

Reihe KLIMOPASS-Berichte

Projektnr.: 4500308017/23

Die Ertragsdaten der Feldfrüchte  
in Baden-Württemberg  
und ihre Beziehung zu Klima und Boden

von E. Koller und H. Flaig

Finanziert mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und  
Energiewirtschaft Baden-Württemberg

Dezember 2014

**KLIMOPASS**

**– Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg**



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

<b>HERAUSGEBER</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe
<b>KONTAKT KLIMOPASS</b>	Dr. Kai Höpker, Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel; Tel.:0721/56001465, <a href="mailto:Kai.Hoepker@lubw.bwl.de">Kai.Hoepker@lubw.bwl.de</a>
<b>FINANZIERUNG</b>	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg - Programm Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg (KLIMOPASS)
<b>BEARBEITUNG UND VERANTWORTLICH FÜR DEN INHALT</b>	Dr. Eva Koller, Dr. Holger Flaig Landwirtschaftliches Technologiezentrum (LTZ) Augustenberg, Karlsruhe
<b>BEZUG</b>	<a href="http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/">http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/</a> ID Umweltbeobachtung U81-W03-N15
<b>STAND</b>	Dezember 2014, Internetausgabe Februar 2015

Verantwortlich für den Inhalt sind die Autorinnen und Autoren. Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Nachdruck für kommerzielle Zwecke - auch auszugsweise - ist nur mit Zustimmung der LUBW unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

# Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung .....	1
1.1	Fragestellung und Projektkonzeption .....	1
1.2	Landesebene .....	1
1.3	Landkreisebene.....	2
1.4	Einfluss der Bodeneigenschaften.....	3
1.5	Extremwerte .....	3
2	Einleitung .....	4
2.1	Hintergrund und Zielsetzung des Projekts.....	4
2.2	Statistische Vorbemerkungen.....	6
2.2.1	Modellbeschreibungen.....	6
2.2.2	Voraussetzungen für die lineare Regression.....	7
2.3	Gliederung des Berichts.....	7
3	Die Erträge der Feldfrüchte in Beziehung zu Temperatur und Niederschlag in Baden-Württemberg von 1952-2011 .....	8
3.1	Einleitung .....	8
3.2	Methode.....	8
3.3	Klimatische Entwicklung in Baden-Württemberg 1952-2011 .....	9
3.4	Erträge in Abhängigkeit von klimatischen Bedingungen 1952-2011.....	11
3.4.1	Winterweizen.....	11
3.4.2	Wintergerste.....	15
3.4.3	Sommergerste .....	18
3.4.4	Kartoffeln und Zuckerrüben .....	20
3.4.5	Silomais .....	27
3.5	Diskussion .....	30
4	Die Erträge der Feldfrüchte in Beziehung auf Temperatur und Niederschlag in den einzelnen Landkreisen des Landes Baden-Württemberg 1973-2012 .....	34
4.1	Einleitung .....	34
4.2	Methode.....	34
4.3	Erträge in Abhängigkeit von klimatischen Bedingungen in den Landkreisen Baden-Württembergs (1974-2012).....	35
4.3.1	Winterweizen.....	35
4.3.2	Wintergerste.....	40

4.3.3	Sommergerste .....	44
4.3.4	Kartoffeln und Zuckerrüben .....	48
4.3.5	Silo- und Körnermais.....	56
4.3.6	Winterroggen.....	64
4.3.7	Winterraps .....	68
4.4	Zeitliche Entwicklung von Klima und Ertrag in Baden-Württemberg – welche Faktoren sind beteiligt?.....	72
4.5	Diskussion .....	74
5	Die Erträge der Feldfrüchte in Beziehung auf Klima und Bodeneigenschaften in Baden-Württemberg 1974-2012.....	76
5.1	Einleitung .....	76
5.2	Methode.....	76
5.2.1	Großräumige Analyse der Kreisdaten .....	76
5.2.2	Ausmaß der Auswirkungen der Klimavariabilität in Bezug auf Boden und ursprüngliche Klimavoraussetzungen .....	77
5.3	Erträge der Feldfrüchte in Beziehung auf Klima über alle Landkreise .....	78
5.3.1	Temperatur .....	78
5.3.2	Niederschlag.....	83
5.4	Erträge der Feldfrüchte in Beziehung auf Klima unter Berücksichtigung der Bodenparameter.....	89
5.5	Erträge der Feldfrüchte in Beziehung auf Klima unter Berücksichtigung der klimatischen Anfangsbedingungen.....	92
5.6	Diskussion .....	95
6	Die Auswirkung von extremen klimatischen Ereignissen auf Erträge der Feldfrüchte in Baden-Württemberg 1974-2012 .....	97
6.1	Einleitung .....	97
6.2	Methode.....	97
6.3	Die direkte Auswirkung extremer Ereignisse auf den Ertrag .....	98
6.4	Erträge in Abhängigkeit von Temperatur und extremen Temperaturereignissen (Frost und Hitze) und deren Interaktion .....	104
6.4.1	Frost.....	104
6.4.2	Hitze .....	108
6.5	Das Extremjahr 2003 .....	112
6.6	Diskussion zu extremen Klimaereignissen.....	114
6.6.1	Auswirkungen von extremen Klimaereignissen auf die Erträge der Feldfrüchte.....	114
6.6.2	Ertragseinbrüche im Extremjahr 2003.....	114
7	Allgemeine Diskussion.....	116

8 Literaturverzeichnis ..... 118

# 1 Zusammenfassung

## 1.1 Fragestellung und Projektkonzeption

Die Ertragsdaten der Feldfrüchte in Baden-Württemberg wurden mit Klimadaten in Beziehung gesetzt. Dazu wurde ein statistischer Ansatz verwendet, bei dem bereits vorhandene Daten zu (beispielsweise) Temperatur und Niederschlag mit den realen Hektarerträgen der gängigsten Ackerkulturen in Baden-Württemberg statistisch korreliert wurden, um abzuschätzen, ob die Veränderungen der Klimafaktoren in den letzten Jahrzehnten bereits signifikante Auswirkungen auf die Erträge gehabt haben. Es wurden keine Pflanzenwachstumsmodelle benutzt oder Zukunftsprojektionen abgeleitet. Weiterhin wurden Bodenparameter, wie z.B. die Bodenzahl, auf Landkreisebene erhoben und als zusätzlicher, möglicherweise erklärender Faktor in die statistische Analyse eingebaut.

Wir betrachteten in diesem Projekt sowohl landesweite Durchschnitte als auch statistische Beziehungen auf Landkreisebene. Weiterhin wurden die Klima-Ertrags-Beziehungen in Abhängigkeit von Boden und klimatischer Ausgangssituation und der Einfluss von klimatischen Extremereignissen auf die Ertragsbildung der einzelnen Feldfrüchte analysiert.

Ertragsdaten wurden vom Statistischen Landesamt Baden-Württemberg für neun Kulturarten bereitgestellt (Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Roggen, Silomais, Körnermais, Zuckerrüben, Kartoffeln und Winterraps). Auf Landesebene sind diese Daten von 1953-2011 vorhanden – auf Landkreisebene sind die Daten aufgrund der Kreisreform auf den Zeitraum 1973-2011 beschränkt. Die Klimadaten wurden vom Deutschen Wetterdienst bezogen und die hinsichtlich Laufzeit und Lage relevanten Wetterstationen den Landkreisen zugeordnet. Die Bodendaten wurden vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau auf Gemeindeebene zur Verfügung gestellt. Sie wurden durch die Bildung gewichteter Mittel auf Landkreisebene aggregiert. Bei der Häufigkeit extremer Wetterereignisse konnten wir auf Auswertungen der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle des DWD für ein anderes Projekt zurückgreifen.

Die hauptsächlich verwendeten statistischen Methoden beruhen auf linearer und multipler Regression, ergänzt um Modelle, die bei eventuellen Verletzungen der statistischen Bedingungen für das einfache lineare Regressionsmodell eingesetzt werden (z.B. *generalized least square* oder *mixed effect models*).

## 1.2 Landesebene

Die mittlere Jahrestemperatur ist in Baden-Württemberg in den letzten 30 Jahren um etwa 1°C angestiegen. Etwa ab Ende der 70-er Jahre ist ein steilerer Aufwärtstrend zu beobachten. Im Gegensatz hierzu ist bei der Jahressumme der Niederschläge statistisch kein deutlicher Trend zu erkennen.

Auf Landesebene war der Ertrag verschiedener Feldfrüchte positiv mit der mittleren Temperatur korreliert, und zwar sowohl mit dem Jahresdurchschnitt als auch mit dem Durchschnitt relevanter einzelner Jahreszeiten (insbesondere Frühjahr und Sommer). Im Gegensatz dazu waren die Erträge nicht mit Jahresniederschlagssummen korreliert, und es gab bei Verwendung multipler Regression zumeist keinen Interaktionseffekt zwischen Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlagssumme. Bei Betrachtung der einzelnen Jahreszeiten waren allerdings Niederschläge im Sommer mit Erträgen korreliert, wenn auch nur in

multipler Regression, bei der sowohl Temperatur als auch Niederschlag in derselben Regressionsanalyse berücksichtigt werden.

Fachlich überraschend ist der Befund, dass statistisch der Ertrag steigt, je weniger Niederschlag gefallen ist. Eine Erklärung für diesen Befund mag eine Autokorrelation liefern: Vor allem im Sommer ist das Temperaturmittel mit der Niederschlagssumme korreliert: Je höher die Temperatur, desto geringer der Niederschlag. Es ist also möglich, dass der Eindruck, die Niederschlagssumme wäre im multiplen Regressionsmodell signifikant negativ mit Ertrag korreliert, daran liegt, dass Ertrag stark positiv mit Temperatur korreliert und Niederschlag negativ mit Temperatur korreliert.

### 1.3 Landkreisebene

Im nächsten Ansatz wurden die Ertragsdaten mit Klimadaten auf der Kreisebene korreliert. Aus den Monatsdaten der Klimaparameter wurden jeweils die Temperaturdurchschnitte für die Vegetationsperioden der einzelnen Kulturen gebildet. In den meisten Landkreisen konnten positive Zusammenhänge zwischen Temperatur und Ertrag für die meisten Kulturen gefunden werden und nur in manchen Kreisen schwache negative Korrelationen zwischen Niederschlag und Ertrag (zur Diskussion dieses Ergebnisses s.o.).

Es scheint daher wahrscheinlich, dass die Temperatur zumindest in manchen Teilen des Landes noch nicht das Optimum für das Wachstum der Feldfrüchte erreicht hat. So fällt bei näherer Betrachtung der statistischen Kennzahlen für die Korrelation von Ertrag mit Temperatur auf, dass eher die Landkreise in den kühleren Regionen des Landes mit hohen Signifikanzwerten, Bestimmtheitsmaßen und hohen Steigungen aufwarten (auch wenn wie beim Niederschlag das Muster nicht durchgehend plausibel ist). Ein solcher Befund wäre bei Temperaturlimitierung der Ertragsbildung auch zu erwarten. Eine vertiefte Analyse ergab darüber hinaus, dass der Effekt höherer Temperaturen auf den Getreideertrag desto größer war, je geringer die Durchschnittstemperatur des Kreises zu Beginn des untersuchten Zeitraums war.

Die Wasserversorgung hingegen ist für das Wachstum oder den Ertrag noch nicht limitierend. Eine Ausnahme ist der Main-Tauber-Kreis (für Wintergerste, Silomais, Winterraps), der zu den niederschlagsärmsten Kreisen in Baden-Württemberg gehört und dessen Böden auch zum Großteil eher flachgründig und damit von geringer Wasserspeicherfähigkeit sind. Wahrscheinlich ist der Niederschlag allein in der Mehrzahl der Landkreise kein hinreichendes Maß für die Wasserversorgung der Pflanzen. Ohne die Betrachtung der Wasserspeicherfähigkeit der Böden ist das Bild der Wasserversorgung der Kulturpflanzen offensichtlich nicht nur in der Praxis, sondern auch in der statistischen Annäherung an die Realität unvollständig.

Auch wenn weitere Faktoren wie Züchtung und damit verbesserte Sorten, Fortschritte bei der Bewirtschaftung (Düngung, Pflanzenschutz, Technik) und der CO<sub>2</sub>-Konzentrationsanstieg in der Atmosphäre zum Ertragsfortschritt beigetragen haben, können wir als grobes Ergebnis dieser Analysen festhalten, dass die steigenden Temperaturen seit den 70er Jahren bereits positive Auswirkungen auf die Erträge der meisten Kulturen, vor allem der Getreidearten, hatten. Im Gegensatz dazu konnten wir keine Zusammenhänge zwischen der Variabilität von Niederschlagssummen und Erträgen finden. Wir können also davon ausgehen, dass für den bisherigen Einfluss des Klimawandels auf die Erträge vor allem die Temperaturentwicklung eine Rolle spielt; Niederschläge greifen zum Teil modulierend ein.

## 1.4 Einfluss der Bodeneigenschaften

Um die Zusammenhänge von Bodeneigenschaften und Klima für die Ertragsbildung zu analysieren, wurde die Temperaturwirkung mit der Bodenzahl in Beziehung gesetzt. Als Maß der Temperatureinwirkung auf die Erträge wurde die Steigung der linearen Regressionen für die Landkreise (und Kulturen) benutzt, in denen es eine signifikante Korrelation zwischen Temperatur und Ertrag gab.

Das Ausmaß der Ertragsteigerung mit dem Temperaturanstieg war bei Winterweizen, Wintergerste und Sommergerste am niedrigsten in den Landkreisen mit hohen Bodenzahlen (also qualitativ „guten“ Böden), und am höchsten in Landkreisen mit niedrigen Bodenzahlen. Eine Erklärung für den eher unerwarteten statistischen Befund wäre die Tatsache, dass die Bodenzahlen mit der „Anfangstemperatur“ 1973 positiv korreliert sind. Die besseren Böden sind also eher in den wärmeren Regionen zu finden.

## 1.5 Extremwerte

In der Extremwertanalyse wurden zwei Ansätze verfolgt: Zum einen wurde die Anzahl von Hitze-, Frost- und trockenen Tagen mit einem einfachen linearen Modell mit den Erträgen ausgewählter Kulturarten korreliert. Hier wurden die gemittelten Daten aus allen Landkreisen zusammen analysiert. Zum anderen führten wir einen Vergleich des Extremjahres 2003 mit dem Fünfjahreszeitraum vorher (1998-2002) durch.

Allgemein hatte die Anzahl der extremen Klimaereignisse allein weniger Einfluss auf die Erträge als angenommen. Hitzeereignisse im Mai waren zwar im einfachen Modell recht häufig positiv mit Ertrag korreliert. Dies ist aber vermutlich darauf zurückzuführen, dass Tage mit 28° C im Mai häufiger sind, wenn die allgemeinen Temperaturen im Mai höher als gewöhnlich sind, und dann greift die positive Temperatur-Ertragskorrelation. Es ist nach dieser Analyse zu vermuten, dass einzelne Tage mit Extremwerten relativ gut toleriert werden. Silomais bricht aus dem Muster aus: Der Ertrag war negativ mit der Anzahl der Tage über 28° C im Juli korreliert und ebenso negativ mit der Anzahl der Trockentage (nFK < 40%) im August.

In den Kulturen, bei denen ein interaktiver Effekt der „Hintergrundtemperatur“ und der Hitzeereignisse auf die Erträge gefunden wurde, war dieser interaktive Effekt stets negativ. Das heißt, Hitzeereignisse hatten einen negativen Effekt, wenn die Temperatur allgemein hoch war. Diese Art der Interaktion wurde vor allem im Juni (Körnermais) und Juli (Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Körnermais) gefunden, also zur Hauptwachstums- und Reifezeit. Es ist möglich, dass es hier ein Zusammenwirken mit der Evapotranspiration und daher dem Wasserhaushalt gab, dass also langanhaltende warme Temperaturen den Wasservorrat des Bodens erschöpft hatten und die Pflanzen damit einem zusätzlichen Stressfaktor ausgesetzt waren.

Im Jahr 2003 mit seinem extremen Sommer, charakterisiert durch außergewöhnlich hohe Temperaturen im Juni und August sowie niedrige Bodenfeuchten, lagen die landwirtschaftlichen Erträge in weiten Teilen des Landes zum Teil deutlich unter dem Durchschnitt der Vorjahre. Die Analyse der Ertragseinbrüche zeigte: Je höher die Mehranzahl an Hitzetagen gegenüber den Vorjahren war, desto höher waren 2003 die Ertragseinbrüche in allen vier untersuchten Kulturarten. Die Schwellenwerte waren dabei unterschiedlich: Erträge von Winterweizen und Sommergerste waren negativ mit der Mehranzahl der Hitzetage über 28, 30 und 32 °C korreliert. Körnermais reagierte bei den Schwellenwerten 28 °C und 32 °C, Silomais bei 32 °C. Das Jahr 2003 bot damit Hinweise darauf, wo die Schwellenwerte für negative Temperatureinwirkung auf den Ertrag liegen könnten und mit welchen Konsequenzen aus vermehrt auftretenden Hitzeperioden mit fortschreitendem Klimawandel gerechnet werden muss.



## 2 Einleitung

### 2.1 Hintergrund und Zielsetzung des Projekts

Der Klimawandel hat bereits eingesetzt und er wird weitergehen. Bereits im Projekt KLARA (Klimawandel – Auswirkungen, Risiken, Anpassung; Stock 2005) konnte aus den Klimadaten abgeleitet werden, dass die Jahresdurchschnittstemperatur in Baden-Württemberg von 1951 bis 2000 zwischen 0,6 und 1,5 °C je nach Region zugenommen hat. Gleichzeitig wurde bis auf wenige Ausnahmen eine Niederschlagszunahme um im Mittel 90 mm im Jahr beobachtet, was einer relativen mittleren Zunahme um 9% entspricht. Hinsichtlich der Veränderung von Schwellenwertereignissen waren eine Zunahme der Sommertage (maximale Temperatur > 25 °C), eine Abnahme der Frosttage (minimale Temperatur < 0 °C) und eine Zunahme der Starkniederschlagstage (Niederschlag > 10 mm) festzustellen. Hinzu kam eine Zunahme des Potentials für Gewitter und Hagel (Stock 2005).

Sowohl die Berichte des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC 2013), als auch die regionalen Klimaprojektionen für Baden-Württemberg (LUBW 2013) lassen keinen Zweifel daran, dass sich das Klima auch im Südwesten Deutschlands in den kommenden Jahrzehnten weiter deutlich ändern wird. Baden-Württemberg ist im deutschlandweiten Vergleich sogar besonders vom Klimawandel betroffen: Erwartet wird ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 3-4 Grad bis Ende des Jahrhunderts und im Median der Modelle ein Rückgang der sommerlichen Niederschläge um ca. 10%; hinzu kommt eine Steigerung der Evapotranspiration durch die höheren Temperaturen. Korrespondierend dazu wird mit einem Anstieg der Anzahl und Intensität von Hitzetagen und Trockenperioden gerechnet. Und schließlich werden Gewitter, Hagelereignisse und Starkniederschläge an Anzahl oder Intensität vermutlich zunehmen (Kunz et al. 2009, Kapsch et al. 2012). Die Landwirtschaft wird wie kaum ein anderer Wirtschaftszweig unmittelbar vom Wettergeschehen beeinflusst, insofern sollte sie sich rechtzeitig auf die klimatischen Veränderungen einstellen (Flaig 2013). Doch ist sie nicht allein betroffen; der Produktionserfolg der Landwirtschaft hat Auswirkungen auf unsere Versorgung mit Nahrungsmitteln und nachwachsenden Rohstoffen.

Wie wird sich die Ertragslage der heimischen Landwirtschaft in den nächsten Jahrzehnten entwickeln? Wird es zu Ertragsrückgängen kommen oder werden die Erträge eher zunehmen? Wird sich das Anbauverhältnis der Kulturarten untereinander ändern? Fragen wie diesen wird in vielen Untersuchungen nachgegangen, zumeist indem Pflanzenwachstumsmodelle mit entsprechend berechneten Klimaparametern gespeist werden. Die Ergebnisse sind zumindest für Mitteleuropa keineswegs eindeutig. Wie Studien für Nordrhein-Westfalen oder Sachsen zeigen (MKULNV 2011, SMUL 2009), hängt das Ergebnis bereits qualitativ – also ob mit Ertragszunahme oder –abnahme gerechnet werden muss – davon ab, welche Annahmen man für die Niederschläge in der Vegetationsperiode, das zukünftig zu erwartende Ausmaß der CO<sub>2</sub>-Düngung und die Fortschritte in der Pflanzenzüchtung macht. Hinzu kommen Unsicherheiten wie das Ausmaß der Schonung des Bodenwasservorrats durch verringerte Transpiration infolge der höheren CO<sub>2</sub>-Konzentration (Weigel et al. 2007) oder ein mögliches häufigeres Vorkommen von Frühsommertrockenheit, deren Auftreten in den letzten Jahren von den Klimamodellen nicht reproduziert werden kann (DWD 2014a).

Unser Projektansatz war ein anderer. In einer retrospektiven Analyse wurden die vorliegenden Ertragsdaten der Feldfrüchte in Baden-Württemberg mit den ebenfalls vorliegenden Klimadaten in Beziehung gesetzt. Unter Berücksichtigung der im Land dokumentierten Bodeneigenschaften wurden mögliche Beziehungen zwischen der Ertragshöhe und bestimmten Klimafaktoren identifiziert und geprüft, ob die Veränderungen

dieser Faktoren in den letzten Jahrzehnten bereits signifikante Auswirkung auf die Erträge gehabt haben. Wir haben hierzu einen statistischen Ansatz verwendet, bei dem wir beispielsweise Daten zu Temperatur oder Niederschlag mit den Hektarerträgen der gängigsten Ackerkulturen in Baden-Württemberg statistisch korreliert haben, um die Reaktion der landwirtschaftlichen Erträge auf den Klimawandel abzuschätzen. Weiterhin fanden in diesem Projekt nicht nur klimatische, sondern auch Bodeneigenschaften Beachtung. Hierzu wurden Bodenparameter, wie z.B. die Ackerzahl, auf Landkreisebene erhoben und als erklärender Faktor in die statistische Analyse eingebaut.

Mit den Ergebnissen dieser Arbeit könnten regionale Ertragsmodelle für die Zukunft verfeinert und validiert werden. Der Blick zurück ist in Ausnahmefällen sogar ein Blick „zurück in die Zukunft“: Ein Augenmerk des Projekts lag auch auf dem Vergleich von guten Ertragsjahren mit den Erträgen in Jahren mit extremer Witterung, wie z.B. dem besonders warmen und trockenen Jahr 2003. Diese Extremjahranalyse erlaubte anhand bereits vorliegender Daten gewisse Aussagen darüber, was in einem gegen Ende des Jahrhunderts vermutlich normalen Sommer wie 2003 zu erwarten wäre. Allerdings wurden die Ergebnisse 2003 unter der damaligen CO<sub>2</sub>-Konzentration und mit den damals verfügbaren Sorten erzielt.

Die Datenlage für ein solches Projekt ist in Baden-Württemberg günstig: Die Ertragsdaten der Feldfrüchte (auch von Gemüse, Obst und Wein) liegen beim Statistischen Landesamt auf Kreisebene vor. Sie wurden systematisch zusammengeführt. Eine Ergänzung durch Ertragsdaten des LTZ z.B. aus den Landessortenversuchen wäre möglich gewesen, wurde jedoch aus Gründen der Konsistenz (Art der Datenerhebung, Zeitreihe) und aus Zeitgründen nicht weiter verfolgt. Klimadaten wurden kostenfrei vom Deutschen Wetterdienst bezogen (DWD 2014b) und die Stationsdaten mit den Landkreisen abgeglichen. Es gäbe auch einen Datenfundus aus dem LTZ-eigenen Wetterstationsnetz. Allerdings reicht die Datenerhebung bei vielen Stationen nur einige Jahre zurück, so dass auch hier aus Konsistenzgründen nur die DWD-Daten verwendet wurden. Die Bodendaten wurden vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (Regierungspräsidium Freiburg) zur Verfügung gestellt, und zwar Bodenzahl, Ackerzahl und Bodenkundliche Feuchtestufe auf der Gemeindeebene. Durch die Bildung gewichteter Mittel wurden die Daten auf Landkreisebene aggregiert.

Im Zuge eines Projektes „Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten des Risikomanagements“ des Thünen-Instituts (federführend) mit verschiedenen Partnern wurde von der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle des Deutschen Wetterdienstes eine deutschlandweite Analyse der extremen Wetterereignisse wie Frost, Hitze, Nässe, Trockenheit und Starkregen durchgeführt, und zwar die Häufigkeit des Auftretens in vergangenen Klimanormalperioden, als auch projiziert in die Zukunft bis 2050 (Fruehauf und Löpmeier 2014). Die Resultate für die erhobenen Klimadaten der Vergangenheit wurden uns freundlicherweise für unser Projekt zur Verfügung gestellt. Daraus konnten die Daten für das Stationsnetz in Baden-Württemberg gewonnen und so auf Landkreisebene verfügbar gemacht werden.

Dieses Projekt wurde mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg im Rahmen des Forschungsprogramms KLIMOPASS gefördert und im Zeitraum April bis Dezember 2014 durchgeführt.

## 2.2 Statistische Vorbemerkungen

### 2.2.1 Modellbeschreibungen

Es liegt in der Natur des Projektes, dass sehr viel Statistik verwendet wurde. Wir fügen daher an dieser Stelle einige Vorbemerkungen ein, die die Grundlagen der benutzten Statistik erläutern.

Wir verwenden in dieser Analyse zum Großteil lineare Modelle. In der einfachsten Form legt das lineare Modell unter Verwendung der *least-squares*-Methode eine Linie durch die Datenpaare (z.B. Temperatur-Ertrag Datenpaare). Aus dem Modell können Steigung und Achsenabschnitt der Kurve abgelesen werden, also beschreibt das Modell in der einfachsten Form eine Kurve mit  $y = ax + c$  (oder Ertrag =  $a * \text{Temperatur} + c$ ).

Im Verlauf dieses Berichts werden außerdem additive Modelle erwähnt, die zwei oder mehr erklärende Faktoren beinhalten (etwa Temperatur und Niederschlag) und daher durch die Formel  $y = a * x_1 + b * x_2 + c$  beschrieben werden (oder im Beispiel, Ertrag =  $a * \text{Temperatur} + b * \text{Niederschlag} + c$ ).

Zusätzlich werden häufig multiple Regressionen mit Interaktionsterm benutzt; das heißt in der Praxis, dass die Daten im (mindestens) dreidimensionalen Raum beschrieben werden, oder mathematisch mit der Formel  $y = a * x_1 + b * x_2 + d * x_1x_2 + c$ . Also in unserem Beispiel Ertrag =  $a * \text{Temperatur} + b * \text{Niederschlag} + d * \text{Temperatur/Niederschlag} + c$ . Diese Art von Modell unterscheidet sich vom additiven oder einfachen Modell vor allem dadurch, dass  $x_1$  und  $x_2$  (in unserem Beispiel Temperatur und Niederschlag) einen interaktiven Effekt haben können, der über die Summe der Einzelkomponenten hinausgeht. Fachlich gesehen wäre das zum Beispiel die Überlegung, ob sich hohe Temperaturen, die sich normalerweise positiv auf die Pflanzenproduktion auswirken würden, in Zusammenhang mit Trockenheit durch die höheren Evapotranspirationsraten negativ auswirken, und zwar stärker als die reine Differenz zwischen den Effekten von Trockenheit und hohen Temperaturen. Natürlich können bei gegebener Datenlage auch mehr als zwei Faktoren in einem multiplen Regressionsmodell betrachtet werden. Da in diesem Projekt der Einfluss mehrerer Faktoren auf die landwirtschaftlichen Erträge betrachtet wird, bietet sich das multiple Regressionsmodell zumindest als Ansatzpunkt an.

Man geht bei der Modellfindung entweder vom einfachsten oder vom kompliziertesten Modell aus und verfeinert dieses dann entsprechend, bis das optimale Modell gefunden ist (also die Linie, die die Zusammenhänge in den Daten am besten beschreibt). Hierbei werden die Faktoren im Modell, die nicht statistisch signifikant sind, Schritt für Schritt entfernt, oder es werden Schritt für Schritt Faktoren hinzugefügt, bis keine weitere Verbesserung des Modells zu finden ist.

Signifikanz wird durch den P-Wert (auch Signifikanzwert genannt) festgestellt: Der übliche Grenzwert, bei dem P als „statistisch signifikant“ gilt, liegt bei 0,05; alle Werte für P, die unter diesem Grenzwert liegen, gelten als „statistisch signifikant“. Es ist hier allerdings zu erwähnen, dass das ein willkürlich gewählter Wert ist, der sich in der Forschung als gut geeignet für Hypothesenforschung erwiesen hat, und nicht unbedingt ein harter Grenzwert. Für jedes Modell wird üblicherweise der P-Wert (P) aufgeführt, zusammen mit t (t-Statistik, Student's t) und DF (degrees of freedom oder Freiheitsgrade), die den P-Wert ausmachen.

Wir führen, wo möglich, außerdem das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  des Modells an, das eine Aussage darüber macht, wie gut das Modell passt, bzw. wie viel der Varianz in den Daten durch das Modell erklärt wird.  $R^2$ -

Werte liegen normalerweise zwischen 0 und 1, wobei 1 der „ideale“ Wert ist, und  $R^2$ -Werte in der Nähe von 0 aussagen, dass ein entsprechend kleiner Anteil der Varianz der Daten durch das Modell erklärt wird.

### 2.2.2 Voraussetzungen für die lineare Regression

Lineare Regression mit dem *least squares*-Verfahren kann angewendet werden, wenn prinzipiell drei Kriterien erfüllt werden:

- 1) Normalität. Das Normalitätskriterium verlangt, dass den Daten eine Normalverteilung zugrunde liegt, dass also zum Beispiel ein Histogramm der Daten einer Gaußkurve nahekommt. Es gibt allerdings auch Autoren, die geringfügige Verletzungen dieses Kriterium als akzeptabel annehmen (siehe Zuur et al. 2009).
- 2) Homogenität/Homoskedastizität. Hier geht es um die Streuung der Daten innerhalb der Messreihe. Es sollte die Varianz der Residuen für alle Werte der Messreihe in etwa gleich sein, es sollte also keine größere oder geringere Streuung der Residuen bei verschiedenen Messwerten vorliegen.
- 3) Unabhängigkeit. Wenn die Daten nicht voneinander unabhängig sind, darf der t-Wert nicht verwendet werden, der für die Bestimmung des P-Werts und damit der statistischen Signifikanz bei der *least squares*-Methode benutzt wird.

Wir überprüfen diese Kriterien für jedes Modell, und in manchen Fällen (vor allem in Kapitel 4) musste ein anderer Algorithmus für das Anpassen der Korrelation verwendet werden, da mindestens eines der Kriterien für die Anwendung der *least squares*-Methode verletzt wurde.

## 2.3 Gliederung des Berichts

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse einer retrospektiven Analyse der landwirtschaftlichen Ertragsdaten und ihrer Beziehung zu Klimaparametern in den letzten 40-60 Jahren beschrieben. Wir beginnen mit einer einfachen Analyse der Landesdurchschnitte in Klima und Ertrag (Temperatur, Niederschlag und Hektarerträge) in Kapitel 3 und setzen diese mit einer entsprechenden kleinräumigeren Analyse auf Landkreisebene fort (Kap. 4). In Kapitel 5 betrachten wir den Einfluss von Bodeneigenschaften und klimatischen Grundbedingungen auf die Auswirkungen des Klimawandels, und in Kapitel 6 werden die Auswirkungen von extremen klimatischen Ereignissen auf landwirtschaftliche Erträge diskutiert. Zuletzt bündeln wir die Ergebnisse der Arbeit in einer zusammenfassenden Diskussion (Kap. 7).

# 3 Die Erträge der Feldfrüchte in Beziehung zu Temperatur und Niederschlag in Baden-Württemberg von 1952-2011

## 3.1 Einleitung

Ziel des Gesamtprojekts war es, festzustellen, ob der historische Klimawandel in Baden-Württemberg schon Auswirkungen auf Erträge der Feldfrüchte hatte. Der erste Schritt zur Beantwortung dieser Frage war eine großräumige Analyse der landesweiten Erträge verschiedener Kulturarten in Abhängigkeit vom Klima, also eine Korrelation der Ertragsdaten gegen Klimafaktoren.

Wir interessieren uns hierbei insbesondere für Temperatur und Niederschläge, die Klimafaktoren, die sich nach Berechnungen durch *General Circulation Models* (GCM; Klimamodelle, die für Projektionen des *Intergovernmental Panel on Climate Change* benutzt werden) am stärksten ändern werden (höhere Temperaturen und möglicherweise längere Dürreperioden). Dabei gehen wir als Anfangsannahme davon aus, dass bis zu einem gewissen Schwellenwert höhere Temperaturen ertragssteigernd wirken, ab diesem Schwellenwert allerdings ertragsmindernd werden, nachdem die Grenze zum Hitzestress überschritten ist. Zu vermuten ist ebenso, dass geringere Niederschläge, besonders im Sommer, Trockenstress verursachen und ertragsmindernd wirken, dass also Jahre mit geringen Niederschlägen ertragsarm waren. Besonders Jahre mit hohen Temperaturen und niedrigen Niederschlägen sollten aufgrund doppelter Stressbelastung für die Pflanze niedrige Erträge aufweisen. Wir gehen daher von der Hypothese aus, dass nicht nur jeweils Temperatur und Niederschlag für sich mit den Ertragsdaten korreliert sind, sondern dass es hier auch einen statistischen Interaktionseffekt gibt.

## 3.2 Methode

Es wurden Daten auf Landesdurchschnittsebene verglichen und korreliert. Hierbei wurden für die Klimadaten frei verfügbare Daten des Deutschen Wetterdienstes verwendet (DWD 2014b), die in Monatsauflösung und auch im jahreszeitlichen Mittel vorliegen. Wir verwenden Daten von 1952-2011.

Die chronologische Anordnung von Daten ist für die Analyse von landwirtschaftlichen Erträgen nicht immer sinnvoll. Wir ordneten daher die Daten nach Vegetationsperiode um. Dabei wurden die Daten ab Oktober (nach Ernte aller Kulturen) dem Folgejahr zugeordnet (also Vorherbst, Vorwinter). So konnten auch v.a. in den im Herbst ausgebrachten Kulturen (Winterweizen, Wintergerste, Winterraps, Winterroggen) eventuelle Zusammenhänge mit den Witterungsbedingungen im Vorwinter (Dezember des Vorjahres, Januar und Februar des Jahres, in dem die Erträge erhoben wurden) hergestellt werden. Es ergibt sich hiermit ein zusammenhängender Analysezeitraum von 1953-2011.

Ertragsdaten wurden vom Statistischen Landesamt Baden-Württemberg für neun Kulturarten bereitgestellt (Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Roggen, Silomais, Körnermais, Zuckerrüben, Kartoffeln und Winterraps). Die Daten beruhen auf der Besonderen Ernte- und Qualitätsermittlung (BEE, Statistisches Bundesamt 2013), bei der repräsentative Probeflächen im ganzen Bundesland beerntet werden. Unter Verwendung der Anbauflächen der jeweils letzten Bodennutzungshaupterhebung bzw. der Betriebe werden

daraus die Ernteerträge für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Körnermais und Winterraps auf Landesebene berechnet. Erträge anderer Kulturen werden aufgrund der Schätzungen der Ernteberichterstatter auf Kreisebene auf das Land hochgerechnet (Betzholz 1998). Auf Landesebene sind diese Daten von 1953-2011 vorhanden – auf Landkreisebene sind die Daten aufgrund der Kreisreform auf den Zeitraum 1973-2011 beschränkt. Es liegen also auf Landesebene für etwa 20 Jahre Daten vor, die auf Kreisebene nicht zu ermitteln sind, und dieser Zeitraum umfasst vor allem einige Jahre vor einem steileren Temperaturanstieg in Baden-Württemberg (siehe Abb. 3.1). Die zusätzliche großräumige Analyse der Daten auf Landesebene kann daher Langzeitentwicklungen beinhalten, die in der kleinräumigen Analyse der Daten auf Kreisebene eventuell fehlen und ist daher ein nützliches Mittel für die grobe Abschätzung der Langzeitentwicklung der Ertragsdaten in Abhängigkeit von Klimaparametern in Baden-Württemberg.

Der Zusammenhang zwischen Klimadaten (Lufttemperatur und Niederschlag) und Erträgen der verschiedenen Kulturen wurde zunächst mit linearen Regressionsmodellen geprüft. Hier wurden sowohl Jahresmittel der Klimadaten als auch Jahreszeitmittel in Kombination mit den Erträgen jeder Kulturart verwendet.

Jedes einzelne Regressionsmodell wurde schrittweise vereinfacht. Zunächst gingen wir von einem Interaktionsmodell aus (multiple Regression mit Interaktionsterm für Temperatur und Niederschlag, also Temperatur gegen Ertrag, Niederschlag gegen Ertrag und Temperatur-Niederschlag-Interaktion gegen Ertrag). Falls der Interaktionsterm nicht signifikant war (Schwelle  $P < 0.05$  bei Definition der statistischen Signifikanz mit 95% Wahrscheinlichkeit), wurde zu einem additiven Modell (Temperatur gegen Ertrag und Niederschlag gegen Ertrag im selben Modell, keine Interaktion) reduziert. War eine der Variablen im additiven Modell (Temperatur + Niederschlag) nicht signifikant, so wurde schließlich zu einem einfachen Modell reduziert (Temperatur gegen Ertrag einzeln, Niederschlag gegen Ertrag einzeln).

Anschließend wurde für Modelle, die einen signifikanten Zusammenhang zwischen Ertrag und Klima zeigten, im diagnostischen Verfahren die Normalverteilung der Residuen, Homoskedastizität des Modells und Unabhängigkeit der Variablen überprüft um sicherzustellen, dass die Grundvoraussetzungen für die Verwendung einer linearen Regression gegeben sind. Die Daten für das Extremjahr 2003 verursachten hierbei eine Nicht-Normalverteilung der Residuen in manchen Modellen. Daher wurde das Extremjahr 2003 zunächst aus dieser einfachen Regressionsanalyse entfernt. Graphisch werden in den folgenden Abbildungen alle Jahre als Punkte dargestellt, also auch 2003; die Regressionslinien in den Abbildungen jedoch beziehen sich jeweils auf die Werte aller Jahre außer 2003. Im weiteren Verlauf des Projekts wurden aber die Anzahl der Hitzetage mit in die Analyse einbezogen, um extreme Wetterlagen zu analysieren.

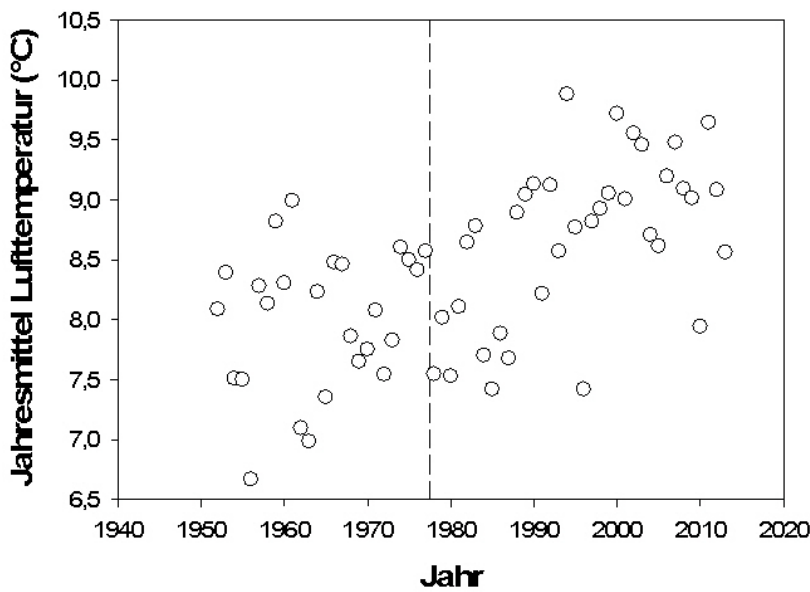
Alle statistischen Analysen wurden mit dem Programm R 3.1.0 durchgeführt.

### **3.3 Klimatische Entwicklung in Baden-Württemberg 1952-2011**

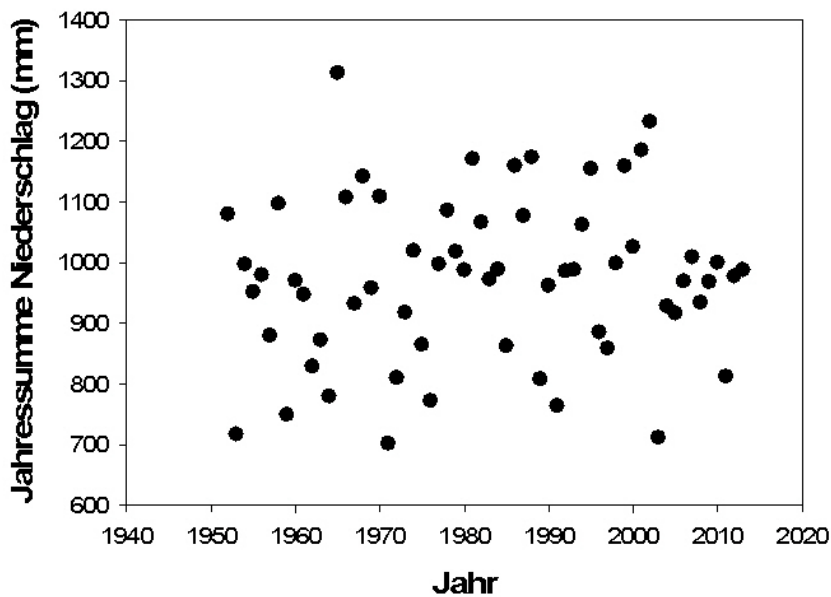
Auch in der vorliegenden statistischen Analyse zeichnet sich ab, dass die mittlere Jahrestemperatur in Baden-Württemberg in den letzten 30 Jahren um etwa  $1^{\circ}\text{C}$  angestiegen ist (Abb. 3.1; vgl. Stock 2005). Hierbei ist etwa Ende der 70er Jahre ein steiler Aufwärtstrend zu beobachten (gestrichelte vertikale Linie, Abb. 3.1).

Im Gegensatz hierzu war bei der Jahressumme der Niederschläge statistisch kein deutlicher Trend zu erkennen. Dies steht im Gegensatz zu den Ergebnissen des Projekts KLARA (Stock 2005), nicht aber zu den Schlussfolgerungen aus der Analyse des Langzeitverhaltens des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg

im KLIWA-Projekt (AK KLIWA, o.J.). Dort wird konstatiert, dass die jährliche Niederschlagsmenge nur in wenigen Gebieten Bayerns und Baden-Württembergs geringfügig zugenommen hat, in mehr als 80% der Gebiete jedoch keine tendenzielle Entwicklung nachweisbar ist.



**Abb. 3.1:** Trend der Jahresdurchschnittstemperatur in Baden-Württemberg von 1952-2013. Die vertikale Linie markiert den Beginn eines verstärkten Aufwärtstrends der Lufttemperaturen seit den 70er Jahren.



**Abb. 3.2:** Trend der Jahresniederschläge in Baden-Württemberg von 1952-2013.

### 3.4 Erträge in Abhängigkeit von klimatischen Bedingungen 1952-2011

In den meisten Fällen war das einfache Modell (nur Temperatur gegen Hektarertrag) das am besten passende Modell und alle Terme im Interaktionsmodell waren nicht signifikant ( $P > 0,05$ ). Lediglich im Sommer gab es mit multipler Regression einen signifikanten Interaktionseffekt von Temperatur und Niederschlag in Bezug auf Ertrag, ebenso waren alle einzelnen Faktoren im Interaktionsmodell signifikant mit Ertrag korreliert (sowohl Temperatur als auch Niederschlag, Tabelle 3.1). Daher wurde in Tabelle 3.1 (und den folgenden Tabellen) auch vermerkt, ob die hierin erwähnten statistischen Parameter sich auf ein einfaches (Ertrag-Temperatur oder Ertrag-Niederschlag) Modell oder auf ein multiples Regressionsmodell (Ertrag gegen Temperatur und Niederschlag und Temperatur\*Niederschlags-Interaktionsterm) beziehen. Graphisch wurde immer das einfache Modell dargestellt (alle Abbildungen).

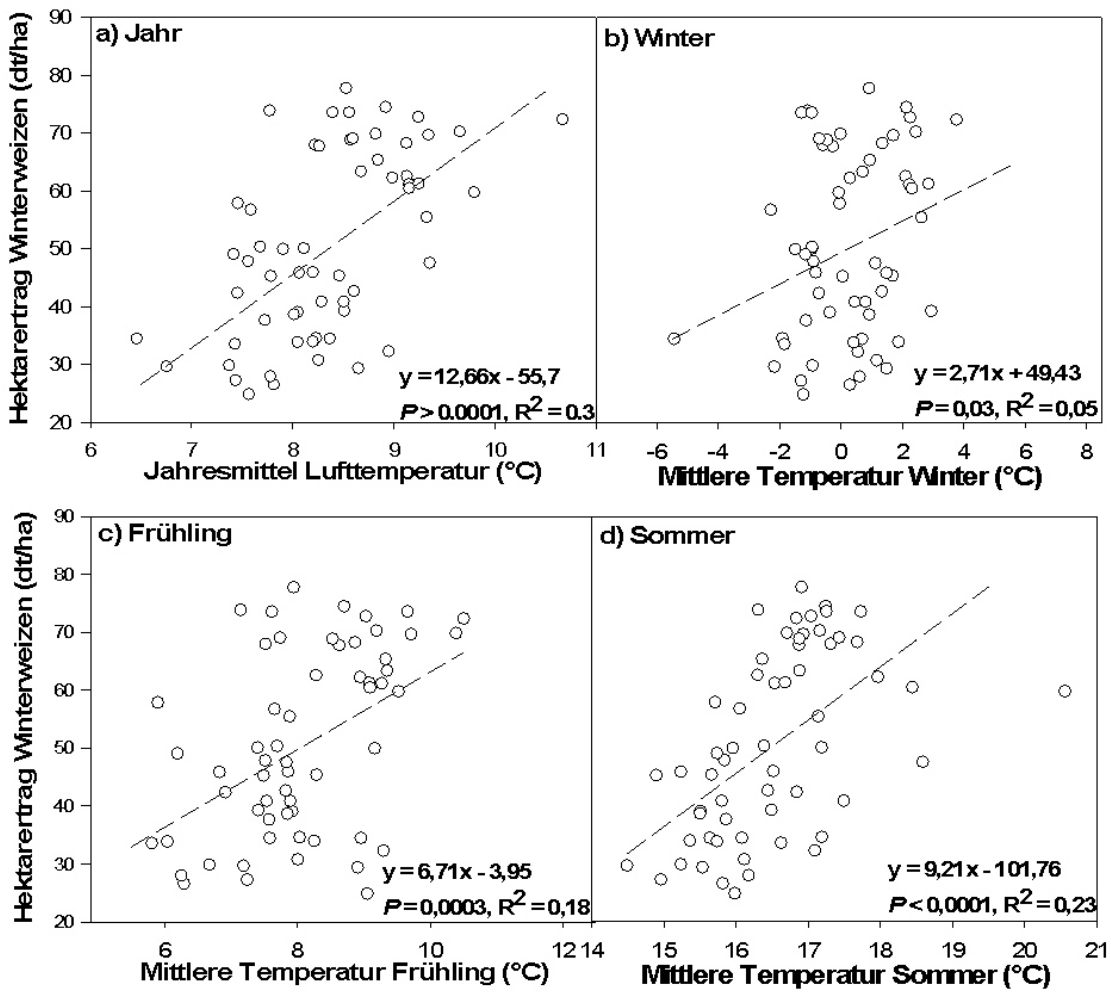
Im Zwischenbericht wurde angemerkt, dass eventuell ein logarithmisches Modell besser auf die Daten passen könnte. Es handelte sich dort aber um eine logarithmische Transformation des Ertrags, der in der vorliegenden Analyse jedoch die abhängige Variable ist: Wir interessieren uns dafür, ob Temperatur einen Einfluss auf Ertrag hat. Daher wurde hier ein logarithmisches Modell angepasst, in dem die Temperatur logarithmiert war, ebenso wurde auch ein exponentielles Modell angepasst (als Umkehrfunktion der logarithmischen Transformation des Ertrags). Keines dieser beiden Modelle brachte eine wesentliche Verbesserung gegenüber dem linearen Modell. Es ist möglich, dass die log-Transformation des Ertrags, die im Zwischenbericht als verbessernd erwähnt wurde, die Streuung der Ertragswerte vermindert und nicht unbedingt die Form der angepassten Kurve verändert. Daher war also keines der nichtlinearen Modelle „besser“ als das lineare Modell und das lineare Modell wurde im weiteren Verlauf der Studie verwendet.

#### 3.4.1 Winterweizen

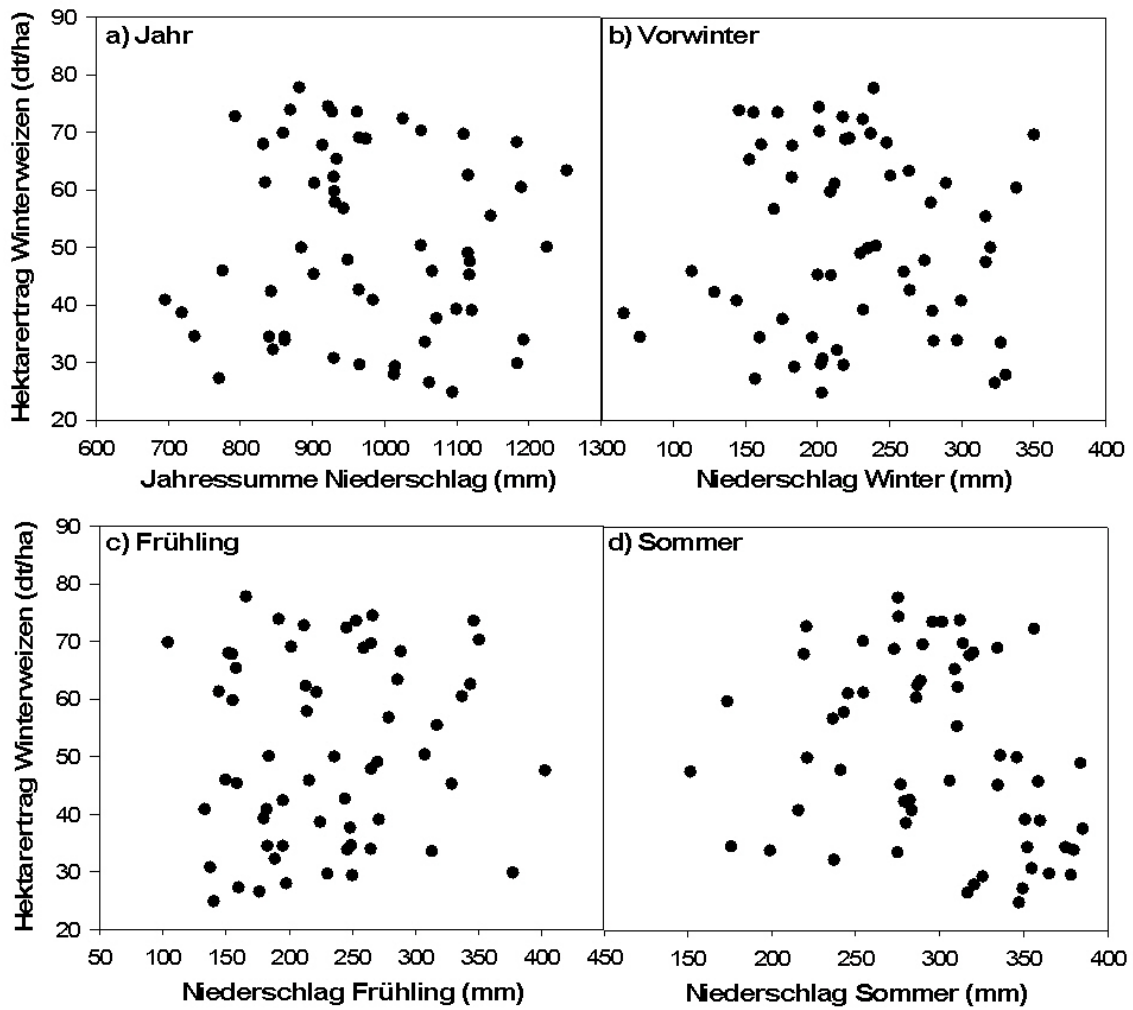
Die Hektarerträge von Winterweizen waren linear mit der mittleren Temperatur korreliert, und zwar sowohl mit Jahresdurchschnittstemperaturen (Abb. 3.3a) als auch mit jahreszeitlichen Mitteln im Vorwinter (Abb. 3.3b), Frühling (Abb. 3.3c) und Sommer (Abb. 3.3d). Im Gegensatz hierzu gab es keine direkte (durch einfaches Regressionsmodell beschreibbare) Korrelation zwischen Niederschlag und Hektarertrag von Winterweizen (Abb. 3.4).

Im Sommer gab es allerdings einen signifikanten Interaktionseffekt von Temperatur und Niederschlag in Bezug auf Ertrag (Tabelle 3.1).





**Abb. 3.3:** Korrelation des Hektarertrags von Winterweizen mit durchschnittlichen Lufttemperaturen im Jahr (a), Vorwinter (Dezember-Februar, b), Frühling (März-Mai, c) und im Sommer (Juni-August, d). Die Linie zeigt das gewählte einfache lineare Regressionsmodell an.



**Abb. 3.4:** Korrelation des Hektarertrags von Winterweizen mit der Niederschlagssumme im Jahr (a), Vorwinter (Dezember-Februar, b), Frühling (März-Mai, c) und im Sommer (Juni-August, d). Keine signifikante Korrelation, daher keine Regressionslinien.

