Einbeziehung nicht möglich war. Es ist jedoch anzunehmen, dass durch den Produktionsfortschritt ebenfalls eine Ertragssteigerung generiert werden konnte, welche dann analog zum Faktor Züchtung von den real erzielten Erträgen subtrahiert werden müsste. Weiterhin kritisch zu betrachten ist die Nichtberücksichtigung der Bodenverhältnisse in den drei zugrunde liegenden Untersuchungsgebieten. Die jährliche Ertragsvariabilität ist neben der vorherrschenden Witterung stark abhängig von der gegebenen Wasserspeicherfähigkeit des Bodens, welche ihren Ausdruck in der sogenannten nutzbaren Feldkapazität findet. Die Wasserverfügbarkeit besitzt eine entscheidende Bedeutung für die Ertragsbildung (WILLMS et al. 2006). Die hier festgestellten Schwellenwerte für ertragsschwache Jahre beziehen sich auf die Bodenverhältnisse der drei Untersuchungsgebiete. Auf andere Anbaugebiete sind die ermittelten Schwellenwerte aufgrund abweichender Bodenverhältnisse daher nur schwer zu übertragen. Dennoch wurde eine neue Methode entwickelt, um den Zusammenhang zwischen Ertragsdaten und Witterung zu ermitteln und zukünftige Abschätzungen zu generieren.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Die Folgen des stattfindenden anthropogenen Klimawandels betreffen sämtliche Umweltsektoren und alle Formen der Landnutzung, wobei die Auswirkungen regional unterschiedlich ausfallen. Regionalspezifischen Untersuchungen zu den Folgen des Klimawandels in ausgewählten Regionen oder z. B. auf Ebene der Bundesländer kommt daher eine bedeutende Rolle zu. Auch in Rheinland-Pfalz hat sich das Klima in der Vergangenheit deutlich geändert. Der Klimawandel zeigt sich durch veränderte mittlere klimatische Bedingungen auf unterschiedlichen Zeitskalen, diese reichen von langjährigen bis hin zu saisonalen Änderungen. Er zeigt sich zudem in einer veränderten Klimavariabilität kurzfristiger Ereignisse wie die sog. Wetterextrema (WEINBERGER 2009). Beide stellen die rheinland-pfälzische Landwirtschaft vor große Herausforderungen. Nach dem KLIMABERICHT RHEINLAND-PFALZ 2007 hat sich z. B. die Jahresdurchschnittstemperatur im Zeitraum 1901-2004 um ca. 0.8 °C erhöht. Auch für die Zukunft zeigt sich je nach Szenario eine mittlere Erwärmung bis in das Jahr 2100 um 2.5-3.5 °C. Es konnte zudem eine Zunahme der Häufigkeit von Westwindwetterlagen festgestellt werden, welche verstärkt in den Wintermonaten und zum Teil auch im Herbst und Frühjahr zu tendenziell höheren Niederschlagssummen geführt haben. Im Sommer hingegen konnte eine Reduzierung der Niederschläge beobachtet werden. Diese Entwicklung wird auch in den Zukunftsszenarien bestätigt, welche einen weiteren Trend hin zu steigenden Winterniederschlägen und eine Abnahme der Sommerniederschläge simulieren. Neben diesen langjährigen bzw. saisonalen klimatischen Änderungen zeigen sich verstärkt auch kurzfristige Extremwettererscheinungen wie z. B. Starkniederschläge oder intensive und länger anhaltende Hitzeperioden.

Die Landwirtschaft ist ein klimasensitiver Wirtschaftszweig und muss sich daher an die klimatischen Gegebenheiten und den Verlauf von Wetter und Witterung, einschließlich extremer Ereignisse anpassen. Die Vulnerabilität landwirtschaftlicher Flächen ist eng verbunden mit deren Standorteigenschaften. Von den Eigenschaften eines Standortes hängt seine Eignung für die landwirtschaftliche Nutzung ab. Wichtige Standortparameter sind direkt an das Klima gebunden und können durch Klimaveränderung beeinflusst werden (OLESEN und BINDI, 2003). Es ist daher von bedeutsamem Interesse, landwirtschaftliche Standorte zu charakterisieren. Innerhalb der Projektstudie wurde daher eine landesweite detaillierte Analyse der naturräumlichen Ausstattung (Boden, Relief) der landwirtschaftlich genutzten Standorte in Rheinland-Pfalz und deren Toleranz bzw. Vulnerabilität gegenüber klimatischen Veränderungen räumlich und qualitativ durchgeführt. Die gewonnenen Informationen wurden als ge-

wichtetes Flächenmittel an die Basisgeometrie des Automatisierten Liegenschaftskatasters ALK, Folie 21, „tatsächliche Nutzung“ (tN) angebunden, welche die gesamte Landesfläche von Rheinland-Pfalz repräsentiert.

Bezogen auf Landwirtschaft und Klimawandel ist eine ausreichende Wasserversorgung der landwirtschaftlichen Standorte eine der wichtigsten Fragestellungen. Die Zusammenführung einzelner Parameter aus dem entwickelten Datenpool, der sog. ALK++, ermöglichte die Entwicklung von Indikatoren. Der sog. Standortindex Basistoleranz erlaubt auf einer Skala von 0-100 Indexpunkten eine Abschätzung der Toleranz landwirtschaftlicher Standorte gegenüber klimawandelinduziertem Trockenstress. Er setzt sich aus den drei Parametern Topographischer Feuchteindex (TWI), Topographische Sonneneinstrahlung (Incoming Solar Radiation, ISR) und nutzbare Feldkapazität (nFK) des Bodens zusammen. Er ermöglicht eine landesweite Angabe der Trockenstresstoleranz für jede landwirtschaftlich genutzte Fläche und macht diese untereinander vergleichbar. Durch ihn lassen sich besonders Trockenstress gefährdete Risikoräume identifizieren. Er kann ohne größeren Aufwand in die Geodaten-Infrastruktur des Landes Rheinland-Pfalz eingebunden und mit Klimadaten kombiniert werden.

Die Kombination von aus dem Relief abgeleiteten Geodaten und Klimadaten bildet die Basis für den sog. Standortklimaindex. Dieser setzt sich aus den drei zuvor aufgeführten Parametern und der klimatischen Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode von Anfang Mai bis Ende Oktober für drei Zeitschienen (1971-2000, 2021-2050 und 2071-2100) zusammen und beschreibt in diesem Bericht beispielhaft eine mögliche Entwicklung entlang des „mittleren Szenarios“ A1B. Er ermöglicht die Identifizierung besonders von Trockenstress gefährdeten Räumen auf verschiedenen Zeit- und Maßstabsebenen. Die Einbindung des dynamischen Faktors Klima, dessen Entwicklung in einem relativ breiten Korridor zukünftiger Möglichkeiten verlaufen wird, ist nicht unproblematisch. Die Einbindung von interpolierten Klimadaten (1 x 1 km) erforderte eine Einschätzung über deren Aussagekraft.

