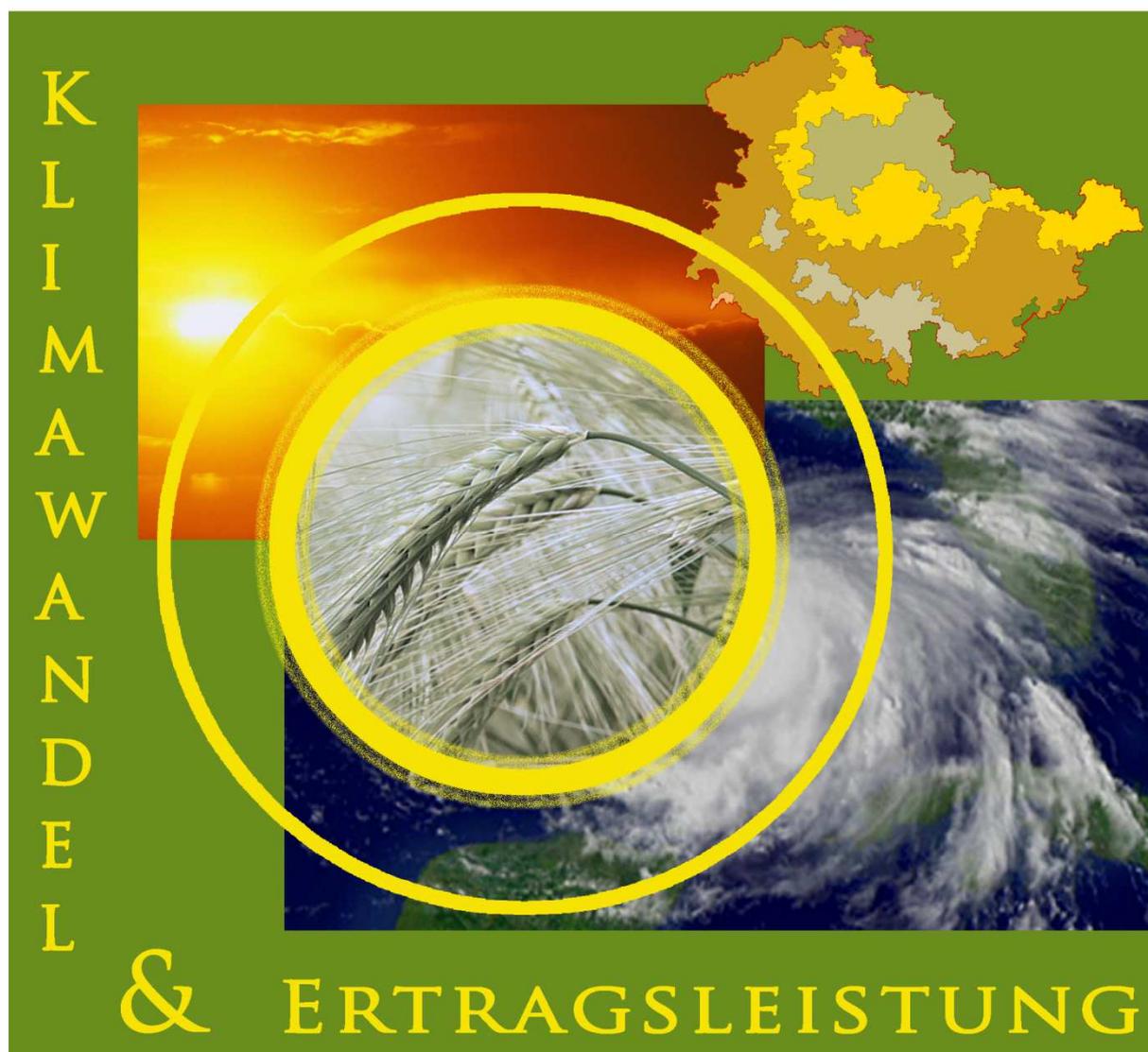


Regionaldifferenzierte Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge von wichtigen Fruchtarten im Freistaat Thüringen mittels Ertrags-simulation mit YIELDSTAT

*Wilfried Mirschel, Ralf Wieland, Karl-Otto Wenkel, Christian Guddat,
Herbert Michel, Karin Luzi, Karin Groth*



Regionaldifferenzierte Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge von wichtigen Fruchtarten im Freistaat Thüringen mittels Ertrags-simulation mit YIELDSTAT

- Abschlussbericht -

Im Auftrag der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL)

Bearbeiter

Dr. Wilfried Mirschel, Dr. Ralf Wieland, Prof. Dr. Karl-Otto Wenkel, Karin Luzi, Karin Groth

- Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V. Müncheberg, Institut für Landschaftssystemanalyse -

Fachliche Ansprechpartner:

Christian Guddat, Herbert Michel

- Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft -

Müncheberg, Mai 2012



Inhaltsverzeichnis

<i>Inhaltsverzeichnis</i>	3
<i>Abbildungsverzeichnis</i>	4
<i>Tabellenverzeichnis</i>	6
1 <i>Vorbetrachtung zur Ertragsbildung</i>	7
2 <i>Aufgabenstellung</i>	8
3 <i>Vorgehensweise</i>	9
4 <i>Analyse der Ertragsdaten</i>	12
5 <i>Analyse der Klimadaten WETTREG 2010 (Emissionsszenario A1B)</i>	16
6 <i>Ertragsmodell YIELDSTAT</i>	22
6.1 <i>Modellbeschreibung</i>	22
6.2 <i>Datenregionalisierung</i>	31
6.2.1 <i>Bodendatenregionalisierung</i>	31
6.2.2 <i>Klimadatenregionalisierung</i>	34
6.3 <i>Annahmen für die Simulationsrechnungen</i>	36
6.4 <i>Softwarekomponenten für regionale Szenariosimulationen</i>	39
7 <i>Modellvalidierung mit realen Wetter- und Ertragsdaten</i>	39
7.1 <i>Landesversuchsstationen des Freistaates Thüringen</i>	39
7.2 <i>Landkreise und Freistaat Thüringen</i>	46
7.2.1 <i>Landkreise</i>	46
7.2.2 <i>Freistaat Thüringen</i>	54
8 <i>Szenario-Simulationen mit WETTREG 2010 (Emissionsszenario A1B) - Ergebnisse und Diskussion</i>	56
8.1 <i>Freistaat Thüringen</i>	57
8.2 <i>Repräsentative Landkreise</i>	70
8.3 <i>Boden-Klima-Regionen / Anbaugebiete</i>	74
8.4 <i>Planungsregionen</i>	78
9 <i>Zusammenfassende Einschätzung</i>	81
10 <i>Danksagung</i>	82
11 <i>Literatur</i>	83

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über die die Ertragsleistung beeinflussenden Faktorkomplexe beim Anbau landwirtschaftlicher Fruchtarten.....	7
Abbildung 2: Lage der für die standortbezogene Überprüfung/Anpassung des Modells YIELDSTAT berücksichtigten landwirtschaftlichen Versuchsstationen der TLL.....	10
Abbildung 3: Lage der für die regionale Überprüfung/Anpassung des Modells YIELDSTAT berücksichtigten repräsentativen Landkreise (grau)	11
Abbildung 4: Ertragsentwicklung für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais für den Freistaat Thüringen im Zeitraum 1963-2010.	14
Abbildung 5: Vergleich des Ertragsniveaus der Versuchsstation Heßberg mit dem Ertragsniveau des Kreises Hildburghausen für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste und Silomais.....	15
Abbildung 6: Mittlere Jahrestemperatur in ihrer regionalen Verteilung innerhalb des Freistaates Thüringen im Vergleich der Klimaperioden 1981-2010 (oben), 2021-2050 (Mitte) und 2071-2100 (unten), Datengrundlage: WETTREG 2010 (Emissionsszenario A1B).....	19
Abbildung 7: Jährliche Niederschlagssumme in ihrer regionalen Verteilung innerhalb des Freistaates Thüringen im Vergleich der Klimaperioden 1981-2010 (oben), 2021-2050 (Mitte) und 2071-2100 (unten), Datengrundlage: WETTREG 2010 (Emissionsszenario A1B).....	20
Abbildung 8: Schema des Modells YIELDSTAT zur standortdifferenzierten Ertragsschätzung auf landwirtschaftlichen Praxisschlägen.....	23
Abbildung 9: Durch die IPCC-Emissionsszenarien angenommene Entwicklung der atmosphärischen CO ₂ -Konzentration.....	30
Abbildung 10: Standorttyp-Karte für den Freistaat Thüringen als Input für die regionaldifferenzierte Ertragsabschätzung mit YIELDSTAT	32
Abbildung 11: Hydromorphieflächentyp-Karte für den Freistaat Thüringen als Input für die regionaldifferenzierte Ertragsabschätzung mit YIELDSTAT	32
Abbildung 12: Neigungsflächentyp-Karte für den Freistaat Thüringen als Input für die regionaldifferenzierte Ertragsabschätzung mit YIELDSTAT	33
Abbildung 13: Ackerzahl-Karte für den Freistaat Thüringen als Input für die regionaldifferenzierte Ertragsabschätzung mit YIELDSTAT	33
Abbildung 14: Höhenlagen-Karte für den Freistaat Thüringen als Input für die regionaldifferenzierte Ertragsabschätzung mit YIELDSTAT	34
Abbildung 15: Karte der mesoskaligen Klimazonierung für den Freistaat Thüringen nach Adler (1987) als Input für die regionaldifferenzierte Ertragsabschätzung mit YIELDSTAT	34
Abbildung 16: Unterteilung des Freistaates Thüringen in 27 <i>Klima-Patches</i> entsprechend des Klimastationsnetzes des DWD.....	35
Abbildung 17: Unterteilung des Freistaates Thüringen in 299 <i>Klima-Patches</i> entsprechend des Klimastations- und Niederschlagsmessstellennetzes des DWD.....	36
Abbildung 18: Vergleich der in den Jahren 1995-2010 in den Landesversuchsstationen erzielten Winterweizen-Erträge mit den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Erträgen.....	41
Abbildung 19: Vergleich der in den Jahren 1995-2010 in den Landesversuchsstationen erzielten Wintergersten-Erträge mit den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Erträgen.....	42
Abbildung 20: Vergleich der in den Jahren 1995-2010 in den Landesversuchsstationen erzielten Sommergersten-Erträge mit den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Erträgen	43
Abbildung 21: Vergleich der in den Jahren 1995-2010 in den Landesversuchsstationen erzielten Winterraps-Erträge mit den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Erträgen	44
Abbildung 22: Vergleich der in den Jahren 1995-2010 in den Landesversuchsstationen erzielten Silomais-Erträge mit den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Erträgen	45
Abbildung 23: Ertragsvergleich zwischen Feldversuch und Modell YIELDSTAT für Winterweizen (■), Wintergerste (▲), Sommergerste (▼) und Winterraps (◆) (links) sowie Silomais (rechts) für alle betrachteten Landesversuchsstationen (Kirchengel, Dornburg, Friemar, Großenstein, Heßberg, Burkersdorf) im Zeitraum 1995-2010.....	45
Abbildung 24: Vergleich statistischer Kreisenerträge von sechs bodenklima- und anbaugiebtsrepräsentativen Landkreisen des Freistaates Thüringen mit den mittels YIELDSTAT berechneten Kreisenerträgen für Winterweizen im Zeitraum 1995-2010.....	47
Abbildung 25: Vergleich statistischer Kreisenerträge von sechs bodenklima- und anbaugiebtsrepräsentativen Landkreisen des Freistaates Thüringen mit den mittels YIELDSTAT berechneten Kreisenerträgen für Wintergerste im Zeitraum 1995-2010.....	48

Abbildung 26: Vergleich statistischer Kreisenerträge von sechs bodenklima- und anbaugiebtsrepräsentativen Landkreisen des Freistaates Thüringen mit den mittels YIELDSTAT berechneten Kreisenerträgen für Sommergerste im Zeitraum 1995-2010.....	49
Abbildung 27: Vergleich statistischer Kreisenerträge von sechs bodenklima- und anbaugiebtsrepräsentativen Landkreisen des Freistaates Thüringen mit den mittels YIELDSTAT berechneten Kreisenerträgen für Wintertraps im Zeitraum 1995-2010	50
Abbildung 28: Vergleich statistischer Kreisenerträge von sechs bodenklima- und anbaugiebtsrepräsentativen Landkreisen des Freistaates Thüringen mit den mittels YIELDSTAT berechneten Kreisenerträgen für Silomais im Zeitraum 1995-2010	51
Abbildung 29: Vergleich zwischen den Kreisenerträgen aus der Kreisstatistik und den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Kreisenerträgen für Winterweizen (■), Wintergerste (▲), Sommergerste (▼) und Wintertraps (◆) (links) sowie Silomais (rechts) für alle repräsentativen Landkreise (Kyffhäuser, Altenburger Land, Saale-Orla-Kreis, Hildburghausen, Sömmerda, Gotha) im Zeitraum 1995-2010.....	53
Abbildung 30: Landeserträge des Freistaates Thüringen im Zeitraum 1995-2010 für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Wintertraps und Silomais im Vergleich zwischen der Landesstatistik und den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Erträgen.....	55
Abbildung 31: Erträge für Winterweizen im Vergleich der Klimazeiträume 1981-2010 und 2021-2050, regionalisiert für den Freistaat Thüringen (Basis: Modell YIELDSTAT, WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B, Variante 1, graue Flächen – kein Ackerland bzw. kein Anbau von Winterweizen).....	58
Abbildung 32: Erträge für Wintergerste im Vergleich der Klimazeiträume 1981-2010 und 2021-2050, regionalisiert für den Freistaat Thüringen (Basis: Modell YIELDSTAT, WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B, Variante 1, graue Flächen – kein Ackerland bzw. kein Anbau von Wintergerste).....	59
Abbildung 33: Erträge für Sommergerste im Vergleich der Klimazeiträume 1981-2010 und 2021-2050, regionalisiert für den Freistaat Thüringen (Basis: Modell YIELDSTAT, WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B, Variante 1, graue Flächen – kein Ackerland bzw. kein Anbau von Sommergerste).....	60
Abbildung 34: Erträge für Wintertraps im Vergleich der Klimazeiträume 1981-2010 und 2021-2050, regionalisiert für den Freistaat Thüringen (Basis: Modell YIELDSTAT, WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B, Variante 1, graue Flächen – kein Ackerland bzw. kein Anbau von Wintertraps)	61
Abbildung 35: Erträge für Silomais im Vergleich der Klimazeiträume 1981-2010 und 2021-2050, regionalisiert für den Freistaat Thüringen (Basis: Modell YIELDSTAT, WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B, Variante 1, graue Flächen – kein Ackerland bzw. kein Anbau von Silomais).....	62
Abbildung 36: Relative Ertragsänderungen 2021-2050 vs. 1981-2010 für Winterweizen als Mittel aus „trockener“ und „feuchter“ Realisierung für Variante 1, regionalisiert für den Freistaat Thüringen (Basis: Modell YIELDSTAT, WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B, graue Flächen – kein Ackerland bzw. kein Anbau von Winterweizen).....	63
Abbildung 37: Relative Ertragsänderungen 2021-2050 vs. 1981-2010 für Wintergerste als Mittel aus „trockener“ und „feuchter“ Realisierung für Variante 1, regionalisiert für den Freistaat Thüringen (Basis: Modell YIELDSTAT, WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B, graue Flächen – kein Ackerland bzw. kein Anbau von Wintergerste)	64
Abbildung 38: Relative Ertragsänderungen 2021-2050 vs. 1981-2010 für Sommergerste als Mittel aus „trockener“ und „feuchter“ Realisierung für Variante 1, regionalisiert für den Freistaat Thüringen (Basis: Modell YIELDSTAT, WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B, graue Flächen – kein Ackerland bzw. kein Anbau von Sommergerste).....	65
Abbildung 39: Relative Ertragsänderungen 2021-2050 vs. 1981-2010 für Wintertraps als Mittel aus „trockener“ und „feuchter“ Realisierung für Variante 1, regionalisiert für den Freistaat Thüringen (Basis: Modell YIELDSTAT, WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B, graue Flächen – kein Ackerland bzw. kein Anbau von Wintertraps)	66
Abbildung 40: Relative Ertragsänderungen 2021-2050 vs. 1981-2010 für Silomais als Mittel aus „trockener“ und „feuchter“ Realisierung für Variante 1, regionalisiert für den Freistaat Thüringen (Basis: Modell YIELDSTAT, WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B, graue Flächen – kein Ackerland bzw. kein Anbau von Silomais)	67
Abbildung 41: Boden-Klima-Räume/Anbaugebiete im Freistaat Thüringen.....	75
Abbildung 42: Planungsregionen des Freistaates Thüringen.....	78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Linearer Ertragstrend (hier: jährliche Rate ($dt\ ha^{-1}\ a^{-1}$)) für die Landesversuchsstations-, die Kreis- und die Landesebene (Grundlage: 6 Versuchsstationen (Abbildung 2); 6 repräsentative Kreise (Abbildung 3)).....	13
Tabelle 2: Ertragsniveau der Landesversuchsstationen im Vergleich zum Praxis-Ertragsniveau auf Kreisebene für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais [in % Praxisertragsniveau].....	15
Tabelle 3: Änderung von Lufttemperatur und Niederschlag (1981-2010 vs. 2021-2050 bzw. 2071-2100) als Mittel für den Freistaat Thüringen	17
Tabelle 4: Niederschlagssummen und mittlere Temperaturen für unterschiedliche Jahresabschnitte im Vergleich der Klimazeiträume 1981-2010 und 2021-2050 bzw. 2071-2100 für die DWD-Stationen Leinefelde, Artern, Erfurt, Gera, Meiningen und Sonneberg	18
Tabelle 5: Beginn, Ende und Dauer der Vegetationsperiode im Vergleich der Klimazeiträume 1981-2010, 2021-2050 bzw. 2061-2080 für die DWD-Stationen Leinefelde, Artern, Erfurt, Gera, Meiningen und Sonneberg (berechnet nach Chmielewski (2003))	21
Tabelle 6: Matrix standorttypabhängiger Relativerträge für Winterweizen und Triticale (StT – Standorttyp, NE_{WW} – Relativertrag Winterweizen, NE_{TR} – Relativertrag Triticale).....	24
Tabelle 7: Übersicht über in YIELDSTAT berücksichtigte fruchtartspezifische Vegetationsjahre	26
Tabelle 8: Fruchtartabhängige Korrekturgröße zur Berücksichtigung der ertragswirksamen Wasserversorgung während der Hauptwachstumsphase	26
Tabelle 9: Fruchtartspezifische Parameterzusammenstellung für den statistischen Ansatz zur Ermittlung der Ernteverluste (Gl. 2).....	27
Tabelle 10: Wirkungsgrad einer Erhöhung des CO_2 -Gehaltes der Atmosphäre auf Biomasse und Ertragsbildung bei landwirtschaftlich angebauten Fruchtarten [$\%(1ppm\ CO_2\text{-Erhöhung})^{-1}$]	29
Tabelle 11: Fruchtartspezifische Korrekturen der Basiserträge für die sechs anbaugiebtsrepräsentativen Kreise	31
Tabelle 12: Ertragsfortschritt durch Züchtung und Agromanagement (ohne Umwelteinflüsse) bei Getreide, Winterraps und Silomais ($dt\ ha^{-1}\ a^{-1}$) unter Praxisbedingungen im Freistaat Thüringen (nach Guddat, 2011a).....	38
Tabelle 13: Trendentwicklung bis 2050 basierend auf den realen Ertragstrends aus 1991-2010 für den Freistaat Thüringen für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais ($dt\ ha^{-1}\ a^{-1}$).....	38
Tabelle 14: Standortcharakteristik der Landesversuchsstationen Burkersdorf, Dornburg, Friemar, Großenstein, Heßberg und Kirchengel.....	40
Tabelle 15: Vergleich der Erträge aus der Kreisstatistik mit den mittels YIELDSTAT berechneten Kreisenerträgen für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais über die Landkreise Kyffhäuser, Altenburger Land, Hildburghausen, Sömmerda, Gotha und den Saale-Orla-Kreis (1995-2010).....	54
Tabelle 16: Vergleich der Erträge aus der Landesstatistik mit den mittels YIELDSTAT berechneten Landeserträgen für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais im Zeitraum 1995-2010.....	56
Tabelle 17: Ertragsänderungen im Freistaat Thüringen für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais in 2021-2050 gegenüber 1981-2010 für vier Trendvarianten (Realisierungen: „trocken“ (tr) und „feucht“ (fe))	68
Tabelle 18: Ertragsvarianz (EV) und Ertragsspanne (ES) zwischen ertragsschlechtestem und ertragsbestem Jahr im Vergleich der 30jährigen Simulationszeiträume 1981-2010 und 2021-2050 für die „feuchte“ Realisierung (Freistaat Thüringen)	70
Tabelle 19a-19f: Absolute und relative Ertragsänderungen in 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010 für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais für vier Trendvarianten, getrennt nach den sechs repräsentativen Landkreisen (tr - „trockene“ Realisierung, fe - „feuchte“ Realisierung)	71
Tabelle 20a-20c: Absolute und relative Ertragsänderungen in 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010 für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais für vier Trendvarianten, getrennt nach den drei Boden-Klima-Räumen/Anbaugebieten (tr - „trockene“ Realisierung, fe - „feuchte“ Realisierung)	76
Tabelle 21a-21d: Absolute und relative Ertragsänderungen in 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010 für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais für vier Trendvarianten, getrennt nach den vier Planungsregionen (tr - „trockene“ Realisierung, fe - „feuchte“ Realisierung)	79

1 Vorbetrachtung zur Ertragsbildung

In der Landwirtschaft spielt der erzielbare Ertrag von den auf Ackerland angebauten Kulturen und vom Grünland für die Landwirtschaftsbetriebe eine existentielle Rolle, ist er doch unter Berücksichtigung von Ertragsstabilität und Ertragsqualität in der monetären Umrechnung eine der Hauptkomponenten bei der Berechnung des Deckungsbeitrages. Abhängig davon ist auch die Erfüllung von Vertragsleistungen, wie z. B. bei Silomais für die Bioenergieproduktion. Die erzielbaren Erträge sind Basis für das gesamte Betriebsergebnis und damit für die langfristige Betriebssicherheit. Der Ertrag einer Fruchtart ist das Resultat einer komplexen Verknüpfung vieler Komponenten und Größen (Abbildung 1).

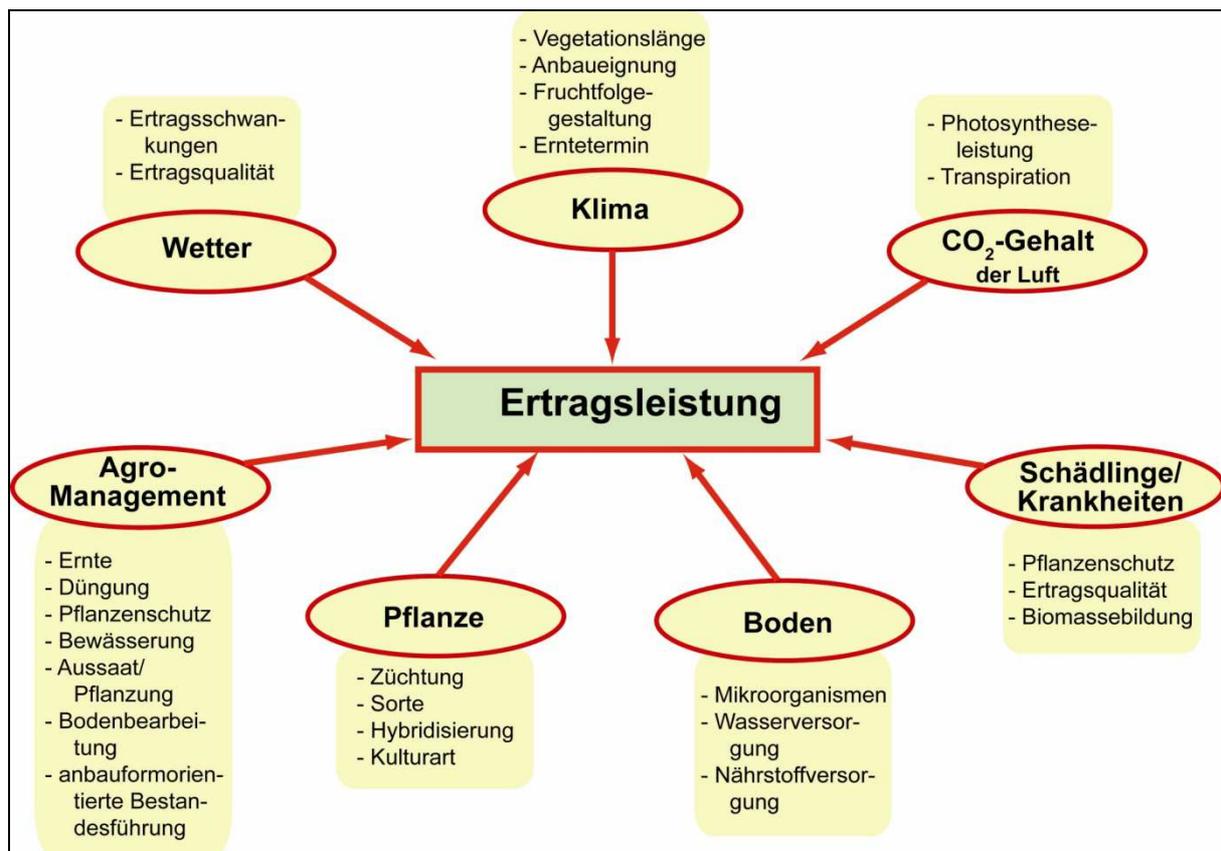


Abbildung 1: Übersicht über die die Ertragsleistung beeinflussenden Faktorkomplexe beim Anbau landwirtschaftlicher Fruchtarten

Im Zentrum steht die **Pflanze**, d. h. die Fruchtart selbst mit ihren unterschiedlichen ertrags- und standortorientierten Sorten und den unterschiedlichen am Verwendungszweck orientierten Züchtungsrichtungen. Wichtigste Komponente für die Entwicklung eines Pflanzenbestandes ist der **Boden**, aus dem sich die Pflanzen über ihr Wurzelsystem mit den nötigen Nährstoffen und dem notwendigen Wasser versorgen. Dabei spielen aber auch die Wechselwirkungen mit den Mikroorganismen im Boden eine wichtige Rolle. **Schädlinge** und **Krankheiten** an und in den Pflanzen können die Ertragsbildung sowie die Ertragsqualität landwirtschaftlicher Kulturen ganz nachhaltig negativ beeinflussen. Über den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln kann hier im Rahmen des **Agro-Managements** regulierend eingegriffen werden. Zum Agro-Management, über das versucht wird, die Ertragsbildung möglichst bei einer optimalen bzw. der Zielstellung angepassten Bestandesführung zu realisieren, gehören aber

auch Maßnahmen wie Düngung, Bewässerung, Pflanzenschutz, Bodenbearbeitung, Aussaat/Pflanzung und die Ernte. Über das **jährliche Wetter**, d. h. über die die Ertragsbildung antreibenden meteorologischen Größen Strahlung, Temperatur und Niederschlag, auf die der Mensch nur bedingt korrigierend eingreifen kann, werden Ertragsvariabilität und Ertragsqualität beeinflusst. Auch das sich über längere Zeiträume ändernde **Klima** hat Einfluss auf die Ertragsbildung und die Ertragsleistung einzelner Fruchtarten. Klimaabhängig können sich auch Anbaueignungen, Fruchtfolgen und sogar Erntetermine und damit das gesamte Management verschieben. Aber auch die gegenwärtig stete Zunahme des **atmosphärischen CO₂-Gehaltes** hat Einfluss auf die Ertragsbildung sowohl in quantitativer (z. B. CO₂-Düngungseffekt) als auch in qualitativer (z. B. Verringerung der Backqualität bei Getreide) Hinsicht. Die Effekte sind für C3- und für C4-Pflanzen unterschiedlich und können sowohl direkt auf Photosynthese und Kohlenstoffhaushalt wirken als auch indirekt über eine reduzierte Transpiration den Ertrag beeinflussen.

2 Aufgabenstellung

Für die Existenzsicherung und die Aufrechterhaltung der Konkurrenzfähigkeit der landwirtschaftlichen Betriebe im Freistaat Thüringen ist die Berücksichtigung des sich ändernden Klimas und die Kenntnis der daraus resultierenden möglichen Auswirkungen auf die Agrarökosysteme bei der Ableitung von Anpassungsmaßnahmen der Landwirtschaft an den Klimawandel bis Mitte des Jahrhunderts und darüber hinaus eine unabdingbare Voraussetzung.

Dabei spielt die regional-spezifische Abschätzung möglicher Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Produktivität der Agrarflächen beim Anbau landwirtschaftlicher Kulturen eine besondere Rolle, nicht nur für die Ableitung regional-spezifischer Anpassungsmöglichkeiten an den zu erwartenden Klimawandel, sondern auch für eventuell notwendig werdende staatliche Direktzahlungen und Fördermaßnahmen sowie deren regional unterschiedliche Verteilung.

Für alle landwirtschaftlichen Ackerstandorte im Freistaat Thüringen sollen daher unter Berücksichtigung der klimatischen Zonierungen sowie Standorttypen und damit auch Bodenformen die Auswirkungen von projizierten Klimaänderungen auf die Erträge ausgewählter landwirtschaftlicher Fruchtarten abgeschätzt werden.

Die Abschätzung zu erwartender Ertragsentwicklungen soll auf der Grundlage der Klimaregionalisierungsmethode WETTREG 2010 für das Emissionsszenario A1B (Realisierungen: „trocken“ und „feucht“) für die Fruchtarten Winterweizen, Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste und Silomais mit dem statistisch basierten Hybridmodell YIELDSTAT zur Ertragsabschätzung von unter Praxisbedingungen angebauten landwirtschaftlichen Fruchtarten erfolgen. Die oben entsprechend ihrer Anbauanteile genannten Fruchtarten, die auch einer stetigen züchterischen Dynamik unterliegen, haben in den landwirtschaftlichen Betrieben die größte wirtschaftliche Bedeutung (TMLNU, 2009, TMLNU, 2011).

Für die Abschätzung der bis 2050 zu erwartenden klimaänderungsbedingten Ertragsveränderungen sollen die beiden 30jährigen Zeiträume 1981-2010 und 2021-2050 die Grundlage bilden.

Um mit dem Modell YIELDSTAT eine belastbare Abschätzung der zukünftig zu erwartenden Ertragsentwicklungen im Freistaat Thüringen vornehmen zu können, ist es notwendig,

- die Ertragsentwicklung in Thüringen unter Berücksichtigung der wissenschaftlich-technischen Fortschritte im Agro-Management und in der Züchtung in den zurückliegenden Jahrzehnten zu analysieren,
- den durch einen Anstieg des atmosphärischen CO₂-Gehaltes sowie durch sich ändernde Niederschlags- und Temperaturverhältnisse zu erwartenden Ertragseinfluss standort-/boden- und fruchtartspezifisch abzuschätzen,
- den ausgehend vom gegenwärtigen Ertragsniveau wahrscheinlich bis zur Mitte des Jahrhunderts noch zu erwartenden ertragswirksamen wissenschaftlich-technischen Fortschritt unter Berücksichtigung von Züchtung und Management gemeinsam mit der TLL zu quantifizieren,
- das statistisch basierte Hybridmodell YIELDSTAT bezüglich seiner Anwendbarkeit für eine räumlich hoch aufgelöste Ertragsschätzung oben genannter Fruchtarten im Freistaat Thüringen auf der Grundlage historischer Daten von Versuchsstationen, Landkreisen sowie des Freistaates Thüringen zu überprüfen, zu adaptieren und zu validieren sowie
- mit dem validierten Modell ausgehend vom Basiszeitraum 1981-2010 eine regionale Ertragsabschätzung für den zukünftigen Klimazeitraum 2021-2050 unter Berücksichtigung der Klimaprojektion WETTREG-2010 (Emissionsszenario A1B) vorzunehmen und
- die Ergebnisse für unterschiedliche Gebietskulissen (repräsentative Landkreise, Boden-Klima-Räume/Anbaugebiete (BKR/AG), Planungsregionen, gesamtter Freistaat Thüringen) zu aggregieren.

3 Vorgehensweise

In Umsetzung der Aufgabenstellung zur Ertragsabschätzung zu ausgewählten landwirtschaftlichen Fruchtarten sind die folgenden Arbeitsschritte zu realisieren:

Schritt 1:

Datenbeschaffung und Datenaufbereitung

Beschaffung und modellinputgerechte Aufbereitung aller für die Aufgabenrealisierung notwendigen Boden-, Wetter-, Klima-, Fruchtartertrags-, Management- und sonstigen Daten auf Punkt- und regionaler Ebene (Karten).

Schritt 2:

Analyse der Ertragsentwicklung

Für die fünf bedeutendsten Fruchtarten im Freistaat Thüringen wird als Grundlage für eine Berücksichtigung des wissenschaftlich-technischen Fortschritts im Agro-Management und in der Züchtung sowie für die Ableitung von zukünftigen Ertrags-trends eine Analyse der Ertragsentwicklung der zurückliegenden Anbaudekaden durchgeführt.

Schritt 3:

Regionalisierung von Wetter- und Klimadaten

Die Regionalisierung der Wetter- und Klimadaten erfolgt hier durch eine Einteilung des Freistaates Thüringen in sogenannte *Klima-Patches* mit einer jeweils repräsentativen Klima- bzw. Niederschlagsmessstation des DWD. Dabei wird unter Nutzung

des *Spatial Analysis and Modeling Tool* (SAMT) auf die Methode nach VORONOI zurückgegriffen. Das Wetter bzw. Klima der jeweiligen repräsentativen Station gilt für alle Flächen innerhalb des dazugehörigen *Klima-Patches* einheitlich.

Schritt 4:

Fruchtartspezifische Überprüfung/Anpassung des Modells YIELDSTAT für die Standort- und Anbaubedingungen verschiedener Versuchsstandorte des Freistaates Thüringen

In diesem Schritt erfolgt für den Zeitraum 1995-2010 eine standortbezogene Modellüberprüfung/Modellanpassung unter Nutzung der konkreten Standort- und realen Wetterdaten der Versuchsstandorte Kirchangel, Grossenstein, Burkersdorf, Heßberg, Dornburg und Friemar, die die verschiedenen Bodenklimaräume und Anbauregionen im Freistaat Thüringen repräsentieren (Abbildung 2).

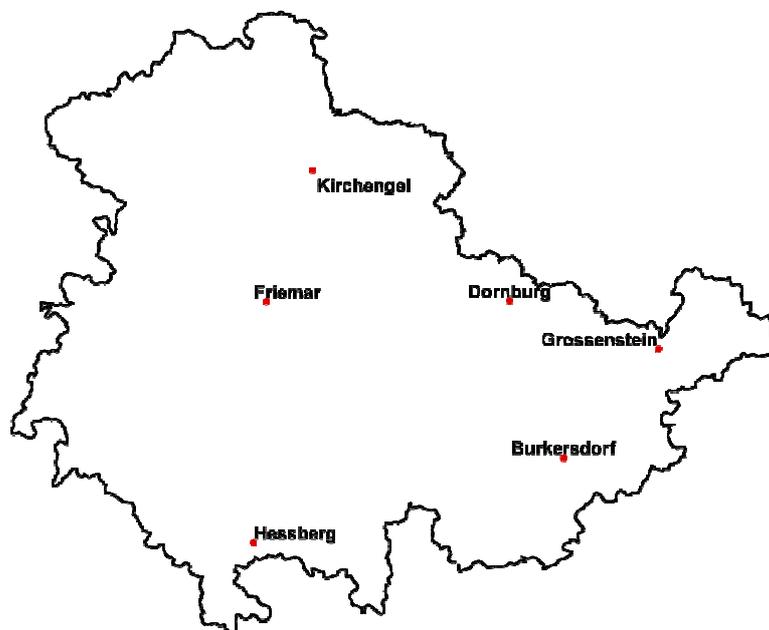


Abbildung 2: Lage der für die standortbezogene Überprüfung/Anpassung des Modells YIELDSTAT berücksichtigten landwirtschaftlichen Versuchsstationen der TLL

Schritt 5:

Validierung des Modells YIELDSTAT auf Landkreisebene unter Nutzung von Ertragsdaten aus der Kreisstatistik

In diesem Schritt erfolgt für den Zeitraum 1995-2010 eine regionale Überprüfung/Anpassung des Modells YIELDSTAT anhand der landkreisbezogenen Werte aus der Ertragsstatistik. Auf dem Landkreisebene werden repräsentativ für die Bodenklimaräume und Anbauggebiete die Kreise Kyffhäuser, Altenburger Land, Saale-Orla-Kreis, Hildburghausen, Sömmerda und Gotha (siehe Abbildung 3) betrachtet. Dabei repräsentieren die Kreise Kyffhäuser und Altenburger Land die *Lößböden der Übergangslagen*, die Kreise Hildburghausen und Saale-Orla-Kreis die *Verwitterungsböden der Übergangslagen* und die Kreise Sömmerda und Gotha die *Lößbö-*

den der Ackerebene. Bei der Berücksichtigung des realen Wetters wird hier auf die Klimastationen des DWD zurückgegriffen. Für den Saale-Orla-Kreis ist es die DWD-Station Gera, für den Kreis Hildburghausen die DWD-Station Meiningen, für den Kreis Sömmerda die DWD-Station Erfurt, für den Kyffhäuserkreis die DWD-Station Artern, für das Altenburger Land die DWD-Station Gera und für den Kreis Gotha die DWD-Station Erfurt.



Abbildung 3: Lage der für die regionale Überprüfung/Anpassung des Modells YIELDSTAT berücksichtigten repräsentativen Landkreise (grau)

Schritt 6:

Validierung des Modells YIELDSTAT auf Landesebene (gesamter Freistaat Thüringen) unter Nutzung von Ertragsdaten aus der Landesstatistik

In diesem Schritt erfolgt für den Zeitraum 1995-2010 eine landesweite Überprüfung des im Schritt 5 auf regionaler Ebene angepassten Modells YIELDSTAT anhand der Erträge aus der Landesstatistik. In Absprache mit der TLL werden ausgehend von den sechs repräsentativen Landkreisen die drei Bodenklimaräume/Anbauggebiete (Roßberg et al., 2007) in Abhängigkeit von Standort- und Anbaubedingungen jeweils nochmals zweigeteilt, in einen östlichen und einen westlichen Teil. Über eine flächengewichtete Zuordnung erfolgt basierend auf den Kreisenerträgen eine Hochrechnung auf den Landesertrag der jeweiligen Fruchtart.

Schritt 7:

Simulations- und Szenariorechnungen für den gesamten Freistaat Thüringen bis 2050

In diesem Schritt werden die Ertragsschätzungen mit dem für die Bedingungen des Freistaates Thüringen validierten Modell YIELDSTAT für die Klimazeiträume 1981-2010 (Referenzzeitraum) und 2021-2050 (Projektionszeitraum) auf der Grundlage von WETTREG-2010 (Emissionsszenario A1B, Realisierungen „trocken“ und „feucht“) flächendeckend für alle Ackerstandorte des Freistaates Thüringen durchgeführt. Berücksichtigt wird dabei auch die Ertragsbeeinflussung durch den zunehmenden

den CO₂-Gehalt in der Atmosphäre. Für den ersten Zeitraum wird dabei von einem Niveau im Agro-Management und der Züchtung ausgegangen, das dem des Jahres 2010 entspricht (Absprache mit der TLL). Die Szenario-Rechnungen werden für unterschiedliche Varianten der Berücksichtigung des bis 2050 zu erwartenden agrotechnischen und züchterischen Fortschritts durchgeführt.

