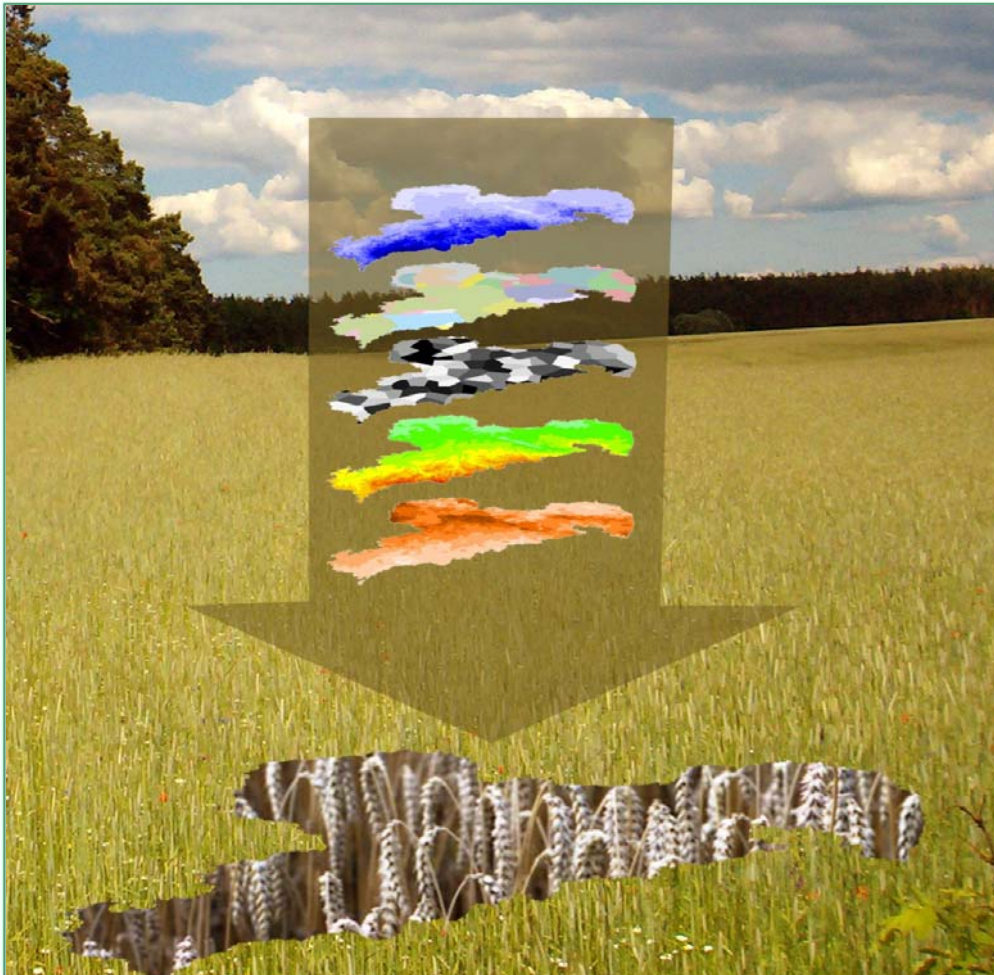




Das Lebensministerium



Klimawandel und Ertragsleistung

Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Heft 28/2009

Freistaat  Sachsen

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

**Auswirkungen des Klimawandels auf die
Ertragsleistung ausgewählter landwirtschaftlicher Fruchtarten im Freistaat Sachsen
- eine landesweite regionaldifferenzierte Abschätzung -**

Dr. Wilfried Mirschel, Prof. Dr. Karl-Otto Wenkel, Dr. Ralf Wieland, Karin Luzi
Dr. habil. Erhard Albert
PD Dr. Barbara Köstner

in Kooperation mit:



BMBF-Verbundprojekt LandCaRe 2020

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbetrachtung zur Ertragsbildung.....	1
2	Aufgabenstellung.....	2
3	Vorgehensweise.....	3
4	WEREX-Klimaszenarios	5
5	Modell YIELDSTAT.....	13
5.1	Modellbeschreibung	13
5.2	Datenregionalisierung	20
5.3	Annahmen für die Simulationen	23
5.4	Regionalisierungstool für die Simulationen	24
6	Modellvalidierung mit realen Wetter- und Ertragsdaten.....	24
6.1	Versuchsstationen des LfULG.....	24
6.2	Ackerschläge des Nitrat-Dauertestflächen-Netzes.....	30
6.3	BEFU-Anwenderbetriebe	33
6.4	Ertragsstatistik auf Landkreis- und Landesebene	36
6.4.1	Landkreisebene.....	38
6.4.2	Landesebene.....	42
7	YIELDSTAT-Modellvergleich: Realwetterdaten vs. WEREX-A1B-Daten.....	44
8	Klimaszenario-Simulationen mit WEREX-A1B-Daten – Ergebnisse und Diskussion	49
8.1	Freistaat Sachsen	50
8.2	Boden-Klima-Regionen	55
9	Literatur	60

1 Vorbetrachtung zur Ertragsbildung

In der Landwirtschaft spielt der Ertrag von auf dem Ackerland angebauten Kulturen für die Betriebsökonomie der Landwirtschaftsbetriebe eine entscheidende Rolle, ist er doch unter Berücksichtigung von Ertragsstabilität und Ertragsqualität in der monetären Umrechnung eine der Hauptkomponenten bei der Berechnung des Deckungsbeitrages. Unter Umständen hängt davon das gesamte Betriebsergebnis ab.

Der Ertrag einer Fruchtart ist das Resultat einer komplexen Verknüpfung vieler Komponenten und Größen (Abbildung 1).



Abbildung 1: Übersicht über Ertragsleistung beeinflussende Faktorkomplexe beim Anbau landwirtschaftlicher Fruchtarten

Im Zentrum steht die Pflanze, d. h. die Fruchtart selbst mit ihren vielen 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, Pilze und Krankheiten an und in den Pflanzen können die Ertragsbildung sowie die Ertragsqualität landwirtschaftlicher Kulturen 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 Wettergrößen 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 verschieben. Aber auch die gegenwärtig stete Zunahme des atmosphärischen CO₂-Gehaltes hat Einfluss auf die Ertragsbildung sowohl in qualitativer als auch in quantitativer 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 alle landwirtschaftlichen Ackerstandorte im Freistaat Sachsen sollen 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 gewonnenen Ergebnisse flossen in die vom Sächsischen Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL) erarbeitete „Strategie zur Anpassung der sächsischen Landwirtschaft an den Klimawandel“ ein.

Die Abschätzungen der Ertragsentwicklungen bzw. der Ertragsänderungen soll auf der Grundlage des Klimaszenarios WEREX IV A1B mit den Realisierungen „feucht“ und „trocken“ für die Fruchtarten Winterweizen, Winterroggen, Wintergerste, Winterraps und Silomais mit dem statistisch orientierten Hybridmodell YIELDSTAT zur Ertragsabschätzung von unter Praxisbedingungen angebauten landwirtschaftlichen Fruchtarten erfolgen.

Für die Abschätzung bis 2050 zu erwartender klimabedingter Ertragsveränderungen sollen die beiden 30-jährigen Zeiträume 1976 - 2005 und 2021 - 2050 die Grundlage bilden.

Dem voraus gehen soll eine Adaptation des Modells YIELDSTAT an die Anbaubedingungen des Freistaates Sachsen sowie eine Modellvalidierung unter Verwendung von Daten aus den letzten 10 Jahren, beginnend bei Daten der Versuchsstationen des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) bis hin zu statistischen Ertragsdaten auf Kreis- bzw. Landesebene. Zusätzlich soll für den vergangenen Zeitraum 1996 - 2006 noch ein Vergleich der Ertragsabschätzungen realisiert werden, die zum einen basieren auf den realen Wetterdaten und zum anderen auf den simulierten WEREX-A1B-Daten, wobei auch hier die WEREX-Realisierungen „feucht“ und „trocken“ zu berücksichtigen sind.

3 Vorgehensweise

Die Realisierung der Ertragsschätzungen zu ausgewählten landwirtschaftlichen Fruchtarten erfolgt in der Reihenfolge der im Folgenden aufgeführten Schritte:

Schritt 1:

Überprüfung/Anpassung des Modells YIELDSTAT für die Standort- und Anbaubedingungen verschiedener Versuchsstandorte des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

In diesem Schritt erfolgt eine Modellüberprüfung und -anpassung unter Nutzung der konkreten Standort- und realen Wetterdaten der Versuchsstandorte Pommritz, Forchheim, Nossen, Köllitsch und Spröda des LfULG, die die verschiedenen Boden-Klima-Regionen im Freistaat Sachsen repräsentieren (Abbildung 2).

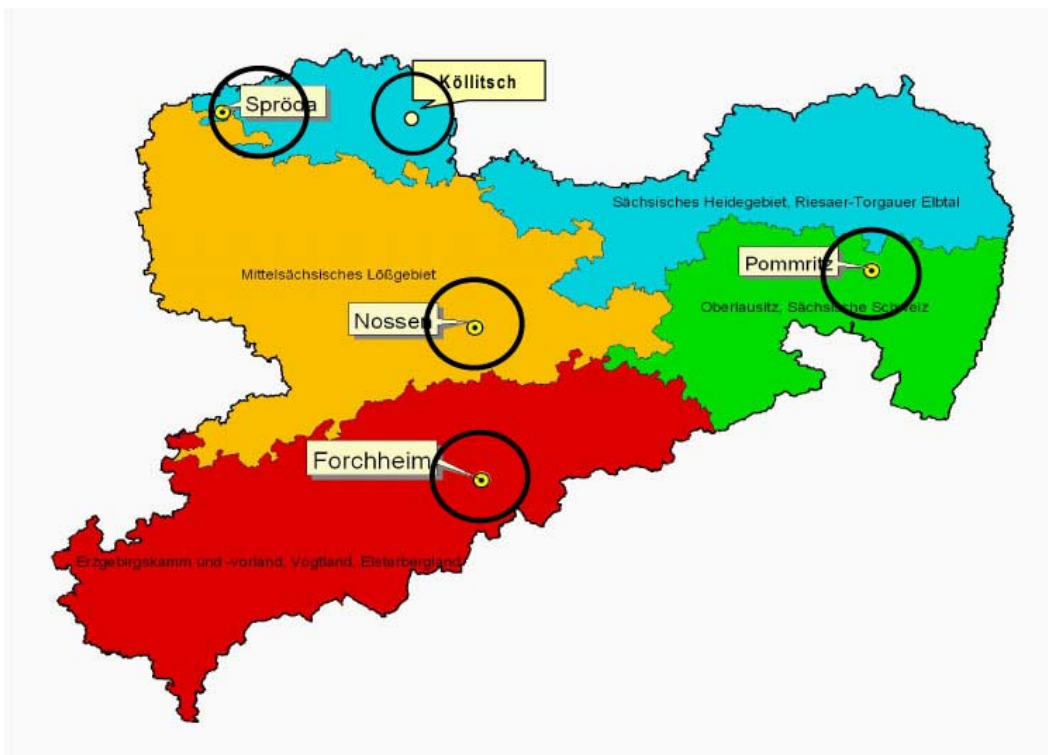


Abbildung 2: Berücksichtigte Versuchsstandorte und deren Lage in den Boden-Klima-Regionen

Schritt 2:

Validierung des Modells YIELDSTAT auf Schlagenebene unter Nutzung von Nitrat-Dauertestflächen-Daten aus der Praxis

Nitrat-Dauertestflächen-Daten des Freistaates Sachsen liegen für die Jahre seit 1998 (zeitlich und räumlich unterschiedlich dicht) in flächenscharfer Form vor. Da eine möglichst schlagnahe Zuordnung von realen Wetterdaten zu den Nitrat-Dauertestflächen aufgrund fehlender regionaler Wetterinformationen nicht möglich ist, erfolgt in diesem Schritt die Modellüberprüfung exemplarisch nur unter Verwendung der schlagscharfen Nitrat-Dauertestflächen-Daten für den Kreis Torgau-Oschatz und für den Weißeritzkreis. Die realen Wetterinformationen für die entsprechenden Flä-

chen aus dem Landkreis Torgau-Oschatz stammen dabei von der Station Köllitsch und für den Weißeritzkreis von der Station Nossen.

Schritt 3:

Validierung des Modells YIELDSTAT auf Betriebs- bzw. Gemeindeebene unter Nutzung von BEFU-Daten des Freistaates Sachsen

Die Daten von den BEFU (Programm zur Düngbedarfsermittlung) anwendenden Betrieben in Sachsen liegen für den Zeitraum 1998 - 2003 gemeindegerecht vor. Da aber eine gemeindegerechte Zuordnung von realen Wetterdaten zu den BEFU anwendenden Betrieben aufgrund fehlender regionaler Wetterinformationen nicht möglich ist, erfolgt in diesem Schritt die Modellüberprüfung ebenfalls nur unter Verwendung der BEFU-Daten gemeindegerecht für den Kreis Torgau-Oschatz und für den Weißeritzkreis (Abbildung 3). Die realen Wetterinformationen für die entsprechenden BEFU anwendenden Betriebe aus dem Kreis Torgau-Oschatz stammen dabei von der Station Köllitsch und für den Weißeritzkreis von der Station Nossen.

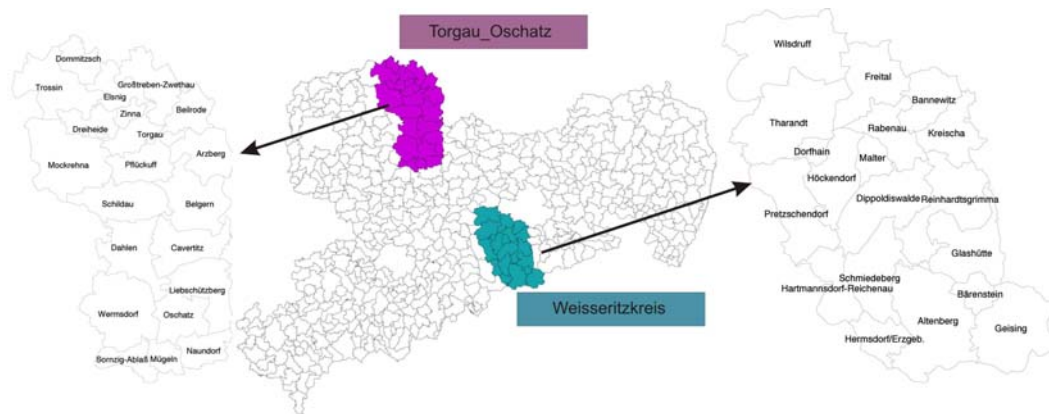


Abbildung 3: Lage der Landkreise und Gemeinden für die Modellüberprüfung auf der Grundlage von Nitrat-Dauertestflächen bzw. BEFU anwendenden Betrieben

Schritt 4:

Validierung des Modells YIELDSTAT auf Kreis- und Landesebene unter Nutzung von Ertragsdaten aus der Kreis- bzw. Landesstatistik

In diesem Schritt erfolgt eine Überprüfung des Modells YIELDSTAT anhand der kreis- bzw. sachsenbezogenen Werte aus der Ertragsstatistik. Auf dem Kreisniveau werden stellvertretend die Kreise Torgau-Oschatz und der Weißeritzkreis (Abbildung 3) für einen Vergleich herangezogen. Dabei werden für den Kreis Torgau-Oschatz die Wetterdaten der Station Köllitsch verwendet und für den Weißeritzkreis die Wetterdaten der Station Nossen. Die mittleren Erträge für den Freistaat Sachsen werden flächengewichtet berechnet aus den Ertragswerten für die einzelnen Boden-Klima-Regionen (Abbildung 2). Für Ertragsschätzungen in der Boden-Klima-Region „Oberlausitz, Sächsische Schweiz“ werden die Wetterdaten der DWD-Station Görlitz verwendet, für das „Mittelsächsische Lössgebiet“ die der DWD-Station Chemnitz und für das Gebiet „Erzgebirgskamm und -vorland, Vogtland, Elsterbergland“ die der DWD-Station Marienberg. Die Boden-Klima-Region „Sächsisches Heidegebiet, Riesaer-Torgauer Elbtal“ wurde aufgrund der enormen Ost-West-

Ausdehnung und eines hier herrschenden Klimagradienten in zwei Gebiete unterteilt, in einen Westteil mit der zugeordneten DWD-Station Leipzig und einen Ostteil mit der zugeordneten DWD-Station Cottbus. Diese Zuordnung ist mit Absprache des Institutes für Hydrologie und Meteorologie der TU Dresden getroffen worden und gilt auch für alle weiteren regionalen Simulations- und Szenariorechnungen.

Schritt 5:

Vergleich der mit dem Modell YIELDSTAT geschätzten Erträge für den Zeitraum 1996 - 2006, zum einen berechnet mit realen Wetterdaten und zum anderen berechnet mit den WEREX-A1B-Daten

Der Vergleich wird für jede Boden-Klima-Region mit den entsprechend zugeordneten DWD-Stationen durchgeführt. Bei den WEREX-A1B-Daten werden die beiden Realisierungen „feucht“ und „trocken“ berücksichtigt.

Schritt 6:

Simulations- und Szenariorechnungen für den gesamten Freistaat Sachsen sowie die abgegrenzten Boden-Klima-Regionen mit WEREX-A1B-Daten bis 2050

In diesem Schritt wird nur auf die WEREX-A1B-Daten zurückgegriffen, wobei die Realisierungen „feucht“ und „trocken“ berücksichtigt werden. Für eine Aussage zu den klimabedingten Ertragsänderungen auf Ackerland werden die Zeitperioden 1976 - 2005 und 2021 - 2050 berücksichtigt. Für den ersten Zeitraum wird dabei von einem Niveau der Agro-Technologie und der Züchtung ausgegangen, das dem des Jahres 2004 entspricht (Absprache mit dem LfULG). Die Szenariorechnungen werden dabei sowohl mit und ohne Berücksichtigung der CO₂-Wirkung als auch mit und ohne Berücksichtigung des sich aus Technologie- und Züchtungsfortschritt ergebenden Trends realisiert. Alle Berechnungen werden sowohl für den gesamten Freistaat Sachsen als auch für die einzelnen Boden-Klima-Regionen durchgeführt.