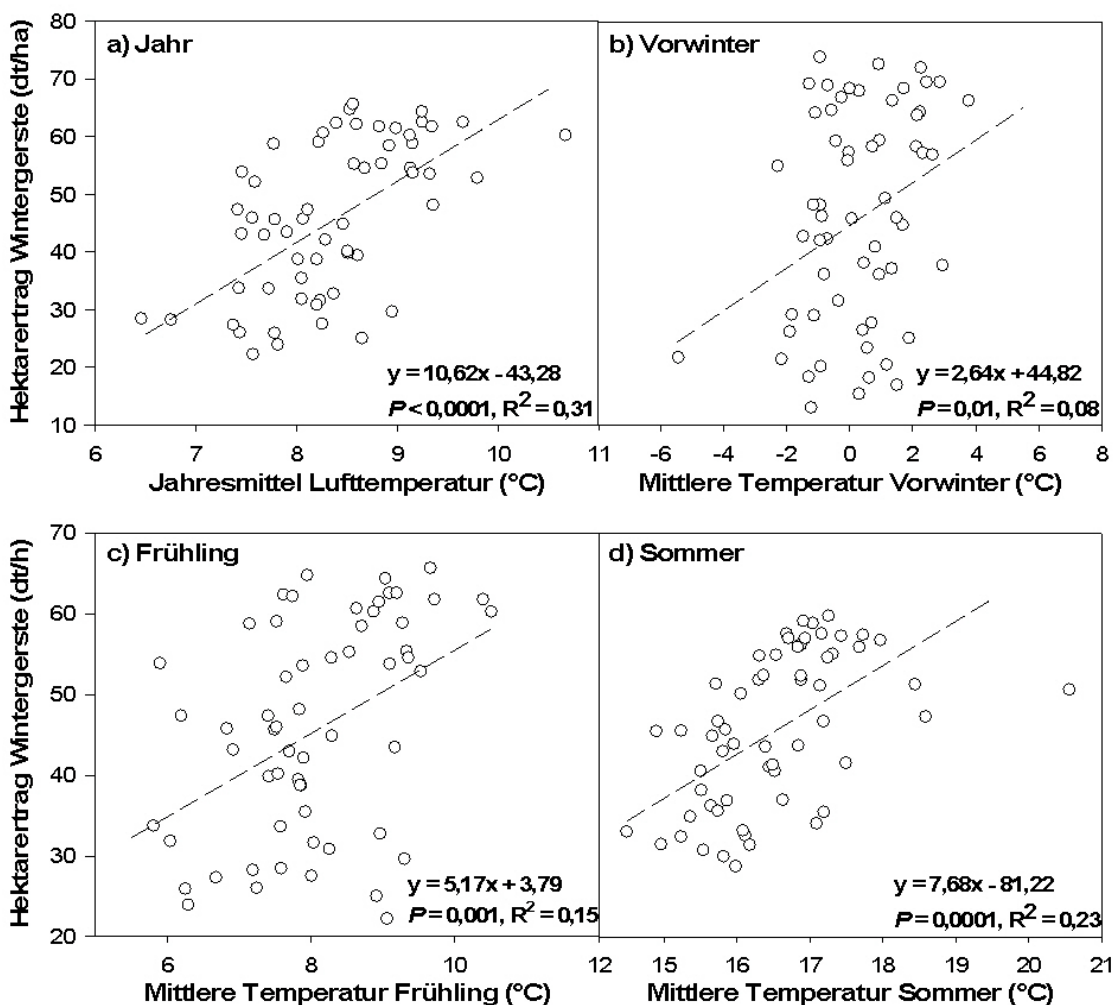
**Tabelle 3.1:** Statistische Parameter für die Korrelation zwischen Hektarerträgen von Winterweizen und Temperatur und Niederschlag mit linearem Regressionsmodell (einfaches Modell), bzw. multipler Regression für Temperatur\*Niederschlag (Interaktionseffekt). Statistisch signifikante Korrelationen sind fett gedruckt (\*  $P < 0,05$ ; \*\*  $P < 0,01$ ; \*\*\*  $P < 0,001$ ).

	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>DF</i>	<b>Modell</b>	<i>R</i> <sup>2</sup>
<u>Jahresdurchschnitt</u>					
<b>Temperatur **</b>	0,007	5,13	57	einfach	0,30
Niederschlag	0,94	-0,07	57	einfach	0,01
Temperatur*Niederschlag Interaktion	0,64	0,46	55	Interaktion	0,28
<u>Frühjahr (März-Mai)</u>					
<b>Temperatur ***</b>	0,0001	4,05	57	einfach	0,21
Niederschlag	0,46	0,73	57	einfach	-0,007
Temperatur*Niederschlag Interaktion	0,41	0,82	55	Interaktion	0,21
<u>Sommer (Jun-Aug)</u>					
<b>Temperatur *</b>	0,02	-2,24	55	Interaktion	0,36
<b>Niederschlag **</b>	0,001	-3,45	55	Interaktion	0,36
<b>Temperatur-Niederschlag Interaktion ***</b>	0,0008	3,54	55	Interaktion	0,36
<u>Winter (Dez-Feb)</u>					
<b>Temperatur *</b>	0,03	2,13	57	einfach	0,05
Niederschlag	0,95	0,05	57	einfach	-0,01
Temperatur*Niederschlag Interaktion	0,52	0,64	55	Interaktion	0,03

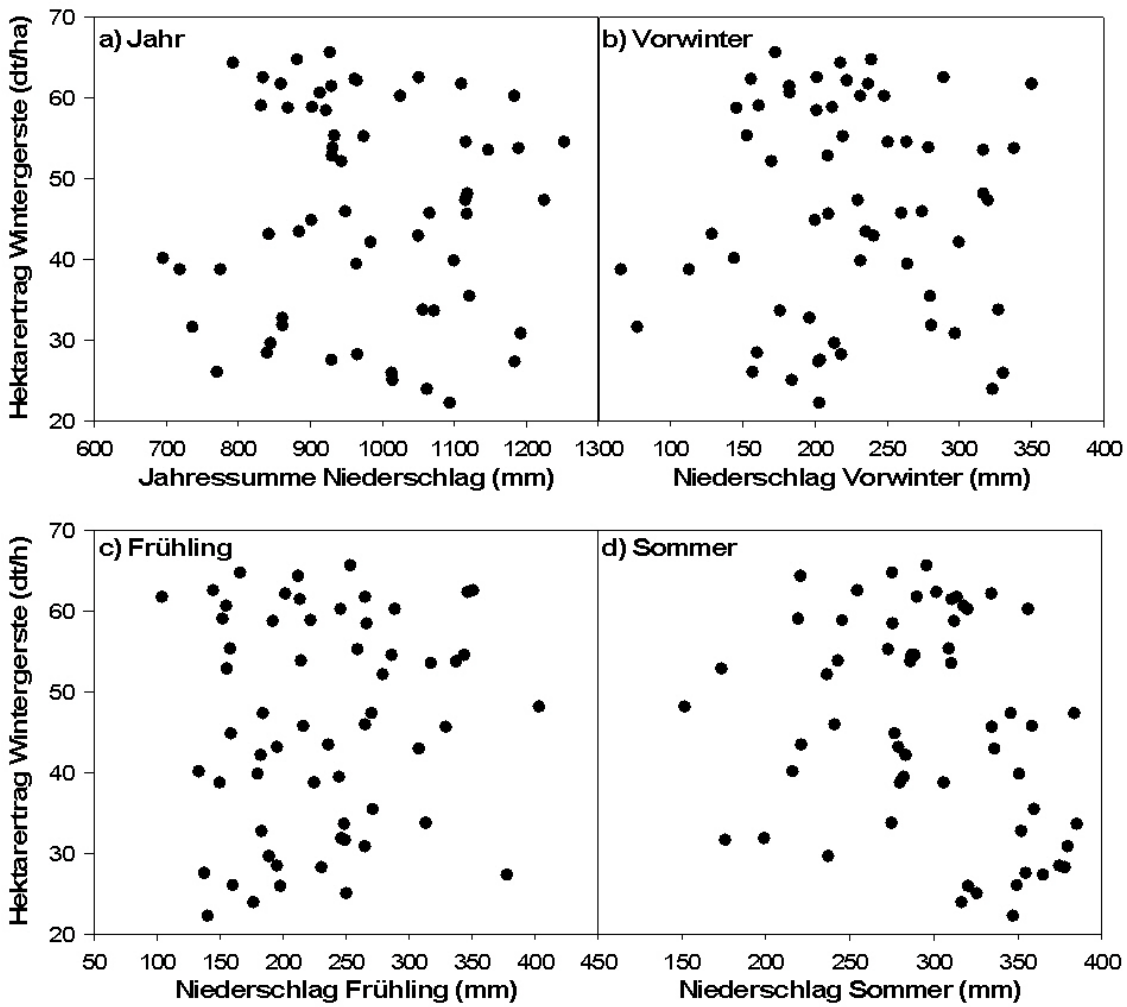
### 3.4.2 Wintergerste

Die Hektarerträge von Wintergerste waren ebenfalls linear mit mittlerer Temperatur korreliert, und zwar sowohl mit Jahresdurchschnittstemperaturen (Abb. 3.5a) als auch mit jahreszeitlichen Mitteln im Vorwinter (Abb. 3.5b), Frühling (Abb. 3.5c) und Sommer (Abb. 3.5d). Im Gegensatz hierzu gab es keine direkte (durch einfaches Regressionsmodell beschreibbare) Korrelation zwischen Niederschlag und Hektarertrag (Abb. 3.6).

In den meisten Fällen war wieder das einfache Modell (nur Temperatur gegen Hektarertrag) das am besten passende Modell und alle Terme im Interaktionsmodell nicht signifikant ( $P > 0,05$ ). Wie bei Weizen gab es im Sommer einen signifikanten Interaktionseffekt von Temperatur und Niederschlag in Bezug auf Ertrag (Tabelle 3.2).



**Abb. 3.5:** Korrelation des Hektarertrags von Wintergerste mit durchschnittlichen Lufttemperaturen im Jahr (a), Vorwinter (Dezember-Februar, b), Frühling (März-Mai, c) und im Sommer (Juni-August, d). Die Linie zeigt das einfache lineare Regressionsmodell an.



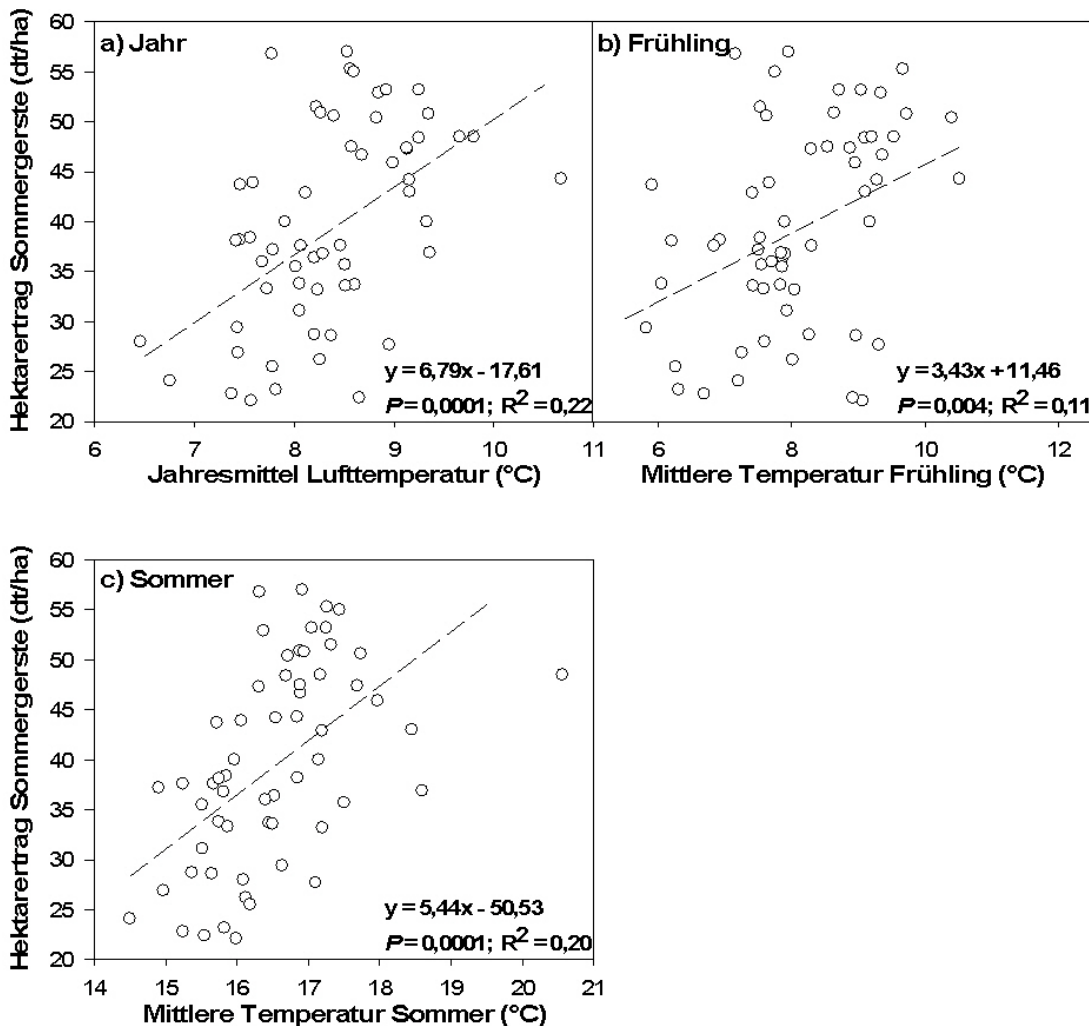
**Abb. 3.6:** Korrelation des Hektarertrags von Wintergerste mit der Niederschlagssumme im Jahr (a), Vorwinter (Dezember-Februar, b), Frühling (März-Mai, c) und im Sommer (Juni-August, d). Keine signifikante Korrelation, daher keine Regressionslinien.

**Tabelle 3.2:** Statistische Parameter für die Korrelation zwischen Hektarerträgen von Wintergerste und Temperatur und Niederschlag mit linearem Regressionsmodell, bzw. multipler Regression für Temperatur\*Niederschlag (Interaktionseffekt). Statistisch signifikante Korrelationen sind fett gedruckt (\*  $P < 0,05$ ; \*\*  $P < 0,01$ ; \*\*\*  $P < 0,001$ ).

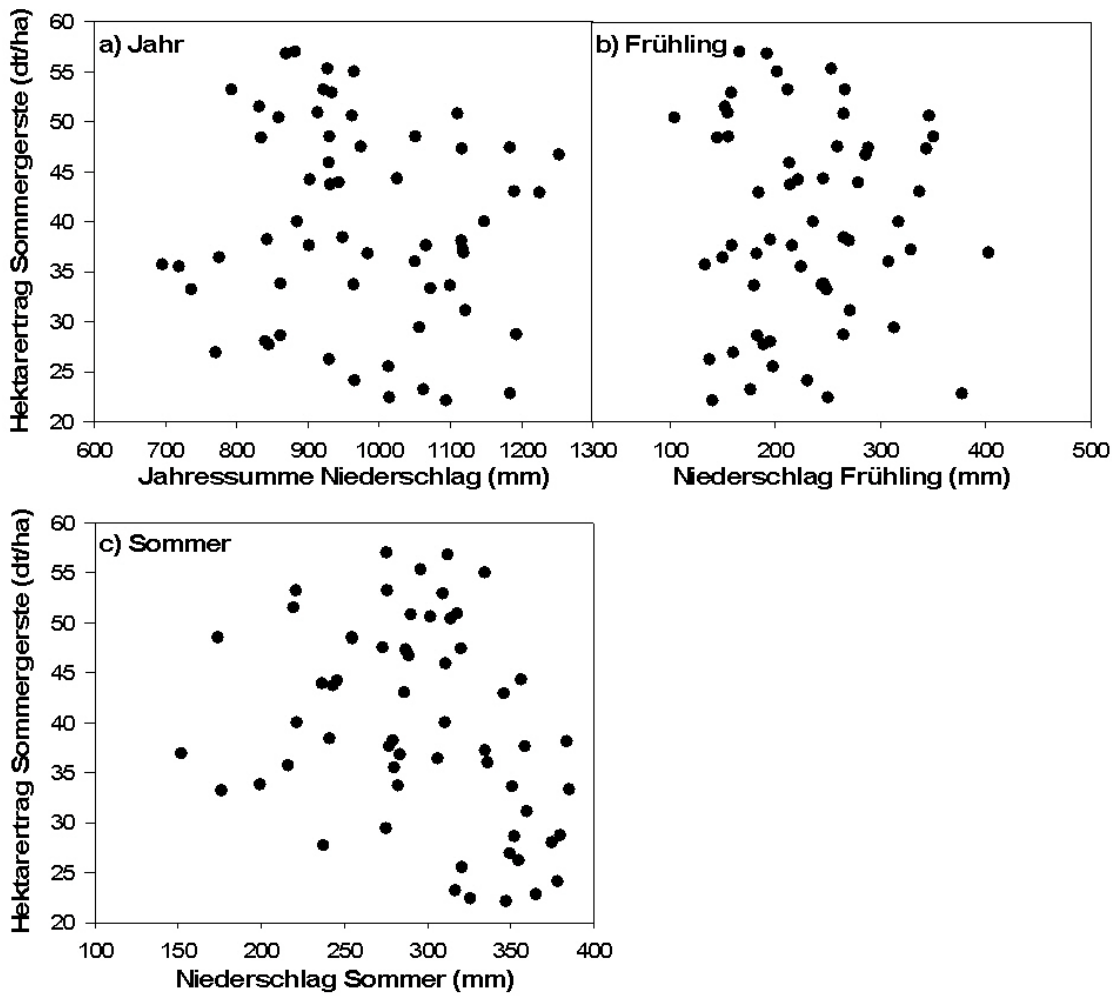
	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>DF</i>	<b>Modell</b>	<i>R</i> <sup>2</sup>
<u>Jahresdurchschnitt</u>					
<b>Temperatur ***</b>	< 0,001	5,16	57	einfach	0,31
Niederschlag	0,69	0,39	57	einfach	-0,01
Temperatur*Niederschlag	0,30	1,03	55	Interaktion	0,30
Interaktion					
<u>Frühjahr</u> <u>(März-Mai)</u>					
<b>Temperatur **</b>	0,001	3,44	57	einfach	0,15
Niederschlag	0,42	0,81	57	einfach	-0,005
Temperatur*Niederschlag	0,65	0,44	55	Interaktion	0,15
Interaktion					
<u>Sommer</u> <u>(Jun-Aug)</u>					
<b>Temperatur *</b>	0,03	-2,20	55	Interaktion	0,35
<b>Niederschlag **</b>	0,001	-3,38	55	Interaktion	0,35
<b>Temperatur-Niederschlag</b>	0,001	3,44	55	Interaktion	0,35
<b>Interaktion ***</b>					
<u>Winter (Dez-Feb)</u>					
<b>Temperatur *</b>	0,01	2,54	57	einfach	0,08
Niederschlag	0,68	0,41	57	einfach	-0,01
Temperatur*Niederschlag	0,54	0,60	55	Interaktion	0,06
Interaktion					

### 3.4.3 Sommergerste

Die Ergebnisse für Sommergerste sind analog denen für Wintergerste: Korrelation der Erträge mit mittlerer Temperatur (Jahresdurchschnittstemperaturen (Abb. 3.7a), Frühling (Abb. 3.7b) und Sommer (Abb. 3.7c)); keine direkte Korrelation zwischen Niederschlag und Hektarertrag (Abb. 3.8), Interaktionseffekt von Temperatur und Niederschlag im Sommer (Tab. 3.3).



**Abb. 3.7:** Korrelation des Hektarertrags von Sommergerste mit durchschnittlichen Lufttemperaturen im Jahr (a), Frühling (März-Mai, b) und im Sommer (Juni-August, c). Die Linie zeigt das einfache lineare Regressionsmodell an.



**Abb. 3.8:** Korrelation des Hektarertrags von Sommergerste mit der Niederschlagssumme im Jahr (a), Frühling (März-Mai, b) und im Sommer (Juni-August, c). Keine signifikante Korrelation, daher keine Regressionslinien.



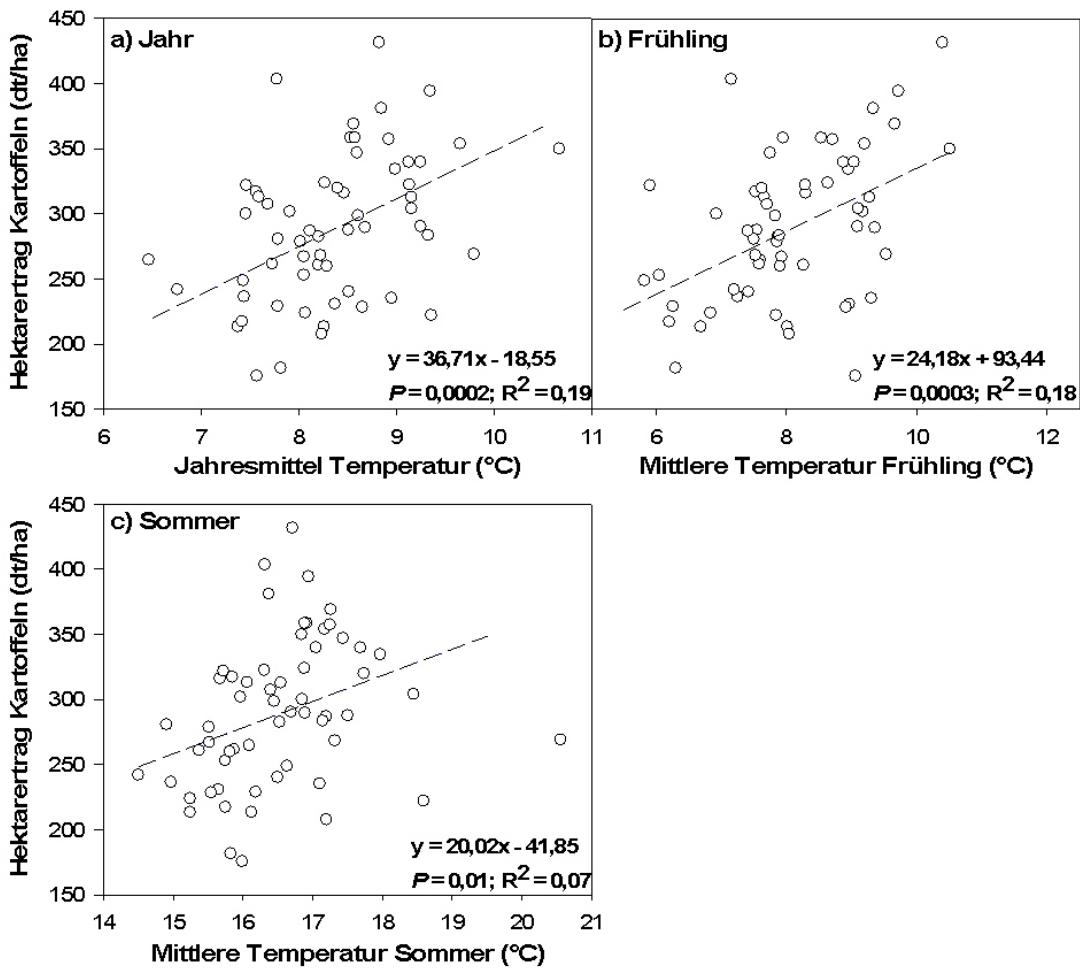
**Tabelle 3.3:** Statistische Parameter für die Korrelation zwischen Hektarerträgen von Sommergerste und Temperatur und Niederschlag mit linearem Regressionsmodell, bzw. multipler Regression für Temperatur\*Niederschlag (Interaktionseffekt). Statistisch signifikante Korrelationen sind fett gedruckt (\*  $P < 0,05$ ; \*\*  $P < 0,01$ ; \*\*\*  $P < 0,001$ ).

	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>DF</i>	<b>Modell</b>	<i>R</i> <sup>2</sup>
<u>Jahresdurchschnitt</u>					
<b>Temperatur ***</b>	< 0,001	4,17	57	einfach	0,22
Niederschlag	0,97	-0,32	57	einfach	-0,01
Temperatur*Niederschlag Interaktion	0,17	1,38	55	Interaktion	0,22
<u>Frühjahr</u> <u>(März-Mai)</u>					
<b>Temperatur **</b>	0,004	2,96	57	einfach	0,11
Niederschlag	0,93	0,07	57	einfach	-0,01
Temperatur*Niederschlag Interaktion	0,50	0,67	55	Interaktion	0,09
<u>Sommer</u> <u>(Jun-Aug)</u>					
<b>Temperatur **</b>	0,007	-2,75	55	Interaktion	0,35
<b>Niederschlag ***</b>	< 0,001	-3,87	55	Interaktion	0,35
<b>Temperatur*Niederschlag Interaktion ***</b>	< 0,001	3,90	55	Interaktion	0,35

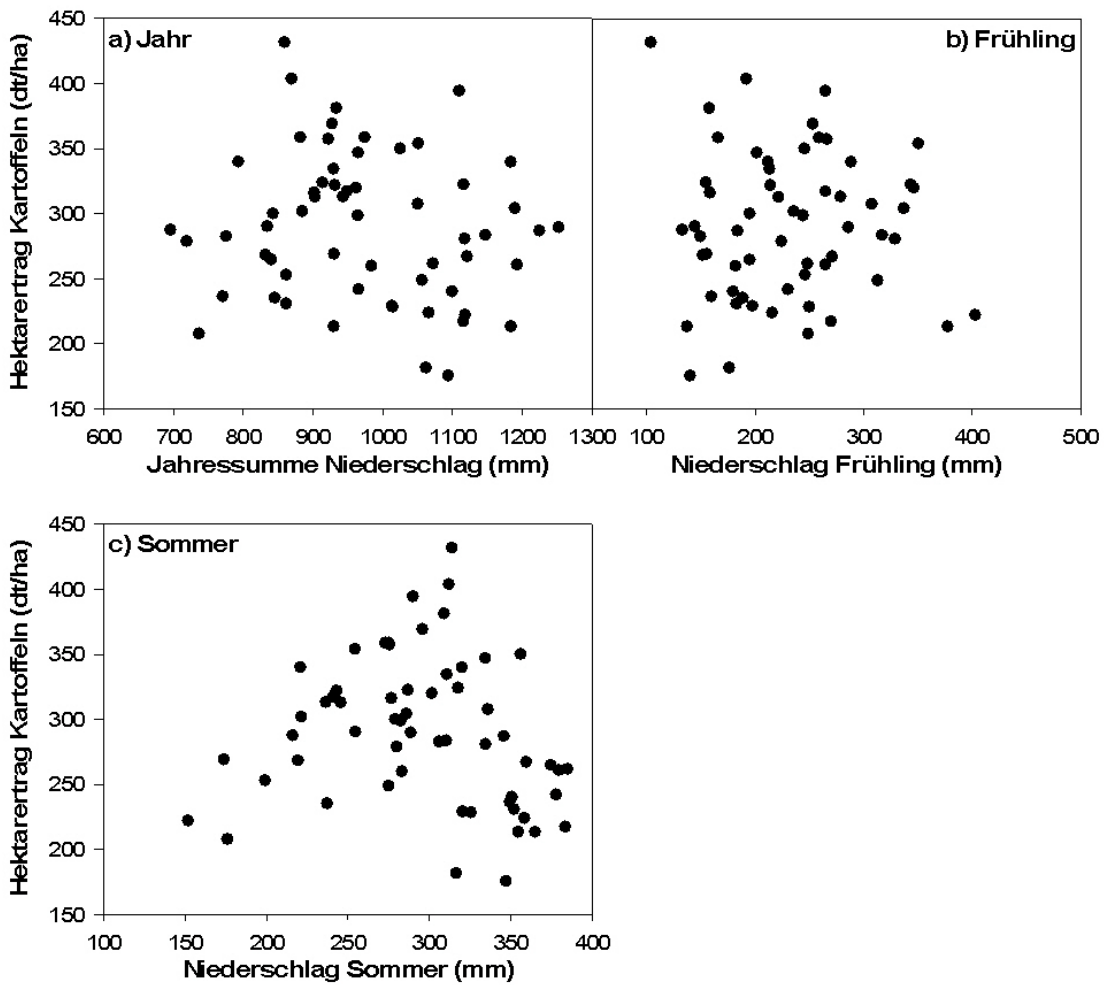
#### 3.4.4 Kartoffeln und Zuckerrüben

Wie auch die untersuchten Getreidearten waren die Erträge von Kartoffeln und Zuckerrüben linear mit mittlerer Temperatur korreliert, und zwar sowohl mit Jahresdurchschnittstemperaturen (Abb. 3.9a, 3.11a) als auch mit jahreszeitlichen Mitteln im Frühling (Abb. 3.9b, 3.11b) und Sommer (Abb. 3.9c, 3.11c).

Auch bei Kartoffeln und Zuckerrüben gab es keine direkte (durch einfaches Regressionsmodell beschreibbare) Korrelation zwischen Niederschlag und Hektarertrag (Abb. 3.10, 3.12).



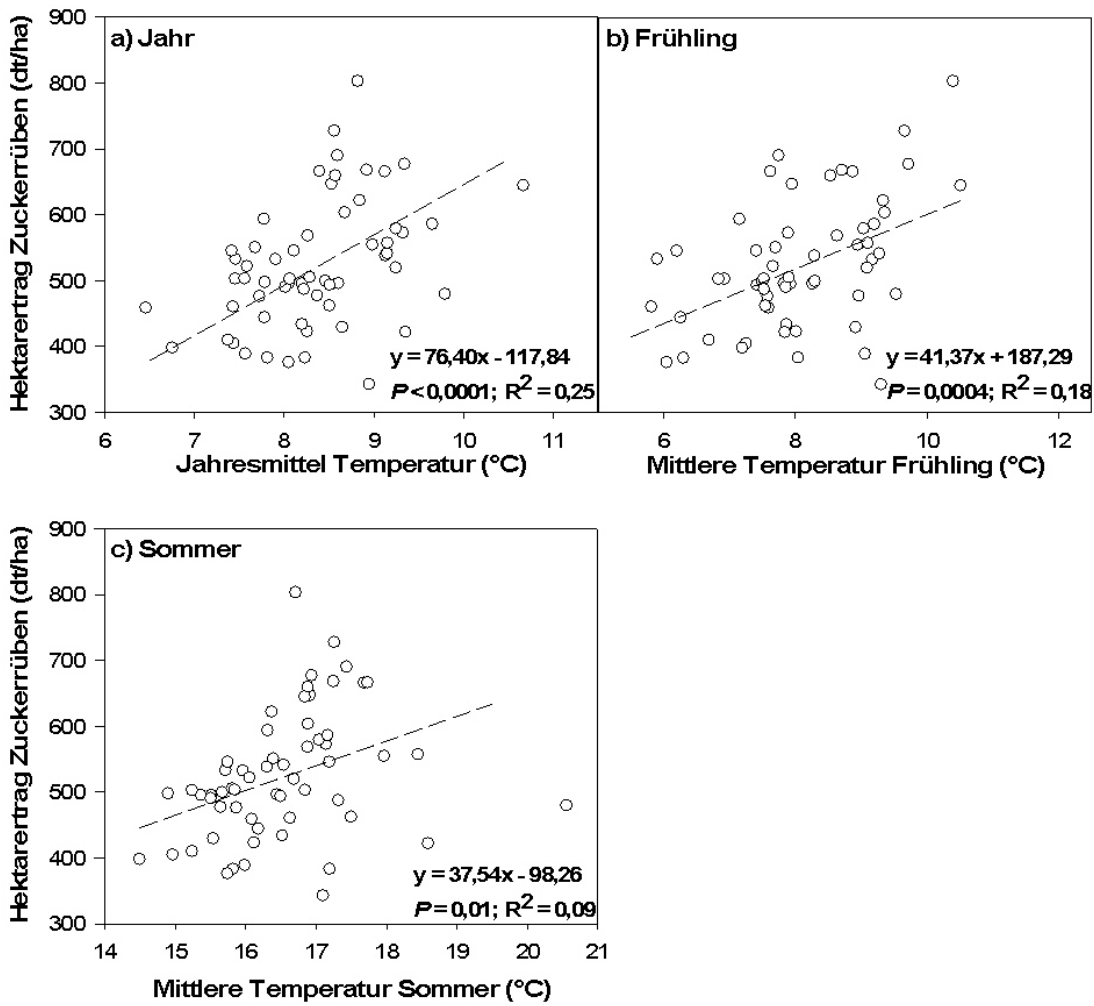
**Abb. 3.9:** Korrelation des Hektarertrags von Kartoffeln mit durchschnittlichen Lufttemperaturen im Jahr (a), Frühling (März-Mai, b) und im Sommer (Juni-August, c). Die Linie zeigt das einfache lineare Regressionsmodell an.



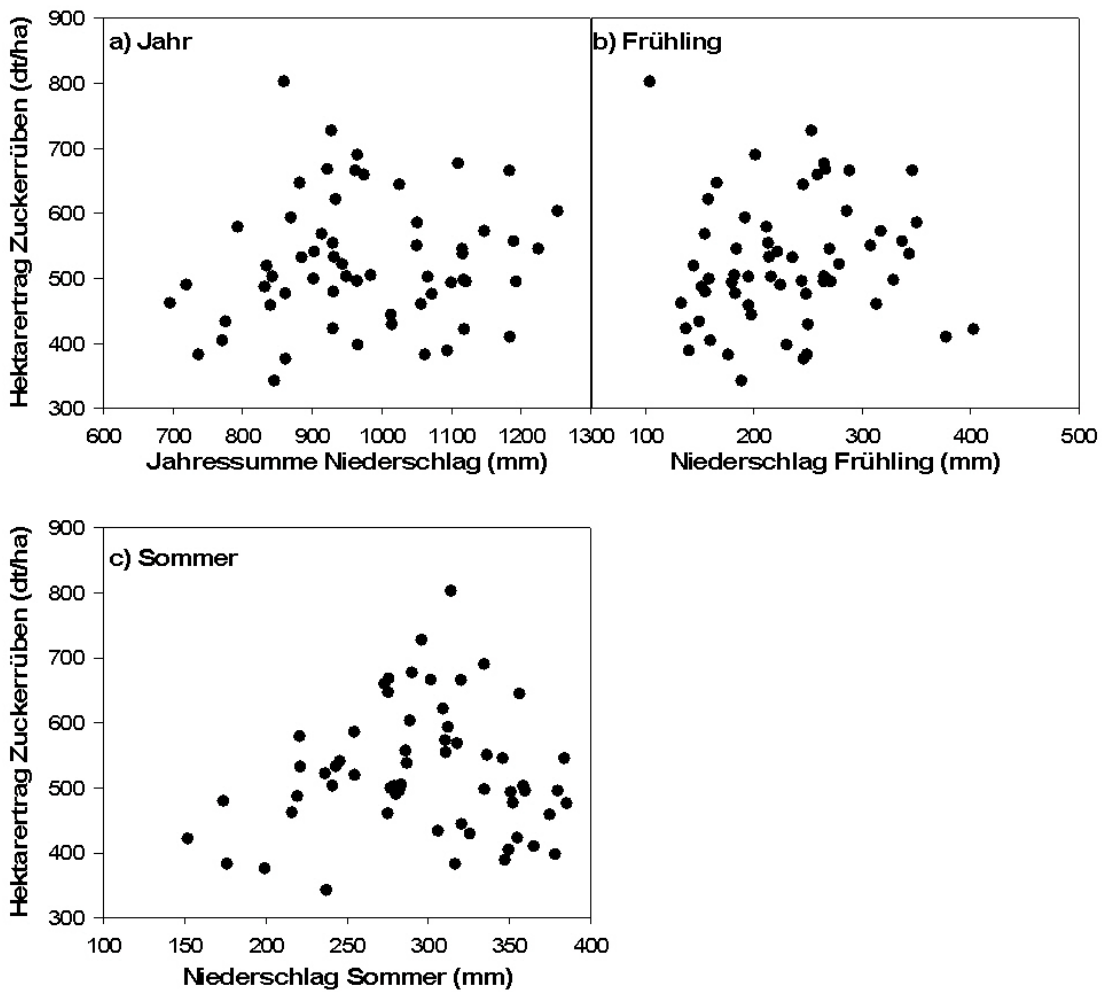
**Abb. 3.10:** Korrelation des Hektarertrags von Kartoffeln mit der Niederschlagssumme im Jahr (a), Frühling (März-Mai, b) und im Sommer (Juni-August, c). Keine signifikante Korrelation, daher keine Regressionslinien.

**Tabelle 3.4:** Statistische Parameter für die Korrelation zwischen Hektarerträgen von Kartoffeln und Temperatur und Niederschlag mit linearem Regressionsmodell, bzw. multipler Regression für Temperatur\*Niederschlag (Interaktionseffekt). Statistisch signifikante Korrelationen sind fett gedruckt (\*  $P < 0,05$ ; \*\*  $P < 0,01$ ; \*\*\*  $P < 0,001$ ).

	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>DF</i>	<b>Modell</b>	<i>R</i> <sup>2</sup>
<u>Jahresdurchschnitt</u>					
<b>Temperatur ***</b>	< 0,001	3,88	57	einfach	0,19
Niederschlag	0,73	0,34	57	einfach	-0,01
Temperatur*Niederschlag Interaktion	0,41	0,82	55	Interaktion	0,17
<u>Frühjahr</u> <u>(März-Mai)</u>					
<b>Temperatur ***</b>	< 0,001	3,79	57	einfach	0,18
Niederschlag	0,92	-0,09	57	einfach	-0,01
Temperatur*Niederschlag Interaktion	0,98	0,02	55	Interaktion	0,15
<u>Sommer</u> <u>(Jun-Aug)</u>					
<b>Temperatur ***</b>	< 0,001	-3,62	55	Interaktion	0,30
<b>Niederschlag ***</b>	< 0,001	-4,41	55	Interaktion	0,30
<b>Temperatur*Niederschlag Interaktion ***</b>	< 0,001	4,49	55	Interaktion	0,30



**Abb. 3.11:** Korrelation des Hektarertrags von Zuckerrüben mit durchschnittlichen Lufttemperaturen im Jahr (a), Frühling (März-Mai, b) und im Sommer (Juni-August, c). Die Linie zeigt das einfache lineare Regressionsmodell an.



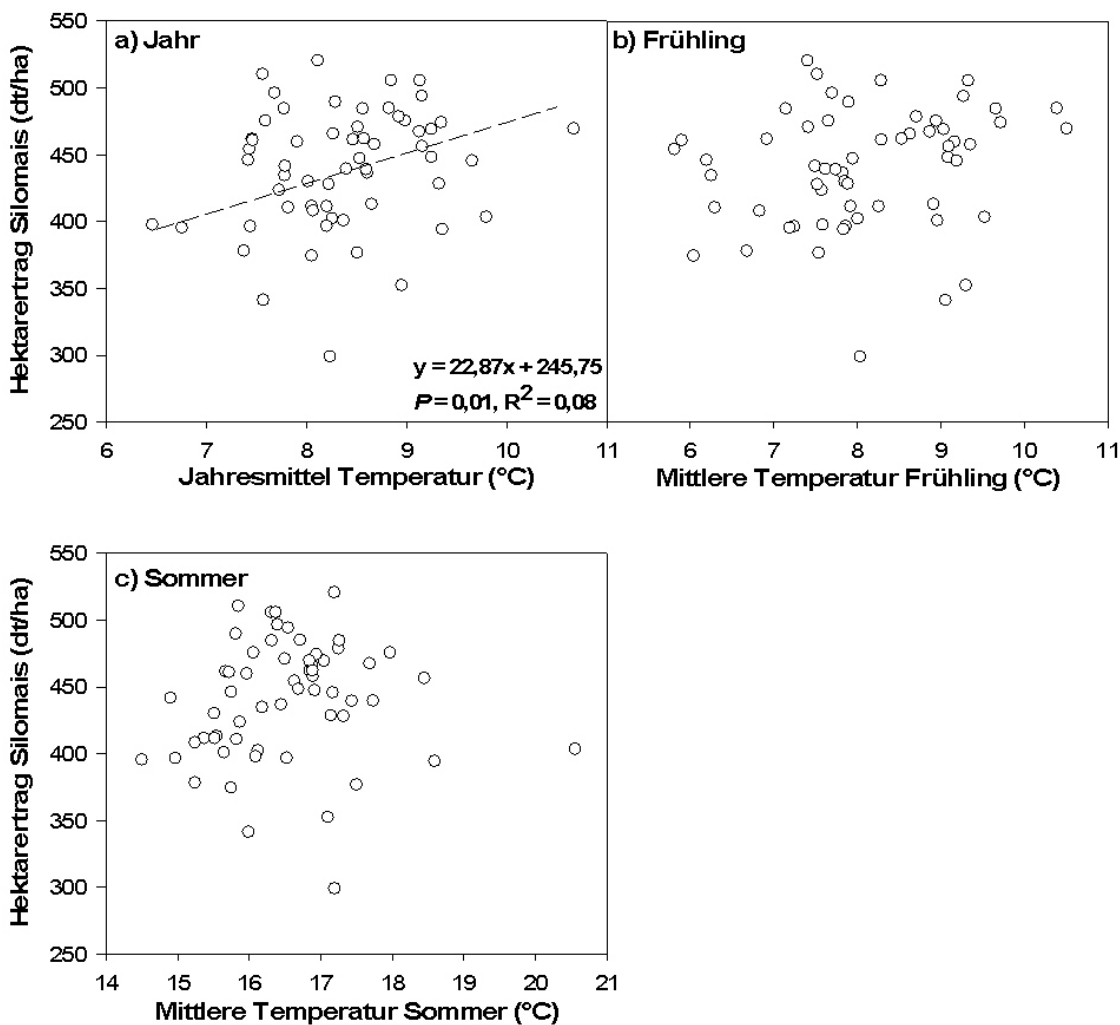
**Abb. 3.12:** Korrelation des Hektarertrags von Zuckerrüben mit der Niederschlagssumme im Jahr (a), Frühling (März-Mai, b) und im Sommer (Juni-August, c). Keine signifikante Korrelation, daher keine Regressionslinien.

**Tabelle 3.5:** Statistische Parameter für die Korrelation zwischen Hektarerträgen von Zuckerrüben und Temperatur und Niederschlag mit linearem Regressionsmodell, bzw. multipler Regression für Temperatur\*Niederschlag (Interaktionseffekt). Statistisch signifikante Korrelationen sind fett gedruckt (\*  $P < 0,05$ ; \*\*  $P < 0,01$ ; \*\*\*  $P < 0,001$ ).

	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>DF</i>	<b>Modell</b>	<i>R</i> <sup>2</sup>
<u>Jahresdurchschnitt</u>					
<b>Temperatur ***</b>	< 0,001	4,92	57	einfach	0,28
Niederschlag	0,20	1,29	57	einfach	0,01
Temperatur*Niederschlag Interaktion	0,78	0,28	55	Interaktion	0,27
<u>Frühjahr</u> <u>(März-Mai)</u>					
<b>Temperatur ***</b>	< 0,001	3,70	57	einfach	0,18
Niederschlag	0,62	0,49	57	einfach	-0,01
Temperatur*Niederschlag Interaktion	0,71	-0,37	55	Interaktion	0,16
<u>Sommer</u> <u>(Jun-Aug)</u>					
<b>Temperatur **</b>	0,005	-2,87	55	Interaktion	0,37
<b>Niederschlag ***</b>	< 0,001	-3,86	55	Interaktion	0,37
<b>Temperatur*Niederschlag Interaktion ***</b>	< 0,001	4,11	55	Interaktion	0,37

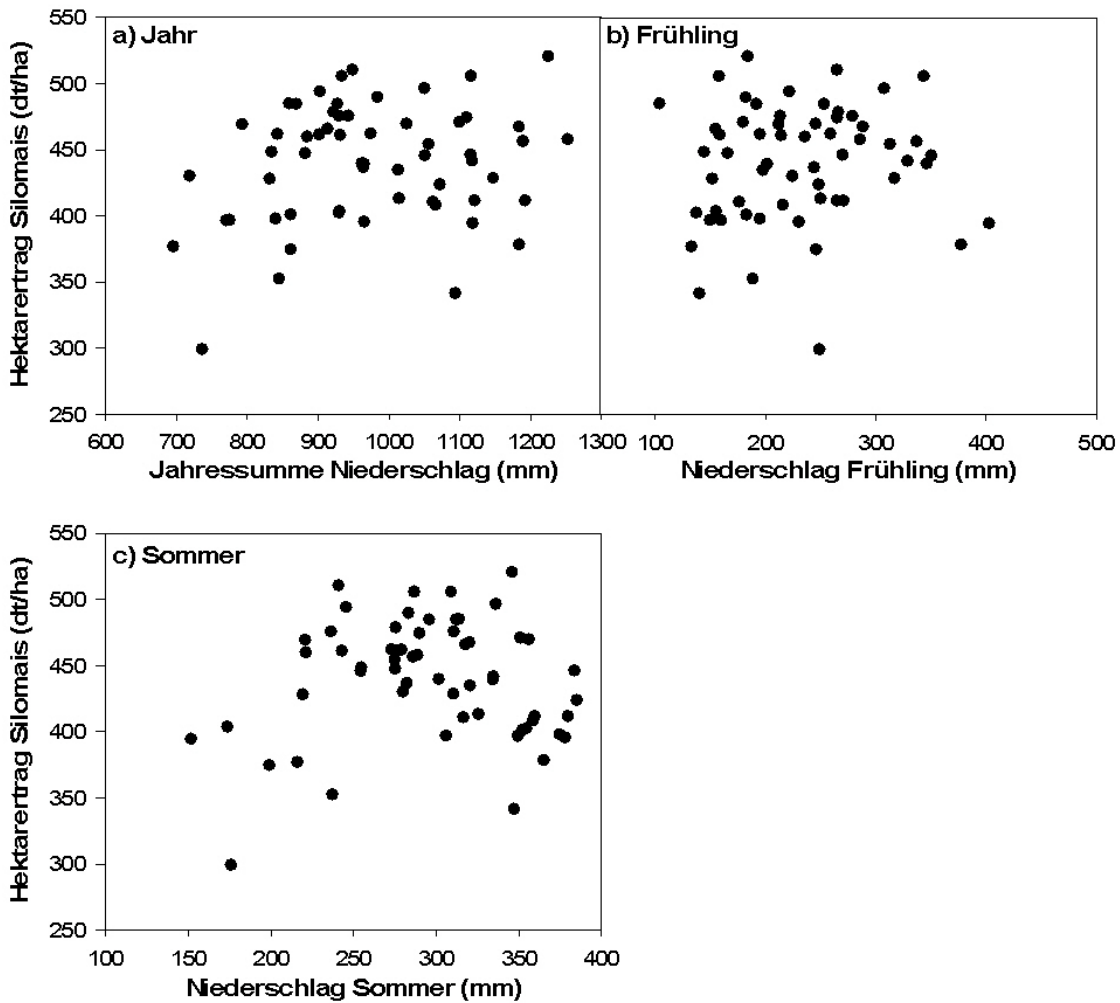
### 3.4.5 Silomais

Silomaiserträge waren linear mit Jahresmitteltemperaturen korreliert (Abb. 3.13a), es konnte jedoch mit einem einfachen Modell kein Zusammenhang zwischen Frühlings- oder Sommertemperaturen hergestellt werden (Abb. 3.13b, c). Ebenso konnte kein linearer Zusammenhang zwischen Jahresniederschlag oder jahreszeitlichen Niederschlägen im Frühling oder Sommer festgestellt werden (Abb. 3.14). Bei multipler Regression der Sommertemperaturen und Sommerniederschläge mit Silomaiserträgen wurde allerdings ein signifikanter Effekt beider Parameter (Temperatur und Niederschlag) im Einzelnen und auch ein signifikanter Interaktionseffekt gefunden (Tabelle 3.6).



**Abb. 3.13:** Korrelation des Hektarertrags von Silomais mit durchschnittlichen Lufttemperaturen im Jahr (a), Frühling (März-Mai, b) und im Sommer (Juni-August, c). Die Linie zeigt das einfache lineare Regressionsmodell an, soweit signifikant (keine Linie: keine signifikante Korrelation).





**Abb. 3.14:** Korrelation des Hektarertrags von Silomais mit der Niederschlagssumme im Jahr (a), Frühling (März-Mai, b) und im Sommer (Juni-August, c). Keine signifikante Korrelation, daher keine Regressionslinien.

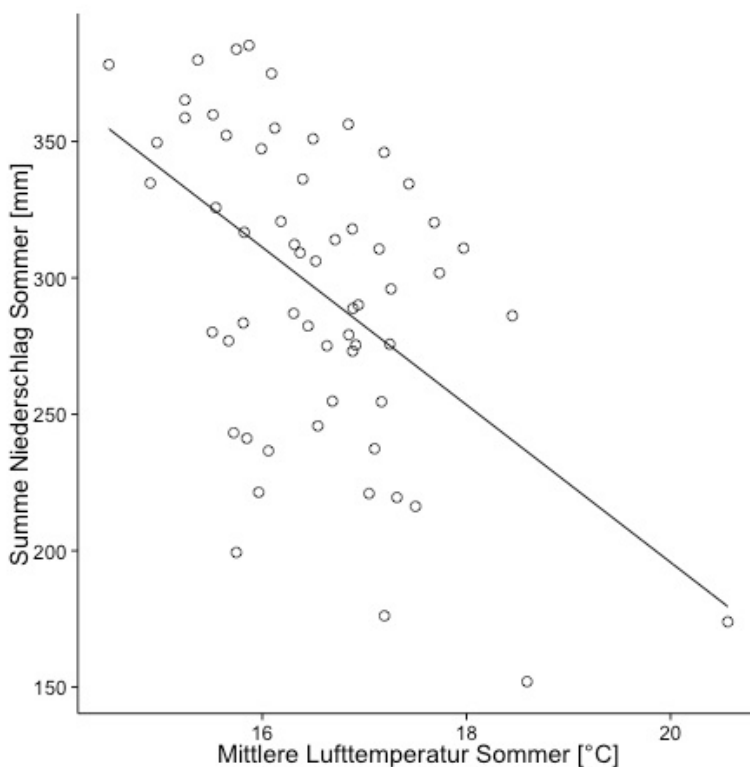
**Tabelle 3.6:** Statistische Parameter für die Korrelation zwischen Hektarerträgen von Silomais und Temperatur und Niederschlag mit linearem Regressionsmodell, bzw. multipler Regression für Temperatur\*Niederschlag (Interaktionseffekt). Statistisch signifikante Korrelationen sind fett gedruckt (\*  $P < 0,05$ ; \*\*  $P < 0,01$ ; \*\*\*  $P < 0,001$ ).

	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>DF</i>	<b>Modell</b>	<i>R</i> <sup>2</sup>
<u>Jahresdurchschnitt</u>					
<b>Temperatur *</b>	0,01	2,56	57	einfach	0,08
Niederschlag	0,08	1,76	57	einfach	0,03
Temperatur*Niederschlag Interaktion	0,65	0,45	55	Interaktion	0,10
<u>Frühjahr</u> <u>(März-Mai)</u>					
Temperatur	0,28	1,07	57	einfach	0,002
Niederschlag	0,72	0,35	57	einfach	-0,01
Temperatur*Niederschlag Interaktion	0,81	0,23	55	Interaktion	-0,02
<u>Sommer</u> <u>(Jun-Aug)</u>					
<b>Temperatur ***</b>	< 0,001	-4,71	55	Interaktion	0,33
<b>Niederschlag ***</b>	< 0,001	-5,05	55	Interaktion	0,33
<b>Temperatur*Niederschlag Interaktion ***</b>	< 0,001	5,23	55	Interaktion	0,33

### 3.5 Diskussion

Auf Landesebene war der Ertrag verschiedener Feldfrüchte positiv mit der Durchschnittstemperatur korreliert, und zwar sowohl mit dem Jahresdurchschnitt als auch mit dem Durchschnitt relevanter einzelner Jahreszeiten (insbesondere Frühjahr und Sommer). Im Gegensatz dazu waren Erträge nicht mit Jahresniederschlagssummen korreliert, und es gab bei Verwendung multipler Regression größtenteils keinen Interaktionseffekt zwischen Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlagssumme bei der Korrelation mit Erträgen. Bei Betrachtung der einzelnen Jahreszeiten fällt allerdings auf, dass Niederschläge im Sommer mit Erträgen korreliert waren. Hierbei zeigte das einfache Modell (also Niederschläge gegen Ertrag) zwar auch keine signifikanten Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Ertrag. In multipler Regression aber, bei der sowohl Temperatur als auch Niederschlag in derselben Regressionsanalyse berücksichtigt werden, wurde sowohl für Niederschlag als einzelnen Faktor, als auch für die Interaktion zwischen Temperatur und Niederschlag mit Erträgen aller betrachteten Kulturarten ein statistisch signifikanter Zusammenhang gefunden.

Fachlich überraschend ist dabei, dass der Ertrag negativ mit den Niederschlägen korreliert, d.h. je mehr Niederschläge, desto weniger Ertrag. Es ist allerdings auch zu beachten, dass vor allem im Sommer das Temperaturmittel mit der Niederschlagssumme korreliert ist (Abb. 3.15,  $P < 0,001$ ,  $R^2 = 0,18$ ). Es ist also möglich, dass der Eindruck, Niederschlag wäre im multiplen Regressionsmodell signifikant mit Ertrag korreliert, daran liegt, dass Ertrag stark positiv mit Temperatur korreliert, und Niederschlag negativ mit Temperatur korreliert. Daher kann es durchaus sein, dass in Jahren mit niedrigen Niederschlagssummen, in denen die Temperatur hoch war, Ertrag temperaturbedingt (nicht niederschlagsbedingt) hoch ausfällt.



**Abb. 3.15:** Kollinearität von mittleren Lufttemperaturen im Sommer und Niederschlägen im Sommer.

Ein weiterer komplizierender Faktor stellt in diesem Fall die Steigerung der landwirtschaftlichen Erträge mit der Zeit dar (Abb. 3.16 für das Beispiel Winterweizen), die sogar klarer linear verläuft als die Erhöhung der Temperatur. Ähnlich wie im Fall von Niederschlag und Temperatur könnte sich der Zusammenhang zwischen Temperatur und Ertrag also aus der gleichzeitigen Erhöhung von Temperatur und Erträgen mit Zeit ergeben. Verantwortlich für die Ertragssteigerung der letzten Jahrzehnte sind viele Faktoren: Der Umweltwandel gehört dazu, vor allem vermutlich der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre, der die Photosyntheseleistung der C3-Kulturpflanzen (z.B. Weizen, Gerste, Raps, Kartoffeln und Zuckerrüben) steigert. Ob der Temperaturanstieg zumindest regional ein fördernder Faktor war, ist Gegenstand der Untersuchung. Mitverantwortlich für die Ertragssteigerung im Laufe der Zeit sind aber auch die Weiterentwicklung der Züchtung, der Anbau neuer und leistungsfähigerer Sorten und die Verbesserungen in Anbautechnik und Bewirtschaftung (Düngung, Pflanzenschutz, Agrartechnik). Den Beitrag dieser Faktoren näher zu analysieren, war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

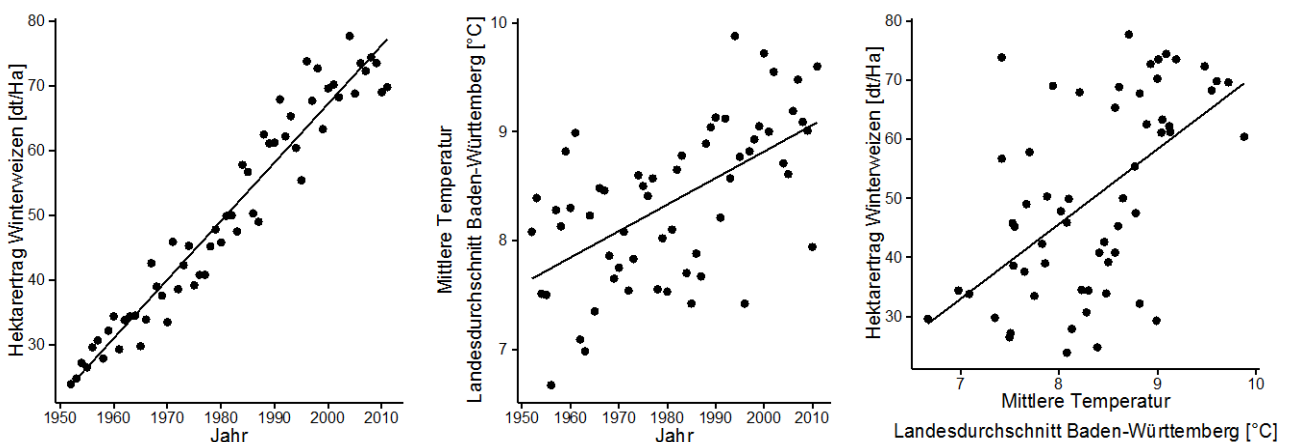


Abb. 3.16. Die statistischen Zusammenhänge zwischen a) der zeitlichen Entwicklung der Erträge von Winterweizen, b) der zeitlichen Entwicklung der mittleren Jahrestemperatur in Baden-Württemberg und c) der Korrelation zwischen dem Ertrag von Winterweizen und der mittleren Temperatur in Baden-Württemberg.