Zur besseren Einschätzung der Aussagefähigkeit interpolierter Klimawerte wurde eine weitere Kennzahl, kurz Reliefindex genannt, entwickelt. Innerhalb des Moduls „Landwirtschaft“ wurden für die Abschätzung der zukünftigen klimatischen Entwicklungen die Daten zweier regionaler Klimamodelle (WETTREG2006 und STAR2) und eine Bandbreite von Szenarien verwendet. Dabei handelt es sich um Zeitreihen (Tageswerte) von Klimawerten an einzelnen Messstationen. Neben diesen punkthaften Klimadaten wurden mit Hilfe der Software INTERMET Interpolationen durchgeführt, um flächenhafte Aussagen gewinnen zu können. Mit Methoden der Geostatistik wurden unter Berücksichtigung des großräumigen Reliefs Klimawerte in einem 1 x 1 km-Raster für ganz Rheinland-Pfalz errechnet. Ist das Relief sehr heterogen (hohe Variabilität), so kann die Repräsentativität des interpolierten Wertes für seinen Raum (1 x 1 km) sehr eingeschränkt sein. Um die Aussagefähigkeit der interpolierten Werte abschätzen zu können, wurde für jede Zelle des Interpolationsgitters anhand der Reliefparameter Topographische Sonneneinstrahlung und Höhe über NN ein Wert für die Variabilität des Reliefs abgeleitet. Diese Angabe liegt für alle Gitterzellen des Interpolationsrasters landesweit in Form eines Vektordatensatzes vor und kann im GIS mit anderen Daten verarbeitet

werden. Mit Hilfe dieser Angabe können Zellen in Bezug auf die Variabilität ihres Reliefs miteinander verglichen und Rückschlüsse auf die Aussagefähigkeit ihrer interpolierten Klimawerte gezogen werden. Der Reliefindex wurde zwar explizit für Analysen innerhalb des KlimLandRP-Projektes entwickelt, kann aber auch für andere Projekte, welche auf interpolierten Klimadaten aufbauen, angewendet werden.

Neben den bereits aufgeführten Standortuntersuchungen wurden innerhalb des Projektes kulturspezifische Fragestellungen vor dem Hintergrund verschiedener Klimaszenarien untersucht. Diese Auswertungen erfolgten sowohl am Punkt, d. h. an kulturspezifisch repräsentativen Klimastationen als auch in der Fläche. Im Weinbau wurden Fragen bezüglich der zukünftigen Rebsorteneignung, der Verfrühung phänologischer Phasen oder der Zu- bzw. Abnahme von Spätfrösten beantwortet. Im Grünland wurden Fragestellungen bezüglich des Beginns und der Dauer der Vegetationsperiode, der Verschlechterung der klimatischen Wasserbilanz und zur Trockenstressproblematik bearbeitet. Im Ackerbau wurden die zukünftigen Vernalisationsverhältnisse bei Winterweizen und Ertragsschwankungen bei der Zuckerrübe unter Betrachtung ertragsrelevanter Witterungsparameter analysiert.

Der rheinland-pfälzische Weinbau wird laut STATISTISCHEM LANDESAMT 2010 auf insgesamt knapp 64.000 ha betrieben und konzentriert sich hierbei auf die Wärme begünstigten Lagen der größeren Flusstäler. Bei Eintreten der zugrunde gelegten Klimaprojektionen könnte der herkömmliche Anbau größeren Veränderungen unterliegen. Der projizierte Temperaturanstieg zeigt sich in einer veränderten Rebsorteneignung, welche durch den sog. Huglin-Index ermittelt werden kann (PETGEN 2007). Dieser könnte bis zur fernen Zukunft (2071-2100) in bestimmten Regionen um mehr als 400 Indexpunkte ansteigen. Durch die Klimaerwärmung könnten in Zukunft vermehrt Wärme liebende Rebsorten interessant werden. In Betracht kämen demnach insbesondere Rotweinsorten wie Cabernet sauvignon, Merlot oder sogar Syrah. Die potentielle Anbaufläche könnte sich zudem deutlich ausweiten, so dass durch eine Liberalisierung des Weinmarktes auf Seiten der EU ab 2016 auch Standorte bzw. Regionen für Weinanbau in Frage kommen würden, welche heute noch nicht weinbaulich genutzt werden. Für bestimmte Rebsorten wie den Riesling könnte das Klimaoptimum überschritten werden, welches bei schlechter Anpassung zu Qualitätseinbußen führen könnte (EITZINGER ET AL. 2009).

Die phänologischen Phasen werden sich im Zuge der zu erwartenden höheren Temperaturen deutlich verfrühen. Diese Verfrühung könnte mit Problemen einhergehen. Der prognostizierte frühere Austrieb könnte das Risiko für Spätfröste erhöhen. Diese zeigen jedoch in den meisten zugrunde gelegten Klimaprojektionen keinen signifikanten Anstieg. Erst in der fernen Zukunft (2071-2100) deuten sich häufigere Spätfrostereignisse an. Eine frühere Lesereife in der noch wärmeren und feuchteren Jahreszeit könnte zu verstärktem Befallsdruck durch Fäulniserreger führen. An dieser Stelle sind insbesondere Pilzbefall durch Botrytis oder Grünfäule zu nennen (PETGEN 2007). Eisweine könnten durch die höheren Temperaturen in bestimmten bisherigen Lagen nicht mehr zu produzieren sein. In allen zugrunde liegenden Klimaprojektionen zeigt sich eine deutliche Reduzierung von Tagen mit Minima < -7 °C, welche für eine erfolgreiche Eisweinernte benötigt werden. Eine zunehmende Gefahr durch

Starkniederschläge, welche direkte Schäden an der Pflanze bzw. indirekte Probleme durch verstärkte Bodenerosion (EITZINGER et al. 2009) verursachen könnten, ist in den diesen zugrunde liegenden Klimadaten nicht nachzuweisen.