4 WEREX-Klimaszenarios

Um im Rahmen der durch das SMUL zu erarbeitenden Gesamtstudie (Strategie zur Anpassung der sächsischen Landwirtschaft an den Klimawandel) eine Konformität zu den anderen Klimawirkungsanalysen (u. a. zum Wasser und zum Boden) zu gewährleisten, wird auch bei den Klimaszenariorechnungen zur regionaldifferenzierten Ertragsabschätzung auf das mit der Regionalisierungsmethodik WEREX IV erstellte SRES-IPCC-Emissionsszenario A1B (WEREX-A1B-Szenario) zurückgegriffen. Ausgangspunkt dafür ist das entsprechende Emissionsszenario des globalen Klimamodells E-CHAM5.

Das WEREX-A1B-Szenario wurde in 10 Klimaszenarien realisiert. Aus den einzelnen Szenarien wurden unter Beachtung des Niederschlages drei Realisierungen abgeleitet, eine „feuchte“ (WEREX-A1B-FEU), eine „normale“ (WEREX-A1B-NOR) und eine „trockene“ (WEREX-A1B-TRO) Realisierung. Damit stehen für das WEREX-A1B-Szenario drei einheitlich modellierte Reihen für den Zeitraum von 1961 bis 2100 als Tageswerte zur Verfügung, die die wichtigsten Witterungsgrößen für die Beobachtungsstationen des DWD (Klimastationen, Niederschlagsmessstationen) im Freistaat Sachsen enthalten. Für die DWD-Klimastationen werden die täglichen Witterungsgrößen Lufttemperatur (Mittel, Minimum, Maximum), Niederschlag, Mittel der relativen Luftfeuchte, Luft-

druck, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer und Bedeckungsgrad bereitgestellt. Für die Stationen des Niederschlagsmessnetzes stehen lediglich die Niederschlagswerte zur Verfügung. Im Rahmen dieser Szenariorechnungen werden nur die beiden WEREX-Realisierungen „feucht“ (WEREX-A1B-FEU) und „trocken“ (WEREX-A1B-TRO) berücksichtigt, um auch Aussagen zur Schwankungsbreite bei den Klimaänderungsbedingten Ertragsauswirkungen zu ermöglichen.

Bezogen auf den gesamten Freistaat Sachsen gibt es sowohl für WEREX-A1B-FEU als auch für WEREX-A1B-TRO bei der mittleren jährlichen Lufttemperatur im Vergleich der Perioden 1971 - 2000 und 2021 - 2050 einen Temperaturanstieg, der bei 1 K liegt. Dieser Wert ist aber über das Jahr nicht zeitkonstant, sondern in den einzelnen Jahreszeiten unterschiedlich ausgeprägt. Im Winter ist der Temperaturanstieg mit 1,6 K am größten und im Frühjahr mit 0,6 K (WEREX-A1B-FEU) bzw. 0,3 K (WEREX-A1B-TRO) am geringsten (vgl. Tabelle 1).

In Sachsen sind die Temperaturanstiege nicht nur jahreszeitabhängig, sondern auch regional sehr unterschiedlich ausgeprägt. In den Klimastationen Görlitz, Cottbus, Leipzig, Marienberg und Chemnitz, die beispielhaft für die in Betracht genommenen Boden-Klima-Regionen stehen, schwanken die Anstiege in der Jahrestemperatur zwischen 0,93 K und 1,05 K bei der Realisierung WEREX-A1B-FEU und zwischen 0,97 K und 1,1 K bei der Realisierung WEREX-A1B-TRO. Dabei sind in Chemnitz und Marienberg im Jahresmittel die größten Temperaturanstiege zu erwarten. Bezogen auf die Monate Dezember bis Februar sind in diesen fünf Stationen für WEREX-A1B-FEU Temperaturanstiege zwischen 1,6 K und 1,9 K zu erkennen und für WEREX-A1B-TRO zwischen 1,4 K und 2,0 K. In den Hauptwachstumsmonaten Mai bis Juli dagegen liegen in diesen Stationen für WEREX-A1B-FEU die Temperaturanstiege nur zwischen 0,6 K und 1,0 K und für WEREX-A1B-TRO zwischen 0,7 K und 1,0 K (Tabelle 2).

Tabelle 1: Änderung von Lufttemperatur und Niederschlag (1971 - 2000 vs. 2021 - 2050) als Mittel für den Freistaat Sachsen für die Realisierungen WEREX-A1B-FEU und WEREX-A1B-TRO

	Änderung 1971 - 2000 vs. 2021 - 2050	
	WEREX-A1B-FEU	WEREX-A1B-TRO
Lufttemperatur		
Frühjahr	+ 0,6 K	+ 0,3 K
Sommer	+ 1,1 K	+ 1,2 K
Herbst	+ 0,7 K	+ 1,0 K
Winter	+ 1,6 K	+ 1,6 K
Jahresmittel	+ 1,0 K	+ 1,0 K
Niederschlag		
Frühjahr	- 7,0 %	- 7,7 %
Sommer	- 10,1 %	- 11,5 %
Herbst	- 7,0 %	- 13,0 %
Winter	- 1,2 %	- 1,2 %
Jahressumme	- 6,8 %	- 8,7 %

Der Jahresniederschlag geht im Vergleich der beiden Perioden 1971 - 2000 und 2021 - 2050 im Landesdurchschnitt um 6,8 % (WEREX-A1B-FEU) bzw. um 8,7 % (WEREX-A1B-TRO) zurück. Auch hier gibt es starke jahreszeitliche Schwankungen. Während im Winter fast kein Rückgang zu erkennen ist (nur 1,2 %), liegen die im Sommer zu erwartenden Rückgänge beim Niederschlag bei 10,1 % (WEREX-A1B-FEU) bzw. 11,5 % (WEREX-A1B-TRO) (vgl. Tabelle 1). Ebenso wie bei der Temperatur gibt es auch beim Niederschlag starke regionale Unterschiede. Für Görlitz liegt für WEREX-A1B-TRO die Abnahme beim Jahresniederschlag bei 14,6 %, während sie für Chemnitz nur bei 6,7 % liegt. Betrachtet man die für das Pflanzenwachstum wichtigen Monate April bis Juni, zeigt sich regional auch hierfür ein sehr unterschiedlicher Rückgang im Niederschlag, der für die 5 betrachteten Klima-Stationen im Bereich zwischen 3,6 % (Chemnitz) und 22,5 % (Cottbus) liegt (Tabelle 2). Unabhängig von der WEREX-Realisierung weist die Station Chemnitz den größten Temperaturanstieg und den geringsten Niederschlagsrückgang auf.

In der Hauptwachstumsperiode landwirtschaftlicher Fruchtarten von April bis August fallen bei der WEREX-Realisierung WEREX-A1B-FEU die Niederschlagsänderungen in den Stationen Marienberg und Chemnitz im Vergleich zu den weiter östlich bzw. weiter nördlich gelegenen Stationen Görlitz, Cottbus und Leipzig mit unter 50 % der auf das gesamte Jahr bezogenen Veränderungen deutlich geringer aus (vgl. auch Abbildung 7). In den Stationen Görlitz, Cottbus und Leipzig betragen diese Veränderungen 70 %, 120 % und 80 % der jahresbezogenen Niederschlagsänderungen. Bei WEREX-A1B-TRO ist dies jedoch nicht so stark ausgeprägt (vgl. Abbildung 9).

Tabelle 2: Niederschlagssummen und mittlere Temperaturen für unterschiedliche Jahresabschnitte im Vergleich der Klimazeiträume 1976 - 2005 und 2021 - 2050 für die Stationen Görlitz, Cottbus, Chemnitz, Marienberg und Leipzig (WEREX-Realisierungen: WEREX-A1B-FEU, WEREX-A1B-TRO)

	WEREX-A1B-FEU			WEREX-A1B-TRO		
	1976 - 2005	2021 - 2050	Δ	1976 - 2005	2021 - 2050	Δ
Station Görlitz						
T (1-12)	8,27	9,20	+ 0,93	8,34	9,31	+ 0,97
N (1-12)	674	634	- 40	661	564	- 97
T (12-2)	-0,64	0,99	+ 1,63	-0,49	0,85	+ 1,36
T (5-7)	15,50	16,25	+ 0,75	15,5	16,23	+ 0,73
N (4-6)	163	164	+ 1	179	147	- 32
N (6-8)	238	209	- 29	224	188	- 36
Station Cottbus						
T (1-12)	9,12	10,08	+ 0,96	9,07	10,12	+ 1,05
N (1-12)	585	549	- 36	513	441	- 72
T (12-2)	0,30	1,98	+ 1,68	- 0,02	2,00	+ 2,02
T (5-7)	16,72	17,3	+ 0,58	16,43	17,21	+ 0,78
N (4-6)	163	152	- 11	142	110	- 32
N (6-8)	196	164	- 32	168	133	- 35
Station Chemnitz						
T (1-12)	7,97	9,02	+ 1,05	7,97	9,07	+ 1,10
N (1-12)	741	713	- 28	642	599	- 43
T (12-2)	- 0,51	1,43	+ 1,84	- 0,66	1,39	+ 1,73
T (5-7)	14,87	15,50	+ 0,63	14,60	15,50	+ 0,90
N (4-6)	206	199	- 7	176	170	- 6
N (6-8)	273	266	- 7	234	222	- 12
Station Marienberg						
T (1-12)	6,25	7,30	+ 1,05	6,38	7,47	+ 1,09
N (1-12)	848	810	- 38	815	733	- 82
T (12-2)	- 1,81	- 0,19	+ 1,62	- 1,54	- 0,10	+ 1,44
T (5-7)	12,82	13,79	+ 0,97	12,85	13,82	+ 0,98
N (4-6)	210	213	+ 3	214	190	- 24
N (6-8)	310	314	+ 4	291	266	- 25
Station Leipzig						
T (1-12)	9,53	10,51	+ 0,98	9,50	10,52	+ 1,02
N (1-12)	646	597	- 49	573	519	- 54
T (12-2)	0,96	2,72	+ 1,76	0,68	2,62	+ 1,94
T (5-7)	16,78	17,31	+ 0,53	16,47	17,26	+ 0,89
N (4-6)	176	157	- 19	159	153	- 6
N (6-8)	224	204	- 20	196	176	- 20

T (t_1 - t_2) – durchschnittliche Lufttemperatur (°C) im Zeitraum von Monat t_1 bis Monat t_2 ;

N (t_1 - t_2) - Niederschlagssumme (mm) im Zeitraum von Monat t_1 bis Monat t_2)

Für einen besseren Überblick ist in den Abbildungen 4 und 5 die regionale Verteilung der Lufttemperaturänderung (1971 - 2000 vs. 2021 - 2050) im Freistaat Sachsen für die Jahreszeiten Frühjahr, Sommer, Herbst und Winter dargestellt, zum einen für WEREX-A1B-FEU und zum anderen für WEREX-A1B-TRO. Bei der Änderung der Jahresmitteltemperatur gibt es zwischen den beiden WEREX-Realisierungen auch in der räumlichen Verteilung kaum Unterschiede, die in beiden Fällen überall bei 1 K liegen.

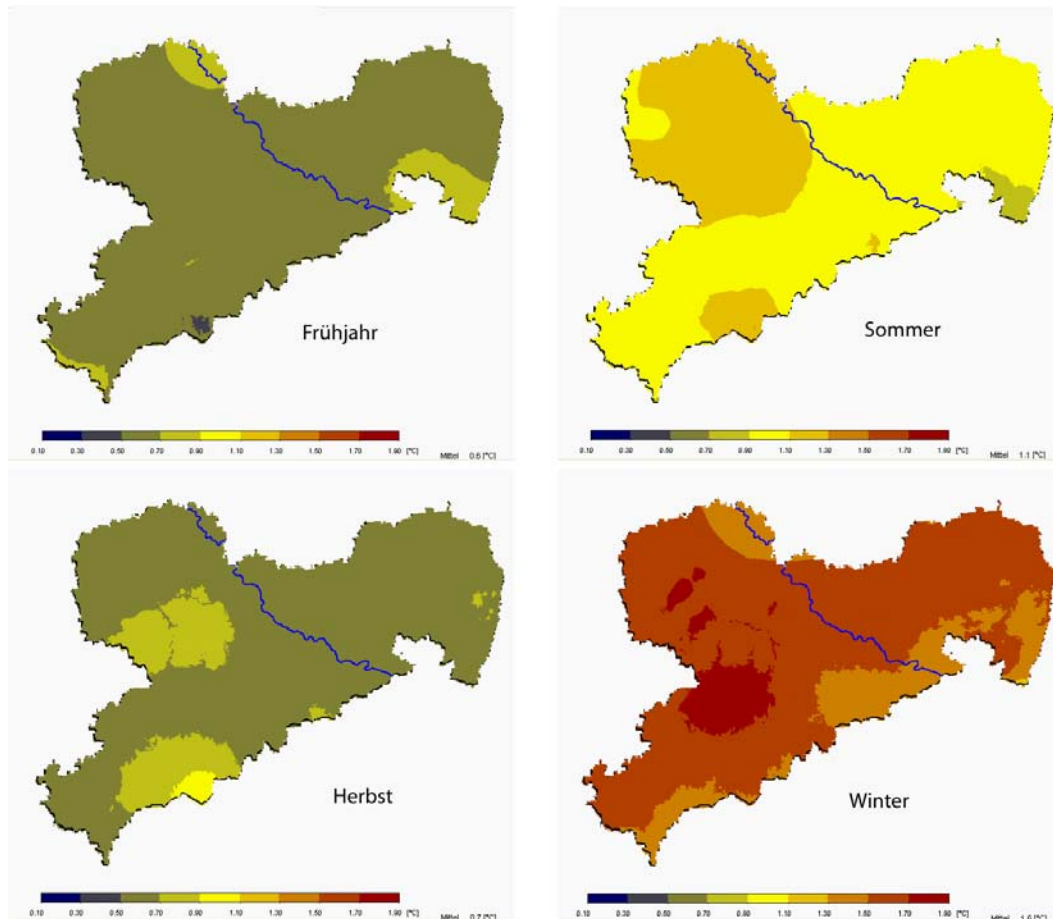


Abbildung 4: Änderung der Lufttemperatur (1971 - 2000 vs. 2021 - 2050) in ihrer regionalen Verteilung innerhalb des Freistaates Sachsen für die WEREX-Realisierung WEREX-A1B-FEU, unterteilt in die meteorologischen Jahreszeiten Frühjahr (3-5), Sommer (6-8), Herbst (9-11) und Winter (12-2)

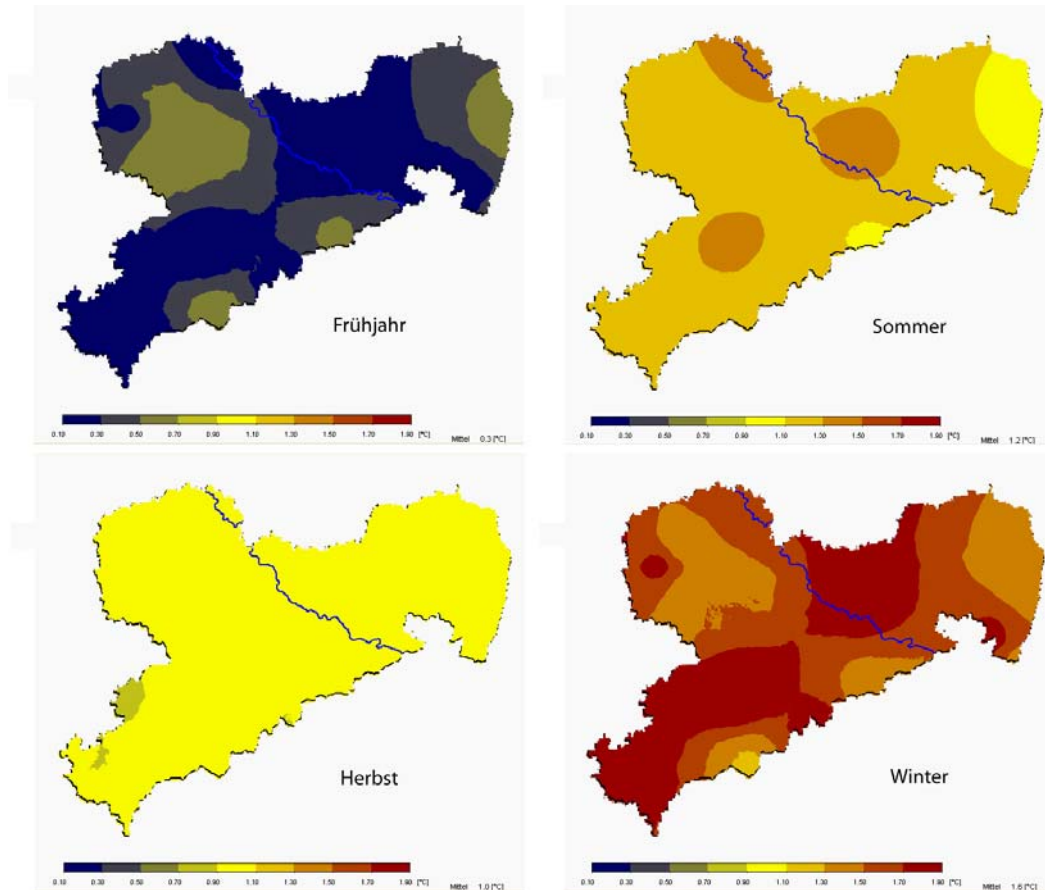


Abbildung 5: Änderung der Lufttemperatur (1971 - 2000 vs. 2021 - 2050) in ihrer regionalen Verteilung innerhalb des Freistaates Sachsen für die WEREX-Realisierung WEREX-A1B-TRO, unterteilt in die meteorologischen Jahreszeiten Frühjahr (3-5), Sommer (6-8), Herbst (9-11) und Winter (12-2)

In den Abbildungen 6 und 7 ist die regionale Verteilung der Niederschlagsänderung (1971 - 2000 vs. 2021 - 2050) im Freistaat Sachsen für die meteorologischen Jahreszeiten Frühjahr, Sommer, Herbst und Winter dargestellt, zum einen für WEREX-A1B-FEU und zum anderen für WEREX-A1B-TRO.