Die für die Simulationsrechnungen notwendigen regionalisierten Klimadaten werden über das für den Freistaat Thüringen vorhandene Netz von Klima- und Niederschlagsmessstationen bereitgestellt. Dabei wird Thüringen in 299 repräsentative *Klima-Patches* unterteilt, für die die jeweils notwendigen Klimaszenariodatensätze bis 2050 erzeugt werden.

Schritt 8:

Aggregation der Ergebnisse der Szenariosimulationen für einzelne Gebietskulissen

Die für die einzelnen Simulationszeiträume und Simulationsszenarien erzeugten Ergebnisse werden für vier verschiedene Gebietskulissen aggregiert und zwar für:

1. repräsentative Landkreise (Sömmerda, Gotha, Altenburger Land, Kyffhäuserkreis, Hildburghausen und Saale-Orla-Kreis),
2. Boden-Klima-Räume/Anbaugebiete (*Lößböden der Ackerebene, Lößböden der Übergangslagen, Verwitterungsböden der Übergangslagen*)
3. Planungsregionen (*Nordthüringen, Mittelthüringen, Südwestthüringen, Ostthüringen*) und
4. den gesamten Freistaat Thüringen.

4 Analyse der Ertragsdaten

Eine wichtige Voraussetzung für die Anpassung des statistisch basierten Modells YIELDSTAT zur standortdifferenzierten Ertragsabschätzung an die Bedingungen im Freistaat Thüringen ist die Kenntnis der Ertragsentwicklung in der Vergangenheit, d.h. der über die einzelnen Anbaudekaden der Vergangenheit erkennbare Ertrags-trend. Dieser wird durch den Züchtungsfortschritt, den Fortschritt im Agro-Management und geringfügig auch durch eine bereits in der Vergangenheit zu beobachtende Zunahme der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre (1 ... 2 ppm a⁻¹) beeinflusst.

Aus der Ertragsdatenanalyse wird deutlich, dass es beim Ertragstrend der einzelnen landwirtschaftlichen Fruchtarten zwischen den landwirtschaftlichen Versuchsstationen (VS) des Freistaates Thüringen und der landwirtschaftlichen Praxis (hier Kreis- und Landesebene) deutliche Unterschiede gibt. In Tabelle 1 sind die analysierten Ertragstrends als jährlicher Zuwachs (dt ha⁻¹ a⁻¹) für die drei Ebenen (Versuchsstation, Kreis, Land) bei Berücksichtigung unterschiedlicher Zeiträume für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais im Vergleich dargestellt. Für die VS muss ergänzt werden, dass die Ertragsdatenanalyse aufgrund der Landessortenversuche erfolgte.

Aus Tabelle 1 wird deutlich, dass der in den VS erreichte jährliche Ertragszuwachs in der Regel höher ausfällt als der in der Praxis erreichte jährliche Ertragszuwachs. Unterschiede im Ertragszuwachs gibt es auch bei den beiden letzten Anbaudekaden. Auf Kreis- und Landesebene ist der Ertragszuwachs im Zeitraum 1991-2000 immer höher als im Zeitraum 2001-2010. Bei den VS ist bis auf Winterraps der gleiche Sachverhalt zu erkennen. Die Beobachtung eines rückläufigen Ertragszuwachses

oder gar einer Stagnation ist auch in anderen Bundesländern, wie z.B. im Freistaat Sachsen (LfLUG, 2009), aber auch europaweit zu beobachten (Olesen et al., 2011; Brisson et al., 2010; Supit et al., 2010; Finger, 2008). In Abbildung 4 sind für die einzelnen Fruchtarten beispielhaft für die Landesebene die Ertragsentwicklungen dargestellt.

Vergleicht man den linearen Ertragstrend auf Kreis- und Landesebene sind die Unterschiede nicht sehr groß. Vernachlässigbar gering sind die Unterschiede beim Trend zwischen Kreis- und Landesebene, wenn man den fast 50jährigen Zeitraum 1963-2010 betrachtet.

Tabelle 1: Linearer Ertragstrend (hier: jährliche Rate ($\text{dt ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$)) für die Landesversuchsstations-, die Kreis- und die Landesebene (Grundlage: 6 Versuchsstationen (Abbildung 2); 6 repräsentative Kreise (Abbildung 3))

Fruchtart	Zeitraum	VS-Ebene	Kreis-Ebene	Landes-Ebene
Winterweizen				
	1991-2000	2,84	1,69	1,76
	2001-2011	1,15	0,04	0,15
	1963-2010		0,89	1,00
Wintergerste				
	1991-2000	2,00	1,22	1,26
	2001-2011	1,40	1,03	0,98
	1963-2010		0,89	0,91
Sommergerste				
	1991-2000	1,04	0,15	0,23
	2001-2011	-0,15	0,07	0,05
	1963-2010		0,50	0,57
Winterraps				
	1991-2000	0,51	0,71	0,85
	2001-2011	1,13	0,54	0,56
	1963-2010		0,52	0,52
Silomais				
	1991-2000	5,06	10,57	9,06
	2001-2010/11	3,08	0,42	-4,09
	1963-2010		2,03	2,03

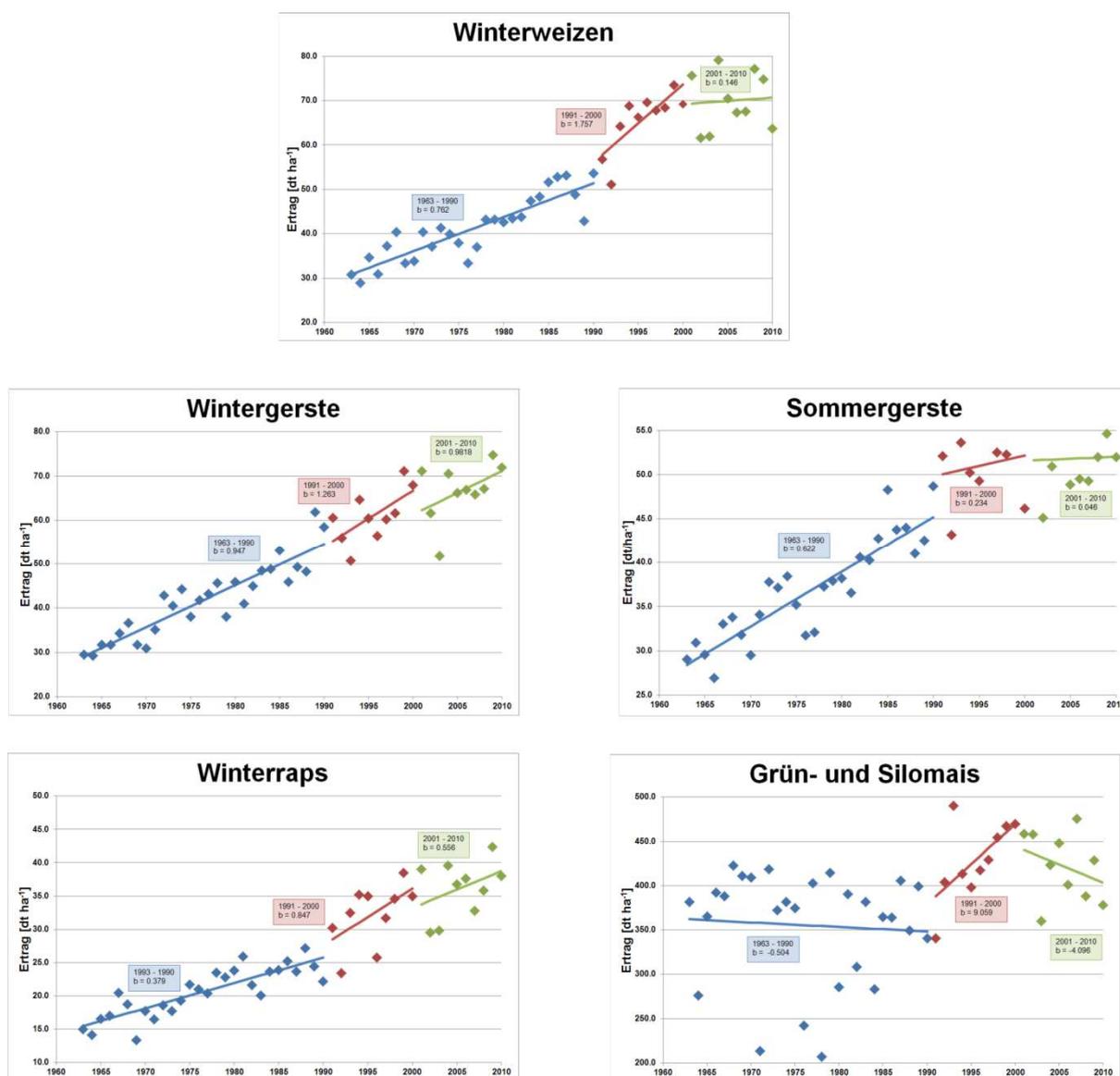


Abbildung 4: Ertragsentwicklung für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais für den Freistaat Thüringen im Zeitraum 1963-2010.

Bei einer Anwendung des Modells YIELDSTAT sowohl für die Versuchsstations- als auch für die Kreis- bzw. Landesebene müssen die Unterschiede im Ertragszuwachs unbedingt berücksichtigt werden.

Eine Anwendung des Modells YIELDSTAT auf verschiedenen Ebenen bedingt aber auch, dass die unterschiedlichen absoluten Ertragsniveaus, die zwischen den Landesversuchsstationen und der Praxis bestehen, über einen fruchtartabhängigen Faktor „Praxis – Versuchsstation“ zu berücksichtigen sind. Aufgrund des im Vergleich zur breiten Praxis besseren Agro-Managements und einer besseren Sortenaktualität, eines besseren Bodenfruchtbarkeitszustandes und einer geringeren Flächenheterogenität liegt das Ertragsniveau in den VS deutlich über dem Ertragsniveau in der Praxis. Beispielhaft sei hier auf das Ertragsniveau der Versuchsstation Heßberg im Vergleich zum Ertragsniveau des Kreises Hildburghausen verwiesen (Abbildung 5).

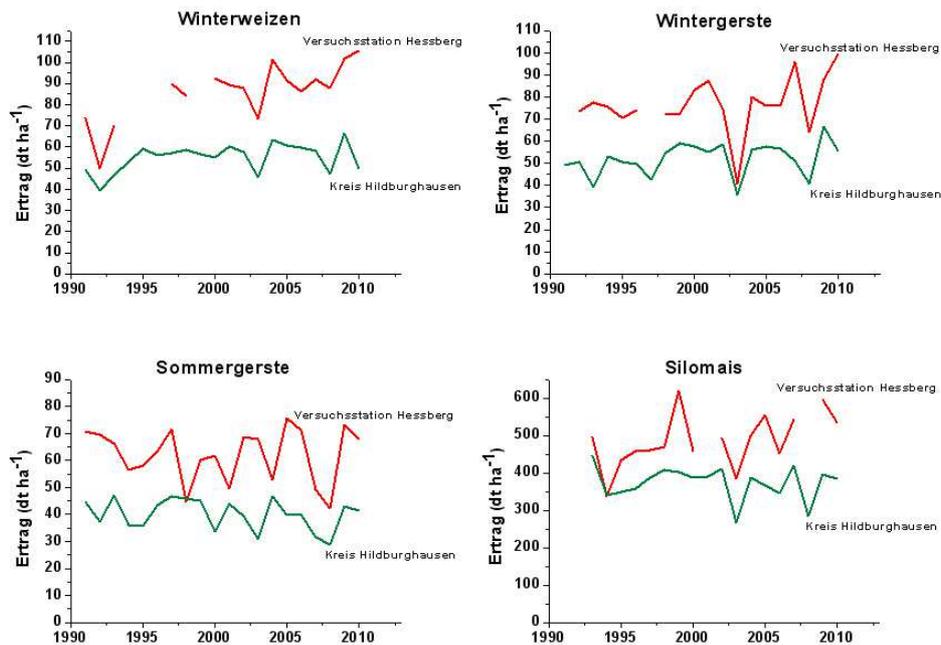


Abbildung 5: Vergleich des Ertragsniveaus der Versuchsstation Heßberg mit dem Ertragsniveau des Kreises Hildburghausen für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste und Silomais

In Trockenjahren, wie z.B. 1992, 2003 und 2006, sind die Unterschiede im Ertragsniveau in der Regel geringer, denn der Wassermangelstress wirkt dann überall gleich intensiv. Bei Einsatz von Beregnung/Bewässerung hätte in der Vergangenheit der Wassermangelstress in den Versuchsstationen kompensiert werden können.

Bei allen betrachteten Fruchtarten liegt das Ertragsniveau der Landesversuchsstationen signifikant über dem Praxis-Ertragsniveau der entsprechenden Kreise. Die für den Zeitabschnitt 1991 bis 2010 im Vergleich zum Praxis-Ertragsniveau durchschnittlich ermittelten höheren Erträge sind beispielhaft für die Versuchsstationen Kirchengel, Heßberg und Friemar fruchtartabhängig in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Ertragsniveau der Landesversuchsstationen im Vergleich zum Praxis-Ertragsniveau auf Kreisebene für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Wintertraps und Silomais [in % Praxisertragsniveau]

Versuchsstation	Kreis	Winterweizen	Wintergerste	Sommergerste	Wintertraps	Silomais
Kirchengel	Kyffhäuser	125	127	124	127	118
Heßberg	Hildburghausen	157	147	157	126	127
Friemar	Gotha	121	123	139	138	121
Mittel		133	134	140	122	130

5 Analyse der Klimadaten WETTREG 2010 (Emissionsszenario A1B)

Um die Ergebnisse zur Ertragsabschätzung unter dem Einfluss des sich ändernden Klimas im Freistaat Thüringen vergleichbar zu machen mit Ergebnissen entsprechender Studien in anderen Bundesländern, wie z. B. der für den Freistaat Sachsen (Mirschel et al. 2009) oder der für Brandenburg (Wiggering et al, 2008), wird auch hier auf das mit der Regionalisierungsmethodik WETTREG 2010 (Spekat et al., 2010) erstellte SRES-IPCC-Emissionsszenario A1B zurück gegriffen. Ausgangspunkt dafür ist das entsprechende Emissionsszenario des in Deutschland entwickelten globalen Zirkulationsmodells ECHAM5/MPI-OM (Roeckner et al., 2004).

Für den Freistaat Thüringen liegen für das WETTREG 2010 (Emissionsszenario A1B) für den Zeitraum 1961 – 2100 Tageswerte vor. Für jedes Jahr sind 10 Realisierungen verfügbar, wobei jede der 10 Realisierungen gleich wahrscheinlich ist. Damit stehen für die Szenariosimulationen für diesen Zeitraum die für YIELDSTAT notwendigen Klimagrößen für alle DWD-Beobachtungsstationen, d.h. für alle Klima- und Niederschlagsmessstationen in Thüringen zur Verfügung bzw. können abgeleitet werden.

Für die DWD-Klimastationen sind die Klimagrößen Lufttemperatur (Mittel, Minimum, Maximum), Niederschlag, Mittel der relativen Luftfeuchte, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer und Bedeckungsgrad verfügbar. Für die Stationen des Niederschlagsmessnetzes stehen lediglich die Niederschlagswerte zur Verfügung.

Für vergleichende Aussagen zur Klimaentwicklung wird immer auf 30jährige Zeiträume zurückgegriffen. Da alle Realisierungen gleich wahrscheinlich sind, wird hier für eine Klimadatenanalyse für den Freistaat Thüringen stellvertretend für alle auf die erste Realisierung (R 00) zurückgegriffen. Die dabei für 2021-2050 und 2071-2100 zu erwartenden Klimaänderungen werden auf den Referenzzeitraum 1981-2010 bezogen.

Für den gesamten Freistaat Thüringen gibt es bei der mittleren jährlichen Lufttemperatur im Vergleich zu 1981-2010 in der Zeitperiode 2021-2050 einen Temperaturanstieg, der bei 1,36 K liegt. Für die Periode 2071-2100 ist sogar mit einem Temperaturanstieg von 3,4 K zu rechnen. Der Temperaturanstieg ist aber über das Jahr nicht zeitkonstant, sondern ist in den einzelnen Jahreszeiten unterschiedlich ausgeprägt. Im Winter ist der Temperaturanstieg mit 1,93 K (2021-2050) bzw. 4,63 K (2071-2100) am größten und im Frühjahr mit 0,89 K bzw. 2,55 K am geringsten (vgl. Tabelle 3).

Die zu erwartenden Änderungen beim Jahresniederschlag fallen etwas moderater aus. Hier kommt es für den Freistaat Thüringen im Vergleich der Perioden 1981-2010 und 2021-2050 mit 3,5 % nur zu einem geringen Niederschlagsrückgang. Im Vergleich zur Periode 2071-2100 beträgt der Rückgang beim Jahresniederschlag 11,5 %. Die nicht sehr stark differierenden Jahresniederschläge sind aber im Laufe des Jahres sehr unterschiedlich verteilt, was gerade für das Wachstum landwirtschaftlicher Fruchtarten von Bedeutung ist. Während die Winter mit Niederschlagszunahmen von 6,7% (2021-2050) bzw. 13,5% (2071-2100) generell feuchter werden, werden das Frühjahr leicht sowie der Sommer und der Herbst doch wesentlich trockener (vgl. Tabelle 3). Dies ist günstig für die Grundwasserneubildung im Winter, aber schlecht für die Wasserversorgung der landwirtschaftlichen Pflanzenbestände in den wichtigsten Wachstumsperioden.

Tabelle 3: Änderung von Lufttemperatur und Niederschlag (1981-2010 vs. 2021-2050 bzw. 2071-2100) als Mittel für den Freistaat Thüringen

	Änderungen 1981-2010 vs.	
	2021-2050	2071-2100
Lufttemperatur		
Frühjahr (März - Mai)	+ 0,89 K	+ 2,55 K
Sommer (Juni - August)	+ 1,38 K	+ 3,66 K
Herbst (September - November)	+ 1,28 K	+ 2,74 K
Winter (Dezember – Februar)	+ 1,93 K	+ 4,63 K
Jahresmittel	+ 1,36 K	+ 3,40 K
Niederschlag		
Frühjahr (März - Mai)	- 2,2 %	- 5,4 %
Sommer (Juni - August)	- 5,9 %	- 27,1 %
Herbst (September - November)	- 9,1 %	- 20,3 %
Winter (Dezember – Februar)	+ 6,7 %	+ 13,5 %
Jahressumme	- 3,5 %	- 11,5 %

Im Freistaat Thüringen sind die zu erwartenden Temperaturanstiege nicht nur jahreszeitabhängig, sondern auch regional sehr unterschiedlich ausgeprägt. In den Klimastationen Leinefelde, Artern, Erfurt, Gera, Meiningen und Sonneberg schwanken die Anstiege in der Jahrestemperatur bis 2021-2050 zwischen 1,31 K und 1,45 K und bis 2071-2100 zwischen 3,29 K und 3,69 K (Tabelle 4). Bezogen auf den Winter sind in diesen 6 Stationen für 2021-2050 Temperaturanstiege zwischen 1,77 K und 2,04 K zu erwarten und für 2071-2100 zwischen 2,65 K und 5,55 K.

In den Hauptwachstumsmonaten Mai bis Juli dagegen liegen in diesen Stationen für 2021-2050 die Temperaturanstiege nur zwischen 1,15 K und 1,35 K und für 2071-2100 zwischen 2,99 K und 3,37 K (Tabelle 4).

Ebenso wie bei der Temperatur gibt es auch beim Niederschlag starke regionale Unterschiede. In 2021-2050 liegt für Meiningen die Abnahme beim Jahresniederschlag bei 5,2 %, während sie für Gera nur bei 2,2 % liegt. In 2071-2100 liegt für Gera die Abnahme bei 15,4 %, während sie für Sonneberg nur bei 8,7 % liegt (Tabelle 4).

Betrachtet man die für das Pflanzenwachstum wichtigen Monate April bis Juni, zeigt sich regional auch hierfür ein sehr unterschiedliches Verhalten im Niederschlag, der für die 6 betrachteten DWD-Stationen für 2021-2050 im Bereich zwischen +0,9 % (Artern) und -5,8 % (Leinefelde) und für 2071-2100 zwischen -7,0 % (Artern) und -20,4 % (Meiningen) liegt (Tabelle 4).

Für einen besseren Überblick sind in den Abbildungen 6 und 7 für die Zeiträume 1981-2010, 2021-205 und 2071-2100 die Jahresmitteltemperaturen und die Jahresniederschläge in einer regional feinen Auflösung dargestellt. Ausgegangen wird dabei von den 27 Klimastationen des DWD, die für den Freistaat Thüringen relevant sind. Die Regionalisierung erfolgte dabei ausgehend von den Klimastationen unter Berücksichtigung des Höhenmodells von Thüringen über einen höhenabhängigen Interpolationsalgorithmus (Franke et al., 2010).

Tabelle 4: Niederschlagssummen und mittlere Temperaturen für unterschiedliche Jahresabschnitte im Vergleich der Klimazeiträume 1981-2010 und 2021-2050 bzw. 2071-2100 für die DWD-Stationen Leinefelde, Artern, Erfurt, Gera, Meiningen und Sonneberg

	1981-2010 vs. 2021-2050			1981-2010 vs. 2071-2100		
	1981-2010	2021-2050	Δ	1981-2010	2071-2100	Δ
Station Leinefelde (356 m ü. NN)						
T (1-12)	7,88	9,31	1,43	7,88	11,57	3,69
N (1-12)	687	656	-31	687	583	-104
T (12-2)	0,23	2,23	2	0,23	5,04	4,81
T (5-7)	14,08	15,29	1,21	14,08	17,43	3,35
N (4-6)	173	163	-10	173	140	-33
N (6-8)	200	183	-17	200	122	-78
Station Artern (164 m ü. NN)						
T (1-12)	8,97	10,28	1,31	8,97	12,26	3,29
N (1-12)	433	422	-11	433	384	-49
T (12-2)	0,74	2,75	2,01	0,74	5,55	4,81
T (5-7)	15,71	16,84	1,13	15,71	18,77	3,06
N (4-6)	114	115	1	114	106	-8
N (6-8)	143	136	-7	143	105	-38
Station Erfurt (316 m ü. NN)						
T (1-12)	8,3	9,73	1,43	8,3	11,86	3,56
N (1-12)	468	448	-20	468	419	-49
T (12-2)	0,22	2,26	2,04	0,22	5,1	4,88
T (5-7)	14,88	16,08	1,2	14,88	18,18	3,3
N (4-6)	131	127	-4	131	120	-11
N (6-8)	163	152	-11	163	136	-27
Station Gera (311 m ü. NN)						
T (1-12)	8,36	9,73	1,37	8,36	11,65	3,29
N (1-12)	583	570	-13	583	493	-90
T (12-2)	0,3	2,29	1,99	0,3	5,06	4,76
T (5-7)	14,97	16,12	1,15	14,97	17,96	2,99
N (4-6)	153	152	-1	153	142	-11
N (6-8)	191	195	4	191	169	-22
Station Meiningen (450 m ü. NN)						
T (1-12)	7,48	8,84	1,36	7,48	10,98	3,5
N (1-12)	658	624	-34	658	575	-83
T (12-2)	-0,66	1,11	1,77	-0,66	3,78	4,44
T (5-7)	14,12	15,46	1,34	14,12	17,59	3,47
N (4-6)	162	154	-8	162	129	-33
N (6-8)	191	167	-24	191	120	-71
Station Sonneberg (626 m ü. NN)						
T (1-12)	6,56	8,01	1,45	6,56	10,17	3,61
N (1-12)	999	959	-40	999	912	-87
T (12-2)	-1,71	0,18	1,89	-1,71	2,65	4,36
T (5-7)	13,32	14,67	1,35	13,32	16,89	3,57
N (4-6)	222	211	-11	222	185	-37
N (6-8)	255	226	-29	255	167	-88

(T (t₁-t₂) – durchschnittliche Lufttemperatur (°C) im Zeitraum von Monat t₁ bis Monat t₂; N (t₁-t₂) – Niederschlagssumme (mm) im Zeitraum von Monat t₁ bis Monat t₂)

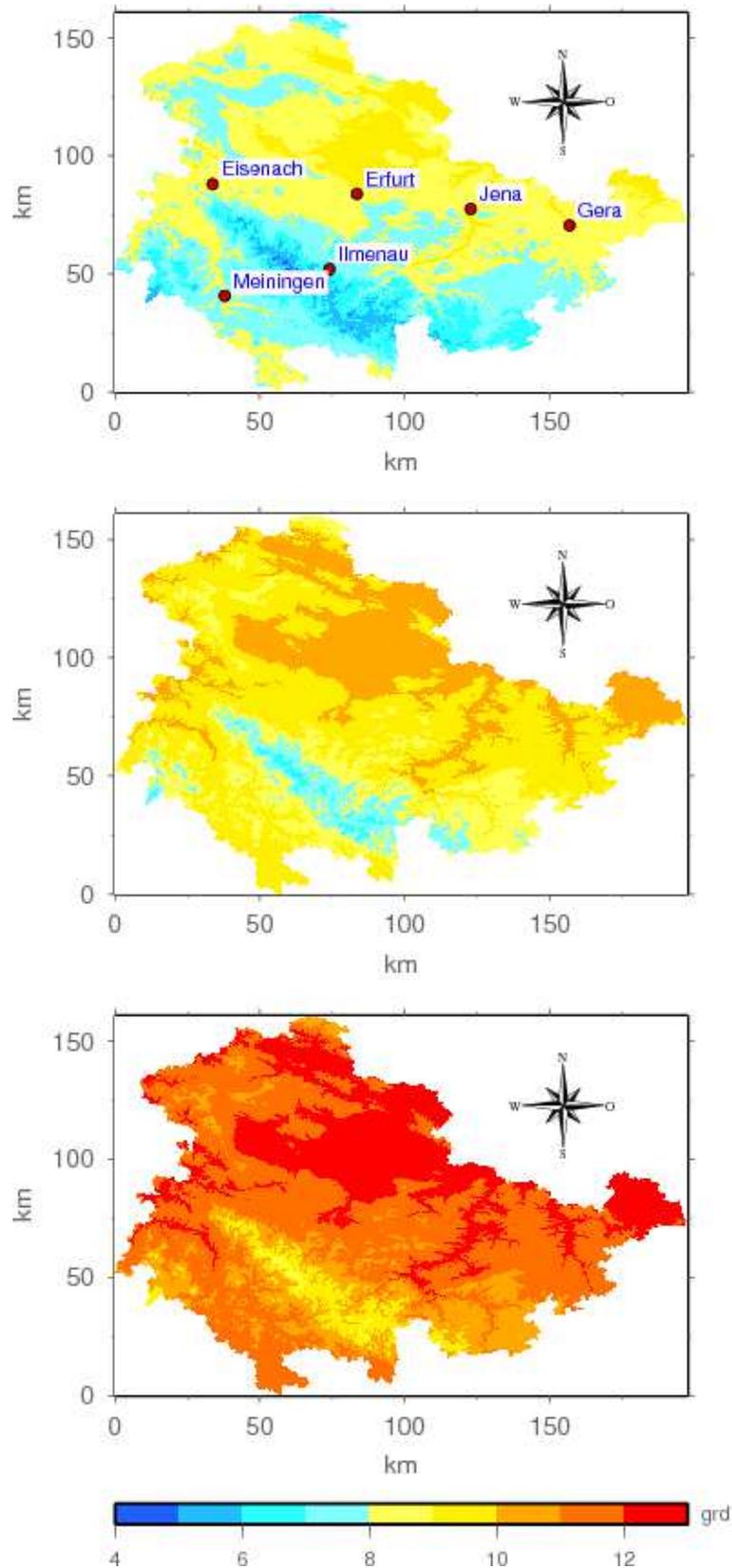


Abbildung 6: Mittlere Jahrestemperatur in ihrer regionalen Verteilung innerhalb des Freistaates Thüringen im Vergleich der Klimaperioden 1981-2010 (oben), 2021-2050 (Mitte) und 2071-2100 (unten), Datengrundlage: WETTREG 2010 (Emissionsszenario A1B)

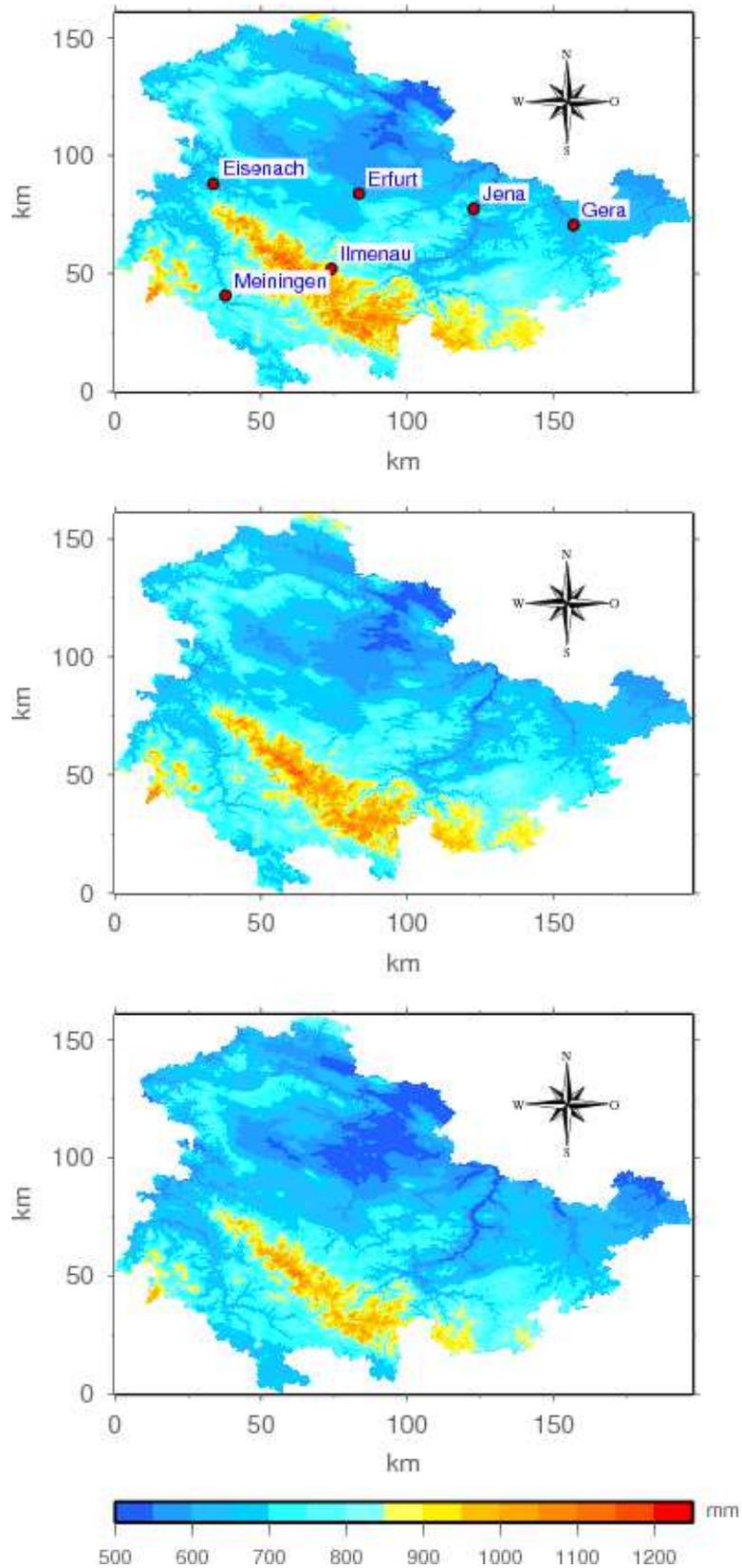


Abbildung 7: Jährliche Niederschlagssumme in ihrer regionalen Verteilung innerhalb des Freistaates Thüringen im Vergleich der Klimaperioden 1981-2010 (oben), 2021-2050 (Mitte) und 2071-2100 (unten), Datengrundlage: WETTREG 2010 (Emissionsszenario A1B)

Mit einem zukünftig zu erwartenden Temperaturanstieg, der besonders im Winter und Frühjahr ausgeprägt ist, ist auch ein immer früher einsetzender Vegetationsbeginn verbunden. Da auch mit einem immer späteren Ende der Vegetationsperiode im Herbst zu rechnen ist, verlängert sich die gesamte durch landwirtschaftliche Fruchtarten nutzbare Vegetationsperiode. Tabelle 5 zeigt für die DWD-Stationen Leinefelde, Artern, Erfurt, Gera, Meiningen und Sonneberg die Änderung für den Beginn, das Ende und die Dauer der Vegetationsperiode (berechnet nach Chmielewski (Chmielewski, 2003)) im Vergleich der Perioden 1981-2010, 2021-2050 und 2061-2090.

Tabelle 5: Beginn, Ende und Dauer der Vegetationsperiode im Vergleich der Klimazeiträume 1981-2010, 2021-2050 bzw. 2061-2080 für die DWD-Stationen Leinefelde, Artern, Erfurt, Gera, Meiningen und Sonneberg (berechnet nach Chmielewski (2003))

	1981-2010	2021-2050	2061-2090
Station Leinefelde (356 m ü. NN)			
Beginn	20. März	4. März	26. Januar
Ende	18. Oktober	31. Oktober	30. November
Dauer	212 Tage	241 Tage	309 Tage
Station Artern (164 m ü. NN)			
Beginn	10. März	19. Februar	19. Januar
Ende	24. Oktober	8. November	2. Dezember
Dauer	228 Tage	262 Tage	317 Tage
Station Erfurt (316 m ü. NN)			
Beginn	17. März	2. März	24. Januar
Ende	21. Oktober	5. November	28. November
Dauer	218 Tage	248 Tage	309 Tage
Station Gera (311 m ü. NN)			
Beginn	17. März	2. März	25. Januar
Ende	21. Oktober	2. November	26. November
Dauer	218 Tage	245 Tage	305 Tage
Station Meiningen (450 m ü. NN)			
Beginn	23. März	11. März	16. Februar
Ende	16. Oktober	23. Oktober	6. November
Dauer	207 Tage	225 Tage	263 Tage
Station Sonneberg (626 m ü. NN)			
Beginn	3. April	24. März	5. März
Ende	9. Oktober	17. Oktober	27. Oktober
Dauer	189 Tage	207 Tage	235 Tage

Vergleicht man den Vegetationszeitraum in 1981-2010 mit den Vegetationszeiträumen in 2021-2050 bzw. in 2061-2090 wird deutlich, dass sich durch den in den

nächsten Jahren zu erwartenden Temperaturanstieg der Vegetationsbeginn im Mittel der oben berücksichtigten DWD-Stationen für Thüringen wahrscheinlich um 14 Tage bzw. 45 Tage nach vorn verlagern wird und sich das Ende der Vegetationsperiode möglicherweise um 12 Tage bzw. 33 Tage hinaus schiebt. Daraus folgt, dass sich die Dauer der durch die Pflanzen nutzbaren Vegetationsperiode um 26 Tage bzw. 78 Tage vergrößern könnte.

Zusammenfassend kann bemerkt werden, dass entsprechend der WETTREG 2010-Projektionen bis Mitte des Jahrhunderts, d.h. bis 2050, klimaseitig für den Freistaat Thüringen keine gravierenden Veränderungen zu erwarten sein werden. Es ist aber voraussichtlich mit größeren regionalen Unterschieden zu rechnen. Auf höher gelegenen Agrarflächen, wie z.B. im Thüringer Wald, in der Rhön oder im Harz, verschieben sich bei einer ausreichenden Niederschlagsversorgung die Temperaturbedingungen weiter in Richtung Wachstumsoptimum. In den niedriger liegenden *Lößgebieten der Ackerebene* und der *Übergangslagen* bleiben die Temperaturbedingungen weiterhin wachstumsoptimal, wogegen die Wasserversorgung durch leicht abnehmende Niederschläge im Frühsommer/Sommer und eine leicht ansteigende Evapotranspiration etwas kritischer wird. Hiervon ausgehend kann abgeleitet werden, dass die zu erwartenden Auswirkungen auf die Pflanzenproduktion im Freistaat Thüringen bis 2050 voraussichtlich nicht sehr gravierend, sondern eher moderat ausfallen könnten.

6 Ertragsmodell YIELDSTAT

6.1 Modellbeschreibung

Grundlage für die modellgestützten Abschätzungen zu erwartender Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Ertragsleistung von im Freistaat Thüringen angebauten Hauptfruchtarten (Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps, Silomais) für den Zeitraum 2021-2050 bildet das Modell YIELDSTAT (**YIELD** estimation based on **STAT**istics). Dieses statistisch basierte Hybridmodell, ist auf eine Ertragsabschätzung für Anbauverhältnisse unter Praxisbedingungen für den konventionellen Pflanzenbau ausgerichtet. Die Ertragsleistung wird dabei in Originalsubstanz abgeschätzt, d. h. für Getreide bei einem Trockensubstanzgehalt von 86 %, für Winterraps von 91 % und für Silomais von 28 %.

Das statistisch orientierte Hybridmodell YIELDSTAT basiert auf standorttypabhängigen Algorithmen nach Kindler (1992) und Mirschel (Mirschel et al., 2003; Mirschel et al., 2006a), standortspezifischen Ertrags-Termen (Mirschel et al., 2006b; Mirschel et al., 2007), managementabhängigen Ertragskorrekturalgorithmen, statistischen Trendanalysen und Trendextrapolationen sowie auf einem Algorithmus zur Berücksichtigung des ertragswirksamen CO₂-Effektes. Parametrisiert ist das Modell YIELDSTAT für 16 verschiedene landwirtschaftliche Fruchtarten (Winterweizen, Wintergerste, Winterroggen, Sommergerste, Triticale, Hafer, Speisekartoffeln, Stärkekartoffeln, Zuckerrüben, Winterraps, Silomais, Klee, Klee gras (70:30), Luzerne, Luzerne gras (70:30), Ackergras) sowie für Intensiv- und Extensiv-Grünland sowie für 56 Standorttypen der MMK (8 AI-Standorttypen, 15 D-Standorttypen, 13 LÖ-Standorttypen, 3 Moor-Standorttypen, 17 V-Standorttypen) (Schmidt und Diemann, 1991). Ein Übersichtsschema des Modells YIELDSTAT ist in Abbildung 8 wiedergegeben.

Grundlage der standorttypabhängigen Algorithmen bilden fruchtartsspezifische relative Ertragsmatrizen, die auf einem sehr umfangreichen in der Praxis erhobenen Da-

tenmaterial basieren. In Tabelle 6 ist beispielhaft für Winterweizen und Triticale die relative Ertragsmatrix für die einzelnen Standorttypen wiedergegeben.