Die Dauergrünlandbewirtschaftung nimmt in Rheinland-Pfalz laut Statistischem Landesamt etwa 233.000 ha ein und ist damit neben dem Ackerbau die zweitwichtigste landwirtschaftliche Nutzung. Die Grünlandproduktion konzentriert sich insbesondere in den klimatisch ungünstigeren Mittelgebirgsregionen von Eifel, Westerwald und Hunsrück. Von besonderem Interesse im Kontext des Klimawandels ist eine ausreichende Wasserversorgung der Grünlandstandorte. Im Vergleich zu den meisten Ackerkulturen ist die Grünlandproduktion aufgrund ihrer hohen Biomasseproduktion auf einen höheren Wasserbedarf angewiesen. Die Pflanzenbestände benötigen für die Transpiration eine möglichst gleichmäßige Niederschlagsverteilung über die gesamte Vegetationsperiode (EITZINGER et al. 2009). Diese könnte im Zuge des Klimawandels gefährdet sein. Alle zugrunde gelegten Klimaprojektionen zeigen eine deutliche Reduzierung der Sommerniederschläge und damit einhergehend eine deutlich schlechtere klimatische Wasserbilanz während der Hauptvegetationsperiode (HVP) des Grünlandes von Mai bis Oktober. Die Grünlandstandorte weisen gegenwärtig aufgrund ihrer Konzentration in höheren und klimatisch ungünstigeren Lagen verhältnismäßig positive klimatische Wasserbilanzen auf. Diese verschlechtern sich in den verwendeten Klimaprojektionen in der Zukunft deutlich. Viele der heute genutzten Standorte würden demnach über sehr geringe bis extrem geringe klimatische Wasserbilanzen während der HVP verfügen. Dies bedeutet, dass in Zukunft viele rheinland-pfälzische Grünlandstandorte unter Wassermangel leiden könnten. Besonders betroffen sind Standorte mit geringer Trockenstresstoleranz und Standorte in den heute schon trockeneren Grünlandgebieten des Oberrheingrabens. Die Folgen wären neben einer erhöhten jährlichen Ertragsvariabilität zusätzliche Kosten durch Nach- oder Neueinsaaten aufgrund durch Trockenstress verursachter Lücken in der Grasnarbe. Trockenschäden im Grünland können zudem die Verunkrautung fördern und zu verstärkter Bodenerosion beitragen. In Jahren mit genügend ganzjähriger Wasserversorgung könnte sich indes das Produktionspotenzial aufgrund längerer Wachstumsphasen verbessern (EITZINGER et al. 2009). Die verwendeten gelegten Klimaprojektionen bewirken eine deutliche Verlängerung der Vegetationsperiode im Grünland, die sich auch in einer Erhöhung der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Berechnung der Schnitthäufigkeiten ausdrückt. Verlauf und Dauer der Vegetationsperiode werden dabei entscheidend durch die jeweilige Höhenlage der Grünlandstandorte gesteuert. Im Grünland wird das zukünftige Produktionspotenzial also insbesondere von den hygrischen Verhältnissen und der Trockenstresstoleranz der jeweiligen Grünlandstandorte abhängen.

Eine ackerbauliche Nutzung findet sich in Rheinland-Pfalz laut STATISTISCHEM LANDESAMT 2010 auf insgesamt mehr als 400.000 ha. Ackerbau wird fast flächendeckend in Rheinland-Pfalz betrieben. Zu den wichtigsten Feldfrüchten zählen Winterweizen, Winterraps, Winter- und Sommergerste, Silomais und Zuckerrüben. Auch im Ackerbau liegt das Kernproblem in klimawandelinduziertem Trockenstress. Die einzelnen Kulturen verfügen über stark unterschiedliche Transpirationskoeffizienten, welche in der jeweiligen Wachstumszeit und -dauer

begründet liegen. Wintergetreide-Sorten, welche einen Teil ihrer Entwicklung in den kühleren Monaten (Herbst, Frühjahr) vollziehen, haben z. B. einen geringeren Wasserverbrauch als die entsprechenden Sommerkulturen. Kartoffeln und Zuckerrüben haben auf der anderen Seite einen höheren Wasserbedarf als Getreide aufgrund ihrer verhältnismäßig langen Vegetationszeit (CHMILIEWSKI 2007). Die wichtigsten Kulturen in Rheinland-Pfalz zeigen allesamt ein deutlich zunehmendes Trockenstressrisiko aufgrund sich verschlechternder klimatischer Wasserbilanzen während der Sommermonate. Die Toleranz der einzelnen Standorte gegenüber Trockenstress wird dabei in Zukunft sehr stark von den jeweiligen Standorteigenschaften abhängen. Erste Abschätzungen hierzu wurden bereits durch die Einbindung der in diesem Projekt entwickelten Indizes (Standortindex Basistoleranz und Standortklimaindex) durchgeführt. Neben einer alle Ackerkulturen betreffenden klimawandelinduzierten Trockenstressproblematik wurden auch einzelne kulturspezifische Auswertungen vorgenommen. Besonders hervorzuheben sind hierbei die zukünftigen Vernalisationsverhältnisse bei Wintergetreide. Winterweizen z. B. benötigt über eine Dauer von 40-80 Tagen niedrige Wintertemperaturen von 0-5 °C, um im Frühjahr auszutreiben. Diese Blühinduktion könnte in Zukunft aufgrund des allgemein höheren Temperaturniveaus gefährdet sein. An allen untersuchten Standorten zeigte sich eine deutliche Verkürzung der relevanten Einwirkungsdauer niedriger Temperaturen im Winter mit zum Teil deutlichen Unterschreitungen der kritischen 40-Tage-Grenze. Eine Verkürzung der Vernalisationsphase könnte sich negativ auf die Pflanzenentwicklung im Frühjahr auswirken. Das verzögerte Eintreten in die generative Phase verbunden mit einer früheren Abreife aufgrund zu hoher Temperaturen kann zu einer Verkürzung der Kornfüllungsphase führen und damit auch Ertragseinbußen zur Folge haben (EITZINGER et al. 2009).

Auswertungen zur Zuckerrübe zeigen eine deutliche Häufung von potentiell ertragsschwachen Jahren für die Zukunft, deren charakteristische Muster aus züchtungsbereinigten Erträgen und Klimadaten der letzten 3-5 Dekaden abgeleitet wurden. Auf Basis dieses im Projekt erstellten multifaktoriellen Fingerabdrucks konnten zukünftige Klimazeitreihen nach potentiell ertragsschwachen Jahren abgesucht werden. Es zeigte sich in allen zugrunde gelegten Simulationen eine deutliche Häufung ertragsschwacher Jahre für die Zukunft.