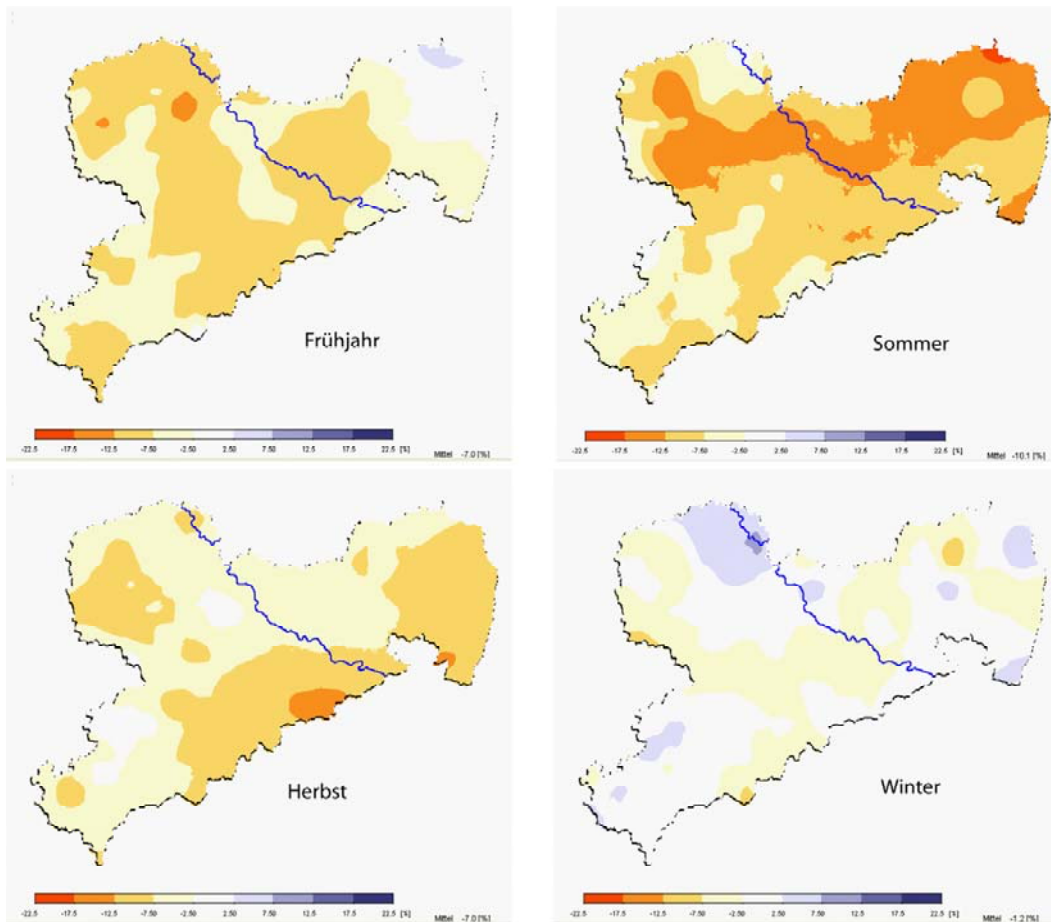


Abbildung 6: Änderung des Niederschlages (1971 - 2000 vs. 2021 - 2050) in seiner regionalen Verteilung innerhalb des Freistaates Sachsen für die WEREX-Realisierung WEREX-A1B-FEU, unterteilt in die meteorologischen Jahreszeiten Frühjahr (3-5), Sommer (6-8), Herbst (9-11) und Winter (12-2)

Im Frühjahr ist bei beiden WEREX-Realisierungen ein leichter Rückgang des Niederschlages zu erkennen, der bei der Realisierung WEREX-A1B-TRO besonders im Osten des Freistaates Sachsen ausgeprägt ist (Tabelle 1, Tabelle 2). Bei der Änderung des Jahresniederschlages für den gesamten Freistaat Sachsen besteht zwischen den beiden WEREX-Realisierungen ein Unterschied von 2 Prozentpunkten (Tabelle 1). Bei WEREX-A1B-TRO ist der gesamte östliche und mittlere Teil von Sachsen stärker von der negativen Niederschlagsänderung betroffen (Abbildung 8).

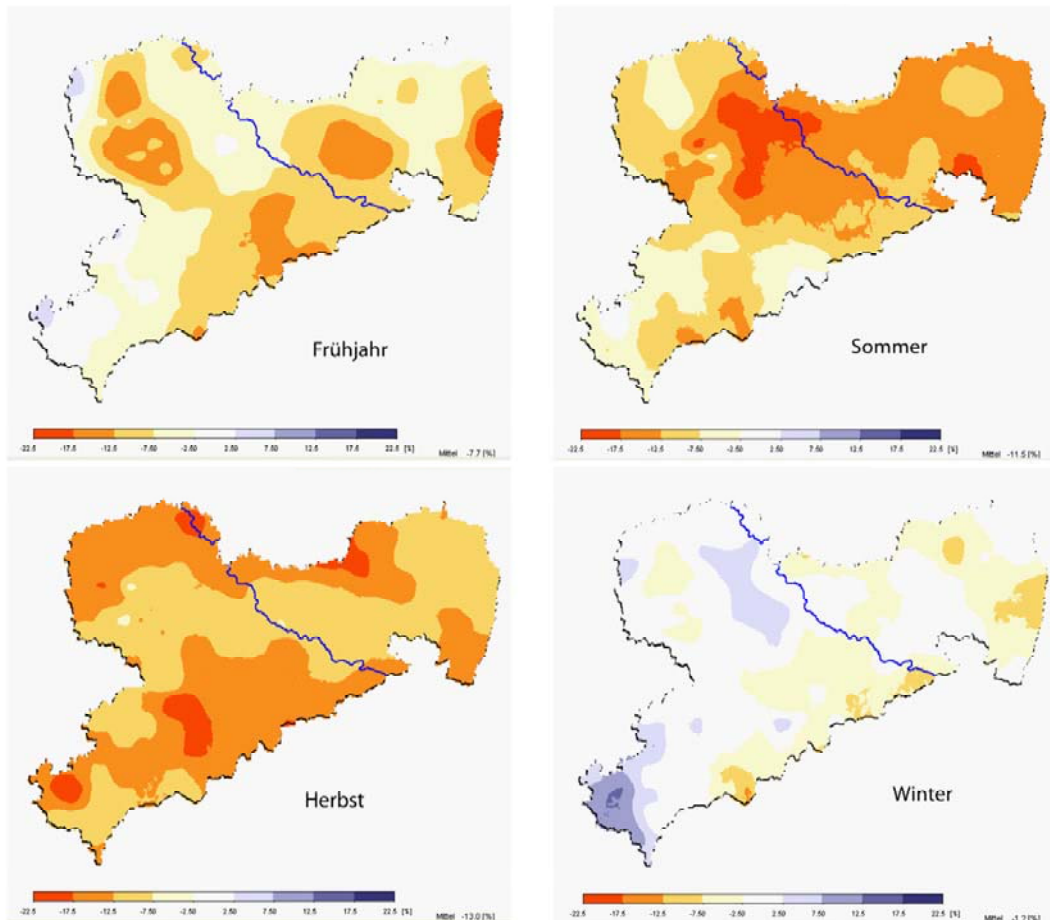


Abbildung 7: Änderung des Niederschlages (1971 - 2000 vs. 2021 - 2050) in seiner regionalen Verteilung innerhalb des Freistaates Sachsen für die WEREX-Realisierung WEREX-A1B-TRO, unterteilt in die meteorologischen Jahreszeiten Frühjahr (3-5), Sommer (6-8), Herbst (9-11) und Winter (12-2)

Zusammenfassend kann bemerkt werden, dass entsprechend der WEREX-Projektionen bis Mitte des Jahrhunderts, d. h. bis 2050, klimaseitig für den Freistaat Sachsen keine gravierenden Veränderungen zu erwarten sein werden. Es ist aber voraussichtlich mit größeren regionalen Unterschieden zu rechnen. Hiervon ausgehend kann die Hypothese aufgestellt werden, dass die zu erwartenden Auswirkungen auf die Pflanzenproduktion in Sachsen bis 2050 voraussichtlich nicht sehr groß sein werden.

Während der südwestliche Teil Sachsens und das Erzgebirge mit einem im Vergleich zum Mittel von Sachsen höheren Temperaturanstieg und einem geringeren Niederschlagsrückgang zu rechnen haben, sind in den nordöstlichen und östlichen Gebieten des Freistaates Sachsen der Temperaturanstieg geringer und das Niederschlagsdefizit größer, besonders in den Frühsommer- und Sommermonaten.

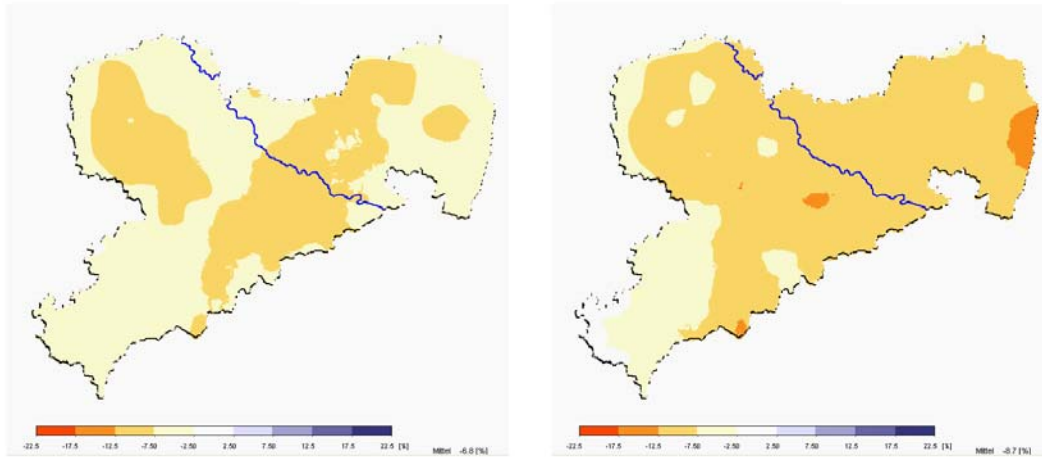


Abbildung 8: Änderung des Jahresniederschlags (1971 - 2000 vs. 2021 - 2050) in seiner regionalen Verteilung innerhalb des Freistaates Sachsen im Vergleich der WEREX-Realisierungen WEREX-A1B-FEU (links) und WEREX-A1B-TRO (rechts)

Entsprechend dem um 2050 zu erwartenden regional unterschiedlich verteilten Rückgang bei den Niederschlägen fallen voraussichtlich auch die zu erwartenden klimatisch bedingten Ertragsänderungen regional unterschiedlich aus.

5 Modell YIELDSTAT

5.1 Modellbeschreibung

Grundlage für die modellgestützten Abschätzungen zu erwartender Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Erträge von im Freistaat Sachsen angebauten Hauptfruchtarten (Winterweizen, Winterroggen, Wintergerste, Winterrraps, Silomais) für den Zeitraum bis 2050 bildet das Modell YIELDSTAT. Dieses statistisch orientierte Hybridmodell, das auf eine Ertragsabschätzung für Anbauverhältnisse unter Praxisbedingungen ausgerichtet ist, basiert auf standorttypabhängigen Algorithmen nach KINDLER (1992) und MIRSCHEL et al. (2003), (2006a), standortspezifischen Ertrags-Termen (MIRSCHEL et al. 2006b; MIRSCHEL et al. 2007), statistischen Trendanalysen und Trendextrapolationen sowie auf einem einfachen auf den Ergebnissen des FACE-Experiments des Johann Heinrich von Thünen-Instituts (vTI) Braunschweig (WEIGEL et al. 2005) basierenden Algorithmus zur Berücksichtigung des CO₂-Effektes (Abbildung 9).

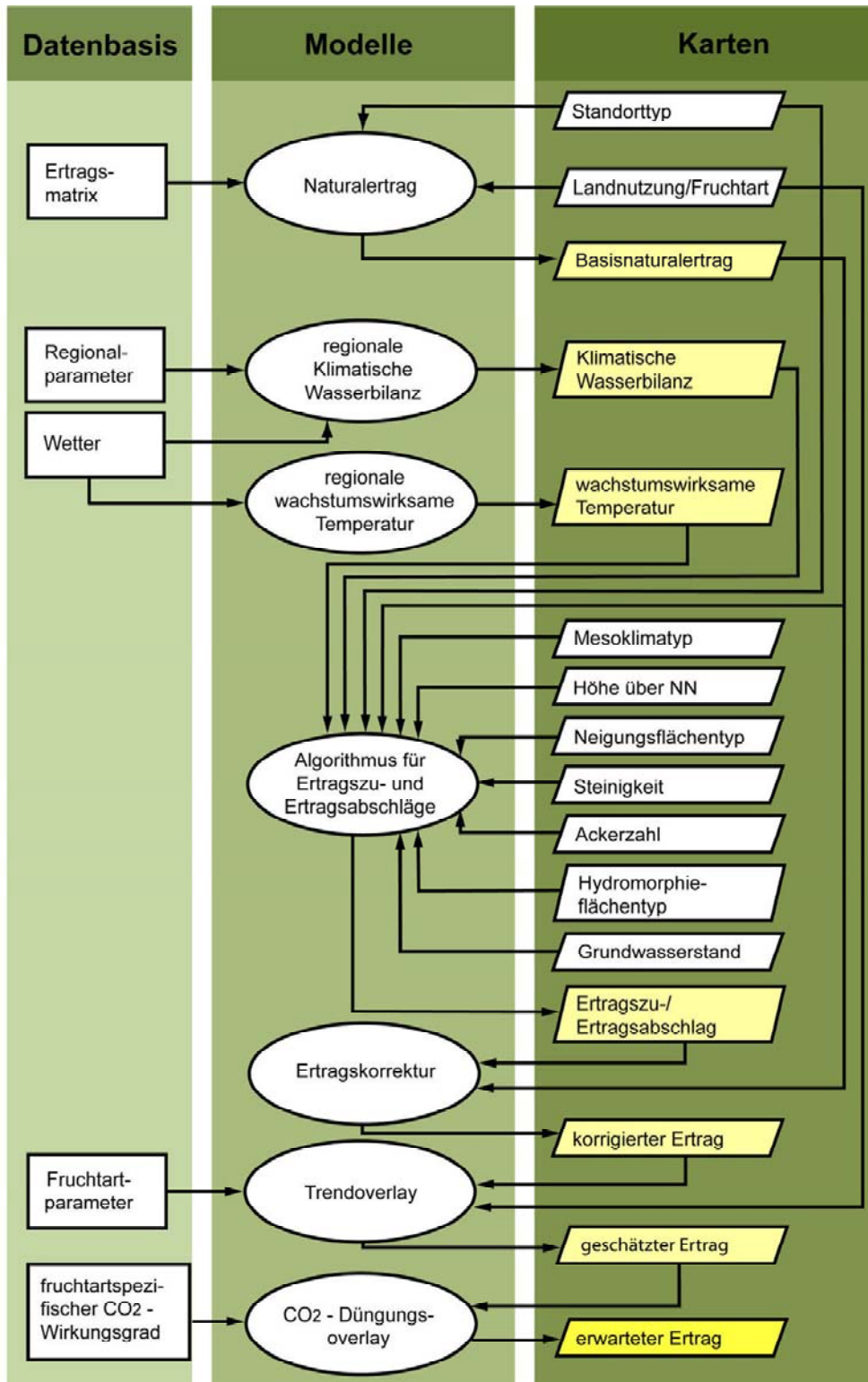


Abbildung 9: Schema des Modells YIELDSTAT zur Ertragsschätzung auf Praxisschlägen

Parametrisiert ist das Modell YIELDSTAT für 16 verschiedene Fruchtarten und 56 Standorttypen der Mittelmaßstäbigen Landwirtschaftlichen Standortkartierung (MMK) (SCHMIDT und DIEMANN 1991).

Grundlage der standorttypabhängigen Algorithmen bilden fruchtartspezifische relative Ertragsmatrizes, die auf einem sehr umfangreichen in der Praxis erhobenen Datenmaterial basieren. In Tabelle 3 ist beispielhaft für Winterweizen und Triticale die relative Ertragsmatrix für die einzelnen Standorttypen wiedergegeben.

Tabelle 3: 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 (Ekorr), 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.

$$\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\} + \\
& + \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 < H\u00fciNN \leq 700 \quad \text{und} \quad WaWiT < 4.0 \\ & 4.0; \quad StT \in (V1a...V9a) \quad \text{und} \quad H\u00fciNN > 700 \quad \text{und} \quad WaWiT < 4.0 \\ & 0; \quad \text{sonst} \end{aligned} \right\}
\end{aligned} \tag{1}$$

Entgegen der bei KINDLER (1992) gemachten Annahme, für die Ertragswirksamkeit der Wasserversorgung der Pflanzenbestände die kalenderjährliche klimatische Wasserbilanz (KWB) zu verwenden, wurde hierfür richtigerweise von der fruchtartspezifischen vegetationsjahrbezogenen KWB ausgegangen. Die dabei fruchtartspezifisch berücksichtigten Vegetationsjahre sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Übersicht über die in YIELDSTAT berücksichtigten Vegetationsjahre

Fruchtart	Beginn Vegetationsjahr	Ende Vegetationsjahr
Winterweizen	September (Aussaatjahr)	August (Erntejahr)
Wintergerste	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 (Tabelle 5) zu berücksichtigen, wurde in Auswertung der für Sachsen für unterschiedliche Aggregationsniveaus zur Verfügung stehenden Wetter- und Ertragsdaten eine pro mm KWB bezogene Korrekturgröße ($EK_{KWB-HWP}$) bestimmt. $EK_{KWB-HWP}$ ist fruchtartabhängig (Tabelle 5) und ergibt multipliziert mit der KWB (in mm) über die jeweilige Hauptwachstumsphase eine entsprechend ausgerichtete additive Ertragskorrektur.