Wenn man sich den Ertragsverlauf in den letzten 60 Jahren in Baden-Württemberg anschaut (Abb. 3.17), so zeigt sich nicht nur beim Winterweizen, sondern auch bei den anderen Feldfrüchten, dass der Ertragsanstieg weitgehend ungebrochen weitergeht. Im Projektjahr 2014 wurden sogar Rekordernten bei den meisten Kulturen eingefahren. Nachdem die Erträge von Wintergerste, Sommergerste und Kartoffeln ab Anfang der 1990-er Jahre auf einem Plateau verharrten, stiegen sie seit etwa 2010 wieder an. Interessant ist, dass Silomais, die einzige C4-Pflanze im dargestellten Kulturartenspektrum, seit den 1970-er Jahren im Ertragsniveau nicht merkbar zulegen konnte. Auch der Körnermais-Ertrag zeigt nach einer Stagnationsphase erst seit etwa 2007 einen Anstieg. Ob dies ein Zeichen dafür ist, dass (Silo-)Mais von der ansteigenden CO<sub>2</sub>-Konzentration nicht profitieren konnte, kann nur vermutet werden. Die Frage wird in Kap. 4.4 näher diskutiert.

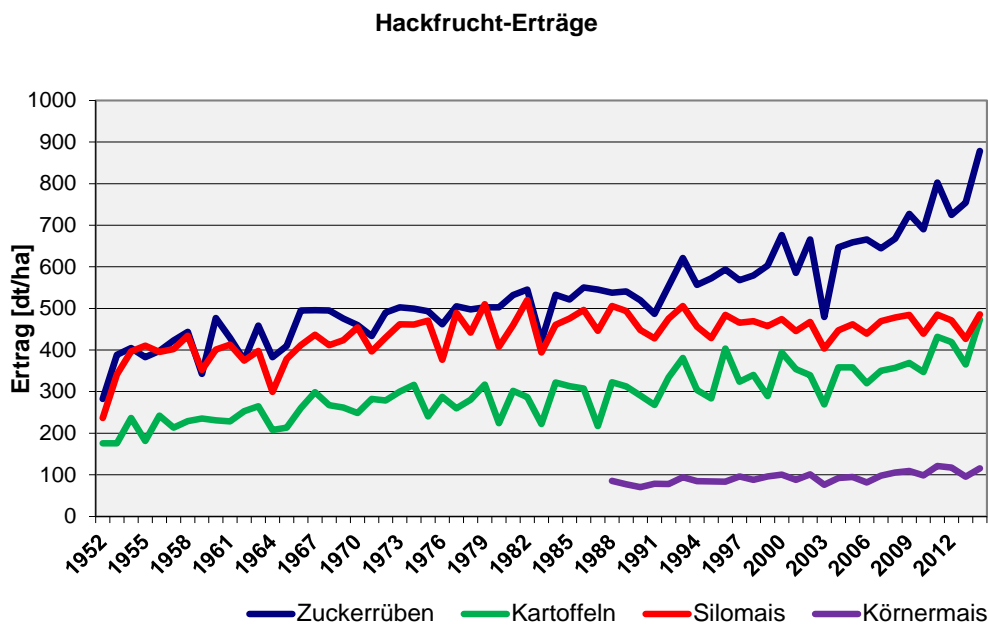
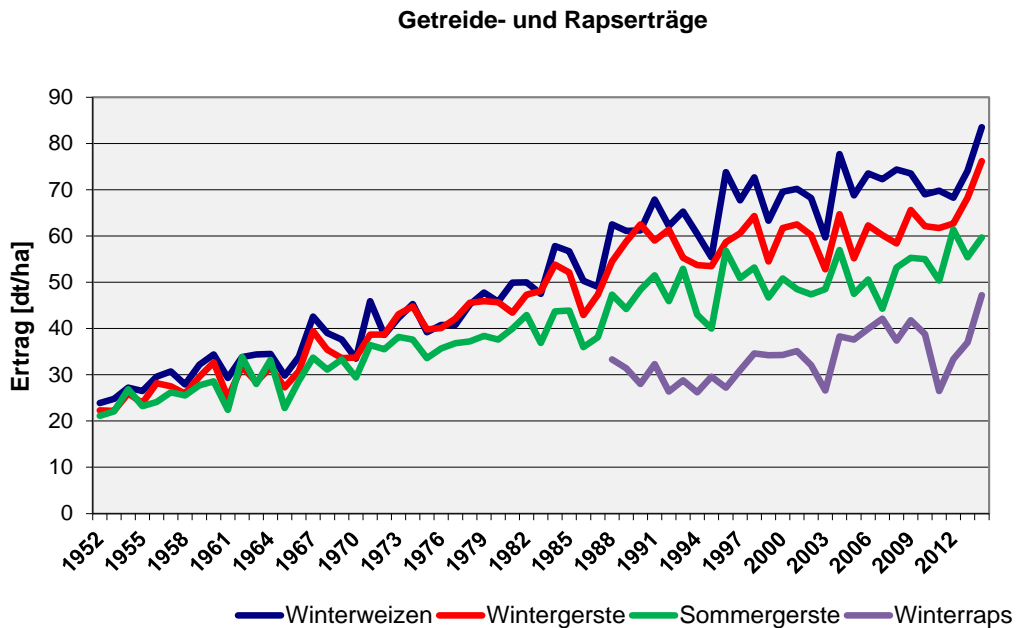


Abb. 3.17: Flächenbezogene Erträge von Getreide, Winterraps und Hackfrüchten in Baden-Württemberg von 1952-2014 in [dt/ha]; Winterraps und Körnermais seit 1988. Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, eigene Darstellung.

Die Stagnation des Ertragszuwachses war nicht nur in Baden-Württemberg, sondern auch in anderen Bundesländern, wie z.B. Sachsen (LfULG 2009) oder Thüringen (Mirschel et al. 2012), aber auch in Europa (Brisson et al. 2010; Grassini et al. 2013) zu beobachten. Der Klimawandel wird zumindest teilweise für die Stagnation der Erträge in der europäischen Landwirtschaft verantwortlich gemacht (Brisson et al. 2010), so über die Verkürzung der Kornfüllungsphase mit steigender Durchschnittstemperatur, der Einwirkung von Extremtemperaturen oder regional zunehmendem Wasserdefizit. Auch global könnte die erhöhte Temperatur die Ertragszuwächse bereits begrenzen (Asseng et al. 2014).

Allerdings sind zumindest in Europa auch andere Faktoren dabei zu bedenken (Dölger 2008, Brisson et al. 2010):

- eine Zunahme von konservierender Bodenbearbeitung gegenüber Pflugeinsatz, evtl. mit (anfänglichen) Anpassungsschwierigkeiten (zu flache Bearbeitung, zu schnelle Umstellung),
- zu enge Fruchtfolgen
- bei Weizen u.U. eine Ausweitung der Anbauflächen auf nicht optimale Standorte
- eine regionale Vernachlässigung der Grunddüngung und evtl. des Pflanzenschutzes,
- geringerer Einsatz von Stickstoffdüngern

Die Ertragsdaten der letzten Jahre deuten darauf hin, dass diese Stagnation des Ertragszuwachses in Baden-Württemberg vorläufig(?) vorbei ist.

Eine klare Zuweisung, welche Faktoren in welchem Ausmaß für den Ertragszuwachs verantwortlich sind, ist schwierig. In einer anderen Arbeit wurde versucht, den klimatischen Einfluss über ein „detrending“ der klimatischen Entwicklungen und das Einsetzen der modifizierten Klimaparameter in Regressionsfunktionen von empirischen Ertragsmodellen herauszurechnen (Lobell et al. 2011). Man kann auch versuchen, zumindest den Sorteneinfluss über spezielle Sortenversuche herauszurechnen (z.B. Ahlemeyer und Friedt 2012). Beide Ansätze waren im Laufe der kurzen Projektzeit nicht zu verwirklichen.

Viele Arbeiten versuchen das Problem der multiplen Einflussfaktoren auf den Ertrag durch den Einsatz von Ertragsmodellierungen zu lösen. Allerdings können verschiedene Modelle zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen kommen (Rosenzweig et al. 2014) bis hin zu dem Befund, dass die simulierten Erträge zwischen den Ertragsmodellen stärker differieren als zwischen den Klimaprojektionen (Asseng et al. 2013).

Eine Korrelation heißt noch nicht, dass eine Ursache-Wirkungs-Beziehung vorliegt. Ob die Verbindung zwischen Ertrag und Temperatur nur auf ihre gleichzeitige Steigerung zurückzuführen ist, wird in den nächsten Abschnitten mit feinerer Auflösung noch geprüft, da dies auf der Grundlage der grob aufgelösten Landesdaten nicht eindeutig auszuschließen ist. Auf der anderen Seite ist auch beim Ertragsfortschritt im Laufe der Jahre (Abb. 3.16a) eben nicht auszuschließen, dass ein klimatischer Effekt mitspielt. Insofern ist die Unsicherheit, inwieweit der Temperaturanstieg zur Ertragsentwicklung beigetragen hat, noch nicht befriedigend aufzulösen.

Insgesamt ziehen wir aus den Landesdaten die Schlussfolgerung, dass mehr oder weniger Niederschläge allein keine signifikanten Effekte auf Erträge der Feldfrüchte auf dieser Analyseebene hatten. Es zeichnet sich allerdings ein möglicher Zusammenhang zwischen Temperatur und landwirtschaftlichen Erträgen ab, der in den kommenden Kapiteln noch eingehender betrachtet wird.

# 4 Die Erträge der Feldfrüchte in Beziehung auf Temperatur und Niederschlag in den einzelnen Landkreisen des Landes Baden-Württemberg 1973-2012

## 4.1 Einleitung

Im letzten Abschnitt wurde zunächst eine grobe Analyse der Ertragsdaten auf Ebene der Landesdurchschnitte erstellt. Hierbei konnten bereits erste Erkenntnisse über die Verbindung zwischen Temperatursteigerung und Ertrag in den letzten 60 Jahren gefunden werden. In den folgenden Abschnitten werden diese noch vertieft und in höherer Auflösung betrachtet. Gegenstand dieses Kapitels sind die Zusammenhänge zwischen den Klimaparametern Temperatur und Niederschlag auf der feineren Ebene der Landkreise. In Baden-Württemberg werden Ertragsdaten auf der Ebene der Landkreise erhoben, was in Verbindung mit Klimadaten von den Stationen des Deutschen Wetterdienstes die Korrelation zwischen Klima und landwirtschaftlichen Erträgen bis zu dieser Auflösung erlaubt. Wir fragen zu Beginn dieser Analyse

- 1) ob die Temperatur-Ertrag-Korrelation, die in Kapitel 3 gefunden wurde, auch in den einzelnen Landkreisen zu finden ist,
- 2) ob diese Korrelation, wenn vorhanden, in allen Landkreisen konsistent ist und
- 3) ob es auf Landkreisebene Zusammenhänge zwischen Ertrag und Niederschlag gibt, die in der Analyse der Daten auf der Ebene von Landesdurchschnitten nicht gefunden wurden.

## 4.2 Methode

Ertragsdaten wurden vom Statistischen Landesamt Baden-Württemberg für die Jahre 1973-2013 auf Kreisebene zur Verfügung gestellt. Dieser Datensatz liegt für jeden Landkreis für die neun Kulturarten Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Roggen, Silomais, Körnermais, Kartoffeln, Zuckerrüben und Winterraps vor. Die Daten beruhen auf den Ertragsschätzungen der Ernteberichterstatte (Betzholz 1998), die mittels eines Faktors, der sich aus dem Verhältnis zwischen Besonderer Ernte- und Qualitätsermittlung (BEE) und Ernte- und Betriebsberichterstattung auf Landesebene ergibt, an die real erzielten Ertragsergebnisse der BEE angeglichen werden (Statistisches Bundesamt 2013) – sofern die Feldfrüchte in der BEE erfasst werden.

Als Klimadaten wurden die frei verfügbaren Daten des DWD verwendet. Hierbei wurden die Klimastationen in Baden-Württemberg mit durchgängigen Laufzeiten von mindestens 1973-2013 identifiziert und den jeweiligen Landkreisen zugeordnet. Danach wurden Landkreise, in denen keine Stationen mit dieser durchgängigen Laufzeit vorhanden waren identifiziert und Stationen gesucht, die einen möglichst großen zusammenhängenden Zeitraum in diesen Landkreisen abdecken. Hier wurden Stationen mit früherer Laufzeit (z.B. 1973-2003) gegenüber jenen mit späteren gemessenen Zeiträumen (z.B. 1983-2013) bevorzugt, da Ende der 70er Jahre ein deutlicher Temperaturanstieg in Baden-Württemberg allgemein zu beobachten war (siehe Abb. 3.1. im vorhergehenden Kapitel). Stationen wurden nur bei einer Laufzeit von mindestens 15

Jahren in die Analyse aufgenommen. Im Landkreis Ludwigsburg wurde keine entsprechende durchgängige Klimastation gefunden, daher wurde dieser Landkreis aus der Analyse ausgelassen. In Landkreisen, in denen mehr als eine Station mit angemessenem Messzeitraum vorhanden war, wurde die Station mit dem längsten zusammenhängenden Messzeitraum benutzt. Wenn mehr als eine Station den gesamten Zeitraum abdeckt, wurden die Werte gemittelt. Im Landkreis Ravensburg fehlten an der Station Weingarten Messwerte für einige Jahre (Oktober 1986 – Juli 1990). Hier konnten die Daten ergänzt werden, da die Station Aulendorf den Zeitraum abdeckte und in den übrigen Jahren eine ausgezeichnete Korrelation zwischen Messwerten in Weingarten und Aulendorf bestand. Die fehlenden Werte in Weingarten wurden also durch Extrapolation dieser Korrelation berechnet und ergänzt. Dies waren die einzige Station und der einzige Landkreis, in dem Daten ergänzt wurden.

Aus den Monatsdaten wurden jeweils die Temperaturdurchschnitte für die Vegetationsperioden der einzelnen Kulturen gebildet. Hierbei mussten wir aus pragmatischen Gründen einheitliche Vegetationsperioden für die Landkreise annehmen und konnten weder auf regionale noch auf Sortenunterschiede eingehen. So wurde für Wintergetreide (Winterweizen, Wintergerste und Roggen) sowie für Winterraps eine Vegetationsperiode von etwa Oktober des Vorjahres bis August angenommen, um auch etwaige späte Erntetermine mit einzuschließen. Die Vegetationsperiode für die Analyse von Sommergerste wurde von März bis August angesetzt, die von Kartoffeln als Kompromiss über alle frühen bis späten Sorten von Mai bis August. Bei Silomais, Körnermais und Zuckerrüben wurde eine Vegetationsperiode von April bis September angenommen. Wir gehen davon aus, dass die Mittelwerte bzw. Summen aus diesen Monaten die relevanten klimatischen Bedingungen in den verschiedenen Jahren für die einzelnen Kulturen abdecken, auch wenn die Erntetermine nicht immer im angegebenen Zeitraum liegen. Zum Beispiel werden Mais und Zuckerrüben auch bis in den November hinein geerntet, aus datentechnischen Gründen wurden jedoch bereits die Monate ab Oktober nicht mit in die Analyse eingebunden. Wir verwenden die mittlere Temperatur der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und die Niederschlagssumme aus demselben Zeitraum. Wenn Temperaturen bzw. Niederschläge in den angegebenen Zeiträumen fehlen (z.B. Ausfall der Messstation im Juli) wurde das gesamte Jahr aus der Analyse ausgelassen.

Die Analyse der Daten erfolgte ähnlich zu dem in Kap. 3.2. beschriebenen Vorgehen. Allerdings gingen wir in der kleinräumigeren Analyse vom einfachsten Modell (z.B. Temperatur gegen Ertrag bzw. Niederschlag gegen Ertrag) aus, und verfeinerten es, wenn nötig. Ein solches einfaches Modell wurde in jedem Landkreis für jede Kulturart einzeln für Temperatur und Niederschlag angefertigt. Es wurde jeweils ein lineares Modell verwendet, das mit der *least squares*-Methode erstellt wurde.

## **4.3 Erträge in Abhängigkeit von klimatischen Bedingungen in den Landkreisen Baden-Württembergs (1974-2012)**

### **4.3.1 Winterweizen**

In 22 von 35 betrachteten Stadt- und Landkreisen war der Hektarertrag von Winterweizen signifikant positiv mit dem Temperaturmittel von Oktober des Vorjahres bis August korreliert (Abb. 4.1., Tabelle 4.1.). Es bestand zwar in diesen Landkreisen (Alb-Donau-Kreis, Bodenseekreis, Emmendingen, Enzkreis, Esslingen, Freudenstadt, Göppingen, Heilbronn, Hohenlohekreis, LKR Karlsruhe, Konstanz, Lörrach, Ostalbkreis, Ravensburg, Reutlingen, Schwäbisch Hall, Schwarzwald-Baar-Kreis, Sigmaringen, Stadtkreis Stuttgart,



Tübingen, Waldshut und Zollernalbkreis) jeweils immer eine positive Korrelation mit der Durchschnittstemperatur; die Kurvenparameter aber waren unterschiedlich, so hatten die Kurven nicht immer dieselbe Steigung (z.B. Kurvensteigung von 9,29 im LKR Ravensburg bzw. 3,68 im LKR Lörrach).

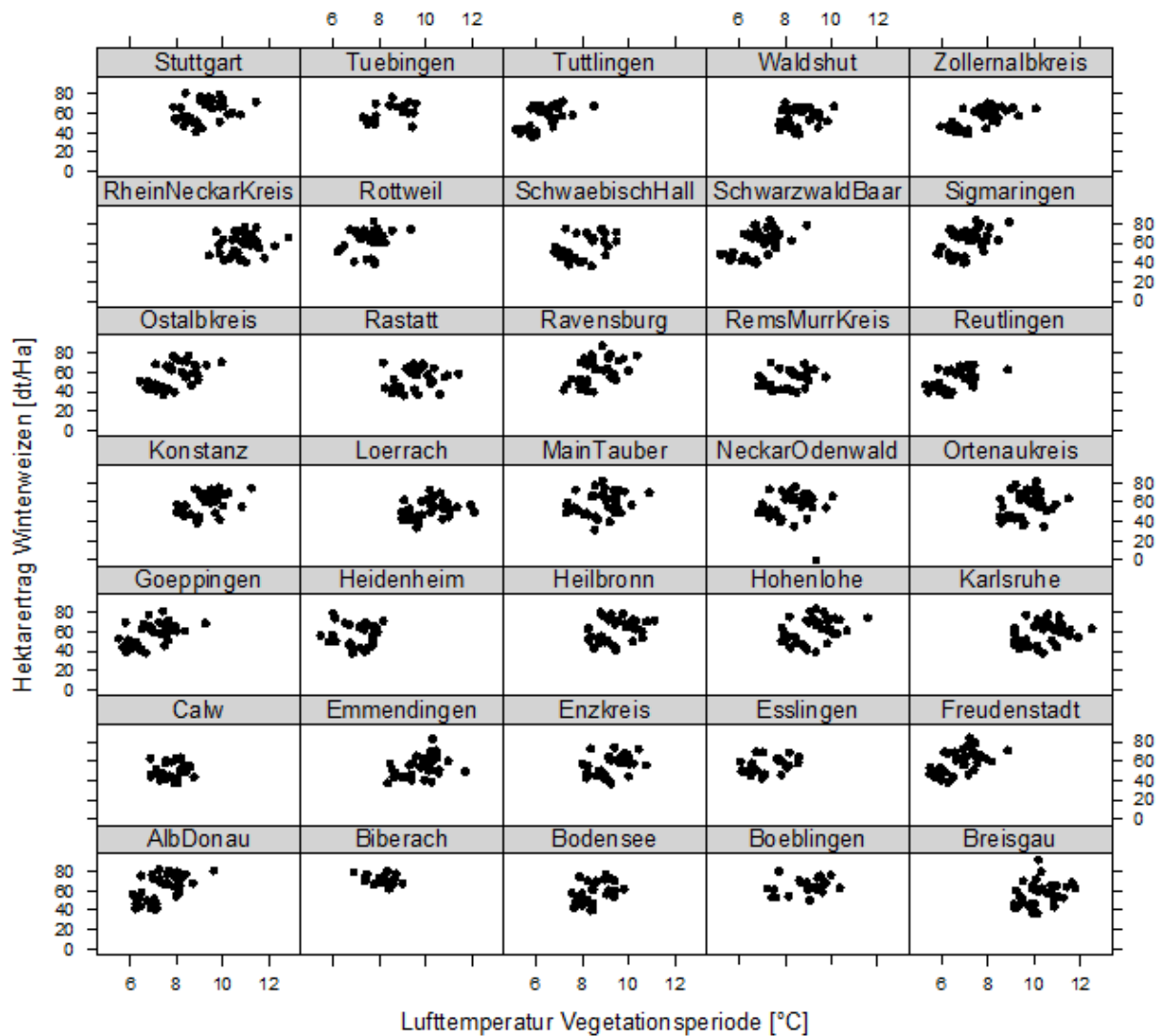


Abb. 4.1: Ertrag von Winterweizen in Abhängigkeit von mittlerer Temperatur während der im Text definierten Vegetationsperiode (Oktober-August) in den einzelnen Landkreisen.

Tabelle 4.1. Ergebnisse der linearen Regression zwischen Hektarerträgen von Winterweizen mit mittlerer Temperatur in der Vegetationsperiode in den einzelnen Landkreisen. Für die Kurvenparameter wird nach dem linearen Modell eine Kurvenformel der Art  $y = ax+c$  angenommen.

Landkreis	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>DF</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
<b>Alb-Donau-Kreis ***</b>	<b>9,52</b>	<b>-6,83</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,14</b>	<b>38</b>	<b>0,29</b>
Biberach	-2,92	95,56	0,20	-1,33	15	0,04
Böblingen	2,72	40,59	0,16	1,43	20	0,04
<b>Bodensee **</b>	<b>8,00</b>	<b>-10,73</b>	<b>0,01</b>	<b>2,57</b>	<b>28</b>	<b>0,16</b>
Breisgau	5,15	3,84	0,06	1,92	36	0,06
Calw	1,60	37,59	0,59	0,53	26	-0,02
<b>Emmendingen *</b>	<b>5,14</b>	<b>4,24</b>	<b>0,03</b>	<b>2,27</b>	<b>32</b>	<b>0,11</b>
<b>Enzkreis *</b>	<b>5,50</b>	<b>4,78</b>	<b>0,02</b>	<b>2,42</b>	<b>30</b>	<b>0,13</b>
<b>Esslingen *</b>	<b>4,21</b>	<b>24,66</b>	<b>0,03</b>	<b>2,17</b>	<b>25</b>	<b>0,12</b>
<b>Freudenstadt ***</b>	<b>8,75</b>	<b>-0,57</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,13</b>	<b>37</b>	<b>0,29</b>
<b>Göppingen ***</b>	<b>7,25</b>	<b>7,17</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>3,89</b>	<b>38</b>	<b>0,26</b>
Heidenheim	-0,07	57,16	0,97	-0,02	29	-0,03
<b>Heilbronn *</b>	<b>4,19</b>	<b>22,16</b>	<b>0,05</b>	<b>1,98</b>	<b>37</b>	<b>0,07</b>
<b>Hohenlohe **</b>	<b>5,56</b>	<b>10,51</b>	<b>0,01</b>	<b>2,66</b>	<b>38</b>	<b>0,13</b>
<b>Karlsruhe *</b>	<b>4,26</b>	<b>14,03</b>	<b>0,05</b>	<b>2,00</b>	<b>38</b>	<b>0,07</b>
<b>Konstanz ***</b>	<b>7,01</b>	<b>-6,18</b>	<b>0,001</b>	<b>3,42</b>	<b>37</b>	<b>0,22</b>
<b>Lörrach *</b>	<b>3,68</b>	<b>15,09</b>	<b>0,05</b>	<b>2,00</b>	<b>35</b>	<b>0,07</b>
Main-Tauber-Kreis	4,08	23,27	0,06	1,91	38	0,06
Neckar-Odenwald-Kreis	1,10	47,04	0,69	0,40	37	-0,02
Ortenaukreis	5,29	5,68	0,06	1,93	38	0,06
<b>Ostalbkreis ***</b>	<b>7,38</b>	<b>-1,27</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>3,80</b>	<b>37</b>	<b>0,26</b>
Rastatt	2,98	25,01	0,21	1,27	34	0,01
<b>Ravensburg ***</b>	<b>9,29</b>	<b>-18,18</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>3,82</b>	<b>38</b>	<b>0,25</b>
Rems-Murr-Kreis	3,79	22,26	0,07	1,87	29	0,07
<b>Reutlingen ***</b>	<b>6,78</b>	<b>8,83</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>3,67</b>	<b>35</b>	<b>0,25</b>
Rhein-Neckar-Kreis	2,72	29,51	0,29	1,05	35	0,003
Rottweil	4,15	31,09	0,23	1,20	29	0,01
<b>Schwäbisch Hall **</b>	<b>6,59</b>	<b>3,09</b>	<b>0,01</b>	<b>2,59</b>	<b>27</b>	<b>0,16</b>
<b>Schwarzwald-Baar-Kreis ***</b>	<b>9,14</b>	<b>-2,41</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,15</b>	<b>38</b>	<b>0,29</b>
<b>Sigmaringen ***</b>	<b>8,94</b>	<b>-2,10</b>	<b>0,001</b>	<b>3,47</b>	<b>37</b>	<b>0,22</b>
<b>Stuttgart *</b>	<b>4,31</b>	<b>23,16</b>	<b>0,03</b>	<b>2,16</b>	<b>34</b>	<b>0,09</b>
<b>Tübingen *</b>	<b>4,96</b>	<b>18,78</b>	<b>0,04</b>	<b>2,13</b>	<b>18</b>	<b>0,15</b>
Tuttlingen	-0,01	54,71	0,87	-0,16	35	-0,07
<b>Waldshut *</b>	<b>4,56</b>	<b>16,09</b>	<b>0,05</b>	<b>1,96</b>	<b>37</b>	<b>0,06</b>
<b>Zollernalbkreis ***</b>	<b>6,96</b>	<b>1,59</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>5,40</b>	<b>38</b>	<b>0,41</b>

Im Gegensatz zur Temperatur gab es für die Summe des Niederschlags im betrachteten Zeitraum (Oktober-August) keine klare Korrelation mit den Erträgen von Winterweizen. Zwar war eine negative Korrelation in neun Landkreisen signifikant (siehe Tabelle 4.2. für Breisgau-Hochschwarzwald, Emmendingen, Freudenstadt, Göppingen, Konstanz, Lörrach, Ortenaukreis, Ravensburg, Rhein-Neckar-Kreis), und die graphische Darstellung in diesen Landkreisen scheint dies zu bestätigen (siehe z.B. Abb. 4.2. für die Landkreise Emmendingen, Lörrach, Ravensburg und Rhein-Neckar-Kreis), die angepasste Kurve hatte jedoch nie eine Steigung die extremer als  $-0,04$  war. Das heißt, die Kurve liegt so gut wie parallel zur x-Achse, und schneidet die y-Achse etwa bei dem Wert für den durchschnittlichen Ertrag für Winterweizen in den entsprechenden Landkreisen. Es ist außerdem zu beachten, dass der  $R^2$ -Wert bei der Korrelation von Winterweizenerträgen und Niederschlägen stets sehr niedrig ist, die Varianz in den Daten wird also nur zu einem sehr kleinen Teil vom Niederschlag erklärt.

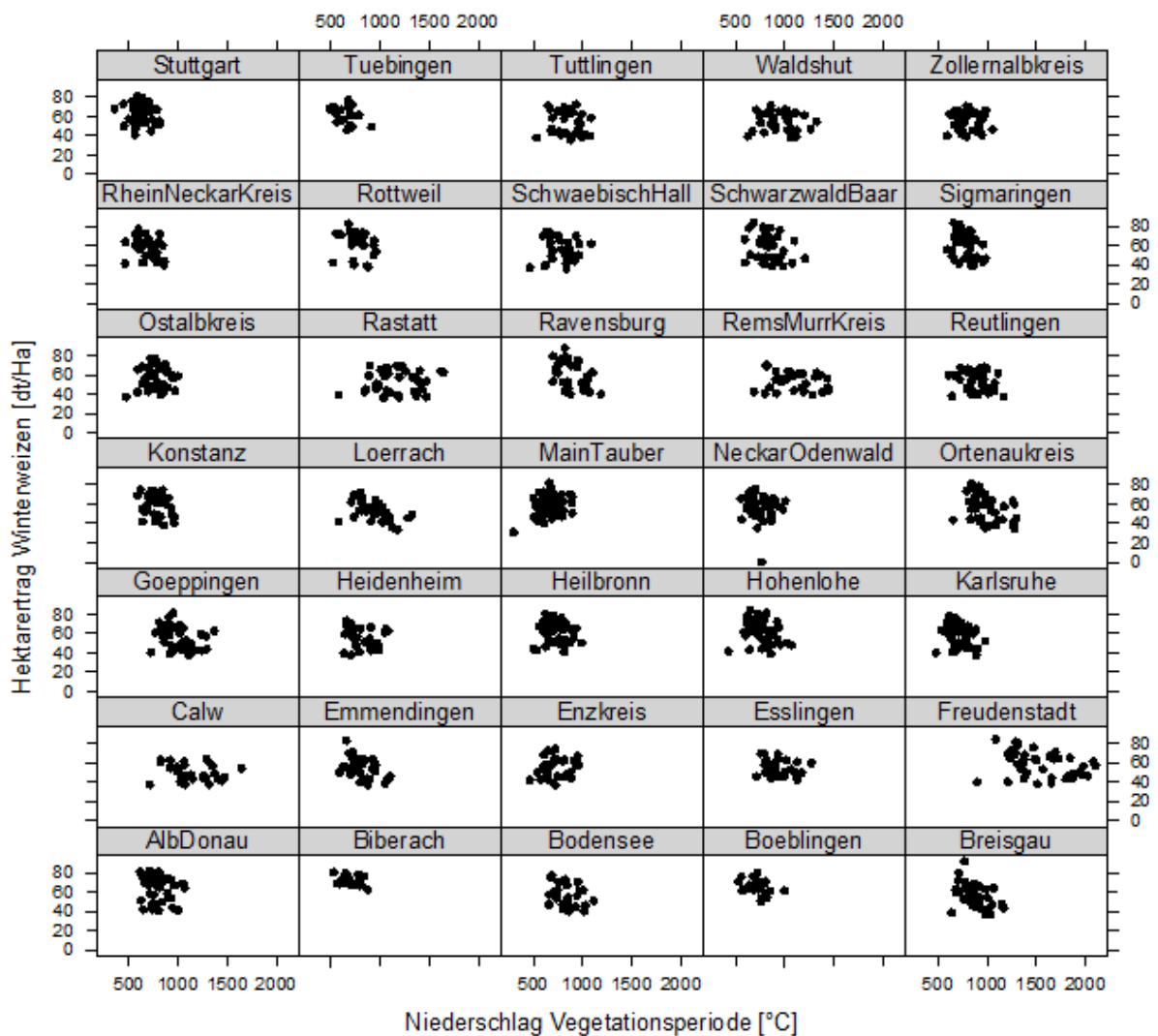


Abb. 4.2: Ertrag von Winterweizen in Abhängigkeit von Niederschlagssummen während im Text definierten Vegetationsperiode (Oktober-August) in den einzelnen Landkreisen.

Tabelle 4.2. Ergebnisse der linearen Regression zwischen Hektarerträgen von Winterweizen mit Niederschlag während der Vegetationsperiode in den einzelnen Landkreisen.

Landkreis	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	P	t	DF	R <sup>2</sup>
Alb-Donau-Kreis	-0,01	76,30	0,37	-0,89	38	<0,01
Biberach	-0,01	82,76	0,21	-1,30	15	0,04
Böblingen	-0,02	82,73	0,11	-1,63	20	0,07
Bodensee	-0,03	83,52	0,07	-1,82	26	0,07
<b>Breisgau **</b>	<b>-0,04</b>	<b>92,34</b>	<b>0,004</b>	<b>-2,99</b>	<b>36</b>	<b>0,17</b>
Calw	-0,006	57,71	0,36	-0,91	26	<0,01
<b>Emmendingen **</b>	<b>-0,03</b>	<b>82,50</b>	<b>0,01</b>	<b>-2,59</b>	<b>30</b>	<b>0,15</b>
Enzkreis	0,01	47,88	0,48	0,70	29	<0,01
Esslingen	-0,01	66,39	0,29	-1,06	25	<0,01
<b>Freudenstadt *</b>	<b>-0,01</b>	<b>79,68</b>	<b>0,04</b>	<b>-2,12</b>	<b>38</b>	<b>0,08</b>
<b>Göppingen *</b>	<b>-0,02</b>	<b>81,44</b>	<b>0,04</b>	<b>-2,08</b>	<b>36</b>	<b>0,08</b>
Heidenheim	-0,01	65,73	0,38	-0,88	27	<0,01
Heilbronn	-0,008	65,88	0,72	-0,35	36	<0,01
Hohenlohe	-0,02	77,75	0,17	-1,39	38	0,02
Karlsruhe	-0,02	76,10	0,14	-1,49	38	0,03
<b>Konstanz *</b>	<b>-0,03</b>	<b>87,16</b>	<b>0,03</b>	<b>-2,13</b>	<b>37</b>	<b>0,08</b>
<b>Lörrach **</b>	<b>-0,02</b>	<b>79,03</b>	<b>0,003</b>	<b>-3,12</b>	<b>34</b>	<b>0,19</b>
Main-Tauber-Kreis	0,02	43,70	0,11	1,59	38	0,03
Neckar-Odenwald-Kreis	-0,01	70,15	0,36	-0,92	36	<0,01
<b>Ortenaukreis *</b>	<b>-0,02</b>	<b>84,49</b>	<b>0,03</b>	<b>-2,21</b>	<b>38</b>	<b>0,09</b>
Ostalbkreis	0,002	54,90	0,85	0,18	37	<0,01
Rastatt	0,007	44,44	0,36	0,92	32	<0,01
<b>Ravensburg *</b>	<b>-0,03</b>	<b>94,78</b>	<b>0,03</b>	<b>-2,22</b>	<b>32</b>	<b>0,10</b>
Rems-Murr-Kreis	-0,007	61,57	0,31	-1,01	29	<0,01
Reutlingen	-0,01	69,76	0,13	-1,53	36	0,03
<b>Rhein-Neckar-Kreis *</b>	<b>-0,03</b>	<b>81,85</b>	<b>0,05</b>	<b>-2,00</b>	<b>34</b>	<b>0,07</b>
Rottweil	-0,02	80,80	0,28	-1,08	26	<0,01
Schwäbisch Hall	-0,000004	55,5	0,99	0	26	<0,01
Schwarzwald-Baar-Kreis	-0,02	81,21	0,12	-1,58	37	0,03
Sigmaringen	-0,04	92,76	0,08	-1,79	37	0,05
Stuttgart	-0,01	71,32	0,44	-0,77	34	<0,01
Tübingen	-0,02	80,55	0,15	-1,49	16	0,06
Tuttlingen	-0,01	65,06	0,40	-0,84	31	<0,01
Waldshut	-0,007	62,65	0,44	-0,78	36	<0,01
Zollernalbkreis	-0,002	57,17	0,84	-0,19	38	<0,01

### 4.3.2 Wintergerste

In 25 von 35 untersuchten Landkreisen waren die Hektarerträge von Wintergerste signifikant mit der mittleren Temperatur während der definierten Vegetationsperiode (Oktober-August) korreliert (Tabelle 4.3, Abb. 4.3). In Normaljahren sollte die Wintergerste allerdings bereits im Juli abgeerntet sein. Alle signifikanten Korrelationen mit Temperatur waren, ebenso wie beim Winterweizen, positiv (also Ertragszunahme in Jahren mit höherer Temperatur). Ebenso gab es in 11 Landkreisen im Prinzip eine signifikante Korrelation der Wintergerste-Erträge mit Niederschlägen im selben Zeitraum (Abb. 4.4. und Tabelle 4.4. – Die Einschränkungen, die unter diesem Punkt für Winterweizen gemacht wurden gelten auch hier); allerdings gab es zum Teil gegenläufige Wirkungen von höheren Niederschlägen. So gab es in den meisten Landkreisen in Jahren mit höherem Niederschlag reduzierte Wintergerste-Erträge, im Main-Tauber-Kreis gab es dagegen einen positiven Effekt von höheren Niederschlägen ( $P = 0,02$ ).

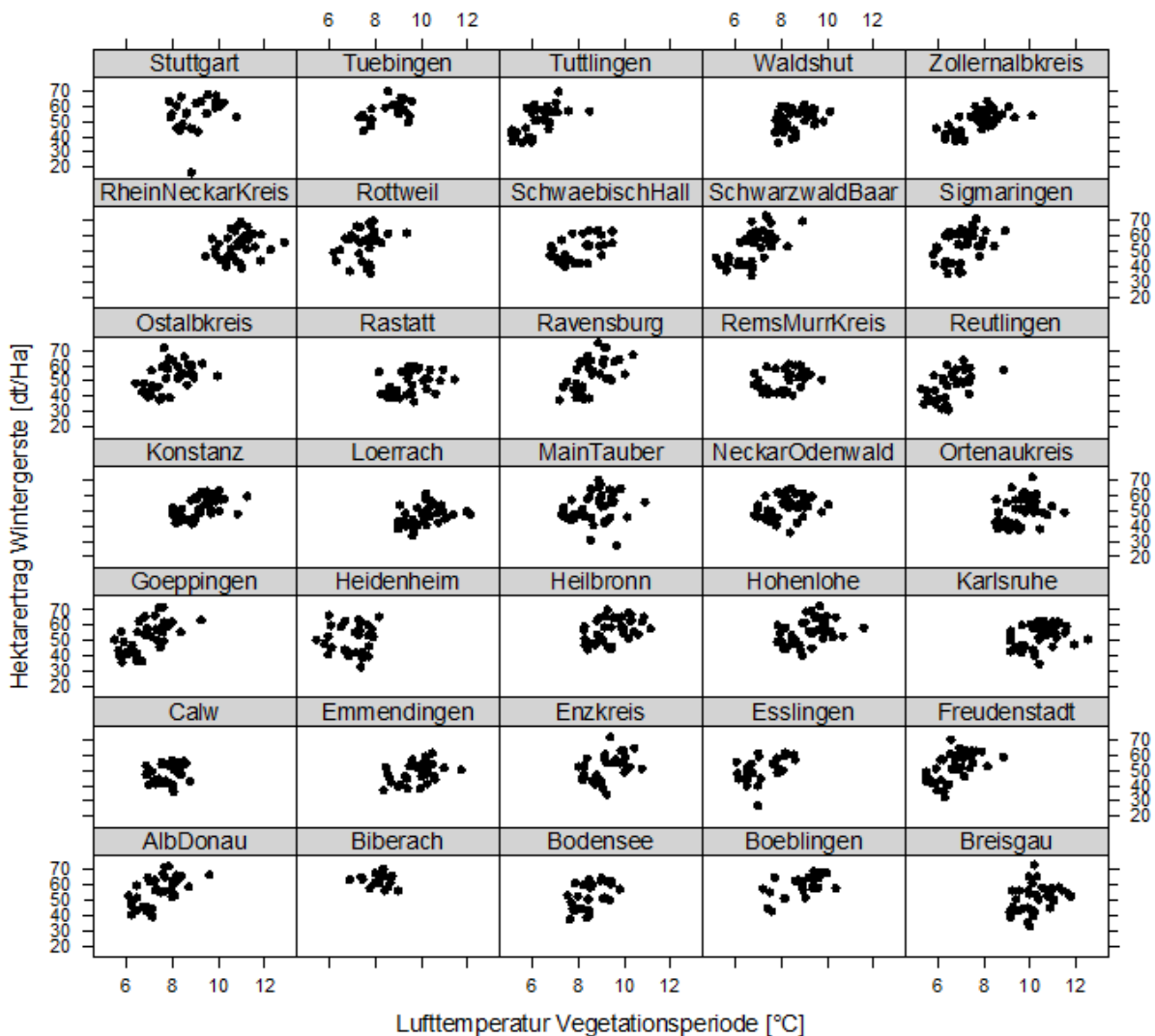


Abb. 4.3: Ertrag von Wintergerste in Abhängigkeit von mittlerer Temperatur während der im Text definierten Vegetationsperiode (Oktober-August) in den einzelnen Landkreisen.

Tabelle 4.3. Ergebnisse der linearen Regression zwischen Hektarerträgen von Wintergerste mit mittlerer Temperatur in der Vegetationsperiode in den einzelnen Landkreisen.

Landkreis	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	P	t	DF	R <sup>2</sup>
<b>Alb-Donau-Kreis ***</b>	<b>7,31</b>	<b>1,97</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,63</b>	<b>38</b>	<b>0,34</b>
Biberach	-1,63	76,27	0,38	-0,89	15	<0,01
<b>Böblingen **</b>	<b>4,69</b>	<b>18,04</b>	<b>0,004</b>	<b>3,19</b>	<b>20</b>	<b>0,30</b>
<b>Bodensee **</b>	<b>6,96</b>	<b>-7,31</b>	<b>0,005</b>	<b>3,04</b>	<b>27</b>	<b>0,22</b>
<b>Breisgau *</b>	<b>4,26</b>	<b>7,24</b>	<b>0,02</b>	<b>2,72</b>	<b>36</b>	<b>0,10</b>
Calw	1,73	33,99	0,43	0,79	26	<0,01
<b>Emmendingen *</b>	<b>3,17</b>	<b>17,10</b>	<b>0,02</b>	<b>2,34</b>	<b>29</b>	<b>0,13</b>
<b>Enzkreis **</b>	<b>5,12</b>	<b>4,38</b>	<b>0,01</b>	<b>2,74</b>	<b>30</b>	<b>0,17</b>
<b>Esslingen **</b>	<b>4,86</b>	<b>15,76</b>	<b>0,01</b>	<b>2,72</b>	<b>25</b>	<b>0,19</b>
<b>Freudenstadt ***</b>	<b>6,79</b>	<b>6,43</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,31</b>	<b>37</b>	<b>0,31</b>
<b>Göppingen ***</b>	<b>7,11</b>	<b>3,91</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,69</b>	<b>38</b>	<b>0,35</b>
Heidenheim	0,86	45,28	0,71	0,36	29	<0,01
Heilbronn	3,57	23,18	0,01	2,54	37	0,12
<b>Hohenlohe **</b>	<b>3,58</b>	<b>22,98</b>	<b>0,01</b>	<b>2,58</b>	<b>38</b>	<b>0,12</b>
<b>Karlsruhe *</b>	<b>3,18</b>	<b>19,51</b>	<b>0,02</b>	<b>2,27</b>	<b>38</b>	<b>0,09</b>
<b>Konstanz ***</b>	<b>4,63</b>	<b>9,75</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>3,83</b>	<b>37</b>	<b>0,26</b>
<b>Lörrach **</b>	<b>3,20</b>	<b>14,14</b>	<b>0,01</b>	<b>2,63</b>	<b>35</b>	<b>0,14</b>
Main-Tauber-Kreis	2,43	31,32	0,18	1,36	38	0,02
Neckar-Odenwald-Kreis	2,61	31,11	0,06	1,93	37	0,06
<b>Ortenaukreis *</b>	<b>3,74</b>	<b>14,41</b>	<b>0,05</b>	<b>2,00</b>	<b>38</b>	<b>0,07</b>
<b>Ostalbkreis ***</b>	<b>5,01</b>	<b>13,13</b>	<b>0,001</b>	<b>3,35</b>	<b>37</b>	<b>0,21</b>
<b>Rastatt *</b>	<b>3,17</b>	<b>18,39</b>	<b>0,04</b>	<b>2,08</b>	<b>34</b>	<b>0,08</b>
<b>Ravensburg ***</b>	<b>7,89</b>	<b>-12,67</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,09</b>	<b>38</b>	<b>0,28</b>
<b>Rems-Murr-Kreis *</b>	<b>2,96</b>	<b>26,44</b>	<b>0,05</b>	<b>2,03</b>	<b>29</b>	<b>0,09</b>
<b>Reutlingen ***</b>	<b>7,05</b>	<b>1,02</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,42</b>	<b>35</b>	<b>0,34</b>
Rhein-Neckar-Kreis	2,60	25,85	0,15	1,43	36	0,02
Rottweil	3,86	25,67	0,15	1,46	29	0,03
<b>Schwäbisch Hall **</b>	<b>4,99</b>	<b>11,50</b>	<b>0,003</b>	<b>3,21</b>	<b>27</b>	<b>0,24</b>
<b>Schwarzwald-Baar-Kreis ***</b>	<b>7,99</b>	<b>-0,83</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,92</b>	<b>38</b>	<b>0,37</b>
<b>Sigmaringen **</b>	<b>6,36</b>	<b>8,79</b>	<b>0,003</b>	<b>3,09</b>	<b>37</b>	<b>0,18</b>
Stuttgart	3,99	18,88	0,14	1,52	25	0,04
<b>Tübingen *</b>	<b>4,28</b>	<b>19,91</b>	<b>0,02</b>	<b>2,53</b>	<b>18</b>	<b>0,22</b>
Tuttlingen	0,01	49,70	0,77	0,28	34	<0,01
<b>Waldshut **</b>	<b>3,99</b>	<b>17,01</b>	<b>0,01</b>	<b>2,44</b>	<b>37</b>	<b>0,11</b>
<b>Zollernalbkreis ***</b>	<b>4,98</b>	<b>11,39</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>5,43</b>	<b>38</b>	<b>0,42</b>

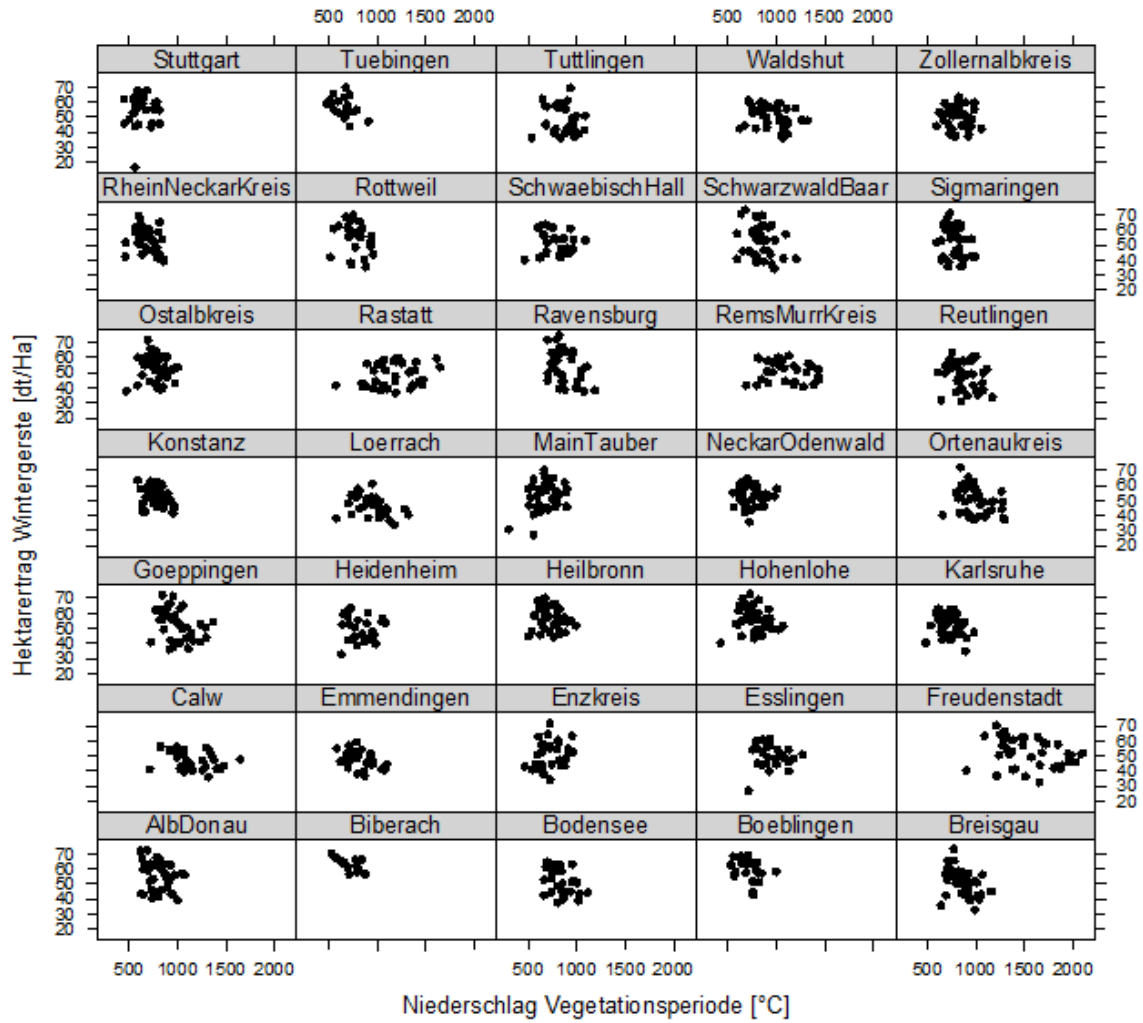


Abb. 4.4: Ertrag von Wintergerste in Abhängigkeit von Niederschlagssummen während der im Text definierten Vegetationsperiode (Oktober-August) in den einzelnen Landkreisen.

Tabelle 4.4. Ergebnisse der linearen Regression zwischen Hektarerträgen von Wintergerste mit Niederschlag während der Vegetationsperiode in den einzelnen Landkreisen

Landkreis	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	P	t	DF	R <sup>2</sup>
Alb-Donau-Kreis	-0,01	69,33	0,19	-1,32	38	0,01
<b>Biberach **</b>	<b>-0,02</b>	<b>82,10</b>	<b>0,002</b>	<b>-3,67</b>	<b>15</b>	<b>0,43</b>
Böblingen	-0,02	74,48	0,15	-1,47	20	0,05
<b>Bodensee *</b>	<b>-0,02</b>	<b>74,01</b>	<b>0,04</b>	<b>-2,11</b>	<b>26</b>	<b>0,11</b>
<b>Breisgau **</b>	<b>-0,02</b>	<b>74,47</b>	<b>0,01</b>	<b>-2,70</b>	<b>36</b>	<b>0,14</b>
Calw	-0,008	57,74	0,09	-1,75	26	0,07
<b>Emmendingen *</b>	<b>-0,01</b>	<b>62,13</b>	<b>0,03</b>	<b>-2,19</b>	<b>27</b>	<b>0,12</b>
Enzkreis	0,01	42,71	0,33	0,98	29	<0,01
Esslingen	-0,003	54,22	0,73	-0,33	25	<0,01
Freudenstadt	-0,008	65,57	0,08	-1,76	38	0,05
<b>Göppingen *</b>	<b>-0,02</b>	<b>74,72</b>	<b>0,03</b>	<b>-2,19</b>	<b>36</b>	<b>0,09</b>
Heidenheim	-0,01	60,50	0,30	-1,04	27	<0,01
Heilbronn	-0,006	61,62	0,55	-0,59	36	<0,01
Hohenlohe	-0,007	62,01	0,44	-0,76	38	<0,01
Karlsruhe	-0,01	63,72	0,17	-1,39	38	0,02
<b>Konstanz *</b>	<b>-0,02</b>	<b>71,82</b>	<b>0,02</b>	<b>-2,41</b>	<b>37</b>	<b>0,11</b>
<b>Lörrach **</b>	<b>-0,01</b>	<b>61,83</b>	<b>0,01</b>	<b>-2,46</b>	<b>34</b>	<b>0,12</b>
<b>Main-Tauber-Kreis *</b>	<b>0,02</b>	<b>36,94</b>	<b>0,04</b>	<b>2,02</b>	<b>38</b>	<b>0,07</b>
Neckar-Odenwald-Kreis	-0,008	59,21	0,40	-0,83	36	<0,01
<b>Ortenaukreis *</b>	<b>-0,01</b>	<b>69,15</b>	<b>0,03</b>	<b>-2,16</b>	<b>38</b>	<b>0,08</b>
Ostalbkreis	-0,006	57,68	0,61	-0,50	37	<0,01
Rastatt	0,008	39,23	0,15	1,47	32	0,03
<b>Ravensburg *</b>	<b>-0,03</b>	<b>83,06</b>	<b>0,02</b>	<b>-2,39</b>	<b>32</b>	<b>0,12</b>
Rems-Murr-Kreis	-0,004	55,77	0,40	-0,85	29	<0,01
Reutlingen	-0,01	59,48	0,23	-1,20	36	0,01
<b>Rhein-Neckar-Kreis *</b>	<b>-0,02</b>	<b>69,92</b>	<b>0,05</b>	<b>-1,94</b>	<b>35</b>	<b>0,07</b>
Rottweil	-0,02	71,69	0,21	-1,26	26	0,02
Schwäbisch Hall	-0,001	52,67	0,86	-0,17	26	<0,01
Schwarzwald-Baar-Kreis	-0,02	72,60	0,07	-1,80	37	0,05
Sigmaringen	-0,03	77,62	0,08	-1,77	37	0,05
Stuttgart	0,001	53,75	0,83	0,08	25	<0,01
Tübingen	-0,02	73,89	0,08	-1,85	16	0,12
Tuttlingen	-0,009	57,14	0,47	-0,73	30	<0,01
Waldshut	-0,009	60,09	0,19	-1,31	36	0,01
Zollernalbkreis	-0,006	54,70	0,54	-0,60	38	<0,01



### 4.3.3 Sommergerste

In 16 von 35 Landkreisen war der Ertrag von Sommergerste positiv mit mittlerer Temperatur während der Vegetationsperiode korreliert (Tabelle 4.5 und Abb. 4.5). Wie bereits bei Winterweizen und Wintergerste waren die signifikanten Korrelationen immer positiv. Hier war auch die Korrelation mit Niederschlägen, die in fünf Landkreisen gefunden wurde (Tabelle 4.6., Abb. 4.6.) immer negativ.