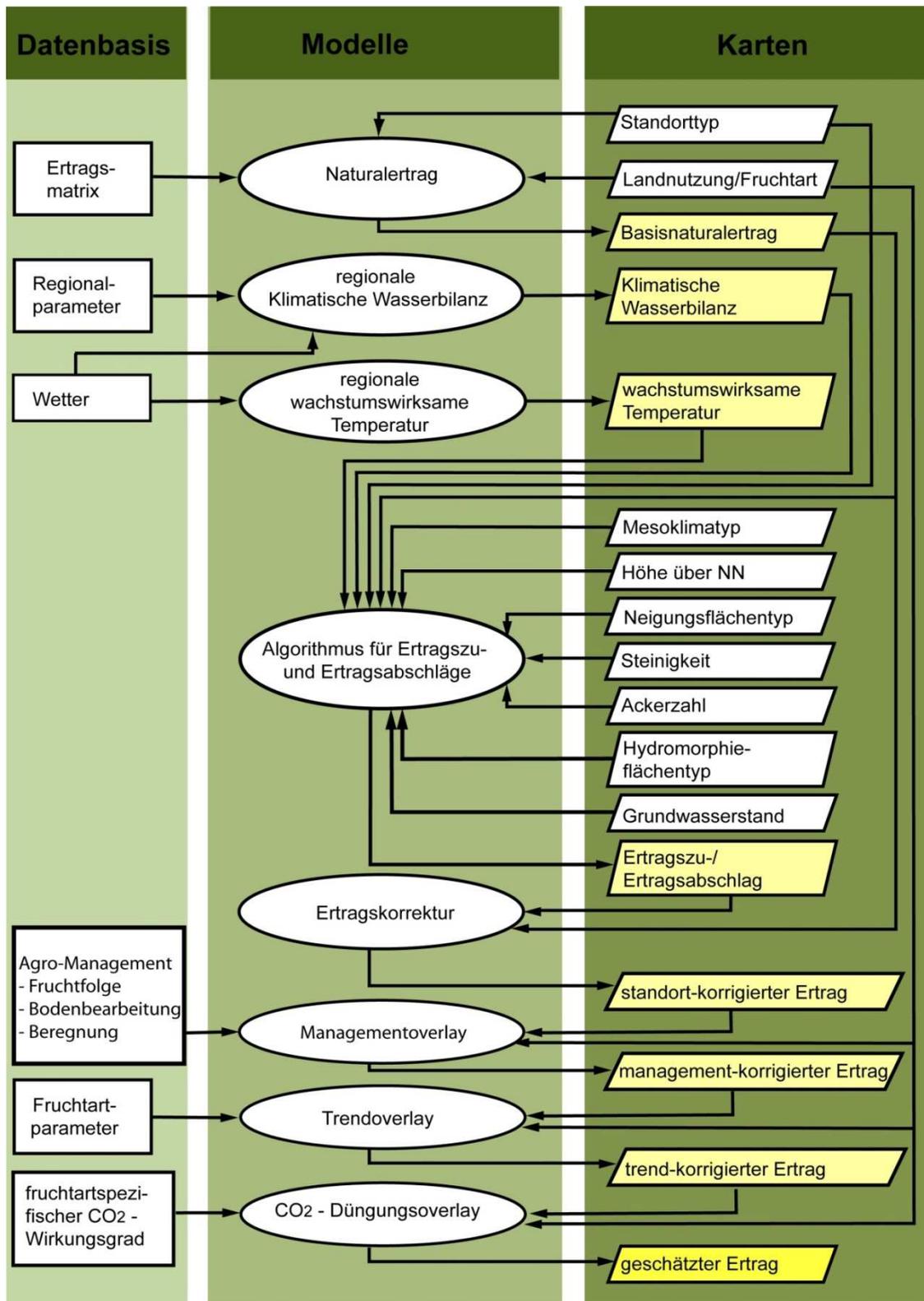


Abbildung 8: Schema des Modells YIELDSTAT zur standortdifferenzierten Ertragsschätzung auf landwirtschaftlichen Praxisschlägen

Tabelle 6: Matrix standorttypabhängiger Relativerträge für Winterweizen und Triticale (StT – Standorttyp, NE_{WW} – Relativertrag Winterweizen, NE_{TR} – Relativertrag Triticale)

Diluvialböden			Aluvialböden			Lößböden			Verwitterungsböden		
StT	NE _{WW}	NE _{TR}	StT	NE _{WW}	NE _{TR}	StT	NE _{WW}	NE _{TR}	StT	NE _{WW}	NE _{TR}
D1a	1,00	1,00	Al1a	1,74	1,51	Lö1a	2,17	1,92	V1a	2,00	1,76
D2a	1,06	1,14	Al1b	1,66	1,43	Lö1b	2,06	1,81	V2a	1,86	1,62
D2b	1,14	1,24	Al1c	1,57	1,35	Lö1c	1,94	1,70	V2c	1,74	1,54
D3a	1,26	1,24	Al2b	1,60	1,38	Lö2c	1,86	1,65	V3a	1,74	1,54
D3b	1,34	1,27	Al2c	1,49	1,30	Lö2d	1,83	1,59	V3b	1,71	1,49
D3c	1,29	1,19	Al3a	1,77	1,54	Lö3a	2,17	1,92	V3c	1,43	1,24
D4a	1,54	1,41	Al3b	1,66	1,46	Lö3c	1,94	1,70	V4a	1,60	1,41
D4b	1,63	1,49	Al3c	1,63	1,43	Lö4b	1,94	1,70	V4b	1,43	1,30
D4c	1,63	1,46				Lö4c	1,80	1,57	V5a	1,69	1,46
D5a	1,71	1,46				Lö5b	1,91	1,68	V5b	1,66	1,49
D5b	1,86	1,54				Lö5c	1,86	1,62	V5c	1,42	1,46
D5c	1,86	1,51				Lö6b	1,83	1,59	V6b	1,57	1,43
D6a	1,77	1,57				Lö6c	1,71	1,49	V7a	1,54	1,32
D6b	1,91	1,68							V7b	1,57	1,38
D6c	1,91	1,68							V7c	1,37	1,27
									V8a	1,57	1,49
									V9a	1,26	1,32

Die standortmerkmalspezifischen Ertrags-Terme, die für einige Fruchtarten bei Mirschel et al. (2006b) und Mirschel et al. (2007) beschrieben sind, sind fruchtartabhängige Korrekturalgorithmen für Ertragszu- und Ertragsabschläge (E_{korrt}), die die Standortspezifik berücksichtigen, d. h. Standortmerkmalsgrößen wie Hangneigung (HaNe), Steinigkeit (SK), Höhenlage (HüNN), Hydromorphie (Hy), Ackerzahl (AZ), Klimazone (KIZ) nach Adler (1987), wachstumswirksame Temperatur (WaWiT) nach Adler (1987), Temperatur im Winter (Dezember-Februar) sowie Klimatische Wasserbilanz (KWB) während des Vegetationsjahres und der Hauptwachstumsphase. Der Korrekturalgorithmus für die Ertragszu- und Ertragsabschläge ist beispielhaft für Winterraps (WRa) in Gleichung (1) wiedergegeben.

Entgegen der bei Kindler (1992) gemachten Annahme, für die Ertragswirksamkeit der Wasserversorgung der Pflanzenbestände die kalenderjährliche KWB zu verwenden, wurde hierfür richtigerweise von der fruchtartspezifischen vegetationsjahrbezogenen KWB ausgegangen. Die dabei fruchtartspezifisch berücksichtigten Vegetationsjahre sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

$$\begin{aligned}
E_{\text{kor}}(WRa) = & \left. \begin{aligned} & 0.04 \cdot KWB; \quad 1 \leq KIZ \leq 14 \quad \text{und} \quad KWB < -25 \\ & 0.03 \cdot KWB; \quad 14 < KIZ \leq 18 \quad \text{und} \quad -25 \leq KWB \leq 100 \\ & 0.02 \cdot KWB; \quad 18 < KIZ \leq 25 \quad \text{und} \quad KWB > 100 \\ & 0; \quad \text{sonst} \end{aligned} \right\} - \\
& - \left. \begin{aligned} & \left. \begin{aligned} & 0; \quad 0 \leq HaNe \leq 9 \\ & 2.0; \quad 9 < HaNe \leq 14 \\ & 4.0; \quad HaNe > 14 \end{aligned} \right\}; StT \in (V1a...V9a) \\ & \left. \begin{aligned} & 0; \quad 0 \leq HaNe \leq 9 \\ & 1.0; \quad 9 < HaNe \leq 14 \\ & 2.0; \quad HaNe > 14 \end{aligned} \right\}; StT \in (V1a...V9a) \end{aligned} \right\} + \\
& + \left. \begin{aligned} & 0.04 \cdot AZ; \quad KIZ \in (3...6,15...18) \\ & 0; \quad \text{sonst} \end{aligned} \right\} - \\
& - \left. \begin{aligned} & \left. \begin{aligned} & 0; \quad SK < 25 \\ & 1.0; \quad 25 \leq SK \leq 100 \\ & 2.0; \quad SK > 100 \end{aligned} \right\}; HaNe \leq 14 \\ & \left. \begin{aligned} & 0; \quad SK < 25 \\ & 0.5; \quad 25 \leq SK \leq 100 \\ & 1.0; \quad SK > 100 \end{aligned} \right\}; HaNe > 14 \end{aligned} \right\} + \quad (1) \\
& + \left. \begin{aligned} & 3.0; \quad Hy \in (S3, G3) \quad \text{und} \quad KWB < -15 \\ & 2.0; \quad Hy \in (GS2, GS3, G2, S2) \quad \text{und} \quad KWB < -15 \\ & 1.0; \quad Hy \in (G1, S1) \quad \text{und} \quad KWB < -15 \\ & 0; \quad \text{else} \end{aligned} \right\} + \\
& + \left. \begin{aligned} & 2.0; \quad Hy \in (S3, G3) \quad \text{und} \quad KIZ \in (3...6,15...18) \\ & 3.0; \quad Hy \in (GS2, GS3, G2) \quad \text{und} \quad KIZ \in (3...6,15...18) \\ & 1.0; \quad Hy \in (S2) \quad \text{und} \quad KIZ \in (3...6,15...18) \\ & 2.0; \quad Hy \in (S1, G1) \quad \text{und} \quad KIZ \in (3...6,15...18) \\ & 0; \quad \text{else} \end{aligned} \right\} - \\
& - \left. \begin{aligned} & 2.0; \quad StT \in (V1a...V9a) \quad \text{und} \quad 600 < HüNN \leq 700 \quad \text{und} \quad WaWiT < 4.0 \\ & 4.0; \quad StT \in (V1a...V9a) \quad \text{und} \quad HüNN > 700 \quad \text{und} \quad WaWiT < 4.0 \\ & 0; \quad \text{sonst} \end{aligned} \right\}
\end{aligned}$$

Tabelle 7: Übersicht über in YIELDSTAT berücksichtigte fruchtartspezifische Vegetationsjahre

Fruchtart	Beginn Vegetationsjahr	Ende Vegetationsjahr
Winterweizen	September (Aussaatjahr)	August (Erntejahr)
Wintergerste	September (Aussaatjahr)	August (Erntejahr)
Sommergerste	September (Aussaatjahr)	August (Erntejahr)
Winterroggen	September (Aussaatjahr)	August (Erntejahr)
Winterraps	August (Aussaatjahr)	Juli (Erntejahr)
Silomais	November (Vorjahr)	Oktober (Erntejahr)

Um zusätzlich die Ertragswirksamkeit der Wasserversorgung während der Hauptwachstumsphasen der Fruchtarten zu berücksichtigen, wurde in Auswertung der für Thüringen für unterschiedliche Aggregationsniveaus zur Verfügung stehenden Wetter- und Ertragsdaten eine pro mm KWB bezogene Korrekturgröße ($EK_{KWB-HWP}$) bestimmt. $EK_{KWB-HWP}$ ist fruchtartabhängig (siehe Tabelle 8) und ergibt multipliziert mit der KWB (in mm) über die jeweilige Hauptwachstumsphase eine entsprechend ausgerichtete additive Ertragskorrektur.

Tabelle 8: Fruchtartabhängige Korrekturgröße zur Berücksichtigung der ertragswirksamen Wasserversorgung während der Hauptwachstumsphase

Fruchtart	Hauptwachstumsphase	$EK_{KWB-HWP}$ [dt ha ⁻¹ (mm KWB) ⁻¹]
Winterweizen	April - Juni	0,04
Wintergerste	April - Mai	0,04
Winterroggen	April-Juni	0,04
Sommergerste	Mai – Juli	0,03
Winterraps	April – Mai	0,02
Silomais	Juni - August	0,2

Wie die letzte Anbauperiode seit 2000 deutlich gemacht hat, kommt es in der Praxis bedingt durch schlechte Wetterbedingungen vermehrt zu Ernteverlusten, d.h. dass widrige Wetterbedingungen eine verlustarme Ernte unmöglich machen. Ein Grund kann darin bestehen, dass z.B. eine optimale Getreideernte durch langanhaltende feuchte Wetterperioden nicht möglich, erst sehr zeitverspätet erfolgen kann und sich bedingt durch die hohe Kornfeuchte, durch Auswuchsgetreide, durch Halm- und Ährenabknicken sowie Lagerbildung hohe Ernteverluste ergeben. Ein weiterer Grund kann in der Nichtbefahrbarkeit der Schläge durch die Erntetechnik bestehen, so dass es nicht bzw. nur sehr verspätet erntbare Teilflächen bzw. Schläge gibt, die den flächenbezogenen geernteten Ertrag stark reduzieren. Jahre mit solchen Witterungsperioden, die teilweise signifikante Ernteverluste mit sich gebracht haben, sind z. B. die Jahre 2002 und 2010 (Agrarmeteorologische Monatsberichte (2002a, 2002b, 2002c, 2002d); DBV (2010); VR Agrar (2010); TMLNU (2010)). Da unter den zu betrachtenden zukünftigen Klimaszenarien solche widrigen Periode in mindestens gleicher Häufigkeit anzutreffen sind, wurde das bisher existente Modell YIELDSTAT dahingehend

erweitert, dass bei regionalen Betrachtungen ein additiver Term diese besondere Situation abbilden kann. Basierend auf einer kombinierten statistischen Auswertung solcher Witterungsereignisse und der dazugehörigen Erntedaten seit 1990 wurde zur Abschätzung der Ernteverluste (EV) der in Gl. (2) wiedergegebene Algorithmus abgeleitet:

$$EV = \begin{cases} 0; NiTage \leq miNiTage \\ A + B * NiTage + \begin{cases} 0; Ni\Sigma \leq miNi\Sigma \\ C + D * \begin{cases} Ni\Sigma; miNi\Sigma < Ni\Sigma \leq maNi\Sigma \\ maNi\Sigma; Ni\Sigma > maNi\Sigma \end{cases} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

Dabei bedeuten: EV – Ertragsverlust (dt ha⁻¹); NiTage – Anzahl der Tage mit Niederschlag (> 0 mm) im Haupterntezeitraum; miNiTage - langjährig mittlere Anzahl der Tage mit Niederschlag im Haupterntezeitraum; NiΣ - Niederschlagssumme im Haupterntezeitraum (mm); miNiΣ - langjährig mittlere Niederschlagssumme im Haupterntezeitraum (mm); maNiΣ - maximal berücksichtigte Niederschlagssumme im Haupterntezeitraum (mm); A, B, C, D – statistische Parameter. Der Haupterntezeitraum sowie die Größen A, B, C, D, maNiΣ, miNiTage und miNiΣ sind dabei fruchtartabhängig.

Für den Freistaat Thüringen sind die statistisch ermittelten Werte der fruchtartabhängigen Größen für die hier betrachteten Hauptfruchtarten in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Fruchtartsspezifische Parameterzusammenstellung für den statistischen Ansatz zur Ermittlung der Ernteverluste (Gl. 2)

	Winterweizen	Wintergerste	Sommergerste	Winterraps	Silomais
Haupterntezeitraum	15.07. - 15.08.	15.07.- 15.08.	15.07. - 15.08.	15.07. - 15.08.	15.09. - 15.10.
miNiTage	13	13	13	13	13
miNiΣ	60	60	60	60	40
maNiΣ	150	150	150	150	120
A	-4,230	-4,635	-6,261	-0,819	8,307
B	0,425	0,419	0,519	0,116	0,017
C	-4,170	-3,936	-4,270	-2,555	-30,881
D	0,056	0,053	0,057	0,034	0,619

In einem weiteren Schritt werden die managementbedingten Ertragsbeeinflussungen abgeschätzt. Berücksichtigung finden dabei die Ertragseinflüsse der Fruchtfolge, der Bodenbearbeitung und der Beregnung. Grundlage für die Ertragsbeeinflussung der

vor der Frucht angebauten Vorfrucht bildet eine Matrix (||M|| (Frucht, Vorfrucht)), de-

ren Einzelwerte aus einer Vielzahl von Versuchsergebnissen als mittlere Reaktion

abgeleitet worden sind. Die Matrixwerte stellen eine multiplikative Auf- oder Abwertung des bereits ermittelten Ertragsniveaus dar. Dieser Wert beträgt z. B. für Wintergerste bei Winterweizen als Vorfrucht 1,0; bei Winterroggen, Triticale und Wintergerste als Vorfrucht 0,9; bei Hülsenfrüchten als Vorfrucht 1,04; bei Ölfrüchten als Vorfrucht 1,05 und bei Feldgemüse als Vorfrucht 0,95.

Die Berücksichtigung der Ertragswirksamkeit der Bodenbearbeitung, wobei zwischen „Bodenbearbeitung mit Pflug“ (konventionell) , „konservierende Bodenbearbeitung“ und „Direktsaat“ unterschieden wird, erfolgt relativ zur „Bodenbearbeitung mit Pflug“ getrennt für Halmvorfrüchte (Wintergetreide, Sommergetreide, Körner- und Silomais) und Blattvorfrüchte (Ackerbohne, Futtererbse, Körnerlupine, Winter- und Sommerrap, Sonnenblume, Kartoffeln, Zuckerrüben, Klee und Klee gras, Luzerne und Luzernegras, Weidelgras). Grundlage bilden dabei eine intensive Versuchsdatenauswertung sowie eine umfangreiche Expertenbefragung. Bei Winterweizen z. B. beträgt der Einfluss einer „konservierenden Bodenbearbeitung“ gegenüber der „Bodenbearbeitung mit Pflug“ bei Blattvorfrüchten +5 %, wogegen bei Halmfrüchten kein Einfluss (0 %) ermittelt wurde. Bei der „Direktsaat“ ist dieser Einfluss bei Blattvorfrüchten +3 % und bei Halmvorfrüchten -5 %. Bei Winterrap ist dieser Einfluss entsprechend +4%, 0%, -5% und -10%. Unabhängig von diesen Tabellenwerten gilt für alle Fruchtarten, die auf leichten D1- und D2-Standorten angebaut werden und wo die Niederschlagshöhe im Anbaujahr (z .B. Winterweizen: September/Aussaatjahr – August/Erntejahr) kleiner 530 mm ist, dass der Einfluss der „konservierenden Bodenbearbeitung“ -5% und der Einfluss der „Direktsaat“ -10 % ist, sowohl für Halm- als auch für Blattfrüchte.

Der durch die Berechnung erzielte Mehrertrag einer Fruchtart wird ausgehend von der mit dem Modell ZUWABE (Mirschel und Wenkel, 2010) berechneten fruchtart- und jahresspezifischen Zusatzwassermenge über eine fruchtartspezifische Zusatzwasser-Mehrertrags-Relation ermittelt und dem Ertrag, der für Bedingungen ohne Zusatzberechnung ermittelt wird, zuaddiert. Die fruchtartspezifische Zusatzwasser-Mehrertrags-Relation wurde im Rahmen des Informations- und Entscheidungsunterstützungssystems LandCaRe-DSS (Wenkel et al., 2010) aus umfangreichen Literaturergebnissen, aus verfügbaren Wasserstafflungsversuchen im Feldexperiment sowie aus Praxisexperimenten abgeleitet. Im Mittel beträgt sie z. B. für Winterweizen $15 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, für Hafer $17 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, für Wintergerste $12 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, für Zuckerrüben $95 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ und für Kartoffeln (RG 3) $120 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (dazu auch Roth und Kachel, 1989; Teichhardt et al., 1984; Kachel und Roth, 1990).

Um für Ertragsabschätzungen in der Zukunft bis 2050 den wahrscheinlichen Fortschritt sowohl in der Pflanzenzüchtung (z.B. Hybridsorten) als auch im Agro-Management (neue Anbautechnologien und -strategien) aus den jetzigen Kenntnissen heraus zu berücksichtigen, ist in das Modell YIELDSTAT eine fruchtart- und regionsspezifische Ertragstrendextrapolation (E_{Trend})

$$E_{Trend} = T_{FA} \cdot (Jahr - 1990) \quad (3)$$

integriert, wobei das Züchtungs- und Managementniveau des Jahres 1990 den Ausgangspunkt bildet.

Für den Zeitraum von 1991 bis 2010 wurden entsprechend der Anwendung des Modells, d.h. die Ebene der Landesversuchsstationen, die Kreisebene und die Landesebene, unterschiedliche fruchtartabhängige Trendgrößen (T_{FA}) berücksichtigt, getrennt für die Perioden 1991-2000 und 2001-2010 (siehe Tabelle 1). Grundlage bilden dabei die realen Ertragsstatistiken der einzelnen Anwendungsebenen für den Zeitraum 1991-2010.

Da eine progressive Extrapolation des Trends nach 2010 nicht realistisch ist, wird T_{FA} im Zeitraum nach 2010 bis 2050 degressiv weitergeführt. Da die Entwicklung von T_{FA} in zukünftigen Zeitraum bis 2050 nur schwer abschätzbar ist, werden hier verschiedene Annahmen getroffen (siehe unter Pkt. 6.3 (Annahmen für die Simulationsrechnungen)).

Für die Abschätzung von Auswirkungen der Klimaänderung auf die Ertragsbildung landwirtschaftlicher Fruchtarten ist es unbedingt notwendig, den Düngungseffekt eines ansteigenden CO_2 -Gehaltes in der Atmosphäre zu berücksichtigen.

Ausgangspunkt für belastbare statistische Ansätze zur Berücksichtigung des CO_2 -Düngungseffekts auf die Biomasse- und Ertragsbildung ist eine breite Datenbasis mit Ergebnissen aus CO_2 -Anreicherungsversuchen. Die unter der Leitung des „Center for the Study of Carbon Dioxide and Global Change“ dazu erstellte Datenbank mit Ergebnissen aus Klimakammer-, Open-Top- und FACE-Experimenten (CO2SCIENCE, 2010) bildet dafür die ideale Voraussetzung, in die auch die FACE-Daten des vTI Braunschweig einfließen (Weigel et al., 2005; Manderscheid et al., 2010). Unterschieden wurde dabei in Versuche mit ausreichender Wasserversorgung und in Versuche mit nicht ausreichender Wasserversorgung (Wassermangelstress). Dabei wurde zwischen CO_2 -Anstieg und Biomasse- bzw. Ertragsentwicklung eine positive lineare Beziehung ermittelt, die zusätzlich noch abhängig ist von der Wasserversorgung, dargestellt durch die Klimatische Wasserbilanz. Die ermittelte Beziehung für den multiplikativ in YIELDSTAT berücksichtigten prozentualen Düngungseffekt pro 1 ppm CO_2 -Erhöhung lautet:

$$F_{CO_2}(FA) = [CO_2(KISz, J) - 385] \begin{cases} CO_{2\text{Eff}}; KWB \geq -50 \\ CO_{2\text{Eff}} \left(1 + 0,186 \frac{|KWB + 50|}{80}\right); -130 \leq KWB < -50 \\ 1,186 * CO_{2\text{Eff}}; -130 > KWB \end{cases} \quad (4)$$

Dabei bedeuten $F_{CO_2}(FA)$ – Faktor der komplexen CO_2 -Wirkung auf die Ertragsleistung, FA – Fruchtart, $CO_2(KISz, J)$ – atmosphärischer CO_2 -Gehalt im Jahr (J) des Klimaszenarios (KISz), $CO_{2\text{Eff}}$ – prozentualer Wirkungsgrad pro 1 ppm CO_2 -Erhöhung bei ausreichender Wasser- und N-Versorgung (Tabelle 10), KWB – klimatische Wasserbilanz (mm) im Vegetationszeitraum der angebauten Fruchtart.

Tabelle 10: Wirkungsgrad einer Erhöhung des CO_2 -Gehaltes der Atmosphäre auf Biomasse und Ertragsbildung bei landwirtschaftlich angebauten Fruchtarten [%/(1ppm CO_2 -Erhöhung)⁻¹]

Fruchtart	$CO_{2\text{Eff}}$	Fruchtart	$CO_{2\text{Eff}}$
Winterweizen	$6,218 \cdot 10^{-2}$	Silomais	$1,589 \cdot 10^{-2}$
Winter-/Sommergerste	$7,547 \cdot 10^{-2}$	Klee	$9,046 \cdot 10^{-2}$
Winterroggen	$6,883 \cdot 10^{-2}$	Luzerne	$7,853 \cdot 10^{-2}$
Zuckerrüben	$3,744 \cdot 10^{-2}$	Ackergras	$4,308 \cdot 10^{-2}$
Winterraps	$9,434 \cdot 10^{-2}$	Kleegras (70:30)	$7,748 \cdot 10^{-2}$
Kartoffeln	$6,162 \cdot 10^{-2}$	Luzernegras (70:30)	$6,727 \cdot 10^{-2}$

Die Quantifizierung des prozentualen Wirkungsgrades erhöhter CO₂-Gehalte auf die Biomasse der oben aufgeführten landwirtschaftlichen Fruchtarten basiert auf der Auswertung von 141 Klimakammer-, 98 Open-Top- und 55 FACE-Experimenten bei erhöhtem CO₂-Gehalt der Atmosphäre.

Im Vergleich der einzelnen Fruchtarten wird deutlich, dass die Reaktion bei Silomais auf eine Erhöhung des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre als C₄-Pflanze im Vergleich zu den C₃-Pflanzen deutlich geringer ausfällt.

Bei der Berücksichtigung des CO₂-Anstiegs im Zeitraum bis 2100 wurde vom durch das IPCC vorgegebenen Emissionsszenario A1B ausgegangen. Laut diesem Szenario ist 2050 mit einem CO₂-Gehalt in der Atmosphäre von 520 ppm zu rechnen und im Jahre 2100 mit 710 ppm (Abbildung 9).

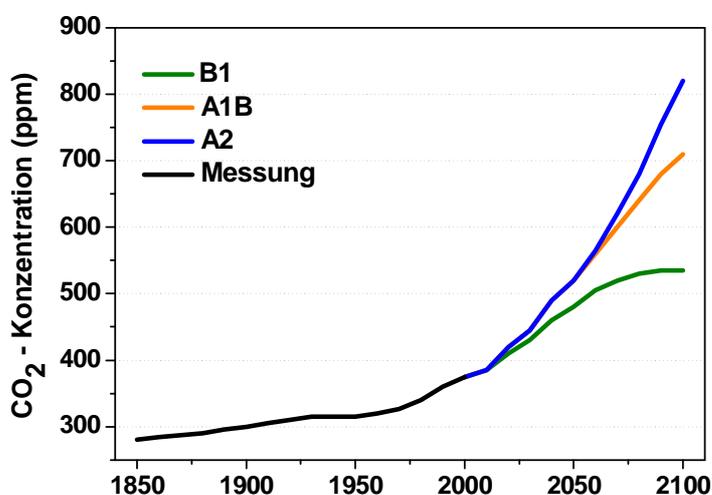


Abbildung 9: Durch die IPCC-Emissionsszenarien angenommene Entwicklung der atmosphärischen CO₂-Konzentration

Als Voraussetzung für die landesweiten Simulationen mit YIELDSTAT für zukünftige Klimaszenarien auf der Grundlage einer regionalisierten Modellparametrisierung für die sechs anbaubereichsrepräsentativen Kreise Kyffhäuser, Altenburger Land, Gotha, Hildburghausen, Sömmerda und Saale-Orla-Kreis wurde in Anpassung des Modells YIELDSTAT an die für 1995-2010 vorliegenden Kreisertragsstatistiken eine kreisspezifische additive Korrektur der fruchtartbezogenen Basiserträge notwendig. Die Korrekturen der Basiserträge sind kreisweise in Tabelle 11 zusammengefasst.

Um das Modell YIELDSTAT, das für Ertragsschätzungen unter Anbaubedingungen der Praxis erstellt und parametrisiert worden ist, unter den besseren Anbaubedingungen (besseres Agro-Management, bessere Sortenaktualität, höherer Bodenertragszustand, geringere Flächenheterogenität) einer Landesversuchsstation, in der in der Regel höhere Erträge als in der Praxis erzielt werden, anzuwenden, ist für diesen Fall die Einführung eines fruchtart- und versuchsstationsabhängigen Anpassungsfaktors „Praxis - Versuchsstation“ $f_{V-P}(FA, StT)$ notwendig. Dieser Faktor nimmt in der Regel Werte größer 1 an und liegt fruchtartabhängig für die Versuchsstation Kirchengel im Bereich 1,16 ... 1,85, für die Versuchsstation Heißberg im Bereich 1,08 ... 1,43, für die Versuchsstation Großenstein im Bereich 1,13 ... 1,73, für die Versuchsstation Friemar im Bereich 1,01 ... 1,45, für die Versuchsstation Dorn-

burg im Bereich 1,03 ... 1,24 und für die Versuchsstation Burkersdorf im Bereich 1,01 ... 1,52.

Tabelle 11: Fruchtartsspezifische Korrekturen der Basiserträge für die sechs anbaugebietsrepräsentativen Kreise

	Basisertragskorrektur (dt ha ⁻¹)				
	Winterweizen	Wintergerste	Sommergerste	Winterrapsp	Silomais
Kyffhäuser	8,45	4,44	13,27	6,59	-21,2
Altenburger Land	1,99	-2,84	1,36	3,17	-43,0
Gotha	4,91	2,55	9,96	2,12	-1,9
Hildburghausen	-3,26	-7,67	-4,09	-3,09	-56,3
Sömmerda	-4,85	-0,33	8,44	0,30	9,6
Saale-Orla-Kreis	6,28	-0 01	8,93	5,29	-52,1

6.2 Datenregionalisierung

Voraussetzung für eine regionaldifferenzierte Ertragsabschätzung mit YIELDSTAT unter Klimawandel ist, dass die Modellinputdaten, d.h. die Standort-, Boden- und Klimadaten, regionalisiert vorliegen. Für eine möglichst feine, aber rechentechnisch auch noch handhabbare Auflösung dieser Inputdaten, werden alle Karteninformationen in Form von Grid-Karten mit der Zellengröße von 1 ha (100 x 100 m) bereitgestellt.

6.2.1 Bodendatenregionalisierung

Die beste digital zur Verfügung stehende bodenkundliche Kartengrundlage für die neuen Bundesländer und damit auch für den Freistaat Thüringen ist die in den 1970er und 1980er Jahren im Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Münchenberg entwickelte *Mittelmassstäbige Landwirtschaftliche Standortkartierung* (MMK, Schmidt und Diemann, 1991) mit ihren vielfältigen Standortinformationen (Standorttyp, Substratflächentyp, Hydromorphieflächentyp, Neigungsflächentyp, Steinigkeit ...). Grundlage für die Ackerzahl-Karte ist die Gemeindedatei (GEMDAT, Lieberoth et al. (1977)). Die mesoskalige Klimazonierung nach Adler (1987) wurde für das Territorium der fünf neuen Bundesländer und damit auch für den Freistaat Thüringen neu digitalisiert. Die Höhenlage und die Hangneigung wurden aus dem digitalen Geländemodell, dem DGM 25, abgeleitet.

Für den Freistaat Thüringen sind als Beispiel für die MMK die Karten mit dem Standorttyp, dem Hydromorphieflächentyp und dem Neigungsflächentyp in den Abbildungen 10 bis 12 dargestellt. Abbildung 13 zeigt die Ackerzahl-Karte für den Freistaat Thüringen, Abbildung 14 die Höhenlagenkarte und die Abbildung 15 die mesoskalige Klimazonierung.

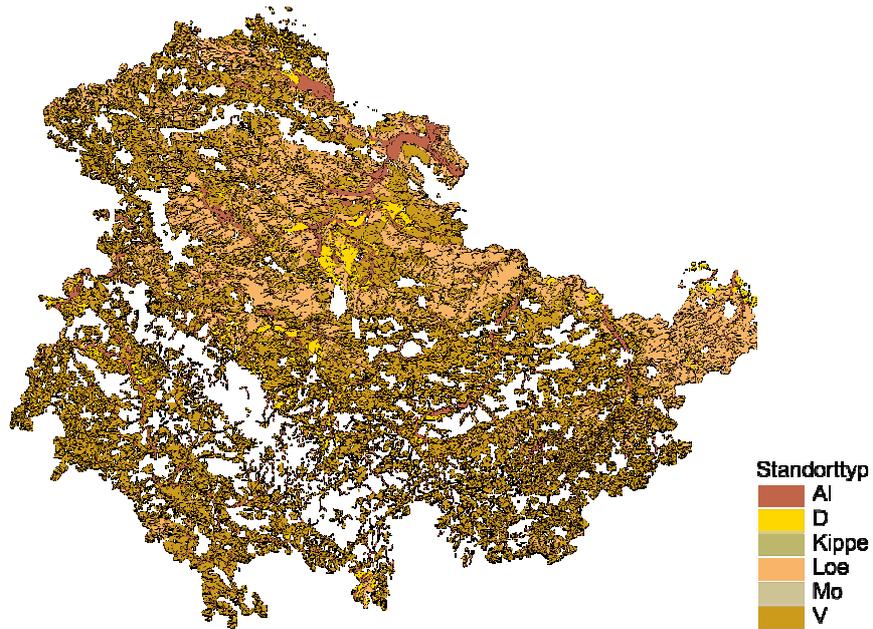


Abbildung 10: Standorttyp-Karte für den Freistaat Thüringen als Input für die regionaldifferenzierte Ertragsabschätzung mit YIELDSTAT

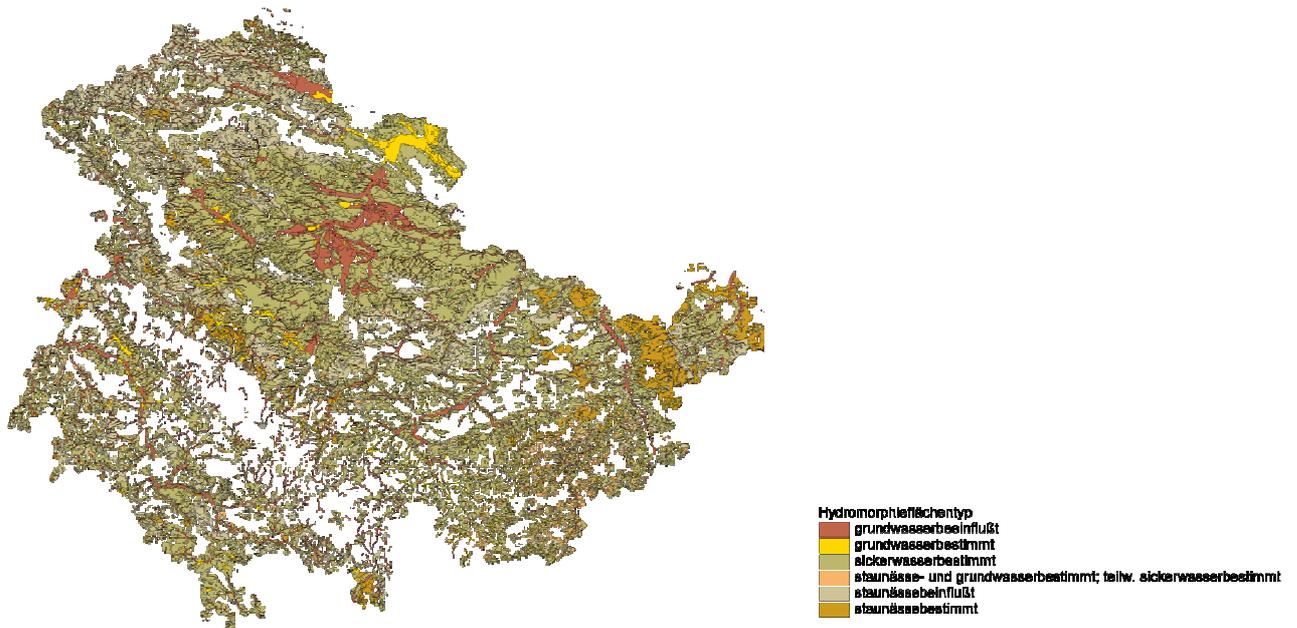


Abbildung 11: Hydromorphieflächentyp-Karte für den Freistaat Thüringen als Input für die regionaldifferenzierte Ertragsabschätzung mit YIELDSTAT

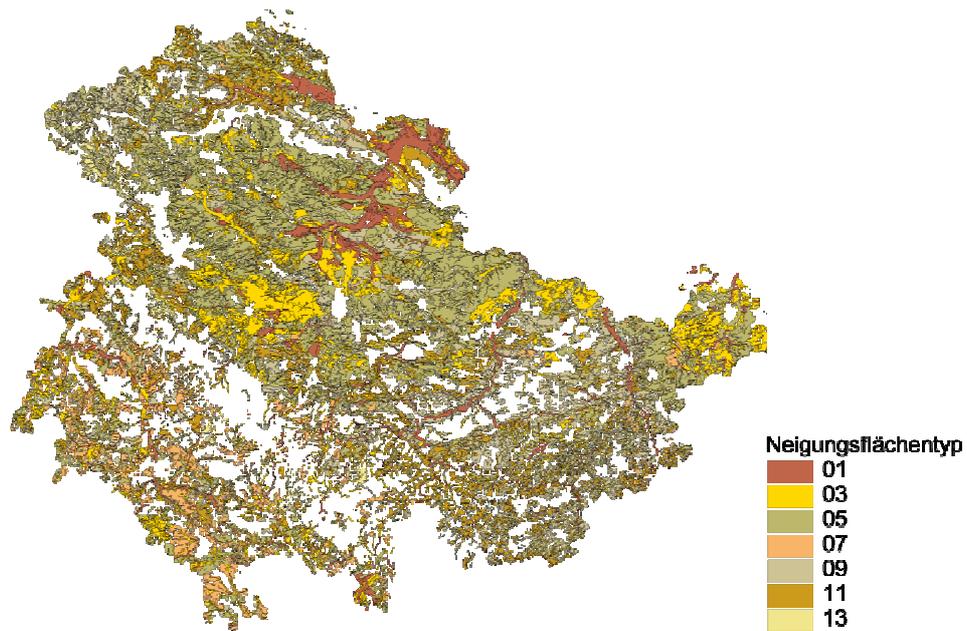


Abbildung 12: Neigungsflächentyp-Karte für den Freistaat Thüringen als Input für die regionaldifferenzierte Ertragsabschätzung mit YIELDSTAT

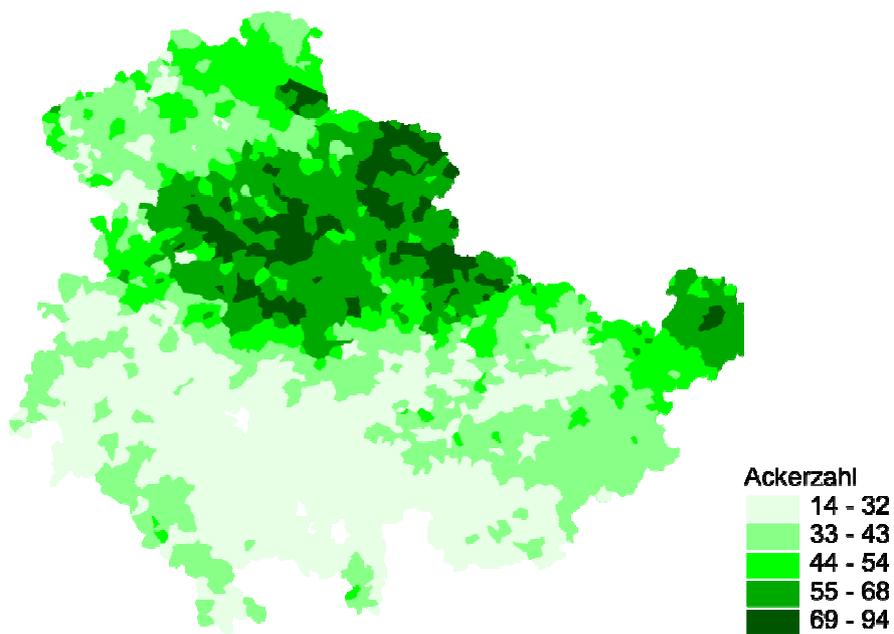


Abbildung13: Ackerzahl-Karte für den Freistaat Thüringen als Input für die regionaldifferenzierte Ertragsabschätzung mit YIELDSTAT

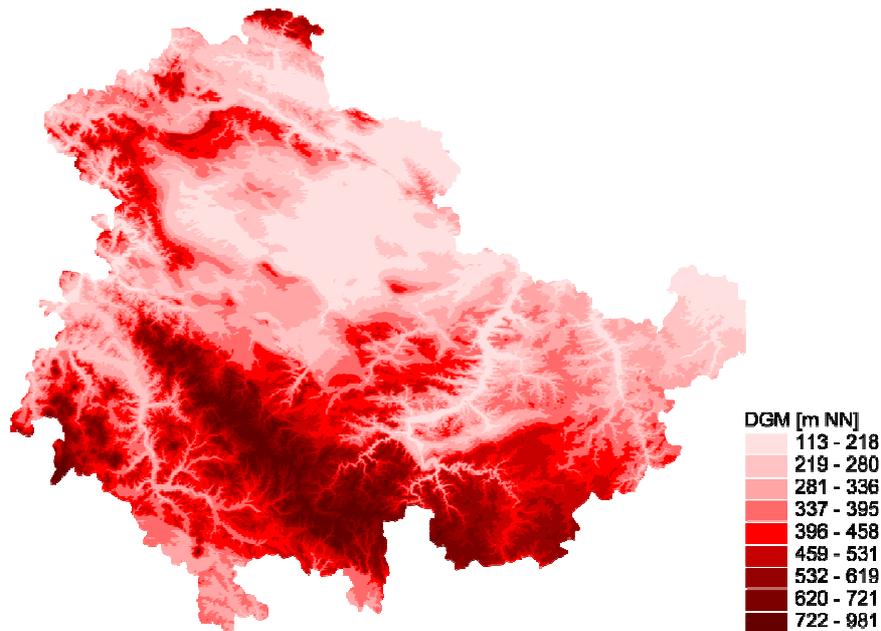


Abbildung 14: Höhenlagen-Karte für den Freistaat Thüringen als Input für die regionaldifferenzierte Ertragsabschätzung mit YIELDSTAT

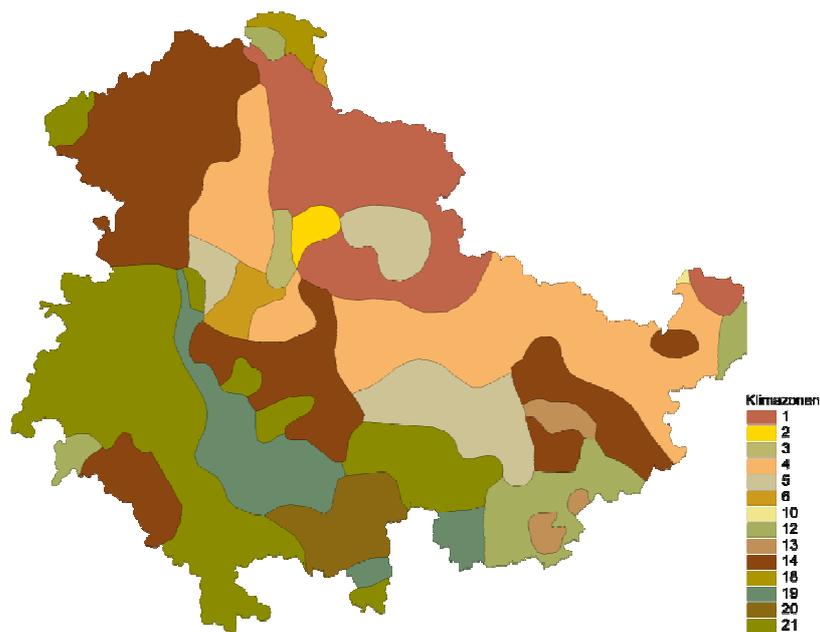


Abbildung 15: Karte der mesoskaligen Klimazonierung für den Freistaat Thüringen nach Adler (1987) als Input für die regionaldifferenzierte Ertragsabschätzung mit YIELDSTAT

6.2.2 Klimadatenregionalisierung

Für die auf den gesamten Agrarflächen des Freistaates Thüringen bzw. der einzelnen Boden-Klima-Räume/Anbauregionen bezogenen regionalen Ertragsabschätzungen sind regional zur Verfügung stehende Wetterdaten unabdingbare Voraussetzung. Besonders wichtig ist dies für den regional sehr differenziert auftretenden Nie-

erschlag. Strahlung und Temperatur als Tageswert differieren dagegen regional nicht so stark.