Tabelle 5: 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
Winterraps	April - Mai	0,02
Silomais	Juni - August	0,20

Neben der Wasserversorgung ist zusätzlich auch die Temperatur in bestimmten Zeitabschnitten signifikant ertragswirksam. Deshalb wird hierfür in Auswertung der für Sachsen für unterschiedliche Aggregationsniveaus zur Verfügung stehenden Wetter- und Ertragsdaten ein von der Temperatur abhängiger Ertragskorrektur-Term eingeführt. Für die über den Winter angebauten Fruchtarten ist die Wintertemperatur für die Biomasseentwicklung und letztendlich auch für die Ertragshöhe eine signifikante Größe. Höhere Wintertemperaturen haben bei den Winterungen in der Regel höhere Erträge zur Folge. Da Mais bei der Ertragsbildung sehr stark auf die Temperatur in der Hauptwachstumsphase reagiert, wird hierfür die Durchschnittstemperatur in dieser Phase berücksichtigt. Der ertragswirksame Temperatureinfluss (EK_T) wird dabei linear und als additiver Term in YIELDSTAT berücksichtigt. Die für die Temperatur betrachteten Wachstumsphasen und die Parameter der linearen Regression sind in Tabelle 6 wiedergegeben.

Tabelle 6: Korrekturgröße zur Berücksichtigung der ertragswirksamen Temperatur in fruchtartabhängigen Wachstumsphasen (T_w)

Fruchtart	Wachstumsphase	$E_{K_T} = A + B T_w$	
		A	B
Winterweizen	Dezember – Februar	-3,98	4,25
Wintergerste	Dezember – Februar	-5,19	5,49
Winterroggen	Dezember – Februar	-2,57	2,75
Winterraps	Dezember – Februar	-2,13	2,3
Silomais	Mai – Juli	-372,0	37,4

Um für Ertragsabschätzungen in der Zukunft bis 2050 den wahrscheinlichen Fortschritt sowohl in der Pflanzenzüchtung (z. B. Hybridsorten) als auch in der Agro-Technologie (neue Anbautechnologien und Managementstrategien) aus den jetzigen Kenntnissen heraus zu berücksichtigen, wurde in das Modell YIELDSTAT ein mit dem Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie abgestimmter fruchtartspezifisch unterschiedlicher Ertragstrend (E_{Trend})

$$E_{Trend} = T_{FA} \cdot (Jahr - 1990) \quad (2)$$

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

Dieser lineare Trend (T_{FA}) wurde berechnet aufgrund der Ertragsstatistik Sachsens für die Jahre 1992 - 2007 und wird als gültig bis 2010 fortgeschrieben. Da eine unveränderte lineare Extrapolation des Trends nicht realistisch ist, wird der Trend nach 2010 bis 2050 abgeschwächt weitergeführt. Dabei werden für 2010 - 2019 nur 60 % des Ausgangstrends (1992 - 2010) angenommen, für 2020 - 2029 nur 40 %, für 2030 - 2039 nur 20 % und für 2040 - 2049 nur noch 10 % des Ausgangstrends (Tabelle 7).

Bei der statistischen Ermittlung der fruchtartspezifischen Ertragstrends auf der Grundlage der Ertragsstatistik des Freistaates Sachsen ergibt sich im Zeitraum um 1990/1992 eine Änderung im Trendverhalten. Hierfür sind die seit 1990 neu verfügbaren Sorten, Dünge- und Pflanzenschutzmittel sowie neuen technologischen Möglichkeiten wahrscheinlich die Hauptursache. Aus diesem Grund wurde für diesen Zeitpunkt aus der kreisbezogenen Ertragsstatistik ein Trendsprung ermittelt, der bei allen Fruchtarten auftritt. Dieser beträgt bei Winterweizen 6,2 dt ha⁻¹, bei Wintergerste 3,3 dt ha⁻¹, bei Winterroggen 10,8 dt ha⁻¹, bei Winterraps 6,6 dt ha⁻¹ und bei Silomais 12,2 dt ha⁻¹.

Grundlage für die Berücksichtigung des CO₂-Düngungseffektes auf die Ertragsbildung bis zum Jahr 2050 bilden die Ergebnisse des FACE-Experiments des vTI Braunschweig, bei denen die Ertragsauswirkungen bei einem CO₂-Gehalt von 550 ppm bei Beibehaltung des gegenwärtigen Strahlungs- und Temperaturniveaus untersucht wurden (WEIGEL et al. 2005). Für die Berücksichtigung des CO₂-Düngungseffektes, der im FACE-Versuch nur als Kombinationseffekt von erhöhter Photosyntheseeffektivität und verringerter Transpiration gemessen werden kann, wurde in erster

Näherung eine Linearität der ertragswirksamen Auswirkungen zwischen dem jetzigen CO₂-Gehalt von ca. 385 ppm und den untersuchten 550 ppm angenommen.

Tabelle 7: Bis 2050 für den Freistaat Sachsen angenommener jährlicher Ertragstrend für Winterweizen, Wintergerste, Winterroggen, Winterraps und Silomais (ALBERT 2008)

Fruchtart	T _{FA} [dt ha ⁻¹ a ⁻¹]				
	1990 - 2009 - 100 %	2010 - 2019 - 60 %	2020 - 2029 - 40 %	2030 - 2039 - 20 %	2040 - 2049 - 10 %
Winterweizen	0,733	0,440	0,293	0,147	0,073
Wintergerste	0,537	0,322	0,215	0,107	0,054
Winterroggen	0,323	0,194	0,129	0,065	0,032
Winterraps	0,461	0,277	0,184	0,092	0,046
Silomais	1,363	0,818	0,545	0,273	0,136

Für Wintergetreide ergibt sich dabei ein ertragswirksamer CO₂-Effekt von 0,07886 % pro 1 ppm CO₂-Erhöhung. Da die FACE-Versuche des vTI Braunschweig keinen Winterraps in der Versuchsfruchtfolge enthielten, wurde für Winterraps das Mittel aus den ertragswirksamen CO₂-Effekten der Versuchsfruchtfolge angesetzt, d. h. 0,06686 % pro 1 ppm CO₂-Erhöhung. Die FACE-Versuche mit Silomais im Jahr 2007 haben keinen nachweisbaren CO₂-Effekt ergeben. Im Jahr 2008 zeichnete sich im Silomaisversuch nur unter Wassermangel ein geringer Effekt ab (MANDERSCHIED 2008). Die Reaktion bei Silomais als C4-Pflanze fällt im Vergleich zu den C3-Pflanzen damit deutlich geringer aus. Deshalb wurde für Silomais ein CO₂-Effekt von nur 20 % des CO₂-Effektes von Getreide angesetzt, d. h. von 0,01577 % pro ppm CO₂-Erhöhung.

Aufgrund des im Vergleich zur breiten Praxis besseren Anbaumanagements und einer besseren Sortenaktualität unterscheidet sich das Ertragsniveau in den Versuchsstationen des LfULG von dem in der Praxis. Beispielhaft sei hier auf das Ertragsniveau der Versuchsstation Nossen im Vergleich zum Ertragsniveau des Weißeritzkreises verwiesen (Abbildung 10).

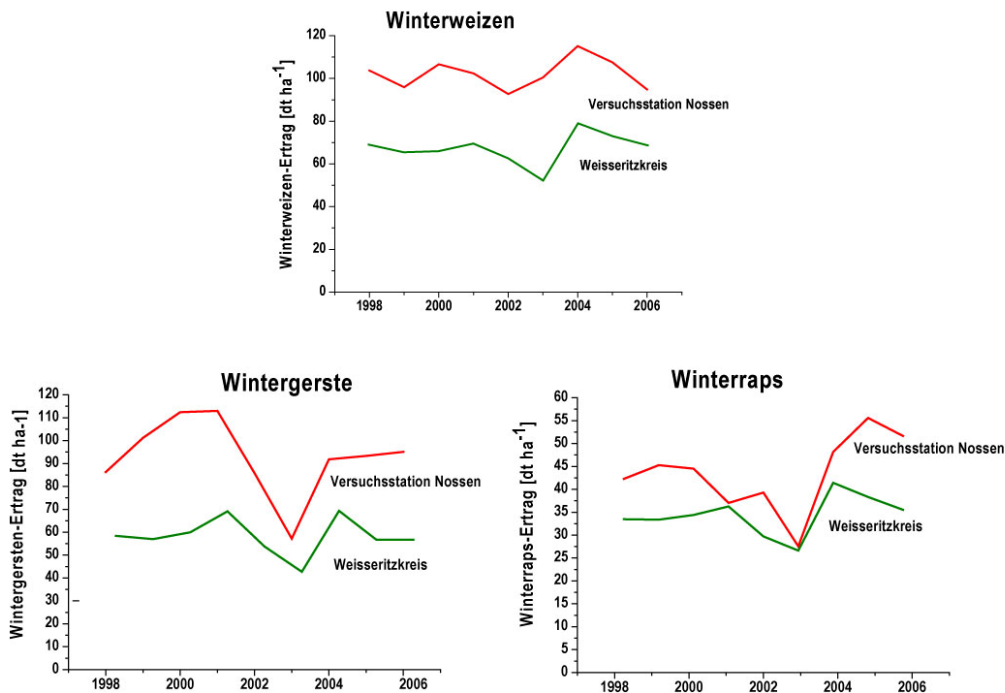


Abbildung 10: Vergleich des Ertragsniveaus der Versuchsstation Nossen mit dem Ertragsniveau des Weißeritzkreises für Winterweizen, Wintergerste und Winterraps

In Trockenjahren, wie z. B. 2003 sind die Unterschiede im Ertragsniveau deutlich geringer, denn der Trockenstress wirkt dann überall gleich. Er kann in der Versuchsstation nur durch Beregnungsmaßnahmen kompensiert werden, was in der Versuchsstation Nossen im Jahr 2003 aber nicht erfolgt ist.

Um das Modell YIELDSTAT, das für Ertragserschätzungen unter Anbaubedingungen der Praxis erstellt und parametrisiert worden ist, unter den Anbaubedingungen einer Landesversuchsstation anzuwenden, ist für diesen Fall die Einführung eines fruchtartabhängigen Anpassungsfaktors „Praxis-Versuchsstation“ $f_{V,P}(FA, StT)$ notwendig. Dieser liegt fruchtartabhängig für die Versuchsstation Pommritz im Bereich 1,25 ... 1,60, für die Versuchsstation Forchheim im Bereich 1,05 ... 1,15, für die Versuchsstation Nossen im Bereich 1,07 ... 1,25, für die Versuchsstation Spröda im Bereich 1,10 ... 1,48 und für die Versuchsstation Köllitsch im Bereich 1,07 ... 1,16.

5.2 Datenregionalisierung

Voraussetzung für eine regionaldifferenzierte Ertragsabschätzung mit YIELDSTAT ist auch, dass alle notwendigen Modellinputdaten regionalisiert vorliegen. Für die erforderlichen Informationen zum Standorttyp und zu den Standortmerkmalen (Neigungsflächentyp, Steinigkeit, Hydromorphieflächentyp) wird auf die Mittelmaßstäbige Landwirtschaftliche Standortkartierung (MMK, SCHMIDT und DIEMANN 1991) zurückgegriffen. Grundlage für die Ackerzahl ist die Gemeindedatei (GEMDAT, LIEBEROTH et al. 1977). Die mesoskalige Klimazonierung nach ADLER (1987) wurde für das Territorium der fünf neuen Bundesländer im Institut für Landschaftssystemanalyse des ZALF Münchenberg neu digitalisiert. Die Höhenlage (HÜNN) und die Hangneigung wurden aus dem digi-

talen Geländemodell (DGM 25) abgeleitet. Die Karten mit dem Standorttyp und den Standortmerkmalen für den Freistaat Sachsen sind in Abbildung 11 dargestellt.

Für die auf den gesamten Freistaat Sachsen bzw. die einzelnen Boden-Klima-Regionen bezogenen regionalen Ertragsabschätzungen sind auch regional zur Verfügung stehende Wetterdaten notwendig. Besonders wichtig ist dies für den regional sehr differenziert auftretenden Niederschlag. Strahlung und Temperatur als Tageswert differieren dagegen regional nicht so stark.

Die zur Anwendung kommenden WEREX-A1B-Daten mit ihren Realisierungen (WEREX-A1B-FEU, WEREX-A1B-NOR, WEREX-A1B-TRO) stehen für die DWD-Klimastationen mit allen notwendigen meteorologischen Größen und für die Niederschlagsmessstationen nur mit den Niederschlagswerten zur Verfügung. Da das Netz der DWD-Klimastationen in Sachsen nicht sehr dicht ist, wurde das wesentlich dichtere Netz der Niederschlagsmessstationen mit berücksichtigt, wobei den einzelnen Niederschlagsmessstationen die Temperatur- und Strahlungswerte der jeweils nächstgelegenen DWD-Klimastation zugeordnet wurden. Unter Anwendung des Regionalisierungsverfahrens nach VORONOI (KLEIN 2005) wurde auf der Basis der Klima- und Niederschlagsmessstationen das Territorium des Freistaates Sachsen in 123 Teilregionen (Abbildung 12) mit einer jeweils repräsentativen Station unterteilt, für die dann für die Szenariorechnungen WEREX-Wetterdatenreihen mit allen notwendigen meteorologischen Größen (Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer) in Tagesauflösung zur Verfügung stehen. Die für die Berechnung der KWB notwendige potenzielle Verdunstung wird nach WENDLING (1991) aus Temperatur und Globalstrahlung berechnet. Die Globalstrahlung wird dabei nach dem Algorithmus von GOUDRIAAN und VAN LAAR (1978) aus der Sonnenscheindauer ermittelt.

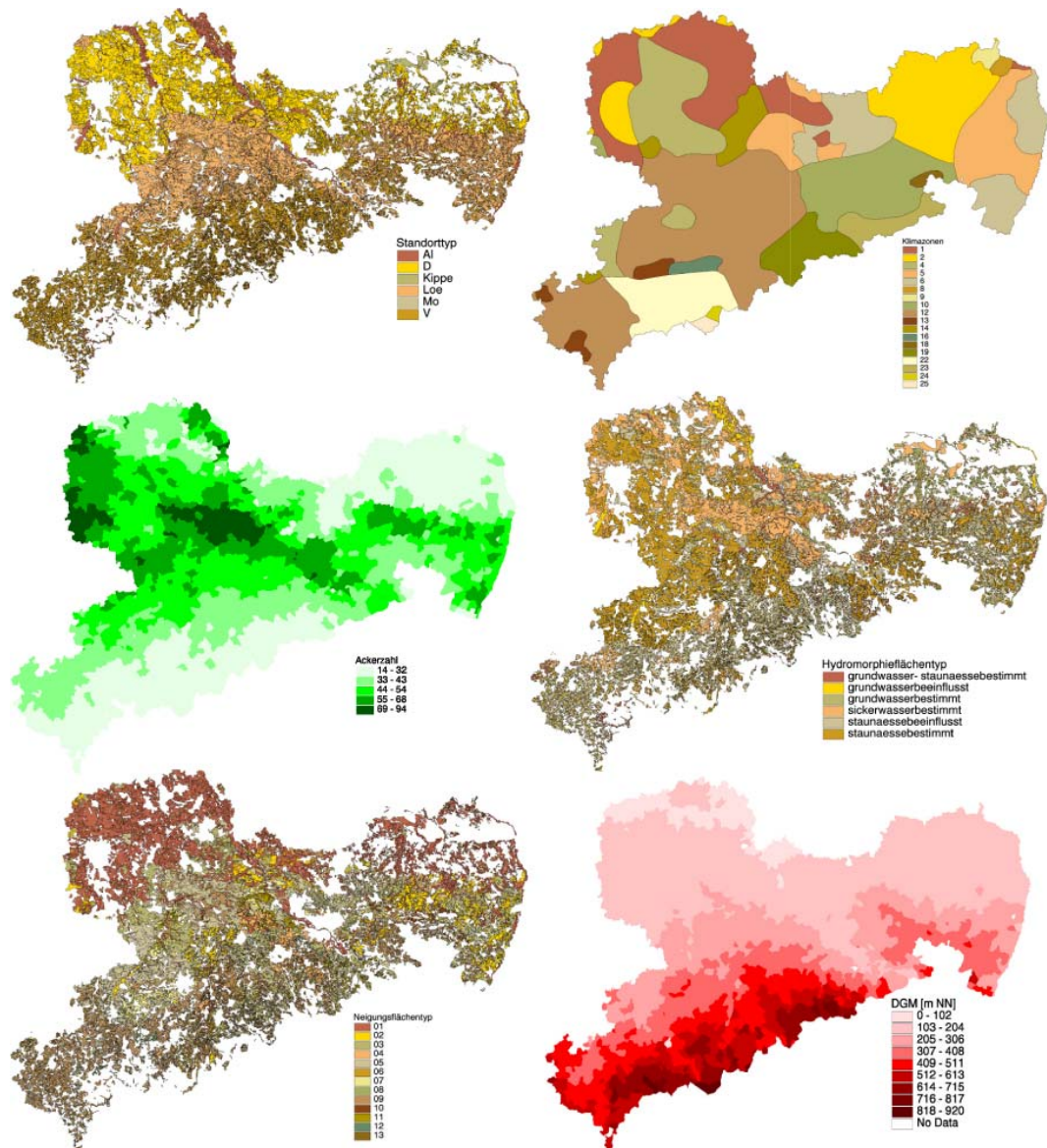


Abbildung 11: Standorttyp- und Standortmerkmalskarten für den Freistaat Sachsen als Input für YIELDSTAT (Standorttyp nach MMK (oben links), Klimazone (oben, rechts), Ackerzahl (Mitte, links), Hydromorphieflächentyp nach MMK (Mitte, rechts), Neigungsflächentyp nach MMK (unten, links), DGM (unten, rechts))