Im Ackerbau wird der anthropogene Klimawandel auf die einzelnen Feldfrüchte unterschiedliche Wirkungen zeigen. Für alle Feldfrüchte gilt jedoch eine ausreichende Wasserversorgung als essentiell. Ist diese nicht gewährleistet, wird eine künstliche Bewässerung in Zukunft von immer größer werdender Bedeutung. Neben dem Hauptproblem einer ausreichenden Wasserversorgung könnten sich für den Ackerbau weitere Probleme ergeben, wie das Auftreten neuer Wärme liebender Schädlinge und Krankheiten. Außerdem könnten sich hitze- und trockentolerante Unkrautarten ausbreiten und es kann mit einem zunehmenden Schadpotenzial durch Hitze und Ozon gerechnet werden. Im Winter kann es zu den bereits angesprochenen Vernalisationsproblemen bei Wintergetreide kommen. Gewinner des Klimawandels könnten Wärme liebende Sommerkulturen wie Mais oder Sonnenblumen werden, welche durch die höheren Temperaturen in ihrem Ertragspotenzial profitieren (EITZINGER et al. 2009).

Innerhalb des mehrjährigen Projektes konnte eine breite Datenbasis für zukünftige klimawandelinduzierte Fragestellungen geschaffen werden. Die Erstellung der sog. ALK++, welche auf Flurstückebene eine große Anzahl an Informationen bereitstellt, stellt hierbei eine wichtige Bezugsbasis dar. Sie beinhaltet neben hochauflösenden, aus dem Relief abgeleiteten Parametern auch geringer aufgelöste Klimadaten. In Zukunft sollte der Fokus weiterführender Analysen auf der Einbeziehung neuester Klimarechnungen und hochauflösender Geodaten liegen. Klimadatenauswertungen und Wirkmodellrechnungen sollten hierbei stets über Ensembledarstellungen erfolgen, da diese den gesamten Korridor möglicher zukünftiger Entwicklungen am besten abbilden können.

Über den Entwurf von Zukunftsprojektionen hinaus besteht die Notwendigkeit, die sich verändernden Bedingungen im Klimawandel im Auge zu behalten. Besonderes Augenmerk könnte hierbei auf die Entwicklung eines Monitoringsystems auf landwirtschaftlichen Flächen fallen. Als entscheidendes Werkzeug würden hierbei landwirtschaftliche Dauerbeobachtungsflächen im Klimawandel in Frage kommen. Dauerbeobachtungen über längere Zeiträume spielen zur Abschätzung möglicher Klimawandelfolgen in der Landwirtschaft eine entscheidende Rolle. Durch standortgebundene langfristige Aufzeichnungen könnten Zusammenhänge zwischen der Ertragsvariabilität im Ackerbau oder im Grünland und klimatischen Änderungen besser abgebildet werden. Langfristige landwirtschaftliche Beobachtungen finden derzeit in Rheinland-Pfalz nur in einem rotierenden System statt (Stichwort „Besondere Ernteermittlung“). Zur Folgenabschätzung im Klimawandel könnten sich feste Dauerbeobachtungsflächen als geeignet erweisen.

Es wird zudem von großer Relevanz sein, die Ergebnisse in die Praxis, d. h. also direkt an den Nutzer (Landwirte bzw. Winzer) zu transferieren. Dieser Transfer könnte über eine Beratungsplattform auf Basis eines sog. „Web-GIS“ erfolgen. Möglich wäre z. B. eine Einspeisung der flurstückscharfen Informationen in bereits vorhandene Informationssysteme (z. B. FLO-Rheinland-Pfalz - ein Internetportal zur Unterstützung der Landwirte bei Förderanträgen). Hierdurch könnten Nutzer direkt auf ihre Flurstücke zurückgreifen und sich z. B. in witterungskritischen Phasen Informationen zur Trockenstresstoleranz oder Kaltluftgefährdung ihrer Flächen einholen. Der Praxistransfer klimarelevanter Standortinformationen könnte auch als Entscheidungshilfe für überregionale Ebenen dienen. Hier könnten sie z. B. zu einer ressourcenschonenden Bewässerung beitragen.

Zusätzlich zu den Möglichkeiten der geodatenbasierten Charakterisierung und des Monitorings sollte in anschließenden Projekten die Modellierung von Erträgen ausgewählter Kulturarten in Rheinland-Pfalz angestrebt werden. Hier könnten flächenhafte Ertragsmodelle (z. B. MONICA oder YIELDSTAT) zur Abschätzung landwirtschaftlicher Erträge auf lokaler oder regionaler Ebene für heutige und zukünftige klimatische Verhältnisse zum Einsatz kommen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht für in diesem Projekt nicht untersuchte Forschungsfelder wie z. B. den Obst- und Gemüseanbau oder die Ausbreitung und Einwanderung von Schädlingen und Krankheiten.

Literatur

AG BODEN (2005): BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG. HANNOVER.

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D. & SMITH, M. (1998): CROP EVAPOTRANSPIRATION. GUIDELINES FOR COMPUTING CROP WATER REQUIREMENTS. FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 56. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO) OF THE UNITED NATIONS, ROME, 300 S.

ARBEITSKREIS KLIWA 2006 : LANGZEITVERHALTEN DER STARKNIEDERSCHLÄGE IN BADEN-WÜRTTEMBERG UND BAYERN. IN: KLIWA-PROJEKT A 1.1.3 „TRENDUNTERSUCHUNGEN EXTREMER NIEDERSCHLAGSEREIGNISSE IN BADEN-WÜRTTEMBERG UND BAYERN.

ARBOL, Y.P. & INGRAM, K.T. (1996): EFFECTS OF HIGHER DAY AND NIGHT TEMPERATURES ON GROWTH AND YIELDS OF SOME CROP PLANTS. IN: GLOBAL CLIMATE CHANGE AND AGRICULTURAL PRODUCTION. DIRECT AND INDIRECT EFFECTS OF CHANGING HYDROLOGICAL, PEDOLOGICAL AN PLANT PROCESSES. FAO. ROME, ITALY.

BARTELME, N. (2005): GEOINFORMATIK. MODELLE, STRUKTUREN, FUNKTIONEN. BERLIN. -- 415 S.; SPRINGER VERLAG. BERLIN UND HEIDELBERG.

BAUER, K. (1994): WEINBAU. ÖSTERREICHISCHER AGRARVERLAG. WIEN

BEHRENS, TH. (2003): DIGITALE RELIEFANALYSE ALS BASIS VON BODEN-LANDSCHAFTSMODELLEN – AM BEISPIEL DER MODELLIERUNG PERIGLAZIÄRER LAGEN AM OSTHARZ, BODEN UND LANDSCHAFT - SCHRIFTENREIHE ZUR BODENKUNDE, LANDESKULTUR UND LANSCHAFTSÖKOLOGIE, BAND 42, GIEßEN

BIGLER, C. & WUNDER, J. (2003): STATISTISCHE DATENANALYSE MIT R: EINE EINFÜHRUNG FÜR UMWELTWISSENSCHAFTLER. ZÜRICH.