Für das zur Anwendung kommende Emissionsszenario A1B werden mit der Regionalisierungs-Methodik WETTREG 2010 insgesamt 10 Realisierungen bereitgestellt, die alle gleichwahrscheinlich sind. Um bei den Szenariosimulationen auch eine Spannbreite hinsichtlich der Auswirkungen auf das Ertragspotenzial aufzeigen zu können, wird aus den 10 Realisierungen eine „feuchte“ Realisierung und eine „trockene“ Realisierung ausgewählt. Die Auswahl erfolgt auf der Grundlage des Zeitraumes 2021-2050 und nicht aufgrund der Niederschlagsversorgung im gesamten Jahr, sondern aufgrund der Niederschlagsversorgung in den für das Pflanzenwachstum wichtigsten Jahreszeiten - Frühjahr und Sommer. In Absprache wurde hier durch die TLL für die „trockene“ Realisierung die Realisierung R33 und für die „feuchte“ Realisierung die Realisierung R77 vorgegeben (Michel, 2012).

Für die DWD-Klimastationen stehen alle für die Szenariosimulationen notwendigen Klimagrößen und für die Niederschlagsmessstationen nur die Niederschlagswerte zur Verfügung.

Um bei den Simulationsrechnungen für Thüringen mit einer regionalen Auflösung von 1 ha (100 x 100 m) in einem verträglichen Rechenzeitrahmen zu bleiben, wird bei der Bereitstellung der Klimadaten nicht auf die sehr rechenzeitaufwendige höhenabhängige Interpolation aufgesetzt, sondern auf einer Einteilung Thüringens in sogenannte *Klima-Patches*, die dem Stationsnetz des DWD entsprechen.

Grundlage für die Erstellung der *Klima-Patches* ist das Regionalisierungsverfahren nach VORONOI (Klein, 2005), welches nach dem Prinzip der kürzesten Entfernungen den DWD-Stationen die einzelnen Gridzellen zuordnet, sodass ein *Klima-Patchwork* entsteht. Wird dieses Verfahren nur für die 27 relevanten Klimastationen des DWD angewendet, die in Thüringen und den angrenzenden Gebieten liegen, entsteht ein recht grobes *Klima-Patchwork* (Abbildung 16), das die reale regionale Klimadatenverteilung nicht ausreichend widerspiegelt.

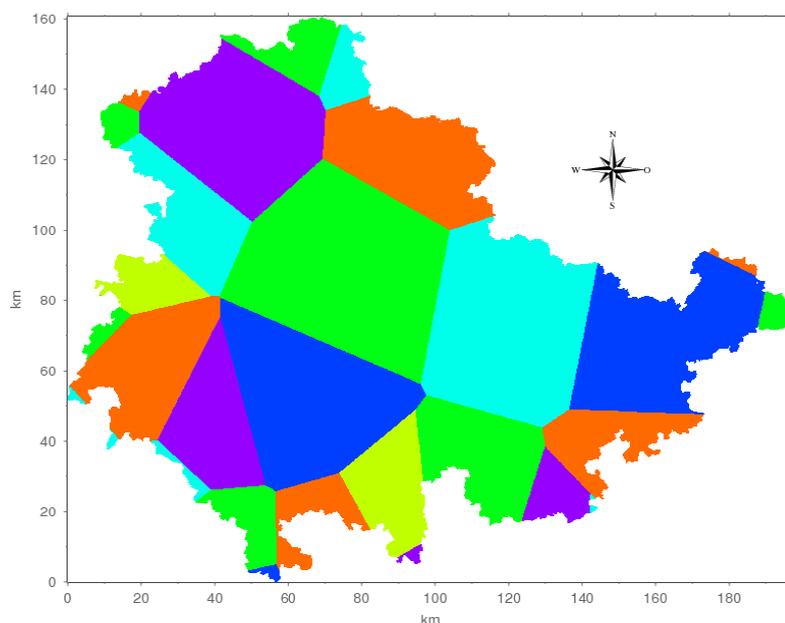


Abbildung 16: Unterteilung des Freistaates Thüringen in 27 *Klima-Patches* entsprechend des Klimastationsnetzes des DWD

Aus diesem Grund werden zusätzlich die Niederschlagsmessstationen des DWD mit einbezogen. Nach Anwendung des VORONOI-Verfahrens ergibt sich dann ein *Kli-*

ma-Patchwork, das aus 299 einzelnen *Klima-Patches* besteht (Abbildung 17). Das so ermittelte *Klima-Patchwork* repräsentiert dann die reale regionale Klimaverteilung ausreichend genau. Um für jede Station einen vollständigen Klimadatensatz (Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer) zur Verfügung zu haben, werden den Niederschlagsmessstationen die täglichen Werte für Temperatur und Sonnenscheindauer der jeweils nächstgelegenen DWD-Klimastationen zugeordnet. Die für die Berechnung der KWB notwendige potenzielle Verdunstung wird nach Wendling (Wendling, 1991) aus Temperatur und Globalstrahlung berechnet. Die Globalstrahlung wird dabei nach dem Algorithmus von Goudriaan (Goudriaan und van Laar, 1978) aus der Sonnenscheindauer ermittelt.

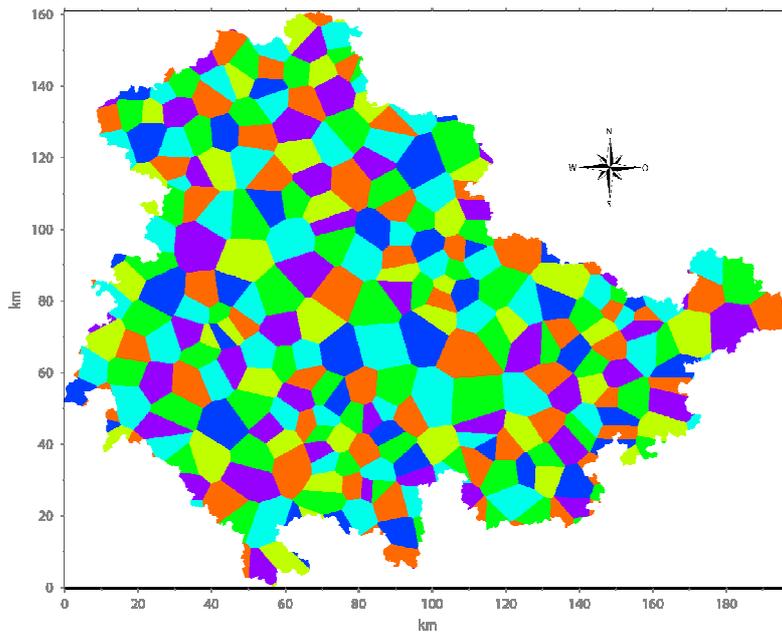


Abbildung 17: Unterteilung des Freistaates Thüringen in 299 *Klima-Patches* entsprechend des Klimastations- und Niederschlagsmessstellennetzes des DWD

6.3 Annahmen für die Simulationsrechnungen

Bei den Szenariorechnungen zur Abschätzung der Erträge werden fruchtartspezifisch immer nur die Ackerstandorte berücksichtigt, für die der Anbau der jeweiligen Fruchtart empfohlen wird und sich lohnt. Beim Anbau von Winterweizen werden daher bei den Berechnungen z. B. die D1a- und D2a-Standorte ausgespart. Diese sind dem Winterroggenanbau vorbehalten. Auch wird aus ökonomischen Gründen den Winterroggen auf Lößstandorten nur in begrenztem Umfang angebaut, die sind Winterweizen, Wintergerste und Zuckerrüben vorbehalten.

Bei der Landnutzung wird von praxisüblichen Markfruchtfolgen ausgegangen. Für zukunftsbezogene Ertragsabschätzungen auf der Datengrundlage von WETTREG 2010 (Emissionsszenario A1B) wird auf den heute üblichen Fruchtfolgen aufgesetzt, d.h. es wird zunächst keine an die jeweilige Marktsituation angepasste Veränderung der Flächennutzungen/Fruchtfolgen/Sorten vorgenommen. Weiterhin werden auf den Ackerflächen auch keine Stilllegungen berücksichtigt. In der Folge dieser Annahme bedeutet das, dass im Modell YIELDSTAT die abgebildete mögliche multiplikative Vorfruchtwirkung nicht zur Wirkung kommt, indem der Multiplikator gleich 1 gesetzt wird.

Bei den Szenariosimulationen vom konventionellen Anbau und der Bodenbearbeitung mit Pflug ausgegangen. Aus diesem Grund wird der im Modell YIELDSTAT integrierte multiplikative Modul zur ertragsbeeinflussenden Berücksichtigung der Bodenbearbeitungsverfahren nicht aktiv.

Bei allen Abschätzungen wird davon ausgegangen, dass das Erntegut bei Winterweizen, Wintergerste und Sommergerste 86 % TS (Trockensubstanz) enthält, bei Winterraps 91 % TS und bei Silomais 28 % TS.

Für die auf WETTREG 2010 (Emissionsszenario A1B) basierenden vergleichenden Szenariosimulationen (1981-2010 vs. 2021-2050) wird zwecks einer besseren Einschätzung der Veränderung der klimabedingten Ertragsleistungen von einem Ertragsniveau ausgegangen, das durch die Züchtung und das Agro-Management der Periode um 2010 geprägt ist.

Bei landesweiten Abschätzungen zu Ertragsentwicklungen einzelner landwirtschaftlicher Fruchtarten bis 2050 ist es notwendig, neben der klimaänderungsbedingten Beeinflussung der Ertragsleistung auch die Beeinflussung der Ertragsleistung durch Züchtungen und weiterentwickelte Anbauverfahren (Agro-Management) zu berücksichtigen. Während für die Simulationsrechnungen klimaseitig ein Szenario (WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B) vorgegeben ist, ist es schwer abzuschätzen, wie die zukünftigen Züchtungs- und Anbautechnologiefortschritte aussehen werden. Aus diesem Grund werden hier drei verschiedene Trendvarianten betrachtet. Gemeinsam ist allen drei Varianten, dass über den Zeitraum bis 2050 ausgehend vom gegenwärtigen Trendniveau keine stetige Linearität fortgeschrieben wird, sondern von einer degressiven Trendentwicklung ausgegangen werden kann.

Die erste Variante beinhaltet eine Abschätzung des durch Züchtungs- und Technologiefortschritt für den Freistaat Thüringen zu erwartenden Trends bis 2050, wie er durch die TLL eingeschätzt wurde (Guddat, 2011a). Die Einschätzung baut auf zu erwartenden Ertragsfortschritten auf, gegliedert in Züchtungsfortschritt, Fortschritt durch Pflanzenschutz und Fortschritt durch Düngung, Bodenbearbeitung, Sensortechnik, teilflächendifferenzierte Bearbeitung und Erntetechnik. In Tabelle 12 sind dekadewise bis 2050 die Ertragsfortschritte dargestellt, abgeschätzt sowohl für die drei Untergliederungen als auch als kumulativer Gesamtfortschritt.

In der zweiten Trendvariante wird von einem 50%igen Niveau der Variante 1 ausgegangen.

In der dritten Trendvariante wird ausgehend vom jeweiligen fruchtartspezifischen Trend für den Zeitraum 1991-2010 bis 2050 eine dekadewise stark degressive Reduzierung des Ertragstrends angenommen. Dabei werden für 2011-2020 nur 60 % des Ausgangstrends aus 1991-2010 angenommen, für 2021-2030 nur 40 %, für 2031-2040 nur 20 % und für 2041-2050 nur noch 10 % des Ausgangstrends (Tabelle 13).

Die regionale Anpassung des Modells YIELDSTAT an die Anbaubedingungen im Freistaat Thüringen erfolgte auf der Grundlage der sechs anbaugebietsrepräsentativen Kreise Kyffhäuser, Altenburger Land, Gotha, Hildburghausen, Sömmerda und Saale-Orla-Kreis. Für diese wurde aufgrund der Kreiserträge aus 1995-2010 eine kreisbezogene Modellparametrisierung vorgenommen. Diesen Kreisen wurden dann Bodenklimaregionen/Anbauggebiete (BKR/AG) zugeordnet, wobei jede der drei BKG/AG nochmals zweigeteilt wurde. Diese Zweiteilung erfolgte in Abstimmung mit der TLL so, dass jedem der sechs Kreise ein Teil der BKR/AG zugeordnet werden konnte, für das dieser Kreis repräsentativ ist. Bei den landesweiten Simulationsrechnungen kamen dann in den sechs BKG/AG-Unterteilungen jeweils die Modellparametrisierungen zur Anwendung, die dem jeweils zugeordneten repräsentativen Kreis entsprechen.

Tabelle 12: Ertragsfortschritt durch Züchtung und Agromanagement (ohne Umwelteinflüsse) bei Getreide, Winterraps und Silomais (dt ha⁻¹ a⁻¹) unter Praxisbedingungen im Freistaat Thüringen (nach Guddat, 2011a)

Fruchtart	2011-2020	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2011-2050
Züchtungsfortschritt					
Winterweizen	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Wintergerste	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Sommergerste	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Winterraps	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Silomais (TM)	1,50	1,30	1,10	0,90	0,12
Fortschritt durch Pflanzenschutz					
Winterweizen	0,20	0,15	0,15	0,10	0,15
Wintergerste	0,15	0,15	0,05	0,05	0,10
Sommergerste	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Winterraps	0,15	0,10	0,10	0,10	0,1125
Silomais (TM)	0,40	0,20	0,20	0,20	0,25
Fortschritt durch Düngung, Bodenbearbeitung, Sensortechnik, teilflächen-differenzierte Bearbeitung und Erntetechnik					
Winterweizen	0,20	0,10	0,10	0,10	0,125
Wintergerste	0,20	0,10	0,10	0,10	0,125
Sommergerste	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Winterraps	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Silomais (TM)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Fortschritt gesamt					
Winterweizen	0,55	0,40	0,40	0,35	0,425
Wintergerste	0,50	0,40	0,30	0,30	0,375
Sommergerste	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Winterraps	0,35	0,30	0,30	0,30	0,3125
Silomais (TM)	2,25	1,85	1,65	1,45	1,80

Tabelle13: Trendentwicklung bis 2050 basierend auf den realen Ertragstrends aus 1991-2010 für den Freistaat Thüringen für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais (dt ha⁻¹ a⁻¹)

Fruchtart	1991-2010 (100%)	2011-2020 (60%)	2021-2030 (40%)	2031-2040 (20%)	2041-2050 (10%)
Winterweizen	0,546	0,338	0,226	0,113	0,056
Wintergerste	0,714	0,429	0,286	0,143	0,071
Sommergerste	0,087	0,052	0,035	0,017	0,009
Winterraps	0,470	0,282	0,188	0,094	0,047
Silomais (TM)	0,123	0,074	0,049	0,025	0,012

6.4 Softwarekomponenten für regionale Szenariosimulationen

Die für die Szenariosimulationen notwendigen Klima- und Wetter-Inputdaten wurden in eine MySQL-Datenbank eingepflegt, die mit dem Simulationstool für das Modell YIELDSTAT gekoppelt ist. Die regionalen Karteninformationen wurden im Rasterformat bereitgestellt und für ein schnelles Arbeiten im hdf-Format vorgehalten. Das Modell YIELDSTAT, das aus mehreren Modulen besteht, und das Klimaregionalisierungsmodul für die WETTREG 2010 – Daten sind in C++ geschrieben und integraler Bestandteil des *Spatial Analysis and Modeling Tool (SAMT)* (Wieland et al., 2006, Mirschel et al., 2006c), einem Open-Source-Tool, das im Institut für Landschaftssystemanalyse des ZALF Müncheberg entwickelt wurde und gegenwärtig in der Version 3.1 vorliegt. Die Steuerung der gesamten Modellanpassungen und Szenariosimulationen erfolgte skriptgesteuert über aufgabenspezifische Python-Module.

Die statistische Auswertung über die verschiedenen Gebietskulissen erfolgte ebenfalls über speziell erstellte Python-Module unter Nutzung der python-eigenen Statistikpakete. Sämtliche Visualisierungen im regionalen Maßstab sowohl der Modellinputgrößen als auch der Ergebnisse der Szenariosimulationen erfolgten wieder im Rahmen von SAMT, wobei auch hier von der eingangs gewählten Rastereinteilung (100m x 100m (1ha)) des Freistaates Thüringen ausgegangen wurde.

7 Modellvalidierung mit realen Wetter- und Ertragsdaten

Für eine Anwendung des Modells YIELDSTAT unter den spezifischen Anbau- und Klimabedingungen des Freistaates Thüringen erfolgte eine Modelladaptation und Modellvalidierung für reale Wetterdaten an realen Ertragsdaten auf 3 verschiedenen regionalen Ebenen. Die kleinstregionale bzw. Punktebene wird durch die Landesversuchsstationen des Freistaates Thüringen Kirchengel, Friemar, Dornburg, Großenstein, Burkersdorf und Heßberg gebildet. Hierfür stehen die Ertragsdaten aus den Anbauversuchen (gemittelt über die angebauten Sorten) und die Wetterdaten der versuchsstationseigenen Wetterstationen zur Verfügung. Die nächst größere regionale Ebene wird durch die bodenklimaraum- und anbaugbietsrepräsentierenden Landkreise Kyffhäuser, Altenburger Land, Gotha, Hildburghausen, Sömmerda und den Saale-Orla-Kreis gebildet. Grundlage hierfür sind reale Erträge aus der Kreisstatistik und Wetterdaten der zugeordneten DWD-Stationen. Die dritte großregionale Ebene umfasst den gesamten Freistaat Thüringen. Hierfür stehen die Erträge der Landesstatistik und die Wetterdaten der DWD-Stationen zur Verfügung.

7.1 Landesversuchsstationen des Freistaates Thüringen

Zur Modellüberprüfung und -adaptation auf Versuchsstationsebene wurden die Versuchsstationen Burkersdorf, Dornburg, Friemar, Großenstein, Heßberg und Kirchengel des Freistaates Thüringen berücksichtigt. Sie repräsentieren die verschiedenen Boden-Klima-Räume/Anbauregionen im Freistaat Thüringen. Eine kurze Charakteristik der Versuchsstandorte ist in Tabelle 14 zusammengestellt.

Tabelle 14: Standortcharakteristik der Landesversuchsstationen Burkersdorf, Dornburg, Friemar, Großenstein, Heßberg und Kirchengel

	Burkersdorf	Dornburg	Friemar	Großenstein	Heßberg	Kirchengel
Landkreis	Saale-Orla-Kreis	Sömmerda	Gotha	Altenburger Land	Hildburghausen	Kyffhäuser
Höhe NN (m)	440	260	284	300	380	305
Niederschlag (mm)	642	584	541	606	773	556
Temperaturmittel (°C)	7,1	8,3	8,0	8,0	7,4	7,6
Standorttyp	V5a	Lö1c	Lö1a3	Lö4b1	V3a1	Lö1c1
Bodenart	sandiger Lehm	toniger Schluff	Lehm	Lehm	Lehm-Ton	Lehm
Ø Ackerzahl	36	63	96	54	43	63

Da die Daten von den Wetterstationen in den Versuchsstandorten in der Regel erst ab 1994 vorliegen und in YIELDSTAT auch die Vorjahresdaten beginnend im August notwendig sind, wurden für die Validierungsarbeiten die Jahre von 1995 bis 2010 berücksichtigt. Für diesen Zeitraum wurden für alle sechs Landesversuchsstationen jeweils alle Fruchtarten (Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais) in die Modellüberprüfungs- und Modelladaptations-Arbeiten einbezogen. Die dabei für Winterweizen erzielten Ergebnisse in der Übereinstimmung zwischen den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten und in den Versuch gemessenen Erträgen sind für alle sechs betrachteten Landesversuchsstationen in Abbildung 18 wiedergegeben.

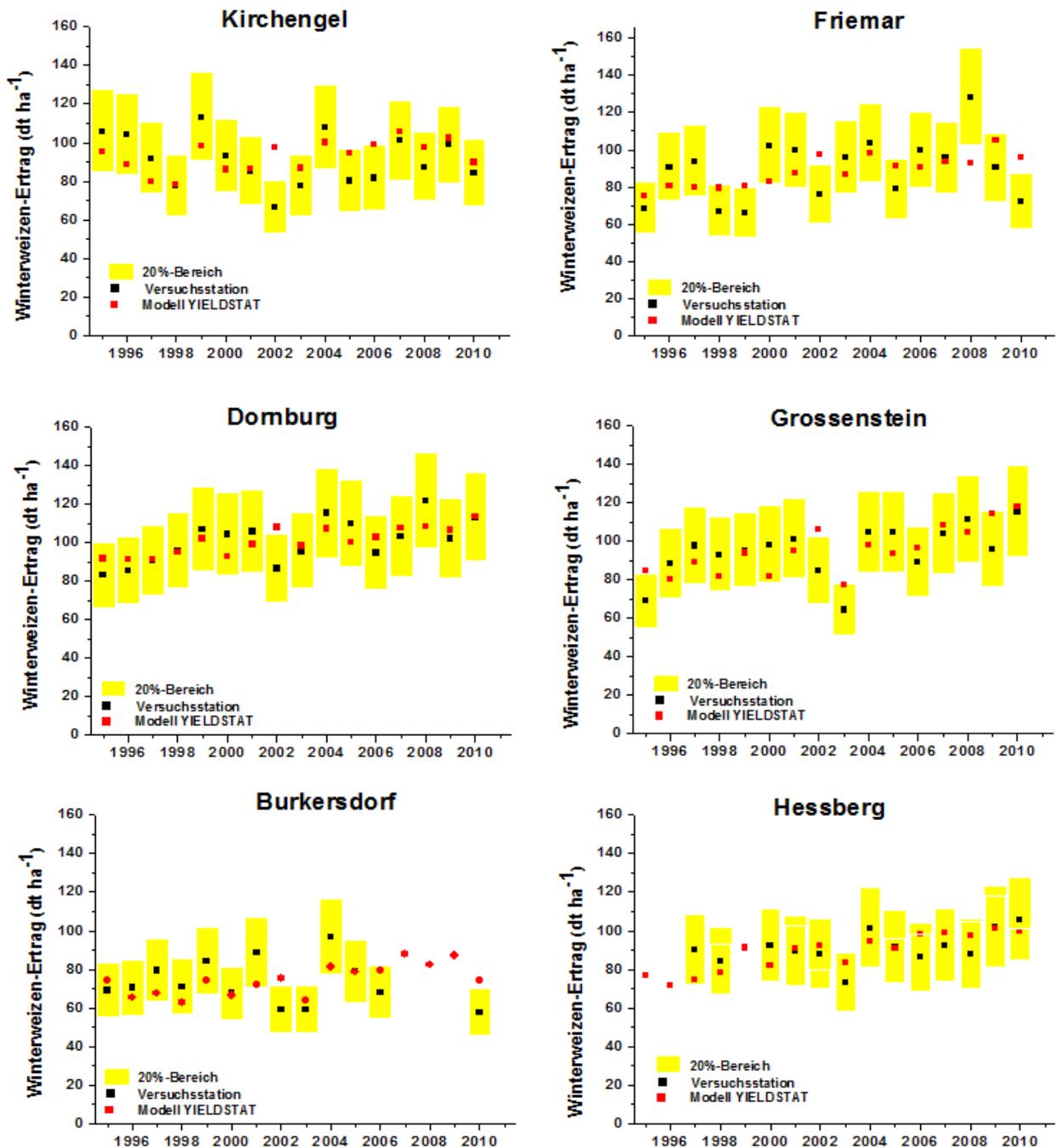


Abbildung 18: Vergleich der in den Jahren 1995-2010 in den Landesversuchsstationen erzielten Winterweizen-Erträge mit den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Erträgen

Der entsprechende Vergleich ist für die Erträge bei Wintergerste für die sechs betrachteten Landesversuchsstationen in Abbildung 19 wiedergegeben.

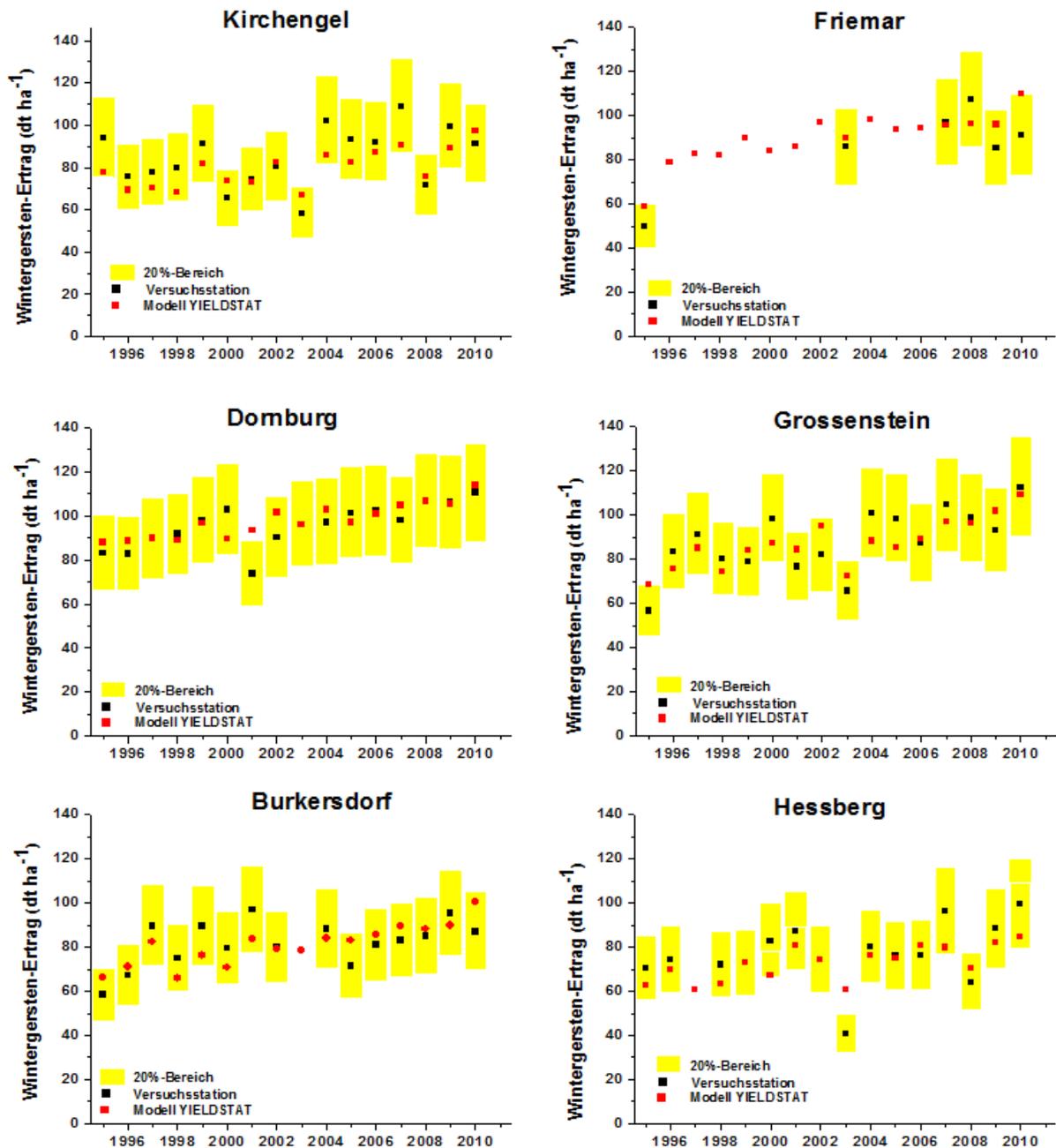


Abbildung 19: Vergleich der in den Jahren 1995-2010 in den Landesversuchsstationen erzielten Wintergersten-Erträge mit den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Erträgen

Für Sommergerste sind in Abbildung 20 für die sechs betrachteten Landesversuchsstationen die mit YIELDSTAT berechneten und die im Versuch gemessenen Erträge miteinander verglichen.

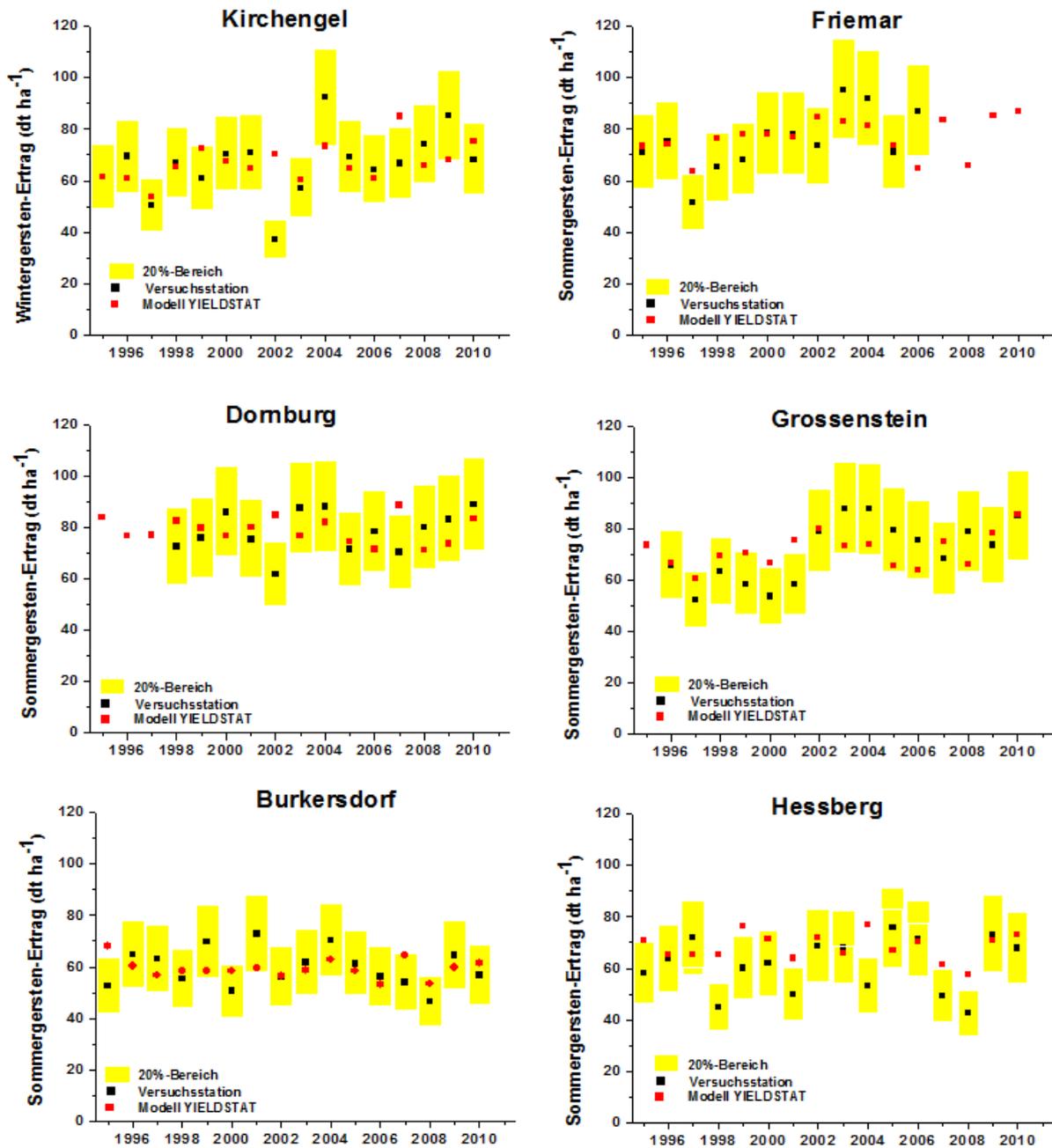


Abbildung 20: Vergleich der in den Jahren 1995-2010 in den Landesversuchsstationen erzielten Sommergersten-Erträge mit den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Erträgen

In Abbildung 21 sind für Winterraps die mit YIELDSTAT berechneten und die im Versuch gemessenen Erträge miteinander verglichen, für alle sechs betrachteten Landesversuchsstationen.

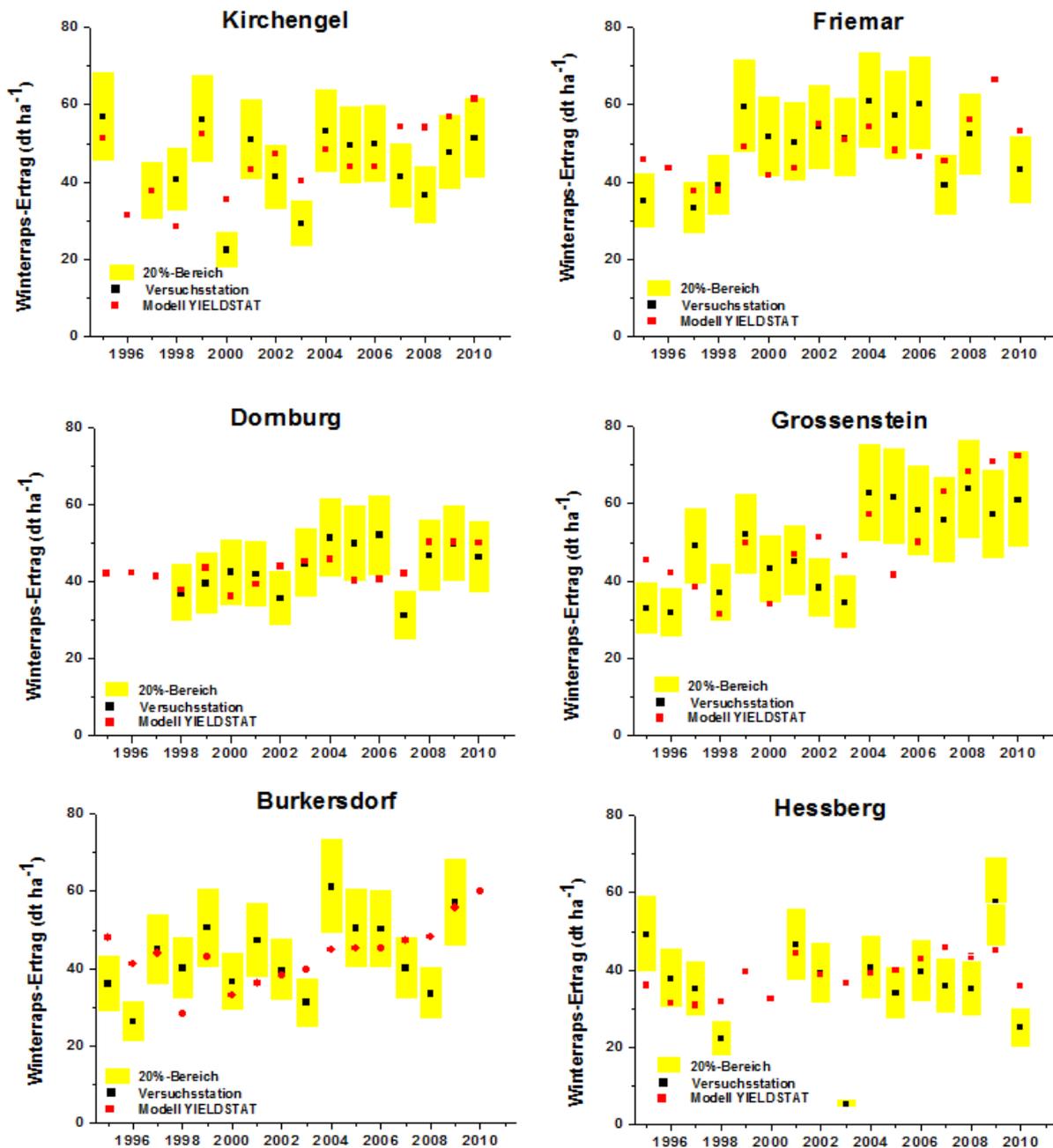


Abbildung 21: Vergleich der in den Jahren 1995-2010 in den Landesversuchsstationen erzielten Winterraps-Erträge mit den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Erträgen

Die für Silomais erzielten Ergebnisse in der Übereinstimmung zwischen den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten und im Versuch gemessenen Erträge sind für alle sechs betrachteten Landesversuchsstationen in Abbildung 22 wiedergegeben. Für die Versuchsstationen Dornburg und Großenstein standen dabei keine Versuchsergebnisse zur Verfügung.