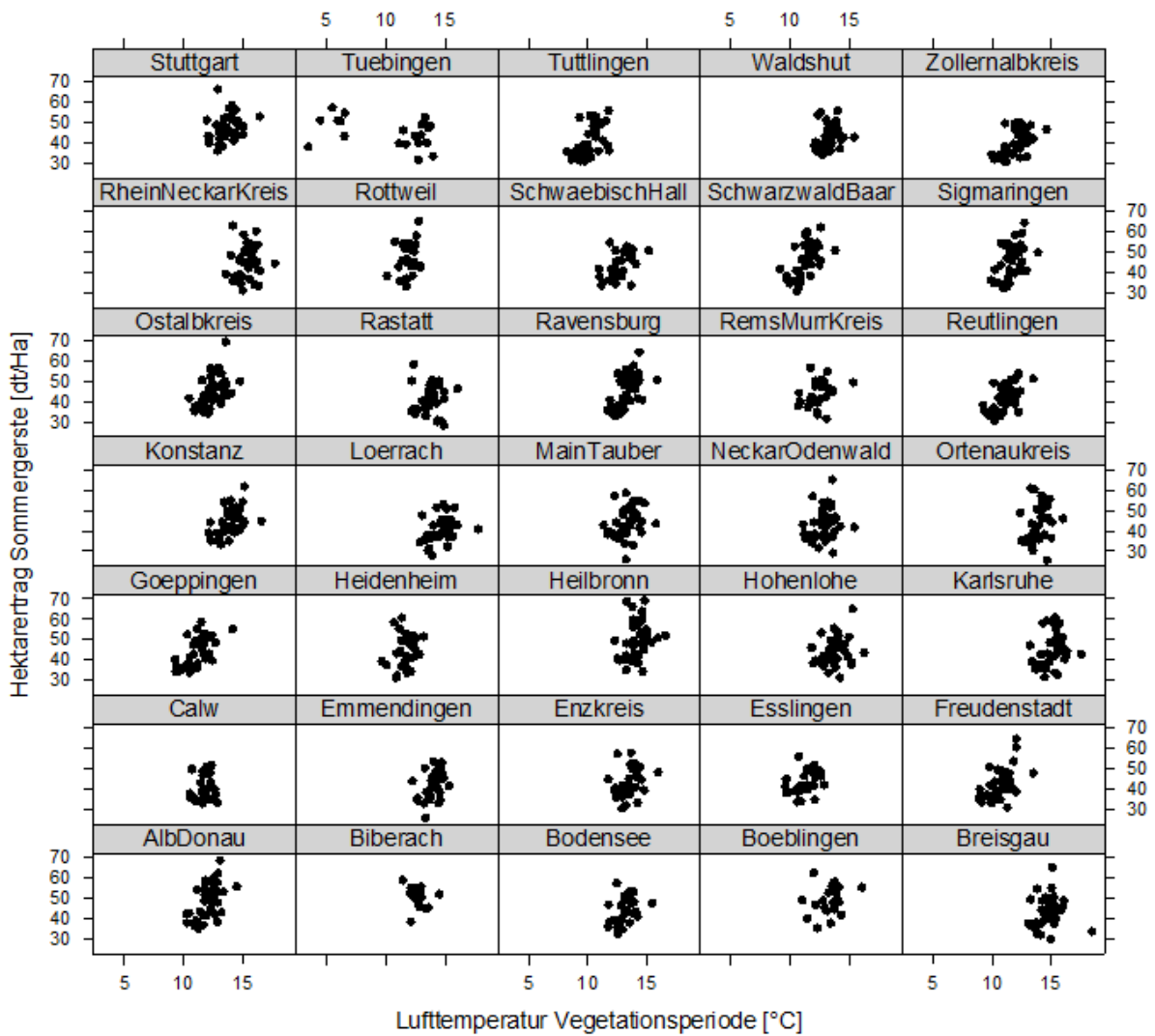


Abb. 4.5. Ertrag von Sommergerste in Abhängigkeit von mittlerer Temperatur während der Vegetationsperiode (März-August) in den einzelnen Landkreisen.

Tabelle 4.5. Ergebnisse der linearen Regression zwischen Hektarerträgen von Sommergerste mit mittlerer Temperatur in der Vegetationsperiode in den einzelnen Landkreisen

Landkreis	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	P	t	DF	R <sup>2</sup>
<b>Alb-Donau-Kreis ***</b>	<b>5,62</b>	<b>-19,81</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,47</b>	<b>38</b>	<b>0,32</b>
Biberach	-1,78	73,70	0,32	-1,02	15	<0,01
Böblingen	1,74	26,32	0,22	1,24	20	0,02
<b>Bodensee *</b>	<b>2,82</b>	<b>6,93</b>	<b>0,04</b>	<b>2,07</b>	<b>27</b>	<b>0,10</b>
Breisgau	0,97	28,79	0,42	0,81	37	<0,01
Calw	1,35	25,40	0,49	0,69	26	<0,01
<b>Emmendingen *</b>	<b>3,94</b>	<b>-12,91</b>	<b>0,02</b>	<b>2,40</b>	<b>29</b>	<b>0,13</b>
Enzkreis	2,33	11,92	0,10	1,65	30	0,05
<b>Esslingen *</b>	<b>2,39</b>	<b>16,37</b>	<b>0,03</b>	<b>2,21</b>	<b>27</b>	<b>0,12</b>
<b>Freudenstadt ***</b>	<b>4,11</b>	<b>-1,07</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>3,91</b>	<b>37</b>	<b>0,27</b>
<b>Göppingen ***</b>	<b>4,05</b>	<b>-1,34</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,24</b>	<b>36</b>	<b>0,31</b>
Heidenheim	1,62	25,16	0,40	0,85	29	<0,01
<b>Heilbronn *</b>	<b>3,14</b>	<b>5,68</b>	<b>0,04</b>	<b>2,03</b>	<b>37</b>	<b>0,07</b>
Hohenlohe	1,86	18,96	0,09	1,73	38	0,04
Karlsruhe	2,30	10,58	0,09	1,69	38	0,04
<b>Konstanz **</b>	<b>3,26</b>	<b>-0,91</b>	<b>0,002</b>	<b>3,30</b>	<b>37</b>	<b>0,20</b>
<b>Lörrach *</b>	<b>2,20</b>	<b>8,32</b>	<b>0,02</b>	<b>2,27</b>	<b>34</b>	<b>0,10</b>
Main-Tauber-Kreis	2,06	16,87	0,09	1,72	38	0,04
Neckar-Odenwald-Kreis	1,94	18,46	0,13	1,52	37	0,03
Ortenaukreis	3,06	1,27	0,10	1,66	36	0,04
<b>Ostalbkreis ***</b>	<b>3,78</b>	<b>-2,53</b>	<b>0,001</b>	<b>3,52</b>	<b>38</b>	<b>0,22</b>
Rastatt	0,14	38,83	0,91	0,11	36	<0,01
<b>Ravensburg ***</b>	<b>4,90</b>	<b>-19,44</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,14</b>	<b>37</b>	<b>0,29</b>
Rems-Murr-Kreis	1,79	20,98	0,10	1,69	29	0,05
<b>Reutlingen ***</b>	<b>4,28</b>	<b>-5,30</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,71</b>	<b>38</b>	<b>0,35</b>
Rhein-Neckar-Kreis	0,79	33,04	0,61	0,50	37	<0,01
Rottweil	3,62	3,14	0,12	1,59	29	0,04
<b>Schwäbisch Hall **</b>	<b>3,41</b>	<b>-0,48</b>	<b>0,003</b>	<b>3,19</b>	<b>28</b>	<b>0,24</b>
<b>Schwarzwald-Baar-Kreis ***</b>	<b>5,20</b>	<b>-12,93</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,40</b>	<b>38</b>	<b>0,32</b>
<b>Sigmaringen **</b>	<b>4,71</b>	<b>-9,72</b>	<b>0,002</b>	<b>3,28</b>	<b>38</b>	<b>0,20</b>
Stuttgart	2,02	20,69	0,08	1,77	34	0,05
Tübingen	-0,73	52,64	0,08	-1,82	18	0,10
Tuttlingen	-0,01	42,57	0,55	-0,59	36	<0,01
Waldshut	1,92	17,94	0,13	1,53	38	0,03
<b>Zollernalbkreis ***</b>	<b>3,79</b>	<b>-5,12</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,45</b>	<b>37</b>	<b>0,33</b>

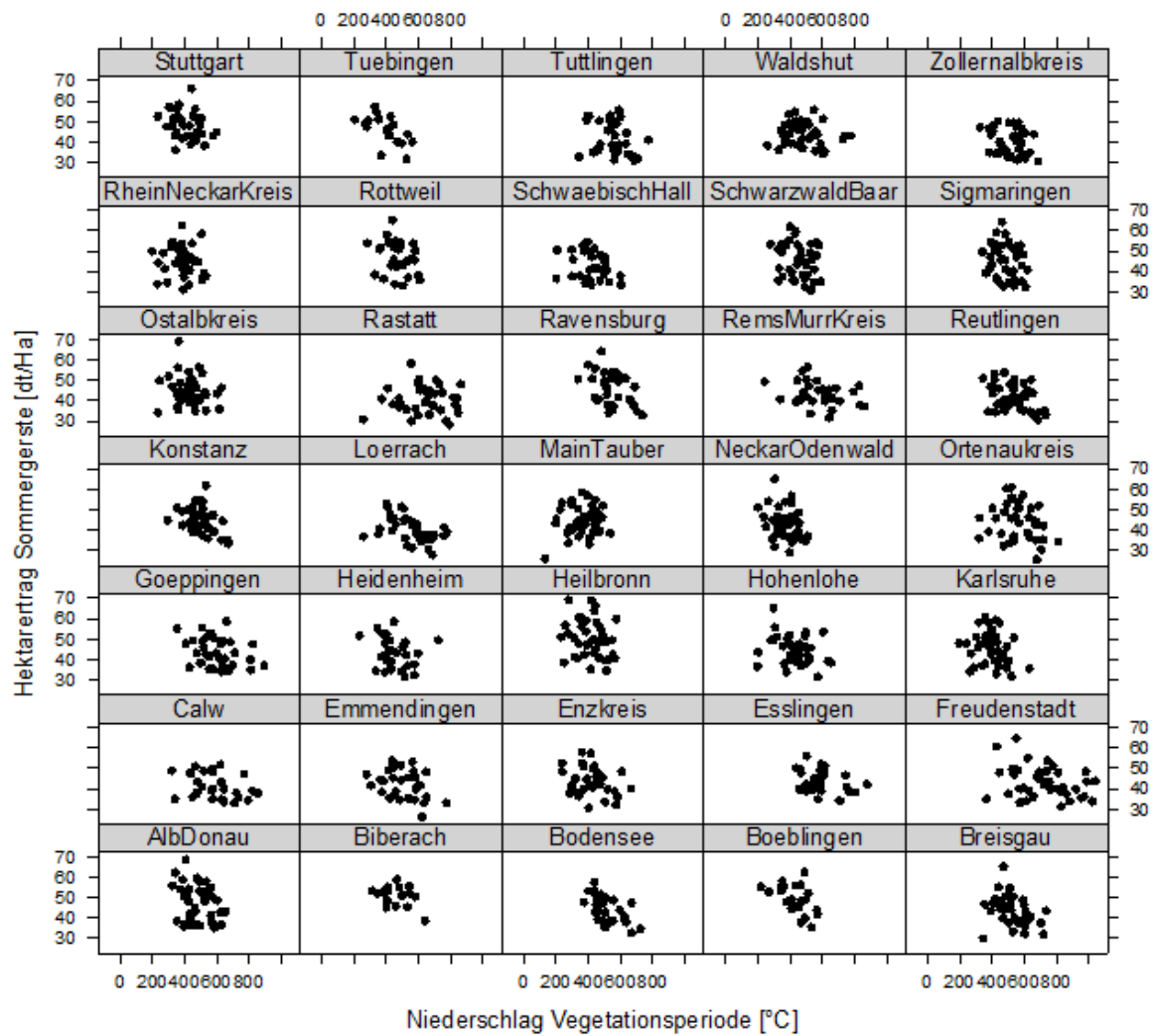


Abb. 4.6. Ertrag von Sommergerste in Abhängigkeit von Niederschlagssummen während der Vegetationsperiode (März-August) in den einzelnen Landkreisen.

Tabelle 4.6. Ergebnisse der linearen Regression zwischen Hektarerträgen von Sommergerste mit Niederschlag während der Vegetationsperiode in den einzelnen Landkreisen

Landkreis	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	P	t	DF	R <sup>2</sup>
Alb-Donau-Kreis	-0,02	57,99	0,19	-1,30	38	0,01
Biberach	-0,02	60,33	0,14	-1,54	15	0,07
<b>Böblingen **</b>	<b>-0,03</b>	<b>66,47</b>	<b>0,01</b>	<b>-2,64</b>	<b>20</b>	<b>0,22</b>
<b>Bodensee ***</b>	<b>-0,04</b>	<b>65,13</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>-3,69</b>	<b>27</b>	<b>0,31</b>
<b>Breisgau *</b>	<b>-0,02</b>	<b>57,59</b>	<b>0,02</b>	<b>-2,36</b>	<b>36</b>	<b>0,11</b>
Calw	-0,01	49,31	0,09	-1,71	26	0,06
Emmendingen	-0,02	52,68	0,07	-1,85	29	0,07
Enzkreis	-0,01	50,80	0,15	-1,47	30	0,03
Esslingen	-0,01	52,14	0,11	-1,65	27	0,05
Freudenstadt	-0,01	52,25	0,07	-1,85	38	0,05
Göppingen	-0,01	55,25	0,06	-1,93	35	0,07
Heidenheim	-0,01	51,24	0,24	-1,19	27	0,01
Heilbronn	-0,01	56,86	0,31	-1,01	36	<0,01
Hohenlohe	-0,01	52,20	0,09	-1,73	38	0,04
Karlsruhe	-0,02	53,37	0,15	-1,44	38	0,02
<b>Konstanz **</b>	<b>-0,03</b>	<b>60,52</b>	<b>0,007</b>	<b>-2,80</b>	<b>37</b>	<b>0,15</b>
<b>Lörrach **</b>	<b>-0,02</b>	<b>52,62</b>	<b>0,007</b>	<b>-2,85</b>	<b>34</b>	<b>0,16</b>
Main-Tauber-Kreis	0,008	41,30	0,48	0,70	38	<0,01
Neckar-Odenwald-Kreis	-0,02	53,45	0,10	-1,65	37	0,04
Ortenaukreis	-0,01	53,42	0,20	-1,30	36	0,01
Ostalbkreis	-0,01	49,76	0,39	-0,86	38	<0,01
Rastatt	0,0008	40,07	0,91	0,11	35	<0,01
<b>Ravensburg *</b>	<b>-0,03</b>	<b>64,47</b>	<b>0,02</b>	<b>-2,40</b>	<b>32</b>	<b>0,12</b>
Rems-Murr-Kreis	-0,01	50,11	0,11	-1,61	29	0,05
<b>Reutlingen **</b>	<b>-0,02</b>	<b>55,26</b>	<b>0,01</b>	<b>-2,66</b>	<b>38</b>	<b>0,13</b>
Rhein-Neckar-Kreis	-0,009	48,76	0,51	-0,65	36	<0,01
Rottweil	-0,02	57,97	0,18	-1,37	28	0,02
Schwäbisch Hall	-0,01	49,54	0,18	-1,35	27	0,02
Schwarzwald-Baar-Kreis	-0,01	53,46	0,31	-1,03	37	<0,01
Sigmaringen	-0,01	53,36	0,33	-0,98	38	<0,01
Stuttgart	-0,01	57,26	0,08	-1,77	34	0,05
Tübingen	-0,04	62,14	0,008	-2,99	16	0,31
Tuttlingen	-0,01	50,01	0,28	-1,09	31	<0,01
Waldshut	-0,004	45,96	0,57	-0,57	37	<0,01
Zollernalbkreis	-0,01	47,73	0,22	-1,22	37	0,01

### 4.3.4 Kartoffeln und Zuckerrüben

Es gab nur sechs von 35 Landkreisen, in denen eine positive Korrelation zwischen dem Ertrag von Kartoffeln und Temperaturen während der Vegetationsperiode hergestellt werden konnte (Abb. 4.7. und Tabelle 4.7.), allerdings war der Ertrag von Kartoffeln nur in einem Landkreis (Ortenaukreis, Abb. 4.8., Tabelle 4.8.) mit Niederschlägen in derselben Zeit signifikant korreliert.

Zuckerrübenenerträge waren ebenfalls in sechs Landkreisen positiv mit Temperaturen während der Vegetationsperiode korreliert (Abb. 4.9., Tabelle 4.9.). Dies waren allerdings andere Landkreise als diejenigen, in denen die positive Korrelation zwischen Temperatur und Kartoffelerträgen gefunden wurde. Es gab keine signifikanten Korrelationen zwischen Zuckerrübenenerträgen und Niederschlägen in der Vegetationsperiode (Abb. 4.10., Tabelle 4.10.).

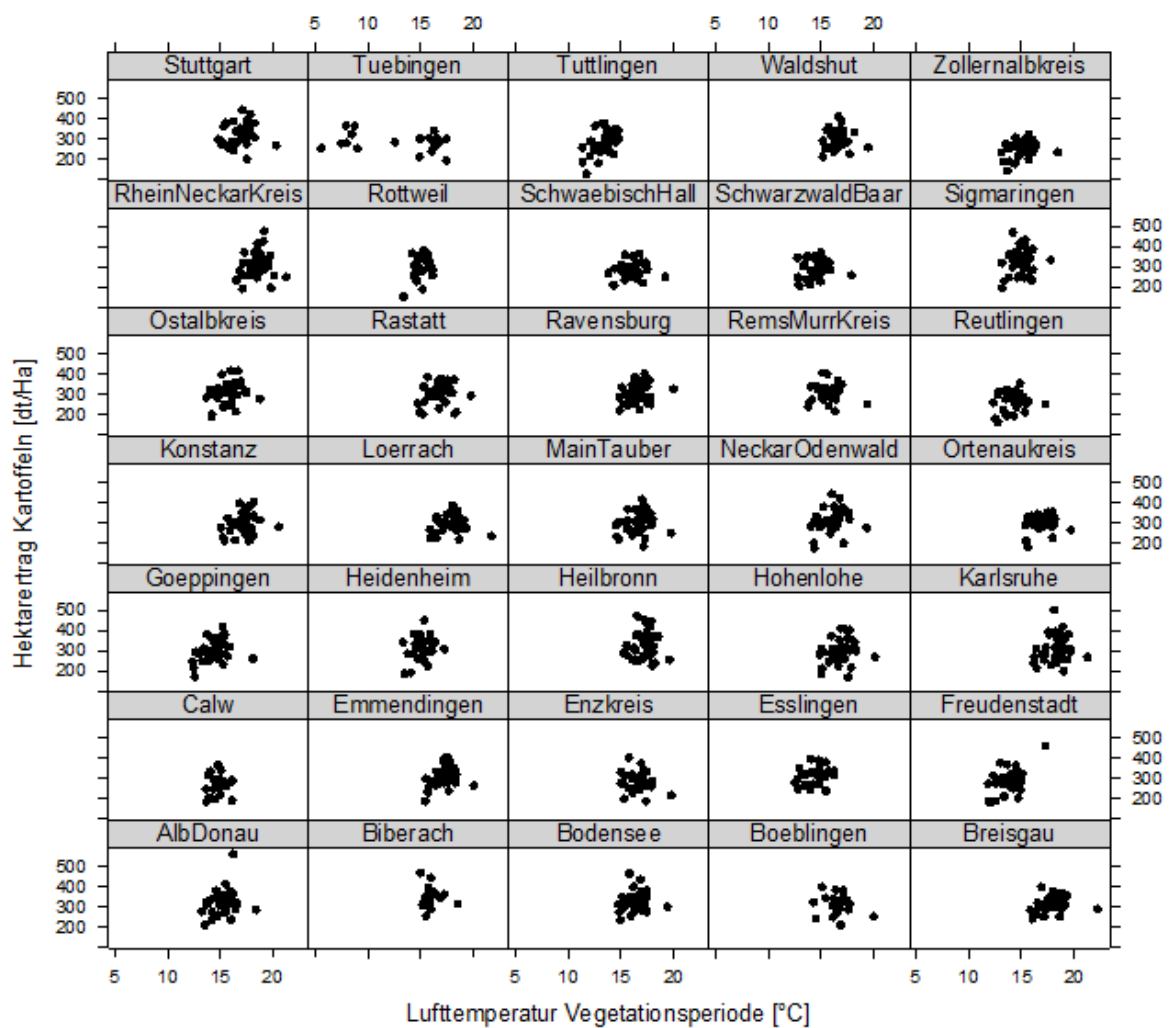


Abb. 4.7. Ertrag von Kartoffeln in Abhängigkeit von mittlerer Temperatur während der Vegetationsperiode (Mai-August) in den einzelnen Landkreisen.

Tabelle 4.7. Ergebnisse der linearen Regression zwischen Hektarerträgen von Kartoffeln mit mittlerer Temperatur in der Vegetationsperiode in den einzelnen Landkreisen

Landkreis	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	P	t	DF	R <sup>2</sup>
Alb-Donau-Kreis	16,42	66,75	0,09	1,70	38	0,04
Biberach	-7,07	463,42	0,65	-0,45	15	<0,01
Böblingen	-8,11	441,28	0,36	-0,92	20	<0,01
Bodensee	6,07	228,85	0,54	0,62	27	<0,01
Breisgau	6,60	196,01	0,21	1,25	35	0,01
Calw	5,13	195,83	0,67	0,42	26	<0,01
<b>Emmendingen *</b>	<b>17,19</b>	<b>9,96</b>	<b>0,04</b>	<b>2,10</b>	<b>32</b>	<b>0,09</b>
Enzkreis	-8,63	432,61	0,30	-1,04	30	<0,01
Esslingen	9,65	175,79	0,19	1,33	27	0,02
<b>Freudenstadt ***</b>	<b>26,58</b>	<b>-79,76</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>3,66</b>	<b>37</b>	<b>0,24</b>
<b>Göppingen *</b>	<b>16,04</b>	<b>71,37</b>	<b>0,03</b>	<b>2,13</b>	<b>36</b>	<b>0,08</b>
Heidenheim	15,31	85,42	0,20	1,28	29	0,02
Heilbronn	6,92	215,82	0,51	0,66	38	<0,01
Hohenlohe	11,63	99,82	0,16	1,40	36	0,02
Karlsruhe	9,39	138,97	0,32	0,99	37	<0,01
Konstanz	11,71	100,22	0,12	1,55	35	0,03
Lörrach	0,79	281,55	0,89	0,13	35	<0,01
Main-Tauber-Kreis	8,85	155,51	0,26	1,13	38	<0,01
Neckar-Odenwald-Kreis	13,84	90,13	0,10	1,68	36	0,04
Ortenaukreis	6,48	191,83	0,33	0,98	36	<0,01
Ostalbkreis	13,09	105,99	0,11	1,62	36	0,04
Rastatt	7,24	188,00	0,35	0,93	36	<0,01
<b>Ravensburg *</b>	<b>15,00</b>	<b>61,99</b>	<b>0,05</b>	<b>1,98</b>	<b>36</b>	<b>0,07</b>
Rems-Murr-Kreis	0,67	301,15	0,92	0,09	29	<0,01
Reutlingen	6,47	177,99	0,36	0,91	38	<0,01
Rhein-Neckar-Kreis	7,62	169,99	0,45	0,76	37	<0,01
<b>Rottweil *</b>	<b>30,00</b>	<b>-155,27</b>	<b>0,04</b>	<b>2,13</b>	<b>27</b>	<b>0,11</b>
Schwäbisch Hall	5,78	192,21	0,36	0,92	29	<0,01
Schwarzwald-Baar-Kreis	7,64	187,55	0,31	1,02	35	<0,01
Sigmaringen	10,49	175,03	0,33	0,97	38	<0,01
Stuttgart	4,57	242,39	0,58	0,55	34	<0,01
Tübingen	-2,46	317,57	0,32	-1,01	18	<0,01
Tuttlingen	0,08	282,01	0,72	0,35	34	<0,01
Waldshut	0,11	304,34	0,99	0,01	36	<0,01
<b>Zollernalbkreis *</b>	<b>10,79</b>	<b>86,28</b>	<b>0,05</b>	<b>1,98</b>	<b>36</b>	<b>0,07</b>

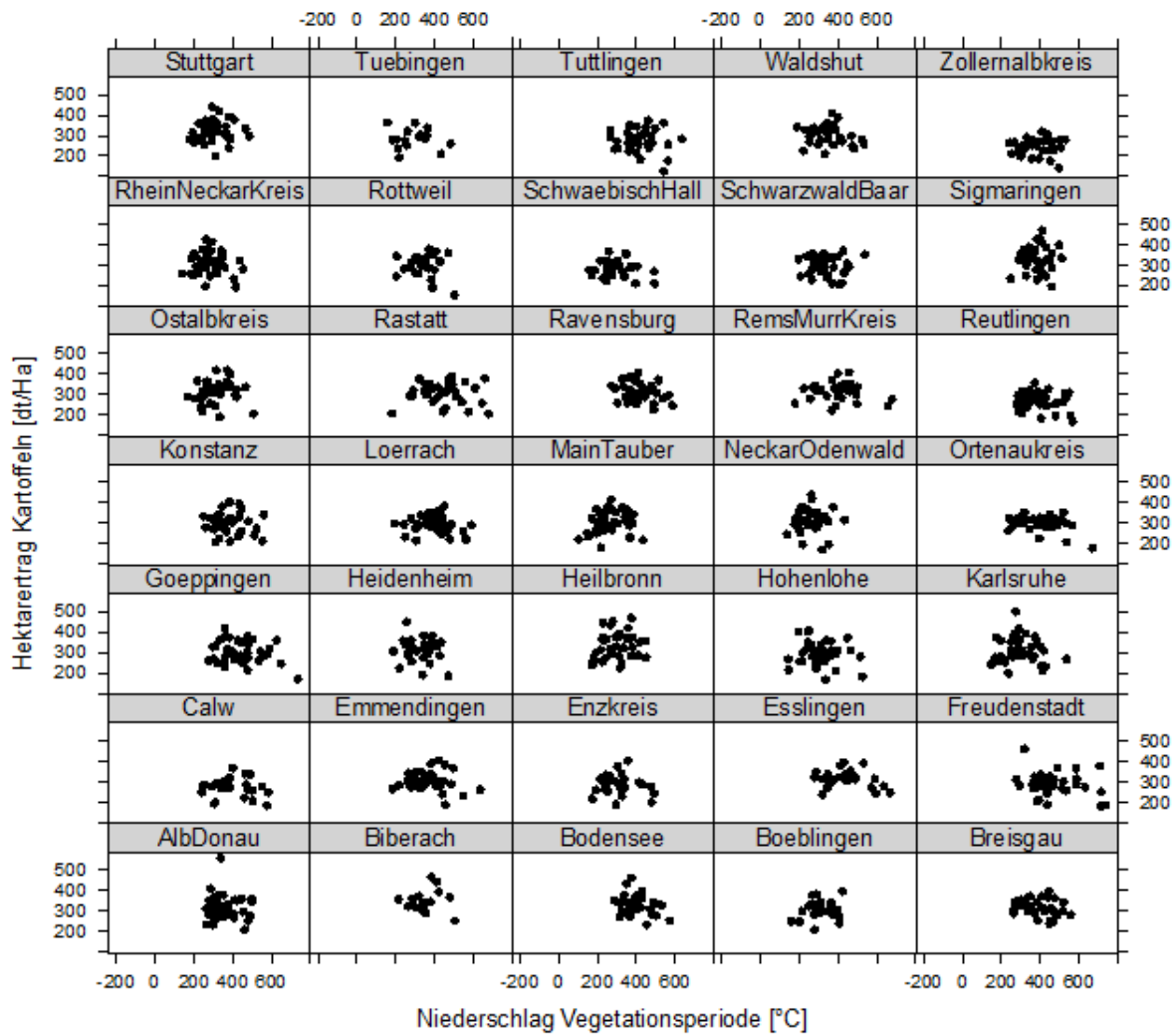


Abb. 4.8. Ertrag von Kartoffeln in Abhängigkeit von Niederschlagssummen während der Vegetationsperiode (Mai-August) in den einzelnen Landkreisen.

Tabelle 4.8. Ergebnisse der linearen Regression zwischen Hektarerträgen von Kartoffeln mit Niederschlag während der Vegetationsperiode in den einzelnen Landkreisen

Landkreis	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	P	t	DF	R <sup>2</sup>
Alb-Donau-Kreis	-0,05	338,07	0,68	-0,41	38	<0,01
Biberach	0,02	343,00	0,91	0,11	15	<0,01
Böblingen	0,11	271,16	0,43	0,79	20	<0,01
Bodensee	-0,18	401,17	0,18	-1,37	27	0,03
Breisgau	-0,07	345,89	0,33	-0,98	34	<0,01
Calw	-0,04	290,15	0,58	-0,55	26	<0,01
Emmendingen	-0,03	320,05	0,72	-0,35	31	<0,01
Enzkreis	-0,06	308,26	0,52	-0,64	30	<0,01
Esslingen	-0,07	350,31	0,28	-1,09	27	<0,01
Freudenstadt	-0,07	327,78	0,31	-1,01	38	<0,01
Göppingen	-0,11	350,28	0,18	-1,34	35	0,02
Heidenheim	-0,10	346,29	0,51	-0,66	27	<0,01
Heilbronn	0,18	279,18	0,15	1,44	38	0,02
Hohenlohe	-0,07	319,79	0,46	-0,73	36	<0,01
Karlsruhe	-0,03	320,78	0,77	-0,28	37	<0,01
Konstanz	-0,05	323,71	0,58	-0,55	35	<0,01
Lörrach	-0,05	318,10	0,46	-0,74	35	<0,01
Main-Tauber-Kreis	0,15	261,82	0,15	1,45	38	0,02
Neckar-Odenwald-Kreis	0,02	305,91	0,85	0,18	36	<0,01
<b>Ortenaukreis *</b>	<b>-0,13</b>	<b>356,99</b>	<b>0,02</b>	<b>-2,33</b>	<b>36</b>	<b>0,10</b>
Ostalbkreis	0,05	294,02	0,60	0,51	36	<0,01
Rastatt	0,003	307,40	0,96	0,05	35	<0,01
Ravensburg	-0,11	361,84	0,28	-1,10	31	<0,01
Rems-Murr-Kreis	-0,01	319,31	0,79	-0,25	29	<0,01
Reutlingen	-0,07	300,10	0,33	-0,98	38	<0,01
Rhein-Neckar-Kreis	-0,07	328,80	0,52	-0,63	36	<0,01
Rottweil	-0,05	320,08	0,69	-0,40	26	<0,01
Schwäbisch Hall	-0,06	305,22	0,43	-0,78	28	<0,01
Schwarzwald-Baar-Kreis	-0,03	309,21	0,74	-0,33	34	<0,01
Sigmaringen	-0,0001	331,36	0,99	-0,001	38	<0,01
Stuttgart	0,12	282,04	0,29	1,06	34	<0,01
Tübingen	-0,04	299,62	0,75	-0,32	16	<0,01
Tuttlingen	-0,06	302,40	0,58	-0,54	30	<0,01
Waldshut	-0,10	344,47	0,21	-1,25	35	<0,01
Zollernalbkreis	0,0007	249,3	0,99	0,01	36	<0,01



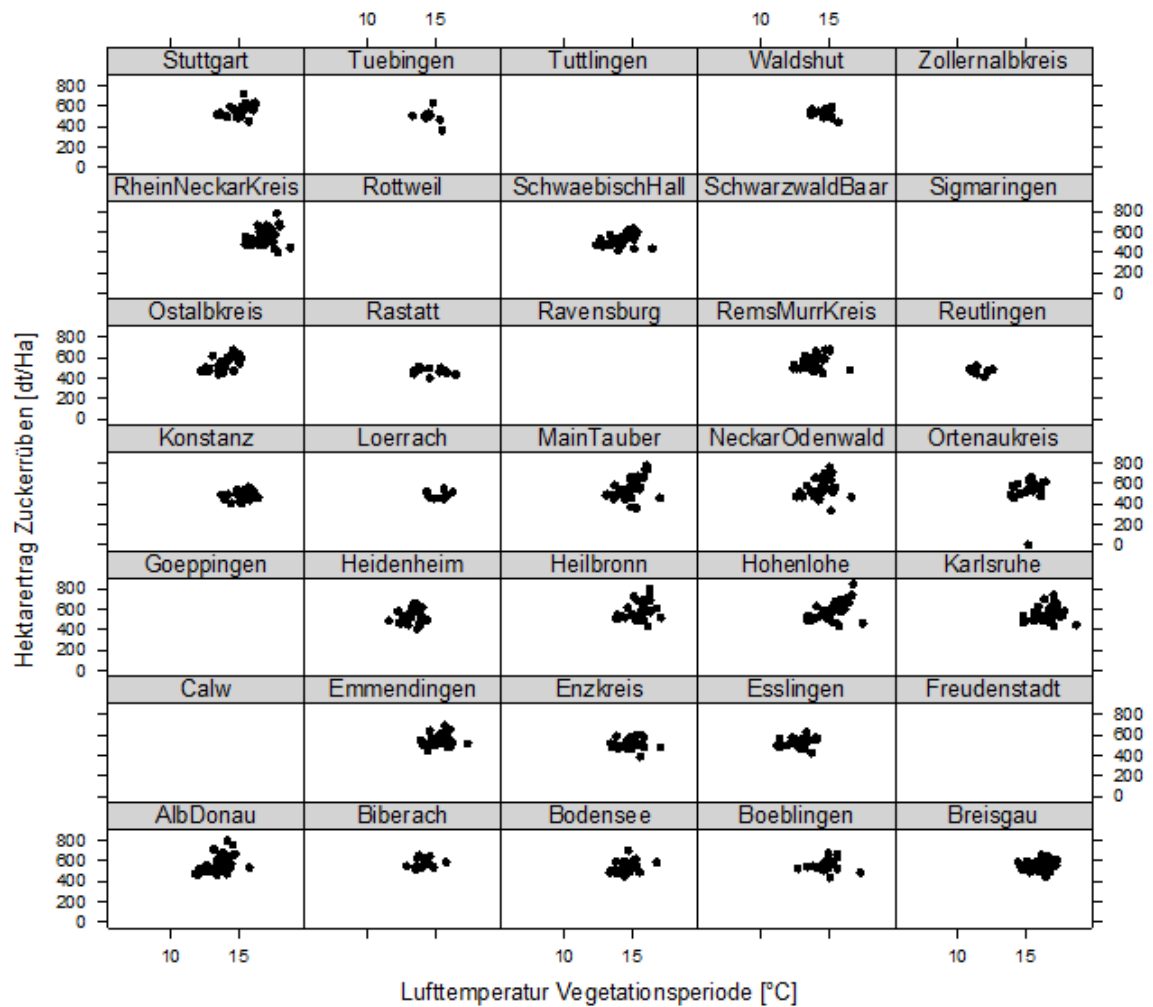


Abb. 4.9. Ertrag von Zuckerrüben in Abhängigkeit von mittlerer Temperatur während der Vegetationsperiode (April-September) in den einzelnen Landkreisen.

Tabelle 4.9. Ergebnisse der linearen Regression zwischen Hektarerträgen von Zuckerrüben mit mittlerer Temperatur in der Vegetationsperiode in den einzelnen Landkreisen

Landkreis	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	P	t	DF	R <sup>2</sup>
<b>Alb-Donau-Kreis ***</b>	<b>49,15</b>	<b>-106,35</b>	<b>0,001</b>	<b>3,35</b>	<b>38</b>	<b>0,20</b>
Biberach	22,33	257,61	0,22	1,26	15	0,03
Böblingen	4,29	489,29	0,75	0,31	20	<0,01
Bodensee	25,17	164,52	0,06	1,94	27	0,08
Breisgau	10,46	388,26	0,39	0,87	30	<0,01
Calw	-	-	-	-	-	-
Emmendingen	12,65	355,49	0,41	0,83	26	<0,01
Enzkreis	4,95	442,08	0,66	0,43	29	<0,01
Esslingen	13,44	353,95	0,16	1,42	27	0,03
Freudenstadt	-	-	-	-	-	-
Göppingen	-	-	-	-	-	-
Heidenheim	17,77	290,14	0,35	0,93	29	<0,01
<b>Heilbronn **</b>	<b>41,44</b>	<b>-54,70</b>	<b>0,01</b>	<b>2,59</b>	<b>37</b>	<b>0,13</b>
<b>Hohenlohe ***</b>	<b>45,34</b>	<b>-105,63</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>3,60</b>	<b>38</b>	<b>0,23</b>
Karlsruhe	16,82	269,30	0,19	1,30	38	0,01
Konstanz	10,72	317,39	0,33	0,97	26	<0,01
Lörrach	5,44	402,44	0,77	0,29	8	<0,01
<b>Main-Tauber-Kreis **</b>	<b>50,31</b>	<b>-196,31</b>	<b>0,002</b>	<b>3,20</b>	<b>38</b>	<b>0,19</b>
Neckar-Odenwald-Kreis	30,12	118,39	0,06	1,92	37	0,06
Ortenaukreis	27,03	126,07	0,48	0,71	21	<0,01
<b>Ostalbkreis ***</b>	<b>43,39</b>	<b>-67,00</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>3,78</b>	<b>29</b>	<b>0,30</b>
Rastatt	-7,38	576,13	0,45	-0,77	10	<0,01
Ravensburg	-	-	-	-	-	-
Rems-Murr-Kreis	21,28	258,54	0,11	1,63	29	0,05
Reutlingen	-2,42	497,55	0,88	-0,14	8	<0,01
Rhein-Neckar-Kreis	23,38	153,95	0,16	1,40	36	0,02
Rottweil	-	-	-	-	-	-
Schwäbisch Hall	17,13	274,48	0,13	1,54	29	0,03
Schwarzwald-Baar-Kreis	-	-	-	-	-	-
Sigmaringen	-	-	-	-	-	-
<b>Stuttgart **</b>	<b>35,99</b>	<b>14,35</b>	<b>0,003</b>	<b>3,11</b>	<b>31</b>	<b>0,21</b>
Tübingen	-36,89	1037,87	0,26	-1,17	10	0,03
Tuttlingen	-	-	-	-	-	-
Waldshut	-16,41	767,33	0,32	-1,02	14	<0,01
Zollernalbkreis	-	-	-	-	-	-

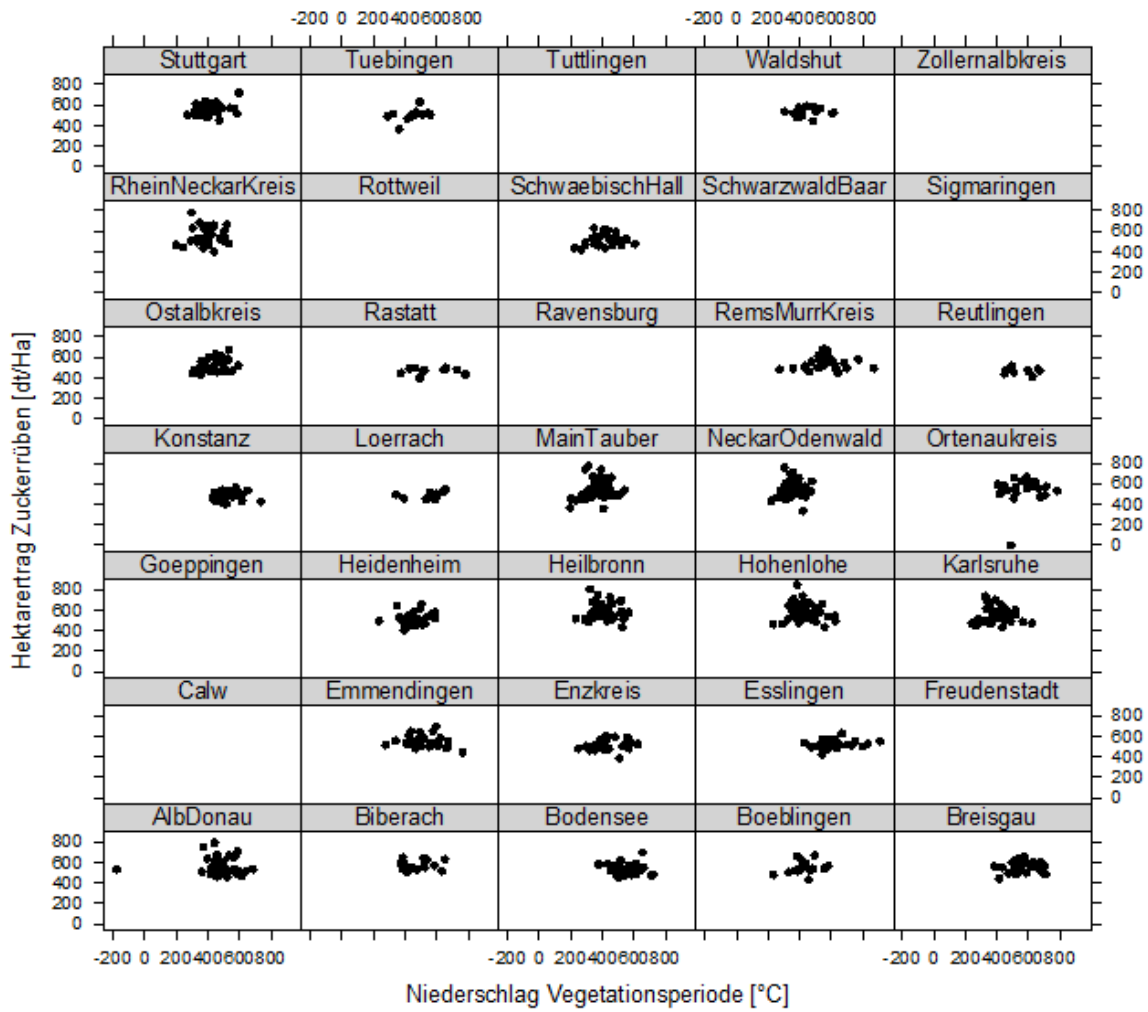


Abb. 4.10. Ergebnisse der linearen Regression zwischen Hektarerträgen von Zuckerrüben mit Niederschlagssummen in der Vegetationsperiode (April-September) in den einzelnen Landkreisen

Tabelle 4.10. Ergebnisse der linearen Regression zwischen Hektarerträgen von Zuckerrüben mit Niederschlag während der Vegetationsperiode in den einzelnen Landkreisen

Landkreis	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>DF</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
Alb-Donau-Kreis	-0,01	563,84	0,92	-0,09	38	<0,01
Biberach	0,11	514,42	0,38	0,89	15	<0,01
Böblingen	0,15	484,21	0,31	1,03	20	<0,01
Bodensee	-0,05	564,64	0,62	-0,49	27	<0,01
Breisgau	0,08	507,83	0,41	0,82	30	<0,01
Calw	-	-	-	-	-	-
Emmendingen	-0,08	592,13	0,43	-0,79	25	<0,01
Enzkreis	0,09	474,93	0,32	0,99	29	<0,01
Esslingen	0,08	476,06	0,26	1,12	27	<0,01
Freudenstadt	-	-	-	-	-	-
Göppingen	-	-	-	-	-	-
Heidenheim	0,14	452,85	0,34	0,95	27	<0,01
Heilbronn	0,0003	586,8	0,99	0,002	37	<0,01
Hohenlohe	-0,10	629,42	0,51	-0,65	38	<0,01
Karlsruhe	0,02	537,77	0,85	0,17	38	<0,01
Konstanz	0,04	454,82	0,67	0,43	25	<0,01
Lörrach	0,14	409,76	0,24	1,26	8	0,06
Main-Tauber-Kreis	0,30	436,91	0,11	1,61	38	0,03
Neckar-Odenwald-Kreis	0,14	498,09	0,53	0,63	37	<0,01
Ortenaukreis	0,16	443,33	0,53	0,63	21	<0,01
Ostalbkreis	0,22	435,54	0,14	1,48	29	0,03
Rastatt	-0,02	475,83	0,77	-0,29	9	<0,01
Ravensburg	-	-	-	-	-	-
Rems-Murr-Kreis	0,05	525,18	0,60	0,52	29	<0,01
Reutlingen	-0,04	492,34	0,71	-0,38	8	<0,01
Rhein-Neckar-Kreis	0,06	523,74	0,73	0,34	36	<0,01
Rottweil	-	-	-	-	-	-
Schwäbisch Hall	0,12	467,11	0,31	1,02	28	<0,01
Schwarzwald-Baar-Kreis	-	-	-	-	-	-
Sigmaringen	-	-	-	-	-	-
Stuttgart	0,21	467,28	0,09	1,72	31	0,05
Tübingen	0,28	375,81	0,18	1,41	10	0,08
Tuttlingen	-	-	-	-	-	-
Waldshut	0,04	507,84	0,72	0,36	14	<0,01
Zollernalbkreis	-	-	-	-	-	-

### 4.3.5 Silo- und Körnermais

Der Silomais-Hektarertrag war nur in drei Landkreisen (Böblingen, Göppingen und Neckar-Odenwald-Kreis) signifikant mit den Temperaturen während der Vegetationsperiode korreliert (Abb. 4.11. und Tabelle 4.11.). Silomais war allerdings die erste betrachtete Kultur, bei der die überwiegende Anzahl der signifikanten Korrelationen mit Temperatur negativ waren (also Ertragsverluste in Jahren mit höherer Temperatur; in Böblingen und im Neckar-Odenwald-Kreis). Ebenso gab es zwei Landkreise, in denen Silomaiserträge signifikant mit Niederschlag korreliert waren (Main-Tauber-Kreis und Tübingen, Abb. 4.12. und Tabelle 4.12). In beiden Fällen war die Korrelation mit Niederschlag positiv (höhere Erträge bei höheren Niederschlägen), also ebenfalls ein Ergebnis, das zu den bisher diskutierten Kulturarten gegenläufig ist.

In 22 von den 27 Landkreisen, für die Daten für den Ertrag von Körnermais vorliegen, waren diese signifikant und positiv mit der Temperatur in der Vegetationsperiode korreliert (Abb. 4.13 und Tabelle 4.13). Im Gegensatz dazu gab es nur im Hohenlohekreis und im Ostalbkreis eine signifikante Korrelation von Körnermaiserträgen mit Niederschlägen (Abb. 4.14. und Tabelle 4.14), und zwar eine positive und eine negative, es konnte hier also kein konsistenter Zusammenhang von Ertrag und Niederschlag gefunden werden.

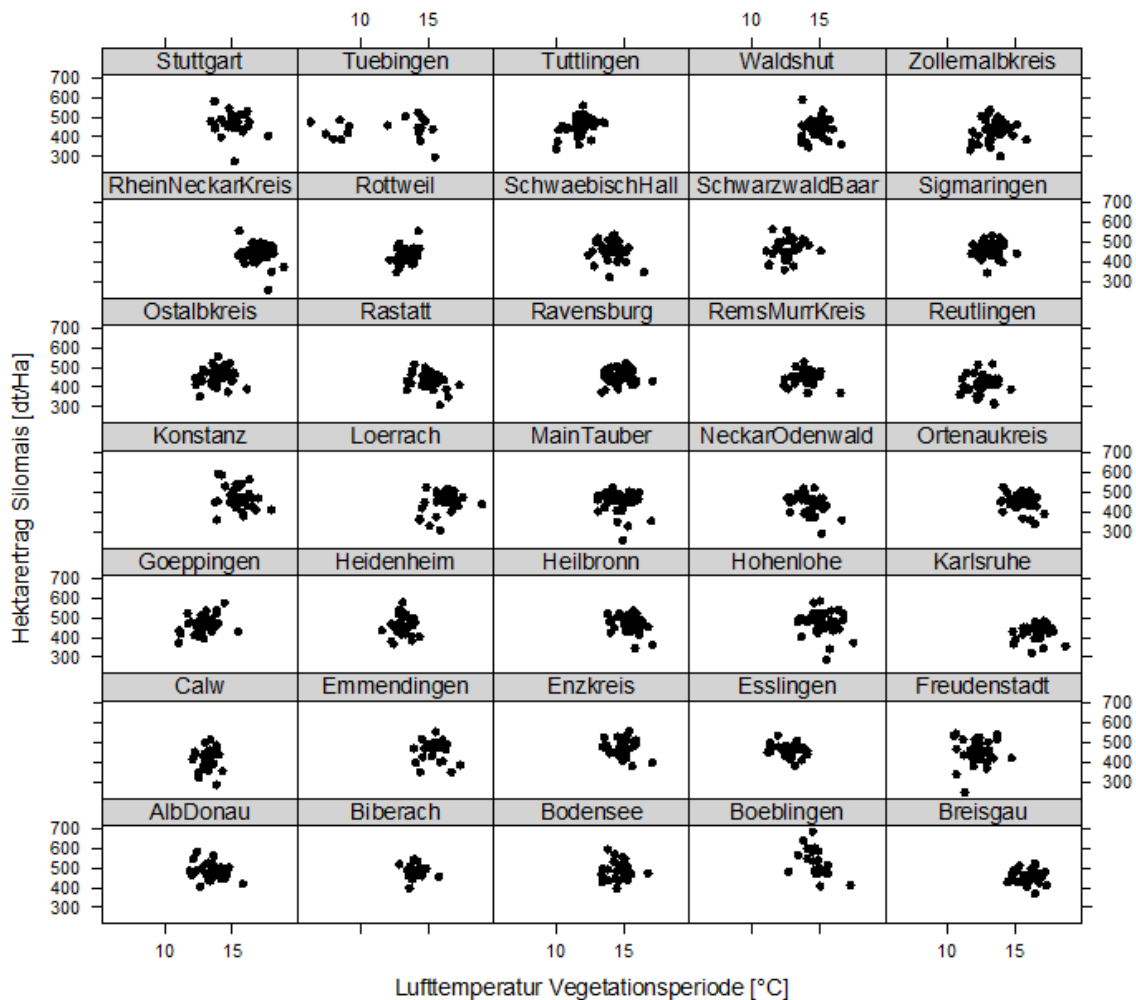


Abb. 4.11. Ertrag von Silomais in Abhängigkeit von mittlerer Temperatur während der Vegetationsperiode (April-September) in den einzelnen Landkreisen.

Tabelle 4.11. Ergebnisse der linearen Regression zwischen Hektarerträgen von Silomais mit mittlerer Temperatur in der Vegetationsperiode in den einzelnen Landkreisen

Landkreis	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	P	t	DF	R <sup>2</sup>
Alb-Donau-Kreis	-13,02	659,00	0,06	-1,88	38	0,06
Biberach	-5,63	560,10	0,69	-0,40	15	<0,01
<b>Böblingen *</b>	<b>-37,58</b>	<b>1079,49</b>	<b>0,02</b>	<b>-2,49</b>	<b>20</b>	<b>0,19</b>
Bodensee	3,23	438,72	0,78	0,27	27	<0,01
Breisgau	2,82	414,30	0,71	0,36	34	<0,01
Calw	8,15	310,94	0,66	0,43	26	<0,01
Emmendingen	-4,77	539,25	0,67	-0,42	31	<0,01
Enzkreis	-8,20	598,16	0,40	-0,84	29	<0,01
Esslingen	-11,09	603,88	0,11	-1,64	27	0,05
Freudenstadt	3,56	410,20	0,74	0,33	37	<0,01
<b>Göppingen **</b>	<b>19,68</b>	<b>208,47</b>	<b>0,009</b>	<b>2,72</b>	<b>37</b>	<b>0,14</b>
Heidenheim	4,67	397,84	0,74	0,33	29	<0,01
Heilbronn	-14,44	693,22	0,07	-1,83	37	0,05
Hohenlohe	-9,77	621,02	0,30	-1,04	38	<0,01
Karlsruhe	2,19	395,25	0,75	0,31	36	<0,01
Konstanz	-12,90	669,33	0,18	-1,33	37	0,02
Lörrach	15,88	196,18	0,08	1,79	35	0,05
Main-Tauber-Kreis	-4,38	516,28	0,64	-0,46	38	<0,01
<b>Neckar-Odenwald-Kreis *</b>	<b>-16,94</b>	<b>684,06</b>	<b>0,03</b>	<b>-2,15</b>	<b>37</b>	<b>0,08</b>
Ortenaukreis	-15,49	692,01	0,07	-1,85	37	0,06
Ostalbkreis	6,28	367,43	0,41	0,82	38	<0,01
Rastatt	-11,74	615,31	0,12	-1,56	36	0,03
Ravensburg	4,51	383,45	0,51	0,66	38	<0,01
Rems-Murr-Kreis	-2,64	488,47	0,73	-0,33	29	<0,01
Reutlingen	3,08	371,59	0,72	0,34	38	<0,01
Rhein-Neckar-Kreis	-16,68	720,80	0,09	-1,72	36	0,05
Rottweil	19,73	168,35	0,14	1,49	29	0,03
Schwäbisch Hall	-9,66	593,99	0,35	-0,93	29	<0,01
Schwarzwald-Baar-Kreis	12,32	306,72	0,19	1,31	35	0,01
Sigmaringen	-4,99	526,70	0,55	-0,58	38	<0,01
Stuttgart	-9,32	610,28	0,41	-0,83	27	<0,01
Tübingen	0,80	432,69	0,83	0,20	18	<0,01
Tuttlingen	0,47	447,66	0,09	1,70	36	0,04
Waldshut	-3,84	501,77	0,74	-0,33	38	<0,01
Zollernalbkreis	11,77	271,13	0,18	1,35	38	0,02

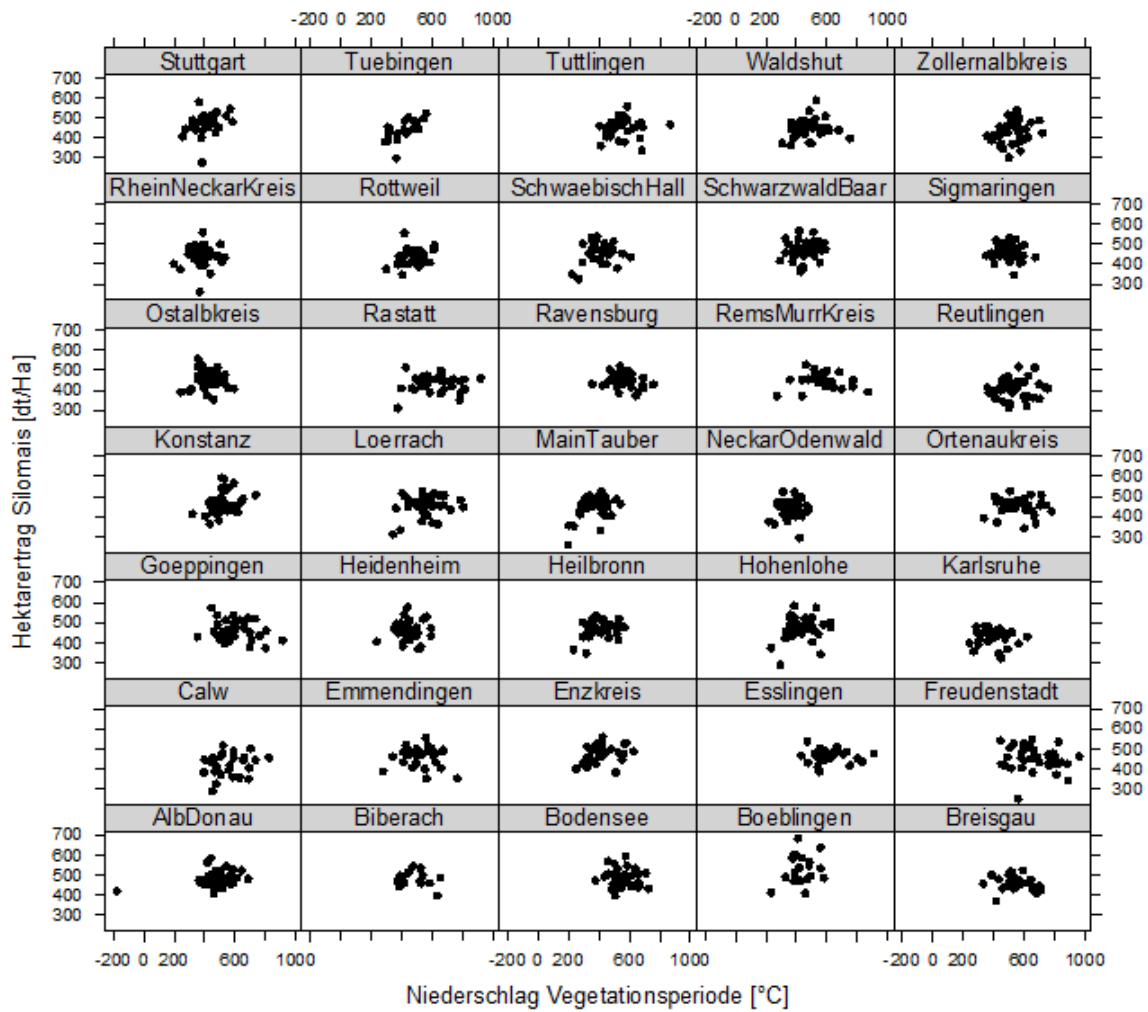


Abb. 4.12. Ertrag von Silomais in Abhängigkeit von Niederschlagssummen während der Vegetationsperiode (April-September) in den einzelnen Landkreisen.