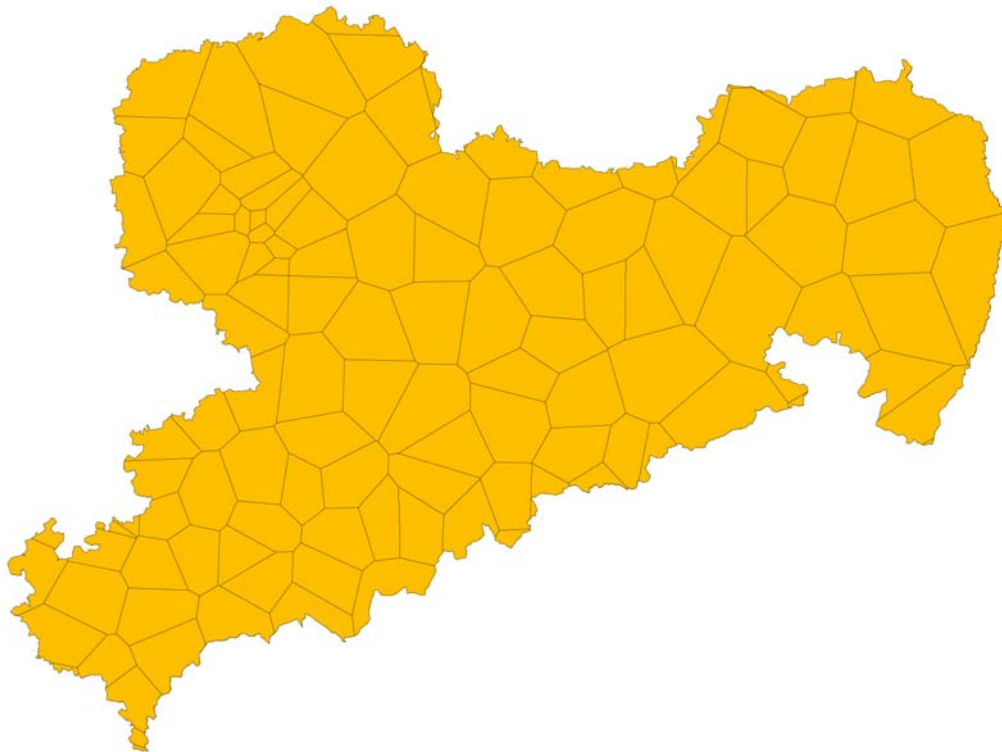


Abbildung 12: Unterteilung des Freistaates Sachsen entsprechend des Klima- und Niederschlagsmessstellennetzes

5.3 Annahmen für die Simulationen

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 niemand aus ökonomischen Gründen den Winterroggen auf Lössstandorten anbauen, sie sind Winterweizen, Wintergerste und Zuckerrüben vorbehalten.

Bei der Landnutzung wird von praxisüblichen Markfruchtfolgen ausgegangen. Für zukunftsbezogene Ertragsabschätzungen auf der Grundlage von WEREX-A1B-Daten werden die heute bestehenden Fruchtfolgen beibehalten, 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.

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

Bei der Berücksichtigung des CO₂-Düngungseffektes in den Zukunftsszenarien wurde von einem gegenwärtigen CO₂-Gehalt der Atmosphäre von 385 ppm und einer jährlichen Zunahme des CO₂-

Gehaltes der Atmosphäre von 2 ppm a⁻¹ ausgegangen. Damit liegt die angenommene jährliche Zunahme über dem Durchschnitt des Zeitraumes 1976 - 2005, was aber damit zu rechtfertigen ist, dass der jährliche Anstieg im Zeitraum 2004 - 2008 bei 2 ppm a⁻¹ lag, mit einer etwas steigenden Tendenz. Ungeachtet dessen wird aber für die Szenariorechnungen bis 2050 ein linearer jährlicher Anstieg angenommen. Das bedeutet, dass für 2035 ein CO₂-Gehalt von 440 ppm und für 2050 von 470 ppm angenommen wird.

Bei der Berücksichtigung des ertragswirksamen Züchtungs- und Technologietrends wurde über den Zeitraum bis 2050 keine Linearität ausgehend vom gegenwärtigen Trend angenommen, sondern eine etappenweise Trendabschwächung (vgl. Tabelle 7).

5.4 Regionalisierungstool für die Simulationen

Die gesamten regionalen für den Freistaat Sachsen flächendeckenden Modell- und Szenariorechnungen mit YIELDSTAT sowie die Regionalisierungen der WEREX-A1B-Daten wurden mit Hilfe des Spatial Analysis and Modeling Tool (SAMT) (WIELAND et al. 2006, MIRSCHEL et al. 2006c) realisiert, einem Open-Source-Tool, das im Institut für Landschaftssystemanalyse des ZALF Müncheberg entwickelt wurde. Das oben beschriebene Modell YIELDSTAT ist in C++ in die SAMT-Version 2.0 integriert. Bei den regionalen Simulationsrechnungen wird von einer Einteilung des Freistaates Sachsen in ein Raster mit der Kantenlänge von 100 m, d. h. von einer Gittergröße von 1 ha, ausgegangen.

6 Modellvalidierung mit realen Wetter- und Ertragsdaten

Für eine Anwendung des Modells YIELDSTAT unter den spezifischen Anbau- und Klimabedingungen des Freistaates Sachsen erfolgte eine Modelladaptation und -validierung für reale Wetter- und Ertragsdaten auf fünf verschiedenen Aggregationsstufen, beginnend bei den Versuchsstationen des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie über Ackerschläge aus dem Nitrat-Dauertestflächen-Netz sowie aus den BEFU-Betrieben Sachsens bis hin zu den Ertragsstatistiken des Freistaates Sachsens auf Kreis- bzw. Landesebene.

6.1 Versuchsstationen des LfULG

Zur Modellüberprüfung und -adaptation auf Versuchsstationsebene wurden die Versuchsstationen Pommritz, Forchheim, Nossen, Köllitsch und Spröda des LfULG berücksichtigt. Sie repräsentieren die verschiedenen Boden-Klima-Regionen im Freistaat Sachsens (Abbildung 2). Eine kurze Charakteristik der Versuchsstandorte ist in Tabelle 8 zusammengestellt.

Tabelle 8: Standortcharakteristik der Versuchsstationen Pommritz, Forchheim, Nossen, Köllitsch und Spröda des LfULG

Landkreis	Pommritz Bautzen	Forchheim Mittlerer Erzgebirgskr.	Nossen Meißen- Radebeul	Spröda Delitzsch	Köllitsch Torgau- Oschatz
Höhe ü. NN	230 m	565 m	255 m	120 m	85 m
Jahresniederschlag	698 mm	880 mm	643 mm	547 mm	500 mm
Jahresmitteltemperatur	8,6 °C	6,2 °C	8,1 °C	8,8 °C	9,0 °C
Standorttyp	Lö5	V8	Lö4	D3	AI
Bodenart	L	sL	L	SI	Lt
Ackerzahl (Mittel)	62	33	65	30	59

Für den Vergleich zwischen den in den Versuchsstationen geernteten und den mit YIELDSTAT berechneten Erträgen werden je nach Anbauspektrum verschiedene Fruchtarten und je nach Datenverfügbarkeit unterschiedlich lange Zeiträume (bis zu 10 Jahren) teilweise bis 2007 berücksichtigt. Da für die Modellrechnungen möglichst standortgenaue Wetterdaten verwendet werden sollen, wurde auf die in den Versuchsstationen gemessenen Wetterdaten zurückgegriffen, die stationsabhängig für unterschiedlich lange Zeiträume verfügbar waren.

Für die Versuchsstation Pommritz sind für Winterweizen, Wintergerste, Winterraps und Silomais die Vergleiche in Abbildung 13 wiedergegeben.

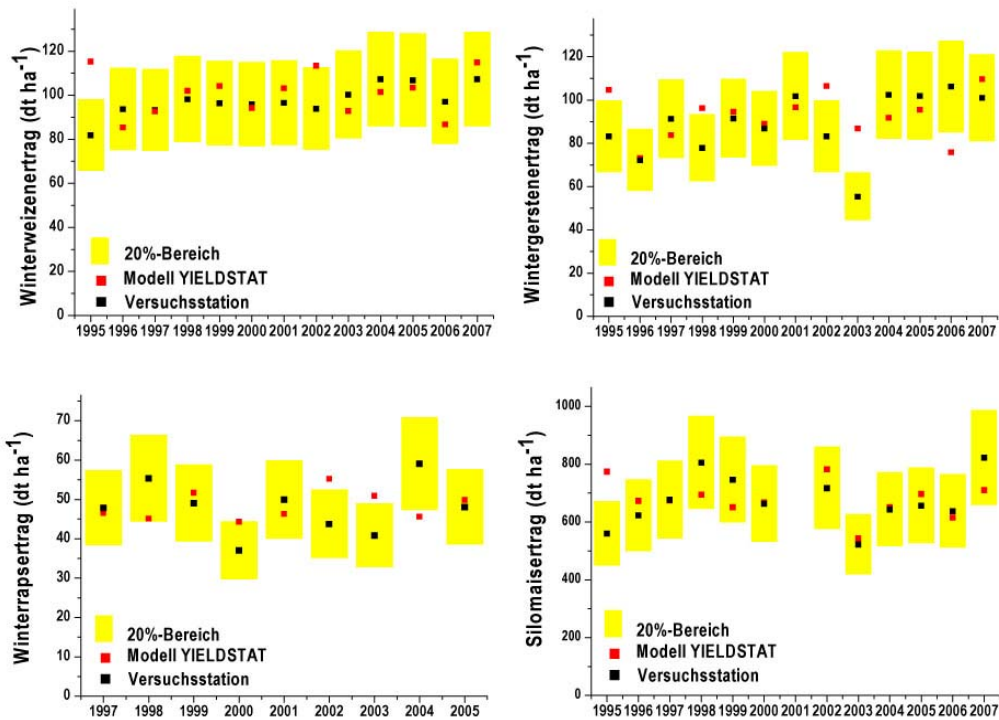


Abbildung 13: Vergleich der im Versuch erzielten Erträge mit den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Erträgen für die Versuchsstation Pommritz (Winterweizen - oben links; Wintergerste - oben rechts; Winterraps - unten links; Silomais - unten rechts)

Der entsprechende Vergleich für die Versuchsstation Forchheim ist beispielhaft für die Fruchtarten Winterweizen, Wintergerste und Winterraps in Abbildung 14 wiedergegeben.

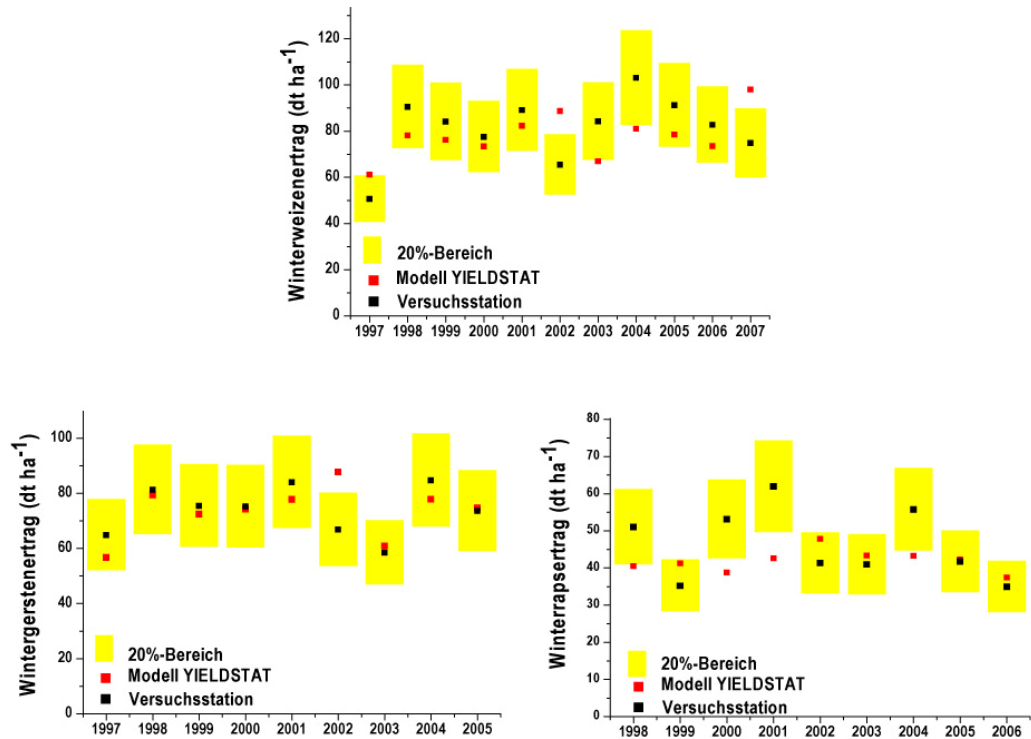


Abbildung 14: Vergleich der im Versuch erzielten Erträge mit den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Erträgen für die Versuchsstation Forchheim (Winterweizen - oben; Wintergerste - unten links; Winterraps - unten rechts)

Abbildung 15 enthält den entsprechenden Ertragsvergleich zwischen Feldversuch und Modell YIELDSTAT für die Versuchsstation Nossen, auch hier beispielhaft für Winterweizen, Wintergerste und Winterraps.

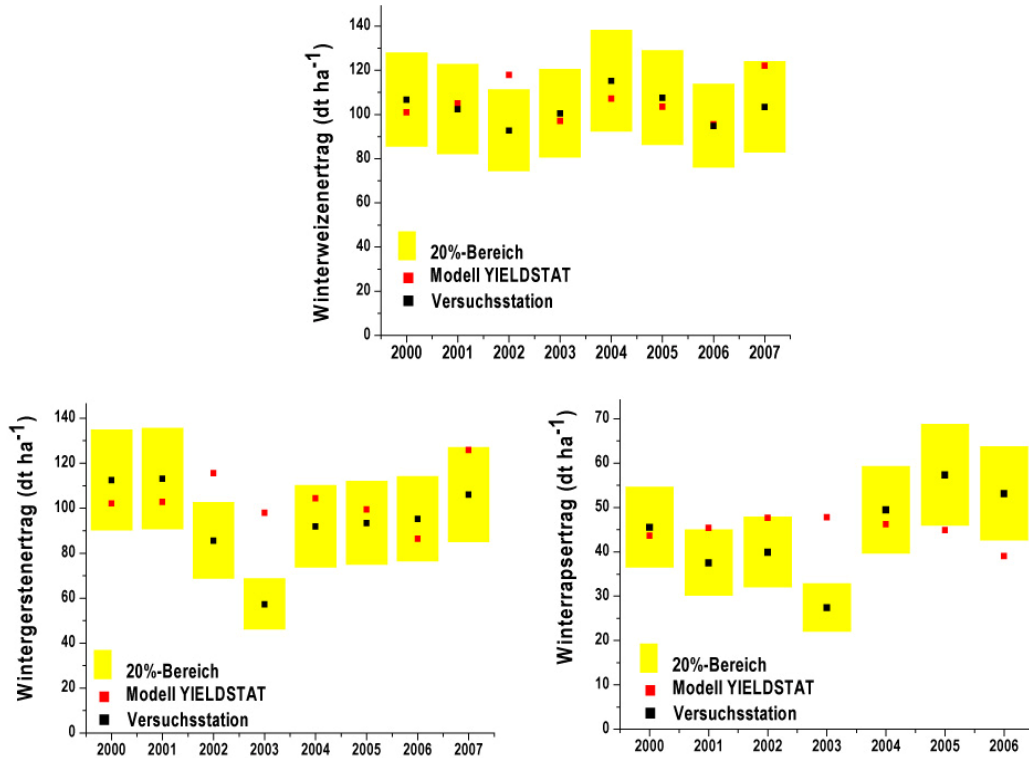


Abbildung 15: Vergleich der im Versuch erzielten Erträge mit den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Erträgen für die Versuchsstation Nossen (Winterweizen - oben; Wintergerste - unten links; Winterraps - unten rechts)

Für die Versuchsstationen Spröda und Köllitsch sind für einige Fruchtarten die Ertragsvergleiche zwischen Feldversuch und Modell YIELDSTAT in Abbildung 16 wiedergegeben.