BINDI, M. & HOWDEN, M. (2004): CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR CROPPING SYSTEMS IN A CHANGING CLIMATE, PROCEEDINGS OF THE 4TH INTERNATIONAL CROP SCIENCE CONGRESS, 26 SEP – 1 OCT 2004. BRISBANE.

BLASCHKE, T. & LANG, S. (2007): LANDSCHAFTSANALYSE IM GIS. STUTTGART. ULMER VERLAG.

BÖHNER, J. (2006): SAGA – ANALYSIS AND MODELLING APPLICATIONS. IN: GÖTTINGER GEOGRAPHISCHE ABHANDLUNGEN 115. GOLTZE VERLAG. GÖTTINGEN.

BUCHGRABER, K. & GINDL, G. (2004): ZEITGEMÄßE GRÜNLAND-BEWIRTSCHAFTUNG. STOCKER LEOPOLD VERLAG.

BUDIKOVA, D. (2009): ROLE OF ARCTIC SEA ICE IN GLOBAL ATMOSPHERIC CIRCULATION: A REVIEW. IN: GLOBAL AND PLANETARY CHANGE 68: S. 149-163.

CALANCA, P.; SMITH, P.; HOLZKÄMPER, A.; AMMANN, C. (2011): DIE REFERENZVERDUNSTUNG UND IHRE ANWENDUNG IN DER AGRARMETEOROLOGIE.. IN: AGRARFORSCHUNG SCHWEIZ 2 (4): 176-183.

CHMIELEWSKI, F. M. (2007): FOLGEN DES KLIMAWANDELS FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT. IN: DER KLIMAWANDEL. – EINBLICKE, RÜCKBLICKE UND AUSBLICKE. S. 75 – 85.

CHMIELEWSKI, F.-M. & KÖHN, W. (1999) IMPACT OF WEATHER ON YIELD COMPONENTS OF SPRING CEREALS OVER 30 YEARS. AGR. FOREST METEOROL. 96, 49-58.

DALY, C. (2006): GUIDE LINES FOR ASSESSING THE SUITABILITY OF SPATIAL CLIMATE DATE SETS. IN: INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY 26. S. 707-721.

DAVIES, W.J. (2006): RESPONSES OF PLANT GROWTH AND FUNCTIONING TO CHANGES IN WATER SUPPLY IN A CHANGING CLIMATE. IN: MORISON, J.I.L., MORECROFT, M.D. (HRSG.) PLANT GROWTH AND CLIMATE CHANGE. BLACKWELL PUBLISHING, OXFORD, UK, 96-117.

DE LANGE, N. (2006): GEOINFORMATIK IN THEORIE UND PRAXIS. SPRINGER-VERLAG. BERLIN.

DIE LANDWIRTSCHAFT (1998): LEHRBUCH FÜR LANDWIRTSCHAFTSSCHULEN. BAND 1. PFLANZLICHE ERZEUGUNG. MÜNCHEN. 744 S.

DIEPENBROCK, W.; ELLMER, F.; LEON, J. (2009): ACKERBAU, PFLANZENBAU UND PFLANZENZÜCHTUNG. EUGEN ULMER KG. STUTTGART.

EITZINGER, J.; KERSEBAUM, K. C.; FORMAYER H. (2009): LANDWIRTSCHAFT IM KLIMAWANDEL. AUSWIRKUNGEN UND ANPASSUNGSSTRATEGIEN FÜR DIE LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT IN MITTELEUROPA.

ERDAS, TECHNICAL DOCUMENTATION (2010): ERDAS FIELD GUIDETM,ERDAS INC., NORCROSS, GA 30092-2500 USA

ERNST, P. & LOEPER, E.-G. (1976): TEMPERATURENTWICKLUNG UND VEGETATIONSBEGINN AUF DEM GRÜNLAND: AUS DER GRÜNLANDLEHRANSTALT UND MARSCHVERSUCHSSTATION FÜR NIEDERSACHSEN, INFELD.

ESRI (2012): ARCGIS DESKTOP 10 HELP, ONLINE: HTTP://RESOURCES.ARCGIS.COM/CONTENT/WEB-BASED-HELP

EVANS, L.T. (1993): CROP EVOLUTION, ADAPTATION AND YIELD. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. 512S.

FITTER, A.H. & HAY, R.K.M. (1987): ENVIRONMENTAL PHYSIOLOGY OF PLANTS. SECOND EDITION. ACADEMIC PRESS. LONDON. 423 S.

GEISLER, G. (1980): PFLANZENBAU. EIN LEHRBUCH - BIOLOGISCHE GRUNDLAGEN UND TECHNIK DER PFLANZENPRODUKTION. BERLIN UND HAMBURG.

GEISLER, G. (1983): ERTRAGSPHYSIOLOGIE VON KULTURARTEN DES GEMÄßIGTEN KLIMAS. BERLIN UND HAMBURG. 205 S.

GERSTENGARBE, F. W. & WERNER P. (2007): DER REZENTE KLIMAWANDEL. IN: DER KLIMAWANDEL – EINBLICKE, RÜCKBLICKE UND AUSBLICKE. S. 34-43.

HANNEN, M.: BETA-RÜBEN: ZUCKER- UND FUTTERRÜBEN. IN: BACHTHALER, G. & H. HÜFFMEIER (SCHRIFTLEITUNG): DIE LANDWIRTSCHAFT BAND 1: PFLANZLICHE ERZEUGUNG – GRUNDLAGEN DER PFLANZENPRODUKTION; UMWELTVERTRÄGLICHER LANDBAU; PRODUKTIONSTECHNIK DER KULTURPFLANZEN; FUTTERKONSERVIERUNG; DAUERGRÜNLAND; NATURSCHUTZ, LANDSCHAFTSPFLEGE. S. 342-373. MÜNCHEN.

HARLFINGER, O.; KOCH, E.; SCHEIFINGER, H. (2002): KLIMAHANDBUCH DER ÖSTERREICHISCHEN BODENSCHÄTZUNG. KLIMATOGRAPHIE TEIL 2. UNIVERSITÄTSVERLAG WAGNER, INNSBRUCK, 256S.

HENGL, T; MACMILLAN,R. A. (2009): GEOMORPHOMETRY – A KEY TO LANDSCAPE MAPPING AND MODELING, DEVELOPMENTS IN SOIL SCIENCE 33.