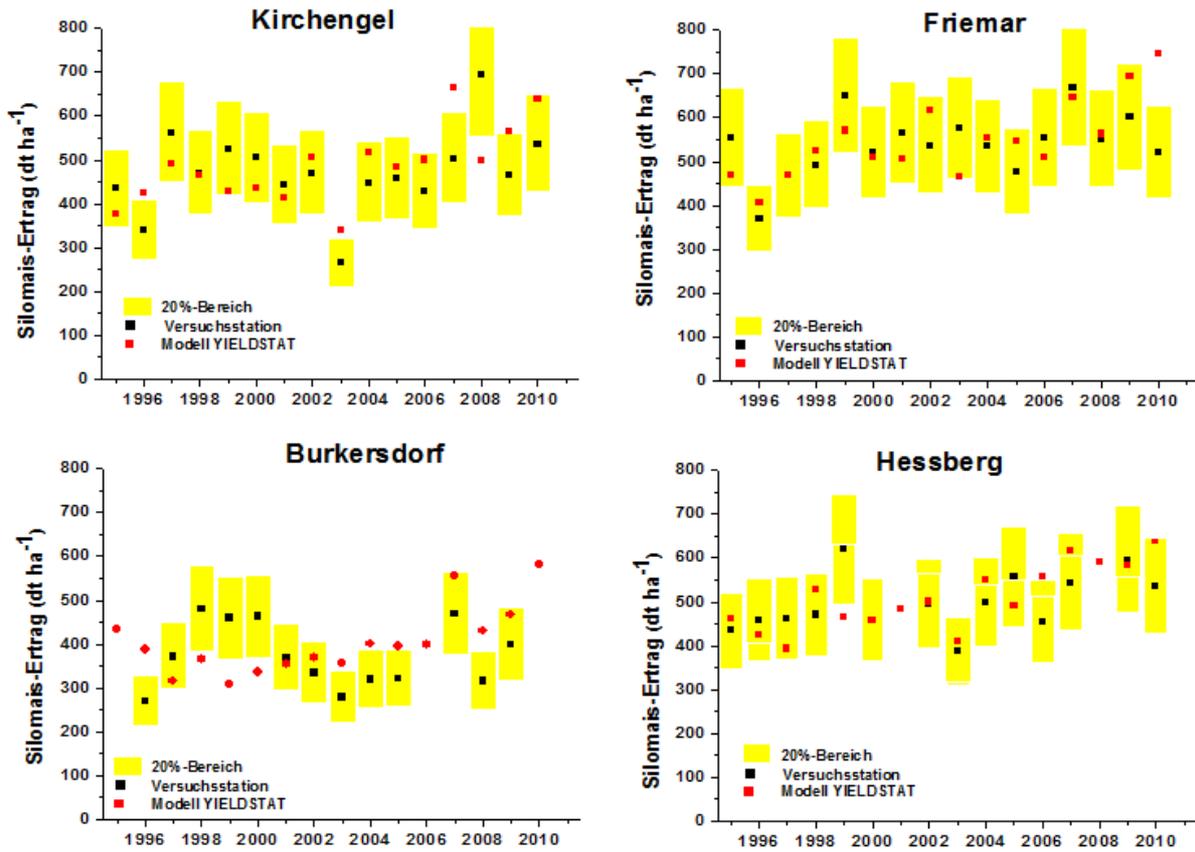


Abbildung 22: Vergleich der in den Jahren 1995-2010 in den Landesversuchsstationen erzielten Silomais-Erträge mit den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Erträgen

Ein Vergleich bezüglich der Erträge der fünf Fruchtarten Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais, zum einen berechnet mit dem Modell YIELDSTAT und zum anderen im Zeitraum 1995-2010 gemessen in den Feldversuchen der sechs betrachteten Landesversuchsstationen Kirchengel, Dornburg, Friemar, Großenstein, Heßberg und Burkersdorf, ist in Abbildung 23 zu finden.

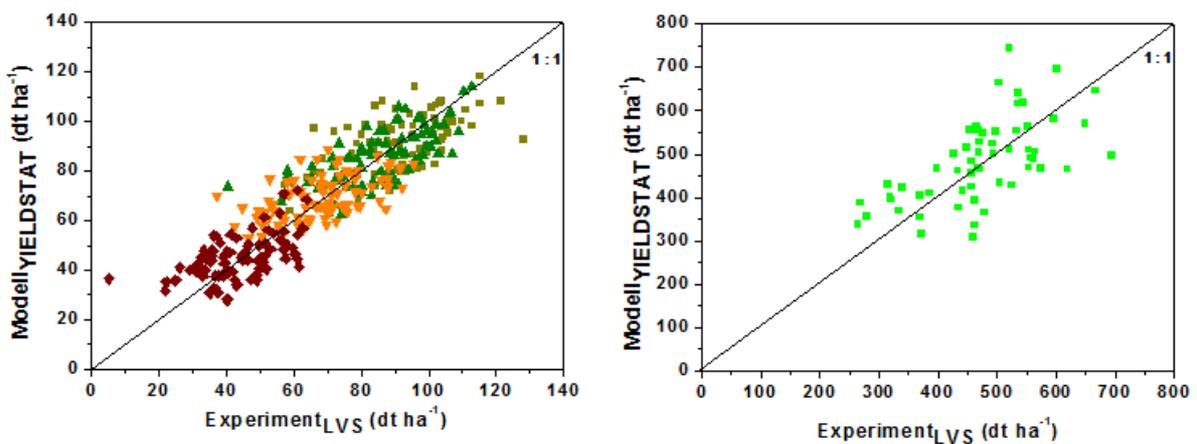


Abbildung 23: Ertragsvergleich zwischen Feldversuch und Modell YIELDSTAT für Winterweizen (■), Wintergerste (▲), Sommergerste (▼) und Winterraps (◆) (links) sowie Silomais (rechts) für alle betrachteten Landesversuchsstationen (Kirchengel, Dornburg, Friemar, Großenstein, Heßberg, Burkersdorf) im Zeitraum 1995-2010

Nach einer statistischen Verrechnung ergibt sich für die Regressionsgeraden durch den Koordinatenursprung [0,0] für alle fünf Fruchtarten eine Steigung von 1,006. Aufgesplittet in die einzelnen Fruchtarten ergibt sich eine Steigung der Regressionsgeraden durch [0,0] von 0,988 für Winterweizen, von 0,989 für Wintergerste, von 0,999 für Sommergerste, von 0,985 für Winterraps und von 1,008 für Silomais. Damit liegt bei allen Fruchtarten die Steigung nahe 1, d. h. der Steigung der Quadrantenhalbierenden (1:1).

7.2 Landkreise und Freistaat Thüringen

Unter Verwendung von raumbezogenen Informationen zum Boden, zum Standort und zum Wetter ist es mit dem Modell YIELDSTAT möglich, für die landwirtschaftlichen Hauptfruchtarten Erträge für alle Ackerstandorte eines Landkreises oder des gesamten Freistaates Thüringen und damit ihre Verteilung in der Fläche zu berechnen. Voraussetzung dafür ist die Integration des Modells YIELDSTAT in SAMT, das raumbezogene Analyse- und Modellierungs-Tool.

Für einen Vergleich zwischen den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Erträgen und den Kreis- bzw. Landeserträgen wurden die offiziellen Kreis- und Landesstatistiken des Thüringer Landesamtes für Statistik (<http://www.tls.thueringen.de/startseite.asp>) verwendet, aufbereitet durch die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft unter Berücksichtigung von in der Vergangenheit durchgeführten Kreisreformen (Guddat, 2011b).

7.2.1 Landkreise

Für eine Überprüfung/Anpassung des Modells YIELDSTAT auf der regionalen Ebene der Landkreise werden repräsentativ für die Bodenklimaräume und Anbauggebiete die Landkreise Kyffhäuser, Altenburger Land, Saale-Orla-Kreis, Hildburghausen, Sömmerda und Gotha (siehe Abbildung 3) betrachtet. Dabei repräsentieren die Kreise Kyffhäuser und Altenburger Land die *Lößböden der Übergangslagen*, die Kreise Hildburghausen und Saale-Orla-Kreis die *Verwitterungsböden der Übergangslagen* und die Kreise Sömmerda und Gotha die *Lößböden der Ackerebene*. Wie bei den Landesversuchsstationen wird auch hier der Zeitraum 1995-2010 betrachtet. Bei der Berücksichtigung des realen Wetters wird hier auf die Klimastationen des DWD zurückgegriffen. Für den Saale-Orla-Kreis ist es die DWD-Station Gera, für den Kreis Hildburghausen die DWD-Station Meiningen, für den Kreis Sömmerda die DWD-Station Erfurt, für den Kyffhäuserkreis die DWD-Station Artern, für das Altenburger Land die DWD-Station Gera und für den Kreis Gotha die DWD-Station Erfurt.

Die für Winterweizen erzielten Ergebnisse in der Übereinstimmung zwischen den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Erträgen und den Erträgen aus der Kreisstatistik sind für alle sechs betrachteten Landkreise in Abbildung 24 wiedergegeben.

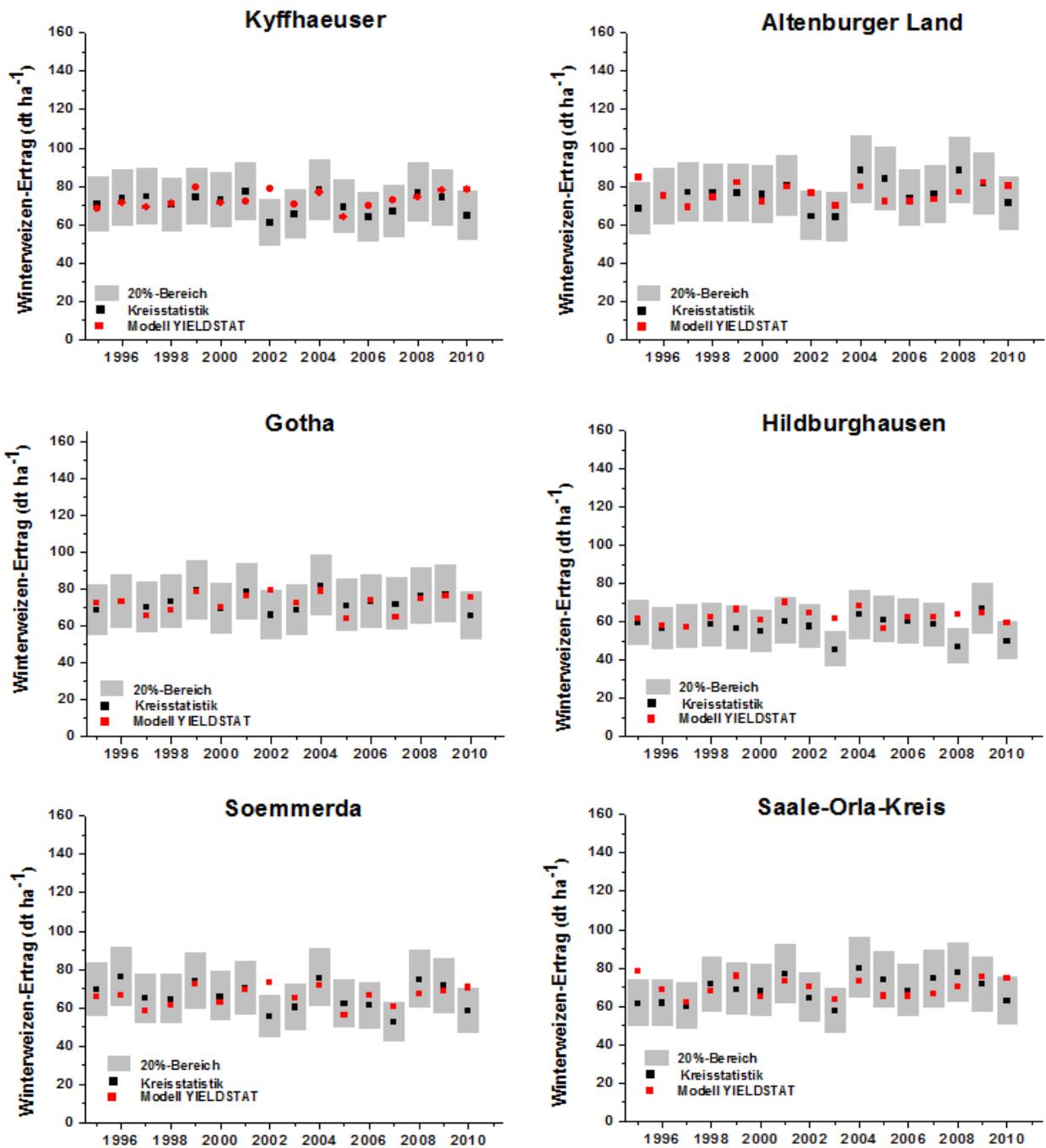


Abbildung 24: Vergleich statistischer Kreisenerträge von sechs bodenklima- und anbaugiebts-repräsentativen Landkreisen des Freistaates Thüringen mit den mittels YIELDSTAT berechneten Kreisenerträgen für Winterweizen im Zeitraum 1995-2010

Der entsprechende Vergleich ist für die Kreisenerträge bei Wintergerste für die sechs betrachteten Landkreise in Abbildung 25 wiedergegeben.

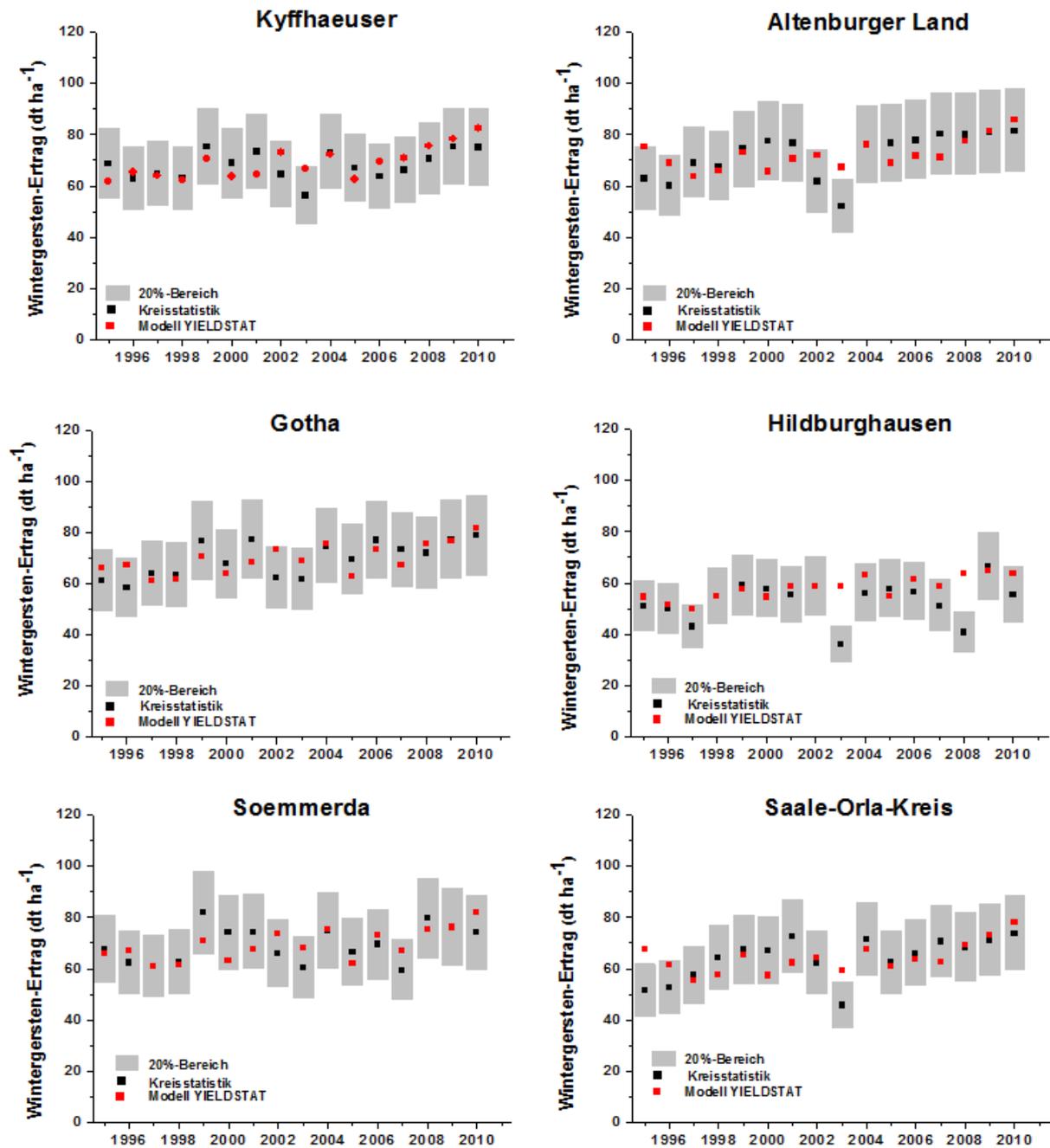


Abbildung 25: Vergleich statistischer Kreiserträge von sechs bodenklima- und anbaugebiets-repräsentativen Landkreisen des Freistaates Thüringen mit den mittels YIELDSTAT berechneten Kreiserträgen für Wintergerste im Zeitraum 1995-2010

Für Sommergerste sind in Abbildung 26 für die sechs repräsentativen Landkreise die mit YIELDSTAT berechneten Kreiserträge mit denen aus der Kreisstatistik verglichen.

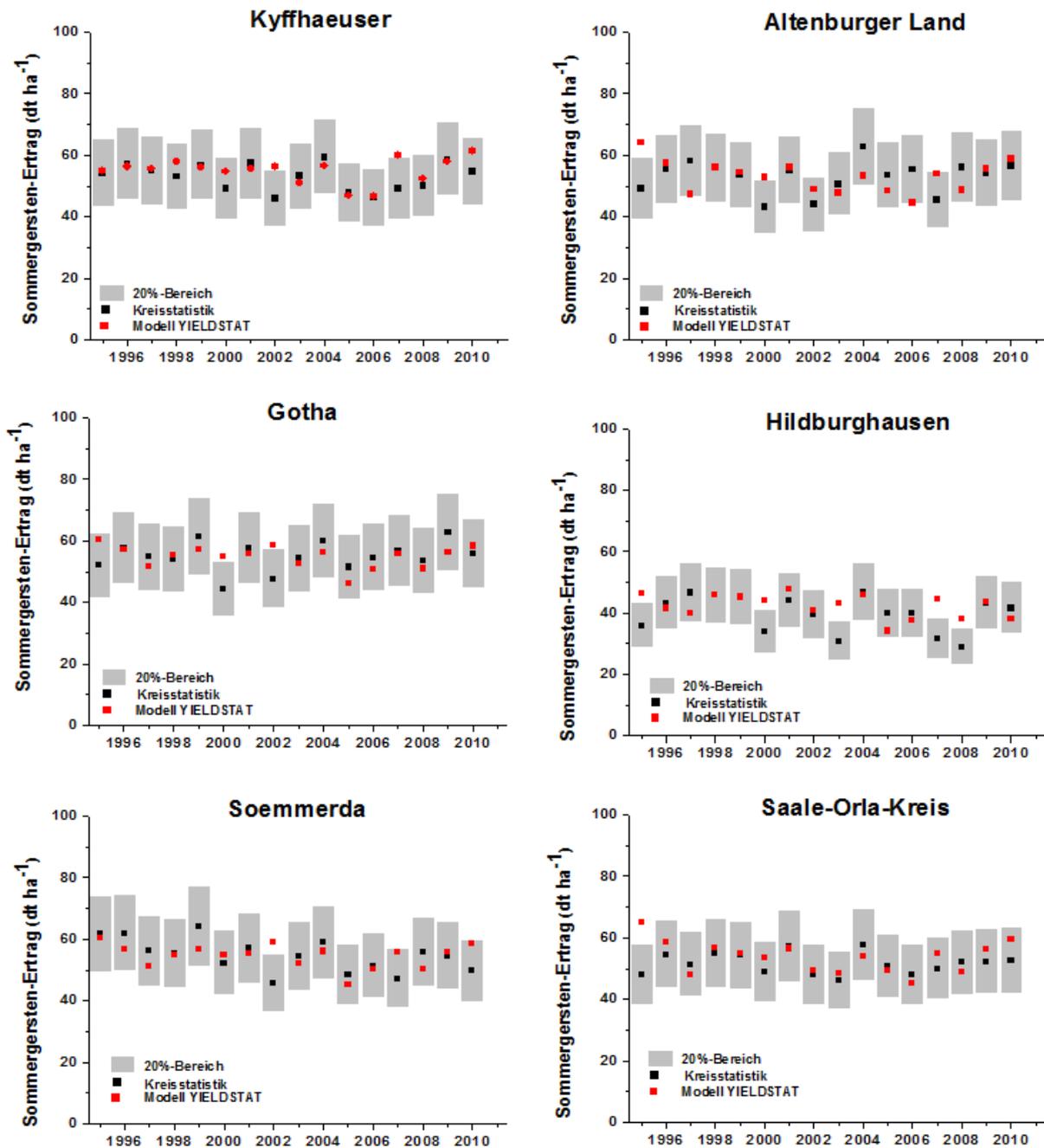


Abbildung 26: Vergleich statistischer Kreisenerträge von sechs bodenklima- und anbaugiebtsrepräsentativen Landkreisen des Freistaates Thüringen mit den mittels YIELDSTAT berechneten Kreisenerträgen für Sommergerste im Zeitraum 1995-2010

In Abbildung 27 sind für die sechs repräsentativen Landkreise die mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Kreisenerträge für Winterraps mit den Winterraps-Erträgen aus der Kreisstatistik verglichen.

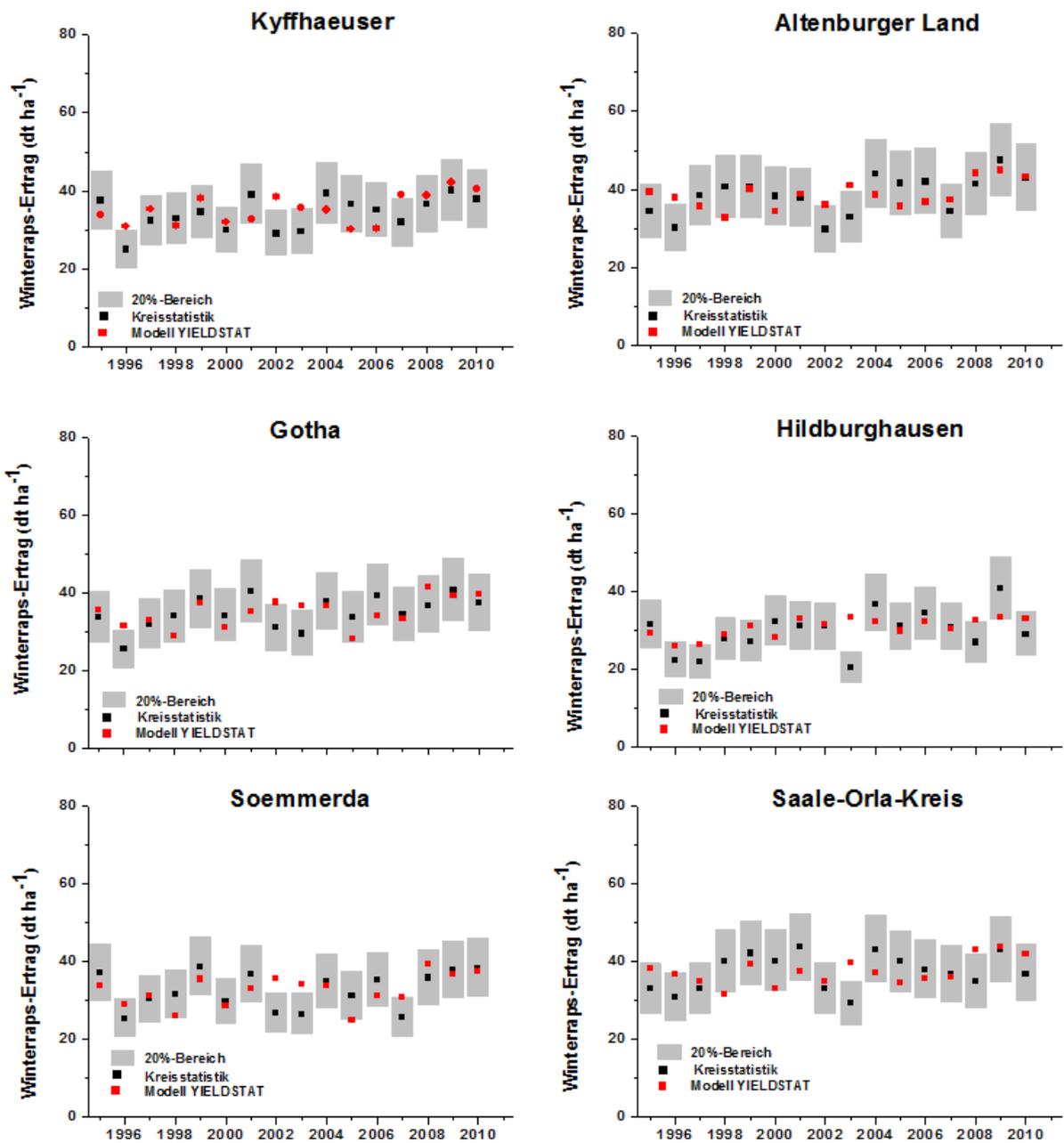


Abbildung 27: Vergleich statistischer Kreisenerträge von sechs bodenklima- und anbaugebiets-repräsentativen Landkreisen des Freistaates Thüringen mit den mittels YIELDSTAT berechneten Kreisenerträgen für Winterraps im Zeitraum 1995-2010

Die für Silomais erzielten Ergebnisse in der Übereinstimmung zwischen den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Kreisenerträgen und den Erträgen aus der Kreisstatistik sind für die sechs repräsentativen Landkreise in Abbildung 28 wiedergegeben.

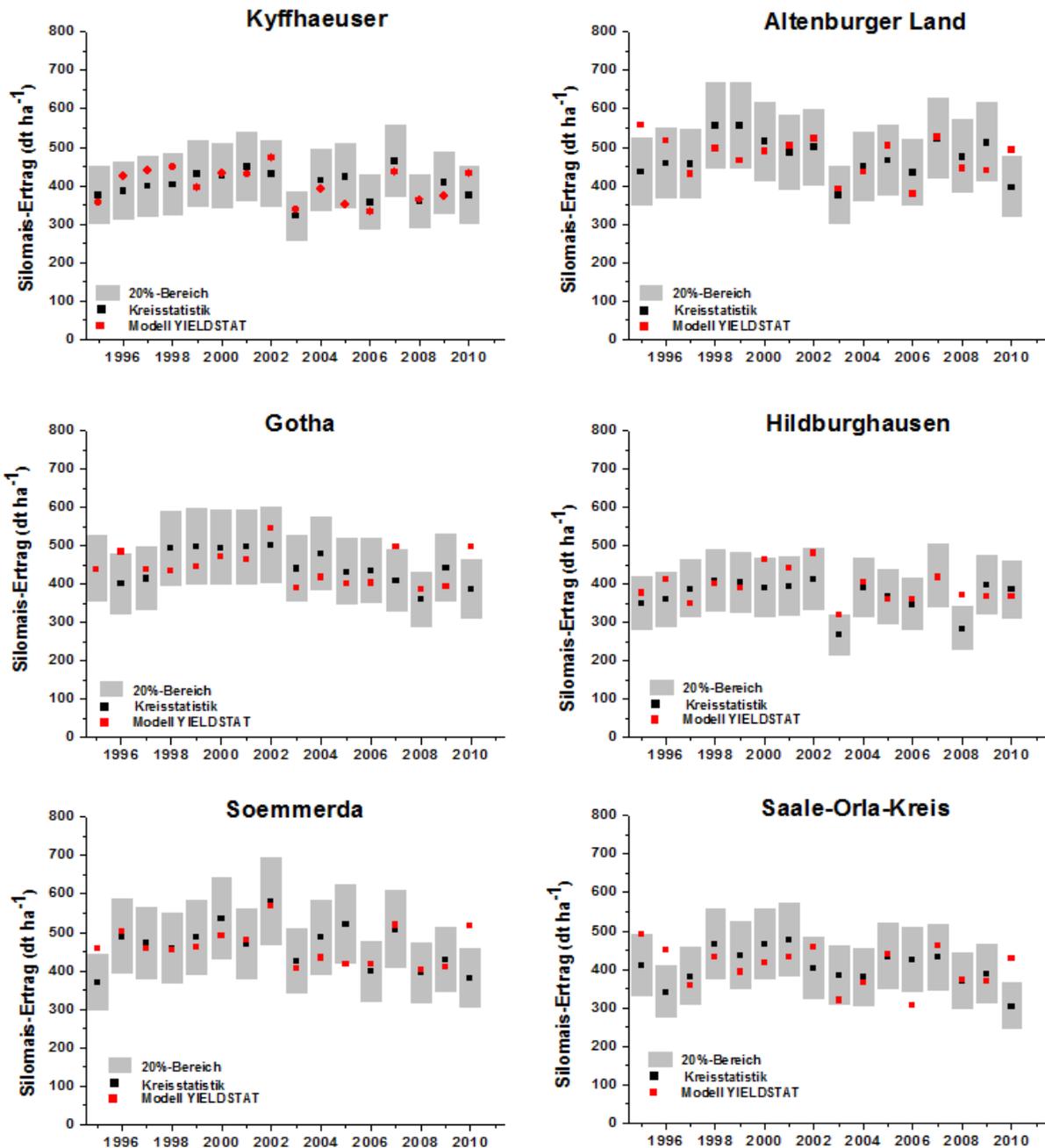


Abbildung 28: Vergleich statistischer Kreiserträge von sechs bodenklima- und anbaugiebts-repräsentativen Landkreisen des Freistaates Thüringen mit den mittels YIELDSTAT berechneten Kreiserträgen für Silomais im Zeitraum 1995-2010

Sowohl bei der Berechnung der Erträge für die Landesversuchsstationen als auch bei der Berechnung der Kreiserträge für die repräsentativen Landkreise lässt sich im Vergleich zu den Erträgen aus den Feldversuchen bzw. zu den Erträgen aus der Kreisstatistik bei einzelnen Fruchtarten und den meisten Landesversuchsstationen bzw. repräsentativen Landkreisen in den Jahren 2002, 2003 (hier besonders bei Winterraps und Wintergerste) und 2010 eine Überschätzung des Ertrages durch das Modell YIELDSTAT erkennen.

Analysiert man die Bedingungen im Anbaujahr 2002, erkennt man, dass sich der Wetterverlauf in 2002 von dem anderer Jahre deutlich unterscheidet. Nachdem der Mai eine feuchte Witterung mit ausreichenden Niederschlägen aufwies, die zeitweise die Heuwerbung verhinderten, trat im Juni kaum Besserung ein. Neben einer Hitze-

welle gehörten ein Tornado, Starkregen, Hagelschlag sowie Blitz und Donner zum Wetterrepertoire des Monats Juni. Im Juli dann bereitete nach einer durch sehr hohe Temperaturen geprägten ersten Monatshälfte das Regentief „Claudia“ den Landwirten im Freistaat Thüringen argen Verdruss. Vieles, was bereits üppig gewachsen war, wurde vernichtet bzw. lag als Lager am Boden, besonders bei den Halmfrucht- und Winterrapsbeständen. Die Feuchtigkeit in Stroh und Korn sowie die hohe Bodenfeuchte in der Krume führten zu einer Verzögerung bei der Ernte von Raps und Getreide. Diese schlechte Erntesituation setzte sich auch im August fort. Eine ausführliche Beschreibung der Auswirkungen dieser besonderen Wettersituation im Jahr 2002 auf die Landwirtschaft ist in den Agrarmeteorologischen Monatsberichten für Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen (Agrarmeteorologische Monatsberichte, 2002a, 2002b, 2002c, 2002d) zu finden.

Die Analyse der Wetterbedingungen im Jahr 2010 für den Freistaat Thüringen zeigt einige ertrags- und erntewirksame Besonderheiten. Nach dem kühlen und feuchten Mai mit guten Wachstumsbedingungen folgte nach einer Trockenheit von Mitte Juni bis zum Ende der zweiten Julidekade danach bis Ende September eine sehr nasse Periode mit hohen und häufigen Niederschlägen. Diese Situation führte zu gravierenden Problemen bei der Getreideernte, denn die nur wenig ausreichend trockenen Tage gestalteten die Mähdruschernte, die sich teilweise bis in den September hinzog, sehr schwierig. Durch die verspätete Ernte kam es nicht nur zu Ertrags-, sondern auch zu Qualitätsverlusten – besonders ausgeprägt beim Winterweizen. Auch der Mais reifte nur verzögert ab, was zu einer verspätet einsetzenden Maisernte führte (Michel und Prüfer, 2011). Durch die überdurchschnittlich nassen Felder kam es auch zu Problemen bei der Befahrbarkeit.

Zusammenfassend lässt sich für die Jahre 2002 und 2010 bemerken, dass in diesen Jahren in der Praxis weitaus mehr gewachsen ist, als geerntet werden konnte. Dies bestätigen im Rahmen eines Praxisversuchs 2002 in Lüttewitz (Freistaat Sachsen) auch Ernteerhebungen zu Winterweizen, bei dem die Mähdrescherernte gegenüber der Handernte auf dem gleichen Feld um ca. 25 % geringer ausfiel (Kersebaum et al., 2003). Die Ertragsanalysen für 2010 weisen sowohl für Thüringen als auch deutschlandweit auf eine ähnliche Situation hin. Beim Winterweizen, der wichtigsten Getreidekultur in Deutschland, waren Anbauflächen bis Ende September noch nicht geerntet. Im Vergleich zu 2009 lagen hier bundesweit die Hektarerträge um reichlich 11 % niedriger (VR Agrar, 2010).

Im Jahr 2003 dagegen ist die modellseitige Überschätzung des Ertrages durch YIELDSTAT auf die Auswinterungsschäden zurückzuführen, denn in YIELDSTAT ist kein Algorithmus enthalten, der die Folgen einer Auswinterung auf den Ertrag abbildet. Die Auswinterungsschäden treten im Jahr 2003 besonders bei Winterraps und Wintergerste sowie teilweise auch bei Winterweizen auf. Grund dafür sind die drei kalten Wintermonate von Dezember 2002 bis Februar 2003 mit Monatsmittelwerten im deutlichen Minusbereich und die teilweise großen täglichen Temperaturschwankungen (teilweise von mehr als 25 K) zwischen den hohen Tagestemperaturen und den teils sehr frostigen Nachttemperaturen. Bedingt durch diese besonderen Witterungsbedingungen und deren Folgen sind teilweise auch die Sommerungen im Anbaujahr 2003 nicht zum optimalen Zeitpunkt in den Boden gekommen, sondern verspätet ausgesät worden.

Ein Vergleich bezüglich der Kreiserträge der fünf betrachteten Fruchtarten (Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais), zum einen berechnet mit dem Modell YIELDSTAT und zum anderen entnommen aus der Kreisstatistik, ist für die repräsentativen Landkreise (Kyffhäuser, Altenburger Land, Saale-Orla-

Kreis, Hildburghausen, Sömmerda, Gotha) für den Zeitraum 1995-2010 in Abbildung 29 zu finden.

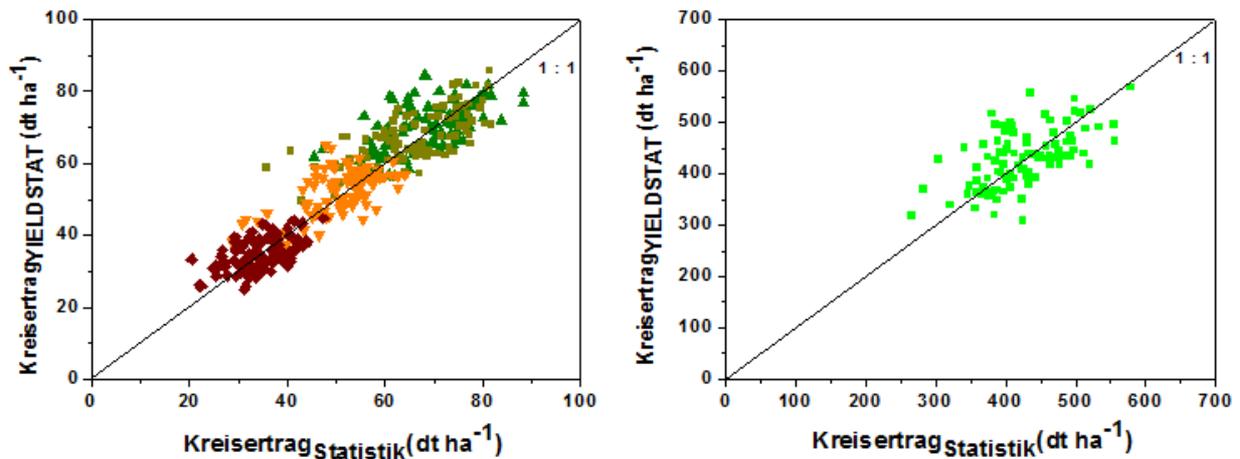


Abbildung 29: Vergleich zwischen den Kreisenerträgen aus der Kreisstatistik und den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Kreisenerträgen für Winterweizen (■), Wintergerste (▲), Sommergerste (▼) und Winterraps (◆) (links) sowie Silomais (rechts) für alle repräsentativen Landkreise (Kyffhäuser, Altenburger Land, Saale-Orla-Kreis, Hildburghausen, Sömmerda, Gotha) im Zeitraum 1995-2010

Nach einer statistischen Verrechnung der Kreisenerträge ergibt sich für die Regressionsgeraden durch den Koordinatenursprung [0,0] für alle fünf Fruchtarten ein Anstieg von 1,000. Aufgesplittet in die einzelnen Fruchtarten ergibt sich eine Steigung der Regressionsgeraden durch [0,0] von 1,012 für Winterweizen, von 1,005 für Wintergerste, von 1,012 für Sommergerste, von 1,000 für Winterraps und von 0,999 für Silomais. Damit liegt bei allen Fruchtarten die Steigung sehr nahe der Steigung der Quadrantenhalbierenden (1:1).

Im Vergleich zu Abbildung 23 (Landesversuchsstationen) ist bei den Kreisenerträgen die Streuung um die Quadrantenhalbierende geringer. Ein Grund besteht darin, dass es sich hier um mittlere Erträge für ganze Landkreise handelt und über eine Mittelwertbildung ausgehend von einzelnen Praxisschlägen die Streuung eine Reduzierung erfährt.