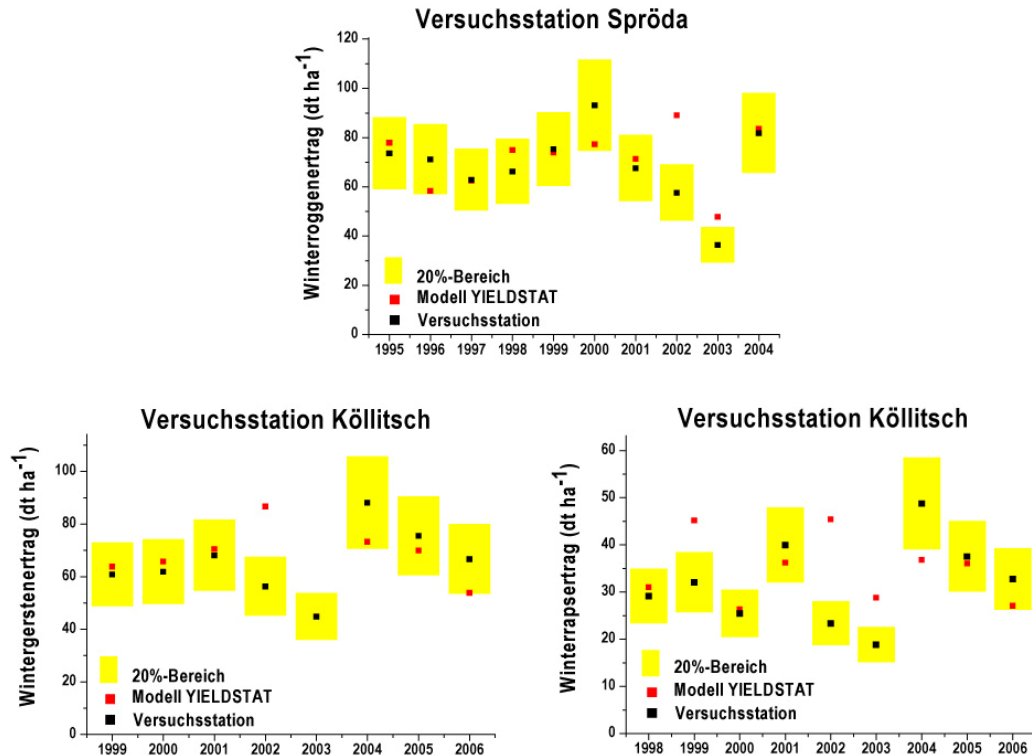


Abbildung 16: Vergleich der im Feldversuch erzielten Erträge mit den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Erträgen für die Versuchsstationen Spröda (Winterroggen – oben) und Köllitsch (Wintergerste - unten links; Winterraps - unten rechts)

Im Vergleich zwischen Modell und Feldversuch ist in allen hier betrachteten Versuchsstationen und Fruchtarten im Jahr 2002 eine signifikante Überschätzung des Ertrages durch das Modell YIELDSTAT zu 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 Hitzewelle 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 Sachsen 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 auf die Landwirtschaft ist in den Agrarmeteorologischen Monatsberichten für Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen (AGRARMETEOROLOGISCHE MONATSBERICHTE 2002a, 2002b, 2002c, 2002d) zu finden. Zusammenfassend ist zu bemerken, dass im Jahr 2002 weitaus mehr gewachsen ist als geerntet wurde. Dies bestätigen im Rahmen eines Praxisversuchs 2002 in Lüttewitz (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).

Da im Modell YIELDSTAT weder Lagerbildung, Hagelschäden, witterungsbedingt erhöhte Schädlings-/Pilzdrucksituationen noch feuchtebedingte Ernteverzögerungen abgebildet werden, sondern nur von den ertragswirksamen Standort-, Boden- und Wetterbedingungen (Temperatur, Niederschlag) ausgegangen wird, schätzt das Modell im Jahr 2002 im Vergleich zur realen Ernte die Erträge in der Regel deutlich höher (Abbildungen 13 bis 16).

Ein Modell-Praxis-Vergleich bezüglich der Erträge der fünf betrachteten Fruchtarten Winterweizen, Wintergerste, Winterroggen, Winterraps und Silomais über alle fünf Versuchsstationen Pommritz, Forchheim, Nossen, Spröda und Köllitsch sowie über alle Jahre ist in Abbildung 17 zu finden.

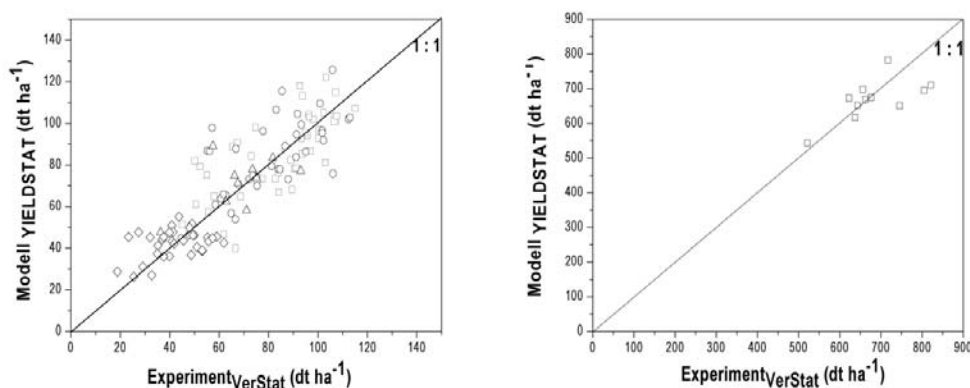


Abbildung 17: Modell-Praxis-Vergleich bezüglich der Erträge für Winterweizen (□), Wintergerste (o), Winterroggen (Δ), Winterraps (◇) (links) und Silomais (rechts) über die Versuchsstationen Pommritz, Forchheim, Nossen, Spröda und Köllitsch

Nach einer statistischen Verrechnung ergibt sich für die Regressionsgeraden durch den Koordinatenursprung [0,0] für alle Fruchtarten eine Steigung von 0,977. Aufgesplittet in die einzelnen Fruchtarten ergibt sich eine Steigung der Regressionsgeraden durch [0,0] von 0,998 für Winterweizen, von 1,027 für Wintergerste, von 1,021 für Winterroggen, von 0,954 für Winterraps und von 0,973 für Silomais. Damit liegt bei allen Fruchtarten die Steigung nahe 1, der Steigung der Quadrantenhalbierenden (1:1).

6.2 Ackerschläge des Nitrat-Dauertestflächen-Netzes

Für eine schlagbezogene Modellvalidierung von YIELDSTAT auf Praxisebene wurden durch das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie für die Jahre 1998 - 2003 schlag-scharfe Ertragsdaten aus dem Nitratdauertestflächen-Netz des Freistaates Sachsen bereitgestellt. Da aber für diese Schläge keine ortsbezogenen Wetterdaten verfügbar gemacht werden können, wurde auf die nächstgelegenen Stationen des agrarmeteorologischen Messnetzes zurückgegriffen, die teilweise doch recht weit von den betrachteten Flächen entfernt sind. Für einen Vergleich wurden aus dem Datensatz beispielhaft die Nitratdauertestflächen extrahiert, die im Kreis Torgau-Oschatz und im Weißeritzkreis liegen. Für die Flächen im Kreis Torgau-Oschatz wurden die Wetter-

daten der agrarmeteorologischen Station Köllitsch verwendet und für die Flächen im Weißeritzkreis die der Station Nossen.

Abbildung 18 zeigt beispielhaft für Winterweizen und Silomais für die Jahre 1998 - 2003 einen Vergleich der auf den Nitratdauerstestflächen erhobenen Erträge mit den mit YIELDSTAT berechneten Erträgen.

Wie schon bei den Versuchsstationen des LfULG ist auch hier für das Jahr 2002 eine Überschätzung der Erträge durch das YIELDSTAT-Modell zu erkennen, besonders ausgeprägt bei Winterweizen und Wintergerste. Die Begründungen hierfür sind die gleichen wie bereits oben ausgeführt (AGRARMETEOROLOGISCHE MONATSBERICHTE 2002a, 2002b, 2002c, 2002d). Bei Silomais tritt die modellmäßige Ertragsüberschätzung nicht ganz so stark hervor, da die wetterseitig bedingte Ertragsbeeinflussung der bis Ende September/Anfang Oktober auf den Ackerflächen etablierten Silomaisbestände im Vergleich zu anderen Fruchtarten nicht so stark ausgeprägt ist.

In Tabelle 9 ist für alle betrachteten Fruchtarten (Winterweizen, Winterroggen, Wintergerste, Winterraps und Silomais) der Vergleich zwischen den Praxiserträgen auf den Nitratdauerstestflächen und den mit dem YIELDSTAT-Modell berechneten Erträgen für den Kreis Torgau-Oschatz und den Weißeritzkreis statistisch für die Jahre 1998 - 2003 zusammengefasst.

Tabelle 9: Ergebnisse des Vergleichs zwischen den auf den Nitratdauerstestflächen der Kreise Torgau-Oschatz und Weißeritzkreis für Winterweizen, Wintergerste, Winterroggen, Winterraps und Silomais im Zeitraum 1998 - 2003 erhobenen Erträge und den mit dem Modell YIELDSTAT für diese Ackerschläge berechneten Erträge (N – Anzahl Testschläge)

Fruchtart	Nitratdauerstestflächen (dt ha ⁻¹)					Modell YIELDSTAT (dt ha ⁻¹)			
	N	Mittel	Min.	Max.	Median	Mittel	Min.	Max.	Median
Winterweizen	185	63,3	19,8	101,0	65,5	67,1	40,0	103,0	67,0
Wintergerste	116	58,7	20,0	90,7	59,7	63,5	20,0	99,1	64,1
Winterroggen	37	52,1	16,7	77,1	51,0	50,8	27,1	72,9	51,9
Winterraps	104	31,4	4,4	54,0	30,3	31,9	22,2	50,0	31,0
Silomais	32	424	205	615	450	371	249	613	357



Abbildung 18: Ertragsvergleich zwischen Praxiserhebungen und YIELDSTAT-Berechnungen auf den bzw. für die Nitratdauerstestflächen der Kreise Torgau-Oschatz und Weißeritzkreis für Winterweizen (oben), Silomais (Mitte) und Wintergerste (unten) der Jahre 1998 - 2003

Das Modell YIELDSTAT überschätzt gemittelt über alle Nitratdauerstestflächen der beiden Kreise Torgau-Oschatz und Weißeritzkreis die Erträge von Winterweizen um 6,0 %, von Wintergerste um 8,1 % und von Wintererbsen um 1,5 %. Bei Winterroggen wird der Ertrag im Mittel um 2,5 % unterschätzt und bei Silomais um 12,5 %. Bei den Medianen ist außer bei Silomais eine sehr gute Übereinstimmung festzustellen, genau wie bei den Maximalerträgen. Die Spannweite der Erträge ist bei den gemessenen Erträgen für alle Fruchtarten größer. Der Grund dafür liegt in der mit dem Modell YIELDSTAT zu hohen Abschätzung der niedrigen Erträge. Eine Ursache ist sicher, dass im Modell YIELDSTAT kein Term enthalten ist, der z. B. den ertragswirksamen Einfluss von Schädlings- und Pilzbefall berücksichtigt. Auch eine Lagerbildung und deren Ertragsauswirkung sind im Modell nicht abgebildet.

In Abbildung 19 sind die Praxiserträge für alle in den Kreisen Torgau-Oschatz und Weißeritzkreis gelegenen Nitratdauerstestflächen den mit YIELDSTAT berechneten Erträgen gegenübergestellt.

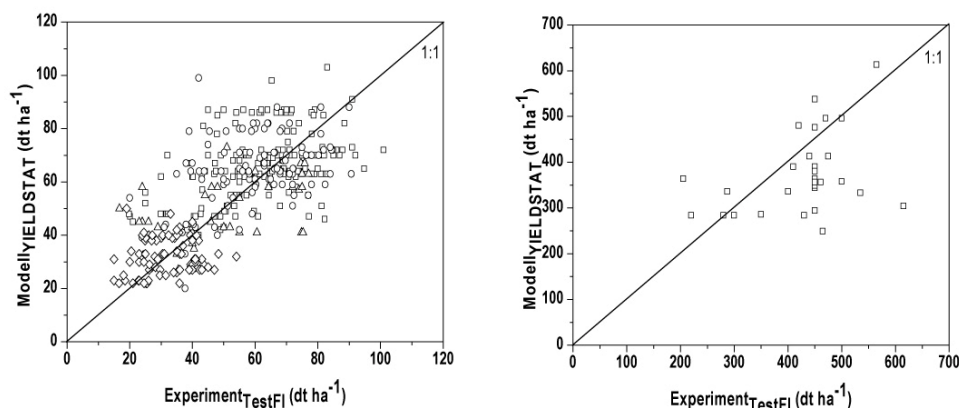


Abbildung 19: Modell-Praxis-Vergleich bezüglich der Erträge für Winterweizen (□), Wintergerste (o), Winterroggen (Δ), Winterrraps (◇) (links) und Silomais (rechts) für die Nitratdauerstestflächen der Jahre 1998-2003 im Kreis Torgau-Oschatz und im Weißeritzkreis

Die lineare Regression zwischen den Praxiserträgen und den mit YIELDSTAT berechneten Erträgen über alle Fruchtarten, Jahre und die beiden Kreise erbringt ein R^2 von 0,904. Der Anstieg der Geraden beträgt 0,8165 und der Schnittpunkt mit der y-Achse liegt bei 13,542.

Vergleicht man diese Ergebnisse mit den Ergebnissen aus Abbildung 17, werden Unterschiede deutlich. Der erste Unterschied ist im Ertragsniveau zu erkennen, das im Vergleich zu den Landesversuchsstationen auf den Praxisschlägen bei allen betrachteten Fruchtarten deutlich niedriger ist. Der zweite Unterschied besteht bei den Abweichungen zwischen den erhobenen und den modellierten Erträgen. Diese Abweichung ist auf dem Praxisniveau der Nitratdauerstestflächen größer. Neben den zwischen Praxis und Versuchsstation unterschiedlichen Managementniveaus ist der Hauptgrund für die größeren Abweichungen darin zu sehen, dass bei den Nitratdauerstestflächen im Unterschied zu den Versuchsstationen nicht das am Ort herrschende Wetter in das Modell Eingang gefunden hat, sondern aus Mangel der Verfügbarkeit solcher Daten nur auf eine Wetterstation pro Kreis zurückgegriffen werden konnte.

6.3 BEFU-Anwenderbetriebe

Für eine gemeinde- bzw. betriebsbezogene Modellvalidierung von YIELDSTAT auf Praxisniveau wurden durch das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie für die Jahre 1997 - 2006 aus dem landesweiten Programm zur Düngebedarfsermittlung (BEFU) für N, P, K, Mg und Ca gemeindegrenzte Ertragsdaten (BEFU-Daten) bereitgestellt. Die bereitgestellten Daten lassen sich aber nicht schlaggenau, sondern nur gemeindegrenzt zuordnen. Da keine gemeindebezogenen Wetterdaten verfügbar gemacht werden können, wurde auch hier auf die nächstgelegenen Stationen des agrarmeteorologischen Messnetzes zurückgegriffen, die teilweise doch recht weit von den betrachteten Gemeinden entfernt sind. Für einen Vergleich wurden aus dem BEFU-Datensatz beispielhaft die Gemeinden der Kreise Torgau-Oschatz und Weißeritzkreis extrahiert. Für die Gemeinden im Kreis Torgau-Oschatz wurden die Wetterdaten der agrarmeteorologischen Station Köllitsch verwendet und für die Gemeinden im Weißeritzkreis die der Station Nossen.

Da für die BEFU-Daten kein direkter schlagbezogener Ertragsvergleich möglich ist, wurden mit dem Modell YIELDSTAT die Erträge der einzelnen Fruchtarten entsprechend ihrer Anbauwürdigkeit für alle Ackerschläge der Gemeinde berechnet. Daraus wurden für die einzelnen Fruchtarten gemeindebezogen flächengewichtete mittlere Erträge bestimmt. Vergleicht man diese mit den Erträgen aus den BEFU-Daten, sollten sie in der Regel kleiner oder gleich den BEFU-Erträgen sein, denn der Agrarbetrieb wird die einzelnen Fruchtarten immer gewinnbringend auf den eher besseren Böden anbauen. Diese Hypothese wird auch bestätigt, wie die Abbildungen 20 (Erträge für Einzeljahre über alle Gemeinden), 21 (Erträge für einzelne Gemeinden über die Jahre) und 22 (Erträge für alle Jahre und Gemeinden) am Beispiel des Winterweizens für den Kreis Torgau-Oschatz deutlich zeigen.

Auch dieser Datensatz mit gemeindebezogenen Erträgen zeigt im Jahr 2002 die Abweichungen zwischen den Praxiserträgen und den mit YIELDSTAT berechneten Erträgen (Abbildungen 20 [Mitte] und 22). Auch hier überschätzt das Modell die Erträge, die im Jahr 2002 gewachsen sind, die aber aus den schon weiter oben angeführten Gründen nicht in voller Höhe geerntet werden konnten.