HERMANN, I. (2007): GEOREFERENZIERTE ZEITREIHENANALYSE LANGJÄHRIGER ZEITREIHEN DER AMTLICHEN REIFEMESSUNG FÜR DAS WEINBAUGEBIET PFALZ. DIPLOMARBEIT. TRIER.

HERRMANN, H. & MEYER-ÖTTING U. (1981): AGRARWIRTSCHAFT: FACHSTUFE LANDWIRT PFLANZENPRODUKTION, TIERPRODUKTION, LANDTECHNIK. MÜNCHEN.

HERTSTEIN, U., DÄMMGEN, U., JÄGER, H.-J., MIRSCHEL, G., OBENAUF, S., ROGASIK J. (1994): WIRKUNGEN EINES VERÄNDERTEN KLIMAS AUF DIE LANDWIRTSCHAFTLICHE PRIMÄRPRODUKTION. IN: KLIMAVERÄNDERUNG UND LANDBEWIRTSCHAFTUNG TEIL II. LANDBAUFORSCHUNG VÖLKENRODE, SONDERHEFT 148, 237-294.

HOFFMANN, C. & MÄRLÄNDER, B. (2001): PERSPEKTIVEN DES ERTRAGSPOTENZIALS VON ZUCKERRÜBEN – EINFLUSS VON WITTERUNG UND STANDORT. IN: SÜDZUCKER AG (HRSG.): FORTSCHRITTE IM ZUCKERRÜBENANBAU – ERFAHRUNGEN, ERKENNTNISSE, VISIONEN – BEITRÄGE ZUR GANZHEITLICHEN BETRACHTUNG. S. 22-29. MANNHEIM.

HOPPMANN, D. (2010): TERROIR: WETTER, KLIMA UND BODEN IM WEINBAU. ULMER EUGEN VERLAG. 320S.

HOPPMANN, D. & B. BERKELMANN-LÖHNERTZ (2000): "THE PROGNOSIS OF PHENOLOGICAL STAGES OF VITIS VINIFERA (CV. RIESLING) FOR OPTIMIZING PEST MANAGEMENT." EPPO BULLETIN 30: 121-126.

HYDRON GMBH (2009): ANWENDUNG DES PROGRAMMS INTERMET ZUR INTERPOLATION VON WETTREG-DATEN IN MONATSZEITSCHRITTEN IM RAHMEN DES KLIMLANDRP-PROJEKTS.

IHAKA, R. & GENTLEMAN R. (1996): R: A LANGUAGE FOR DATA ANALYSIS AND GRAPHICS. IN: JOURNAL OF COMPUTATIONAL AND GRAPHICAL STATISTICS 5: 299-314.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2000): IPCC SPECIAL REPORT ON EMISSIONS SCENARIOS.

JAISER, R., DETHLOFF, K., HANDORF, D., RINKE, A., COHEN, J. (2012): IMPACT OF SEA ICE COVER CHANGES ON THE NORTHERN HEMISPHERE ATMOSPHERIC WINTER CIRCULATION. IN: TELLUS A 2012. DYNAMIC METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY.VOL.64.

KELLER, E.R. (1999): ZUCKERRÜBE – BIOLOGISCHE UND ÖKOLOGISCHE GRUNDLAGEN. IN: KELLER, E.R., H. HANUS & K.-U. HEYLAND (HRSG.): HANDBUCH DES PFLANZENBAUS 3 – KNOLLEN- UND WURZELFRÜCHTE, KÖRNER- UND FUTTERLEGUMINOSEN. S. 306-319. STUTTGART

KENTER, C. (2003): ERTRAGSBILDUNG VON ZUCKERRÜBEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER WITTERUNG. GÖTTINGEN.

KREIENKAMP F., SPEKAT, A. (2008): IDP. EIN WERKZEUG ZUR EXPLORATIVEN DATENANALYSE. POTSDAM.

KROPP, J.; ROITHMEIER, O.; HATTERMANN, F.; RACHIMOW, C., LÜTTGER, A.; WECHSUNG, F.; LASCH, P.; CHRISTIANSEN, E.S.; REYER, C.; SUCKOW, F.; GUTSCH, M.; HOLSTEN, A.; KARTSCHALL, T.; WODINSKI, M.; HAUF, Y.; CONRADT, T.; ÖSTERLE, H.; WALTHER, C.; LISSNER, T.; LUX, N.; TEKKEN, V.; RITCHIE, S.; KOSSAK, J.; KLAUS, M.; COSTA, L.; VETTER,,T.; KLOSE, M. (2009): KLIMAWANDEL IN SACHSEN-ANHALT - VERLETZLICHKEITEN GEGENÜBER DEN FOLGEN DES KLIMAWANDELS. ABSCHLUSSBERICHT DES POTSDAM-INSTITUTS FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG (PIK).

KÖPKE, U. (2000): ÖKOLOGISCHER LANDBAU. IN: LÜTKE ENTRUP, N., OEHMICHEN J. (HRSG.) LEHRBUCH DES PFLANZENBAUES BAND 2. KULTURPFLANZEN, THOMAS MANN VERLAG, GELSENKIRCHEN-BUER,772-819.

LATIF, L. (2012): DIE KLIMAERWARTUNG DER KOMMENDEN ZEHN JAHRE, VORTRAG 7. EXTREMWETTERKONGRESS 20. BIS 23. MÄRZ 2012, HAMBURG

LOEL, J.; KENTER, C.; HOFFMANN, C. (2011): ANALYSE DES ZUCHTFORTSCHRITTS VON ZUCKERRÜBEN. SUGAR INDUSTRY 136 (2): 109-118.

LORENZ, D. H.; EICHHORN, K. W.; BLEIHOLDER, H.; KLOSE, R.; MEIER, U.; WEBER, E. (1994): PHÄNOLOGISCHE ENTWICKLUNSSTADIEN DER WEINREBE – CODIERUNG UND BESCHREIBUNG NACH DER ERWEITERTEN BBCH-SKALA. IN: DIE WEINWISSENSCHAFT, VITICULTURAL AND ECOLOGICAL SCIENCES, 66-70. FACHVERLAG DR. FRAUND GMBH. MAINZ.

MICHEL, S.; SCHWAB, A.; KÖNIGER, S. (2005): STANDORTBEWERTUNG: DAS GELÄNDEKLIMA. IN: DER DEUTSCHE WEINBAU. NR.1 22-25. NEUSTADT AN DER WEINSTRAßE

MINISTERIUM FÜR UMWELT, FORSTEN UND VERBRAUCHERSCHUTZ RHEINLAND-PFALZ (2007): KLIMABERICHT RHEINLAND-PFALZ. MAINZ

MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, VERKEHR, LANDWIRTSCHAFT UND WEINBAU RHEINLAND-PFALZ (2005): WEINKULTURLANDSCHAFTSPROGRAMM STEILLAGEN.