Tabelle 4.12. Ergebnisse der linearen Regression zwischen Hektarerträgen von Silomais mit Niederschlag während der Vegetationsperiode in den einzelnen Landkreisen

Landkreis	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	P	t	DF	R <sup>2</sup>
Alb-Donau-Kreis	0,07	447,41	0,10	1,66	38	0,04
Biberach	-0,07	514,62	0,49	-0,69	15	<0,01
Böblingen	0,19	438,17	0,31	1,02	20	<0,01
Bodensee	-0,05	514,60	0,62	-0,50	27	<0,01
Breisgau	-0,10	518,01	0,08	-1,78	34	0,05
Calw	0,09	366,89	0,33	0,99	26	<0,01
Emmendingen	-0,03	480,92	0,70	-0,38	30	<0,01
Enzkreis	0,13	417,08	0,09	1,71	29	0,06
Esslingen	-0,007	466,47	0,89	-0,14	27	<0,01
Freudenstadt	-0,07	504,85	0,29	-1,06	38	<0,01
Göppingen	-0,08	510,55	0,20	-1,28	36	0,01
Heidenheim	0,04	443,06	0,74	0,33	27	<0,01
Heilbronn	0,13	413,84	0,06	1,86	37	0,06
Hohenlohe	0,11	424,92	0,28	1,07	38	<0,01
Karlsruhe	-0,01	439,32	0,79	-0,26	36	<0,01
Konstanz	0,19	369,60	0,07	1,81	37	0,05
Lörrach	0,09	399,27	0,22	1,24	35	0,01
<b>Main-Tauber-Kreis **</b>	<b>0,27</b>	<b>351,50</b>	<b>0,007</b>	<b>2,81</b>	<b>38</b>	<b>0,15</b>
Neckar-Odenwald-Kreis	0,01	436,23	0,90	0,11	37	<0,01
Ortenaukreis	-0,01	460,05	0,84	-0,19	37	<0,01
Ostalbkreis	-0,009	459,50	0,92	-0,10	38	<0,01
Rastatt	0,02	420,81	0,64	0,46	35	<0,01
Ravensburg	-0,06	486,25	0,30	-1,04	33	<0,01
Rems-Murr-Kreis	-0,02	467,96	0,62	-0,49	29	<0,01
Reutlingen	0,01	400,24	0,81	0,24	38	<0,01
Rhein-Neckar-Kreis	0,02	432,01	0,84	0,19	36	<0,01
Rottweil	0,14	363,83	0,16	1,41	28	0,03
Schwäbisch Hall	0,08	422,15	0,44	0,77	28	<0,01
Schwarzwald-Baar-Kreis	0,11	412,99	0,29	1,05	34	<0,01
Sigmaringen	-0,08	505,62	0,33	-0,97	38	<0,01
Stuttgart	0,21	382,70	0,10	1,66	27	0,05
<b>Tübingen **</b>	<b>0,41</b>	<b>268,36</b>	<b>0,002</b>	<b>3,49</b>	<b>16</b>	<b>0,39</b>
Tuttlingen	0,04	427,99	0,60	0,51	32	<0,01
Waldshut	0,07	412,68	0,36	0,92	37	<0,01
Zollernalbkreis	0,14	353,97	0,16	1,42	38	0,02



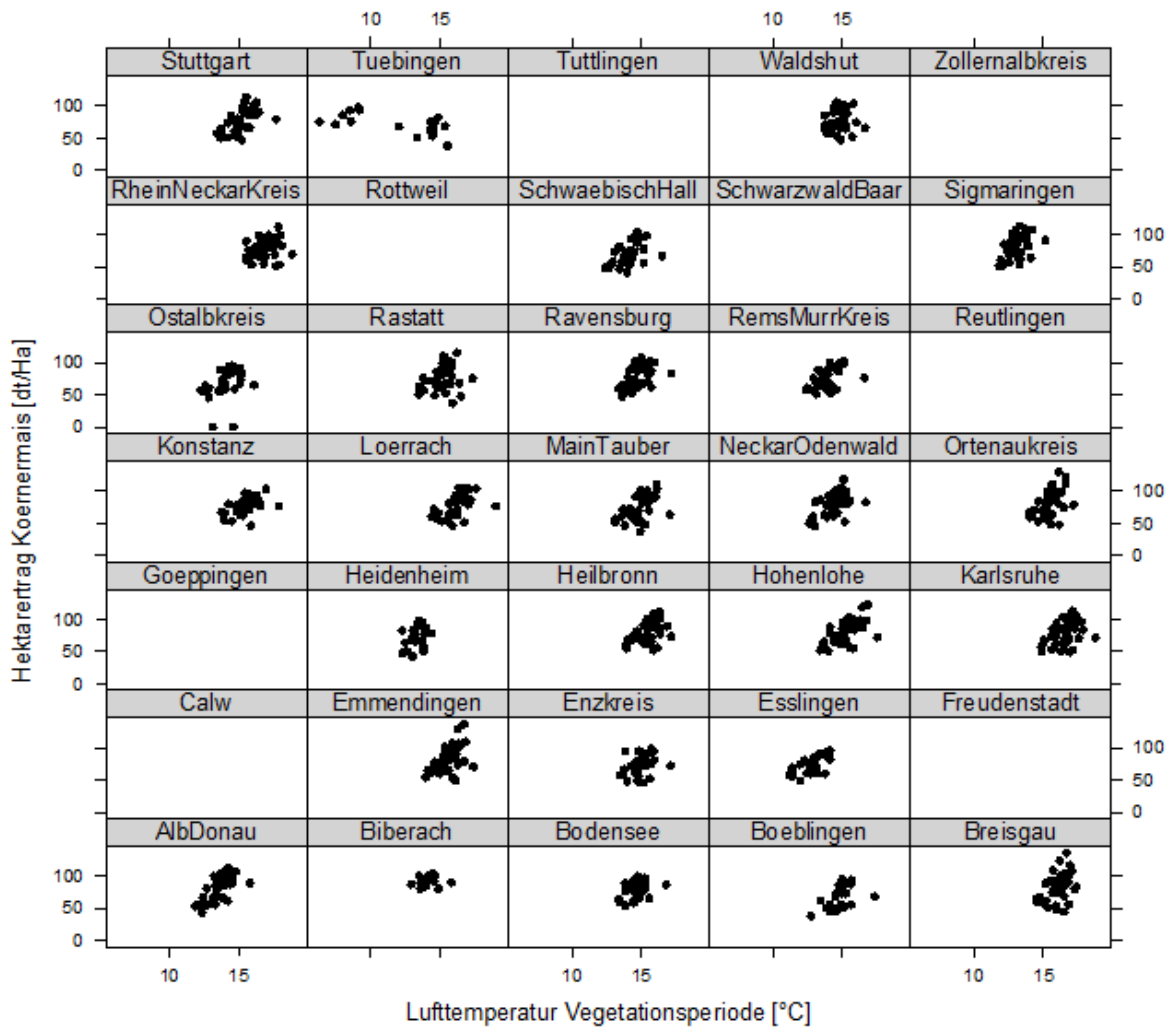


Abb. 4.13. Ertrag von Körnermais in Abhängigkeit von mittlerer Temperatur während der Vegetationsperiode (April-September) in den einzelnen Landkreisen.

Tabelle 4.13. Ergebnisse der linearen Regression zwischen Hektarerträgen von Körnermais mit mittlerer Temperatur in der Vegetationsperiode in den einzelnen Landkreisen

Landkreis	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	P	t	DF	R <sup>2</sup>
<b>Alb-Donau-Kreis ***</b>	<b>15,73</b>	<b>-132,25</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>5,75</b>	<b>39</b>	<b>0,44</b>
Biberach	1,72	67,38	0,55	0,60	15	<0,01
<b>Böblingen *</b>	<b>9,09</b>	<b>-68,04</b>	<b>0,02</b>	<b>2,37</b>	<b>20</b>	<b>0,18</b>
<b>Bodensee **</b>	<b>7,70</b>	<b>-34,63</b>	<b>0,01</b>	<b>2,54</b>	<b>27</b>	<b>0,16</b>
<b>Breisgau **</b>	<b>12,48</b>	<b>-116,89</b>	<b>0,008</b>	<b>2,78</b>	<b>36</b>	<b>0,15</b>
Calw	-	-	-	-	-	-
<b>Emmendingen ***</b>	<b>13,39</b>	<b>-126,50</b>	<b>0,001</b>	<b>3,47</b>	<b>34</b>	<b>0,24</b>
<b>Enzkreis *</b>	<b>6,96</b>	<b>-30,01</b>	<b>0,05</b>	<b>2,00</b>	<b>29</b>	<b>0,09</b>
<b>Esslingen ***</b>	<b>9,99</b>	<b>-54,52</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,27</b>	<b>27</b>	<b>0,38</b>
Freudenstadt	-	-	-	-	-	-
Göppingen	-	-	-	-	-	-
Heidenheim	7,13	-21,69	0,29	1,07	20	<0,01
<b>Heilbronn ***</b>	<b>9,86</b>	<b>-73,02</b>	<b>0,001</b>	<b>3,51</b>	<b>37</b>	<b>0,23</b>
<b>Hohenlohe ***</b>	<b>11,80</b>	<b>-98,03</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,87</b>	<b>38</b>	<b>0,36</b>
<b>Karlsruhe **</b>	<b>9,24</b>	<b>-72,85</b>	<b>0,006</b>	<b>2,90</b>	<b>38</b>	<b>0,16</b>
<b>Konstanz ***</b>	<b>7,32</b>	<b>-36,36</b>	<b>0,001</b>	<b>3,46</b>	<b>35</b>	<b>0,23</b>
<b>Lörrach ***</b>	<b>9,76</b>	<b>-79,16</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>3,70</b>	<b>35</b>	<b>0,26</b>
<b>Main-Tauber-Kreis ***</b>	<b>10,81</b>	<b>-85,44</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>3,59</b>	<b>36</b>	<b>0,24</b>
<b>Neckar-Odenwald-Kreis ***</b>	<b>10,77</b>	<b>-74,46</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>3,96</b>	<b>37</b>	<b>0,27</b>
<b>Ortenaukreis ***</b>	<b>13,48</b>	<b>-126,04</b>	<b>0,001</b>	<b>3,52</b>	<b>38</b>	<b>0,22</b>
<b>Ostalbkreis *</b>	<b>9,53</b>	<b>-65,90</b>	<b>0,02</b>	<b>2,28</b>	<b>32</b>	<b>0,11</b>
Rastatt	6,11	-16,05	0,10	1,65	36	0,04
<b>Ravensburg ***</b>	<b>11,32</b>	<b>-89,50</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>3,81</b>	<b>36</b>	<b>0,26</b>
<b>Rems-Murr-Kreis **</b>	<b>8,75</b>	<b>-44,29</b>	<b>0,005</b>	<b>3,01</b>	<b>29</b>	<b>0,21</b>
Reutlingen	-	-	-	-	-	-
Rhein-Neckar-Kreis	3,84	14,10	0,21	1,26	36	0,01
Rottweil	-	-	-	-	-	-
<b>Schwäbisch Hall **</b>	<b>10,28</b>	<b>-75,80</b>	<b>0,002</b>	<b>3,38</b>	<b>29</b>	<b>0,25</b>
Schwarzwald-Baar-Kreis	-	-	-	-	-	-
<b>Sigmaringen ***</b>	<b>13,30</b>	<b>-92,30</b>	<b>0,001</b>	<b>3,56</b>	<b>36</b>	<b>0,24</b>
<b>Stuttgart ***</b>	<b>12,25</b>	<b>-107,72</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,42</b>	<b>34</b>	<b>0,34</b>
<b>Tübingen **</b>	<b>-3,06</b>	<b>107,92</b>	<b>0,002</b>	<b>-3,45</b>	<b>18</b>	<b>0,36</b>
Tuttlingen	-	-	-	-	-	-
Waldshut	2,90	35,72	0,47	0,71	36	<0,01
Zollernalbkreis	-	-	-	-	-	-

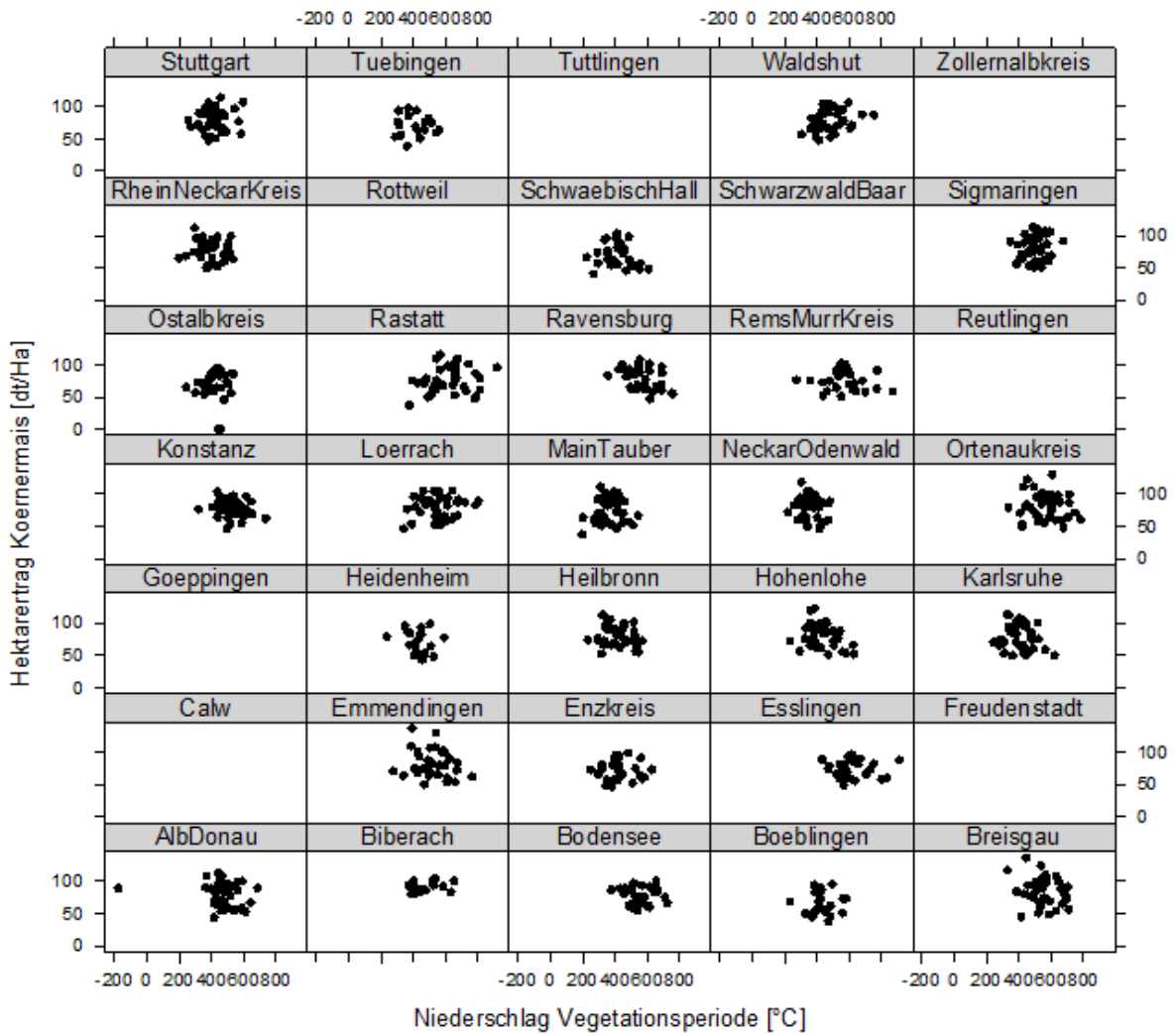


Abb. 4.14. Ertrag von Körnermais in Abhängigkeit von Niederschlagssummen während der Vegetationsperiode (April-September) in den einzelnen Landkreisen.

Tabelle 4.14. Ergebnisse der linearen Regression zwischen Hektarerträgen von Körnermais mit Niederschlag während der Vegetationsperiode in den einzelnen Landkreisen

Landkreis	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	P	t	DF	R <sup>2</sup>
Alb-Donau-Kreis	-0,02	91,19	0,35	-0,93	39	<0,01
Biberach	0,02	79,02	0,21	1,30	15	0,04
Böblingen	0,002	65,19	0,96	0,04	20	<0,01
Bodensee	-0,009	82,96	0,75	-0,32	27	<0,01
Breisgau	-0,04	106,39	0,28	-1,07	36	<0,01
Calw	-	-	-	-	-	-
Emmendingen	-0,02	96,82	0,41	-0,81	33	<0,01
Enzkreis	0,007	70,62	0,82	0,22	29	<0,01
Esslingen	0,003	71,49	0,89	0,13	27	<0,01
Freudenstadt	-	-	-	-	-	-
Göppingen	-	-	-	-	-	-
Heidenheim	-0,04	89,53	0,43	-0,80	18	<0,01
Heilbronn	-0,02	91,54	0,33	-0,97	37	<0,01
<b>Hohenlohe *</b>	<b>-0,06</b>	<b>109,79</b>	<b>0,04</b>	<b>-2,03</b>	<b>38</b>	<b>0,07</b>
Karlsruhe	-0,03	92,56	0,38	-0,87	38	<0,01
Konstanz	-0,02	88,91	0,37	-0,90	35	<0,01
Lörrach	0,01	69,14	0,52	0,64	35	<0,01
Main-Tauber-Kreis	0,02	66,19	0,57	0,57	36	<0,01
Neckar-Odenwald-Kreis	-0,02	89,74	0,55	-0,59	37	<0,01
Ortenaukreis	-0,01	90,70	0,63	-0,48	38	<0,01
<b>Ostalbkreis *</b>	<b>0,04</b>	<b>49,12</b>	<b>0,04</b>	<b>0,82</b>	<b>32</b>	<b>&lt;0,01</b>
Rastatt	0,02	58,79	0,26	1,13	35	<0,01
Ravensburg	-0,06	115,83	0,04	-2,08	31	0,09
Rems-Murr-Kreis	-0,01	85,41	0,56	-0,58	29	<0,01
Reutlingen	-	-	-	-	-	-
Rhein-Neckar-Kreis	-0,008	82,21	0,79	-0,26	36	<0,01
Rottweil	-	-	-	-	-	-
Schwäbisch Hall	-0,03	83,06	0,37	-0,90	28	<0,01
Schwarzwald-Baar-Kreis	-	-	-	-	-	-
Sigmaringen	0,04	60,33	0,34	0,96	36	<0,01
Stuttgart	0,02	66,59	0,46	0,74	34	<0,01
Tübingen	-0,01	75,79	0,78	-0,27	16	<0,01
Tuttlingen	-	-	-	-	-	-
Waldshut	0,04	55,20	0,09	1,72	35	0,05
Zollernalbkreis	-	-	-	-	-	-

### 4.3.6 Winterroggen

In 24 von 31 Landkreisen gab es eine signifikante Korrelation zwischen Winterroggenerträgen und der Temperatur zwischen Oktober des Vorjahres und August (Abb. 4.15., Tabelle 4.15.). Diese Korrelation war, ebenso wie bei den anderen Getreidekulturen, immer positiv. Lediglich in den Kreisen Breisgau-Hochschwarzwald und Konstanz gab es einen signifikanten Zusammenhang zwischen Roggenerträgen und Niederschlägen (jeweils negativ).

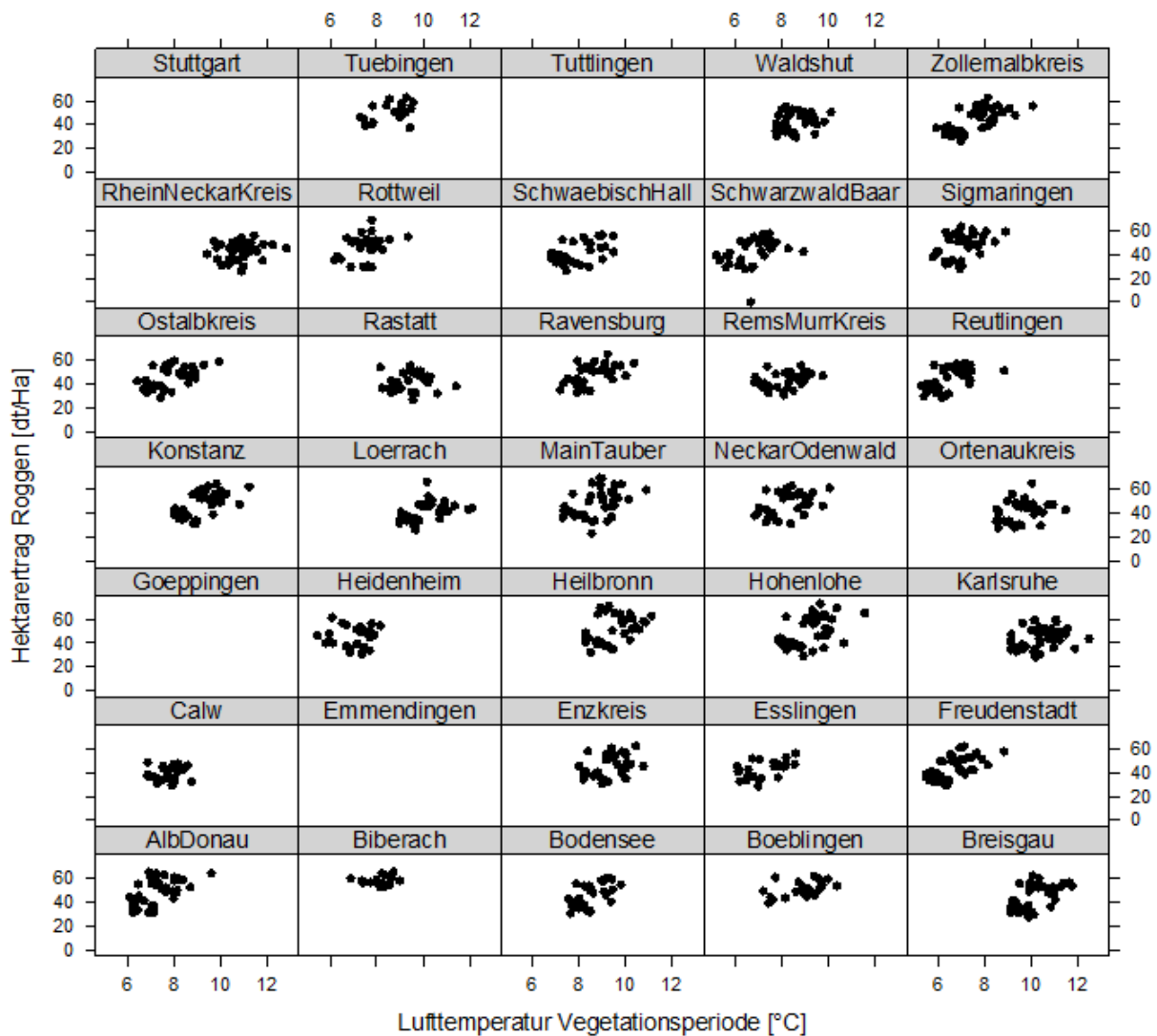


Abb. 4.15. Ertrag von Roggen in Abhängigkeit von der mittleren Temperatur während der im Text definierten Vegetationsperiode (Oktober-August) in den einzelnen Landkreisen.

Tabelle 4.15. Ergebnisse der linearen Regression zwischen Hektarerträgen von Roggen mit mittlerer Temperatur in der Vegetationsperiode in den einzelnen Landkreisen

Landkreis	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	P	t	DF	R <sup>2</sup>
<b>Alb-Donau-Kreis ***</b>	<b>7,25</b>	<b>-4,44</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>3,83</b>	<b>36</b>	<b>0,27</b>
Biberach	0,77	51,81	0,64	0,46	15	<0,01
<b>Böblingen **</b>	<b>3,69</b>	<b>18,55</b>	<b>0,01</b>	<b>2,59</b>	<b>20</b>	<b>0,21</b>
<b>Bodensee ***</b>	<b>8,50</b>	<b>-27,19</b>	<b>0,001</b>	<b>3,51</b>	<b>27</b>	<b>0,28</b>
<b>Breisgau ***</b>	<b>7,20</b>	<b>-28,42</b>	<b>0,001</b>	<b>3,54</b>	<b>34</b>	<b>0,24</b>
Calw	1,90	24,79	0,34	0,95	26	<0,01
Emmendingen	-	-	-	-	-	-
<b>Enzkreis **</b>	<b>4,96</b>	<b>-0,75</b>	<b>0,01</b>	<b>2,47</b>	<b>30</b>	<b>0,14</b>
<b>Esslingen **</b>	<b>4,98</b>	<b>6,38</b>	<b>0,003</b>	<b>3,22</b>	<b>25</b>	<b>0,26</b>
<b>Freudenstadt ***</b>	<b>6,86</b>	<b>-1,09</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,26</b>	<b>35</b>	<b>0,32</b>
Göppingen	-	-	-	-	-	-
Heidenheim	0,69	40,56	0,75	0,31	28	<0,01
<b>Heilbronn *</b>	<b>5,04</b>	<b>3,88</b>	<b>0,02</b>	<b>2,34</b>	<b>35</b>	<b>0,11</b>
<b>Hohenlohe **</b>	<b>6,66</b>	<b>-10,81</b>	<b>0,003</b>	<b>3,16</b>	<b>36</b>	<b>0,19</b>
<b>Karlsruhe *</b>	<b>3,09</b>	<b>11,95</b>	<b>0,05</b>	<b>1,94</b>	<b>38</b>	<b>0,06</b>
<b>Konstanz ***</b>	<b>7,78</b>	<b>-23,39</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,34</b>	<b>35</b>	<b>0,33</b>
<b>Lörrach **</b>	<b>4,65</b>	<b>-5,60</b>	<b>0,005</b>	<b>2,98</b>	<b>33</b>	<b>0,18</b>
<b>Main-Tauber-Kreis **</b>	<b>5,97</b>	<b>-3,20</b>	<b>0,005</b>	<b>2,94</b>	<b>38</b>	<b>0,16</b>
<b>Neckar-Odenwald-Kreis **</b>	<b>5,24</b>	<b>5,01</b>	<b>0,004</b>	<b>3,07</b>	<b>35</b>	<b>0,18</b>
<b>Ortenaukreis *</b>	<b>4,12</b>	<b>2,04</b>	<b>0,03</b>	<b>2,20</b>	<b>36</b>	<b>0,09</b>
<b>Ostalbkreis ***</b>	<b>5,52</b>	<b>2,28</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>3,74</b>	<b>35</b>	<b>0,26</b>
Rastatt	0,92	33,12	0,62	0,49	29	<0,01
<b>Ravensburg ***</b>	<b>6,14</b>	<b>-4,29</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>3,81</b>	<b>36</b>	<b>0,26</b>
<b>Rems-Murr-Kreis *</b>	<b>2,97</b>	<b>19,02</b>	<b>0,04</b>	<b>2,07</b>	<b>29</b>	<b>0,09</b>
<b>Reutlingen ***</b>	<b>6,44</b>	<b>2,61</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>3,68</b>	<b>33</b>	<b>0,27</b>
Rhein-Neckar-Kreis	1,97	21,57	0,25	1,16	36	<0,01
Rottweil	4,72	10,57	0,10	1,67	26	0,06
<b>Schwäbisch Hall **</b>	<b>5,77</b>	<b>-4,22</b>	<b>0,004</b>	<b>3,10</b>	<b>27</b>	<b>0,23</b>
<b>Schwarzwald-Baar-Kreis *</b>	<b>4,93</b>	<b>8,29</b>	<b>0,02</b>	<b>2,28</b>	<b>34</b>	<b>0,10</b>
<b>Sigmaringen **</b>	<b>6,76</b>	<b>-0,97</b>	<b>0,004</b>	<b>3,08</b>	<b>35</b>	<b>0,19</b>
Stuttgart	-	-	-	-	-	-
<b>Tübingen **</b>	<b>5,51</b>	<b>2,85</b>	<b>0,01</b>	<b>2,69</b>	<b>18</b>	<b>0,24</b>
Tuttlingen	-	-	-	-	-	-
Waldshut	3,17	14,80	0,10	1,65	35	0,04
<b>Zollernalbkreis ***</b>	<b>6,87</b>	<b>-8,13</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>5,36</b>	<b>36</b>	<b>0,42</b>

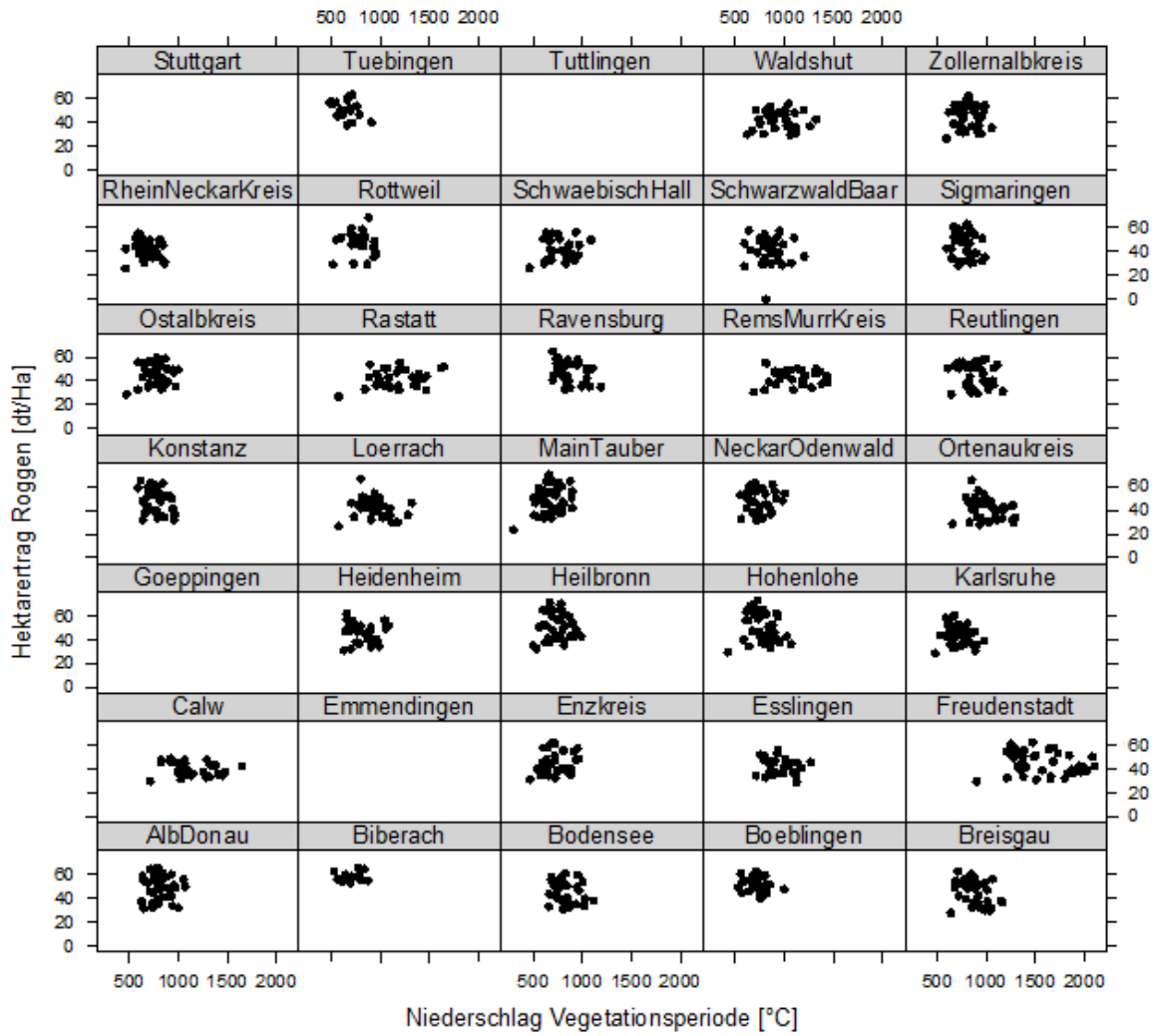


Abb. 4.16. Ertrag von Roggen in Abhängigkeit von Niederschlagssummen während der im Text definierten Vegetationsperiode (Oktober-August) in den einzelnen Landkreisen.

Tabelle 4.16. Ergebnisse der linearen Regression zwischen Hektarerträgen von Roggen mit Niederschlag während der Vegetationsperiode in den einzelnen Landkreisen

Landkreis	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	P	t	DF	R <sup>2</sup>
Alb-Donau-Kreis	-0,0009	49,59	0,95	-0,05	36	<0,01
Biberach	0,005	53,89	0,51	0,66	15	<0,01
Böblingen	-0,01	59,91	0,37	-0,91	20	<0,01
Bodensee	-0,01	56,71	0,35	-0,94	26	<0,01
<b>Breisgau *</b>	<b>-0,02</b>	<b>70,26</b>	<b>0,02</b>	<b>-2,28</b>	<b>34</b>	<b>0,10</b>
Calw	-0,003	43,44	0,49	-0,68	26	<0,01
Emmendingen	-	-	-	-	-	-
Enzkreis	0,01	33,88	0,24	1,17	29	0,01
Esslingen	-0,006	48,61	0,50	-0,68	25	<0,01
Freudenstadt	-0,005	53,94	0,27	-1,11	36	<0,01
Göppingen	-	-	-	-	-	-
Heidenheim	-0,008	52,20	0,46	-0,74	27	<0,01
Heilbronn	0,003	49,44	0,85	0,18	34	<0,01
Hohenlohe	-0,01	63,57	0,28	-1,08	36	<0,01
Karlsruhe	-0,01	51,58	0,41	-0,82	38	<0,01
<b>Konstanz *</b>	<b>-0,03</b>	<b>74,73</b>	<b>0,04</b>	<b>-2,12</b>	<b>35</b>	<b>0,08</b>
Lörrach	-0,01	52,68	0,21	-1,27	32	0,01
Main-Tauber-Kreis	0,02	34,11	0,12	1,55	38	0,03
Neckar-Odenwald-Kreis	-0,004	52,35	0,73	-0,34	34	<0,01
Ortenaukreis	-0,01	55,18	0,14	-1,49	36	0,03
Ostalbkreis	0,005	41,76	0,67	0,43	35	<0,01
Rastatt	0,009	30,74	0,09	1,71	28	0,06
Ravensburg	-0,02	68,85	0,04	-2,07	30	0,09
Rems-Murr-Kreis	-0,001	45,08	0,75	-0,31	29	<0,01
Reutlingen	-0,01	54,79	0,35	-0,94	34	<0,01
Rhein-Neckar-Kreis	-0,01	55,12	0,13	-1,52	35	0,03
Rottweil	0,003	43,90	0,83	0,20	23	<0,01
Schwäbisch Hall	0,006	36,86	0,62	0,49	26	<0,01
Schwarzwald-Baar-Kreis	-0,006	46,74	0,66	-0,43	33	<0,01
Sigmaringen	-0,01	60,92	0,34	-0,95	35	<0,01
Stuttgart	-	-	-	-	-	-
Tübingen	-0,02	68,76	0,12	-1,61	16	0,08
Tuttlingen	-	-	-	-	-	-
Waldshut	-0,002	44,49	0,76	-0,30	34	<0,01
Zollernalbkreis	0,0009	43,46	0,95	0,06	36	<0,01



### 4.3.7 Winterraps

In 14 von 35 Landkreisen gab es eine signifikante positive Korrelation zwischen dem Ertrag von Winterraps und Temperatur zwischen Oktober und August (Abb. 4.17. und Tabelle 4.17). Diese war ebenso wie bei den meisten Kulturen, immer positiv. Nur im Main-Tauber-Kreis gab es einen (positiven) Zusammenhang zwischen Niederschlag und Winterrapsenerträgen (Abb. 4.18., Tabelle 4.18).

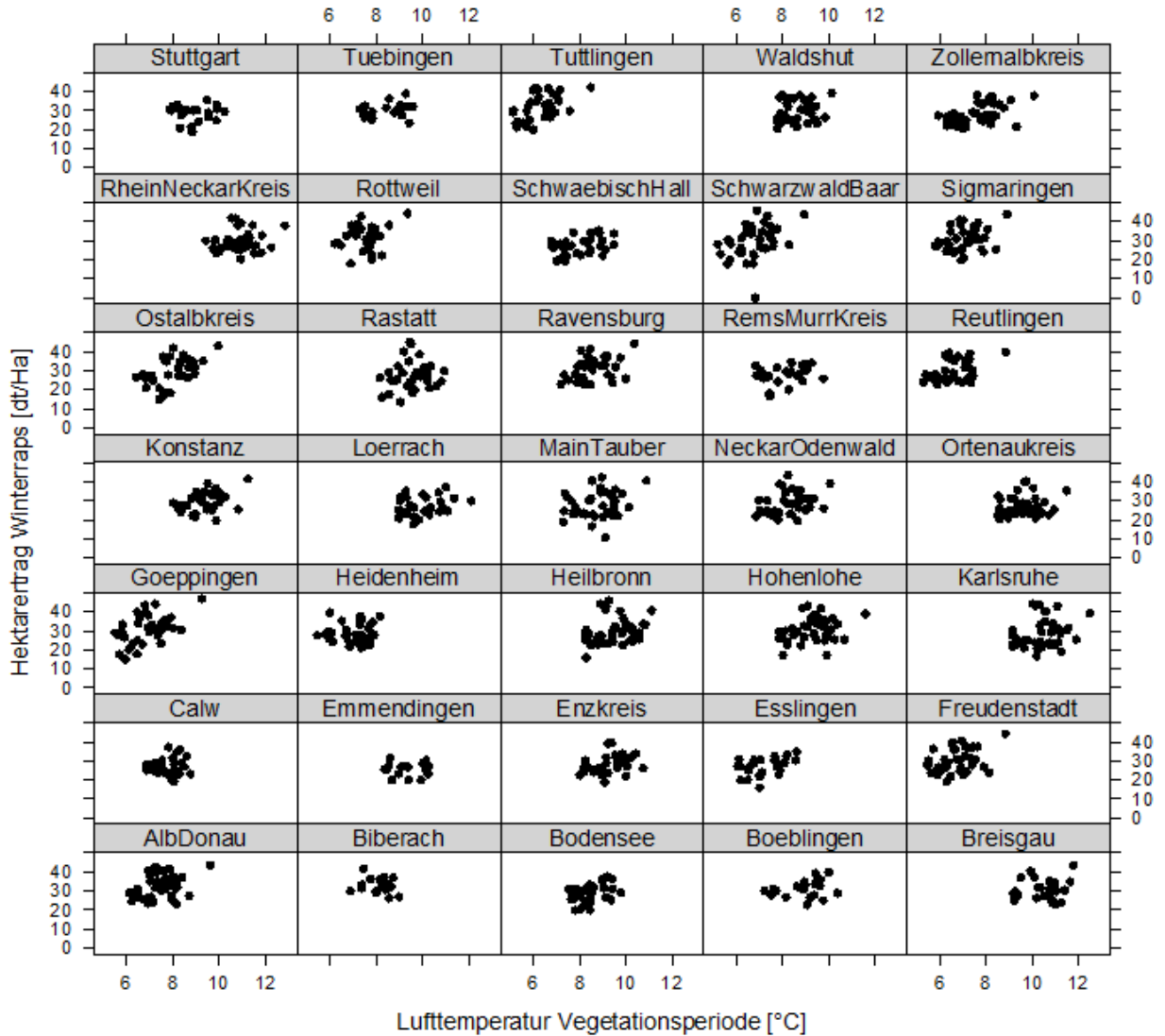


Abb. 4.17. Ertrag von Winterraps in Abhängigkeit von der mittleren Temperatur während der im Text definierten Vegetationsperiode (Oktober-August) in den einzelnen Landkreisen.

Tabelle 4.17. Ergebnisse der linearen Regression zwischen Hektarerträgen von Winterraps mit mittlerer Temperatur in der Vegetationsperiode in den einzelnen Landkreisen

Landkreis	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	P	t	DF	R <sup>2</sup>
<b>Alb-Donau-Kreis **</b>	<b>3,01</b>	<b>9,52</b>	<b>0,01</b>	<b>2,66</b>	<b>38</b>	<b>0,13</b>
Biberach	-1,36	44,10	0,47	-0,74	15	<0,01
Böblingen	1,44	18,44	0,17	1,40	20	0,04
<b>Bodensee *</b>	<b>3,07</b>	<b>2,63</b>	<b>0,03</b>	<b>2,27</b>	<b>27</b>	<b>0,12</b>
Breisgau	0,03	31,17	0,98	0,02	24	<0,01
Calw	0,69	21,61	0,67	0,42	26	<0,01
Emmendingen	-0,01	25,66	0,99	-0,01	15	<0,01
<b>Enzkreis *</b>	<b>2,27</b>	<b>7,12</b>	<b>0,04</b>	<b>2,12</b>	<b>30</b>	<b>0,10</b>
<b>Esslingen **</b>	<b>2,71</b>	<b>7,43</b>	<b>0,01</b>	<b>2,53</b>	<b>24</b>	<b>0,17</b>
<b>Freudenstadt *</b>	<b>2,78</b>	<b>11,47</b>	<b>0,02</b>	<b>2,33</b>	<b>37</b>	<b>0,10</b>
<b>Göppingen ***</b>	<b>4,39</b>	<b>0,76</b>	<b>0,001</b>	<b>0,22</b>	<b>36</b>	<b>0,22</b>
Heidenheim	0,42	26,20	0,74	0,32	29	<0,01
Heilbronn	2,10	9,95	0,12	1,56	37	0,03
Hohenlohe	1,98	12,09	0,08	1,76	38	0,05
Karlsruhe	2,28	4,89	0,12	1,57	38	0,03
Konstanz	2,40	7,15	0,02	2,40	37	0,11
Lörrach	1,58	11,29	0,19	1,32	25	0,02
Main-Tauber-Kreis	2,02	10,65	0,13	1,53	38	0,03
<b>Neckar-Odenwald-Kreis *</b>	<b>2,31</b>	<b>9,34</b>	<b>0,04</b>	<b>2,09</b>	<b>37</b>	<b>0,08</b>
Ortenaukreis	0,86	19,12	0,46	0,74	36	<0,01
<b>Ostalbkreis ***</b>	<b>4,37</b>	<b>-4,81</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>3,80</b>	<b>37</b>	<b>0,26</b>
Rastatt	1,37	14,26	0,46	0,73	30	<0,01
<b>Ravensburg **</b>	<b>3,33</b>	<b>2,11</b>	<b>0,009</b>	<b>2,72</b>	<b>36</b>	<b>0,14</b>
Rems-Murr-Kreis	1,61	15,17	0,13	1,55	26	0,04
<b>Reutlingen **</b>	<b>2,99</b>	<b>9,89</b>	<b>0,007</b>	<b>2,84</b>	<b>34</b>	<b>0,16</b>
Rhein-Neckar-Kreis	1,24	16,28	0,33	0,97	36	<0,01
Rottweil	2,38	13,63	0,18	1,35	28	0,02
<b>Schwäbisch Hall *</b>	<b>1,94</b>	<b>11,56</b>	<b>0,05</b>	<b>1,98</b>	<b>27</b>	<b>0,09</b>
<b>Schwarzwald-Baar-Kreis **</b>	<b>4,13</b>	<b>1,72</b>	<b>0,01</b>	<b>2,46</b>	<b>35</b>	<b>0,12</b>
<b>Sigmaringen *</b>	<b>2,81</b>	<b>10,82</b>	<b>0,03</b>	<b>2,18</b>	<b>37</b>	<b>0,08</b>
Stuttgart	-0,02	28,85	0,98	-0,02	20	<0,01
Tübingen	1,54	17,21	0,15	1,46	18	0,05
Tuttlingen	0,02	30,72	0,57	0,56	35	<0,01
Waldshut	1,40	17,40	0,33	0,97	35	<0,01
<b>Zollernalbkreis ***</b>	<b>2,98</b>	<b>5,68</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>3,73</b>	<b>37</b>	<b>0,25</b>

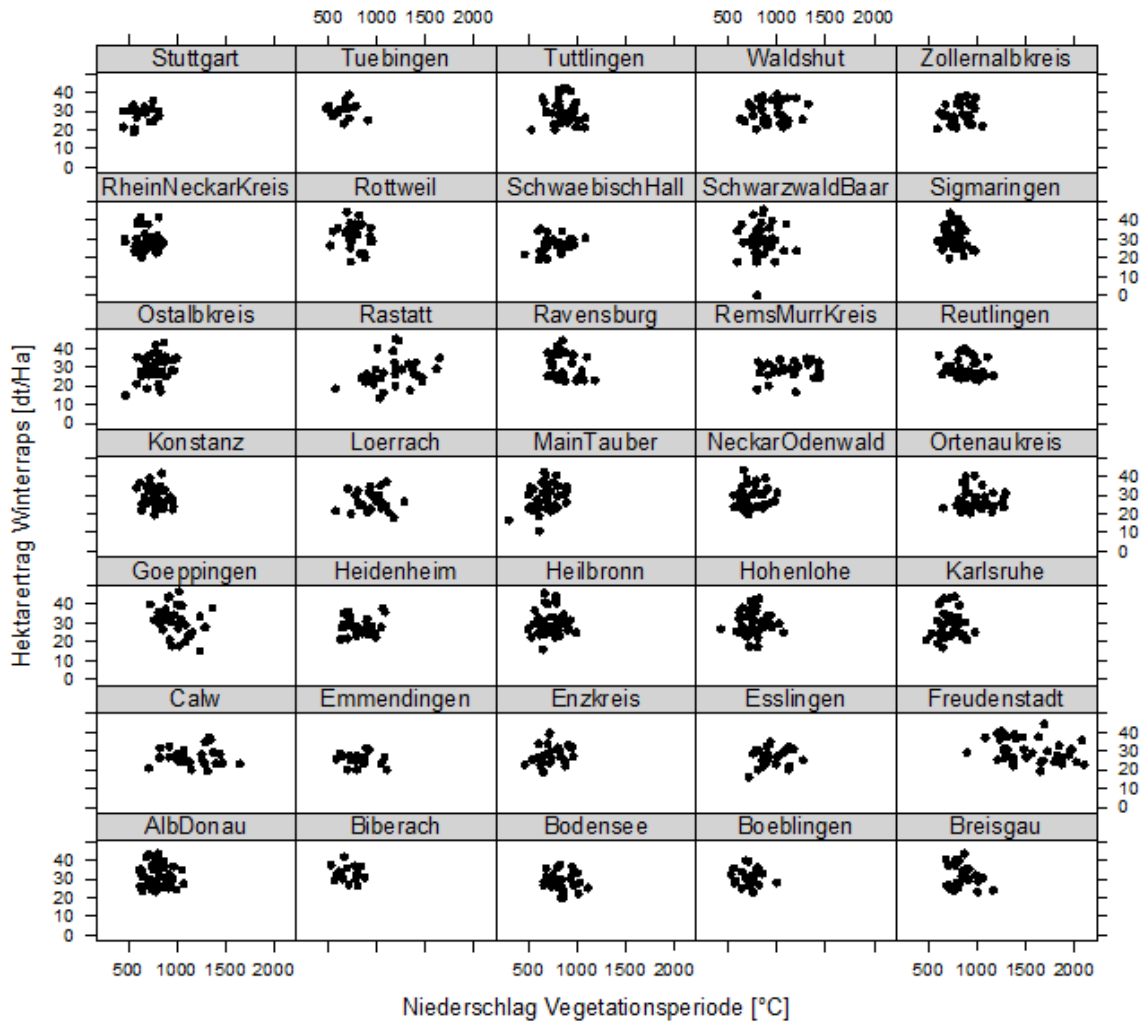


Abb. 4.18. Ertrag von Winterraps in Abhängigkeit von Niederschlagssummen während der im Text definierten Vegetationsperiode (Oktober-August) in den einzelnen Landkreisen.

Tabelle 4.18. Ergebnisse der linearen Regression zwischen Hektarerträgen von Winterraps mit Niederschlag während der Vegetationsperiode in den einzelnen Landkreisen

Landkreis	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	P	t	DF	R <sup>2</sup>
Alb-Donau-Kreis	-0,003	34,93	0,62	-0,49	38	<0,01
Biberach	-0,004	36,12	0,66	-0,43	15	<0,01
Böblingen	-0,003	33,91	0,67	-0,42	20	<0,01
Bodensee	-0,007	34,55	0,36	-0,92	26	<0,01
Breisgau	-0,01	40,43	0,27	-1,11	24	<0,01
Calw	0,0002	26,70	0,95	0,06	26	<0,01
Emmendingen	-0,003	28,27	0,56	-0,59	15	<0,01
Enzkreis	0,009	21,32	0,17	1,39	29	0,03
Esslingen	0,003	23,92	0,62	0,49	24	<0,01
Freudenstadt	-0,005	39,57	0,06	-1,89	38	0,06
Göppingen	-0,01	45,83	0,07	-1,86	34	0,06
Heidenheim	0,0008	27,86	0,89	0,12	27	<0,01
Heilbronn	0,003	27,47	0,73	0,34	36	<0,01
Hohenlohe	-0,0004	30,80	0,95	-0,05	38	<0,01
Karlsruhe	-0,0003	28,92	0,97	-0,03	38	<0,01
Konstanz	-0,01	37,31	0,21	-1,25	37	0,01
Lörrach	-0,002	28,98	0,74	-0,32	24	<0,01
<b>Main-Tauber-Kreis *</b>	<b>0,01</b>	<b>16,99</b>	<b>0,05</b>	<b>1,97</b>	<b>38</b>	<b>0,06</b>
Neckar-Odenwald-Kreis	0,003	26,25	0,69	0,39	36	<0,01
Ortenaukreis	-0,001	29,23	0,73	-0,33	36	<0,01
Ostalbkreis	0,01	17,70	0,10	1,65	37	0,04
Rastatt	0,008	17,55	0,15	1,45	28	0,03
Ravensburg	-0,01	41,30	0,15	-1,45	30	0,03
Rems-Murr-Kreis	0,003	24,13	0,38	0,87	26	<0,01
Reutlingen	-0,004	33,37	0,51	-0,65	35	<0,01
Rhein-Neckar-Kreis	-0,001	30,40	0,89	-0,14	35	<0,01
Rottweil	-0,007	37,39	0,54	-0,61	25	<0,01
Schwäbisch Hall	0,006	22,28	0,32	1,00	26	<0,01
Schwarzwald-Baar-Kreis	0,0005	28,94	0,96	0,05	34	<0,01
Sigmaringen	-0,01	43,50	0,12	-1,57	37	0,03
Stuttgart	0,005	24,99	0,51	0,66	20	<0,01
Tübingen	-0,0009	31,26	0,91	-0,11	16	<0,01
Tuttlingen	-0,001	31,00	0,89	-0,12	31	<0,01
Waldshut	0,0008	28,73	0,88	0,14	34	<0,01
Zollernalbkreis	0,006	22,89	0,40	0,84	37	<0,01

## 4.4 Zeitliche Entwicklung von Klima und Ertrag in Baden-Württemberg – welche Faktoren sind beteiligt?

Bei genauer Betrachtung der Daten aus Kapitel 3 (Landesdurchschnitt) gab es Zweifel über die Authentizität der Temperatur-Ertragskorrelation. Es wäre prinzipiell möglich, dass eine allgemeine Ertragssteigerung in den letzten 50 Jahren mehr mit Züchtung, Sortenwahl und effizienterer Bewirtschaftung zu tun haben könnte als mit Klimaeinflüssen, auch wenn beim Ertragsfortschritt im Laufe der Jahre (Abb. 4.19a) wahrscheinlich ist, dass ein klimatischer Effekt mitspielt. Die Steigerung des Ertrags wäre möglicherweise eher durch Züchtung und effizienteren Anbau bedingt und könnte parallel mit einer gleichzeitigen Temperatursteigerung auftreten statt von dieser abhängig zu sein. Wir haben dieses Problem am Ende von Kapitel 3 bereits in Bezug auf Temperatur und Niederschlag erläutert. Eine Illustration findet sich bereits in Abb. 3.16, die hier zum einfacheren Lesen nochmals als Abb. 4.19 wiederholt ist.