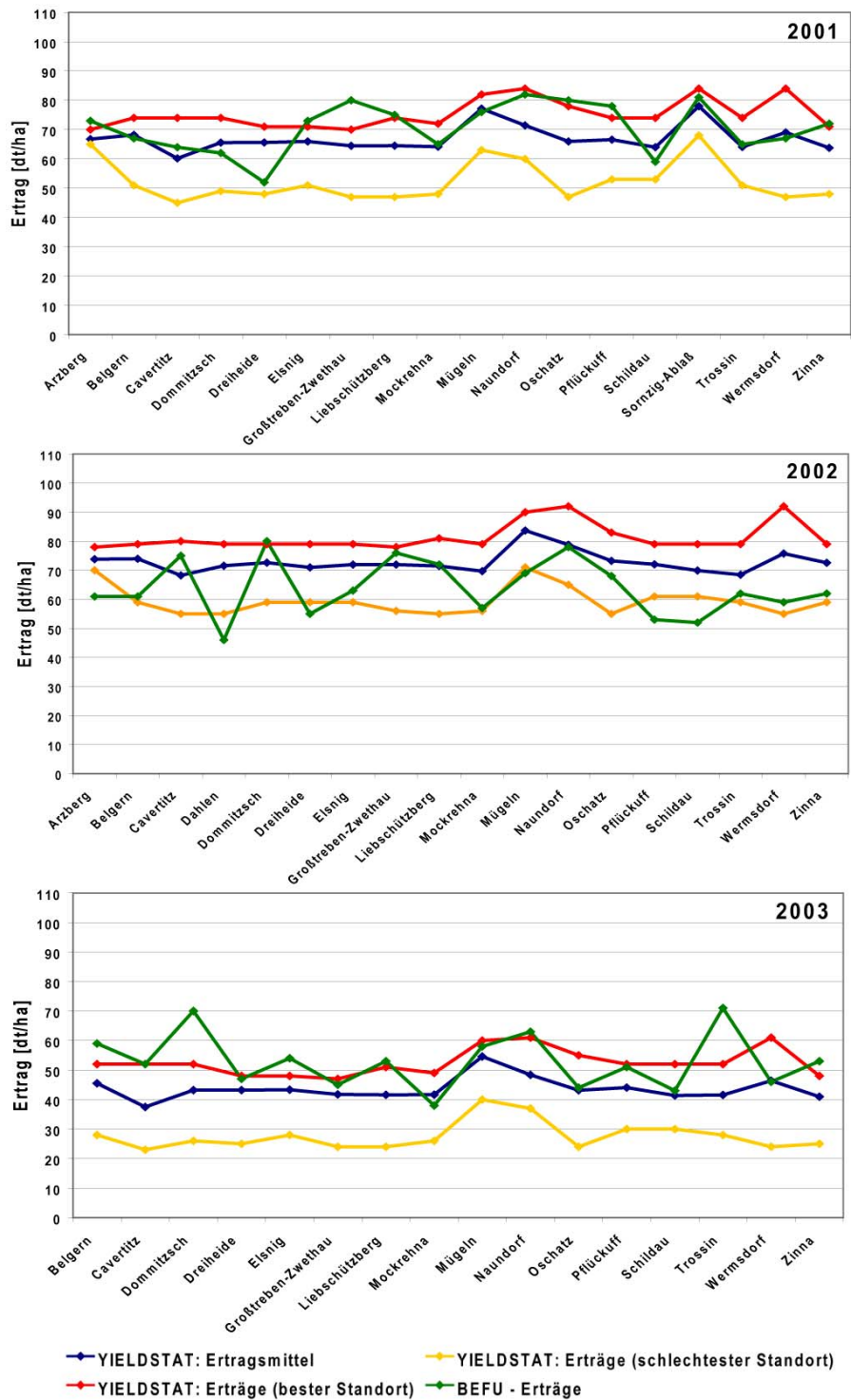


Abbildung 20: Vergleich der BEFU-Erträge auf Gemeindeebene mit den mit YIELDSTAT berechneten Erträgen für alle 18 Gemeinden des Kreises Torgau-Oschatz für die Jahre 2001 (oben), 2002 (Mitte) und 2003 (unten)

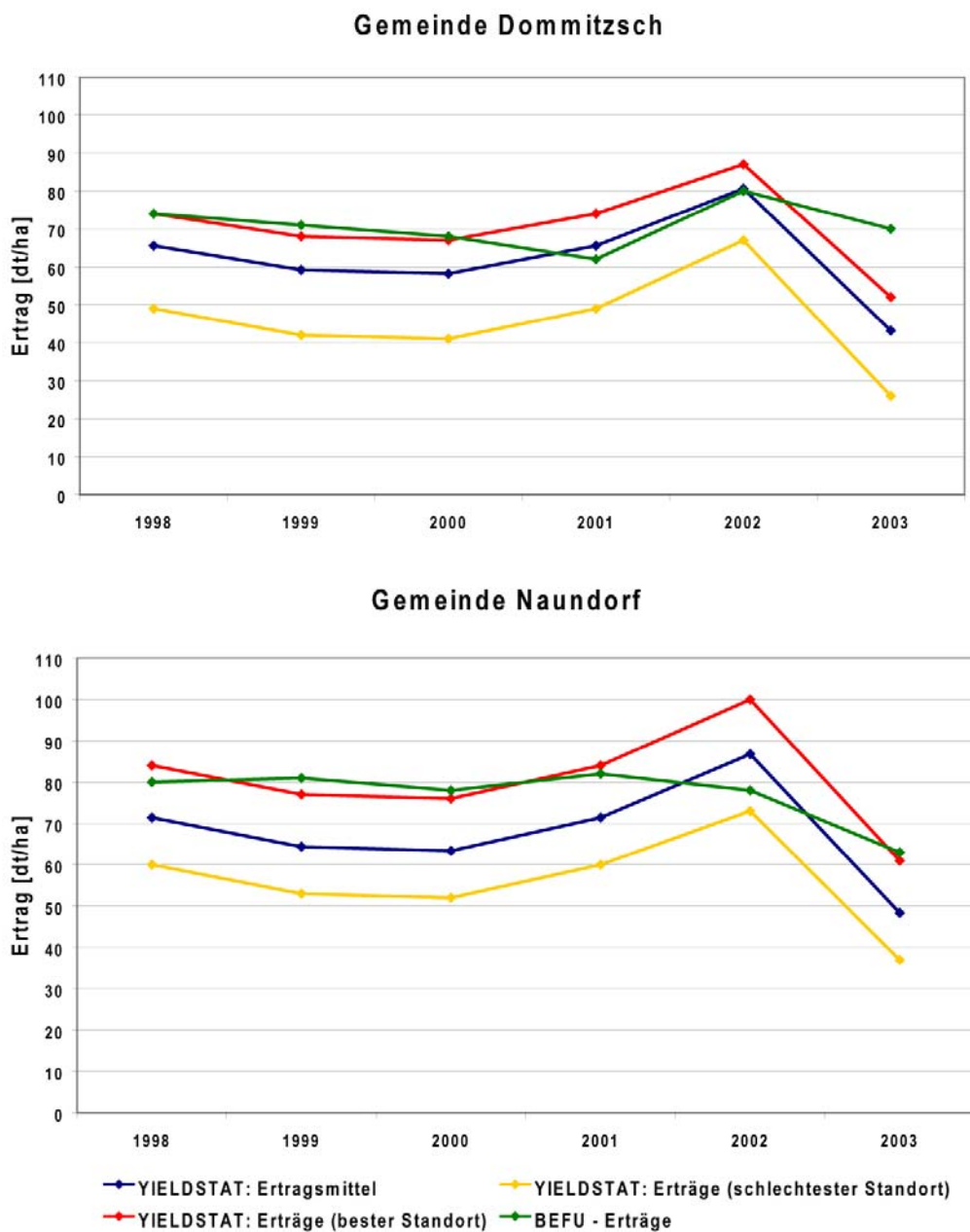


Abbildung 21: Vergleich der BEFU-Erträge auf Gemeindeebene mit den mit YIELDSTAT berechneten Erträgen für die Gemeinden Dommitzsch (oben) und Naundorf (unten) über die Jahre 1998 - 2003

6.4 Ertragsstatistik auf Landkreis- und Landesebene

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

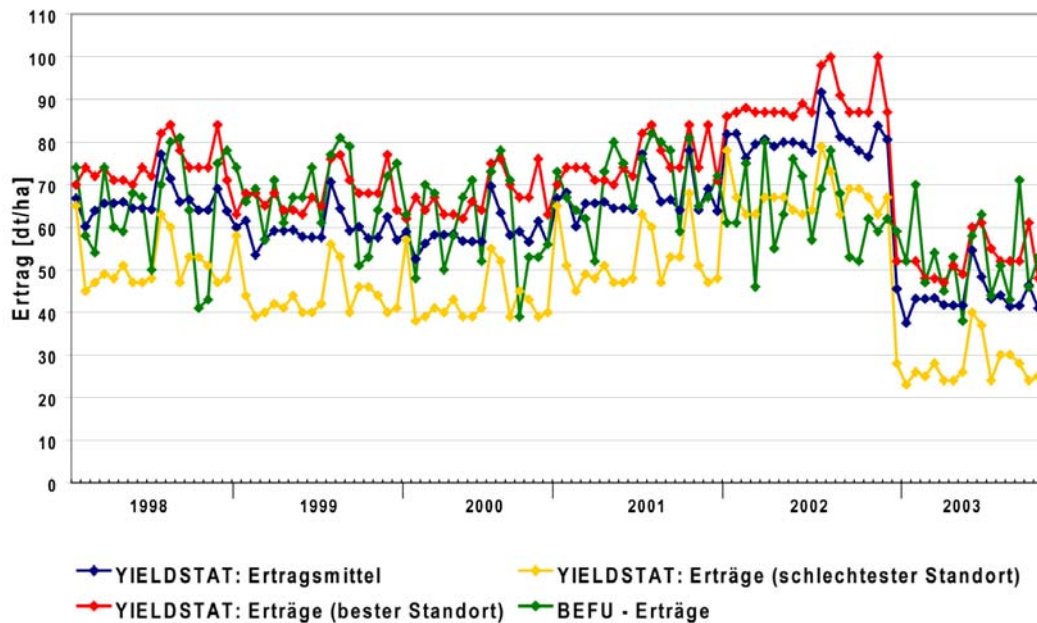


Abbildung 22: Vergleich der BEFU-Erträge auf Gemeindeebene mit den mit YIELDSTAT berechneten Erträgen für alle 18 Gemeinden des Kreises Torgau-Oschatz und alle Jahre (1998 - 2003)

Beispielhaft für die Landkreise Torgau-Oschatz und Weißeritzkreis ist in Abbildung 23 die räumliche Differenzierung der Ertragsleistung des Winterweizens dargestellt, und zwar relativ zum mittleren Kreisertrag, der gleich 100 % gesetzt wurde. Grundlage für die dargestellten Ergebnisse sind die Berechnungen mit den Wetterdaten des Jahres 2006.

Für einen Vergleich zwischen den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten Erträgen und den Kreis- bzw. Landeserträgen wurden die offiziellen Kreis- und Landesstatistiken des Statistischen Landesamtes des Freistaates Sachsen (<http://www.statistik.sachsen.de>) verwendet.

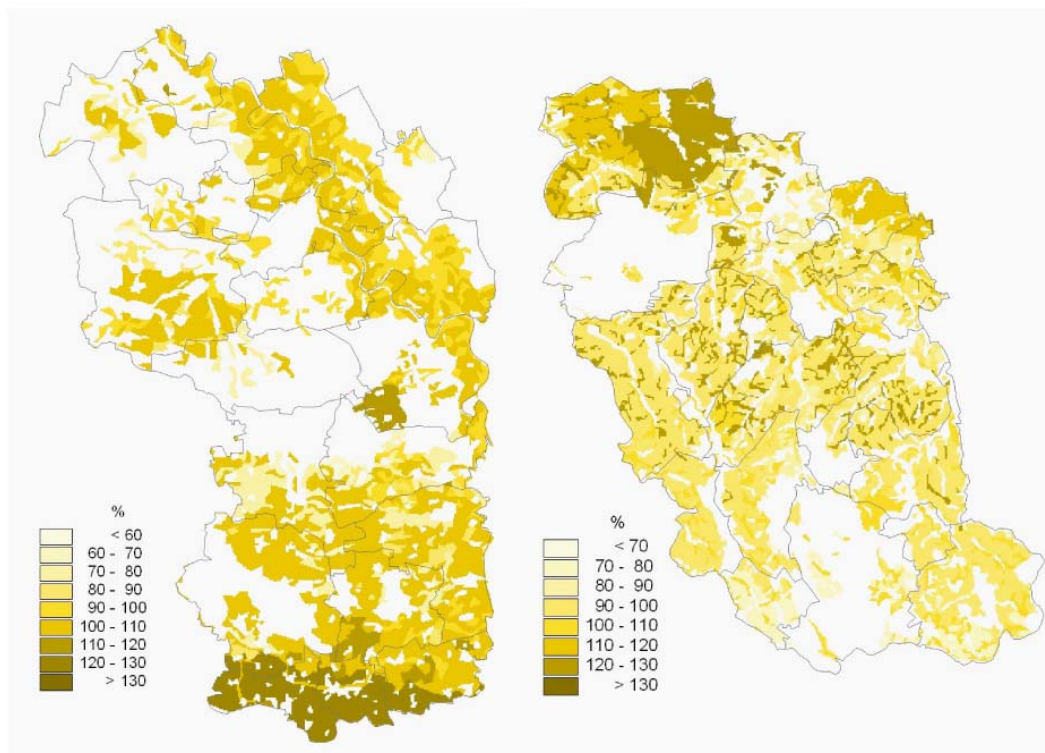


Abbildung 23: Räumliche Differenzierung der Ertragsleistung des Winterweizens auf den Ackerstandorten in den Landkreisen Torgau-Oschatz (links) und Weißeritzkreis (rechts), dargestellt relativ zum mittleren Kreisertrag (= 100 %); Grundlage: Modell YIELDSTAT, Jahr: 2006

6.4.1 Landkreisebene

Für eine Validierung des Modells YIELDSTAT auf Landkreisebene wurden die Kreise Torgau-Oschatz und Weißeritzkreis als zwei repräsentative Kreise ausgewählt, für die auch eine gute Datenlage vorhanden ist.

Da das Stationsnetz des DWD und auch das agrarmeteorologische Stationsnetz im Freistaat Sachsen nicht so dicht ist, dass eine flächenscharfe Zuordnung der realen Wetterdaten möglich wird, wurden für die Ertragsabschätzungen im Kreis Torgau-Oschatz die Wetterdaten der agrarmeteorologischen Station Köllitsch verwendet und für die Ertragsabschätzungen im Weißeritzkreis die der Station Nossen. Aufgrund der Datenverfügbarkeit wurde im Landkreis Torgau-Oschatz der Zeitraum 1998 - 2006 und im Weißeritzkreis der Zeitraum 2000 - 2006 berücksichtigt.

Für die Wintergetreidearten (Winterweizen, Winterroggen, Wintergerste) zeigt Abbildung 24 einen Vergleich der statistischen Kreiserträge mit den mittels YIELDSTAT berechneten Kreiserträgen, sowohl für den Kreis Torgau-Oschatz als auch für den Weißeritzkreis. Die gleiche Gegenüberstellung ist für Winterrraps und Silomais in Abbildung 25 zu finden.

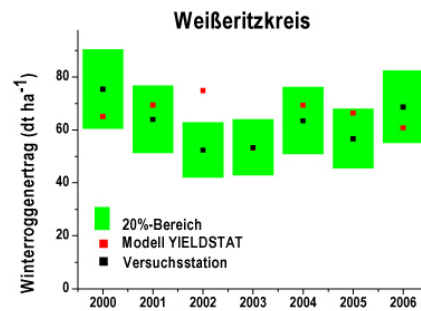
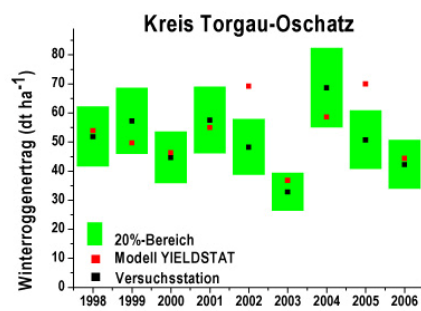
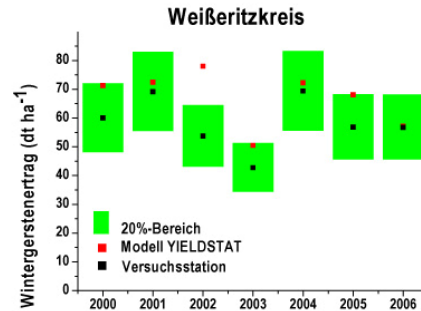
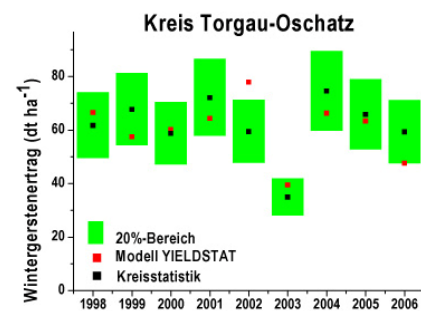
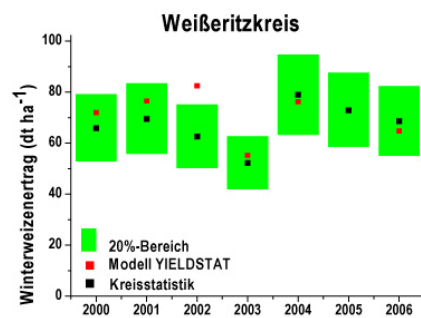
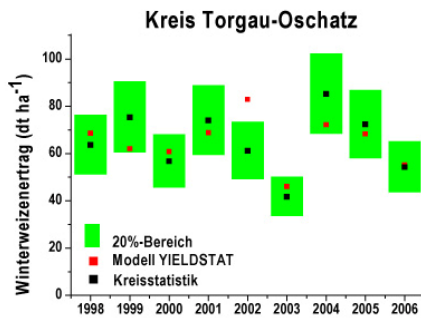


Abbildung 24: Vergleich der statistischen Kreiserträge mit den mittels YIELDSTAT berechneten Kreiserträgen für Winterweizen (oben), Wintergerste (Mitte) und Winterroggen (unten) für den Kreis Torgau-Oschatz (1998 - 2006) sowie den Weißeritzkreis (2000 - 2006)

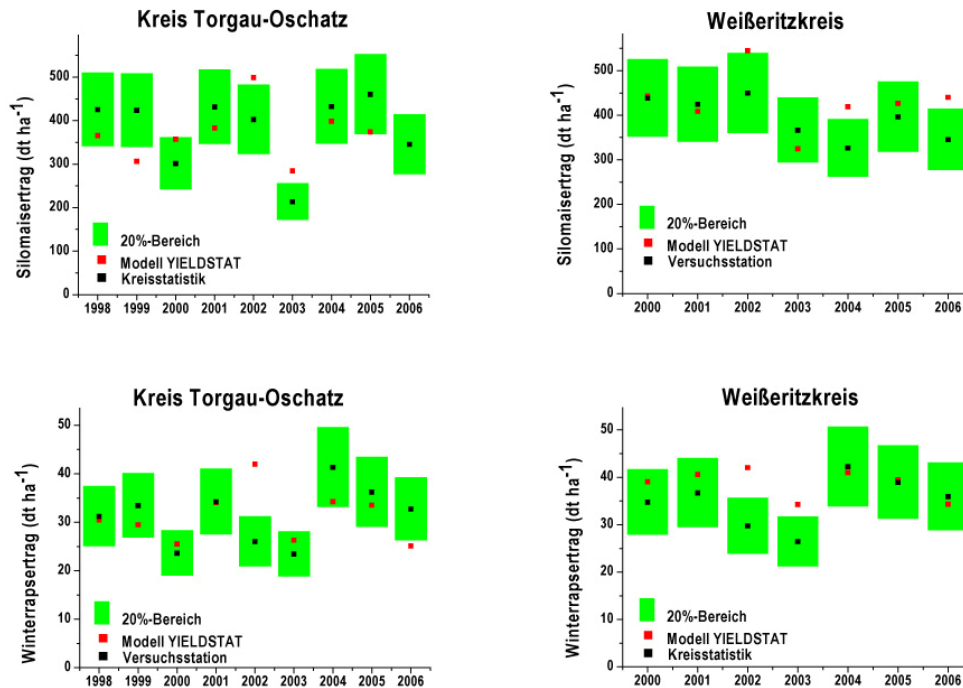


Abbildung 25: Vergleich der statistischen Kreiserträge mit den mittels YIELDSTAT berechneten Kreiserträgen für Silomais (oben) und Winterrapsertrag (unten) für den Kreis Torgau-Oschatz (1998 - 2006) sowie den Weißeritzkreis (2000 - 2006)

Auch bei der Modellvalidierung auf Kreisebene ist für das Jahr 2002 die Überschätzung des Ertrages durch YIELDSTAT gegenüber den im Kreis erhobenen Ernteerträgen deutlich zu erkennen (Abbildungen 24 und 25). Das trifft für beide Kreise und alle betrachteten Fruchtarten sowie für Silomais - aber nicht so stark ausgeprägt - zu. Die Begründung ist auch hier die gleiche wie auf Schlag-, Betriebs- und Gemeindeebene (AGARMETEOROLOGISCHE MONATSBERICHTE 2002a, 2002b, 2002c, 2002d).