MITCHELL, A. (2001): THE ESRI GUIDE TO GIS ANALYSIS, VOLUME 1: GEOGRAPHIC PATTERNS AND RELATIONSHIPS. 190S.

MÜNZER, W. & FISCHER, K. (1991): KÖRNERLEGUMINOSEN-COMPENDIUM. ARBEITSUNTERLAGEN FÜR DEN FACHBEREICH. FREISING-MÜNCHEN.124 S.

MUES, V. (2000): GIS-GESTÜTZTE REGIONALISIERUNG VON KLIMA-UND DEPOSITIONSDATEN IN NIEDERSACHSEN, DISSERTATION, GÖTTINGEN

OEHMICHEN, J. (1986): PLANZENPRODUKTION. BAND 2. PRODUKTIONSTECHNIK. BERLIN UND HAMBURG. 607S.

OLESEN, J.E. & BINDI, M. (2003): AGRICULTURAL IMPACTS AND ADAPTIONS TO CLIMATE CHANGE IN EUROPE. FARM POLICY JOURNAL. POTSDAM.

PEREIRA, J.S.; CHAVES, M.-M.; CALDEIRA, M.-C.; CORREIA, A.V. (2006): WATER AVAILABILITY AND PRODUCTIVITY. IN: MORISON, J.I.L., MORECROFT, M.D.(HRSG.) PLANT GROWTH AND CLIMATE CHANGE. BLACKWELL PUBLISHING, OXFORD, UK, 118-145.

PETGEN M. (2007): REAKTION DER REBEN AUF DEN KLIMAWANDEL. IN: SCHWEIZERISCHE ZEITUNG FÜR OBST UND WEINBAU NR. 9/07. S. 6-9. WÄDENSWIL.

PETGEN M. (2008): SONNENBRANDSCHÄDEN AN TRAUBEN. FOLGEN DES KLIMAWANDELS? IN: DAS DEUTSCHE WEINMAGAZIN 21. S. 26-30.

PIKE, R.J.; EVANS, I.S.; HENGL, T. (2009): GEOMORPHOMETRY: A BRIEF GUIDE. IN: HENGL, T. [HRSG.] U. H.I. REUTER [HRSG.]: GEOMORPHOMETRY - CONCEPTS, SOFTWARE, APPLICATIONS. DEVELOPMENTS IN SOIL SCIENCE, BD. 33, ELSEVIER, AMSTERDAM/OXFORD, S. 3-30.

REINER, L.; BAUMER, M.; BUHLMANN, V.; GRASER, S.; KLASEN, M.; MANGSTL, A.; MEIER, B.; REHSE, E.; U. A. (1988): WINTERGERSTE AKTUELL. FRANKFURT AM MAIN. 240S.

RICHTER, R. (2002). HINWEISE ZUR VERMEHRUNG VON GRÄSERN. IN G. ERBE, HANDBUCH SAATGUT VERMEHRUNG. S. 75-96. AGRIMEDIA. BERGEN UND DUMME.

ROSENZWEIG, C.; HILLEL, D. (1998): CARBON DIOXIDE, CLIMATE CHANGE AND CROP YIELDS. IN: ROSENZWEIG, C., HILLEL, D. (HRSG.) CLIMATE CHANGE AND THE GLOBAL HARVEST. POTENTIAL IMPACTS OF THE GREENHOUSE EFFECT ON AGRICULTURE. OXFORD UNIVERSITY PRESS. OXFORD, 70-100.

RÖSTEL, H.J. (1999): ZUCKERRÜBE – MORPHOLOGIE UND ANATOMIE. IN: KELLER, E.R., H. HANUS & K.-U. HEYLAND (HRSG.): HANDBUCH DES PFLANZENBAUS 3 – KNOLLEN- UND WURZELFRÜCHTE, KÖRNER- UND FUTTERLEGUMINOSEN. STUTTGART: 319-355.

ROWE, J. S. (1996): LAND CLASSIFICATION AND ECOSYSTEM CLASSIFICATION, ENVIRONMENTAL MONITORING AND ASSESSMENT 39:11-20.

SCHÄR, C.; VIDALE, P.L.; LÜTHI, D.; FREI, C.; HÄBERLI, C.; LINIGER, M.A.; APPENZELLER, C. (2004): THE ROLE OF INCREASING TEMPERATURE VARIABILITY IN EUROPEAN SUMMER HEAT WAVES, NATURE 427. S. 332 – 336.

SCHAUMBERGER, A. (2005): ERTRAGSANALYSE IM ÖSTERREICHISCHEN GRÜNLAND MITTELS GIS UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG KLIMATISCHER VERÄNDERUNGEN. IRDNING. 66 S.

SCHAUMBERGER, A.; PÖTSCH, M.; BUCHGRABER, K. (2010): ABSCHLUSSBERICHT GT HARTBERG PROJEKT NR. 100082. RÄUMLICHE MODELLIERUNG VON GRÜNLANDERTRÄGEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON WITTERUNGSEINFLÜSSEN. IRDNING.

SCHÖNBERGER, H. & KROPF, U. (2000): HAFER (AVENA SATIVA). IN: OEHMICHEN, J., LÜTKE ENTRUP, N. (HRSG.) LEHRBUCH DES PFLANZENBAUES. BAND 2, KULTURPFLANZEN, 387-397.

SCHULTZ, H.R.; HOPPMANN, D.; HOFMANN, M. (2006): BEITRAG ZUM INTEGRIERTEN KLIMASCHUTZPROGRAMM DES LANDES HESSEN (INKLIM 2012) DES FACHGEBIETS WEINBAU DER FORSCHUNGSANSTALT GEISENHEIM. DER EINFLUSS KLIMATISCHER VERÄNDERUNGEN AUF DIE PHÄNOLOGISCHE ENTWICKLUNG DER REBE, DIE SORTENEIGNUNG SOWIE MOSTGEWICHT UND SÄURESTRUKTUR DER TRAUBEN.

STOCK, M. ET AL. (2007): PERSPEKTIVEN DER KLIMAÄNDERUNG BIS 2050 FÜR DEN WEINBAU IN DEUTSCHLAND (KLIMA 2050), POTSDAM INSTITUTE FOR CLIMATE IMPACT RESEARCH; PIK-REPORT 106. POTSDAM.