Ein Vergleich zwischen den statistischen Kreisenerträgen und den mittels YIELDSTAT berechneten Kreisenerträgen ist für die betrachteten fünf Fruchtarten und repräsentativen Landkreise für den Zeitraum 1995-2010 in Tabelle 15 statistisch zusammengefasst.

Im Mittel der berücksichtigten Jahre 1995-2010 ist bei den Kreisenerträgen für alle fünf berücksichtigten Fruchtarten eine gute Übereinstimmung zwischen Kreisstatistik und den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Kreisenerträgen zu erkennen. Auch beim Median sowie beim Ertragsmaximum liegt eine gute Übereinstimmung vor. Angemerkt werden muss nur, dass die mit YIELDSTAT berechneten Ertragsminima bei allen fünf Fruchtarten über den Vergleichswerten aus der Kreisstatistik liegen, d.h. die in der Kreisstatistik ausgewiesene Ertragsspanne zwischen Ertragsminimum und Ertragsmaximum ist etwas größer als die Ertragsspanne, die mit dem Modell YIELDSTAT ausgewiesen wird.

Tabelle 15: Vergleich der Erträge aus der Kreisstatistik mit den mittels YIELDSTAT berechneten Kreiserträgen für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais über die Landkreise Kyffhäuser, Altenburger Land, Hildburghausen, Sömmerda, Gotha und den Saale-Orla-Kreis (1995-2010)

Fruchtart	Ertrag (Kreisstatistik) (dt ha ⁻¹)				Ertrag (Modell YIELDSTAT) (dt ha ⁻¹)			
	Mittel	Min.	Max.	Median	Mittel	Min.	Max.	Median
Winterweizen	68,5	45,5	88,3	69,3	69,9	56,3	84,4	70,2
Wintergerste	66,0	35,8	81,8	66,7	67,0	49,7	85,8	66,8
Sommergerste	51,2	28,9	64,1	52,8	52,2	34,1	64,9	54,5
Winterraps	34,5	20,5	47,4	34,5	34,8	24,8	44,8	34,9
Silomais	426,3	266,3	579,2	424,6	429,6	307,8	568,2	431,7

7.2.2 Freistaat Thüringen

Eine landesweite Überprüfung des für die Landkreisebene angepassten Modells YIELDSTAT erfolgt für den Zeitraum 1995-2010 anhand der Erträge aus der Landesstatistik, die auf den Erträgen aller 17 Landkreise basiert. In Absprache mit der TLL wurden ausgehend von den sechs repräsentativen Landkreisen die drei Bodenklimaräume/Anbauggebiete in Abhängigkeit von Standort- und Anbaubedingungen jeweils nochmals zweigeteilt, in einen östlichen und einen westlichen Teil, um damit einen eindeutigen Zuordnung zu den repräsentativen Landkreisen zu realisieren. Die ausgewählten DWD-Stationen sind die gleichen wie für die repräsentativen Landkreise (siehe Punkt 7.2.1). Basierend auf den Kreiserträgen und den landwirtschaftlichen Anbauflächen der repräsentativen Landkreise erfolgt über die unterteilten und neu zugeordneten Bodenklimaräume/Anbauggebiete eine flächengewichtete Hochrechnung zum Landesertrag der jeweiligen Fruchtart.

Die für den Zeitraum 1995 – 2010 mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Landeserträge für den Freistaat Thüringen sind in Abbildung 30 für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais den Landeserträgen aus der Landesstatistik (<http://www.tls.thueringen.de/startseite.asp>) gegenübergestellt.

Im Mittel über alle fünf betrachteten Fruchtarten unterschätzt das Modell YIELDSTAT bei der Modellvalidierung auf Landesebene im Zeitraum 1995-2010 die jeweiligen Landeserträge leicht, und zwar um 2,8 %. Wie aus Abbildung 30 ersichtlich ist, liegen die Abweichungen bei allen Fruchtarten im Wesentlichen im Abweichungsbereich von 15 %. Nur bei Wintergerste wird dieser Bereich in einem Jahr (2003) und bei Winterraps in vier Jahren (1996, 2002, 2003, 2005) leicht überschritten.

Wie bei den Landesversuchsstationen und den Landkreisen tritt auch auf Landesebene bei den einzelnen Fruchtarten im Jahr 2002 und teilweise auch im Jahr 2010 sowie im Jahr 2003 bei Wintergerste und Winterraps (hier Auswinterungsschäden) eine modellseitige Ertragsüberschätzung auf. Die Erklärung dafür ist die gleiche wie bei den Landesversuchsstationen und den Landkreisen (vergl. Punkt 7.2.1).

Ein Grund für die Abweichungen zwischen den Erträgen der Landesstatistik und den mit YIELDSTAT abgeschätzten Landeserträgen liegt darin, dass das Territorium des

Freistaates Thüringen wetterseitig im Zeitraum 1995-2010 nur durch eine begrenzte Anzahl von DWD-Stationen abgedeckt werden konnte. Ein Vergleich zwischen den Erträgen aus der Landesstatistik und den mittels YIELDSTAT berechneten Landeserträgen ist für die betrachteten fünf Fruchtarten für den Zeitraum 1995-2010 noch einmal statistisch in Tabelle 16 zusammengefasst.

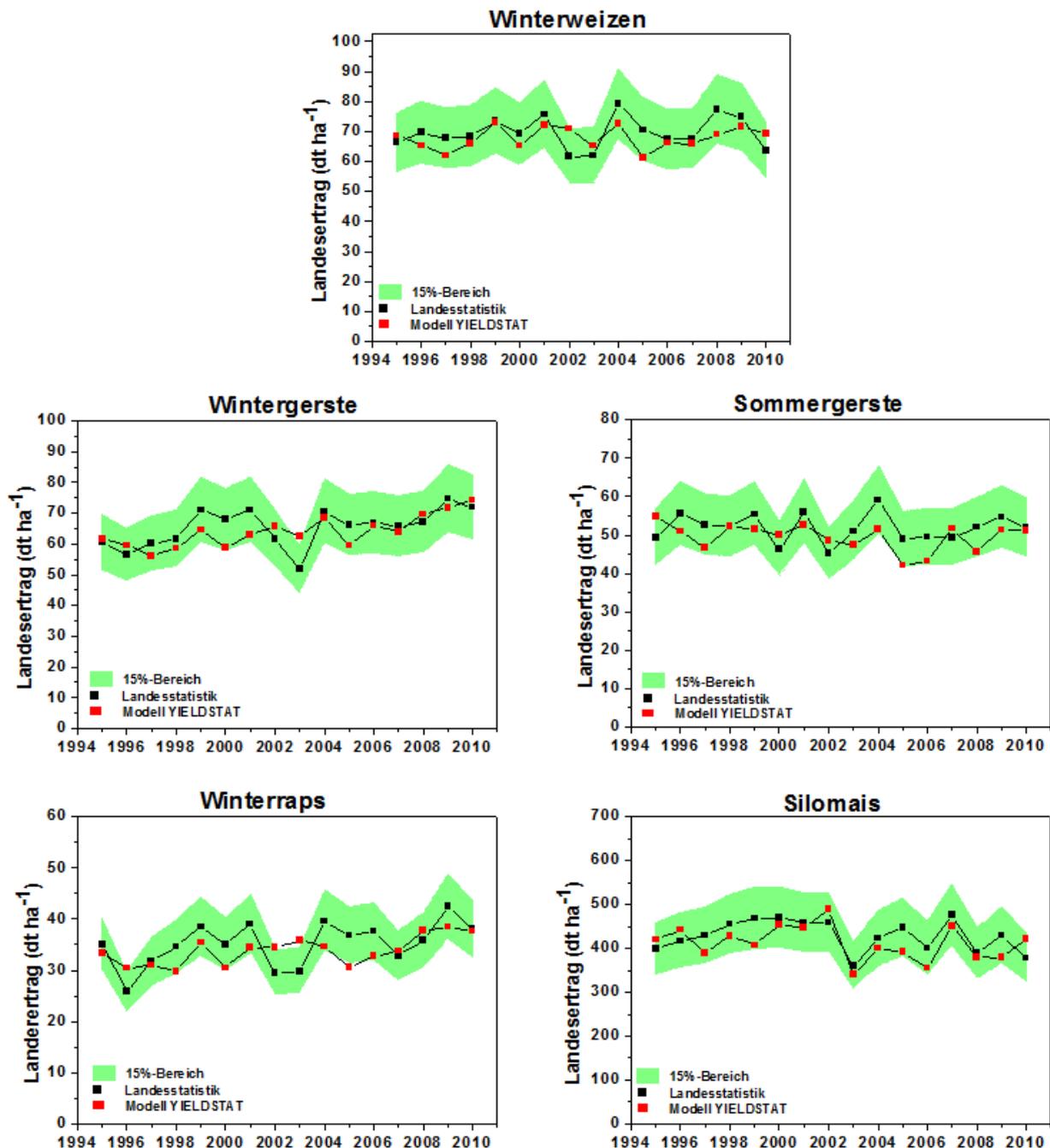


Abbildung 30: Landeserträge des Freistaates Thüringen im Zeitraum 1995-2010 für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais im Vergleich zwischen der Landesstatistik und den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Erträgen

Tabelle 16: Vergleich der Erträge aus der Landesstatistik mit den mittels YIELDSTAT berechneten Landeserträgen für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais im Zeitraum 1995-2010

Fruchtart	Landesertrag (Landesstatistik) (dt ha ⁻¹)				Landesertrag (YIELDSTAT) (dt ha ⁻¹)			
	Mittel	Min.	Max.	SD*	Mittel	Min.	Max.	SD*
Winterweizen	69,6	61,6	79,1	5,2	67,8	61,3	72,9	3,7
Wintergerste	65,3	51,8	74,7	6,2	64,0	63,4	74,2	5,1
Sommergerste	51,8	45,1	59,0	3,7	49,4	42,1	54,9	3,6
Winterraps	35,1	25,8	42,4	4,3	33,8	29,8	38,5	2,8
Silomais	428,5	359,9	475,5	35,5	412,2	340,5	489,7	39,6

* SD - Standardabweichung

Auf der Ebene des Freistaates Thüringen ergibt die statistische Auswertung des Ertragsvergleichs zwischen der Landesstatistik und dem Ertragsschätzmodell YIELDSTAT, dass das Ertragsmittel des Zeitraumes 1995-2010 bei allen betrachteten Fruchtarten durch das Modell YIELDSTAT gut wiedergegeben wird, ungeachtet einer leichten Unterschätzung um 2,8%. Auch die in diesem Zeitraum durch schlechte und gute Ertragsjahre aufgezeigte Ertragsspanne wird durch das Modell YIELDSTAT ausreichend gut wiedergespiegelt. Während bei den Minimalertragsjahren fruchtartabhängig eine geringe Unter- bzw. Überschätzung erfolgt, werden die Maximalertragsjahre durch das Modell YIELDSTAT bis auf Silomais leicht unterschätzt, um durchschnittlich 6,1%, was für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste und Winterraps durchschnittlich 3,6 dt ha⁻¹ entspricht. Die für die einzelnen Fruchtarten berechneten Standardabweichungen liegen sowohl bei der Landesstatistik als auch bei den mit YIELDSTAT geschätzten Landeserträgen in der gleichen Größenordnung.

Insgesamt aber wird deutlich, dass das Modell YIELDSTAT der Ertragsdynamik über die Jahre auf Landesebene gut folgen kann, auch wenn aufgrund des Fehlens eines sehr engmaschigen Stationsnetzes keine „regionalisierten Wetterdaten“ verwendet werden konnten, sondern nur die Wetterdaten aus einer begrenzten Anzahl von DWD-Stationen.

8 Szenario-Simulationen mit WETTREG 2010 (Emissionsszenario A1B) - Ergebnisse und Diskussion -

Eine belastbare Abschätzung klimaänderungsbedingter Auswirkungen auf die Erträge landwirtschaftlicher Fruchtarten und damit auf die Produktivität von Ackerstandorten kann nur auf der Basis von Mittelwerten über langjährige Zeitspannen vorgenommen werden. Seitens der Klimatologie werden hierfür Zeiträume von 30 Jahren angesetzt (Franke et al., 2010). In der vorliegenden Studie für den Freistaat Thüringen wurden hierfür die beiden 30jährigen Zeitperioden 1981-2010 und 2021-2050 in Betracht gezogen. Um die Ertragssimulationen mit methodisch homogen erzeugten Klimadatensätzen durchführen zu können, wurden für beide Zeitperioden, sowohl für die vergangene (Referenzzeitraum) als auch für die in der Zukunft liegende (Projekti-

onszeitraum) Zeitperiode, auf die WETTREG 2010 - Daten (Emissionsszenario A1B) zurückgegriffen (Kontrolllauf und Projektion). Um auch eine Aussage zur Variation in den Ertragsänderungen zu erhalten, wurden die Szenariosimulationen flächendeckend für alle Ackerstandorte des Freistaates Thüringen mit dem Modell YIELDSTAT sowohl für eine „trockene“ Klimarealisierung als auch für eine „feuchte“ Klimarealisierung innerhalb von WETTREG 2010 durchgeführt. Die für die Simulationsrechnungen notwendigen regionalisierten Klimadaten werden über das für den Freistaat Thüringen vorhandene Netz von Klima- und Niederschlagsmessstationen bereitgestellt. Dabei wird Thüringen in 299 repräsentative *Klima-Patches* unterteilt (siehe Punkt 6.2.2), für die die jeweils notwendigen Klimaszenariodaten bis 2050 erzeugt werden. Berücksichtigt wird bei den Szenariosimulationen auch die Ertragsbeeinflussung durch den zunehmenden CO₂-Gehalt in der Atmosphäre.

In Absprache mit der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft wird dabei für den ersten Zeitraum, dem Referenzzeitraum, von einem Niveau der Agro-Technologie und der Züchtung ausgegangen, das dem des Jahres 2010 entspricht. Für den zweiten Zeitraum, den Projektionszeitraum, werden die Szenariosimulationen für vier unterschiedliche Varianten durchgeführt, die die bis 2050 möglichen Fortschritte in Agro-Technologie und Züchtung unterschiedlich berücksichtigen:

Variante 1: keine Berücksichtigung eines Ertragstrends

Variante 2: mit Ertragstrend nach TLL-Vorgabe (siehe Punkt 6.3)

Variante 3: mit Ertragstrend 50% von Variante 2

Variante 4: mit dekadeweise stark degressivem Ertragstrend (siehe Punkt 6.3)

Mit dem Modell YIELDSTAT zur regionalen Ertragsschätzung werden die Szenariosimulationen für unterschiedliche Raumbezüge durchgeführt:

1. für den gesamten Freistaat Thüringen,
2. für die sechs repräsentativen Landkreise Kyffhäuser, Altenburger Land, Hildburghausen, Sömmerda, Gotha und den Saale-Orla-Kreis,
3. für die drei Boden-Klima-Räume/Anbaugebiete *Lößböden der Ackerebene*, *Lößböden der Übergangslagen* und *Verwitterungsböden der Übergangslagen* und
4. für die vier Planungsregionen *Nordthüringen*, *Ostthüringen*, *Südwestthüringen* und *Mittelthüringen*.

8.1 Freistaat Thüringen

Regionalisiert für den Freistaat Thüringen werden die Simulationsergebnisse mit YIELDSTAT der Variante 1 (ohne Ertragstrend) der beiden Zeiträume 1981-2010 und 2021-2050 als Mittel zwischen „trockener“ und „feuchter“ Realisierung gegenübergestellt, in Abbildung 31 für Winterweizen, in Abbildung 32 für Wintergerste, in Abbildung 33 für Sommergerste, in Abbildung 34 für Winterraps und in Abbildung 35 für Silomais.

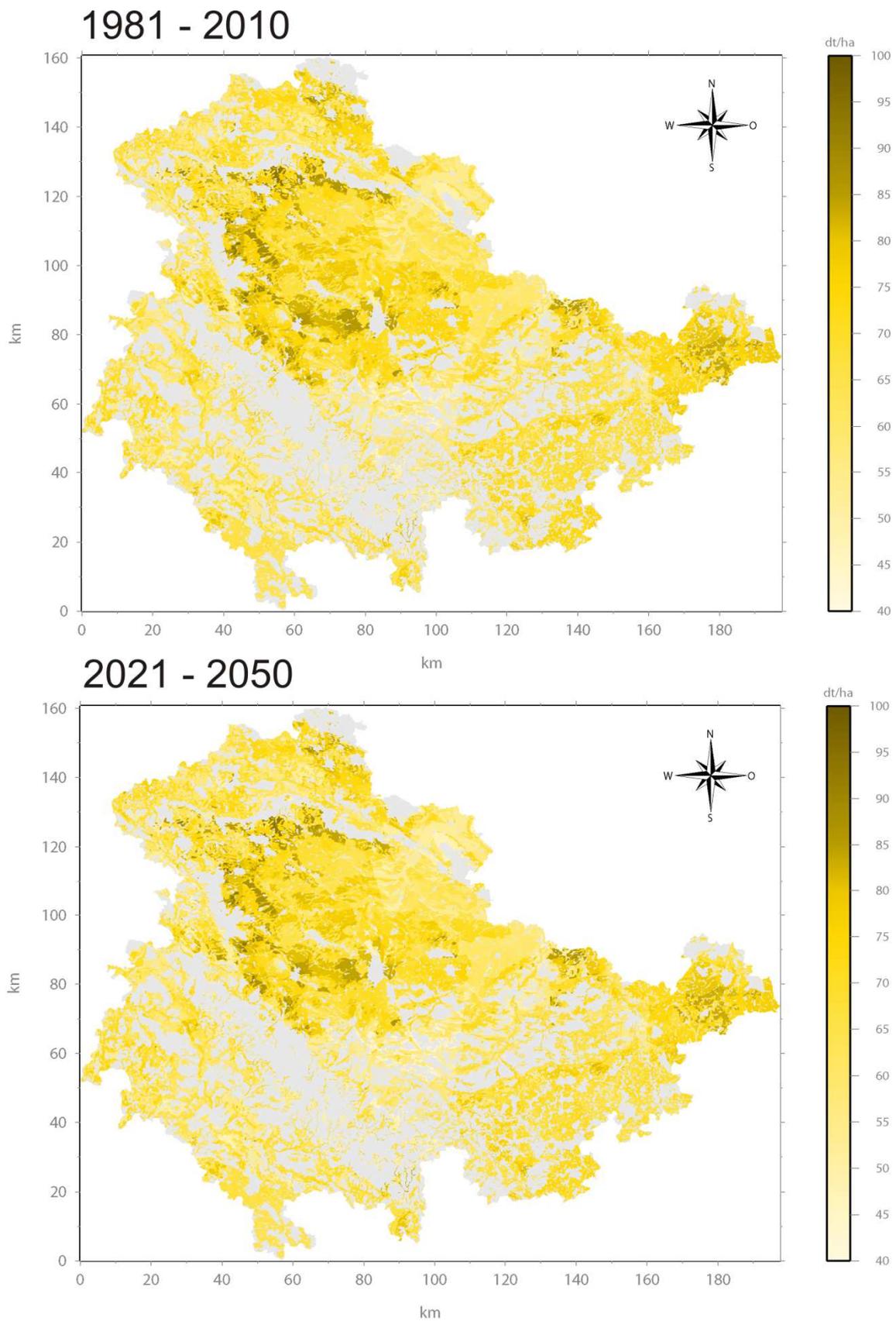


Abbildung 31: Erträge für Winterweizen im Vergleich der Klimazeiträume 1981-2010 und 2021-2050, regionalisiert für den Freistaat Thüringen (Basis: Modell YIELDSTAT, WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B, Variante 1, graue Flächen – kein Ackerland bzw. kein Anbau von Winterweizen)

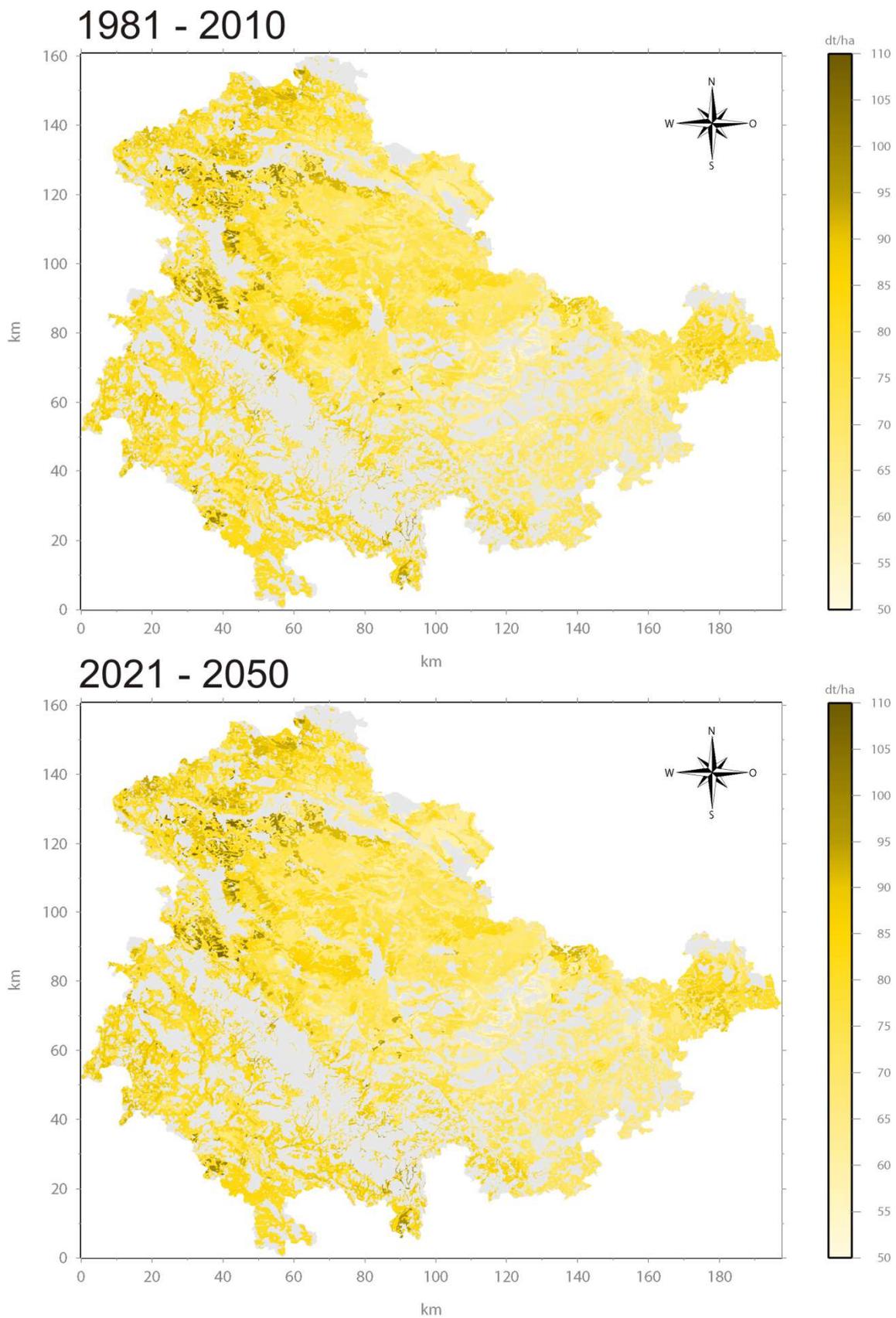


Abbildung 32: Erträge für Wintergerste im Vergleich der Klimazeiträume 1981-2010 und 2021-2050, regionalisiert für den Freistaat Thüringen (Basis: Modell YIELDSTAT, WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B, Variante 1, graue Flächen – kein Ackerland bzw. kein Anbau von Wintergerste)

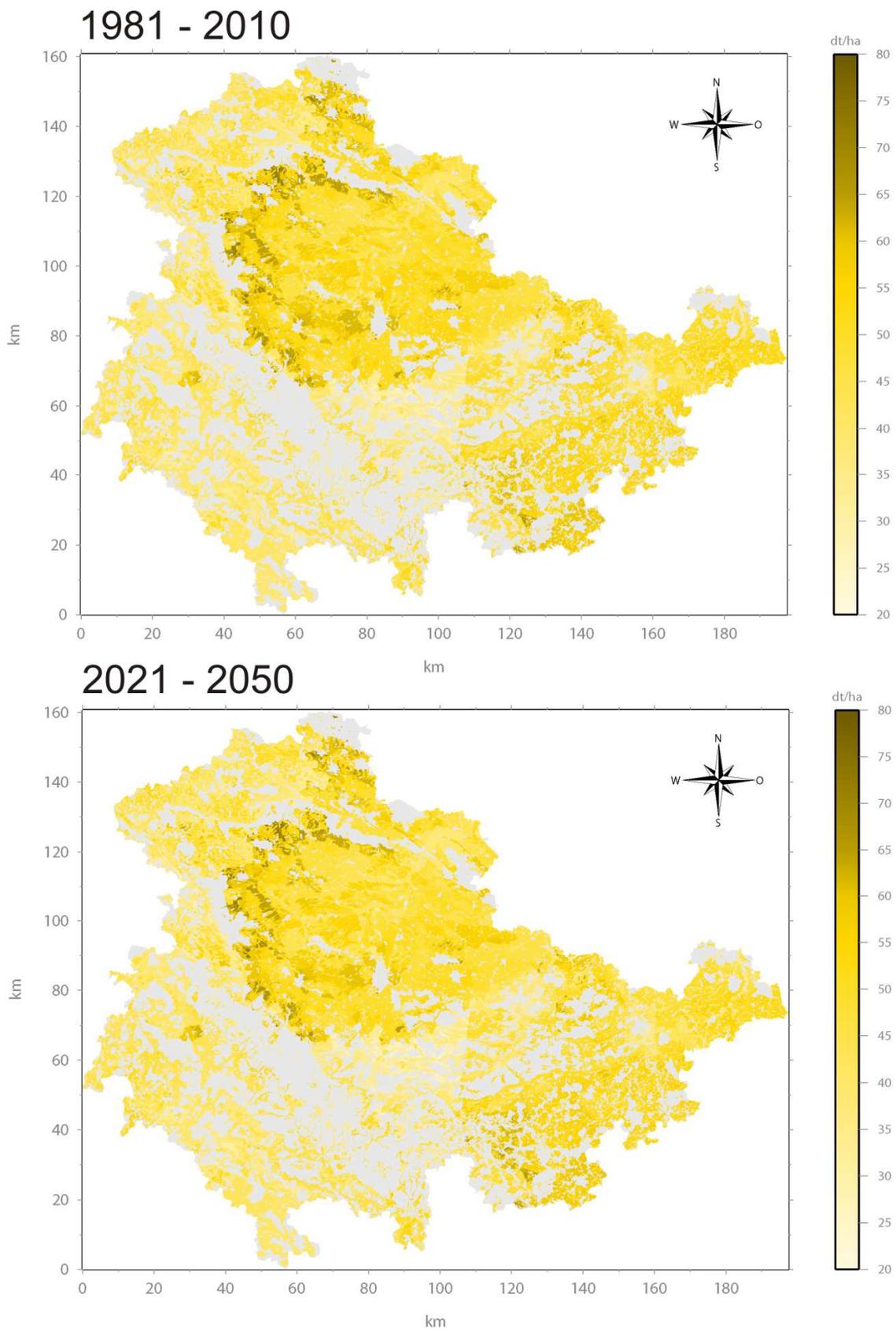


Abbildung 33: Erträge für Sommergerste im Vergleich der Klimazeiträume 1981-2010 und 2021-2050, regionalisiert für den Freistaat Thüringen (Basis: Modell YIELDSTAT, WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B, Variante 1, graue Flächen – kein Ackerland bzw. kein Anbau von Sommergerste)

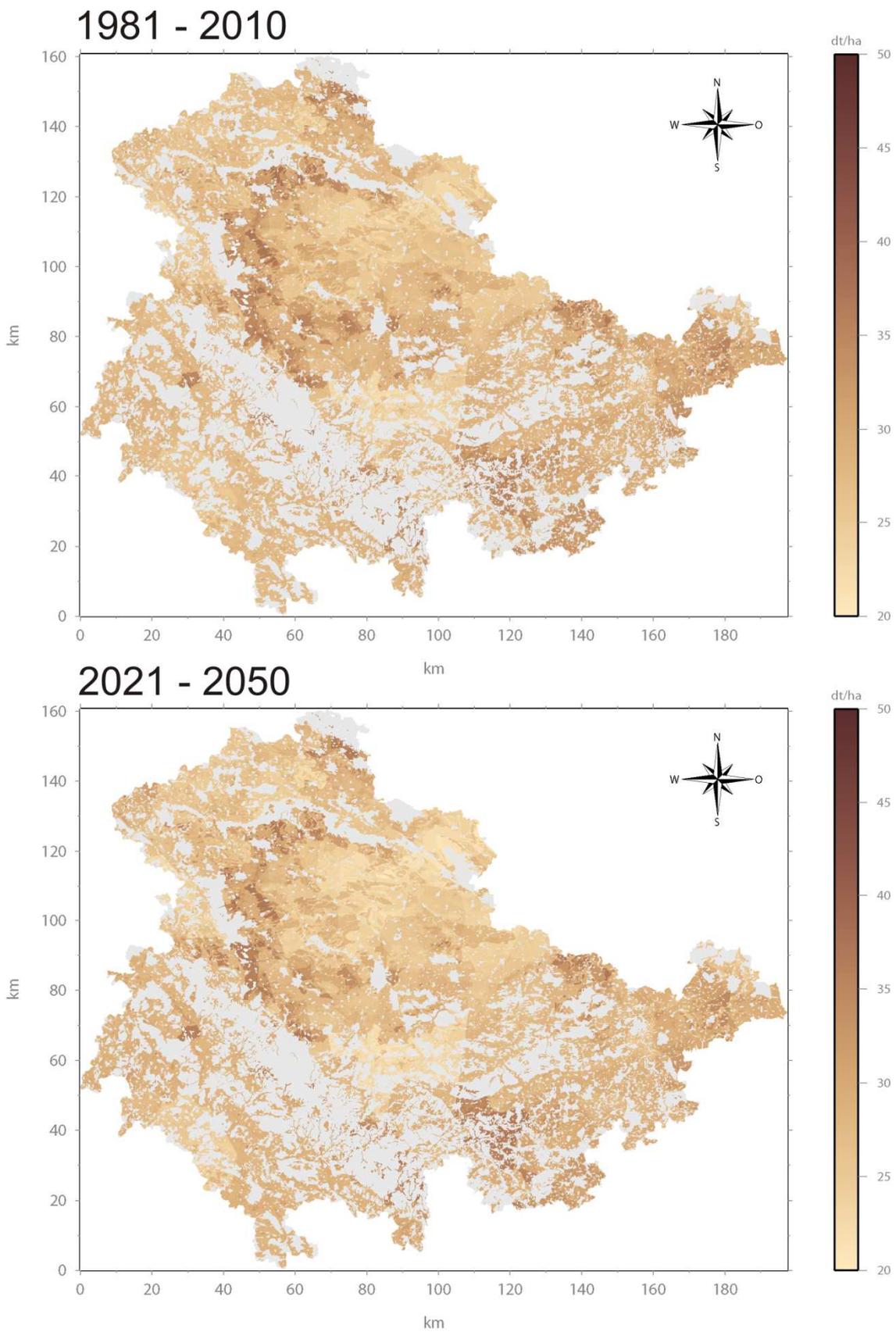


Abbildung 34: Erträge für Winterraps im Vergleich der Klimazeiträume 1981-2010 und 2021-2050, regionalisiert für den Freistaat Thüringen (Basis: Modell YIELDSTAT, WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B, Variante 1, graue Flächen – kein Ackerland bzw. kein Anbau von Winterraps)

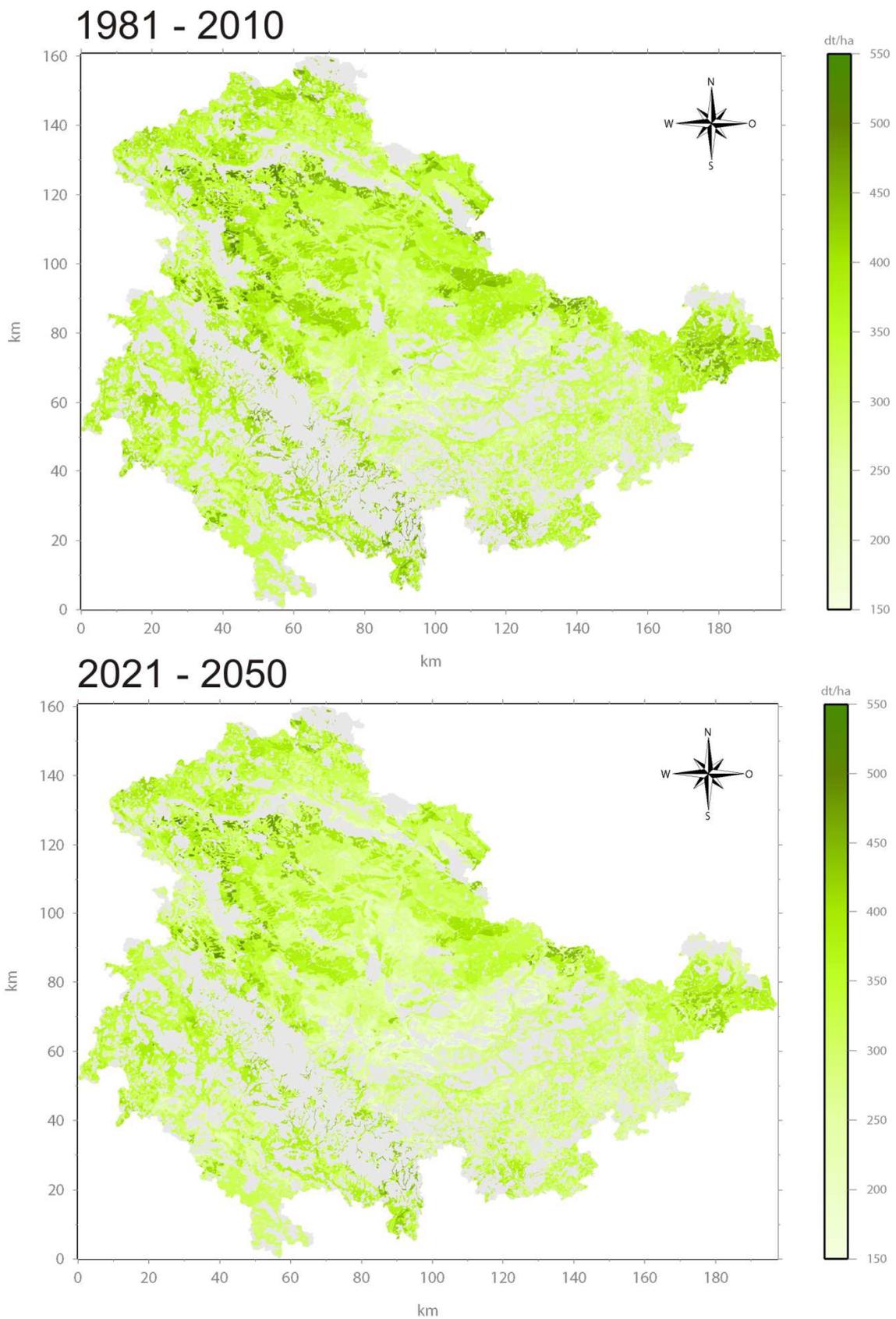


Abbildung 35: Erträge für Silomais im Vergleich der Klimazeiträume 1981-2010 und 2021-2050, regionalisiert für den Freistaat Thüringen (Basis: Modell YIELDSTAT, WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B, Variante 1, graue Flächen – kein Ackerland bzw. kein Anbau von Silomais)

Gültig für alle Fruchtarten kann man ausgehend von den Abbildungen 31 bis 35 bei der räumlichen Verteilung der Ertragshöhen eine deutliche Übereinstimmung mit der Verteilung der unterschiedlichen Böden und damit der Standortqualität im Freistaat Thüringen erkennen, d.h. auf den besten Ackerstandorten werden in beiden Simulationszeiträumen die höchsten Erträge erzielt. Ein Ertragsvergleich zwischen den beiden Simulationszeiträumen 1981-2010 und 2021-2050 lässt für Variante 1 in den Abbildungen 31 bis 35 eine leichte Abnahme der Erträge in 2021-2050 gegenüber 1981-2010 erkennen. Dabei ist aber die Ertragsänderung in Thüringen nicht überall gleich, d. h. es gibt in Thüringen auch Regionen, in denen der zu erwartende Klimaänderungseffekt auch ohne die Berücksichtigung eines Züchtungs- und Technologiefortschritts (Variante 1) zu einem Ertragszuwachs führt. Eine Ausnahme bildet hier lediglich der Silomais, bei dem die rein klimabedingten (Variante 1) Ertragsänderungen landesweit negativ sind (vergl. Abbildung 36).

Die Veränderungen im Ertrag zwischen 1981-2010 und 2021-2050 innerhalb Thüringens sind in ihrer Größe deutlich standort- und höhenlagenabhängig. Regionalisiert für den Freistaat Thüringen geben die Abbildungen 36 bis 40 für Variante 1 für die fünf hier betrachteten Fruchtarten die relativen Ertragsunterschiede zwischen den beiden Zeiträumen wieder, und zwar als Mittel aus „trockener“ und „feuchter“ Realisierung.