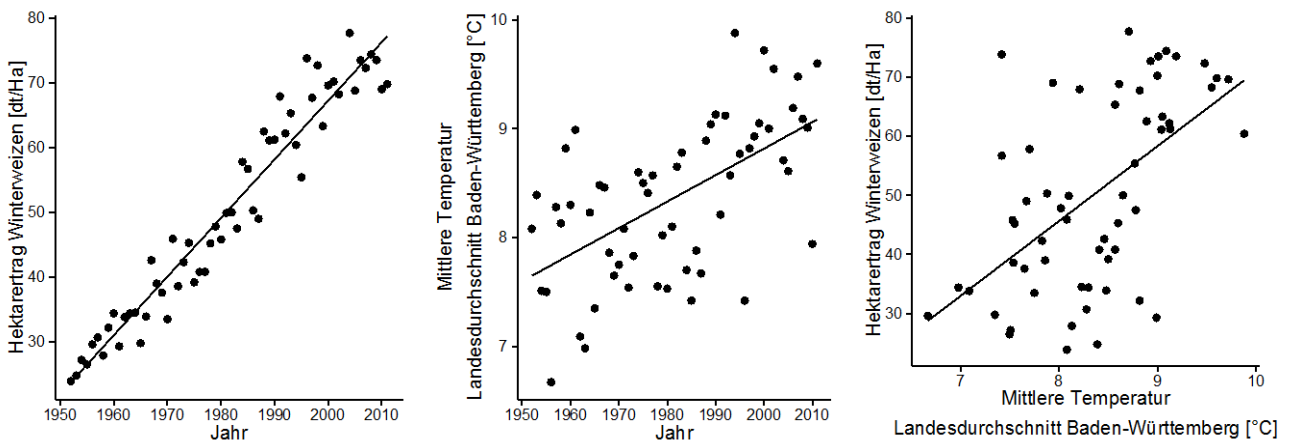


Abb. 4.19. Die statistischen Zusammenhänge zwischen a) der zeitlichen Entwicklung der Erträge von Winterweizen, b) der zeitlichen Entwicklung der mittleren Jahrestemperatur in Baden-Württemberg und c) der Korrelation zwischen dem Ertrag von Winterweizen und der mittleren Temperatur in Baden-Württemberg.

Da es durchaus Landkreise gibt, bei denen sich keine signifikante Korrelation zwischen Temperatur und Ertrag herstellen lässt, wurde geprüft, ob eine Steigerung der Erträge in diesen einzelnen Landkreisen mit der Zeit festzustellen ist (am Beispiel Winterweizen). Es stellte sich heraus, dass die Ertragssteigerung mit der Zeit auch in den Landkreisen vorhanden ist, in denen es keine Korrelation mit der Temperatur gibt. Ebenso ist auch eine Temperatursteigerung in diesen Landkreisen statistisch nachweisbar. Der Temperaturanstieg ist also auch auf Landkreisebene nicht stringent mit einem Ertragsanstieg verknüpft. Eine fehlende Korrelation kann darin gründen, dass steigende Temperaturen für den Ertrag nicht relevant sind, von anderen Faktoren überlagert werden oder sogar den durch andere Faktoren geförderten Ertragsanstieg bremsen. Mit der Betrachtung von Durchschnittstemperaturen in der Vegetationsperiode ist diese Frage offenkundig nicht zu entscheiden.

Allerdings fällt bei der Betrachtung der Korrelationskurven von Ertrag mit Temperatur und ihrer statistischen Parameter auf, dass eher die Landkreise in den kühleren Regionen des Landes mit hohen Signifikanzwerten, Bestimmtheitsmaßen und Steigungen aufwarten (auch wenn wie beim Niederschlag das Muster nicht

durchgehend plausibel ist). Ein solcher Befund wäre bei Temperaturlimitierung der Ertragsbildung bzw. zumindest starkem Temperatureinfluss zu erwarten.

Neben der Temperatur ist auch die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre ein nicht zu unterschätzender Faktor. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration an der Messstelle Schauinsland des Umweltbundesamtes hat seit Anfang der 1970-er Jahre von ca. 330 ppm auf 390 ppm zugenommen (UBA 2014). Wenn Pflanzen mehr CO<sub>2</sub> angeboten wird, steigern sie ihre Photosyntheseleistung. C3-Pflanzen wie Weizen, deren CO<sub>2</sub>-Assimilationskapazität auch bei den derzeitigen Konzentrationen noch nicht gesättigt ist, können bei einer Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Luft unter idealen sonstigen Bedingungen ihre Netto-Photosyntheserate steigern und im Prinzip einen Mehrertrag erzielen. C4-Pflanzen wie Mais assimilieren CO<sub>2</sub> auf einem anderen Stoffwechselweg und sind darin bereits so effizient, dass sie von einem höheren CO<sub>2</sub>-Partialdruck kaum profitieren. Insofern ist eine Beteiligung der CO<sub>2</sub>-Konzentration am Ertragsfortschritt ebenfalls nicht auszuschließen, zumal CO<sub>2</sub>-Erhöhung und Temperaturerhöhung sogar kausal verknüpft sind.

Dass die Silomais-Erträge in Baden-Württemberg in den letzten Jahren nicht weiter angestiegen sind (Abb. 3.17), kann ein Indiz dafür sein, dass CO<sub>2</sub> bei den anderen (C3-)Kulturen die Ertragsentwicklung mit beeinflusst, bei Mais jedoch nicht. Auffallend ist weiterhin, dass Silomais insofern von dem Muster der anderen Kulturarten in Kap. 3 abweicht, als die Erträge zwar linear mit der Jahresmitteltemperatur korreliert waren, jedoch mit einem einfachen Modell kein Zusammenhang zwischen Frühlings- oder Sommertemperaturen hergestellt werden konnte. Die anderen Kulturen zeigten einen Zusammenhang mit der Sommertemperatur. Auf Landkreisebene war Silomais nur in wenigen Kreisen überhaupt mit der Temperatur korreliert und wenn, dann die einzige Kultur, bei der die überwiegende Anzahl der signifikanten Korrelationen mit Temperatur negativ waren. Es wäre möglich, dass die Auswirkung steigender CO<sub>2</sub>-Konzentrationen bei den C3-Kulturen mögliche Auswirkungen der Temperatur (die parallel zur CO<sub>2</sub>-Konzentration steigt) maskiert und nur beim Mais die CO<sub>2</sub>-unbeeinflusste Temperaturwirkung zum Tragen kommt (bzw. kaum eine Temperaturwirkung erkennbar ist).

Allerdings kommt hier noch das Problem des Ernteindex und seiner züchterischen Beeinflussung ins Spiel. Bei Getreide wurde ein großer Anteil des Ertragsfortschritts durch eine Steigerung des Ernteindex bei nahezu gleichbleibender oberirdischer Gesamtbiomasse erreicht (Weiser 2014) – mehr Korn bei weniger Stroh und besserer Standfestigkeit (Haas und Friedt 1990). Insofern muss hier CO<sub>2</sub> gar keinen großen Beitrag geleistet haben. Silomais hat *per se* einen Ernteindex von nahe 1, er ist somit kein ertragsbeeinflussender Faktor. Bei Körnermais kann er variieren. Während bei Getreide eine stetige Erhöhung des Verhältnisses von Kornertrag zum Biomasseertrag erreicht wurde, wurden beim Mais – ausgehend von einem bereits recht hohen Ernteindex – zunächst Fortschritte in der Biomasseproduktion insgesamt erreicht (Hay 1995). Körnermais und Silomais verhalten sich gemäß statistischer Analyse jedenfalls nicht gleichsinnig. Körnermais sollte ebenfalls kaum auf CO<sub>2</sub> reagieren, passt jedoch eher ins übliche „C3-Muster“ der positiven Temperatur-Ertragskorrelation, und dies bei der Mehrzahl der relevanten Kreise (Kap. 4.3.5). Denkbar wäre eine Steigerung des Ernteindex, aber auch dass die Temperaturerhöhung die notwendige Wärmesumme für die Entwicklung der Maiskolben bereit stellt, die Vegetationsperiode insgesamt verlängert und damit die Erträge der Körner steigert. Beim Themenkomplex „Wirkung von CO<sub>2</sub>, Ernteindex und Temperatur“ verbietet sich also eine einfache Erklärung.

Die Ertragssteigerung mit der Zeit integriert über alle Einflussfaktoren. Am wahrscheinlichsten ist eine Beteiligung aller genannter Mechanismen am Ertragsfortschritt, wobei eine quantitative Abschätzung des Anteils von Züchtung und Bewirtschaftung oder CO<sub>2</sub> versus Temperaturerhöhung im Rahmen dieses Projektes nicht machbar ist. Die Daten zeigen aber auch, dass auf Landesebene und in vielen Landkreisen die

Temperaturerhöhung der letzten Jahrzehnte den Ertragsfortschritt jedenfalls nicht gehemmt hat. Wir gehen nicht zuletzt aufgrund der Unterschiede zwischen wärmeren und kühleren Landkreisen für die weitere Analyse davon aus,

- dass eine allgemeine Steigerung der Erträge durch Anbaufortschritte und CO<sub>2</sub>-Anstieg in die Temperatur-Ertragskorrelation einfließt,
- dass die Temperatur-Ertragskorrelation aber nicht allein durch diese bedingt wird, und
- dass wir daher einen Zusammenhang zwischen Temperatur und Erträgen dort, wo er gefunden wurde, annehmen können.

Die vertiefte Analyse mit den klimatischen Anfangsbedingungen als Faktor (Kap. 5.5) und die Betrachtung der Extremwetterlagen (Kap. 6) sollen hier weitere Hinweise bringen.

## 4.5 Diskussion

In den meisten Landkreisen konnten positive Zusammenhänge zwischen Temperatur und Ertrag gefunden werden und nur in manchen Kreisen schwache negative Korrelationen zwischen Niederschlag und Ertrag. Hier ist zu beachten, dass

- a) die Korrelationen zwischen Temperatur und Ertrag wesentlich häufiger und hier auch
- b) die Steigungen der Korrelationskurven um ein Vielfaches steiler und die Bestimmtheitsmaße in der Regel höher waren.

Interaktionseffekte wurden auch in den seltenen Fällen, in denen sowohl eine Temperatur- als auch eine Niederschlagskorrelation gefunden wurden, nicht festgestellt.

Da die Niederschlagskorrelationen fast immer gegenläufig zu den Temperaturkorrelationen waren, ist es allerdings möglich, dass wir es hier mit einem indirekten Temperatureffekt zu tun haben – höhere Temperaturen sind mit weniger Niederschlägen korreliert bzw. niedrigere Temperaturen mit im Durchschnitt höheren Niederschlägen (siehe auch Kap. 3.5 für eine Diskussion der Kollinearität zwischen Temperatur und Niederschlag). Das Muster in den Landkreisen ist diesbezüglich zwischen warm-trockenem oder kühl-feuchtem Regionalklima nicht durchgehend plausibel. (Negative) Niederschlagskorrelationen mit einigermaßen hoher Signifikanz sind nur bei Getreide in einigen südbadischen Landkreisen zu finden. Denkbar sind auch Interaktionen mit der Phytopathologie, z.B. dass höhere Niederschläge mit einer erhöhten Infektionswahrscheinlichkeit für pilzverursachte Pflanzenkrankheiten einhergehen.

Bei der Entwicklung der Niederschläge in Baden-Württemberg (auch in den Landkreisen) ist kein klarer Trend erkennbar. Bei den Erträgen ist aber ein Trend zu erkennen. Offenkundig ist der Niederschlag damit im Durchschnitt kein determinierender Faktor, sondern etwas anderes, wie z.B. Temperatur, CO<sub>2</sub> oder Zuchtfortschritt. Die Temperatur steigt an, ist also neben dem Züchtungsfortschritt und CO<sub>2</sub>-Anstieg der heißeste Kandidat auf den Haupt-Erklärungsfaktor. Niederschlag wirkt höchstens modulierend ein, vor allem wenn Extrema ins Spiel kommen (Extremwetter oder besondere Böden (z.B. Main-Tauber-Kreis)).

Die Erhöhung der Durchschnittstemperaturen hat den Ertragsanstieg weder auf Landes-, noch auf Kreisebene erkennbar negativ beeinflusst. Es scheint sogar wahrscheinlich, dass die Temperatur zumindest in den kühleren Teilen des Landes noch nicht das Optimum für das Wachstum der Feldfrüchte erreicht hat. Diese Frage wird in Kap. 5 näher beleuchtet.

Die Wasserversorgung hingegen ist für das Wachstum oder den Ertrag noch nicht limitierend. Eine Ausnahme ist bezeichnenderweise der Main-Tauber-Kreis (Wintergerste, Silomais, Winterraps), der zu den niederschlagsärmsten Kreisen in Baden-Württemberg gehört und dessen Böden auch zum Großteil eher flachgründig und damit von geringer Wasserspeicherfähigkeit sind. Es scheint wahrscheinlich, dass Niederschlag in der Mehrzahl der Landkreise kein besonders gutes Maß für die Wasserversorgung der Pflanzen ist. Ohne die Betrachtung der Wasserspeicherfähigkeit der Böden ist das Bild der Wasserversorgung der Kulturpflanzen offensichtlich nicht nur in der Praxis, sondern auch in der statistischen Annäherung an die Realität unvollständig. Die Rolle der Böden wird im nächsten Kapitel ausführlich behandelt.

Außerdem gibt es in der Literatur Hinweise darauf, dass die jahreszeitliche Verteilung der Niederschläge wichtiger für die Primärproduktion von Pflanzen ist als die absolute Summe (Craine 2013; Robinson et al. 2013). Hier werden unter Umständen lange Dürreperioden oder auch Starkregenereignisse oder Überschwemmungen wichtiger für den Einfluss der Niederschläge auf den Ertrag der Feldfrüchte als eine reine Betrachtung der Niederschlagssummen vermuten ließe. Wir behandeln dieses Thema in Kapitel 6 dieses Berichts.

Wir gehen davon aus, dass höhere Durchschnittstemperaturen sich bisher vorwiegend ertragssteigernd, zumindest aber nicht spürbar negativ auf die Erträge von Getreide ausgewirkt haben. Ob diese Situation sich auch unter extremen Wetterlagen (hier v.a. Hitze) so darstellt, diskutieren wir ebenfalls in Kapitel 6.

Abschließend ist zu erwähnen, dass Temperatur und Ertrag in den meisten Kulturarten, vor allem den Getreidearten, positiv und linear miteinander korrelieren. Eine lineare Linie passte hier am besten auf die Daten. Logarithmische oder quadratische Modelle passten entweder schlechter oder stellten zumindest keine Verbesserung gegenüber dem linearen Modell dar. Ähnlich lautete der Befund bei einer globalen Analyse von Ertragsverläufen in den Hauptanbaugebieten von Reis, Weizen und Mais (Grassini et al. 2013).



# 5 Die Erträge der Feldfrüchte in Beziehung auf Klima und Bodeneigenschaften in Baden-Württemberg 1974-2012

## 5.1 Einleitung

Nachdem in Kapitel 3 Daten auf Landesebene und in Kapitel 4 auf Kreisebene für alle Kreise einzeln analysiert wurden, werden die Daten in diesem Kapitel in der Auflösung „Kreisebene insgesamt“ analysiert, um großflächige Zusammenhänge zwischen Klimavariablen und Erträgen zu erkennen. Die Fragen, die wir hier stellen, sind:

- 1) Gibt es großräumige Zusammenhänge zwischen den beobachteten Klimaparametern (vor allem Temperatur, die in den Studien in Kapitel 3 und 4 besonders wichtig war) und Ertrag, die aus der Kombination aller detaillierter Daten aus den einzelnen Landkreisen herausgearbeitet werden können?
- 2) Ist das Ausmaß der Ertragssteigerung durch Temperatur (in den Landkreisen, in denen eine signifikante Ertragssteigerung mit Temperaturanstieg zu beobachten war) von den Bodeneigenschaften abhängig?
- 3) Ist das Ausmaß der Ertragssteigerung durch Temperatur (in den Landkreisen, in denen eine signifikante Ertragssteigerung mit Temperaturanstieg zu beobachten war) von der klimatischen Ausgangssituation abhängig? Konkret wäre eine mögliche Fragestellung: Reagieren Erträge in kälteren Landkreisen stärker auf erhöhte Temperatur als in wärmeren Landkreisen?

## 5.2 Methode

### 5.2.1 Großräumige Analyse der Kreisdaten

In dieser Analyse wurde jedes Jahr in jedem Landkreis als ein Wertepaar (Temperatur/Niederschlag und Ertrag) behandelt. Hierdurch entsteht eine große Datenmenge (siehe Abb. 5.1. weiter unten), die dann im weiteren Verlauf hinsichtlich großräumiger Zusammenhänge zwischen Klima und landwirtschaftlichen Erträgen analysiert werden kann.

Die Datenmenge ist sehr groß, und die Datenpunkte sind nicht immer unabhängig voneinander. Es ist z.B. wahrscheinlicher, dass ein Landkreis, in dem der Ertrag 1973 hoch war, im Jahr 1974 auch hohe Erträge aufweist, als dass die Erträge in einem Landkreis mit niedrigem Ertrag im Jahr 1973 im Jahr 1974 entsprechend hoch sind. Daher wurde hier nach dem am besten passenden Modell für den Zusammenhang Klima-Ertrag gesucht. Hierbei wurde das übliche lineare Regressionsmodell als erstes angepasst, gefolgt von einem GLS-Modell (*Generalised Least Squares*), in dem eine Autokorrelationsstruktur für die zeitliche Entwicklung beinhaltet war. Das bedeutet, der Algorithmus, der die Regression zwischen Klimaparameter und Ertrag herstellt, zieht in Betracht, dass Ertragswerte eventuell in der oben beschriebenen Art und Weise zeitlich voneinander abhängig sind. Weiterhin wurde ein *mixed-effects*-Modell angepasst, in dem der Landkreis als „Zufallsvariable“ eingefügt wurde. Das bedeutet, dass der Algorithmus in Betracht zieht, dass alle Werte, die aus demselben Landkreis stammen, gruppiert sind, und sich vermutlich ähnlicher sind als

dieselbe Anzahl Werte, die aus unterschiedlichen Landkreisen stammen (zum Beispiel: die Jahreswerte im Landkreis Karlsruhe von 1973-1978 liegen vermutlich eher in einer Linie als Karlsruhe 1973, Alb-Donau-Kreis 1974, LKR Heilbronn 1975, Bodenseekreis 1976, LKR Rastatt 1977 und Bodenseekreis 1978). Der beste Algorithmus wurde bestimmt, indem Akaike's Information Criterion (AIC) für alle Modelle bestimmt und dann verglichen wurde. Je kleiner der Wert des AICs, desto besser passt das Modell (im Vergleich) auf die Daten.

Prinzipiell wird mit jedem der Modelle eine einfache Kurve an die Datenpunkte angepasst. Die Unterschiede liegen hier darin, dass durch die unterschiedliche Anpassungsweise der Kurven auch zum Teil nicht gültige Kurven angepasst werden (z.B. kann eine normale lineare Regression prinzipiell nicht mit abhängigen Daten verwendet werden, siehe Kapitel 2.2.). Im Kapitel 4 waren lineare Regression und GLS mit Korrelationskorrektur für Jahre übereinstimmend, daher war die Korrektur für Zeit in den einzelnen Landkreisen für sich nicht relevant. In diesem Fall (alle Landkreisdaten zusammen) war das GLS-Modell allerdings abweichend vom „normalen“ Regressionsmodell, daher musste eine Entscheidung zwischen den zwei Optionen getroffen werden. Der AIC war im GLS-Modell geringer (7449 gegenüber 9379 für das Beispiel Winterweizen), daher wurde dieses statt dem einfachen linearen Regressionsmodell verwendet. Das *mixed-effects*-Modell war gegenüber dem GLS-Modell keine Verbesserung, und wurde daher verworfen.

## **5.2.2 Ausmaß der Auswirkungen der Klimavariabilität in Bezug auf Boden und ursprüngliche Klimavoraussetzungen**

Da für diese Fragestellung eine Analyse des Ausmaßes der Temperatureinwirkung auf Erträge nötig war, mussten wir erst ein Maß für dieses Ausmaß festlegen. Wir benutzen hier die Steigung der linearen Regressionen der einzelnen Landkreise aus Kapitel 4. Es wurden lediglich die Landkreise benutzt, in denen es eine signifikante Korrelation zwischen Temperatur und Ertrag gab (siehe Abschnitt 4.3). Da nicht für alle Kulturen ausreichend Landkreise mit signifikanten Temperatur-Ertragskorrelationen vorlagen, wurden nur die Kulturen, für die ausreichend Daten vorhanden waren (Winterweizen, Winter- und Sommergerste, Roggen, Winterweizen, Körnermais und Kartoffeln) betrachtet. Für diese Kulturen wurden die Steigungen der Temperatur-Ertragskurve aus Kapitel 4.3. übernommen.

Bodendaten wurden vom Regierungspräsidium Freiburg (Abt. 9, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau) zur Verfügung gestellt. Als Kennzeichen der Güte des Bodens benutzten wir Bodenzahlen. Bodenzahlen und Ackerzahlen wurden auf der Ebene von Gemeindegebieten zur Verfügung gestellt. Um das Landkreismittel herzustellen, wurden diese Zahlen nach Fläche der Gemeinde gewichtet und dann gemittelt. Wir verwenden hier also einen nach Fläche gewichteten Mittelwert. Es wurde die Bodenzahl verwendet, da in die Berechnung der Ackerzahl bereits Klimaparameter mit eingehen. Die Bodenzahl stellt ein vom Klima unabhängigeres Maß für unsere Zwecke dar.

Für die klimatische „Ausgangssituation“ eines Landkreises wurden die Temperaturen/Niederschläge von 1973 verwendet. 1973 war das erste Jahr, das in die Analyse einfließt, also der Ausgangspunkt der Studie. Es geht in dieser Analyse nicht um die absoluten Temperaturen oder Niederschläge 1973, sondern um die relative Situation in den einzelnen Landkreisen, bevor eventuell steilere oder weniger steile Temperaturanstiege anzurechnen waren (siehe Abb. 3.1. in Kapitel 3). Hierfür war der Vergleich in einem einzigen Jahr ausreichend.

## 5.3 Erträge der Feldfrüchte in Beziehung auf Klima über alle Landkreise

### 5.3.1 Temperatur

Über alle Landkreise betrachtet konnte für Sommergerste, Kartoffeln, Silomais, Winterraps und Winterroggen ein linearer Zusammenhang zu den Temperaturen während der Vegetationszeit hergestellt werden (Tabelle 5.1., Abb. 5.3-5.5, 5.8, 5.9). Allerdings ist auch hier, so wie in Kapitel 4 bereits kurz diskutiert, zu beachten, dass die Steigung der Kurve, die diese Beziehung verdeutlicht, in allen Kulturen relativ zum Standardertrag der Kultur sehr gering ist. Bei den übrigen Kulturen gab es keinen klaren linearen Zusammenhang zwischen Temperatur und Hektarertrag.

Tabelle 5.1. Statistik für die Zusammenhänge zwischen Temperatur und Hektarertrag der neun Testkulturen, aus einem *generalised least squares*-Modell der Form  $y = ax + c$ .

Kultur	Kurvenparameter		Statistik		
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>DF</i>
Winterweizen	-0,16	59,85	0,13	-1,48	1218
Wintergerste	-0,03	53,09	0,72	-0,34	1207
<b>Sommergerste *</b>	<b>0,15</b>	<b>42,78</b>	<b>0,03</b>	<b>2,10</b>	<b>1224</b>
<b>Kartoffeln ***</b>	<b>3,89</b>	<b>245,14</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>6,58</b>	<b>1209</b>
<b>Silomais *</b>	<b>1,81</b>	<b>429,12</b>	<b>0,02</b>	<b>2,23</b>	<b>1215</b>
Körnermais	0,35	74,93	0,06	1,81	913
Zuckerrüben	1,31	541,73	0,27	1,08	728
<b>Winterraps ***</b>	<b>-0,40</b>	<b>33,25</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>-5,50</b>	<b>1144</b>
<b>Winterroggen *</b>	<b>-0,21</b>	<b>48,01</b>	<b>0,05</b>	<b>-1,91</b>	<b>1030</b>

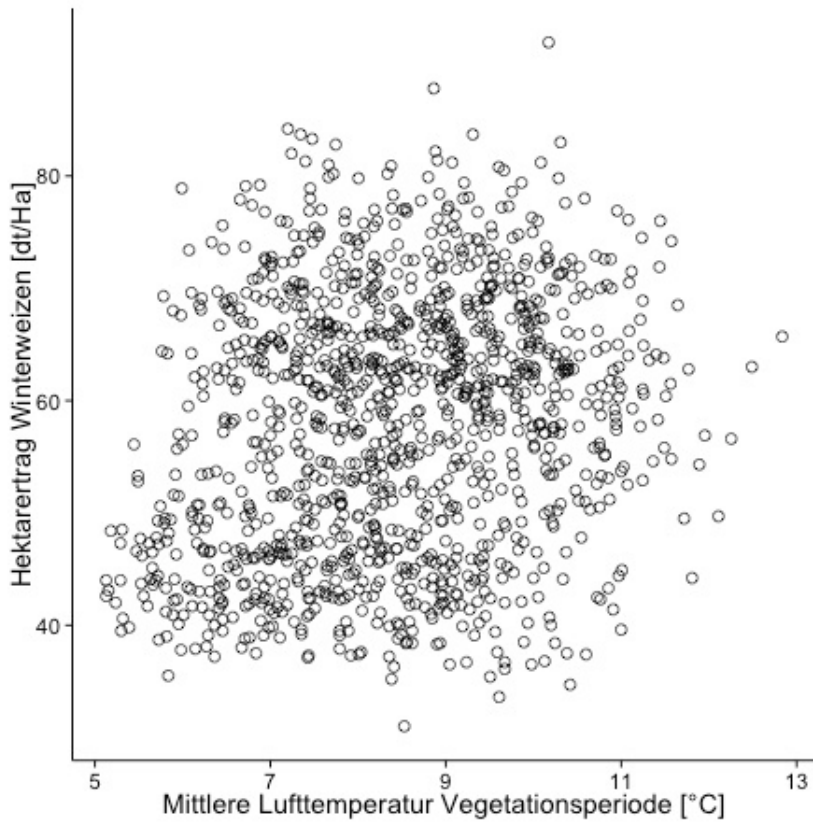


Abb. 5.1. Hektarertrag Winterweizen aller Landkreise in Abhängigkeit von mittlerer Lufttemperatur in der Zeit auf dem Feld (Oktober-August)

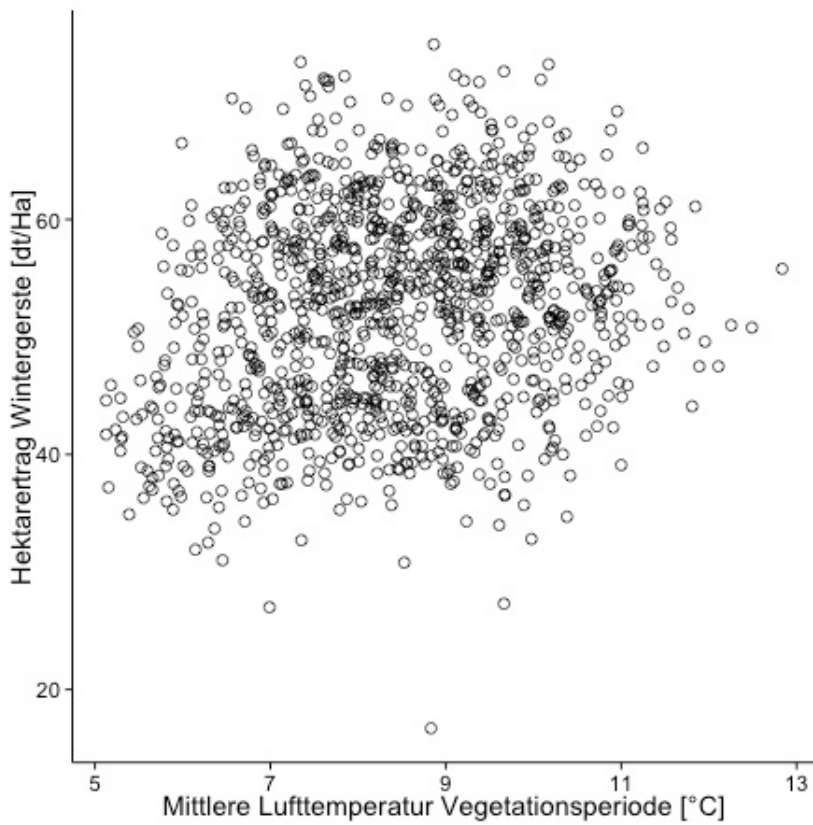


Abb. 5.2. Hektarertrag Wintergerste aller Landkreise in Abhängigkeit von mittlerer Lufttemperatur in der Zeit auf dem Feld (Oktober-August)

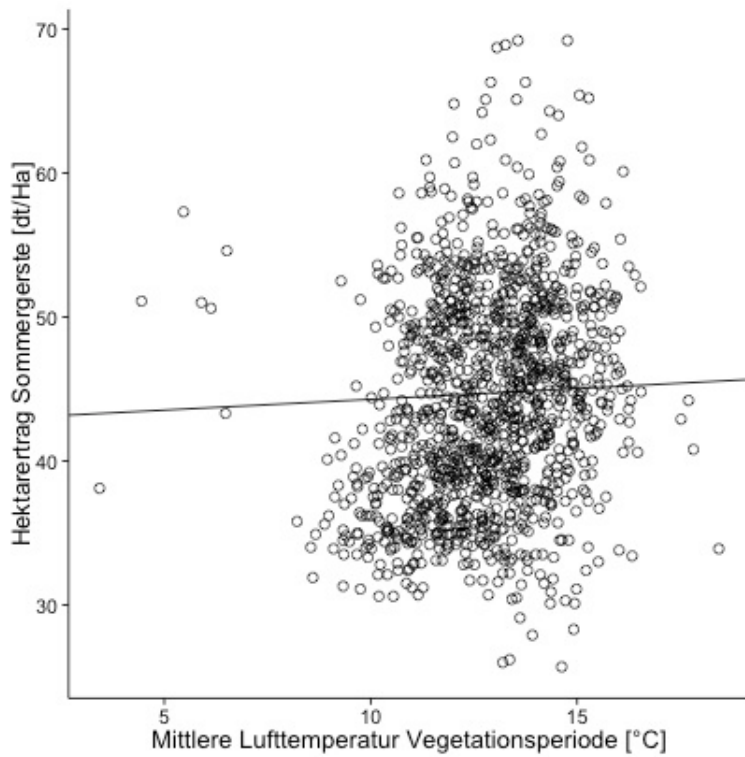


Abb. 5.3. Hektarertrag Sommergerste aller Landkreise in Abhängigkeit von mittlerer Lufttemperatur in der Vegetationsperiode

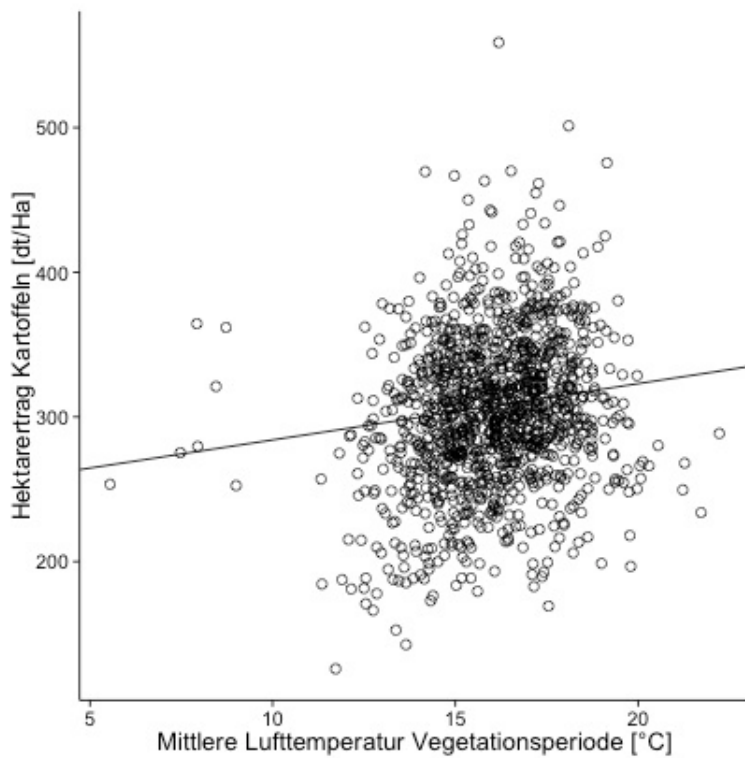


Abb. 5.4. Hektarertrag Kartoffeln aller Landkreise in Abhängigkeit von mittlerer Lufttemperatur in der Vegetationsperiode

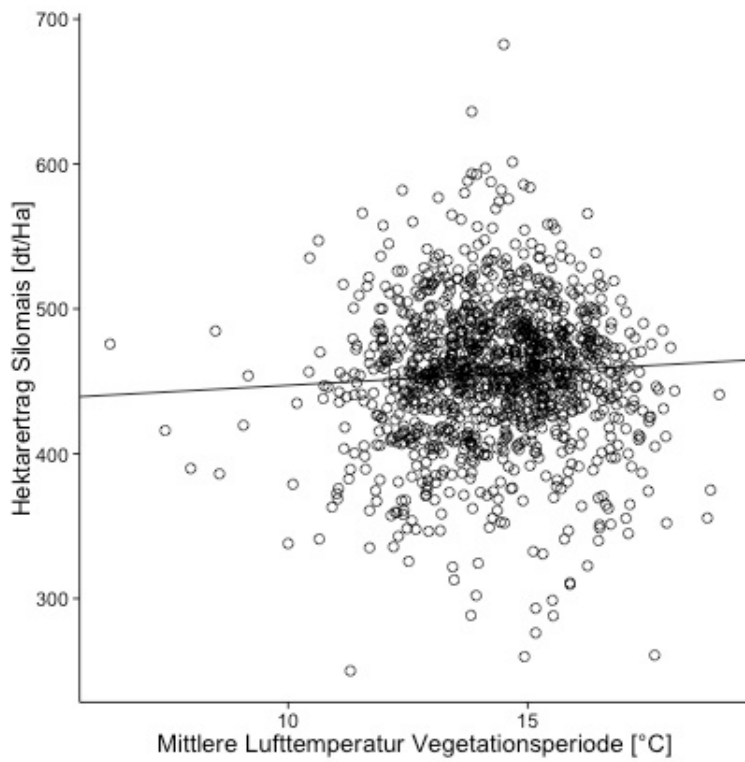


Abb. 5.5. Hektarertrag Silomais aller Landkreise in Abhängigkeit von mittlerer Lufttemperatur in der Vegetationsperiode

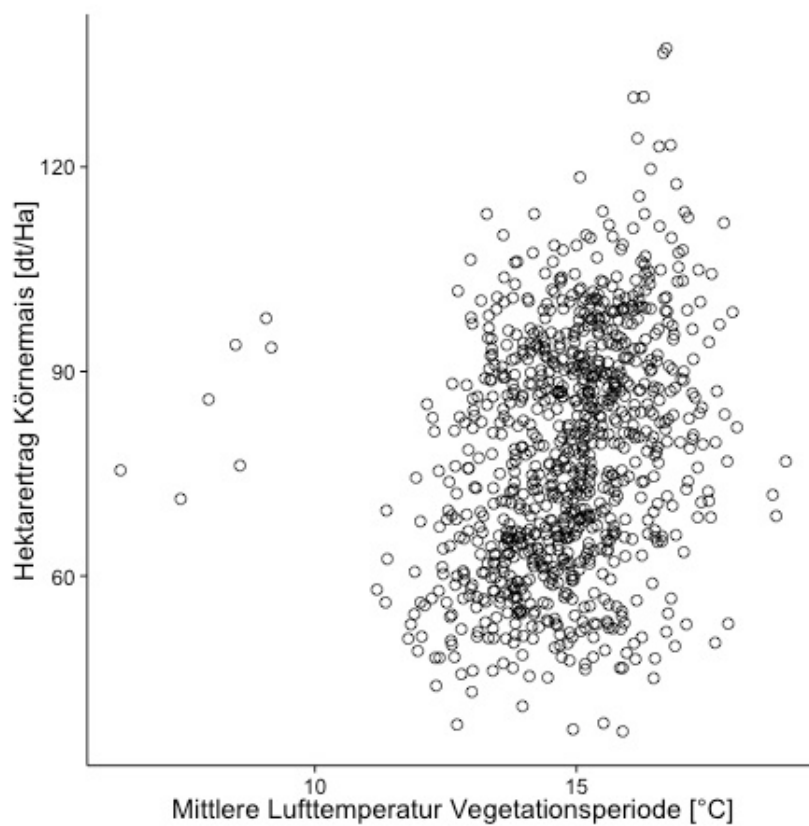


Abb. 5.6. Hektarertrag Körnermais aller Landkreise in Abhängigkeit von mittlerer Lufttemperatur in der Vegetationsperiode

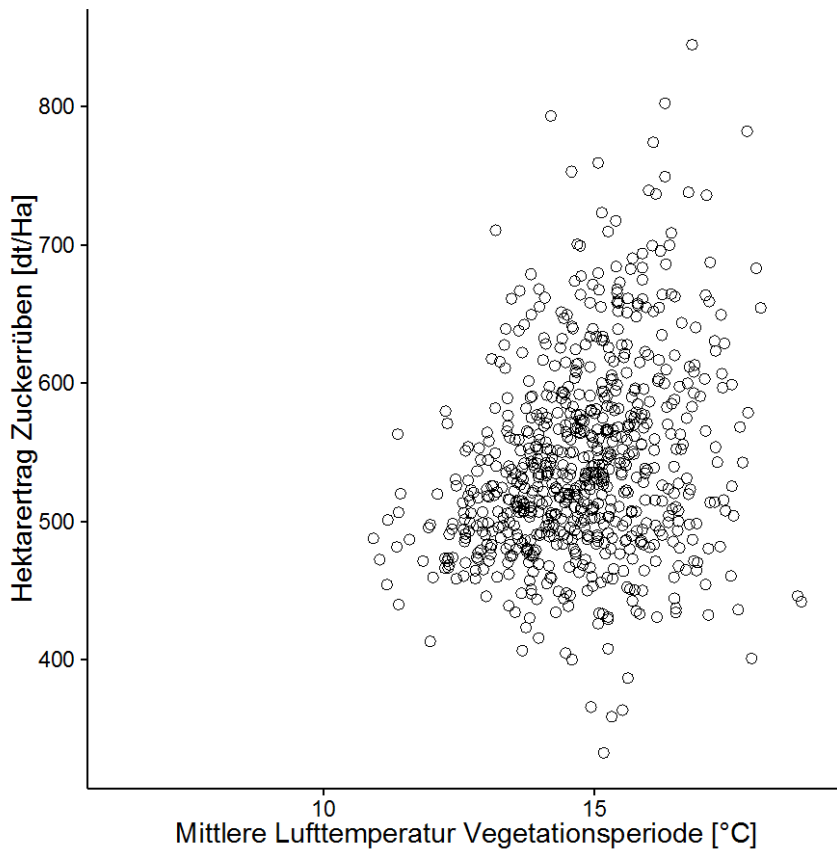


Abb. 5.7. Hektarertrag Zuckerrüben aller Landkreise in Abhängigkeit von mittlerer Lufttemperatur in der Vegetationsperiode

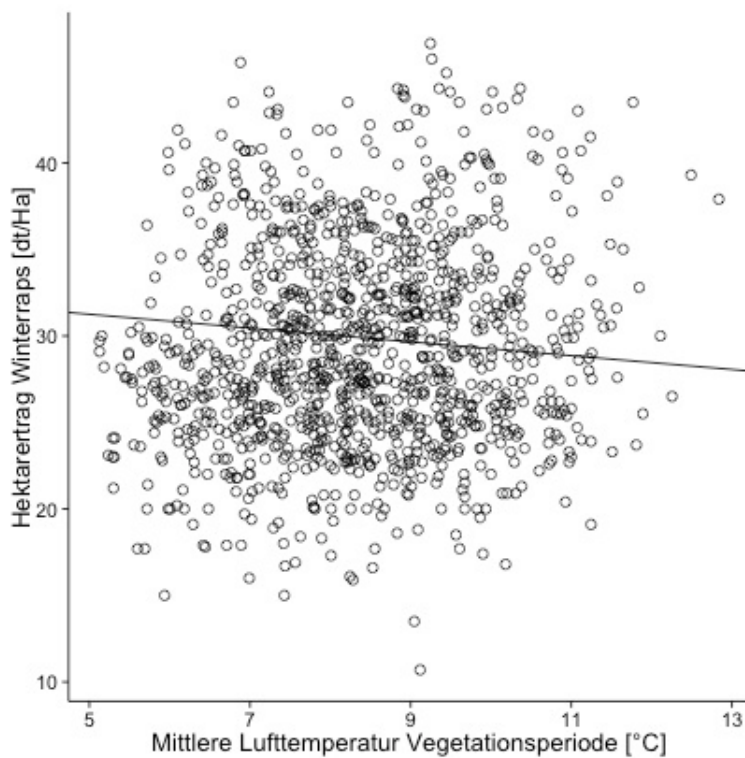


Abb. 5.8. Hektarertrag Winterraps aller Landkreise in Abhängigkeit von mittlerer Lufttemperatur in der Zeit auf dem Feld (Oktober-August)

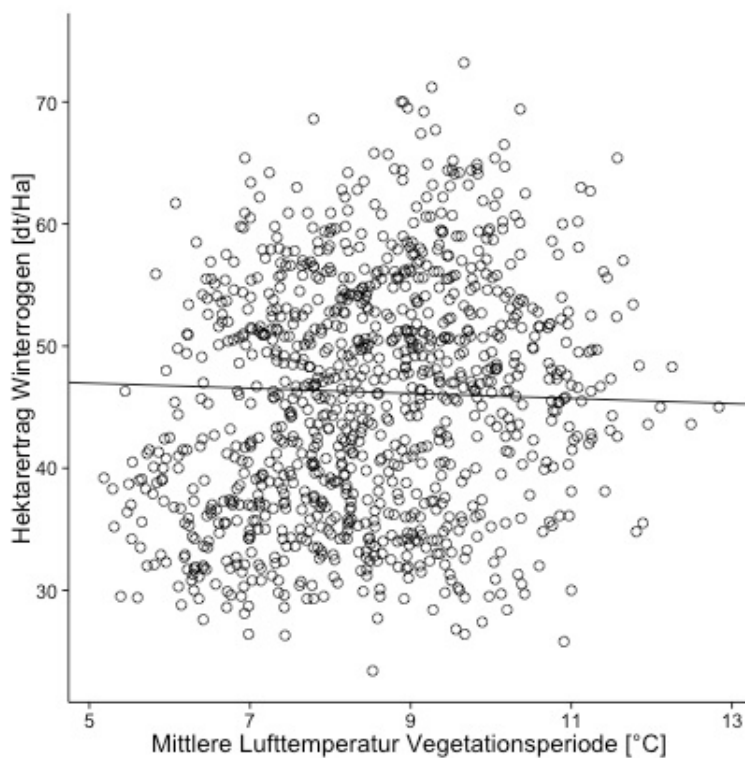


Abb. 5.9. Hektarertrag Winterroggen aller Landkreise in Abhängigkeit von mittlerer Lufttemperatur in der Zeit auf dem Feld (Oktober-August)

### 5.3.2 Niederschlag

Im Gegensatz zu Temperaturen konnte für fast alle Kulturen prinzipiell ein statistischer Zusammenhang zwischen der Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode gefunden werden, mit Ausnahme von Silomais und Winterraps (Tabelle 5.2., Abb. 5.10-5.18). Allerdings war die Steigung dieser Kurven ebenfalls sehr gering (siehe 5.3.1), und damit der Effekt von Niederschlag auf Ertrag. Es fällt bei der graphischen Betrachtung auch auf, dass sich allgemein die Niederschlagssummen von Oktober bis August zwischen 500 und 1000 mm häufen, die Kurve wird also unter anderem von Extremjahren geformt.



Tabelle 5.2. Statistik für die Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Hektarertrag der neun Testkulturen, aus einem *generalised least squares*-Modell der Form  $y = ax + c$  mit Korrelationsstruktur für das Probejahr (siehe Text in Methode).

Kultur	Kurvenparameter		Statistik		
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>DF</i>
<b>Winterweizen ***</b>	<b>-0,006</b>	<b>63,80</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>-9,37</b>	<b>1189</b>
<b>Wintergerste ***</b>	<b>-0,005</b>	<b>57,44</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>-8,56</b>	<b>1178</b>
<b>Sommergerste ***</b>	<b>-0,009</b>	<b>49,24</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>-9,19</b>	<b>1203</b>
<b>Kartoffeln **</b>	<b>-0,03</b>	<b>320,08</b>	<b>0,002</b>	<b>-3,10</b>	<b>1189</b>
Silomais	-0,005	457,84	0,62	-0,48	1196
<b>Körnermais ***</b>	<b>0,01</b>	<b>74,03</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>5,55</b>	<b>899</b>
<b>Zuckerrüben **</b>	<b>0,04</b>	<b>539,91</b>	<b>0,001</b>	<b>3,28</b>	<b>722</b>
Winterraps	-0,0008	30,57	0,07	-1,78	1117
<b>Winterroggen ***</b>	<b>-0,005</b>	<b>50,92</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>-8,74</b>	<b>1010</b>

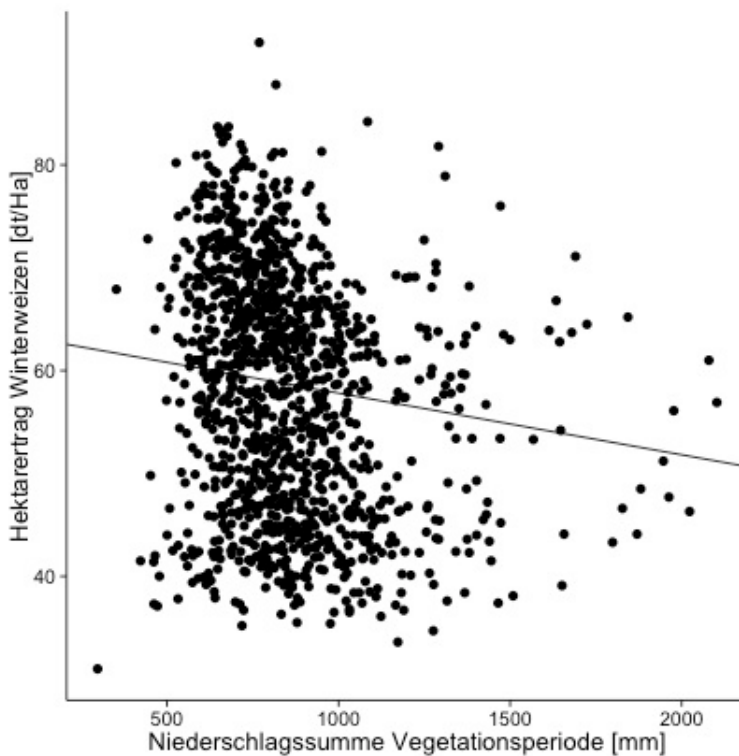


Abb. 5.10. Hektarertrag Winterweizen aller Landkreise in Abhängigkeit der Niederschlagssumme in der Zeit der Pflanzen auf dem Feld (Oktober-August)

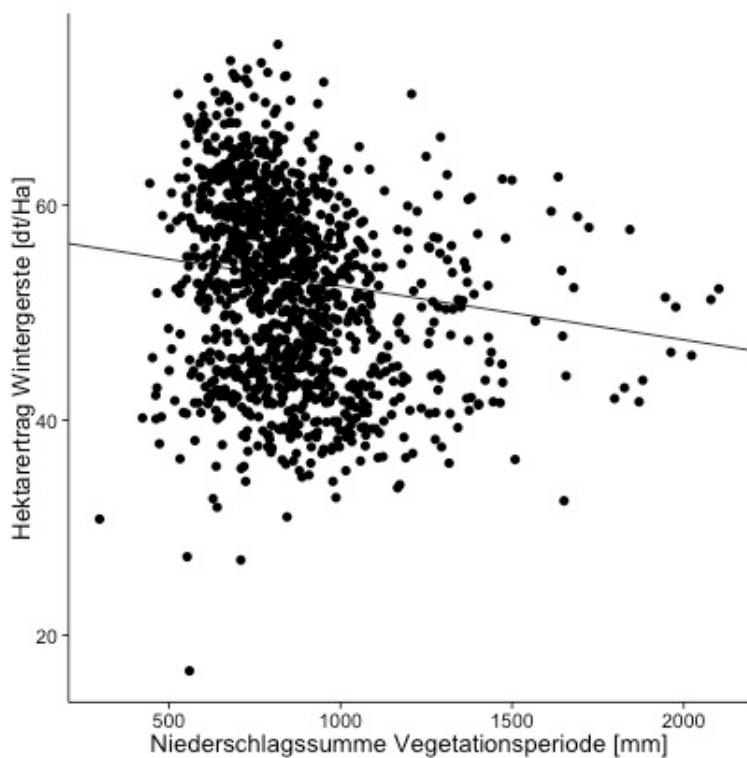


Abb. 5.11. Hektarertrag Wintergerste aller Landkreise in Abhängigkeit der Niederschlagssumme in der Zeit der Pflanzen auf dem Feld (Oktober-August)

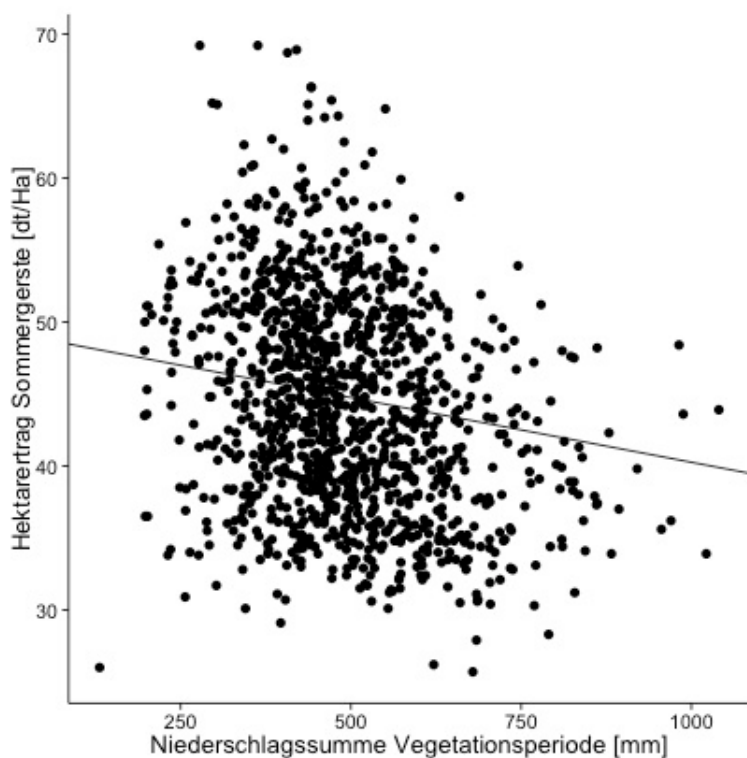


Abb. 5.12. Hektarertrag Sommergerste aller Landkreise in Abhängigkeit der Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode

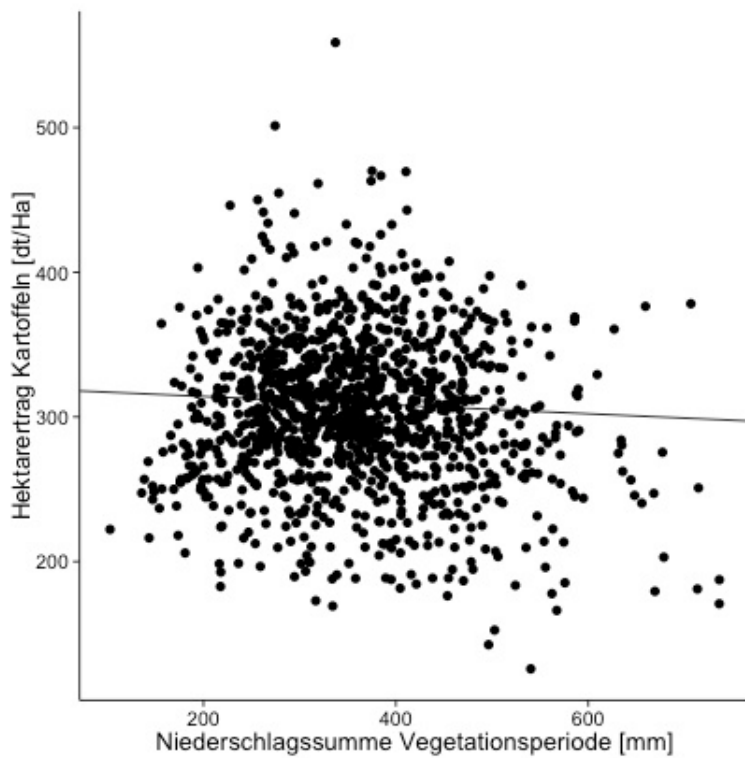


Abb. 5.13. Hektarertrag Kartoffeln aller Landkreise in Abhängigkeit der Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode

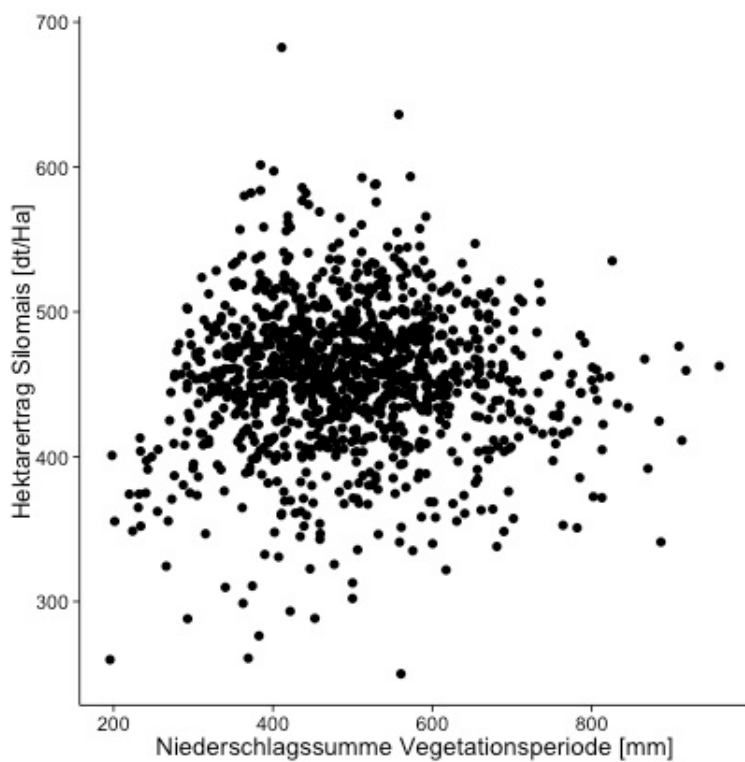


Abb. 5.14. Hektarertrag Silomais aller Landkreise in Abhängigkeit der Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode

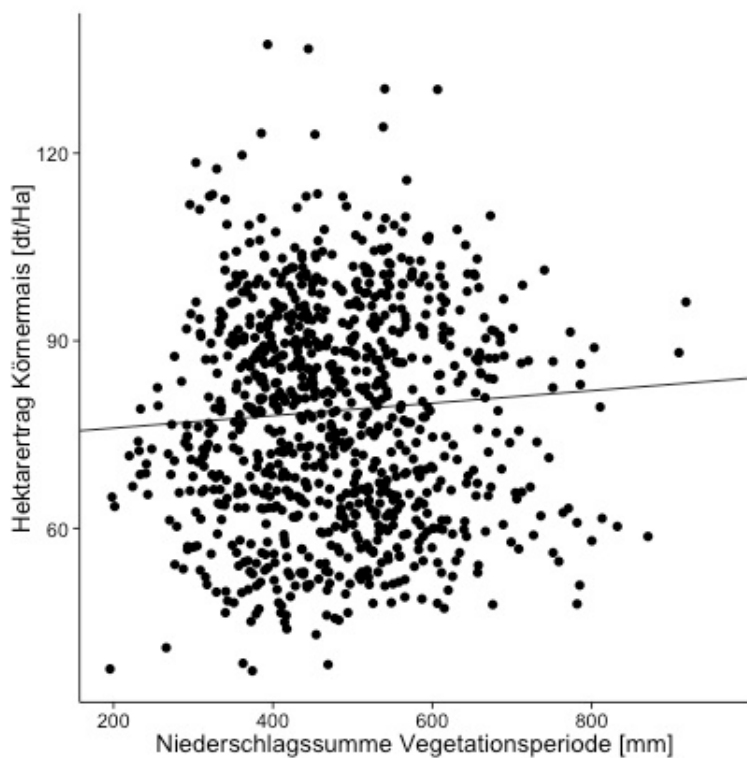


Abb. 5.15. Hektarertrag Körnermais aller Landkreise in Abhängigkeit der Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode

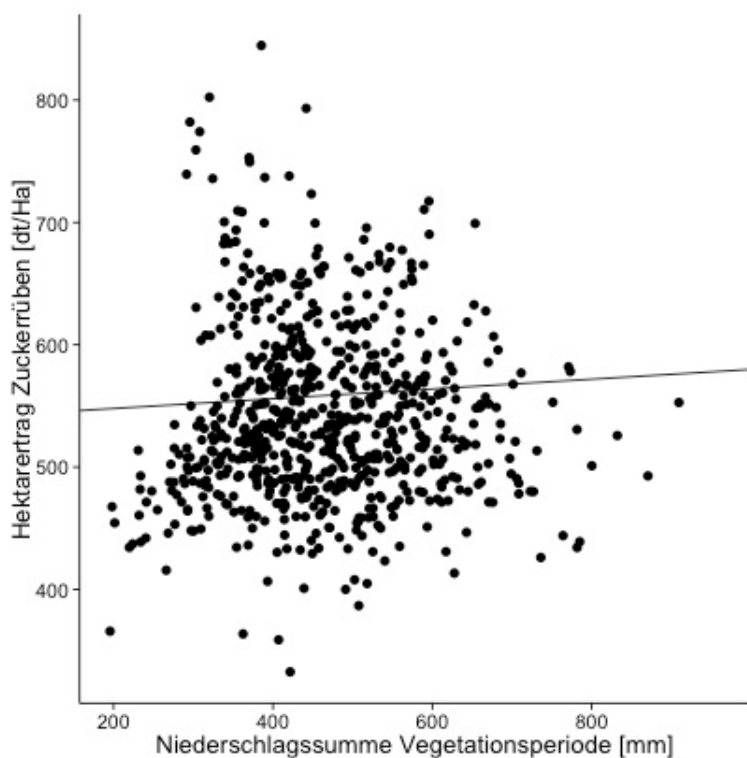


Abb. 5.16. Hektarertrag Zuckerrüben aller Landkreise in Abhängigkeit der Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode

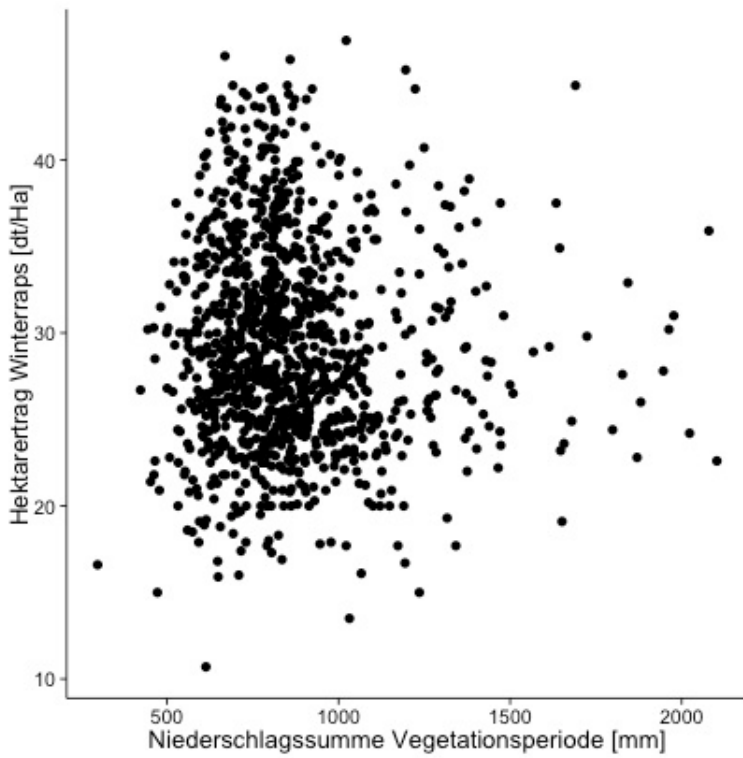


Abb. 5.17. Hektarertrag Winterraps aller Landkreise in Abhängigkeit der Niederschlagssumme in der Zeit der Pflanzen auf dem Feld (Oktober-August)

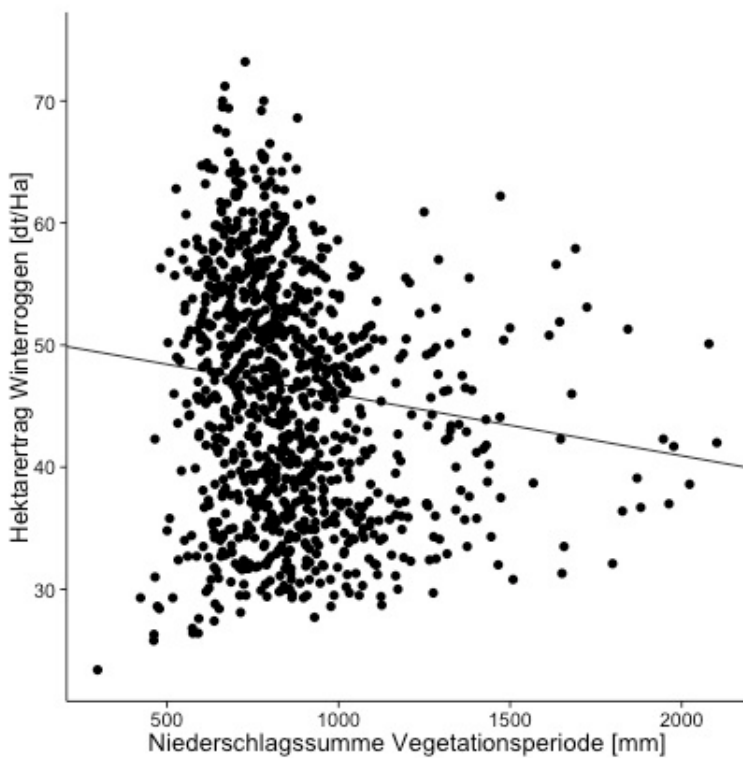


Abb. 5.18. Hektarertrag Winterroggen aller Landkreise in Abhängigkeit der Niederschlagssumme in der Zeit der Pflanzen auf dem Feld (Oktober-August)

## 5.4 Erträge der Feldfrüchte in Beziehung auf Klima unter Berücksichtigung der Bodenparameter

Setzt man die Bodenzahl mit dem Ausmaß der Ertragssteigerung (also über die Steigung der Regressionsgeraden Temperatur vs. Ertrag) in Beziehung, so zeigt sich, dass das in Kapitel 3 und 4 diskutierte Ausmaß der Ertragssteigerung mit dem Temperaturanstieg bei Winterweizen, Wintergerste und Sommergerste am niedrigsten in den Landkreisen mit hohen Bodenzahlen (also qualitativ „guten“ Böden) war, und am höchsten in Landkreisen mit niedrigen Bodenzahlen (Abb. 5.19-5.21, Tabelle 5.3.). Das ist ein überraschendes Ergebnis, sollte man doch erwarten, dass gute Böden dank ihrer Wasserspeicherfähigkeit höhere Temperaturen besser in Ertrag umsetzen können als schlechtere und damit auch trockenheitsgefährdetere Böden. Einen möglichen Erklärungsansatz bietet Abb. 5.26: Die guten und schlechten Böden sind nicht gleichmäßig in wärmeren und kälteren Landkreisen verteilt. Die kälteren Landkreise, in denen eine Temperaturerhöhung die Wachstumsbedingungen noch eher verbessern kann, haben die im Durchschnitt geringeren Bodenzahlen.

Dieses Muster konnte bei den übrigen Kulturen (Kartoffeln, Körnermais, Winterraps und Roggen) nicht beobachtet werden. Über die Gründe dafür kann nur spekuliert werden: Zum Beispiel besteht bei Kartoffeln nur in manchen Landkreisen eine Temperatur-Ertrags-Korrelation (Kap. 4.3.4), und Körnermais wird ohnehin nur im wärmeren Spektrum der Landkreise in signifikantem Umfang angebaut (Abb. und Tab. 4.13).

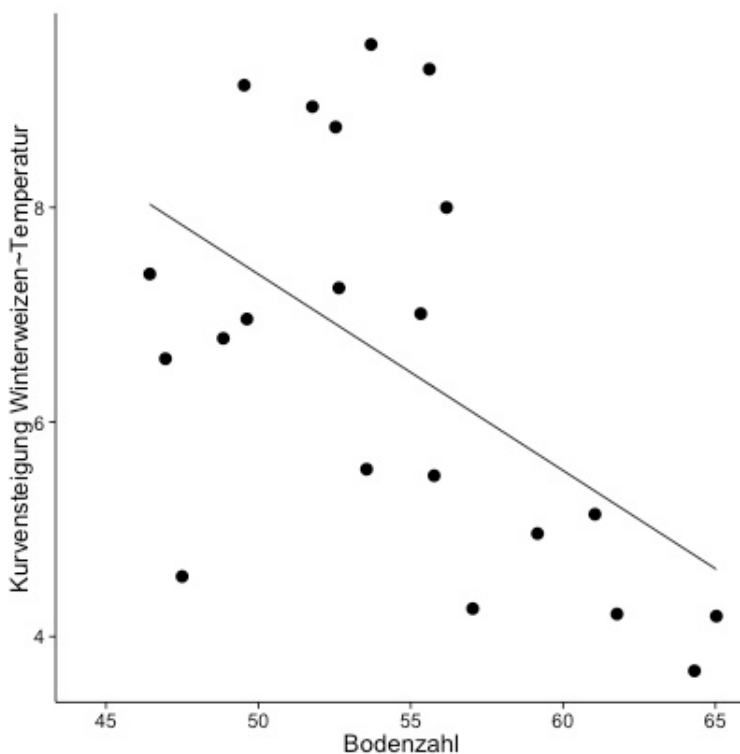


Abb. 5.19. Steigung der Korrelationskurve von Winterweizen mit Temperatur aus den einzelnen Landkreisen in Verhältnis zur mittleren Bodenzahl

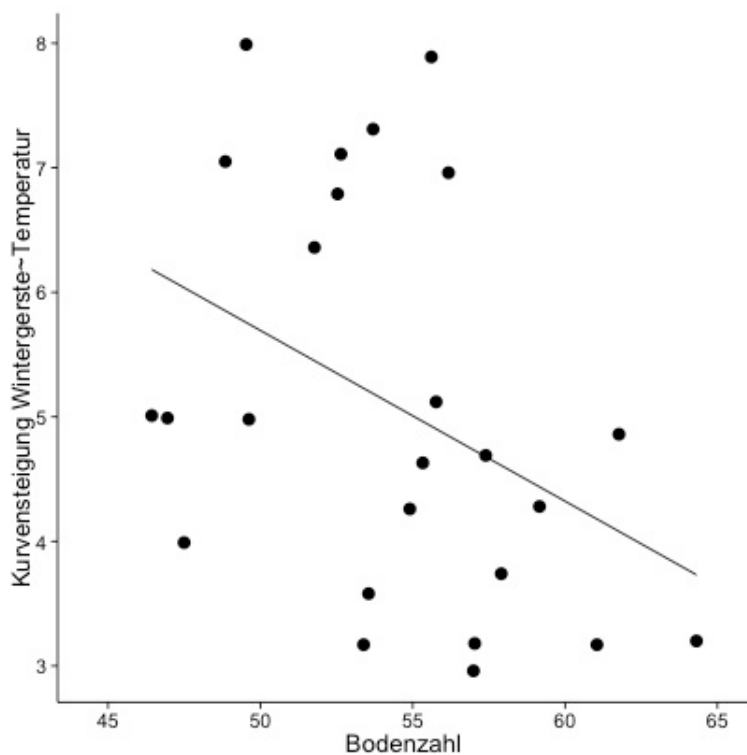


Abb. 5.20. Steigung der Korrelationskurve von Wintergerste mit Temperatur aus den einzelnen Landkreisen in Verhältnis zur mittleren Bodenzahl

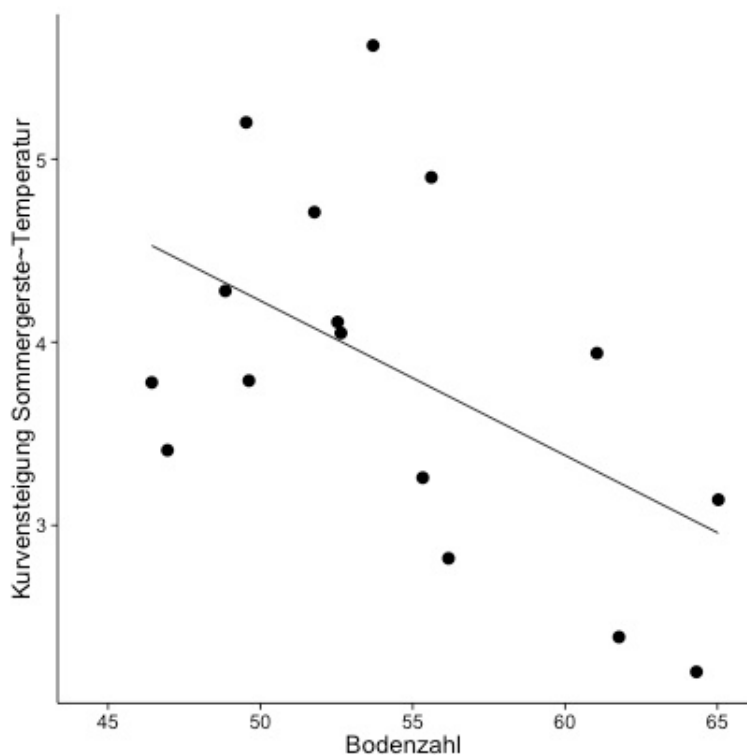


Abb. 5.21. Steigung der Korrelationskurve von Sommergerste mit Temperatur aus den einzelnen Landkreisen in Verhältnis zur mittleren Bodenzahl

Tabelle 5.3. Statistischer Zusammenhang zwischen der Kurvensteigung der Temperatur-Ertragskurve (als Maß für die Stärke der Ertragssteigerung mit Temperatur) und mittlerer Bodenzahl (nach Fläche gewichtet), Werte jeweils per Landkreis gemittelt.

Kultur	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>DF</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
<b>Winterweizen *</b>	<b>-0,18</b>	<b>16,25</b>	<b>0,01</b>	<b>-2,71</b>	<b>19</b>	<b>0,24</b>
<b>Wintergerste *</b>	<b>-0,13</b>	<b>12,54</b>	<b>0,05</b>	<b>-2,05</b>	<b>23</b>	<b>0,11</b>
<b>Sommergerste *</b>	<b>-0,08</b>	<b>8,44</b>	<b>0,04</b>	<b>-2,25</b>	<b>14</b>	<b>0,21</b>
Kartoffeln	-0,22	31,63	0,81	-0,25	4	<0,01
Körnermais	-0,13	17,31	0,45	-0,75	19	<0,01
Winterraps	-0,03	5,01	0,48	-0,71	12	<0,01
Roggen	-0,09	11,00	0,11	-1,64	22	0,06

Der Einfluss der bodenkundlichen Feuchtestufe war schwieriger zu ermitteln, da diese in Kategorien erhoben wird, und daher schwer numerisch zu quantifizieren ist. Da die Ertragsdaten auf Landkreisebene vorliegen, benötigen wir aber Landkreisdurchschnitte, die ohne diskrete Skala nicht leicht zu ermitteln sind. Abb. 5.22 zeigt den prozentualen Anteil der Landkreisfläche, der einer bestimmten Feuchtestufe zugeordnet wurde (nach Fläche gewichtet, der BÜK entnommen). Wir beschränken uns hier aufgrund der zeitintensiven Bearbeitung auf sieben Landkreise: Karlsruhe und Lörrach als Kreise mit geringer Steigung der Temperatur-Ertragskurve, Schwarzwald-Baar-Kreis und Alb-Donau-Kreis als Kreise mit hoher Steigung der Temperatur-Ertragskurve, und Rhein-Neckar-Kreis, Ortenaukreis und Breisgau-Hochschwarzwald als Kreise, in denen es zwar keine Temperatur-Ertragskorrelation gab, in denen aber Niederschlag und Ertrag korreliert waren (siehe Kapitel 4). Der Vergleich sollte Ähnlichkeiten in der groben Verteilung der Landkreisfläche in den Feuchtestufen zeigen, wenn etwa eine negative Korrelation von Ertrag und Niederschlag besonders auf frischen und feuchten Böden zu erwarten wäre (etwa aufgrund von Staunässe). Wir können allerdings in Abb. 5.22. keine solchen Gruppierungen feststellen.



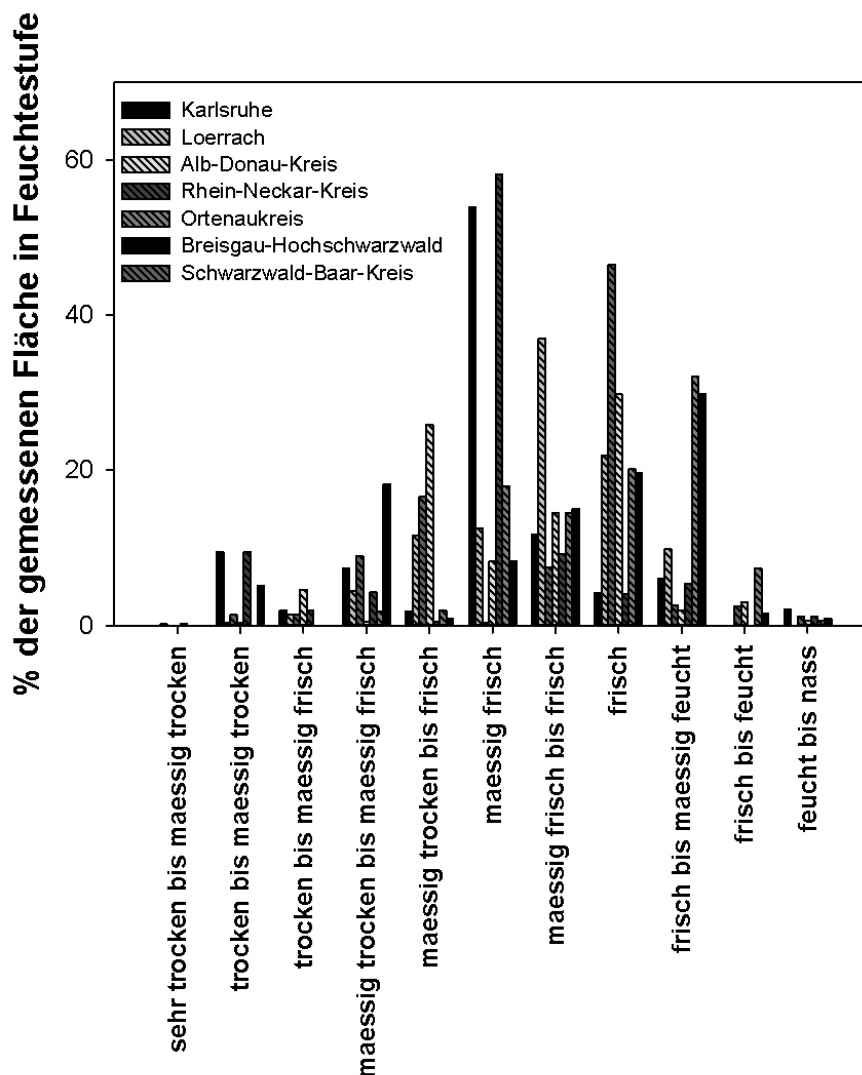


Abb. 5.22. Prozentualer Anteil der Landkreisfläche, der einzelnen bodenkundlichen Feuchtestufen zugeordnet ist, in den Landkreisen Karlsruhe, Lörrach, Schwarzwald-Baar-Kreis, Alb-Donau-Kreis, Ortenaukreis und Breisgau-Hochschwarzwald.

## 5.5 Erträge der Feldfrüchte in Beziehung auf Klima unter Berücksichtigung der klimatischen Anfangsbedingungen

Die Stärke der Ertragssteigerung von Winterweizen, Wintergerste und Sommergerste durch höhere Temperatur war direkt negativ mit der klimatischen Ausgangssituation eines Landkreises (Temperaturmittel 1973) verbunden. Je kälter der Landkreis zu Beginn des untersuchten Zeitraums, desto höher war der Effekt höherer Temperaturen auf den Getreideertrag (Tabelle 5.4., Abb. 5.23-5.25). Wie bei der Analyse für Bodenzahlen (s. oben) konnte dieses Muster für die übrigen Kulturarten (Kartoffeln, Körnermais, Winterraps und Roggen) nicht gefunden werden. Eine Interaktion bei multipler Regression zwischen klimatischer Ausgangssituation und Bodenzahl in Bezug auf Ertragssteigerung gab es allerdings nicht ( $P = 0,83$ ).

Tabelle 5.4. Statistischer Zusammenhang zwischen der Kurvensteigung der Temperatur-Ertragskurve (als Maß für die Stärke der Ertragssteigerung mit Temperatur) und der Jahresmitteltemperatur 1973.

Kultur	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>DF</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
<b>Winterweizen **</b>	<b>-1,16</b>	<b>15,73</b>	<b>0,001</b>	<b>-3,82</b>	<b>16</b>	<b>0,44</b>
<b>Wintergerste ***</b>	<b>-1,08</b>	<b>13,82</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>-5,27</b>	<b>19</b>	<b>0,57</b>
<b>Sommergerste *</b>	<b>-0,64</b>	<b>8,61</b>	<b>0,01</b>	<b>-2,99</b>	<b>12</b>	<b>0,38</b>
Kartoffeln	-1,67	31,62	0,85	-0,20	3	<0,01
Körnermais	-0,56	15,44	0,32	-1,01	15	<0,01
Winterraps	-0,45	6,35	0,07	-1,92	12	0,17
Roggen	-0,37	8,68	0,16	-1,44	19	0,05

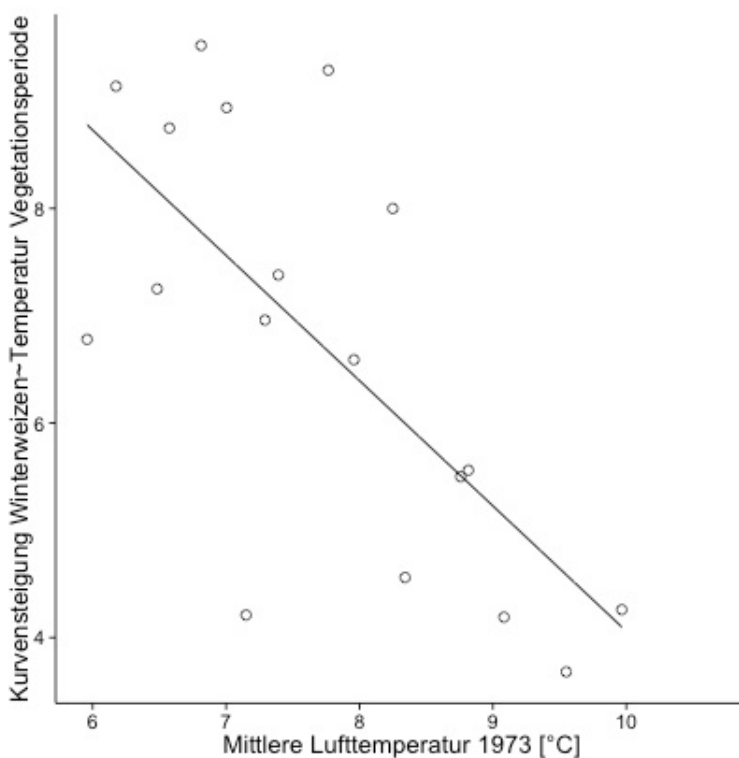


Abb. 5.23. Steigung der Korrelationskurve von Winterweizen mit Temperatur aus den einzelnen Landkreisen (als Maß für das Ausmaß der Temperatureinwirkung) in Verhältnis zur mittleren Jahrestemperatur 1973 (als Maß für die relativen klimatischen Ausgangsbedingungen in den einzelnen Landkreisen)

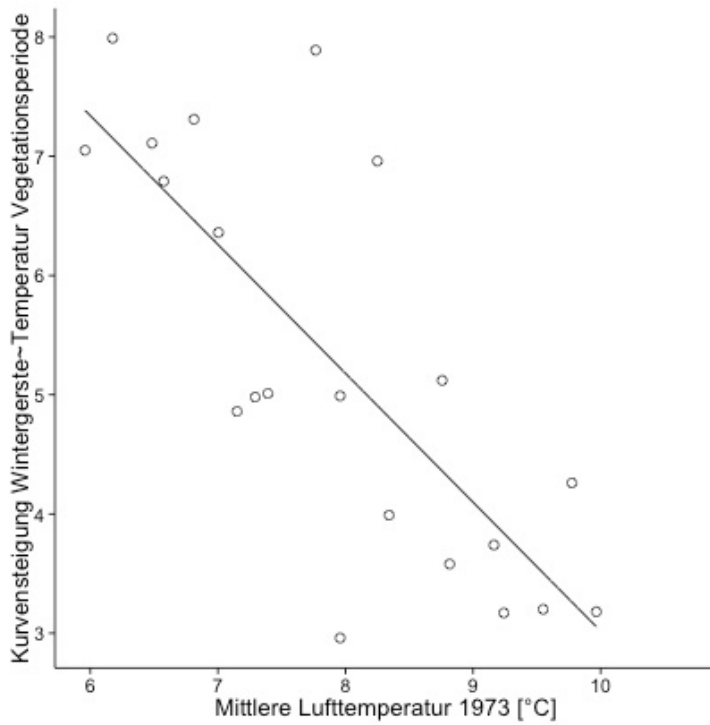


Abb. 5.24. Steigung der Korrelationskurve von Wintergerste mit Temperatur aus den einzelnen Landkreisen (als Maß für das Ausmaß der Temperatureinwirkung) in Verhältnis zur mittleren Jahrestemperatur 1973 (als Maß für die relativen klimatischen Ausgangsbedingungen in den einzelnen Landkreisen)

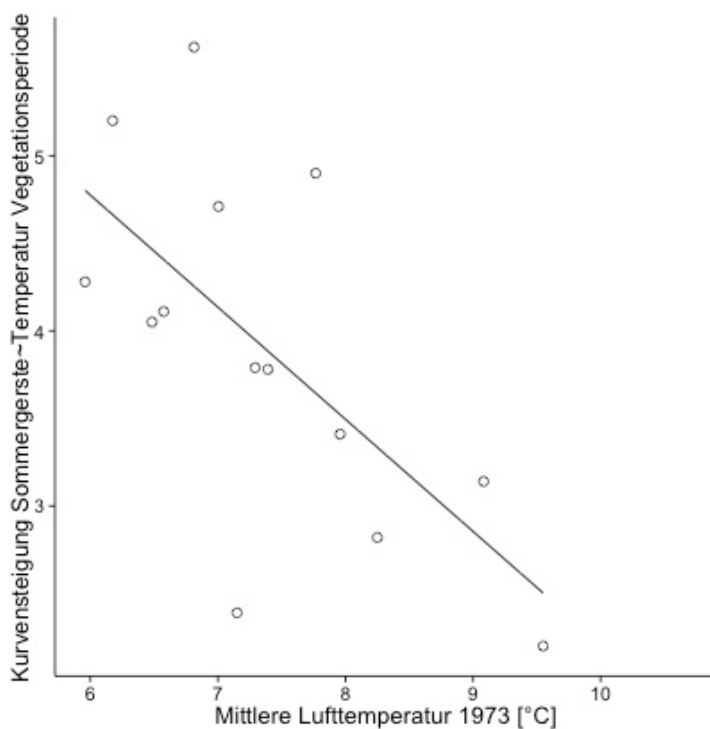


Abb. 5.25. Steigung der Korrelationskurve von Sommergerste mit Temperatur aus den einzelnen Landkreisen (als Maß für das Ausmaß der Temperatureinwirkung) in Verhältnis zur mittleren Jahrestemperatur 1973 (als Maß für die relativen klimatischen Ausgangsbedingungen in den einzelnen Landkreisen)

## 5.6 Diskussion

Die Temperatur-Ertrags-Beziehung konnte für die Getreidekulturen, für die in Kapitel 3 (Landesebene) und 4 (einzelne Landkreise) deutliche Temperaturabhängigkeit gezeigt wurde, nicht über alle Datenpunkte aller Landkreise gefunden werden. Es ist möglich, dass hier

- die Daten aus Landkreisen ohne diese Temperatur-Ertragskorrelation eine mögliche Korrelation verdecken
- sich die Datenwolke aus vielen einzelnen, überlagernden Korrelationskurven zusammensetzt, die in Summe keine gerade Linie bilden, dass also das Verhältnis von Ertrag und Temperatur landkreisspezifisch ist.

Zum Erklärungsansatz b) passt auch, dass die klimatische Ausgangssituation (Temperatur 1973) direkt mit der Form der Ertrags-Temperatur-Kurve zusammenhängt. Zwar ist auch die Bodenzahl direkt mit der Steigung der Temperatur-Ertrags-Kurve korreliert, aber das kann gut daran liegen, dass „schlechtere“ Böden eher in kälteren Landkreisen vorkommen (Abb. 5.26).

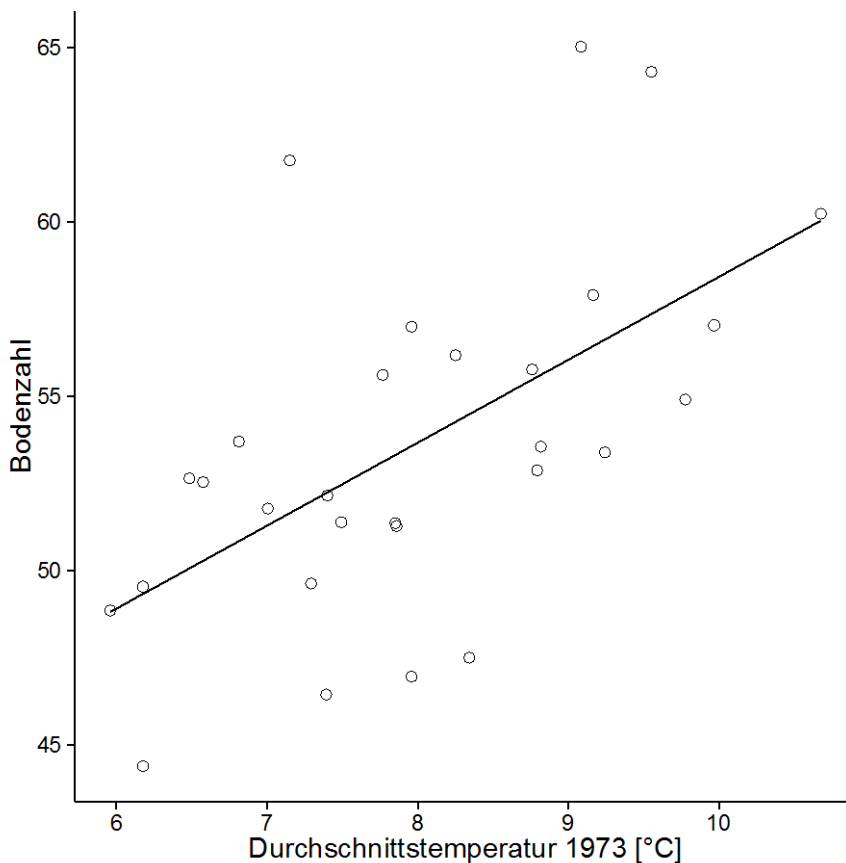


Abb. 5.26: Der Zusammenhang zwischen der klimatischen Ausgangssituation (hier durchschnittliche Temperatur 1973) und der Bodenqualität (hier Bodenzahl) in den einzelnen Landkreisen.

Im Fall von Zuckerrüben und Kartoffeln kommt hinzu, dass es hier klare Anbauswerpunkte im Land gibt. Zuckerrüben benötigen gut durchwurzelbare Böden mit guter Wasserversorgung, Kartoffeln benötigen „siebfähige Böden“ und die Nähe zu Verarbeitern (Butz, pers. Mitt.). Außerdem muss man damit rechnen, dass ein bestimmter (aber unbekannter) Anteil der Kulturen in manchen Jahren bewässert wird. Diese Gegebenheiten erschweren eine repräsentative statistische Analyse über die Landkreise.

Wir gehen davon aus, dass die eigentliche Temperatur-Ertragskurve in der Theorie wie die Konzeptkurve Abb. 5.27 aussieht: Höhere Temperaturen sind bis zu einem gewissen Schwellenwert ertragssteigernd, ab dem höhere Temperaturen keine Ertragssteigerung mehr bringen; das heißt, ab dem das Pflanzenwachstum nicht mehr temperaturlimitiert ist. An dieser Stelle werden dann andere Faktoren (Bearbeitung, Düngung, Sortenauswahl etc.) von größerer Bedeutung für den Ertrag als Temperatur. Ab einem zweiten Schwellenwert wirkt ein Temperaturanstieg dann ertragshemmend, weil die Schwelle zu Hitzestress überschritten wird (Hitze wird in Kapitel 6 besprochen). Auf unsere Studie bezogen heißt das, dass kältere Landkreise noch in der temperaturlimitierten Phase der Kurve liegen, während die wärmeren Landkreise bereits an der abflachenden Stelle der Kurve liegen können, also das Temperaturoptimum erreicht ist. Da alle signifikanten Temperaturkorrelationen positiv waren, gehen wir davon aus, dass der optimale Bereich der Durchschnittstemperatur in den letzten 50 Jahren in Baden-Württemberg noch nicht überschritten wurde. Ob einzelne Hitzeperioden, oder auch das Extremjahr 2003, bereits Aufschluss über den Schwellenwert zum Hitzestress geben können, wird in Kapitel 6 genauer betrachtet.

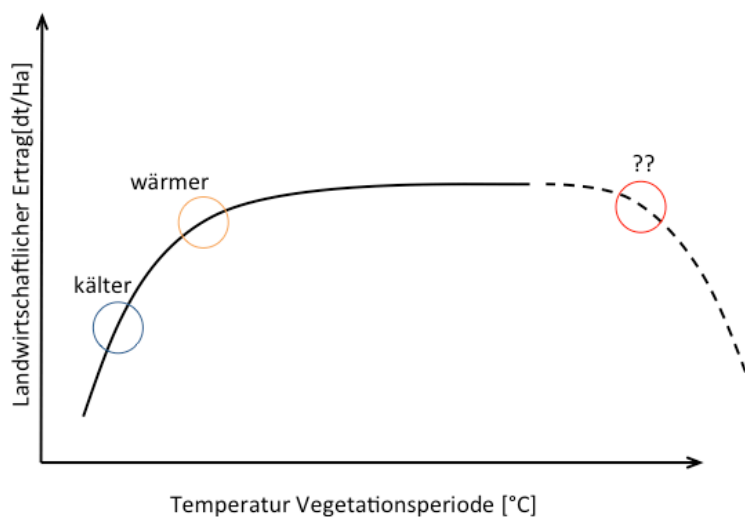


Abb. 5.27. Konzept-Kurve der theoretischen Auswirkung von Temperaturanstieg in der Vegetationsperiode auf landwirtschaftliche Erträge

# 6 Die Auswirkung von extremen klimatischen Ereignissen auf Erträge der Feldfrüchte in Baden-Württemberg 1974-2012

## 6.1 Einleitung

In den vorhergehenden Kapiteln wurde das allgemein bekannteste Symptom des Klimawandels, der Anstieg der durchschnittlichen Temperaturen, betrachtet. Es wird allerdings vor allem in den letzten Jahren vermehrt diskutiert, dass extreme klimatische Ereignisse (Hitze, Dürre, Überschwemmungen, etc.) stärker zu- bzw. abnehmen als durchschnittliche Temperaturen und größere Auswirkungen auf die Funktion von Ökosystemen und damit auch die Pflanzenproduktion, also landwirtschaftliche Erträge, haben können. In den nächsten Jahrzehnten werden eine Zunahme von Hitze- und eine Abnahme von Frosttagen erwartet; Niederschläge sollen ebenso „extremer“ werden. In Baden-Württemberg sehen wir seit Mitte des letzten Jahrhunderts bereits eine Zunahme der Anzahl von Hitzetagen, einhergehend mit einer Abnahme der Anzahl von Frosttagen. Im Extremjahr 2003 wurden extreme Hitze- und Trockenheitsperioden verzeichnet.

In diesem Kapitel geht es daher um die Frage, wie sich die Häufigkeit von extremen Ereignissen wie Hitze- und Trockenheitsperioden in den letzten 40 Jahren auf die Erträge der Feldfrüchte in Baden-Württemberg ausgewirkt hat. Es wird hierbei auch das Extremjahr 2003 in Kontrast zu den vorhergehenden Jahren betrachtet. Wir wollen insbesondere untersuchen, ob es einen statistischen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Hitzetage und Erträgen gab, und ob für die Ertragsrückgänge 2003 ein Schwellenwert für Hitzetoleranz der verschiedenen Kulturen gefunden werden kann. Mit anderen Worten versuchen wir hier die Stelle zu finden, an der die Konzeptkurve in Kapitel 5 (Abb. 5.27) abfällt. Gleichfalls versuchen wir, durch die Betrachtung der Trockenheits- und Nässeperioden den Einfluss von Niederschlägen auf Erträge genauer zu untersuchen. Wir haben in vorhergehenden Kapiteln besprochen, dass Niederschläge alleine (in der Jahressumme) statistisch wenig Einfluss auf die Erträge hatten. Als einen möglichen Grund hierfür haben wir angeführt, dass die Verteilung der Niederschläge möglicherweise eine größere Rolle für die Ertragsbildung spielt als ihre Summe. In diesem Kapitel untersuchen wir also auch die Zusammenhänge zwischen Trockenheit/Nässe (also Niederschlagsmustern, statt Niederschlagssummen) und Erträgen.

## 6.2 Methode

Als Datengrundlage und Arbeitserleichterung für den Großteil dieses Kapitels wurden uns freundlicherweise von der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle des Deutschen Wetterdienstes Daten zu extremen Wetterlagen von 1972-2013 zur Verfügung gestellt. Sie wurden im Rahmen des Projekts „Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten des Risikomanagements“ erhoben. In diesem Datensatz liegen die Anzahl der Tage mit Wetterereignissen, die einen bestimmten Schwellenwert über- bzw. unterschreiten, in Monatsauflösung vor (z. B. die Anzahl der Tage über 30 °C im Mai, etc.). Es wurden für verschiedene Wetterstationen in Baden-Württemberg (die auch für die Analyse der Durchschnittsdaten in den anderen Kapiteln benutzt wurden) jeweils die Anzahl der Tage mit Frost ( $T < -10$  °C,  $T < -15$  °C,  $T < -20$  °C), Hitze ( $T > 28$  °C,  $T > 30$  °C,  $T > 32$  °C), Trockenheit (nFK in Sand oder Lehm  $< 40\%$ , nFK in Sand oder Lehm  $< 50\%$ ) und Nässe (nFK in Sand oder Lehm  $> 99\%$ ) zur Verfügung gestellt. Hierbei wurden diejenigen

Stationen ausgewählt, in denen die gesamte Zeitspanne (1973-2013) mit Messwerten abgedeckt ist. In den Landkreisen, in denen mehr als eine Station zur Verfügung stand, wurde der Mittelwert aus den Stationen gebildet.

Für die Monate, in denen Hitze/Frost relevant waren (also in denen Frost oder Hitzeereignisse auftraten) wurden die Hitze/Frosttage pro Monat ermittelt. Wir wählten hier die niedrigsten Schwellenwerte (28 °C für Hitze, -10 °C für Frost), da Tage mit Temperaturen über bzw. unter diesen Schwellenwerten in den meisten Landkreisen so selten waren, dass klare Muster schwer erkennbar wären. Daraufhin wurden die so ausgewählten Daten nach Landkreis gemittelt, so dass ein Landesmittel zustande kam. Ebenso wurden Ertrags- und Klimadaten gemittelt, da in dieser Analyse nicht alle Landkreise beachtet werden konnten (z.B. fehlen diejenigen Landkreise, in denen keine durchgehenden Klimadaten von 1973-2013 vorhanden sind). Auch aus Zeitgründen erfolgte hier keine Korrelation auf der Ebene der einzelnen Landkreise, es wurden also die gemittelten Daten aus allen Landkreisen zusammen analysiert. Die Anzahl der Extremtage wurde dann mit einem einfachen linearen Modell mit den Erträgen der untersuchten Kulturarten korreliert.

Im Anschluss wurde dieses einfache Modell im Fall von Hitze und Frost durch die Durchschnittstemperatur während der definierten Vegetationsperiode (s. Kapitel 3-4) der einzelnen Kulturarten erweitert; es wurde hier eine multiple Regression mit Frost- bzw. Hitzetagen, Temperatur, und Frost/Hitzetagen\*Temperatur Interaktionsterm durchgeführt, um festzustellen, ob beispielsweise Hitzetage weniger Effekt hatten, wenn sie in einem sonst weniger heißen Sommer vorkamen, das heißt, der Hitzestress nur an einzelnen Tagen und an diesen möglicherweise nur einige Stunden vorhanden war. Dieselbe Analyse wurde allerdings für Trockenheit/Nässe nicht durchgeführt, da wir davon ausgehen, dass der Auffüllungsgrad der nFK an den einzelnen Stationen aus den Niederschlägen modelliert war. Daher ergibt sich die Anzahl der Nässe-/Trockentage aus der Niederschlagssumme, insofern können diese beiden Faktoren nicht zusammen verwendet werden.

Für die Analyse des extremen Hitzejahres 2003 bildeten wir zuerst den Mittelwert für Temperaturen, Niederschläge, Hitze- bzw. Frosttage, Trocken- und Nässetage für 1998-2002. Hierbei handelt es sich im Gegensatz zu der vorhergehenden Analyse um die Summe aller extremen Wetterereignisse des Jahres, statt um Monatswerte. Im Anschluss wurde die Differenz zwischen 2003 und dem vorhergehenden Fünfjahresmittel gebildet (also die Temperaturdifferenz, Zahl der Mehrtage über 28 °C, Ertragsunterschiede, etc.). Die Ertragseinbrüche 2003 im Vergleich zu dem Fünfjahresmittel davor wurde dann mit einer linearen Regression gegen die Mehranzahl der Hitzetage ( $T < 28$  °C,  $T < 30$  °C,  $T < 32$  °C) korreliert. Aus Zeitgründen wurde diese Analyse lediglich für Winterweizen, Sommergerste, Körnermais und Silomais durchgeführt.

### **6.3 Die direkte Auswirkung extremer Ereignisse auf den Ertrag**

In einfacher linearer Regression konnte so gut wie kein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Tage mit extremen Wetterereignissen und Winterweizenerträgen gefunden werden (Tab. 6.1). Lediglich die Anzahl der Hitzetage über 28 °C im Mai wirkte sich signifikant positiv auf die Erträge aus ( $P = 0,02$ ), aber selbst hier war der  $R^2$ -Wert für Hitzetage allein nur bei 0,09.

Die Erträge der Wintergerste waren ebenfalls nur mit der Anzahl der Hitzeereignisse über 28 °C im Mai signifikant positiv korreliert (Tabelle 6.2).

Der Ertrag der Sommergerste war positiv korreliert mit der Anzahl der Hitzetage im Mai, mit der Anzahl der Hitzetage über 28 °C im August und mit der Anzahl von Tagen, an denen die nFK unter 40% lag (Tab. 6.3). Die Augustkorrelation könnte mit dem Wetter zur Ernte zu tun haben. Es gab aber auch eine negative Korrelation zwischen den Sommergerste-Erträgen und den Nässeereignissen im Mai und Juni.

Der Ertrag von Silomais war negativ mit der Anzahl der Tage über 28 °C im Juli korreliert und ebenso negativ mit der Anzahl der Trockentage (nFK < 40%) im August (Tab. 6.4). Die Zahl an anderen extremen Wetterereignissen wies keine signifikante Korrelation mit dem Silomaisertrag auf.

Ähnlich wie bei den oben beschriebenen Getreidekulturen war der Ertrag von Körnermais positiv mit der Anzahl an Tagen über 28 °C im Mai und mit der Anzahl an Trockentagen (nFK < 40%) im Mai und Juni korreliert. Andere Extremwetterereignisse waren nicht korreliert.

Tabelle 6.1. Ergebnisse einfacher linearer Regression von Winterweizen mit der Anzahl der Tage mit extremen klimatischen Verhältnissen in einzelnen Monaten

Extremwert	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	P	t	DF	R <sup>2</sup>
Frost <-10°C November	-1,30	76,11	0,73	-0,33	38	<0,01
Frost <-10°C Dezember	-0,64	76,81	0,49	-0,68	38	<0,01
Frost <-10°C Januar	-0,23	76,45	0,64	-0,47	38	<0,01
Frost <-10°C Februar	0,37	74,81	0,48	0,70	38	<0,01
Frost <-10°C März	1,61	74,99	0,33	0,98	38	<0,01
Frost <-10°C April	-76,69	76,10	0,38	-0,88	38	<0,01
<b>Hitze &gt; 28°C Mai *</b>	<b>3,98</b>	<b>72,53</b>	<b>0,02</b>	<b>2,29</b>	<b>38</b>	<b>0,09</b>
Hitze > 28°C Juni	0,37	74,55	0,51	0,66	38	<0,01
Hitze > 28°C Juli	0,29	74,00	0,44	0,76	38	<0,01
Hitze > 28°C August	0,16	74,82	0,69	0,39	38	<0,01
Trockenheit Mai (nFK Lehm < 40%)	3,27	75,20	0,17	1,38	38	0,02
Trockenheit Juni (nFK Lehm < 40%)	0,39	74,61	0,39	0,85	38	<0,01
Trockenheit Juli (nFK Lehm < 40%)	0,03	75,45	0,89	0,13	38	<0,01
Trockenheit August (nFK Lehm < 40%)	-0,11	76,49	0,67	-0,42	38	<0,01
Nässe Mai (nFK Lehm > 99%)	-0,04	76,22	0,84	-0,19	38	<0,01
Nässe Juni (nFK Lehm > 99%)	-0,03	75,93	0,91	-0,10	38	<0,01
Nässe Juli (nFK Lehm > 99%)	-0,27	77,01	0,42	-0,80	38	<0,01
Nässe August (nFK Lehm > 99%)	-0,09	76,29	0,78	-0,27	38	<0,01



Tabelle 6.2. Ergebnisse einfacher linearer Regression von Wintergerste mit der Anzahl der Tage mit extremen klimatischen Verhältnissen in einzelnen Monaten

Extremwert	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>DF</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
Frost <-10°C November	-1,68	53,07	0,57	-0,57	38	<0,01
Frost <-10°C Dezember	-0,19	52,92	0,78	-0,26	38	<0,01
Frost <-10°C Januar	-0,21	53,22	0,58	-0,54	38	<0,01
Frost <-10°C Februar	-0,11	52,87	0,78	-0,27	38	<0,01
Frost <-10°C März	-0,09	52,64	0,94	-0,07	38	<0,01
Frost <-10°C April	-107,84	53,09	0,10	-1,66	38	0,04
<b>Hitze &gt; 28°C Mai</b>	<b>3,07</b>	<b>50,12</b>	<b>0,02</b>	<b>2,31</b>	<b>38</b>	<b>0,10</b>
Hitze > 28°C Juni	0,47	51,11	0,27	1,09	38	<0,01
Hitze > 28°C Juli	0,23	51,21	0,43	0,79	38	<0,01
Trockenheit Mai (nFK Lehm < 40%)	2,74	52,15	0,13	1,52	38	0,03
Trockenheit Juni (nFK Lehm < 40%)	0,64	50,76	0,06	1,89	38	0,06
Trockenheit Juli (nFK Lehm < 40%)	0,21	51,00	0,31	1,02	38	<0,01
Trockenheit August (nFK Lehm < 40%)	0,13	51,73	0,52	0,63	38	<0,01
Nässe Mai (nFK Lehm > 99%)	-0,28	55,96	0,07	-1,84	38	0,05
Nässe Juni (nFK Lehm > 99%)	-0,28	54,25	0,21	-1,25	38	0,01
Nässe Juli (nFK Lehm > 99%)	-0,27	53,87	0,29	-1,07	38	<0,01
Nässe August (nFK Lehm > 99%)	-0,37	54,78	0,14	-1,48	38	0,03

Tabelle 6.3. Ergebnisse einfacher linearer Regression von Sommergerste mit der Anzahl der Tage mit extremen klimatischen Verhältnissen in einzelnen Monaten

Extremwert	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>DF</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
<b>Hitze &gt; 28°C Mai</b>	<b>2,80</b>	<b>42,54</b>	<b>0,01</b>	<b>2,51</b>	<b>38</b>	<b>0,12</b>
Hitze > 28°C Juni	0,55	43,07	0,13	1,52	38	0,03
Hitze > 28°C Juli	0,03	44,58	0,88	0,15	38	<0,01
<b>Hitze &gt; 28°C August</b>	<b>0,52</b>	<b>41,94</b>	<b>0,05</b>	<b>2,00</b>	<b>38</b>	<b>0,07</b>
Trockenheit Mai (nFK Lehm < 40%)	1,96	44,48	0,21	1,27	38	0,01
<b>Trockenheit Juni (nFK Lehm &lt; 40%)</b>	<b>0,68</b>	<b>42,85</b>	<b>0,01</b>	<b>2,43</b>	<b>38</b>	<b>0,11</b>
Trockenheit Juli (nFK Lehm < 40%)	0,25	42,91	0,15	1,44	38	0,02
Trockenheit August (nFK Lehm < 40%)	0,21	43,48	0,24	1,18	38	0,01
<b>Nässe Mai (nFK Lehm &gt; 99%)</b>	<b>-0,28</b>	<b>48,13</b>	<b>0,03</b>	<b>-2,18</b>	<b>38</b>	<b>0,08</b>
<b>Nässe Juni (nFK Lehm &gt; 99%)</b>	<b>-0,39</b>	<b>47,10</b>	<b>0,04</b>	<b>-2,12</b>	<b>38</b>	<b>0,08</b>
Nässe Juli (nFK Lehm > 99%)	-0,24	45,95	0,26	-1,13	38	<0,01
Nässe August (nFK Lehm > 99%)	-0,28	46,48	0,18	-1,34	38	0,01

Tabelle 6.4. Ergebnisse einfacher linearer Regression von Silomais mit der Anzahl der Tage mit extremen klimatischen Verhältnissen in einzelnen Monaten

Extremwert	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>DF</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
Frost <-10°C April	163,18	428,34	0,48	0,70	38	<0,01
Hitze > 28°C Mai	8,51	422,23	0,07	1,80	38	0,05
Hitze > 28°C Juni	-2,22	436,11	0,13	-1,52	38	0,03
<b>Hitze &gt; 28°C Juli</b>	<b>-2,66</b>	<b>444,59</b>	<b>0,007</b>	<b>-2,82</b>	<b>38</b>	<b>0,15</b>
Hitze > 28°C August	-1,09	435,04	0,33	-0,98	38	<0,01
Trockenheit Mai (nFK Lehm < 40%)	0,19	429,05	0,97	0,03	38	<0,01
Trockenheit Juni (nFK Lehm < 40%)	-0,66	431,00	0,58	-0,54	38	<0,01
Trockenheit Juli (nFK Lehm < 40%)	-1,32	438,86	0,06	-1,86	38	0,05
<b>Trockenheit August (nFK Lehm &lt; 40%)</b>	<b>-1,75</b>	<b>440,08</b>	<b>0,01</b>	<b>-2,57</b>	<b>38</b>	<b>0,12</b>
Nässe Mai (nFK Lehm > 99%)	-0,36	433,30	0,52	-0,64	38	<0,01
Nässe Juni (nFK Lehm > 99%)	-0,32	430,98	0,68	-0,40	38	<0,01
Nässe Juli (nFK Lehm > 99%)	-0,30	430,49	0,73	-0,33	38	<0,01
Nässe August (nFK Lehm > 99%)	1,27	421,64	0,15	1,46	38	0,02

Tabelle 6.5. Ergebnisse einfacher linearer Regression von Körnermais mit der Anzahl der Tage mit extremen klimatischen Verhältnissen in einzelnen Monaten

Extremwert	Kurvenparameter		Statistik			
	Steigung (a)	Abschnitt (c)	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>DF</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
Frost <-10°C April	-58,69	108,01	0,74	-0,33	38	<0,01
<b>Hitze &gt; 28°C Mai</b>	<b>11,32</b>	<b>98,62</b>	<b>0,001</b>	<b>3,50</b>	<b>38</b>	<b>0,22</b>
Hitze > 28°C Juni	0,93	104,79	0,41	0,82	38	<0,01
Hitze > 28°C Juli	-0,67	111,66	0,39	-0,86	38	<0,01
Hitze > 28°C August	0,99	102,33	0,24	1,18	38	0,01
<b>Trockenheit Mai (nFK Lehm &lt; 40%)</b>	<b>15,87</b>	<b>105,15</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>3,85</b>	<b>38</b>	<b>0,26</b>
<b>Trockenheit Juni (nFK Lehm &lt; 40%)</b>	<b>2,46</b>	<b>100,68</b>	<b>0,005</b>	<b>2,93</b>	<b>38</b>	<b>0,16</b>
Trockenheit Juli (nFK Lehm < 40%)	0,06	107,26	0,90	0,11	38	<0,01
Trockenheit August (nFK Lehm < 40%)	-0,23	109,22	0,67	-0,42	38	<0,01
Nässe Mai (nFK Lehm > 99%)	-0,65	115,30	0,12	-1,56	38	0,03
Nässe Juni (nFK Lehm > 99%)	-0,55	111,04	0,35	-0,94	38	<0,01
Nässe Juli (nFK Lehm > 99%)	-0,40	109,64	0,55	-0,60	38	<0,01
Nässe August (nFK Lehm > 99%)	0,12	107,04	0,86	0,17	38	<0,01

## 6.4 Erträge in Abhängigkeit von Temperatur und extremen Temperaturereignissen (Frost und Hitze) und deren Interaktion

### 6.4.1 Frost

Die Anzahl der Frosttage unter  $-10\text{ °C}$  hatte auch in Interaktion mit Temperatur keinen Einfluss auf die Erträge der fünf untersuchten Kulturen (Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Silomais, Körnermais), und zwar weder im Vorwinter (relevant nur für Winterweizen und Wintergerste, Tab. 6.6-6.13) noch im Frühjahr (März und April; Tab. 6.14.-6.17).