STATISTISCHES LANDESAMT (2012): STATISTISCHE BÄNDE. DIE LANDWIRTSCHAFT 2010. BAND 399.

STREIT; A. (2004): GIS-EINSATZ IN DER LANDWIRTSCHAFT – DEFIZITE UND ENTWICKLUNGSPOTENTIALE. IN: GEOGRAPHISCHE INFORMATIONSSYSTEME IN DER LANDWIRTSCHAFT UND IM LÄNDLICHEN RAUM. KTBL-SCHRIFTEN-VERTRIEB IM LANDWIRTSCHAFTSVERLAG GMBH. DARMSTADT.

TRNKA, M., EITZINGER, J., GRUSZCZYNSKI, G.; BUCHGRABER, K.; RESCH, R.; SCHAUMBERGER, A. (2006): A SIMPLE STATISTICAL MODEL FOR PREDICTING HERBAGE PRODUCTION FROM PERMANENT GRASSLAND. IN: GRASS & FORAGE SCIENCE 61.3. S. 253-271.

TROUGHT, M.C.T.; HOWELL, G.S.; CHERRY, N. (1999): PRACTICAL CONSIDERATIONS FOR REDUCING FROST DAMAGE IN VINEYARDS. IN: REPORT TO NEW ZEALAND WINEGROWERS. LINCOLN UNIVERSITY. CANTERBURY.

UMWELTBUNDESAMT (2007): NEUE ERGEBNISSE ZU REGIONALEN KLIMAÄNDERUNGEN. DAS STATISTISCHE REGIONALISIERUNGSMODELL WETTREG. DESSAU.

VERBAND DER HESSISCH-PFÄLZISCHEN ZUCKERRÜBENANBAUER E.V. (HRSG.) (1949-2010): GESCHÄFTSBERICHTE DER JAHRE 1949-2010. WORMS.

VERMESSUNGS- UND KATASTERVERWALTUNG RHEINLAND-PFALZ (2008): RICHTLINIEN ZUR BILDUNG UND ABBILDUNG VON OBJEKTEN DER AUTOMATISIERTEN LIEGENSCHAFTSKARTE -OBJEKTABBILDUNGSKATALOG LIEGENSCHAFTSKARTE RHEINLAND-PFALZ - (OBAK-LIKA RP), MINISTERIUM DES INNERN UND FÜR SPORT RHEINLAND-PFALZ, MAINZ

VOIGTLÄNDER, G. & JACOB, H. (1987): GRÜNLANDWIRTSCHAFT UND FUTTERBAU. EUGEN ULMER VERLAG. STUTTGART.

WEINBERGER, K. (2009): MANAGEMENT VON WETTERRISIKEN IN ANBETRACHT DES KLIMAWANDELS UND DER GAP-REFORM. LÄNDLICHER RAUM 02/2010 (ON-LINE) - WWW.LAENDLICHER-RAUM.AT

WEISHEIMER A. & PALMER, T.N. (2005): CHANGING FREQUENCY OF OCCURRENCE OF EXTREME SEASONAL TEMPERATURES UNDER GLOBAL WARMING. IN: GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS 32, L 20721, DOI, 10.1029/2005GLO23365.

WILLMS, M. & EULENSTEIN, F. & MÜLLER, L. & SCHINDLER, U. & MIRSCHEL, W. & FISCHER, A. (2006): ZALF-GUTACHTEN ZUM WASSERHAUSHALT. - IN: DATEN ZUM INTEGRIERTEN KLIMASCHUTZMANAGEMENT IM LAND BRANDENBURG: 70-75; POTSDAM (LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG).

ZEBISCH, M.; GROTHMANN, T.; SCHRÖTER, D.; HASSE, C.; FRITSCH, U.; CRAMER, W. (2005): KLIMAWANDEL IN DEUTSCHLAND – VULNERABILITÄT UND ANPASSUNGSSTRATEGIEN KLIMASENSITIVER SYSTEME. UMWELTBUNDESAMT DESSAU.

Internet:

DEUTSCHER WETTERDIENST (2011): DEUTSCHER KLIMAATLAS, HTTP://WWW.DWD.DE/KLIMAATLAS

SCHÖNIGER, M. & DIETRICH, J. (2009): HYDROSCRIPT (INTERNET: HTTP://WWW.HYDROSKRIPT.DE/HTML/_INDEX.HTML?PAGE=/HTML/HYKP0505.HTML). 23.04.2009.

STATISTISCHES LANDESAMT RHEINLAND-PFALZ 2010: HTTP://WWW.STATISTIK.RLP.DE/WIRTSCHAFT/LANDWIRTSCHAFT/TABELLEN/WE4_RLP/ (11.05.2012).

Wissenschaftliche Zwischen- und Abschlussarbeiten innerhalb des Moduls „Landwirtschaft“:

EISENBACH, L. (2010): KLIMAWANDEL UND DIE AUSWIRKUNGEN AUF DEN WEINBAU IN RHEINHESSEN - THEORETISCHE PROGNOSEN KONTRA PRAKTISCHE WAHRNEHMUNGEN. STAATSEXAMENSARBEIT AN DER UNIVERSITÄT MAINZ.

KREMER, P. (2011): MÖGLICHE AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF DIE ZUCKERRÜBENERTRÄGE IN AUSGEWÄHLTEN REGIONEN IN RHEINHESSEN UND DER PFALZ. STAATSEXAMENSARBEIT AN DER UNIVERSITÄT MAINZ.

STREIB, L. (2012): KLIMAIMPAKTRISIKO FÜR GRÜNLANDFLÄCHEN. ZUKUNFTSSZENARIEN GIS-BASIERTER ERTRAGSMODELLIERUNG IN RHEINLAND-PFALZ. DIPLOMARBEIT UNIVERSITÄT KOBLENZ/LANDAU.

Datenquellen

ANBAUDATEN (INVEKOS): DATEN DER LANDWIRTSCHAFTLICHEN BETRIEBSDATENBANK (LBD) RHEINLAND-PFALZ.

GEMESSENE KLIMADATEN: DEUTSCHER WETTERDIENST 1951-2003. OFFENBACH.

PROJIZIERTE KLIMADATEN: WETTREG2006 (CEC); STAR (PIK): JEWEILS ZUR VERFÜGUNG GESTELLT VOM UMWELTBUNDESAMT (2008).

ZUCKERRÜBENERTRAGSDATEN: VERBAND DER HESSISCH-PFÄLZISCHEN ZUCKERRÜBEN-ANBAUER E.V. (HRSG.) (1949-2010): GESCHÄFTSBERICHTE DER JAHRE 1949-2010. WORMS.