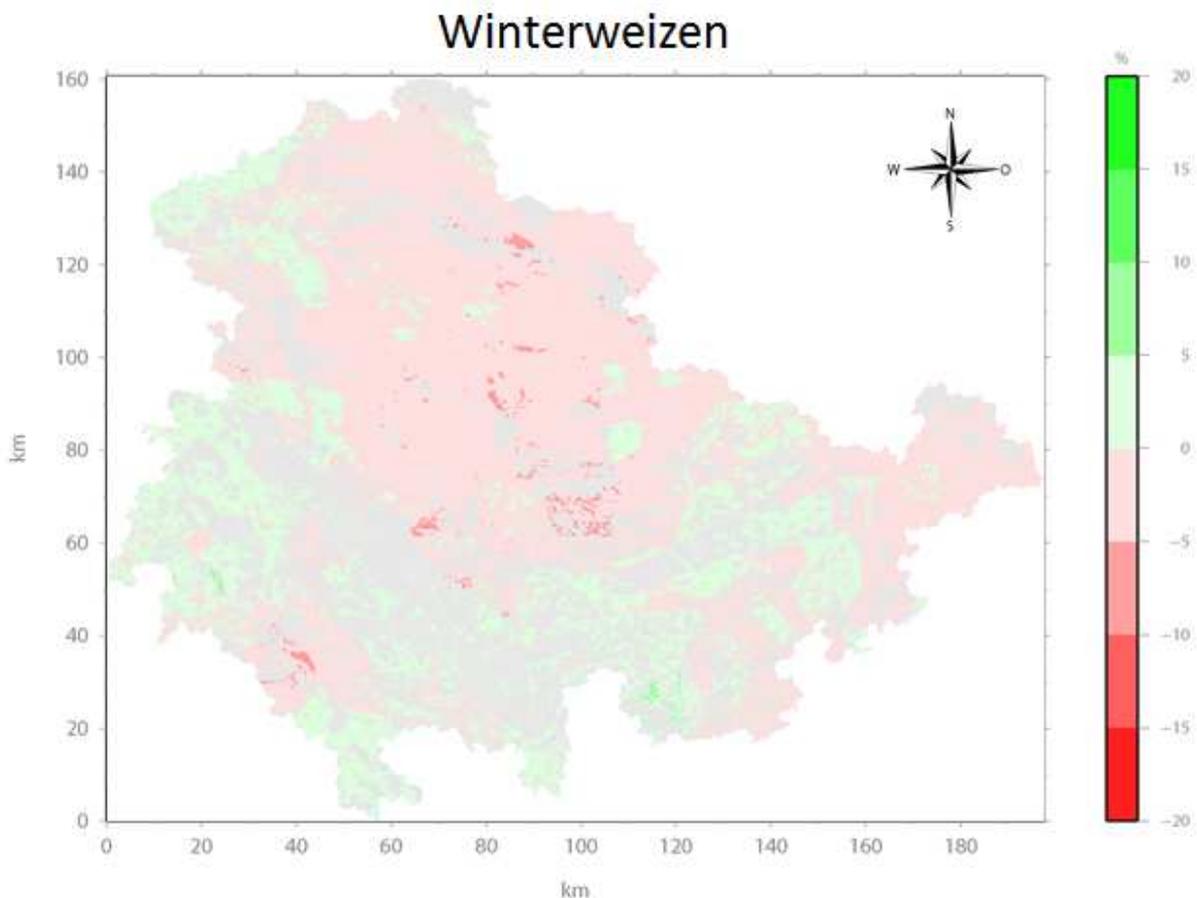


Abbildung 36: Relative Ertragsänderungen 2021-2050 vs. 1981-2010 für Winterweizen als Mittel aus „trockener“ und „feuchter“ Realisierung für Variante 1, regionalisiert für den Freistaat Thüringen (Basis: Modell YIELDSTAT, WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B, graue Flächen – kein Ackerland bzw. kein Anbau von Winterweizen)

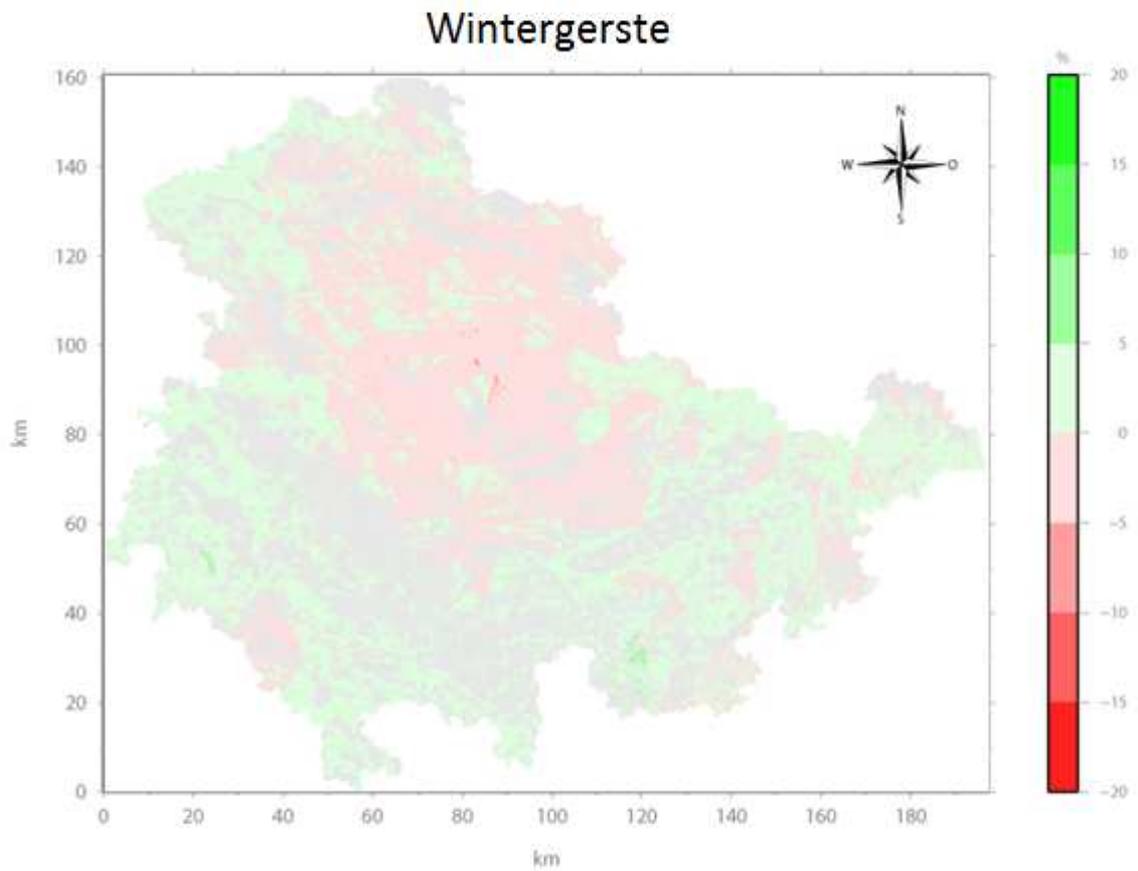


Abbildung 37: Relative Ertragsänderungen 2021-2050 vs. 1981-2010 für Wintergerste als Mittel aus „trockener“ und „feuchter“ Realisierung für Variante 1, regionalisiert für den Freistaat Thüringen (Basis: Modell YIELDSTAT, WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B, graue Flächen – kein Ackerland bzw. kein Anbau von Wintergerste)

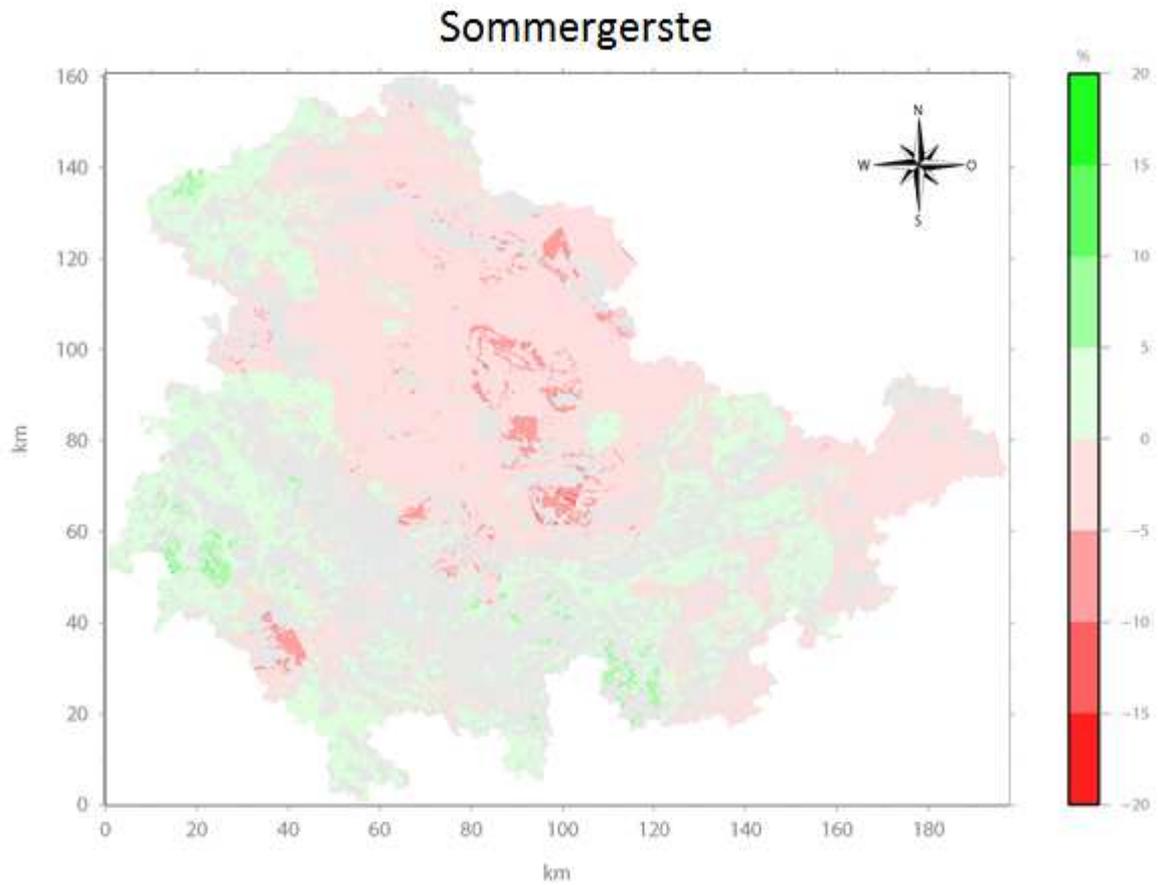


Abbildung 38: Relative Ertragsänderungen 2021-2050 vs. 1981-2010 für Sommergerste als Mittel aus „trockener“ und „feuchter“ Realisierung für Variante 1, regionalisiert für den Freistaat Thüringen (Basis: Modell YIELDSTAT, WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B, graue Flächen – kein Ackerland bzw. kein Anbau von Sommergerste)

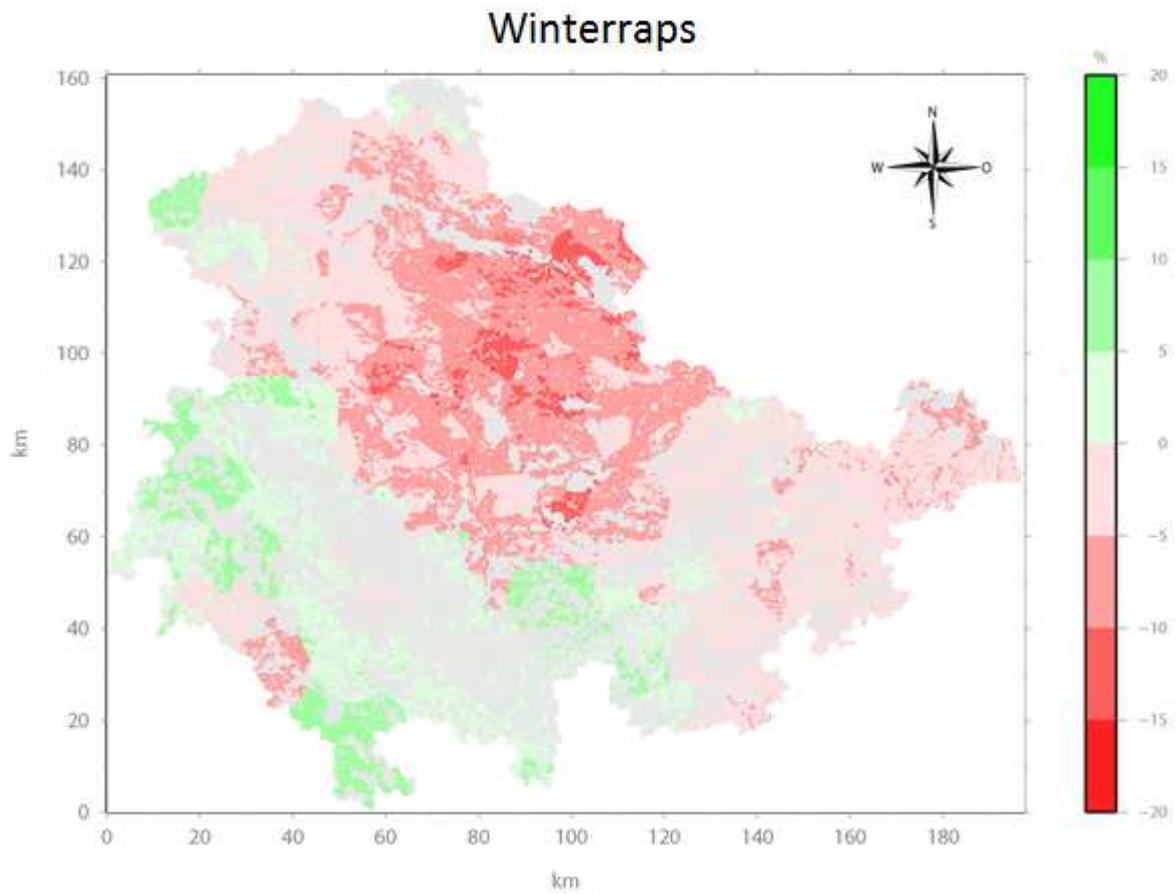


Abbildung 39: Relative Ertragsänderungen 2021-2050 vs. 1981-2010 für Winterraps als Mittel aus „trockener“ und „feuchter“ Realisierung für Variante 1, regionalisiert für den Freistaat Thüringen (Basis: Modell YIELDSTAT, WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B, graue Flächen – kein Ackerland bzw. kein Anbau von Winterraps)

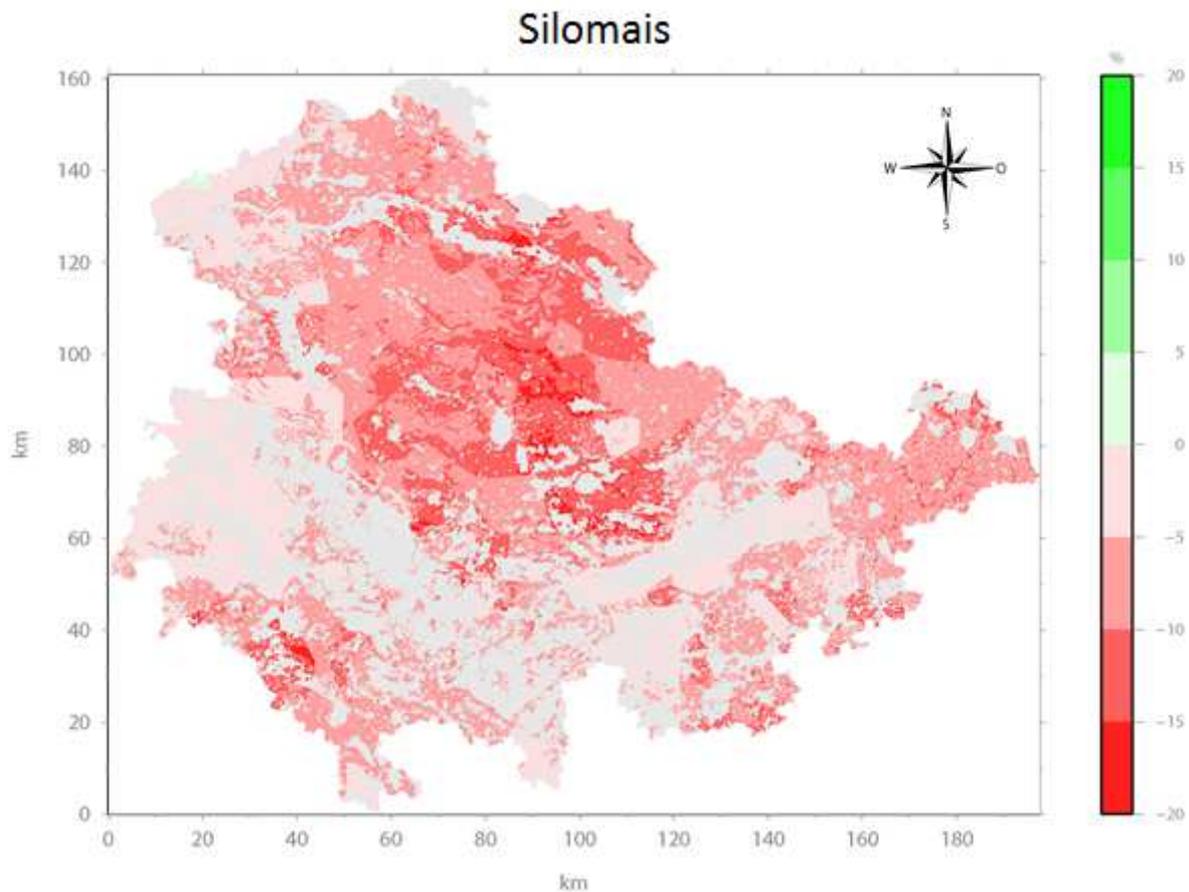


Abbildung 40: Relative Ertragsänderungen 2021-2050 vs. 1981-2010 für Silomais als Mittel aus „trockener“ und „feuchter“ Realisierung für Variante 1, regionalisiert für den Freistaat Thüringen (Basis: Modell YIELDSTAT, WETTREG 2010, Emissionsszenario A1B, graue Flächen – kein Ackerland bzw. kein Anbau von Silomais)

Bei Variante 1 liegen bei Getreide die Gebiete mit einem rein auf der Klimaänderung beruhenden leichten Ertragszuwachs in den südlichen und westlichen Teilen von Thüringen, d.h. im Thüringer Wald und südwestlich davon bis zur Rhön, im Thüringer Schiefergebirge, im Hainich und im Eichsfeld bis hin zum südlichen Harz sowie südlich von Jena bis zum Vogtland. Die Gebiete mit rein klimaänderungsbedingten Ertragsabnahmen, die aber nur sehr schwach ausfallen könnten, sind bei Getreide das gesamte Thüringer Becken und der östlichste Teil von Thüringen, das Osterland. Bei Wintergerste ist allerdings auch hier ein leichter Ertragszuwachs zu erwarten (Abbildungen 36 - 38).

Bei Winterraps beschränkt sich der rein klimaänderungsbedingte (Variante 1) Ertragsanstieg nur auf Gebiete des Thüringer Waldes und des Thüringer Schiefergebirges und südwestlich davon sowie auf ein Gebiet nördlich des Eichsfeldes. In den restlichen Gebieten des Freistaates Thüringen ist mit einem klimaänderungsbedingten Ertragsrückgang zu rechnen, der im Thüringer Becken am deutlichsten ausfallen wird (Abbildung 39).

Bei Silomais wird im gesamten Freistaat Thüringen mit klimaänderungsbedingten Ertragsrückgängen zu rechnen sein, die im Thüringer Becken wieder am deutlichsten ausfallen könnten (Abbildung 40). Der Unterschied in der Ertragswirksamkeit bedingt durch das zu erwartende Klima basiert bei Silomais im Vergleich zu den anderen hier betrachteten Fruchtarten auf dem viel geringeren CO₂-Effekt der C4-Pflanzen, zu der der Mais gehört. Bei den Getreidearten und Winterraps, die zu den C3-Pflanzen ge-

hören, kompensiert der CO₂-Effekt zu großen Teilen die durch Temperaturanstieg und ungünstige Niederschlagsverteilung im Jahr hervorgerufenen ertragswirksamen Negativeffekte.

Die Ackerstandorte der höher gelegenen Gebieten in Thüringen profitieren hinsichtlich Wachstum und Ertrag von einer kommenden Temperaturerhöhung bei einer in diesen Gebieten dafür immer noch ausreichenden Wasserversorgung. Im Thüringer Becken sowie im östlichen Teil von Thüringen könnte es bei zunehmenden Temperaturen zu wachsendem Wasserstress in der Hauptwachstumsperiode und damit im Mittel der Jahre zu klimaänderungsbedingten Ertragseinbußen kommen, die unterschiedlich stark ausfallen werden.

Werden bei den Szenariosimulationen zusätzlich noch angenommene züchtungs- und anbautechnologiebedingte positiv wirkende Ertragstrends (Variante 2, Variante 3 und Variante 4 (siehe Punkt 8)) berücksichtigt, dann ergeben sich bei allen betrachteten Fruchtarten in 2021-2050 gegenüber 1981-2010 signifikante Ertragszunahmen, ausgenommen ist hier in Variante 3 der Silomais und für die „trockene“ Realisierung die Sommergerste. In Tabelle 17 werden für die fünf betrachteten Fruchtarten und beide WETTREG 2010 - Realisierungen („trocken“ und „feucht“) die Ertragsänderungen in 2021-2050 gegenüber 1981-2010 für die Variante 1, die Variante 2, die Variante 3 und die Variante 4 zusammengefasst.

Tabelle 17: Ertragsänderungen im Freistaat Thüringen für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais in 2021-2050 gegenüber 1981-2010 für vier Trendvarianten (Realisierungen: „trocken“ (tr) und „feucht“ (fe))

Fruchtart	Realisierung	Ertragsänderung 2021-2050 vs. 1981-2010							
		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)
Winterweizen	tr	-2,6	-3,8	8,7	12,7	3,0	4,4	2,8	4,1
	fe	-0,7	-1,0	10,6	15,4	4,9	7,2	4,7	7,8
Wintergerste	tr	-0,9	-1,2	9,1	12,0	4,1	5,4	5,9	7,8
	fe	0,5	0,7	10,5	13,7	5,5	7,2	7,3	9,5
Sommergerste	tr	-2,4	-5,0	2,6	5,4	0,1	0,2	-1,6	-3,3
	fe	-0,4	-0,8	4,6	9,4	2,1	4,3	0,4	0,9
Winterraps	tr	-1,7	-4,8	7,3	17,6	2,3	6,4	2,8	7,7
	fe	-0,7	-1,9	7,3	20,0	3,3	9,0	3,8	10,3
Silomais	tr	-46,7	-13,3	122,1	34,8	37,7	10,7	-45,5	-12,9
	fe	-30,6	-8,6	138,2	38,6	53,8	15,0	-29,4	-8,2

Tabelle 17 veranschaulicht, dass die geringsten klimaänderungsbedingten relativen Ertragsveränderungen (Variante 1) bei der Wintergerste zu erwarten sind. Hier kompensiert der CO₂-Düngungseffekt in etwa die negativen Ertragseffekte, die durch einen Temperaturanstieg und durch rückläufige Sommerniederschläge hervorgerufen werden. Bei den anderen Fruchtarten gelingt dies nicht. Hier ist mit klimaänderungs-

bedingten Ertragsrückgängen zu rechnen, die bei Sommergerste und Silomais am deutlichsten ausgeprägt sind. Der Silomais als C4-Pflanze ist bei herkömmlichem Agro-Management (incl. gegenwärtiger Anbauzeitspannen) und gegenwärtigem Sortenspektrum hiervon mit Ertragsrückgängen von um die 10 % besonders betroffen. Geht man aber davon aus, dass bis 2050 durch einen früheren Vegetationsbeginn die Maisaussaat 14 Tage eher erfolgt und hier die gleiche Biomassezuwachsrate wie in 1981-2010 angenommen wird, dass bis 2050 die Silomaisernte durch ein späteres Vegetationsende um 7 Tage hinaus geschoben wird und hier aufgrund nachlassender Strahlung nur 50% der Biomassezuwachsrate wie in 1981-2010 angenommen wird, und dass bis 2050 neue Maissorten (z. B. spezielle Energiemais-Sorten) zum Anbau kommen, die die Vegetationsverlängerung für eine höhere Biomasseakkumulation besser ausnutzen können, dann könnte nur dadurch im Landesdurchschnitt der Ertrag um ca. 45 dt ha⁻¹ höher ausfallen. Damit kann der in Tabelle 17 ausgewiesene rein temperatur-, strahlungs- und niederschlagsbedingte Ertragsverlust kompensiert bzw. leicht überkompensiert werden. Damit könnten für 2021-2050 auch bei Silomais rein klimaänderungsbedingt gering positive Ertragsänderungen zu erwarten sein. Was bleibt und sich in Zukunft verstärken wird, ist das zunehmende Risiko bei der Stabilität der Maiserträge bedingt durch ein bis 2050 zunehmendes Wassermangelstressrisiko im Frühsommer und Sommer.

Betrachtet man die Spannweite der Ertragsänderungen zwischen der „trockenen“ und der „feuchten“ WETTREG 2010 – Realisierung kann man erkennen, dass die Spannweiten bei den drei Winterungen (Winterweizen, Wintergerste, Winterraps) geringer ausfallen im Vergleich zu den Spannweiten bei den beiden Sommerungen (Sommergerste, Silomais). Ein Grund dafür ist, dass die Sommerungen durch vermehrte Frühsommer-Trockenheiten häufiger mit Problemen bei der Bestandsetablierung (beginnend beim Auflaufen) konfrontiert sind und bei zunehmenden Sommertemperaturen und abnehmenden Sommerniederschlägen häufiger und besonders bei Silomais länger Wassermangelstresssituationen ausgesetzt sind.

Bei Berücksichtigung von Fortschritten in der Züchtung und im Agro-Management gemäß der Annahmen gemäß Variante 2 und Variante 3 ist bis 2050 auch weiterhin bei allen betrachteten Fruchtarten mit einem Ertragszuwachs zu rechnen, je nach Variante unterschiedlich stark ausgeprägt. Bei Variante 4, bei der bei der Bestimmung des stark degressiven Fortschrittstrends vom aktuellen Trend ausgegangen wird, sind bei Sommergerste und Silomais auch Ertragseinbußen möglich, d. h. Züchtung und zukünftige neue Agrotechnologien können bei diesen Fruchtarten die klimaänderungsbedingten Ertragseinbußen nicht kompensieren. Die Hauptursache ist hier im Ausgangstrend für Sommergerste und Silomais der letzten Dekade zu sehen, der für Sommergerste bei 0,05 dt ha⁻¹ a⁻¹ lag und bei Silomais sogar bei -4,09 dt ha⁻¹ a⁻¹ (siehe Tabelle 1).

Da zukünftige Abschätzungen von Züchtungserfolgen und Fortschritten im Agromanagement aber mit vielen Unsicherheiten verbunden sind, sind auch die darauf aufbauenden Aussagen zu Ertragsentwicklungen bis 2050 ebenfalls mit entsprechenden Unsicherheiten verbunden. In jedem Fall ist es aber mit den Aussagen zu möglichen Ertragsentwicklungen aus den Varianten 1 bis 4 möglich, eine Spannweite für die Ertragsentwicklungen bis 2050 abzustecken.

Für die Landwirtschaftsbetriebe ist die Frage nach der Ertragsstabilität von großer Bedeutung und danach, wie sie sich bis 2050 verändern könnte. Da bis 2050 mit einer immer häufiger auftretenden Abnahme der Sommerniederschläge verbunden mit einer Zunahme der Temperaturen zu rechnen ist und in diesen Situationen auch noch vermehrt konvektive Niederschläge mit höheren Intensitäten auftreten können,

ist auch mit zunehmenden Ertragsschwankungen zwischen den Einzeljahren zu rechnen. Die Simulationsrechnungen belegen dies. In Tabelle 18 werden für den Freistaat Thüringen beispielhaft für die „feuchte“ Realisierung fruchtartbezogen die Ertragsvarianz und die Ertragsspanne zwischen ertragsschlechtestem und ertragsbestem Jahr der 30jährigen Simulationszeiträume 1981-2010 und 2021-2050 miteinander verglichen.

Tabelle 18: Ertragsvarianz (EV) und Ertragsspanne (ES) zwischen ertragsschlechtestem und ertragsbestem Jahr im Vergleich der 30jährigen Simulationszeiträume 1981-2010 und 2021-2050 für die „feuchte“ Realisierung (Freistaat Thüringen)

Fruchtart	1981 - 2010		2021 - 2050	
	EV (dt ha ⁻¹)	ES (dt ha ⁻¹)	EV (dt ha ⁻¹)	ES (dt ha ⁻¹)
Winterweizen	4,05	19,70	4,89	23,30
Wintergerste	3,43	17,00	4,04	20,50
Sommergerste	3,54	18,90	4,71	23,10
Winterraps	2,33	11,60	3,38	17,70
Silomais	36,00	172,50	47,90	208,90

Aus Tabelle 18 wird deutlich, dass bei allen Fruchtarten die Ertragsvarianz im Simulationszeitraum 1981-2010 kleiner ist als im Simulationszeitraum 2021-2050. Das gleiche trifft auch für die Ertragsspanne zwischen ertragsschlechtestem und ertragsbestem Jahr der 30jährigen Simulationszeiträume zu. Damit wird deutlich unterstrichen, dass die Stabilität der Erträge bis 2050 abnehmen wird.

8.2 Repräsentative Landkreise

Werden die Simulationsergebnisse zur regionalen Ertragsabschätzung mit dem Modell YIELDSTAT auf die Gebietskulissen der sechs repräsentativen Kreise Sömmerda, Gotha, Altenburger Land, Kyffhäuserkreis, Hildburghausen und Saale-Orla-Kreis (siehe Abbildung 3) bezogen, ergeben sich im Vergleich zu Aussagen bezüglich des gesamten Freistaates Thüringen weitaus differenziertere Aussagen hinsichtlich der Höhe der Ertragsänderungen bis 2050.

In Tabelle 19a-f sind für die vier Simulationsvarianten die absoluten und relativen Ertragsänderungen in 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010 für die betrachteten Fruchtarten Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais und die beiden WETTREG 2010 – Realisierungen „trocken“ und „feucht“ zusammengefasst, getrennt für die einzelnen repräsentativen Landkreise (Kyffhäuser (Tabelle 19a), Sömmerda (Tabelle 19b), Gotha (Tabelle 19c), Hildburghausen (Tabelle 19d), Altenburger Land (Tabelle 19e), Saale-Orla-Kreis (Tabelle 19f)).

Tabelle 19a-19f: Absolute und relative Ertragsänderungen in 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010 für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais für vier Trendvarianten, getrennt nach den sechs repräsentativen Landkreisen (tr - „trockene“ Realisierung, fe - „feuchte“ Realisierung)

Tabelle 19a

Fruchtart	Realisierung	Ertragsänderung 2021-2050 vs. 1981-2010							
		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)
Kreis Kyffhäuser									
Winterweizen	tr	-3,8	-5,7	7,5	11,1	1,8	2,7	1,6	2,3
	fe	-1,1	-1,6	10,2	15,0	4,5	6,7	4,3	6,3
Wintergerste	tr	-1,9	-2,6	8,1	11,3	3,1	4,3	4,9	6,8
	fe	0,1	0,1	10,1	13,9	5,1	7,0	6,9	9,4
Sommergerste	tr	-3,6	-7,1	1,4	2,8	-1,1	-2,2	-2,8	-5,5
	fe	-0,8	-1,6	4,2	8,2	1,7	3,3	0,0	0,1
Winterraps	tr	-3,5	-10,5	4,5	13,5	0,5	1,5	1,0	2,9
	fe	-1,6	-4,7	6,4	18,8	2,4	7,1	2,9	8,4
Silomais	tr	-55,7	-15,9	113,1	32,2	28,7	8,2	-54,5	-15,5
	fe	-33,1	-9,3	135,7	38,0	51,3	14,4	-31,9	-8,9

Tabelle 19b

Fruchtart	Realisierung	Ertragsänderung 2021-2050 vs. 1981-2010							
		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)
Kreis Sömmerda									
Winterweizen	tr	-3,1	-4,7	8,1	12,4	2,5	3,8	2,3	3,4
	fe	-1,4	-2,1	9,9	14,8	4,2	6,3	4,0	5,9
Wintergerste	tr	-1,4	-1,9	8,6	11,9	3,6	5,0	5,4	7,5
	fe	-0,2	-0,3	9,8	13,4	4,8	6,6	6,6	9,0
Sommergerste	tr	-3,1	-6,2	1,9	3,8	-0,6	-1,2	-2,3	-4,6
	fe	-1,2	-2,4	3,8	7,5	1,3	2,6	-0,4	-0,7
Winterraps	tr	-3,1	-9,8	4,9	15,5	0,9	2,8	1,4	4,3
	fe	-1,9	-5,8	6,1	18,8	2,1	6,5	2,6	7,9
Silomais	tr	-51,7	-15,0	117,1	34,0	32,7	9,5	-50,5	-14,7
	fe	-37,5	-10,6	131,3	37,3	46,9	13,3	-36,3	-10,3

Tabelle 19c

Fruchtart	Realisierung	Ertragsänderung 2021-2050 vs. 1981-2010							
		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)
Kreis Gotha									
Winterweizen	tr	-3,4	-4,6	7,8	10,6	2,2	3,0	2,0	2,6
	fe	-0,9	-1,2	10,4	13,8	4,7	6,3	4,5	6,0
Wintergerste	tr	-1,7	-2,2	8,3	10,8	3,3	4,3	5,1	6,6
	fe	0,2	0,3	10,2	13,1	5,2	6,7	7,0	9,0
Sommergerste	tr	-3,3	-6,1	1,7	3,1	-0,8	-1,5	-2,5	-4,6
	fe	-0,8	-1,5	4,2	7,7	1,7	3,1	0,0	0,0
Winterraps	tr	-2,7	-7,0	5,3	13,7	1,3	3,4	1,8	4,6
	fe	-1,0	-2,6	7,0	18,0	3,0	7,7	3,5	8,9
Silomais	tr	-55,7	-15,3	113,1	31,0	28,7	7,9	-54,5	-15,0
	fe	-32,1	-8,7	136,7	37,3	52,3	14,3	-30,9	-8,4

Tabelle 19d

Fruchtart	Realisierung	Ertragsänderung 2021-2050 vs. 1981-2010							
		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)
Kreis Hildburghausen									
Winterweizen	tr	-1,3	-2,0	10,0	15,4	4,3	6,7	4,1	6,3
	fe	0,8	1,2	12,1	18,7	6,4	10,0	6,2	9,5
Wintergerste	tr	0,8	1,0	10,8	13,4	5,8	7,2	7,6	9,4
	fe	2,1	2,6	12,1	15,0	7,1	8,8	8,9	11,0
Sommergerste	tr	-1,2	-2,8	3,8	9,0	1,3	3,1	-0,4	-0,9
	fe	0,9	2,1	5,9	14,0	3,4	8,1	1,7	4,1
Winterraps	tr	1,2	3,4	9,2	25,8	5,2	14,6	5,7	15,9
	fe	1,9	5,4	9,9	27,9	5,9	16,6	6,4	17,9
Silomais	tr	-41,3	-11,7	127,5	36,0	43,1	12,2	-40,1	-11,3
	fe	-20,7	-5,9	148,1	41,9	63,7	18,0	-19,5	-5,5

Tabelle 19e

Fruchtart	Realisierung	Ertragsänderung 2021-2050 vs. 1981-2010							
		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)
Kreis Altenburger Land									
Winterweizen	tr	-2,0	-2,7	9,3	12,3	3,6	4,8	3,4	4,5
	fe	-1,6	-2,1	9,6	12,6	4,0	5,2	3,8	4,9
Wintergerste	tr	-0,5	-0,6	9,5	12,3	4,5	5,8	6,3	8,2
	fe	-0,2	-0,3	9,8	12,5	4,8	6,1	6,6	8,4
Sommergerste	tr	-1,8	-3,6	3,2	6,4	0,7	1,4	-1,0	-2,0
	fe	-1,1	-2,2	3,9	7,6	1,4	2,7	-0,3	-0,5
Winterraps	tr	-2,1	-5,4	5,9	15,1	1,9	4,8	2,4	6,0
	fe	-2,0	-4,9	6,0	14,7	2,0	4,9	2,5	6,1
Silomais	tr	-42,4	-11,1	126,4	33,0	42,0	11,0	-41,2	-10,8
	fe	-39,4	-9,9	129,4	32,5	45,0	11,3	-38,2	-9,6

Tabelle 19f

Fruchtart	Realisierung	Ertragsänderung 2021-2050 vs. 1981-2010							
		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)
Saale-Orla-Kreis									
Winterweizen	tr	-1,6	-2,3	9,7	13,7	4,0	5,7	3,8	5,3
	fe	-1,1	-1,5	10,2	14,2	4,5	6,3	4,3	6,0
Wintergerste	tr	-0,3	-0,4	9,7	13,5	4,7	6,6	6,5	9,0
	fe	0,1	0,1	10,1	13,9	5,1	7,0	6,9	9,4
Sommergerste	tr	-1,1	-2,0	3,9	7,2	1,4	2,6	-0,3	-0,5
	fe	-0,8	-1,5	4,2	7,6	1,7	3,1	0,0	0,0
Winterraps	tr	-1,1	-2,8	6,9	17,3	2,9	7,3	3,4	8,4
	fe	-1,0	-2,4	7,0	17,1	3,0	7,3	3,5	8,5
Silomais	tr	-39,5	-11,8	129,3	38,5	44,9	13,4	-38,3	-11,4
	fe	-37,0	-10,6	131,8	37,8	47,4	13,6	-35,8	-10,3

Aus den in den Tabellen 19a bis 19f dargestellten landkreisbezogenen Simulationsergebnissen wird deutlich, dass sich die sechs Landkreise hinsichtlich der bis 2050

zu erwartenden rein klimaänderungsbedingten Ertragseinbußen (Variante 1) in zwei Gruppen einteilen lassen. Die erste Gruppe wird gebildet durch die Landkreise Sömmerda und Gotha, die die BKR/AG *Lößböden der Ackerebene* repräsentieren, und den Kyffhäuser-Kreis, der den nördlichen Teil der BKR/AG *Lößböden der Übergangslagen* repräsentiert. Bei den zu erwartenden rein klimaänderungsbedingten Ertragseinbußen liegen die Kreise dieser Gruppe über dem Landesmittel von Thüringen. Die zweite Gruppe setzt sich zusammen aus dem Kreis Hildburghausen und dem Saale-Orla-Kreis, die die BKR/AG *Verwitterungsböden der Übergangslagen* repräsentieren, und dem Kreis Altenburger Land, der den südöstlichen Teil der BKR/AG *Lößböden der Übergangslagen* repräsentiert. Bei den zu erwartenden rein klimaänderungsbedingten Ertragseinbußen liegen die Kreise dieser Gruppe unter dem Landesmittel von Thüringen. Die bis 2050 zu erwartenden rein klimaänderungsbedingten Ertragseinbußen fallen in den Kreisen der ersten Gruppe bei allen betrachteten Fruchtarten höher aus als bei den Kreisen der zweiten Gruppe. In Abhängigkeit von den bei den Simulationsrechnungen berücksichtigten Realisierungen („trocken“, „feucht“) liegen die bis 2050 zu erwartenden Ertragseinbußen im Mittel der jeweiligen Gruppe bei der ersten Gruppe von Kreisen bei Winterweizen um 0,7 ... 1,8 Prozentpunkte höher als bei den Kreisen der zweiten Gruppe, bei Wintergerste um 0,1 ... 0,8 Prozentpunkte höher, bei Sommergerste um 0,7 ... 2,3 Prozentpunkte höher, bei Winterraps um 2,1 ... 3,7 Prozentpunkte höher und bei Silomais um 3,5 ... 5,2 Prozentpunkte höher.

Vergleicht man die Auswirkungen der unter WETTREG 2010 (Emissionsszenario A1B) zu erwartenden Klimaveränderungen auf den Ertrag unter Berücksichtigung verschiedener Ertragstrends (Varianten 2 bis 4), dann ist bei den Varianten 2 und 3 für alle betrachteten Landkreise und Fruchtarten mit einem Ertragszuwachs zu rechnen. Bei Variante 4 nur bei Winterweizen, Wintergerste und Winterraps. Bei Sommergerste kann es in Abhängigkeit von der Klimarealisierung („trocken“, „feucht“) teilweise und bei Silomais immer zu Ertragseinbußen kommen. Das gilt für alle Landkreise gleichermaßen. Die für die Variante 1 getroffenen Aussagen bezüglich der Beurteilung der beiden Gruppen von Landkreisen treffen auch für die Varianten 2 bis 4 zu.

Betrachtet man die klimaänderungsbedingten Auswirkungen auf den zu erwartenden Ertrag fruchtartbezogen, dann lassen sich für die einzelnen Landkreise die gleichen Aussagen ableiten, wie für den gesamten Freistaat Thüringen (vergl. Punkt 8.3).

8.3 Boden-Klima-Regionen / Anbaugebiete

Betrachtet man in Auswertung der Simulationsrechnungen die Ergebnisse zur regionalen Ertragsschätzung mit dem Modell YIELDSTAT bezogen auf die Gebietskulissen der drei Boden-Klima-Räume/Anbaugebiete (*Lößböden der Ackerebene*, *Lößböden der Übergangslagen*, *Verwitterungsböden der Übergangslagen*, Abbildung 41, (Roßberg et al., 2007)) zeichnen sich auch hier im Vergleich zu Aussagen bezüglich des gesamten Freistaates Thüringen abweichende Aussagen hinsichtlich der Höhe der bis 2050 zu erwartenden Ertragsänderungen ab.