Tabelle 6.6. Statistische Ergebnisse aus multipler Regression von durchschnittlicher Temperatur während der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und Novemberfrost ( $T < -10\text{ °C}$ ) mit Hektarerträgen der einzelnen Kulturen. Nicht relevante Kulturen (die nicht im Vorherbst ausgebracht werden) sind nicht berücksichtigt (und mit NA gekennzeichnet)

	Temperatur			Frost November ( $<-10\text{ °C}$ )			Interaktionsterm (Temperatur*Frost)		
	P	t	DF	P	t	DF	P	t	DF
Winterweizen	<b>0,05</b>	<b>1,99</b>	<b>36</b>	0,77	0,28	36	0,77	-0,29	36
Wintergerste	<b>0,008</b>	<b>2,79</b>	<b>36</b>	0,48	-0,70	36	0,49	0,69	36
Sommergerste	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Silomais	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Körnermais	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Tabelle 6.7. Kurvenparameter aus multipler Regression von durchschnittlicher Temperatur während der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und Novemberfrost ( $T < -10\text{ °C}$ ) mit Hektarerträgen der einzelnen Kulturen. Nicht relevante Kulturen (die nicht im Vorherbst ausgebracht werden) sind nicht berücksichtigt (und mit NA gekennzeichnet)

	Temperatur		Frost November ( $<-10\text{ °C}$ )		Interaktionsterm	
	Steigung	Abschnitt	Steigung	Abschnitt	Steigung	Abschnitt
Winterweizen	<b>4,74</b>	<b>35,76</b>	11,79	35,76	-1,44	35,76
Wintergerste	<b>4,58</b>	<b>14,11</b>	-20,03	14,11	2,33	14,11
Sommergerste	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Silomais	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Körnermais	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Tabelle 6.8. Statistische Ergebnisse aus multipler Regression von durchschnittlicher Temperatur während der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und Dezemberfrost ( $T < -10\text{ °C}$ ) mit Hektarerträgen der einzelnen Kulturen. Nicht relevante Kulturen (die nicht im Vorherbst ausgebracht werden) sind nicht berücksichtigt (und mit NA gekennzeichnet)

	Temperatur			Frost Dezember ( $<-10\text{°C}$ )			Interaktionsterm		
	P	t	DF	P	t	DF	P	t	DF
Winterweizen	0,52	0,64	36	0,09	-1,68	36	0,10	1,67	36
Wintergerste	<b>0,04</b>	<b>2,05</b>	<b>36</b>	0,14	-1,49	36	0,13	1,54	36
Sommergerste	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Silomais	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Körnermais	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Tabelle 6.9. Kurvenparameter aus multipler Regression von durchschnittlicher Temperatur während der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und Dezemberfrost ( $T < -10\text{ °C}$ ) mit Hektarerträgen der einzelnen Kulturen. Nicht relevante Kulturen (die nicht im Vorherbst ausgebracht werden) sind nicht berücksichtigt (und mit NA gekennzeichnet)

	Temperatur		Frost Dezember ( $<-10\text{°C}$ )		Interaktionsterm	
	Steigung	Abschnitt	Steigung	Abschnitt	Steigung	Abschnitt
Winterweizen	1,66	62,92	-20,82	62,92	2,43	62,92
Wintergerste	<b>3,66</b>	<b>21,62</b>	-12,85	21,62	1,56	21,62
Sommergerste	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Silomais	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Körnermais	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Tabelle 6.10. Statistische Ergebnisse aus multipler Regression von durchschnittlicher Temperatur während der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und Januarfrost ( $T < -10\text{ °C}$ ) mit Hektarerträgen der einzelnen Kulturen. Nicht relevante Kulturen (die nicht im Vorherbst ausgebracht werden) sind nicht berücksichtigt (und mit NA gekennzeichnet)

	Temperatur			Frost Januar ( $<-10\text{°C}$ )			Interaktionsterm		
	P	t	DF	P	t	DF	P	t	DF
Winterweizen	0,14	1,49	36	0,89	-0,13	36	0,87	0,16	36
Wintergerste	<b>0,01</b>	<b>2,53</b>	<b>36</b>	0,76	-0,30	36	0,71	0,37	36
Sommergerste	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Silomais	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Körnermais	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Tabelle 6.11. Kurvenparameter aus multipler Regression von durchschnittlicher Temperatur während der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und Januarfrost ( $T < -10\text{ °C}$ ) mit Hektarerträgen der einzelnen Kulturen. Nicht relevante Kulturen (die nicht im Vorherbst ausgebracht werden) sind nicht berücksichtigt (und mit NA gekennzeichnet)

	Temperatur		Frost Januar ( $<-10\text{°C}$ )		Interaktionsterm	
	Steigung	Abschnitt	Steigung	Abschnitt	Steigung	Abschnitt
Winterweizen	4,32	38,68	-0,75	38,68	0,11	38,68
Wintergerste	<b>5,06</b>	<b>8,90</b>	-1,19	8,90	0,18	8,90
Sommergerste	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Silomais	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Körnermais	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Tabelle 6.12. Statistische Ergebnisse aus multipler Regression von durchschnittlicher Temperatur während der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und Februarfrost ( $T < -10\text{ °C}$ ) mit Hektarerträgen der einzelnen Kulturen. Nicht relevante Kulturen (die nicht im Vorherbst ausgebracht werden) sind nicht berücksichtigt (und mit NA gekennzeichnet)

	Temperatur			Frost Februar ( $<-10\text{°C}$ )			Interaktionsterm		
	P	t	DF	P	t	DF	P	t	DF
Winterweizen	<b>0,01</b>	<b>2,48</b>	<b>36</b>	0,39	0,86	36	0,48	-0,71	36
Wintergerste	<b>0,004</b>	<b>3,03</b>	<b>36</b>	0,92	0,09	36	0,99	-0,01	36
Sommergerste	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Silomais	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Körnermais	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Tabelle 6.13. Kurvenparameter aus multipler Regression von durchschnittlicher Temperatur während der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und Februarfrost ( $T < -10\text{ °C}$ ) mit Hektarerträgen der einzelnen Kulturen. Nicht relevante Kulturen (die nicht im Vorherbst ausgebracht werden) sind nicht berücksichtigt (und mit NA gekennzeichnet)

	Temperatur		Frost Februar ( $<-10\text{°C}$ )		Interaktionsterm	
	Steigung	Abschnitt	Steigung	Abschnitt	Steigung	Abschnitt
Winterweizen	<b>6,32</b>	<b>20,55</b>	4,22	20,55	-0,42	20,55
Wintergerste	<b>5,51</b>	<b>5,41</b>	0,32	5,41	-0,005	5,41
Sommergerste	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Silomais	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Körnermais	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Tabelle 6.14. Statistische Ergebnisse aus multipler Regression von durchschnittlicher Temperatur während der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und Märzfrost ( $T < -10\text{ °C}$ ) mit Hektarerträgen der einzelnen Kulturen. Nicht relevante Kulturen (die nicht im Vorherbst ausgebracht werden) sind nicht berücksichtigt (und mit NA gekennzeichnet)

	Temperatur			Frost März ( $<-10\text{°C}$ )			Interaktionsterm		
	P	t	DF	P	t	DF	P	t	DF
Winterweizen	<b>0,01</b>	<b>2,54</b>	<b>36</b>	0,83	0,20	36	0,93	-0,08	36
Wintergerste	<b>0,0009</b>	<b>3,58</b>	<b>36</b>	0,92	-0,09	36	0,87	0,16	36
Sommergerste	<b>0,003</b>	<b>3,07</b>	<b>36</b>	0,88	-0,14	36	0,83	0,20	36
Silomais	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Körnermais	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Tabelle 6.15. Kurvenparameter aus multipler Regression von durchschnittlicher Temperatur während der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und Märzfrost ( $T < -10\text{ °C}$ ) mit Hektarerträgen der einzelnen Kulturen. Nicht relevante Kulturen (die nicht im Vorherbst ausgebracht werden) sind nicht berücksichtigt (und mit NA gekennzeichnet)

	Temperatur		Frost März ( $<-10\text{°C}$ )		Interaktionsterm	
	Steigung	Abschnitt	Steigung	Abschnitt	Steigung	Abschnitt
Winterweizen	<b>5,50</b>	<b>27,92</b>	4,88	27,92	-0,25	27,92
Wintergerste	<b>5,53</b>	<b>5,37</b>	-1,54	5,37	0,33	5,37
Sommergerste	<b>3,69</b>	<b>-3,32</b>	-2,17	-3,32	0,24	-3,32
Silomais	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Körnermais	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Tabelle 6.16. Statistische Ergebnisse aus multipler Regression von durchschnittlicher Temperatur während der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und Aprilfrost ( $T < -10\text{ °C}$ ) mit Hektarerträgen der einzelnen Kulturen. Nicht relevante Kulturen (die nicht im Vorherbst ausgebracht werden) sind nicht berücksichtigt (und mit NA gekennzeichnet)

	Temperatur			Frost April ( $<-10\text{°C}$ )			Interaktionsterm		
	P	t	DF	P	t	DF	P	t	DF
Winterweizen	<b>0,05</b>	<b>1,99</b>	<b>36</b>	0,56	-0,57	36	0,57	0,56	36
Wintergerste	<b>0,001</b>	<b>3,38</b>	<b>36</b>	0,14	-1,49	36	0,14	1,47	36
Sommergerste	<b>0,004</b>	<b>3,05</b>	<b>36</b>	0,09	-1,73	36	0,09	1,71	36
Silomais	0,98	0,02	36	0,47	0,72	36	0,47	-0,72	36
Körnermais	<b>0,003</b>	<b>3,10</b>	<b>36</b>	0,80	0,25	36	0,80	-0,25	36



Tabelle 6.17. Kurvenparameter aus multipler Regression von durchschnittlicher Temperatur während der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und Aprilfrost ( $T < -10\text{ °C}$ ) mit Hektarerträgen der einzelnen Kulturen. Nicht relevante Kulturen (die nicht im Vorherbst ausgebracht werden) sind nicht berücksichtigt (und mit NA gekennzeichnet)

	Temperatur		Frost April ( $<-10\text{ °C}$ )		Interaktionsterm	
	Steigung	Abschnitt	Steigung	Abschnitt	Steigung	Abschnitt
Winterweizen	<b>4,26</b>	<b>39,72</b>	-1721,28	39,72	232,48	39,72
Wintergerste	<b>4,87</b>	<b>11,42</b>	-3008,76	11,42	405,45	11,42
Sommergerste	<b>3,22</b>	<b>3,36</b>	-8135,65	3,36	658,86	3,36
Silomais	0,11	427,10	19942,54	427,10	-1427,69	427,10
Körnermais	<b>11,64</b>	<b>-59,73</b>	4752,58	-59,73	-342,35	-59,73

## 6.4.2 Hitze

Während die Anzahl der Hitzetage im Mai alleine in manchen Kulturen signifikant und positiv mit Erträgen korreliert war, verschwindet diese Korrelation im multiplen Regressionsmodell mit Interaktion zwischen Anzahl Hitzetage ( $T > 28\text{ °C}$ ) und Durchschnittstemperatur (Tab. 6.18, Tab. 6.19), in dem die Anzahl der Hitzetage nicht mehr signifikant mit den Erträgen der untersuchten Kulturen korreliert ist.

Tabelle 6.18. Statistische Ergebnisse aus multipler Regression von durchschnittlicher Temperatur während der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und Hitzetagen ( $T > 28\text{ °C}$ ) im Mai mit Hektarerträgen der einzelnen Kulturen

	Temperatur			Hitze Mai ( $<28\text{ °C}$ )			Interaktionsterm		
	P	t	DF	P	t	DF	P	t	DF
Winterweizen	0,43	0,79	36	0,79	-0,26	36	0,67	0,42	36
Wintergerste	<b>0,01</b>	<b>2,64</b>	<b>36</b>	0,43	0,78	36	0,51	-0,65	36
Sommergerste	0,05	1,95	36	0,66	0,44	36	0,71	-0,36	36
Silomais	0,81	0,23	36	0,08	1,75	36	0,10	-1,65	36
Körnermais	0,11	1,63	36	0,69	0,39	36	0,78	-0,27	36

Tabelle 6.19. Kurvenparameter aus multipler Regression von durchschnittlicher Temperatur während der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und Hitzetagen ( $T > 28\text{ °C}$ ) im Mai mit Hektarerträgen der einzelnen Kulturen

	Temperatur		Hitze Mai ( $>28\text{ °C}$ )		Interaktionsterm	
	Steigung	Abschnitt	Steigung	Abschnitt	Steigung	Abschnitt
Winterweizen	2,33	53,47	-4,95	53,47	0,92	53,47
Wintergerste	<b>5,47</b>	<b>5,20</b>	10,36	5,20	-1,01	5,20
Sommergerste	3,20	2,34	8,56	2,34	-0,53	2,34
Silomais	1,77	395,81	177,22	395,81	-11,31	395,81
Körnermais	8,33	-18,64	27,17	-18,64	-1,29	-18,64

Die Anzahl der Hitzetage im Juni war nur mit den Erträgen von Körnermais signifikant korreliert. Hier findet sich allerdings auch ein signifikanter Interaktionsterm, der im Gegensatz zu den einzelnen Faktoren eine negative Steigung hat. Das heißt also vereinfacht, während Körnermaiserträge positiv mit Durchschnittstemperatur und Anzahl der Hitzetage über  $28\text{ °C}$  korreliert waren, ist die Kombination der Durchschnittstemperatur und der Anzahl der Hitzetage (also ein warmer Juni mit vielen Hitzetagen) mit negativen Effekten auf den Ertrag verbunden.

Tabelle 6.20. Statistische Ergebnisse aus multipler Regression von durchschnittlicher Temperatur während der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und Hitzetagen ( $T > 28\text{ °C}$ ) im Juni mit Hektarerträgen der einzelnen Kulturen

	Temperatur			Hitze Juni ( $<28\text{ °C}$ )			Interaktionsterm		
	P	t	DF	P	t	DF	P	t	DF
Winterweizen	<b>0,009</b>	<b>2,76</b>	<b>36</b>	0,09	1,72	36	0,08	-1,75	36
Wintergerste	<b>0,001</b>	<b>3,55</b>	<b>36</b>	0,19	1,31	36	0,19	-1,33	36
Sommergerste	<b>0,003</b>	<b>-1,37</b>	<b>36</b>	0,18	1,34	36	0,17	-1,37	36
Silomais	0,13	1,51	36	0,20	1,28	36	0,15	-1,45	36
Körnermais	<b>0,0003</b>	<b>3,97</b>	<b>36</b>	<b>0,05</b>	<b>1,97</b>	<b>36</b>	<b>0,04</b>	<b>-2,07</b>	<b>36</b>

Tabelle 6.21. Kurvenparameter aus multipler Regression von durchschnittlicher Temperatur während der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und Hitzetagen ( $T > 28\text{ °C}$ ) im Juni mit Hektarerträgen der einzelnen Kulturen

	Temperatur		Hitze Juni ( $>28\text{ °C}$ )		Interaktionsterm	
	Steigung	Abschnitt	Steigung	Abschnitt	Steigung	Abschnitt
Winterweizen	<b>7,60</b>	<b>10,61</b>	9,26	10,61	-1,03	10,61
Wintergerste	<b>6,90</b>	<b>-6,19</b>	4,98	-6,19	-0,55	-6,19
Sommergerste	<b>4,63</b>	<b>-15,44</b>	4,55	-15,44	-0,32	-15,44
Silomais	10,61	282,30	25,60	282,30	-1,85	282,30
Körnermais	<b>18,66</b>	<b>-160,68</b>	<b>26,39</b>	<b>-160,68</b>	<b>-1,78</b>	<b>-160,68</b>

Ein ähnliches Muster wie das für Körnermaiserträge im Juni findet sich im Juli für alle Kulturen mit Ausnahme des Silomais. Hier besteht eine signifikante Korrelation für die Anzahl der Hitzetage über  $28\text{ °C}$ , Durchschnittstemperatur und deren Interaktion mit den Erträgen von Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste und Körnermais (Tab. 6.22 und 6.23). Die Korrelation mit den Einzelfaktoren ist wiederum positiv, die Interaktion ist durchgehend negativ – das heißt, es hätten größere Erträge bei derselben Temperatur erzielt werden können, wenn die Hitzetage nicht aufgetreten wären.

Tabelle 6.22. Statistische Ergebnisse aus multipler Regression von durchschnittlicher Temperatur während der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und Hitzetagen ( $T > 28\text{ °C}$ ) im Juli mit Hektarerträgen der einzelnen Kulturen

	Temperatur			Hitze Juli ( $<28\text{ °C}$ )			Interaktionsterm		
	P	t	DF	P	t	DF	P	t	DF
Winterweizen	<b>0,003</b>	<b>3,16</b>	<b>36</b>	<b>0,02</b>	<b>2,40</b>	<b>36</b>	<b>0,02</b>	<b>-2,38</b>	<b>36</b>
Wintergerste	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,49</b>	<b>36</b>	<b>0,006</b>	<b>2,91</b>	<b>36</b>	<b>0,006</b>	<b>-2,91</b>	<b>36</b>
Sommergerste	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,15</b>	<b>36</b>	<b>0,01</b>	<b>2,55</b>	<b>36</b>	<b>0,01</b>	<b>-2,60</b>	<b>36</b>
Silomais	0,06	1,87	36	0,20	1,28	36	0,15	-1,44	36
Körnermais	<b>&lt;0,001</b>	<b>4,93</b>	<b>36</b>	<b>0,01</b>	<b>2,44</b>	<b>36</b>	<b>0,01</b>	<b>-2,59</b>	<b>36</b>

Tabelle 6.23. Kurvenparameter aus multipler Regression von durchschnittlicher Temperatur während der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und Hitzetagen ( $T > 28\text{ °C}$ ) im Juli mit Hektarerträgen der einzelnen Kulturen

	Temperatur		Hitze Juli ( $>28\text{ °C}$ )		Interaktionsterm	
	Steigung	Abschnitt	Steigung	Abschnitt	Steigung	Abschnitt
Winterweizen	<b>12,28</b>	<b>-27,77</b>	<b>12,66</b>	<b>-27,77</b>	<b>-1,48</b>	<b>-27,77</b>
Wintergerste	<b>11,74</b>	<b>-45,95</b>	<b>10,33</b>	<b>-45,95</b>	<b>-1,21</b>	<b>-45,95</b>
Sommergerste	<b>8,10</b>	<b>-58,45</b>	<b>10,71</b>	<b>-58,45</b>	<b>-0,83</b>	<b>-58,45</b>
Silomais	15,21	226,60	25,84	226,60	-1,95	226,60
Körnermais	<b>26,02</b>	<b>-258,01</b>	<b>32,03</b>	<b>-258,01</b>	<b>-2,29</b>	<b>-258,01</b>

Die Anzahl der Hitzetage im August war im multiplen Regressionsmodell nicht signifikant mit den Erträgen der untersuchten Kulturen korreliert.

Tabelle 6.24. Statistische Ergebnisse aus multipler Regression von durchschnittlicher Temperatur während der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und Hitzetagen ( $T > 28\text{ °C}$ ) im August mit Hektarerträgen der einzelnen Kulturen

	Temperatur			Hitze August ( $<28\text{ °C}$ )			Interaktionsterm		
	P	t	DF	P	t	DF	P	t	DF
Winterweizen	<b>0,01</b>	<b>2,68</b>	<b>36</b>	0,19	1,31	36	0,16	-1,40	36
Wintergerste	<b>0,002</b>	<b>3,29</b>	<b>36</b>	0,11	1,63	36	0,12	-1,58	36
Sommergerste	<b>0,009</b>	<b>2,73</b>	<b>36</b>	0,21	1,24	36	0,21	-1,25	36
Silomais	0,27	1,11	36	0,30	1,03	36	0,26	-1,14	36
Körnermais	<b>0,001</b>	<b>3,38</b>	<b>36</b>	0,14	1,47	36	0,13	-1,54	36

Tabelle 6.25. Kurvenparameter aus multipler Regression von durchschnittlicher Temperatur während der Vegetationsperiode der einzelnen Kulturen und Hitzetagen ( $T > 28\text{ °C}$ ) im August mit Hektarerträgen der einzelnen Kulturen

	Temperatur		Hitze August ( $>28\text{ °C}$ )		Interaktionsterm	
	Steigung	Abschnitt	Steigung	Abschnitt	Steigung	Abschnitt
Winterweizen	<b>8,14</b>	<b>7,75</b>	5,60	7,75	-0,65	7,75
Wintergerste	<b>6,93</b>	<b>-7,87</b>	4,82	-7,87	-0,51	-7,87
Sommergerste	<b>4,61</b>	<b>-15,60</b>	3,28	-15,60	-0,23	-15,60
Silomais	8,54	310,90	14,88	310,90	-1,07	310,90
Körnermais	<b>17,39</b>	<b>-142,80</b>	14,32	-142,80	-0,96	-142,80

## 6.5 Das Extremjahr 2003

Die Ertragseinbrüche im Jahr 2003 (im Vergleich mit dem 5-Jahres-Mittel der vorhergehenden Jahre) waren mit der Mehranzahl der Hitzetage 2003 korreliert und zwar sowohl für die Schwellenwerte 28 °C (Abb. 6.1A) und 30 °C (Abb. 6.1B) als auch für den Schwellenwert 32 °C (Abb. 6.1C). Das heißt, je größer die Zunahme der Hitzetage, desto höher waren 2003 die Ertragseinbrüche im Winterweizen. Dasselbe Muster zeigte sich bei der Sommergerste (Abb. 6.2.).

Die Ertragseinbrüche 2003 beim Silomais zeigten kein Muster mit der Mehranzahl an Hitzetagen im Jahr 2003 für die Schwellenwerte 28 °C und 30 °C (Abb. 6.3A und Abb. 6.3B). Hier waren die Einbrüche im Hektarertrag jedoch negativ mit der Mehranzahl an Hitzetagen über 32 °C korreliert (Abb. 6.3C). Hier galt also, je größer die Zunahme der Hitzetage, desto höher die Ertragseinbrüche 2003, allerdings erst ab dem Schwellenwert 32 °C.

Die Ertragseinbrüche für Körnermais zeigten auf den ersten Blick ein weniger einfach verständliches Muster. Hier war die Mehranzahl der Tage über 28 °C mit den Ertragseinbrüchen korreliert (Abb. 6.4A), die Mehranzahl der Tage über 30 °C zeigte jedoch keine (signifikante) Korrelation mit den Ertragseinbrüchen (Abb. 6.4B). Beim Schwellenwert 32 °C kam es wieder zur signifikanten Korrelation mit Ertragseinbrüchen (Abb. 6.4C).

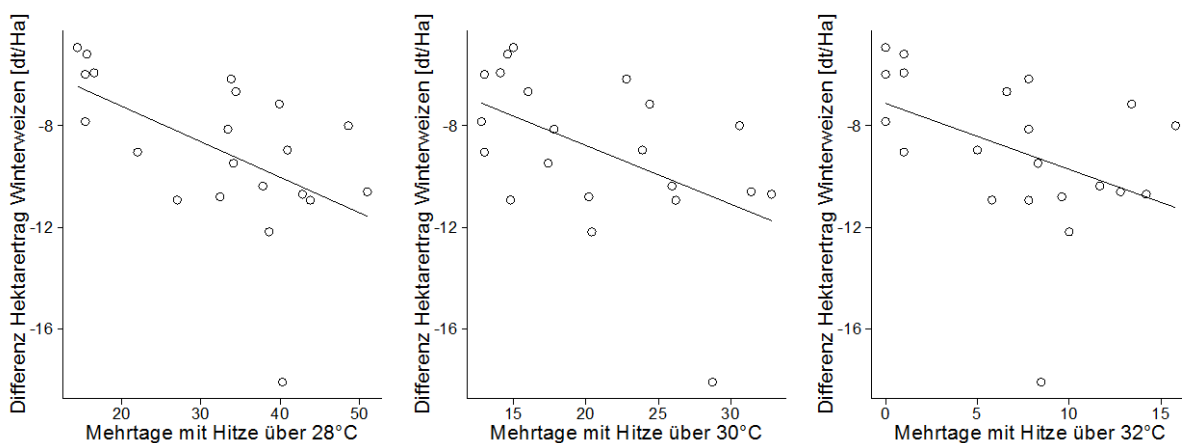


Abb. 6.1. Ertragseinbruch von Winterweizen im Extremjahr 2003 gegenüber dem Schnitt der vorhergehenden 5 Jahre in Bezug auf Mehrtage mit Hitze über a) 28 °C, b) 30 °C und c) 32 °C im Jahr 2003 gegenüber dem Schnitt der vorhergehenden 5 Jahre. Linie bildet lineare Regression ab.

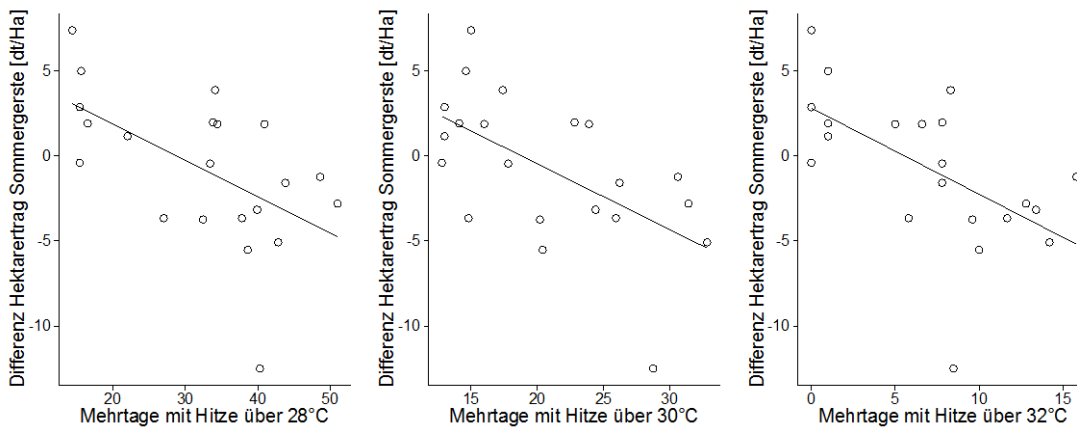


Abb. 6.2. Ertragseinbruch von Sommergerste im Extremjahr 2003 gegenüber dem Schnitt der vorhergehenden 5 Jahre in Bezug auf Mehrstage mit Hitze über a) 28 °C, b) 30 °C und c) 32 °C im Jahr 2003 gegenüber dem Schnitt der vorhergehenden 5 Jahre. Linie bildet lineare Regression ab.

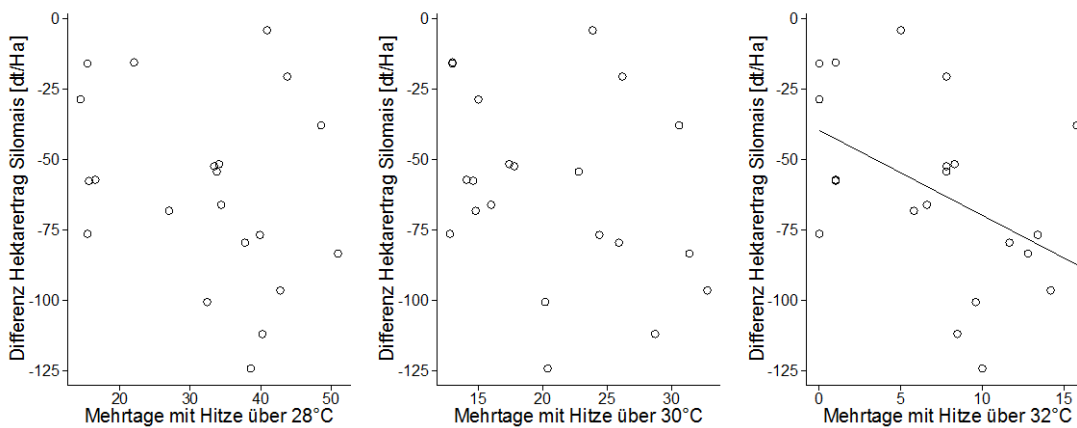


Abb. 6.3. Ertragseinbruch von Silomais im Extremjahr 2003 gegenüber dem Schnitt der vorhergehenden 5 Jahre in Bezug auf Mehrstage mit Hitze über a) 28 °C, b) 30 °C und c) 32 °C im Jahr 2003 gegenüber dem Schnitt der vorhergehenden 5 Jahre. Linie bildet lineare Regression ab.

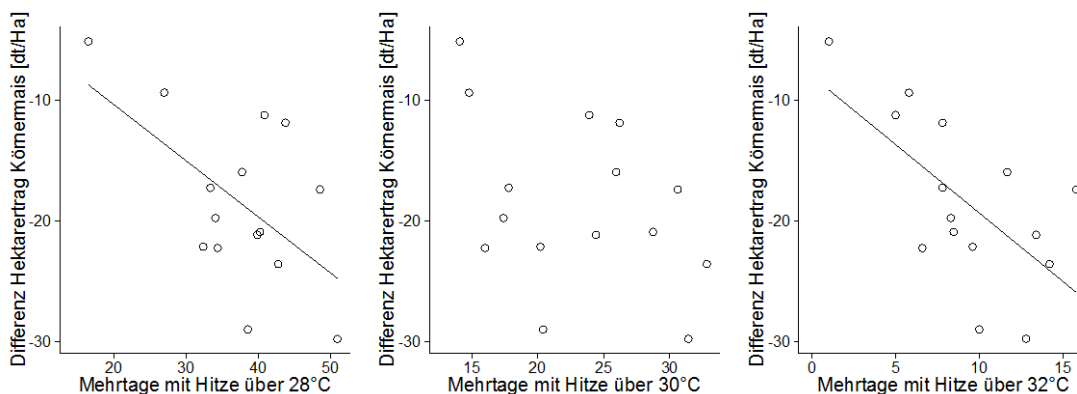


Abb. 6.4. Ertragseinbruch von Körnermais im Extremjahr 2003 gegenüber dem Schnitt der vorhergehenden 5 Jahre in Bezug auf Mehrstage mit Hitze über a) 28 °C, b) 30 °C und c) 32 °C im Jahr 2003 gegenüber dem Schnitt der vorhergehenden 5 Jahre. Linie bildet lineare Regression ab.

## 6.6 Diskussion zu extremen Klimaereignissen

### 6.6.1 Auswirkungen von extremen Klimaereignissen auf die Erträge der Feldfrüchte

Allgemein hatte die Anzahl der extremen Klimaereignisse allein weniger Einfluss auf die Erträge als angenommen. Hitzeereignisse im Mai waren zwar im einfachen Modell recht häufig positiv mit Ertrag korreliert. Dies ist jedoch vermutlich darauf zurückzuführen, dass einzelne Tage mit 28 °C im Mai häufiger sind, wenn die allgemeinen Temperaturen im Mai höher als gewöhnlich sind (ohne extrem zu werden). Es wird statt den „Tagen über 28 °C“ eher die damit korrelierte höhere Durchschnittstemperatur sein, die die leichte Ertragssteigerung ausmacht. Silomais bricht aus dem Muster aus: Der Ertrag war negativ mit der Anzahl der Tage über 28 °C im Juli korreliert und ebenso negativ mit der Anzahl der Trockentage ( $nFK < 40\%$ ) im August. Hitze wirkt sich insbesondere während der Blütenbildung schädlich aus, insofern ist die Analyse von Hitzeereignissen während der Blütenentwicklung besonders interessant (Juni: Getreide, Juli: Mais)

Nach dieser Analyse ist zu vermuten, dass einzelne Tage mit Extremwerten relativ gut toleriert werden. In der verfügbaren Zeit war eine vertiefte Analyse der extremen Ereignisse nicht möglich. Es wäre interessant, ob die Dauer des extremen Ereignisses eine Rolle für die Auswirkung auf Ertrag hat, ob also zum Beispiel einzelne Tage mit extremen Temperaturwirkungen gut toleriert werden, längere Perioden, in denen die Temperatur über 28 °C steigt, aber eher ertragsmindernd wirken. Es ist gut möglich, dass wir in Baden-Württemberg noch nicht genug extreme Ereignisse dieser Art erlebt haben, um ein entsprechendes Muster aus den langjährigen Daten herauszulesen. Daher haben wir eine grobe Analyse des Extremjahres 2003 eingefügt, um einen Ansatz für diese Art der Extremjahranalyse zu geben.

In den Kulturen, bei denen ein interaktiver Effekt der „Hintergrundtemperatur“ und der Hitzeereignisse auf die Erträge gefunden wurde, war dieser interaktive Effekt stets negativ. Das heißt, bei höheren Temperaturen hatten Hitzeereignisse einen relativen ertragsmindernden Effekt. Diese Art der Interaktion wurde vor allem im Juni (Körnermais) und Juli (Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Körnermais) gefunden, also zur Hauptwachstums- und Reifezeit. Es ist möglich, dass es hier auch ein Zusammenwirken mit Evapotranspirationsraten und daher dem Wasserhaushalt gab, dass also langanhaltende warme Temperaturen, die immer wieder Werte von über 28 °C erreichten, den Wasservorrat des Bodens erschöpft hatten und dass die Pflanzen damit einem zusätzlichen Stressfaktor ausgesetzt waren. Diese Interaktion konnte aus Zeit- und Datenlagegründen nicht überprüft werden, wäre aber ein interessantes Thema für eine zukünftige Untersuchung.

### 6.6.2 Ertragseinbrüche im Extremjahr 2003

Mit dieser Untersuchung wollten wir vor allem versuchen, Schwellenwerte für Ertragseinbrüche mit Hitze (also die rechte Hälfte unserer Konzeptkurve in Abbildung 5.27) zu finden. Der optimale Temperaturbereich für Wachstum, Entwicklung und Reife bei Weizen liegt zwischen 20 und 25 °C (Porter und Gawith 1999). Da Winterweizen und Sommergerste bereits bei Zunahme der Hitzetage über 28 °C vermehrte Ertragseinbrüche zeigten, nehmen wir an, dass hier der Schwellenwert für Ertragseinbrüche durch Hitzestress bereits in der Nähe von 28 °C liegt. Bei 28 °C handelt es sich um den niedrigsten gewählten Schwellenwert im Projekt „Agrarrelevante Extremwetterlagen“ der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle. Es ist allerdings wieder anzumerken, dass hier auch die Anzahl der Hitzetage eine Rolle

spielte: Je mehr Tage den Schwellenwert überstiegen, desto größer waren auch die Ertragseinbrüche. Deutliche Einbrüche beim Befruchtungserfolg bei Winterweizen sind ab ca. 31 °C dokumentiert (Porter und Gawith 1999). Generell ist bei der Beurteilung von Temperaturdaten, die an Wetterstationen in 2 m Höhe über dem Erdboden gemessen werden, im Hinblick auf ihre physiologische Wirkung aber Vorsicht geboten. Die physiologischen Schwellenwerte wurden in der Regel in Blattnähe ermittelt. Wie Siebert et al. (2014) eindrucksvoll zeigen, kann die Temperatur in Bestandeshöhe mehrere Grad höher liegen als in der Standard-Messhöhe von 2 m der Wetterstationen, insbesondere dann, wenn Trockenheit die Verdunstung von Wasser und damit die Transpirationskühlung hemmt. 28 °C an der Wetterstation kann also deutlich mehr als 30 °C im Bestand bedeuten.

Bei Silomais lag dieser Schwellenwert vermutlich zwischen 30 °C und 32 °C, da erst ab einem Schwellenwert von 32 °C ein eindeutiges Muster zwischen der Zunahme der Ereignisse und Ertragseinbrüchen gefunden werden konnte. Bei 32 °C handelt es sich um den höchsten gewählten Schwellenwert im Projekt „Agrarrelevante Extremwetterlagen“ der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle. Das ist nicht überraschend, da wir erwarten, dass Mais als C4-Pflanze größere Hitzetoleranz als C3-Arten wie Weizen oder Gerste aufweist und da die optimalen Temperaturen für Maiswachstum erst über 25 °C erreicht werden (Geisler 1983). Temperaturen von 30-35 °C führen bei Mais in der Regel noch nicht zu Wachstumseinbußen (Wahid et al. 2007). Es gibt allerdings auch Hinweise darauf, dass Mais bereits bei häufigen und längeren Temperaturen von 29-30 °C mit Ertragseinbußen reagiert und hitzebedingt sein globales Ertragspotential in den letzten Jahren nicht ausschöpfen konnte (Schlenker und Roberts 2009, Lobell und Field 2007).

Andererseits zeigte der Körnermais in derselben Analyse bereits vermehrt Einbrüche bei der Zunahme der Tage über 28 °C. Da Silomais und Körnermais dieselbe Pflanzenart (wenn auch oft nicht dieselbe Sorte) darstellen, wäre ein möglicher Erklärungsansatz, dass 28 °C ein Schwellenwert für die Hitzewirkung bei der Blütenentwicklung und Befruchtung ist - und damit indirekt auch für die Körnerbildung. Es ist wahrscheinlich, dass eine Zunahme der Tage über 28 °C vor allem den (Früh-)Sommer betrifft, und daher die Blütezeit mit einschließen könnte. Bei großer Hitze wird zunächst die Ausbildung von Pollen in der Maisblüte gestört. Hinzu kommt ein weiterer Mechanismus: Bei Mais blühen die weiblichen Blüten später als die männlichen (Proterandrie). Vor allem wenn Trockenheit zur Hitze hinzukommt, kann sich die Ausbildung der Narbenfäden verzögern, so dass durch diese Desynchronisation der Blüte der Befruchtungserfolg gemindert wird (Lütke Entrup et al. 2013). Das könnte auch erklären, warum der Ertrag von Körnermais empfindlich gegenüber einer Zunahme von Tagen über 28 °C (unter Umständen Blüte und Befruchtung) ist, und ebenso gegenüber einer Zunahme von Tagen über 32 °C (wie der Silomais auch, also Schwellenwert für das Wachstum vegetativer Organe), aber nicht gegenüber einer Zunahme von Tagen über 30 °C. Hier wäre eine Analyse der Zunahme der Hitzetage in den einzelnen Monaten angebracht – diese konnte allerdings aus Zeitgründen nicht mehr durchgeführt werden.



## 7 Allgemeine Diskussion

Die generelle Fragestellung des Forschungsprojekts war, ob bereits Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge der Feldfrüchte in den letzten Jahrzehnten in Baden-Württemberg gefunden werden können. Wir betrachteten in diesem Projekt sowohl landesweite Durchschnitte als auch die Beziehung der Erträge zum Klima auf der Ebene der Landkreise. Wir betrachteten weiterhin die Beziehungen der Erträge zum Klima in Abhängigkeit von Boden und klimatischer Ausgangssituation und den Einfluss von klimatischen Extremereignissen auf die Ertragsbildung der einzelnen Feldfrüchte.

Das grobe Ergebnis dieser Analysen ist, dass die steigenden Temperaturen seit den 1970er Jahren wahrscheinlich positive Auswirkungen auf die Erträge der meisten Kulturen, vor allem der Getreidearten, hatten. Im Gegensatz dazu konnten wir keine Zusammenhänge mit der Variabilität von Niederschlagssummen und Erträgen finden. Hier muss allerdings auch angemerkt werden, dass in Baden-Württemberg die Temperaturen seit den späten 70er Jahren klar gestiegen sind, während bei Niederschlägen in der Jahressumme keine klaren zeitlichen Zu- oder Abnahmen gefunden werden konnten. Wir können also davon ausgehen, dass für den Einfluss des Klimawandels auf die Erträge derzeit vor allem die Temperaturentwicklung eine Rolle spielt, in die Niederschläge zum Teil modulierend mit eingreifen.

Bisher scheint der Effekt der gesteigerten Temperatur auf die Erträge in Baden-Württemberg vorwiegend positiv gewesen zu sein. In den meisten Landkreisen waren warme Jahre ertragreicher als weniger warme. Dies trifft vor allem auf die ursprünglich kälteren Landkreise zu. Wir nehmen an, dass in den kälteren Landkreisen Erträge noch durch Temperatur limitiert werden, höhere Durchschnittstemperaturen also noch ertragssteigernd wirken. In den wärmeren Landkreisen werden dagegen möglicherweise bereits Durchschnittstemperaturen erreicht, bei denen Erträge „temperaturgesättigt“ sind, also nicht mehr wesentlich weiter gesteigert werden. In einer globalen Analyse von Klimadaten und anhand historischer Erträge kalibrierter modellgestützter Erträge kamen Lobell et al. (2011) zu dem Schluss, dass in manchen Ländern der Klimatrend seit 1980, vor allem die Temperaturzunahme, bereits die potentiellen Ertragszuwächse bei Weizen und Mais durch CO<sub>2</sub>-Düngung und züchterischen sowie anbautechnischen Fortschritt gedämpft hat. In Mitteleuropa zeigte der Vergleich „Ertragszuwächse mit und ohne Klimatrend“ allerdings nur moderate Verluste für Weizen und moderate Gewinne für Mais mit dem bereits stattgefundenen Klimawandel. Insofern passen unsere Ergebnisse durchaus in dieses globale Bild, vor allem, wenn man die regionalen Unterschiede in Baden-Württemberg zwischen wärmeren und kälteren Anbaugebieten in Betracht zieht.

Das Ausmaß der Ertragsteigerung mit dem Temperaturanstieg war bei Winterweizen, Wintergerste und Sommergerste am niedrigsten in den Landkreisen mit hohen Bodenzahlen (also qualitativ „guten“ Böden), und am höchsten in Landkreisen mit niedrigen Bodenzahlen. Eine Erklärung für den eher unerwarteten statistischen Befund wäre die Tatsache, dass die Bodenzahlen mit der „Anfangstemperatur“ 1973 positiv korreliert sind. Die besseren Böden sind also eher in den wärmeren Regionen zu finden. Die Rolle der Böden verdient eine nähere Untersuchung.

In der Auswertung der Anzahl der Hitzetage konnte keine allgemeine Ertragsminderung gefunden werden. Einzelne Hitzetage müssen scheinbar keine Ertragseinbrüche zur Folge haben; dazu kommt es vermutlich erst bei länger andauerndem Hitzestress. Teilweise waren allerdings Interaktionen zwischen der Temperatur im Juni/Juli und dem Auftreten von Hitzetagen festzustellen; das heißt, bei langanhaltenden hohen Temperaturen und gleichzeitigem häufigerem Auftreten von Hitzetagen erfolgten dann Ertragseinbrüche relativ zum eigentlichen Ertragspotential in diesen Jahren. In den letzten vierzig Jahren wurden vermutlich die Durchschnittstemperaturen und damit einhergehend die extremen Ereignisse (Hitze, Trockenheit), bei

denen Ertragseinbrüche zu vermuten wären, nicht häufig genug erreicht, um hier konsistente Muster erkennen zu lassen oder gar einen Schwellenwert für die Ertragsminderung durch Hitzestress auszuarbeiten.

Lediglich bei der speziellen Analyse des Jahres 2003 fanden sich Hinweise, wo die Hitze-Schwellenwerte für Ertragseinbußen bei den betrachteten Kulturen liegen könnten. Die Extremwertanalyse am Beispiel des Jahres 2003 zeigte Einbrüche bei verlängerten Perioden mit Temperaturen über 28 °C für die Getreidearten und bei längeren Perioden mit Temperaturen über 32 °C für Mais. Die scheinbar stärkere Robustheit des Maisertrags gegenüber Hitzeereignissen war hier nicht überraschend, da wir davon ausgehen, dass der Mais als C4-Pflanze an warme Standorte gut angepasst ist.

Der Sommer 2003 war mit einem deutschlandweiten Mittel von 3,4 Grad über dem Durchschnitt der Referenzperiode 1961-1990 der wärmste Sommer seit Beginn der regelmäßigen Wetteraufzeichnungen; vermutlich war kein Sommer der letzten 500 Jahre in Europa wärmer (Luterbacher et al. 2004). Im Südwesten Deutschlands wurden mehr als vier Grad über dem Mittel erreicht. Die Bruttoprimärproduktion brach europaweit um ca. 30% ein – eine solcher Einbruch kam in den letzten hundert Jahren noch nie vor (Ciais et al. 2005). In der Zukunft werden solche Hitze-Ereignisse vermutlich mit höherer Frequenz auftreten, intensiver sein und länger andauern (EASAC 2013). Die Wahrscheinlichkeit solcher Hitzewellen würde bis zur Mitte des Jahrhunderts um das 5-10fache steigen. Sommertemperaturen wie 2003 könnten sogar gegen Ende des Jahrhunderts jeden zweiten bis dritten Sommer überschritten werden (EASAC 2013). Auch wenn derzeit solche Episoden rar sind – die Landwirtschaft tut gut daran, sich über Anpassungsmaßnahmen rechtzeitig für solche Extremwetterlagen vorzubereiten (Flaig 2013).

## 8 Literaturverzeichnis

- Ahlemeyer, J. und Friedt, W. (2012): Winterweizen - Züchterischer Ertragsfortschritt ungebrochen. In: Saatenunion 03/2012. <http://archiv.saaten-union.de/index.cfm/article/7246.html?page=print>. Zugriff: Dezember 2014
- AK KLIWA (o.J., Hrsg.): Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Berichte, Heft 7. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München
- Asseng, S., Ewert, F., Rosenzweig, C., Jones, J.W., Hatfield, J.L., Ruane, A.C., Boote, K.J., Thorburn, P.J., Rötter, R.P., Cammarano, D., Brisson, N., Basso, B., Martre, P., Aggarwal, P.K., Angulo, C., Bertuzzi, P., Biernath, C., Challinor, A.J., Doltra, J., Gayler, S., Goldberg, R., Grant, R., Heng, L., Hooker, J., Hunt, L.A., Ingwersen, J., Izaurralde, R.C., Kersebaum, K.C., Müller, C., Naresh Kumar, S., Nendel, C., O'Leary, G., Olesen, J.E., Osborne, T.M., Palosuo, T., Priesack, E., Ripoche, D., Semenov, M.A., Shcherbak, I., Steduto, P., Stöckle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Travasso, M., Waha, K., Wallach, D., White, J.W., Williams, J.R. und Wolf, J. (2013): Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change* 3, 827–832
- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R.P., Lobell, D.B., Cammarano, D., Kimball, B.A., Ottman, M.J., Wall, G.W., White, J.W., Reynolds, M.P., Alderman, P.D., Prasad, P.V.V., Aggarwal, P.K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, A.J., De Sanctis, G., Doltra, J., Fereres, E., Garcia-Vila, M., Gayler, S., Hoogenboom, G. und Hunt, L.A. (2014): Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, doi: 10.1038/nclimate2470
- Betzholz, T. (1998): Exakte Ertragsfeststellung bei Getreide und Kartoffeln. Baden-Württemberg in Wort und Zahl 5/98, S. 228-235.
- Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.-X. und Huard, F. (2010): Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Research* 119, 201–212
- Ciais, Ph., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogée, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, Ch., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A.D., Friedlingstein, P., Grünwald, T., Heinesch, B., Keronen, P., Knohl, A., Krinner, G., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J.M., Papale, D., Pilegaard, K., Rambal, S., Seufert, G., Soussana, J.F., Sanz, M.J., Schulze, E.-D., Vesala, T. und Valentini, R. (2005): Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437, 529-533
- Craine, J. (2013): The importance of precipitation timing for grassland productivity. *Plant Ecology* 214, 1085-1089.
- Dölger, D. (2008): Entwicklung der Flächenproduktivität auf verschiedenen Standorten Mitteleuropas. Vortrag beim DLG-Kolloquium 2008 „Boden und Wasser – reichen die Potenziale für eine nachhaltige Welternährung?“ am 3. 12. 2008 in Berlin
- DWD (2014a, Hrsg.): Klimawandel und Roggenanbau - besteht die Gefahr von Trockenstress? [http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Landwirtschaft/Interessantes/2014/Roggen\\_Klimawandel,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Roggen\\_Klimawandel.pdf](http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Landwirtschaft/Interessantes/2014/Roggen_Klimawandel,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Roggen_Klimawandel.pdf)
- DWD (2014b, Hrsg.): [http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=dwdwww\\_klima\\_umwelt\\_klimadaten\\_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKli](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKli)

- EASAC (2013): European Academies Science Advisory Council (Hrsg.): Trends in extreme weather events in Europe: implications for national and European Union adaptation strategies. Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, Halle (Saale)
- Flaig, H. (2013): Anpassungsstrategie Baden-Württemberg an die Folgen des Klimawandels. Fachgutachten für das Handlungsfeld Landwirtschaft. Hrsg.: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart. Download: <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de>, ID Umweltbeobachtung U13-W04-N14
- Fruehauf, C., Löpmeier, F.-J. (2014): Ergebnisse der Klimadatenauswertungen für extreme Wetterlagen. Vortrag Tagung „Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten des Risikomanagements“ am 13.5. 2014 in Braunschweig.
- Geisler, G. (1983): Ertragsphysiologie von Kulturarten des gemäßigten Klimas. Parey, Berlin. ISBN 3-489-61010-5.
- Grassini, P., Eskridge, K.M. und Cassman, K.G. (2013): Distinguishing between yield advances and yield plateaus in historical crop production trends. *Nature Communications*, doi: 10.1038/ncomms3918
- Haas, G.W. und Friedt 1990: Ziele und Möglichkeiten der Züchtung nährstoffeffizienter Nutzpflanzen. Arbeitstagung der "Arbeitsgemeinschaft der Saatzuchtler" innerhalb der Vereinigung österr. Pflanzenzüchter, 20.-22.11.1990, Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irnding, Österreich, 21-37
- Hay, R.K.M. (1995): Harvest index: a review of its use in plant breeding and crop physiology. *Ann. Appl. Biol.* 126, 197-216
- IPCC (2013, ed.): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. IPCC Working Group I Contribution to AR5. Intergovernmental Panel on Climate Change, Genf (CH)
- Kapsch, M.-L., Kunz, M., Vitolo, R. und Economou, T. (2012): Long-term trends of hail-related weather types in an ensemble of regional climate models using a Bayesian approach. *Journal of Geophysical Research* 117, D15107, doi:10.1029/2011JD017185
- Kunz, M., Sander, J. und Kottmeier, Ch. (2009): Recent trends of thunderstorm and hailstorm frequency and their relation to atmospheric characteristics in southwest Germany. *Int. J. Climatol.* 29, 2283–2297
- LfULG(2009): Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG, Hrsg.): Klimawandel und Landwirtschaft - Fachliche Grundlage für die Strategie zur Anpassung der sächsischen Landwirtschaft an den Klimawandel. Dresden
- Lobell, D.B. und Field, C.B. (2007): Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environ. Res. Lett.* 2, 014002; doi:10.1088/1748-9326/2/1/014002
- Lobell, D.B., Schlenker, W. und Costa-Roberts, J. (2011): Climate Trends and Global Crop Production Since 1980. *Science* 333, 616-620
- LUBW (2013, Hrsg.): Zukünftige Klimaentwicklung in Baden-Württemberg – Perspektiven aus regionalen Klimamodellen. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe. <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/229984/>
- Lütke Entrup, N., Schwarz, F. J. und Heilmann, H. (2013): Handbuch Mais: Grundlagen - Anbau - Verwertung – Ökonomie; S. 39-40. DLG-Verlag GmbH. ISBN 9783769008265

- Luterbacher, J., Dietrich, D., Xoplaki, E., Grosjean, M. und Wanner, H. (2004): European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science* 303, 1499-1503
- Mirschel, W., Wieland, R., Wenkel, K.-O., Guddat, C., Michel, H., Luzi, K. und Groth, K. (2012): Regionaldifferenzierte Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge von wichtigen Fruchtarten im Freistaat Thüringen mittels Ertragssimulation mit YIELDSTAT. Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V., Müncheberg und Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena
- MKULNV (2011, Hrsg.): Klimawandel und Landwirtschaft - Auswirkungen der globalen Erwärmung auf die Entwicklung der Pflanzenproduktion in Nordrhein-Westfalen. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf
- Porter, J.R. und Gawith, M. (1999): Temperatures and the growth and development of wheat: a review. *European Journal of Agronomy* 10, 23–36
- Robinson, T., Pierre, K., Vadeboncoer, M., Byrne, K., Thomey, M. & Colby, S. (2013): Seasonal, not annual precipitation drives community productivity across ecosystems. *Oikos* 122, 727-738.
- Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A.C., Müller, C., Arneth, A., Boote, K.J., Folberth, C., Glotter, M., Khabarov, N., Neumann, K., Piontek, F., Pugh, T.A.M., Schmid, E., Stehfest, E., Yang, H., und Jones, J.W. (2014): Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *PNAS* 111, 3268-3273
- Schlenker, W. und Roberts, M.J. (2009): Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *PNAS* 106, 15594–15598
- Siebert, S., Ewert, F., Eyshi Rezaei, E., Kage, H. und Graß, R. (2014): Impact of heat stress on crop yield – on the importance of considering canopy temperature. *Env. Res. Lett.* 9, 044012 (8 pp.); doi: 10.1088/1748-9326/9/4/044012
- SMUL (2009): Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (Hrsg.): Klimawandel und Landwirtschaft - Strategie zur Anpassung der sächsischen Landwirtschaft an den Klimawandel. SMUL, Dresden.
- Statistisches Bundesamt (2013): Besondere Ernte- und Qualitätsermittlung (Qualitätsbericht). [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Qualitaetsberichte/LandForstwirtschaft/ErnteBEE.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Qualitaetsberichte/LandForstwirtschaft/ErnteBEE.pdf?__blob=publicationFile). Zugriff Dezember 2014.
- Stock, M. (2005, Hrsg.): KLARA: Klimawandel - Auswirkungen, Risiken, Anpassung. PIK Report No. 99. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
- UBA (2014): Umweltbundesamt (Hrsg.): Zugriff Dezember 2014: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen>
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M. und Foolad, M.R. (2007): Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany* 61, 199–223
- Weigel, H.-J., Manderscheid, R. und Schaller, M. (2007): Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf Ertrag und Qualität von Getreide. *Getreidetechnologie*, Band 61 (3), S. 142-149
- Weiser, Ch. (2014): Einflüsse auf den Getreidestrohertrag als Voraussetzung der Bestimmung des nachhaltigen Strohpotenzials. *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* 23/2, 66-70
- Zuur, A.F., Ieno, E.N., Walker, N.J., Saveliev, A.A., and Smith, G.M. (2009): *Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R*. Springer