Abbildung 41: Boden-Klima-Räume/Anbauggebiete im Freistaat Thüringen

In Tabelle 20a-c sind für die vier Simulationsvarianten die absoluten und relativen Ertragsänderungen in 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010 für die betrachteten Fruchtarten Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Wintererbsen und Silomais und die beiden WETTREG 2010 – Realisierungen „trocken“ und „feucht“ zusammengefasst, getrennt für die drei Boden-Klima-Räume (*Lössböden der Ackerebene* (Tabelle 20a), *Lössböden der Übergangslagen* (Tabelle 20b), *Verwitterungsböden der Übergangslagen* (Tabelle 20c).

Tabelle 20a-20c: Absolute und relative Ertragsänderungen in 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010 für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais für vier Trendvarianten, getrennt nach den drei Boden-Klima-Räumen/Anbaugebieten (tr - „trockene“ Realisierung, fe - „feuchte“ Realisierung)

Tabelle 20a

Fruchtart	Realisierung	Ertragsänderung 2021-2050 vs. 1981-2010							
		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)
Lössböden der Ackerebene									
Winterweizen	tr	-3,2	-4,8	8,1	12,1	2,4	3,6	2,2	3,2
	fe	-1,1	-1,7	10,1	15,0	4,5	6,7	4,2	6,3
Wintergerste	tr	-1,5	-2,1	8,5	11,7	3,5	4,8	5,3	7,3
	fe	0,0	0,0	10,0	13,6	5,0	6,8	6,8	9,2
Sommergerste	tr	-3,0	-6,0	2,0	4,0	-0,5	-1,0	-2,2	-4,4
	fe	-0,9	-1,8	4,1	8,1	1,6	3,2	-0,1	-0,1
Winterraps	tr	-3,1	-9,6	4,9	15,1	0,9	2,8	1,4	4,2
	fe	-1,6	-4,8	6,4	19,3	2,4	7,3	2,9	8,7
Silomais	tr	-51,2	-14,2	117,6	32,6	33,2	9,2	-50,0	-13,9
	fe	-34,5	-9,4	134,3	36,5	49,9	13,6	-33,3	-9,1

Tabelle 20b

Fruchtart	Realisierung	Ertragsänderung 2021-2050 vs. 1981-2010							
		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)
Lössböden der Übergangslagen									
Winterweizen	tr	-3,0	-4,1	8,3	11,2	2,6	3,6	2,4	3,2
	fe	-1,2	-1,6	10,1	13,5	4,4	6,0	4,2	5,6
Wintergerste	tr	-1,4	-1,9	8,6	11,5	3,6	4,8	5,4	7,2
	fe	-0,1	-0,1	9,9	13,1	4,9	6,5	6,7	8,8
Sommergerste	tr	-2,8	-5,3	2,2	4,2	-0,3	-0,6	-2,0	-3,7
	fe	-0,9	-1,7	4,1	7,7	1,6	3,0	-0,1	-0,1
Winterraps	tr	-2,6	-6,7	5,4	13,9	1,4	3,6	1,9	4,8
	fe	-1,5	-3,8	6,5	16,4	2,5	6,3	3,0	7,5
Silomais	tr	-49,3	-14,0	119,5	34,1	35,1	10,0	-48,1	-13,7
	fe	-34,8	-9,7	134,0	37,3	49,6	13,8	-33,6	-9,4

Tabelle 20c

Fruchtart	Realisierung	Ertragsänderung 2021-2050 vs. 1981-2010							
		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)
Verwitterungsböden der Übergangslagen									
Winterweizen	tr	-2,5	-3,8	8,8	13,3	3,1	4,7	2,9	4,3
	fe	-0,4	-0,5	10,9	16,4	5,3	7,9	5,0	7,5
Wintergerste	tr	-0,7	-0,9	9,3	12,0	4,3	5,6	6,1	7,9
	fe	0,8	1,0	10,8	13,8	5,8	7,4	7,6	9,7
Sommergerste	tr	-2,0	-4,4	3,0	6,6	0,5	1,1	-1,2	-2,6
	fe	0,0	0,0	5,0	10,9	2,5	5,5	0,8	1,8
Winterraps	tr	-0,8	-2,3	7,2	20,3	3,2	9,0	3,7	10,4
	fe	0,1	0,3	8,1	22,6	4,1	11,4	4,6	12,7
Silomais	tr	-44,7	-13,0	124,1	36,0	39,7	11,5	-43,5	-12,6
	fe	-27,0	-7,7	141,8	40,4	57,4	16,4	-25,8	-7,4

Die in den Tabellen 20a bis 20c BKR/AG-bezogenen Simulationsergebnisse zur Ertragsveränderung unter sich bis 2050 verändernden Klimabedingungen bestätigen die bereits unter Punkt 8 für den gesamte Freistaat Thüringen gemachten Aussagen. Bei Variante 1 sind dabei im BKR/AG „Lößböden der Ackerebene“ (BKR/AG-LA) bis 2050 die rein klimaänderungsbedingt größten Ertragsrückgänge zu erwarten. Im BKR/AG *Lößboden der Übergangslagen* (BKR/AG-LÜ) fallen diese geringer aus und im BKR/AG *Verwitterungsböden der Übergangslagen* (BKR/AG-VÜ) sind diese noch geringer. Über alle betrachteten Fruchtarten sind die zu erwartenden Ertragseinbußen gegenüber BKR/AG-LA im BKR/AG-LÜ um bis zu 0,7 Prozentpunkte (Ausnahme bei Winterraps: 1,1 ... 2,9 Prozentpunkte) und im BKR/AG-VÜ um 1,0 ... 1,8 Prozentpunkte (Ausnahme bei Winterraps: 5,1 ... 7,3 Prozentpunkte) geringer. Im Vergleich der klimabedingten Ertragsauswirkungen zwischen BKR/AG-LÜ und BKR/AG-VÜ ist im BKR/AG-VÜ der Ertragsrückgang um 0,3 ... 2,0 Prozentpunkte geringer (Ausnahme bei Winterraps: 4,1 ... 4,4 Prozentpunkte).

Vergleicht man die Auswirkungen der zu erwartenden Klimaveränderungen auf den Ertrag unter Berücksichtigung verschiedener Ertragstrends (Varianten 2 bis 4), dann ist bei den Varianten 2 und 3 für alle betrachteten BKR/AG's und Fruchtarten mit einem Ertragszuwachs zu rechnen. Bei Variante 4 trifft dies nur bei Winterweizen, Wintergerste und Winterraps zu. Bei Sommergerste und bei Silomais werden mit YIELDSTAT in allen BKR/AG's Ertragseinbußen abgeschätzt (Ausnahme BKR/AG-VÜ, Realisierung "feucht"). Die für die Variante 1 getroffenen Aussagen bezüglich der Beurteilung der Ertragsänderungen in den drei BKR/AG's treffen auch für die Varianten 2 bis 4 zu.

Betrachtet man die klimaänderungsbedingten Auswirkungen auf den zu erwartenden Ertrag fruchtartbezogen, dann lassen sich für die einzelnen BKR/AG's die gleichen Aussagen ableiten, wie für den gesamten Freistaat Thüringen (vergl. Punkt 8.3)

8.4 Planungsregionen

Die seit Mitte der 1990er Jahre verbindliche Unterteilung Thüringens in die vier Planungsregionen „Nordthüringen“, „Mittelthüringen“, „Südwestthüringen“ und „Ostthüringen“ geht nicht von Boden-Klima-Räumen oder Anbaugebieten aus, sondern ist ein Zusammenschluss von mehreren Kreisen zu Planungseinheiten, die einer insgesamt abgestimmten progressiven Entwicklung des Freistaates Thüringen dienen. Bezogen auf die vier Planungsregionen sind natürlich auch Aussagen zur landwirtschaftlichen Ertragsentwicklung für zukünftige Zeiträume besonders auch unter dem Blickwinkel der Klimaänderung von Interesse.

Da die Planungsregionen ungeachtet der BKR/AG's festgelegt wurden und damit innerhalb einer Planungsregion mehrere BKR/AG's liegen können, kommt es auf dieser Gebietskulisse zu Aussagen bezüglich der bis 2050 zu erwartenden Ertragsveränderungen, die sich von denen anderer hier betrachteter Gebietskulissen unterscheiden. Die Planungsregionen Thüringens sind in Abbildung 42 wiedergegeben.

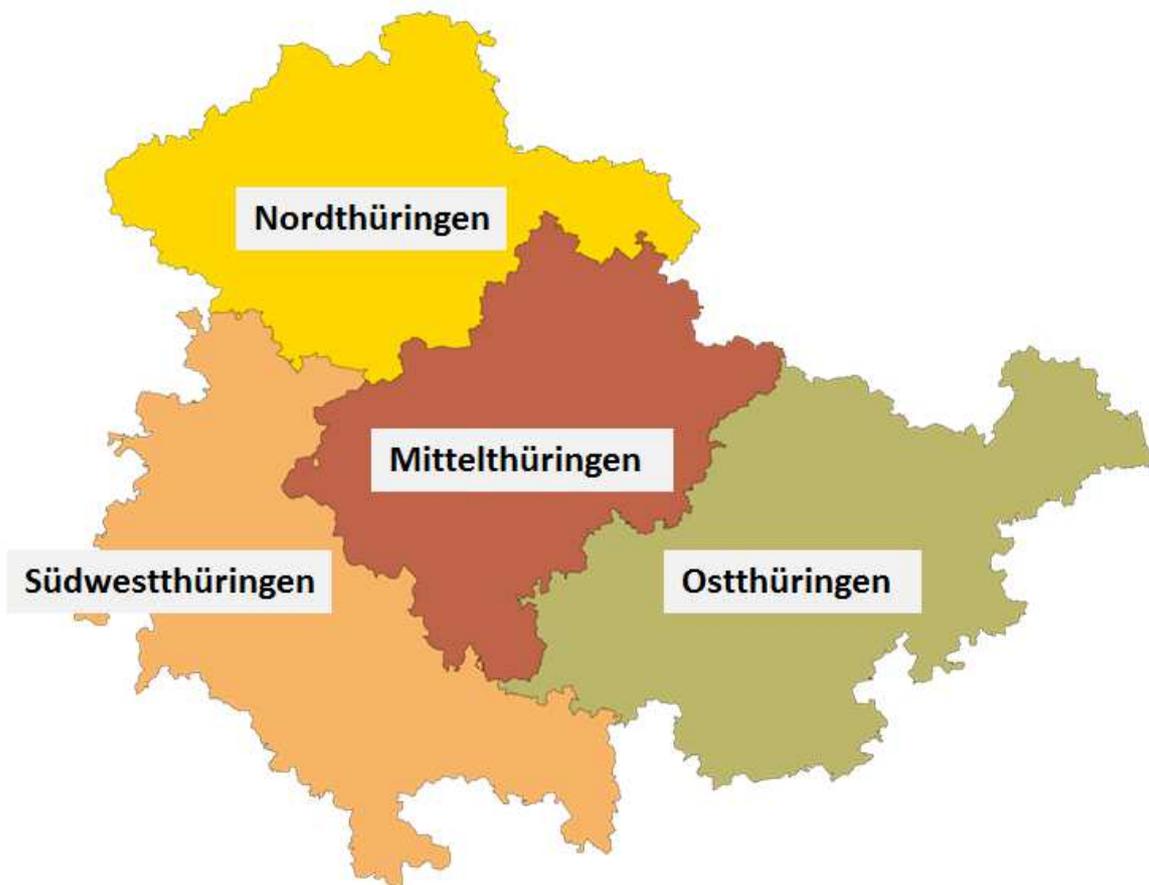


Abbildung 42: Planungsregionen des Freistaates Thüringen

In Tabelle 21a-d sind für die vier Simulationsvarianten die absoluten und relativen Ertragsänderungen in 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010 für die betrachteten Fruchtarten Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterrapen und Silomais und die beiden WETTREG 2010 – Realisierungen „trocken“ und „feucht“ zusammengefasst, getrennt für die vier Planungsregionen des Freistaates Thüringen (*Nordthüringen* (Tabelle 21a), *Mittelthüringen* (Tabelle 21b), *Südwestthüringen* (Tabelle 21c), *Ostthüringen* (Tabelle 21d)).

Tabelle 21a-21d: Absolute und relative Ertragsänderungen in 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010 für Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps und Silomais für vier Trendvarianten, getrennt nach den vier Planungsregionen (tr - „trockene“ Realisierung, fe - „feuchte“ Realisierung)

Tabelle 21a

Fruchtart	Realisierung	Ertragsänderung 2021-2050 vs. 1981-2010							
		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)
Planungsregion Nordthüringen									
Winterweizen	tr	-3,8	-5,5	7,5	10,8	1,8	2,6	1,6	2,2
	fe	-0,5	-0,8	10,7	15,3	5,1	7,3	4,8	6,9
Wintergerste	tr	-1,8	-2,3	8,2	10,5	3,2	4,1	5,0	6,4
	fe	0,6	0,8	10,6	13,5	5,6	7,1	7,4	9,4
Sommergerste	tr	-3,5	-7,1	1,5	3,0	-1,0	-2,0	-2,7	-5,4
	fe	-0,2	-0,4	4,8	9,7	2,3	4,6	0,6	1,3
Winterraps	tr	-2,6	-7,5	5,4	15,6	1,4	4,0	1,9	5,4
	fe	-0,7	-2,0	7,3	20,7	3,3	9,4	3,8	10,7
Silomais	tr	-55,7	-15,3	113,1	31,0	28,7	7,9	-54,5	-15,0
	fe	-27,8	-7,5	141,0	38,2	56,6	15,3	-26,6	-7,2

Tabelle 21b

Fruchtart	Realisierung	Ertragsänderung 2021-2050 vs. 1981-2010							
		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)
Planungsregion Mittelthüringen									
Winterweizen	tr	-3,0	-4,4	8,3	12,1	2,6	3,8	2,4	3,4
	fe	-1,3	-1,8	10,0	14,4	4,4	6,3	4,1	5,9
Wintergerste	tr	-1,4	-1,9	8,6	11,6	3,6	4,9	5,4	7,3
	fe	-0,2	-0,3	9,8	13,1	4,8	6,4	6,6	8,8
Sommergerste	tr	-2,9	-5,8	2,1	4,2	-0,4	-0,8	-2,1	-4,1
	fe	-1,1	-2,2	3,9	7,7	1,4	2,8	-0,3	-0,5
Winterraps	tr	-2,7	-7,8	5,3	15,3	1,3	3,7	1,8	5,1
	fe	-1,7	-4,8	6,3	17,7	2,3	6,5	2,8	7,8
Silomais	tr	-50,5	-14,7	118,3	34,4	33,9	9,9	-49,3	-14,4
	fe	-35,5	-10,1	133,3	38,0	48,9	13,9	-34,3	-9,8

Tabelle 21c

Fruchtart	Realisierung	Ertragsänderung 2021-2050 vs. 1981-2010							
		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)
Planungsregion Südwestthüringen									
Winterweizen	tr	-1,7	-2,6	9,6	14,7	3,9	6,0	3,7	5,6
	fe	0,5	0,7	11,7	17,9	6,1	9,3	5,8	8,9
Wintergerste	tr	0,3	0,4	10,3	12,7	5,3	6,5	7,1	8,7
	fe	1,8	2,2	11,8	14,5	6,8	8,4	8,6	10,5
Sommergerste	tr	-1,3	-3,0	3,7	8,6	1,2	2,8	-0,5	-1,1
	fe	0,6	1,4	5,6	13,0	3,1	7,2	1,4	3,3
Winterraps	tr	0,6	1,7	8,6	24,2	4,6	13,0	5,1	14,3
	fe	1,4	3,9	9,4	26,4	5,4	15,2	5,9	16,5
Silomais	tr	-42,0	-11,6	126,8	34,9	42,4	11,7	-40,8	-11,2
	fe	-22,7	-6,2	146,1	40,0	61,7	16,9	-21,5	-5,9

Tabelle 21c

Fruchtart	Realisierung	Ertragsänderung 2021-2050 vs. 1981-2010							
		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt/ha)	rel. Abw. (%)
Planungsregion Ostthüringen									
Winterweizen	tr	-1,9	-2,8	9,3	13,6	3,7	5,4	3,5	5,0
	fe	-1,2	-1,7	10,1	14,4	4,4	6,3	4,2	5,9
Wintergerste	tr	-0,4	-0,6	9,6	13,4	4,6	6,4	6,4	8,9
	fe	0,0	0,0	10,0	13,7	5,0	6,9	6,8	9,3
Sommergerste	tr	-1,5	-3,0	3,5	7,1	1,0	2,0	-0,7	-1,4
	fe	-0,7	-1,4	4,3	8,5	1,8	3,6	0,1	0,3
Winterraps	tr	-1,4	-3,7	6,6	17,2	2,6	6,8	3,1	8,0
	fe	-1,1	-2,8	6,9	17,5	2,9	7,4	3,4	8,5
Silomais	tr	-38,8	-11,6	130,0	38,7	45,6	13,6	-37,6	-11,2
	fe	-34,2	-9,8	134,6	38,7	50,2	14,4	-33,0	-9,5

Auch die in den Tabellen 21a bis 21d auf die einzelnen Planungsregionen bezogenen Simulationsergebnisse zur Ertragsveränderung unter sich bis 2050 verändern-

den Klimabedingungen bestätigen die bereits unter Punkt 8 gemachten Aussagen. Die Planungsregionen lassen sich hinsichtlich der bis 2050 zu erwartenden Ertragsveränderungen in zwei Gruppen zusammenfassen. Dabei bilden die Planungsregionen *Nordthüringen* und *Mittelthüringen* eine Gruppe (Gruppe I) und die Planungsregionen *Südwestthüringen* und *Ostthüringen* die andere Gruppe (Gruppe II).

Bei Simulations-Variante 1 sind in den Planungsregionen der Gruppe I die rein klimaänderungsbedingt größten Ertragsrückgänge zu erwarten. Sie liegen gegenüber der Gruppe II im Mittel aus „trockener“ und „feuchter“ Realisierung bei Winterweizen um 1,5 Prozentpunkte höher, bei Wintergerste um 1,4 Prozentpunkte höher, bei Sommergerste um 2,3 Prozentpunkte höher, bei Winterraps um 5,3 Prozentpunkte höher und bei Silomais um 2,2 Prozentpunkte höher.

Vergleicht man die Planungsregionen der Gruppe I, wo bei allen Fruchtarten Ertragseinbußen auftreten, untereinander, sind in *Mittelthüringen* die zu erwartenden Ertragseinbußen gegenüber *Nordthüringen* im Mittel aus „trockener“ und „feuchter“ Realisierung bei Winterweizen gleich groß, bei Wintergerste um 0,3 Prozentpunkte höher, bei Sommergerste um 0,2 Prozentpunkte höher, bei Winterraps um 1,5 Prozentpunkte höher und bei Silomais um 1,0 Prozentpunkte höher.

Auch in der Gruppe II kommt es bei Variante 1 in der Regel zu rein klimaänderungsbedingten Ertragseinbußen. Ausgenommen sind hier Wintergerste und Winterraps in der Planungsregion *Südwestthüringen*, wo im Mittel der „trockenen“ und „feuchten“ Realisierung mit 1,3% und 2,8% leichte Ertragszunahmen zu erwarten sind. Vergleicht man die beiden Planungsregionen der Gruppe II untereinander, sind in *Südwestthüringen* die zu erwartenden Ertragseinbußen gegenüber *Ostthüringen* im Mittel aus „trockener“ und „feuchter“ Realisierung bei Winterweizen um 1,3 Prozentpunkte geringer, bei Sommergerste um 1,4 Prozentpunkte geringer und bei Silomais um 1,8 Prozentpunkte geringer.

Vergleicht man die Auswirkungen der zu erwartenden Klimaveränderungen auf den Ertrag unter Berücksichtigung verschiedener Ertragstrends (Varianten 2 bis 4), dann ist bei den Varianten 2 und 3 in allen Planungsregionen und bei allen betrachteten Fruchtarten mit einem Ertragszuwachs zu rechnen, ausgenommen in der Planungsregion *Nordthüringen* bei Sommergerste im Fall der „trockenen“ Realisierung.

Bei Variante 4 ist in allen Planungsregionen bei Winterweizen, Wintergerste und bei Silomais ebenfalls mit einem Ertragszuwachs zu rechnen. Bei Silomais ist in allen Planungsregionen bei Variante 4 ein Ertragsrückgang zu erwarten. Unabhängig von „trockener“ oder „feuchter“ Realisierung ist bei Sommergerste nur in *Mittelthüringen* mit einem Ertragsrückgang zu rechnen, sonst in den drei restlichen Planungsregionen nur bei der „trockenen“ Realisierung. In allen anderen Fällen ist bei Sommergerste ebenfalls mit einem Ertragszuwachs zu rechnen, der aber im Vergleich zu den anderen Getreidearten nicht so deutlich ausfällt.

9 Zusammenfassende Einschätzung

Zusammenfassend kann abgeleitet werden, dass sich das Klima auf der Basis der Klimaprojektionen WETTREG 2010 (Emissionsszenario A1B) im Freistaat Thüringen zunächst bis 2050 nur relativ geringfügig ändern wird. Die daraus resultierenden rein klimaänderungsbedingten Ertragseinbußen werden für die landwirtschaftlichen Hauptfruchtarten im Zeitraum bis 2050 voraussichtlich nicht sehr gravierend ausfallen. Im Mittel werden Sommerungen stärker von den Ertragseinbußen betroffen sein als Winterungen, denn die Sommerungen sind aufgrund der zu erwartenden Klimaentwicklungen mit einem größeren Anbaurisiko verbunden, schon beginnend mit er-

schweren Bedingungen für eine ordentliche Bestandsetablierung. Unter Berücksichtigung der auch weiterhin zu erwartenden Fortschritte in der Pflanzenzüchtung und im Agro-Management wird es aber auch bis 2050 insgesamt noch zu Ertragssteigerungen kommen, in Abhängigkeit von der Fruchtart unterschiedlich in der Höhe. Die Ertragssteigerungen werden aber nicht mehr die bisherigen Wachstumsraten erreichen. Die sich durch ansteigende Temperaturen bis 2050 verlängernde Vegetationsperiode kann durch Fruchtarten wie Silomais und Zuckerrüben für eine erhöhte Biomassebildung besser genutzt werden.

Die zu erwartenden Ertragsveränderungen der hier betrachteten Fruchtarten werden im Freistaat Thüringen territorial unterschiedlich ausfallen. Dabei sind bei den bis 2050 ansteigenden Temperaturen und den wahrscheinlich häufiger werdenden Frühlings- und Sommer-Trockenheiten die Anbauregionen im Vorteil, die eine höhere Niederschlagsversorgung aufweisen, denn Hauptursache für die rein klimaänderungsbedingt rückläufigen Erträge wird in erster Linie der Wassermangelstress sein. Daher werden die Anbauregionen auf den Verwitterungsböden bis 2050 wahrscheinlich eine positivere Ertragsentwicklung aufweisen als z. B. die Anbauregionen auf den *Lößböden der Ackerebene*.

Die bei allen hier berücksichtigten Fruchtarten bis 2050 leicht zunehmende Ertragsvarianz, die sich in allen hier betrachteten Gebietskulissen wiederfindet, weist auf eine generelle Zunahme des Ertrags- und Ernterisikos und damit auf eine leicht abnehmende Ertragsstabilität hin. Die Ertragsschwankungen zwischen den Einzeljahren werden im Mittel wahrscheinlich ansteigen.

Aus all den Ergebnissen bis 2050 kann geschlussfolgert werden, dass die Vorzüglichkeit der einzelnen hier betrachteten landwirtschaftlichen Hauptfruchtarten im allgemeinen erhalten bleiben wird und daraus keine grundlegende Verschiebung der Anbaueignung untereinander abgeleitet werden kann.

Abschließend muss hinsichtlich des für die Ertragsabschätzungen verwendeten Modells YIELDSTAT darauf hingewiesen werden, dass es mit YIELDSTAT nur möglich ist, mittlere Extremereignisse bei den Klimaveränderungen bis 2050 in ihrer Ertragswirkung zu berücksichtigen, heftige lokal begrenzte Gewitterniederschläge und Hagelereignisse sowie Auswinterungsschäden können hinsichtlich ihrer Ertragswirksamkeit nur bedingt abgebildet werden.

Bedingt durch eine ständige Weiterentwicklung der globalen Klimamodelle, eine zeitangepasste Neuausrichtung bzw. Adaptation der Emissionsszenarien, eine immer besser aufgelöste Klimadatenregionalisierung, zukünftig ständig neue, verbesserte Sortenspektren und weitere Fortschritte in Anbautechnologie und Agro-Management wird für die Ableitung belastbarer Empfehlungen zur Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel empfohlen, eine Studie zur Ertragsleistung unter Klimawandel aller fünf Jahre durchzuführen.

10 Danksagung

Die vorliegende Studie zur „Regionaldifferenzierten Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge von wichtigen Fruchtarten im Freistaat Thüringen mittels Ertragssimulation mit YIELDSTAT“ entstand im Institut für Landschaftssystemanalyse des ZALF Müncheberg unter Nutzung von Elementen aus dem Informations- und Entscheidungsunterstützungssystem *LandCaRe-DSS* (Wenkel et al., 2010). Für die schnelle und unbürokratische Bereitstellung von Daten aus den Landesversuchsstationen der TLL, von Wetter- und Klimadaten des Freistaates Thüringen sowie von Daten zur kreisbezogen langjährigen Ertragsentwicklung in Thüringen

sei an dieser Stelle den Herren Christian Guddat, Herbert Michel und Dr. Walter Peyker von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft gedankt.

Gedankt sei an dieser Stelle auch Herrn Joachim Kiesel, Frau Karin Luzi, Frau Karin Groth und Frau Carola Voigt vom Institut für Landschaftssystemanalyse des ZALF Müncheberg für die Aufbereitung und Bereitstellung der für die regionalen Simulationen notwendigen MMK-Karten und sonstigen Karten-Informationen für den Freistaat Thüringen.

Der Dank der Autoren dieser Studie geht aber auch an Herr Dr. Armin Vetter, dem amtierenden Präsidenten der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, für seine strategisch administrative Unterstützung sowie an alle hier nicht genannten Mitarbeiter des Leibniz-Zentrums für Agrarlandschaftsforschung Müncheberg und der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, die direkt und indirekt zum Gelingen dieser Studie beigetragen haben.

11 Literatur

- Adler, G. (1987): Zur mesoskaligen Kennzeichnung landwirtschaftlich genutzter Standorte von Pflanzenbaubetrieben.- Z. Meteorologie 37, 1987, S. 291-298.
- Agrarmeteorologischer Monatsbericht (2002a): Florian bescherte ungemütliches Maiwetter, Niederschläge verhinderten zeitweise Heuwerbung. Agrarmeteorologischer Monatsbericht für Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen. Jg. 2002 Nr. 5, 2 S.
- Agrarmeteorologischer Monatsbericht (2002b): Neben Hitzewelle gehörten ein Tornado, Starkregen, Hagelschlag sowie Blitz und Donner zum Repertoire des Brachmondes. Agrarmeteorologischer Monatsbericht für Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen. Jg. 2002 Nr. 6, 2 S.
- Agrarmeteorologischer Monatsbericht (2002c): Regentief „Claudia“ bereitete Landwirten Verdruss. Agrarmeteorologischer Monatsbericht für Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen. Jg. 2002 Nr. 7, 2 S.
- Agrarmeteorologischer Monatsbericht (2002d): Tiefdruck-Ladies „Ilse“ und „Jacky“ leiteten Unwetterkatastrophe ein – Der Augustflut folgte nach Mariä Himmelfahrt die Augustglut – Erntemond brachte viele Landwirte in Existenznot. Agrarmeteorologischer Monatsbericht für Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen. Jg. 2002 Nr. 8, 2 S.
- Brisson, N.; Gate, P.; Gouache, D.; Charmet, G.; Oury, F.-X.; Huard, F. (2010): Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. Field Crops Research, Volume 119, Issue 1, 201-212.
- CO2SCIENCE (2010): Plant Dry Weight (Biomass) Responses to Atmospheric CO2 Enrichment. http://www.co2science.org/data/plant_growth/dry/dry_subject.php (Zugriff: 10/2010).
- Chmielewski, F.-M., (2003): Phenology and Agriculture (chapter 7). In: Schwartz, M.D. (ed.): Phenology: An Integrative Environmental Science. Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, pp. 505-522.
- DBV (2010): Deutscher Bauernverband zieht magere Erntebilanz 2010 – Präsident Kliem: „Wetter führte zu Zitter- und Verlustpartie“.
<http://www.bauernverband.de/index.php?redid=340548> .
- Finger, R. (2008): „Impacts of Agricultural Policy Reforms on Crop Yields“, EuroChoices, Volume 7, Issue 3, 24-25.

- Franke, J.; Bernhofer, Ch.; Köstner (2010): Vorsorge und Gestaltungspotenziale in ländlichen Räumen unter regionalen Wetter- und Klimaänderungen (LandCaRe 2020) – Teilprojekt 2.1: LandCaRe – Klimadatenbank. Forschungs-Abschlußbericht: BMBF 01 LS 05107, Technische Universität Dresden, Professur für Meteorologie, Selbstverlag, Dresden, 29 S.
- Guddat, C. (2011a): Ertragsfortschritt durch Züchtung und Agromanagement (ohne Umwelteinflüsse) bei Getreide, Raps und Mais in der Praxis in Thüringen. Persönliche Mitteilung.
- Guddat, C. (2011b): Kreisstatistik zu Erträgen landwirtschaftlicher Fruchtarten für den Zeitraum 1963-2010 bezogen auf die gegenwärtige Landkreisstruktur. Persönliche Mitteilung.
- Goudriaan, J.; van Laar, H.H. (1978): Calculation of daily totals of the gross CO₂ assimilation of leaf canopies. *Neth. J. agric. Sci.* 26, p. 373-382.
- Kachel, K.; Roth, D. (1990): Beziehungen zwischen Zusatzwasser und Ertrag – Ableitung und Anwendung effizienter Berechnungsmengen. *Gartenbau* 37(1990)4: 107-109.
- Kersebaum, K. C.; Lorenz, K.; Reuter, H.I.; Wendroth, O.; Giebel, A.; Schwarz, J. (2003): Site specific nitrogen fertilisation recommendations based on simulation. In: Stafford, J. & A. Werner [eds.]: *Precision Agriculture. Proc. 4th European Conference on Precision Agriculture*, Berlin, Wageningen Academic Publishers, Wageningen, 309 - 314.
- Kindler, R. (1992): *Ertragsschätzung in den neuen Bundesländern*. Verlag Pflug und Feder GmbH, St. Augustin, 230 S.
- Klein, R. (2005): *Algorithmische Geometrie: Grundlagen, Methoden, Anwendungen*, Springer Verlag, 426 S.
- Lieberoth, I.; Adler, G.; Schmidt, I. (1977): Die Nutzung der Gemeindedatei des Datenspeichers Boden in der Landwirtschaft. – *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 21, S. 687-697.
- Manderscheid, R.; Weigel, H.J.; Erbs, M.; Nozinski, E. (2010): Rückkoppelungseffekte zwischen zukünftigen atmosphärischen CO₂-Konzentrationen und Wasserhaushaltsgrößen in Agrarökosystemen. Forschungs-Abschlußbericht: BMBF 01 LS 05108, Institut für Biodiversität, vTI Braunschweig, Selbstverlag, Braunschweig, 13 S.
- Michel, H. (2012): Festlegung einer feuchten und trockenen Realisierung im Rahmen von WETTREG 2010. Persönliche Mitteilung.
- Michel, H.; Prüfer, U. (2011): *Witterungsbericht 2010 – Eine Datenanalyse ausgewählter Standorte Thüringens*. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), Jena, 50 S., <http://www.tll.de/ainfo/pdf/wett0911.pdf>.
- Mirschel, W.; Schultz, A.; Wieland, R.; Lutze, G.; Luzi, K. (2006a): Modellgestützte Analyse ausgewählter Größen des Landschaftshaushaltes am Beispiel der Agrarfläche der Ziethener Moränenlandschaft. In: Lutze, G.; Schultz, A.; Wenkel, K.-O. (Hrsg.): *Landschaften beobachten, nutzen und schützen – Landschaftsökologische Langzeit-Studie in der Agrarlandschaft Chorin 1992-2006*. G.B. TeubnerVerlag, Wiesbaden, 2006, S. 164-195.
- Mirschel, W.; Eulenstein, F.; Willms, M.; Wieland, R.; Schindler, U.; Wenkel, K.-O. (2007): Model-based climate change impact assessment for arable land in a moraine landscape of North-East Germany and adaptation possibilities. In: Parker, C.; Skerratt, S.; Park, C.; Shields, J. (eds.): *Environmental and Rural Sustainability through ICT (Proceedings of the 6th Biennial Conference of the European Federation of IT in Agriculture - EFITA/WCCA 2007- (2nd – 5th July 2007, Glasgow, UK))*, p. 1-6, Glasgow (Glasgow Caledonian University), Proceedings on CD (ISBN-10: 1-905866-10-0) Online im Internet: <http://www.efita.net/?d=6147> (Environment – Climate).

- Mirschel, W.; Wenkel, K.-O. (2010): Modell ZUWABE zur standortspezifischen Berechnung des mittleren Zusatzwasserbedarfs landwirtschaftlicher Fruchtarten im LandCaRe-DSS (Modellbeschreibung). In: Wenkel, K.-O.; Berg, M.; Wieland, R.; Mirschel, W.: Modelle und Entscheidungsunterstützungssystem zur Klimafolgenabschätzung und Ableitung von Adaptionsstrategien der Landwirtschaft an veränderte Klimabedingungen (AGROKLIM-ADAPT) - Decision Support System (DSS). Forschungs-Abschlußbericht: BMBF 01 LS 05104, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF), Selbstverlag, Münchenberg, S. A8/1-A8/9.
- Mirschel, W.; Wieland, R.; Wenkel, K.-O. (2006b): Spatial Analysis and Modeling Tool V2.0 – applications to the landscape indicators crop yield and crop coverage. In: Studzinski, J.; Hryniewicz, O. (eds.): Eco-Info and Systems Research. Series: Systems Research (ed.: J. Gutenbaum), Polish Academy of Sciences/Systems Research Institute, Warsaw 2006, Vol. 52, p. 29-42.
- Mirschel, W.; Wieland, R.; Wenkel, K.-O. (2003): Bedeutung der Modellwahl bei der Ertrags-schätzung - Bauernschläue vs. Agrarwissenschaft-. In: Gnauck, A.(Hrsg.): Theorie und Modellierung von Ökosystemen: Workshop Kölpinsee 2001. (Berichte aus der Umweltinformatik), Shaker Verlag Aachen, 2003, S. 162-186.
- Mirschel, W.; Wenkel, K.-O.; Wieland, R.; Luzi, K.; Albert, E.; Köstner, B. (2009): Klimawandel und Ertragsleistung: Auswirkungen des Klimawandels auf die Ertragsleistung ausgewählter landwirtschaftlicher Fruchtarten im Freistaat Sachsen -eine landesweite regionaldifferenzierte Abschätzung-. In: SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND GEOLOGIE (Hrsg.): Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG Sachsen), Heft 28/2009, 61 S., Dresden (ISSN: 1867-2868), Online im Internet: http://www.smul.sachsen.de/lfl/publikationen/jsp/inhalt.jsp?seite=detail&pub_id=4245.
- Oleson, J.; Trnka, M.; Kersebaum, K.; Skelvag, A.; Seguin, B.; Peltonen-Sainio, P.; Rossi, F.; Kozyra, J.; Micale, F. (2011): "Impacts and adaption of European crop production systems to climate change", European Journal of Agronomy, Volume 34, 96-112.
- LfULG (Sächsisches Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und Geologie) (Hrsg.) (2009): Klimawandel und Landwirtschaft - Fachliche Grundlagen für die Strategie zur Anpassung der sächsischen Landwirtschaft an den Klimawandel, Schriftenreihe des LfLUG, 148 S.
- Roeckner, E., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kornblueh, L., Manzini, E., Schlese, U., Schulzweida, U. (2004): The atmosphere general circulation model ECHAM5. Part 2: Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution. MPI-Report 354, Hamburg: Max-Planck-Institute for Meteorology.
- Roßberg, D.; Michel, V.; Graf, R.; Neukampf, R. (2007): Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland. Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes 59 (7): 155-161.
- Roth, D.; Kachel, K. (1989): Zusatzwasser-Ertragsbeziehungen von Winterweizen, Sommergerste, Zuckerrüben, Kartoffeln und Welschem Weidelgras auf drei Standorten mit unterschiedlichem Bodenwasserbereitungsvermögen. Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkunde 33: 393-403.
- Schmidt, R., Diemann, R. (Eds.) (1991): Erläuterungen zur Mittelmaßstäbigen Landwirtschaftlichen Standortkartierung (MMK). FZB Münchenberg, Münchenberg.
- Spekat, A., Kreienkamp, F., Enke, W. (2010): An impact-oriented classification method for atmospheric patterns. In: Physics and Chemistry of the Earth 35:352-359.
- Supit, I.; van Diepen, C.; de Witt, A.; Kabat, P.; Baruth, B.; Ludwig, F. (2010): "Recent changes in climatic yield potential of various crops in Europe", Agricultural Systems, Volume 103, 683-694.

- Teichhardt, R.; Roth, D.; Zenner, I. (1984): Langjährige Untersuchungen zur Ertragswirksamkeit der Beregnung unter Produktionsbedingungen. *Feldwirtschaft* 25(1984)5: 195-198.
- TMLNU(Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt) (2009): Bericht zur Entwicklung der Landwirtschaft in Thüringen 2009 (Berichtsjahr 2007 und 2008). <http://www.thueringen.de/de/publikationen/pic/pubdownload1013.pdf>.
- TMLNU(Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt) (2011): Bericht zur Entwicklung der Landwirtschaft in Thüringen 2010 (Berichtsjahr 2009-2010). <http://www.thueringen.de/de/publikationen/pic/pubdownload1232.pdf>
- VR Agrar (2010): Deutscher Bauernverband zieht magere Erntebilanz 2010 – Präsident Kliem: „Wetter führt zu Zitter- und Verlustpartie“, *VR Agrar* 2010(10):1-2.
- Weigel, H.J.; Manderscheid, R.; Pacholski, A.; Burkart, S.; Jansen, G. (2005): Mehr CO₂ in der Atmo-sphäre: Prima Klima für die Landwirtschaft?. *ForschungsReport - Zeitschrift des Senats der Bundesforschungsanstalten, Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Land-wirtschaft*, 1/2005; S. 14-17.
- Wendling, U.; Schellin, H.-G.; Thomä, M. (1991): Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für die Zwecke der agrarmeteorologischen Beratung. *Z. f. Meteorologie* 41, S. 486-474.
- Wenkel, K.-O. ; Berg, M. ; Wieland, R. ; Mirschel, W. (2010): Vorsorge und Gestaltungspotenziale in ländlichen Räumen unter regionalen Wetter- und Klimaänderungen (LandCa-Re 2020) PT-DLR 01 LS 05104 : Modelle und Entscheidungsunterstützungssystem zur Klimafolgenabschätzung und Ableitung von Adaptationsstrategien der Landwirtschaft an veränderte Klimabedingungen (AGROKLIM-ADAPT) ; Teilprojekt 6 (DSS) ; Schlußbericht ; Projektlaufzeit 01.11.2006-31.03.2010 51 S.; Müncheberg (Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung).
- Wiggering, H.; Eulenstein, F.; Mirschel, W.; Willms, M.; Dalchow, C.; Augustin, J. (2008): The Environmental Effects of Global Changes on Northeast Central Europe in the Case of Non-Modified Agricultural Management. In: *Landscape Online* 4 (2008), pp.1-17.