Ein Modell-Praxis-Vergleich für die Erträge auf Kreisebene der fünf betrachteten Fruchtarten Winterweizen, Wintergerste, Winterroggen, Winterrapsertrag und Silomais über alle berücksichtigten Jahre und die beiden Kreise Torgau-Oschatz (1998 - 2006) und Weißeritzkreis (2000 - 2006) ist in Abbildung 26 zu finden.

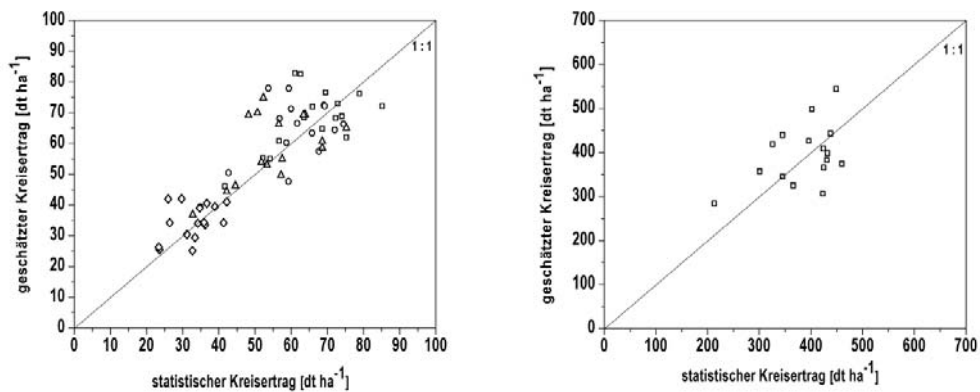


Abbildung 26: Modell-Praxis-Vergleich bezüglich der Kreislerträge für Winterweizen (□), Wintergerste (o), Winterroggen (Δ), Winterraps (◇) (links) und Silomais (rechts) für den Kreis Torgau-Oschatz (1998 - 2006) und den Weißeritzkreis (2000 - 2006)

Nach einer statistischen Verrechnung ergibt sich für die Regressionsgeraden durch den Koordinatenursprung [0,0] ein Anstieg für die Wintergetreidearten und Winterraps von 1,032 und für Silomais von 1,008. Im Vergleich zu Abbildung 19 (Praxisschlag-Ebene) ist bei den Kreislerträgen die Streuung um die Quadrantenhalbierende (1:1) geringer. Sie liegt im gleichen Bereich wie bei den Versuchsstationen (Abbildung 17). Ein Grund besteht darin, dass es sich hier um mittlere Erträge für einen ganzen Kreis handelt und dass damit ja schon die Schwankungsbreite bei den Erträgen auf Praxisschlagebene, die in den Kreisen existent ist (siehe Abbildung 19), statistisch bedingt kleiner ist.

Ein Vergleich zwischen den statistischen Kreislerträgen und den mittels YIELDSTAT berechneten Kreislerträgen ist für die betrachteten Fruchtarten und die Kreise Torgau-Oschatz und Weißeritzkreis in Tabelle 10 statistisch zusammengefasst.

Tabelle 10: Vergleich der Erträge aus der Kreisstatistik mit den auf der Basis von YIELDSTAT berechneten Kreislerträgen für Winterweizen, Wintergerste, Winterroggen, Winterraps und Silomais für die Kreise Torgau-Oschatz (1998 - 2006) und Weißeritzkreis (2000 - 2006)

Fruchtart	Ertrag (Kreisstatistik) (dt ha ⁻¹)				Ertrag (Modell YIELDSTAT) (dt ha ⁻¹)			
	Mittel	Min.	Max.	Median	Mittel	Min.	Max.	Median
Winterweizen	65,9	41,7	85,2	67,2	67,8	46,0	82,9	68,6
Wintergerste	60,4	34,9	74,5	60,0	63,6	39,4	76,3	57,9
Winterroggen	55,4	32,8	75,3	55,0	58,9	36,8	74,8	59,6
Winterraps	32,9	23,4	42,2	33,8	34,4	25,1	42,1	34,2
Silomais	386	213	460	412	395	284	545	390

Im Mittel der berücksichtigten Jahre ist bei den Erträgen auf Kreisebene für alle fünf Fruchtarten eine gute Übereinstimmung zwischen Kreisstatistik und YIELDSTAT zu erkennen. Auch beim

Median sowie bei der Ertragsspanne zwischen Ertragsminimum und Ertragsmaximum liegt eine gute Übereinstimmung vor.

6.4.2 Landesebene

Für eine Validierung des Modells YIELDSTAT auf Landesebene wurde der Freistaat Sachsen entsprechend der Boden-Klima-Regionen (Abbildung 2) in mehrere Teilgebiete unterteilt. Da eine Regionalisierung der realen Wetterdaten nicht möglich war, wurde jeder Boden-Klima-Region eine repräsentative DWD-Station zugeordnet (Tabelle 11), mit der dann wetterseitig unter Berücksichtigung der regionalisierten Boden- und Standortinformationen für das jeweilige Teilgebiet die jahresbezogenen Ertragsabschätzungen mit YIELDSTAT realisiert wurden. Die fruchtartbezogenen mittleren Erträge für den Freistaat Sachsen wurden durch eine flächengewichtete Mittlung der teilgebietsbezogenen Erträge bestimmt.

Tabelle 11: Zuordnung repräsentativer DWD-Stationen zu den Boden-Klima-Regionen des Freistaates Sachsen

Boden-Klima-Region	DWD-Station
Oberlausitz, Sächsische Schweiz	Görlitz
Erzgebirgskamm und -vorland, Vogtland, Elsterbergland	Marienberg
Mittelsächsisches Lössgebiet	Chemnitz
Sächsisches Heidegebiet, Riesaer-Torgauer Elbtal (Ost)	Cottbus
Sächsisches Heidegebiet, Riesaer-Torgauer Elbtal (West)	Leipzig-Schkeuditz

Die mit YIELDSTAT berechneten Landeserträge für den Freistaat Sachsen sind in Tabelle 12 und in Abbildung 27 den Landeserträgen aus der Landesstatistik (<http://www.statistik.sachsen.de>) gegenübergestellt, beispielhaft für Winterweizen, Winterraps und Silomais. Dabei wurden die Jahre 1998 - 2006 berücksichtigt.

Bei der Modellvalidierung auf Landesebene überschätzt das Modell YIELDSTAT bei allen drei Fruchtarten den Landesertrag bis 2003 leicht. In den Jahren ab 2004 wird bei Winterweizen und Winterraps eine sehr gute Übereinstimmung mit der Landesstatistik erreicht, bei Silomais dagegen liegt auch hier eine leichte Überschätzung durch das Modell vor (Abbildung 27, Tabelle 12). Ein wichtiger Grund für die Abweichungen zwischen den Erträgen der Landesstatistik und den mit YIELDSTAT abgeschätzten Landeserträgen liegt darin, dass das Territorium des Freistaates Sachsens wetterseitig nur durch fünf DWD-Stationen (Tabelle 11) abgedeckt wurde.

Tabelle 12: Vergleich der Erträge für Winterweizen, Winterraps und Silomais des Freistaates Sachsen aus der Landesstatistik mit den mit dem Modell YIELDSTAT berechneten mittleren Landeserträgen (1998 - 2006)

Jahr	Winterweizen		Winterraps		Silomais	
	Landesstatistik (dt ha ⁻¹)	Modell YIELDSTAT (dt ha ⁻¹)	Landesstatistik (dt ha ⁻¹)	Modell YIELDSTAT (dt ha ⁻¹)	Landesstatistik (dt ha ⁻¹)	Modell YIELDSTAT (dt ha ⁻¹)
1998	66,4	68,2	34,2	40,3	472	474
1999	70,6	78,2	34,7	39,2	449	466
2000	64,7	72,9	32,4	37,9	419	508
2001	71,9	76,7	35,2	40,7	416	424
2002	62,0	86,0	28,4	42,5	429	570
2003	49,3	57,5	26,8	35,1	318	371
2004	81,1	79,0	41,8	40,4	388	437
2005	74,4	78,8	37,7	40,1	443	505
2006	61,4	61,9	34,9	34,2	347	408

Wie bei den anderen Validierungsebenen tritt auch auf Landesebene bei allen betrachteten Fruchtarten im Jahr 2002 die signifikante Differenz zwischen den statistisch erhobenen Ernteerträgen und den mit Hilfe von YIELDSTAT berechneten Erträgen deutlich hervor (Abbildung 27). Die Erklärung dafür ist die gleiche wie in den davor realisierten Modellvalidierungsschritten auf Schlag-, Betriebs-, Gemeinde- und Kreisebene. Insgesamt aber wird deutlich, dass das Modell YIELDSTAT der Ertragsdynamik über die Jahre auf Landesebene gut folgen kann, auch wenn keine regionalisierten realen Wetterdaten verwendet werden konnten.

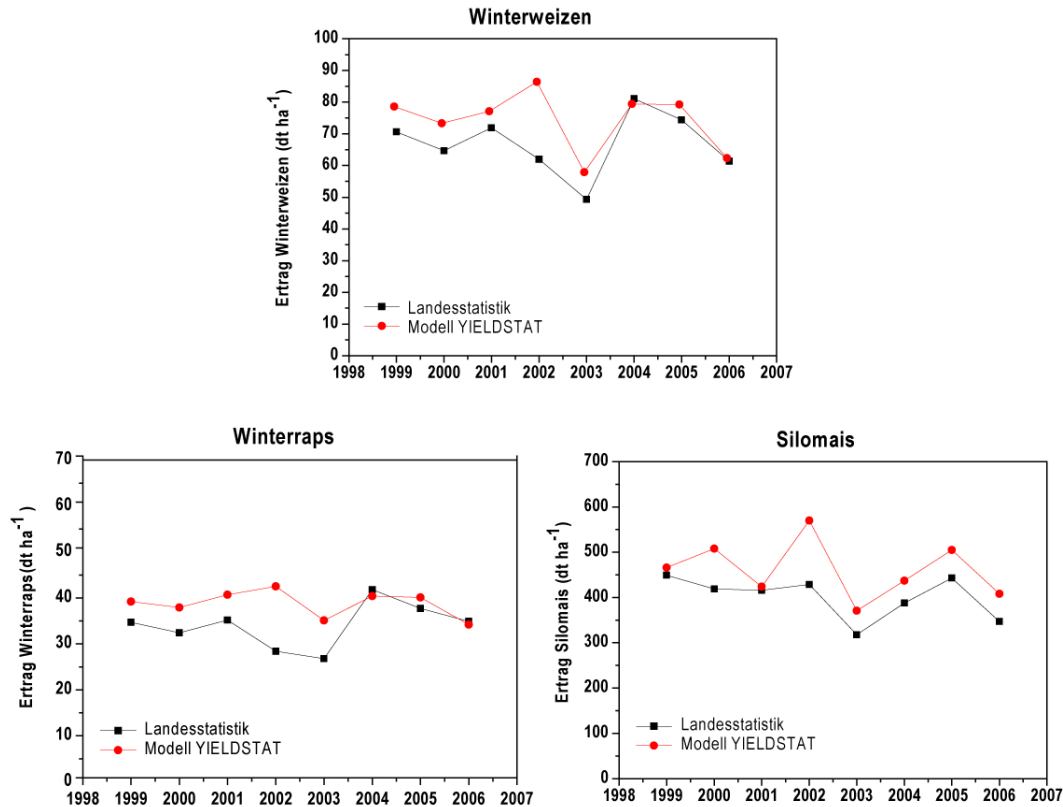


Abbildung 27: Landeserträge des Freistaates Sachsen für Winterweizen, Winterraps und Silomais im Vergleich zwischen der Landesstatistik und dem Modell YIELDSTAT

7 YIELDSTAT-Modellvergleich: Realwetterdaten vs. WEREX-A1B-Daten

Nachdem für das Modell YIELDSTAT eine Modellvalidierung für verschiedene Aggregationsniveaus zwischen Schlag- und Landesebene unter Nutzung von realen Wetterdaten stattgefunden hat, ist es für Ertragsabschätzungen für in der Zukunft liegende Zeitspannen notwendig zu klären, welche Auswirkungen es hat, wenn von realen Wetterdaten übergegangen wird zu den WEREX-A1B-Daten.

Zur Beantwortung dieser Frage wurden für den Zeitraum 1996 - 2006 und die fünf Boden-Klima-Regionen mit ihren zugeordneten DWD-Stationen (Tabelle 11) Ertragsabschätzungen mit dem Modell YIELDSTAT durchgeführt, zum einen mit den realen Wetterdaten von 1996 - 2006 und zum anderen mit den beiden WEREX-A1B-Realisierungen „feucht“ (WEREX-A1B-FEU) und „trocken“ (WEREX-A1B-TRO), ebenfalls für den Zeitraum 1996 - 2006. Beispielhaft wurden diese Untersuchungen für die Fruchtarten Winterweizen, Winterraps und Silomais realisiert.

Ein jahresgenauer Vergleich der meteorologischen Standardgrößen Temperatur, Niederschlag und Strahlung der realen Wetterdaten mit denen der synthetisch erzeugten WEREX-A1B-Daten lässt erkennen, dass sich die Einzeljahre nicht vergleichen lassen und dass sich in den beiden Datensätzen für ein konkretes Jahr der Witterungsverlauf sowie auch das Gesamtjahr teilweise

sehr deutlich unterscheiden. In Abbildung 28 wird das am Beispiel der DWD-Station Chemnitz für die Temperatur und den Niederschlag verdeutlicht.

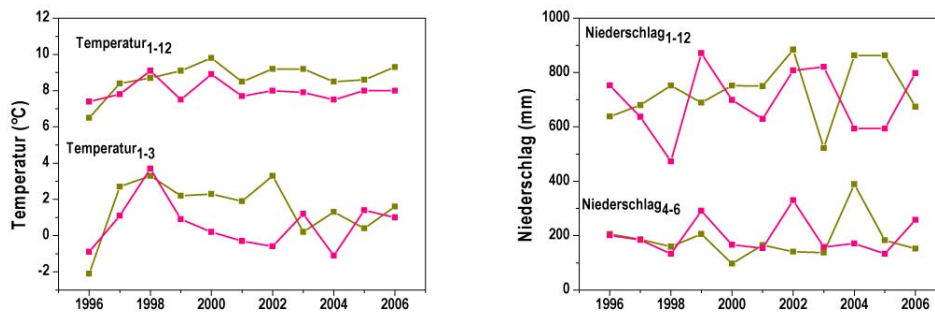


Abbildung 28: Vergleich von realen Wetterdaten (oliv) und WEREX-A1B-Daten (rot) für die DWD-Station Chemnitz im Zeitraum 1996-2006, dargestellt für die Temperatur (Temperatur₁₋₁₂ – Jahresmitteltemperatur, Temperatur₁₋₃ – Durchschnittstemperatur im 1. Quartal) und den Niederschlag (Niederschlag₁₋₁₂ – Jahresniederschlag, Niederschlag₄₋₆ – Niederschlagssumme von April bis Juni)

Das führt auch dazu, dass die mit YIELDSTAT realisierten Ertragsschätzungen einzeljahresbezogen nicht vergleichbar sind, denn die Wetterdatenbasis ist einmal das Real-Wetter und zum anderen ist es das WEREX-A1B-Wetter (synthetische Wetterdaten). In Tabelle 13 und Abbildung 29 wird das am Beispiel des Winterweizenertrages für das Mittelsächsische Lössgebiet mit der DWD-Station Chemnitz deutlich.

Tabelle 13: Einzeljahresvergleich für die Jahresmitteltemperatur ($\bar{\varnothing}JT$), die mittlere Temperatur im 1. Quartal ($\bar{\varnothing}T_{1-3}$), die Jahresniederschlagssumme (ΣJN), die Niederschlagssumme im 2. Quartal (ΣN_{4-6}) der DWD-Station Chemnitz sowie den mit YIELDSTAT für das Mittelsächsische Lössgebiet berechneten Winterweizen-ertrag (E) zwischen realem Wetter und WEREX-A1B-FEU-Wetter (1996 - 2006)

Jahr	reales Wetter					WEREX-A1B-FEU				
	$\bar{\varnothing}JT$ (°C)	$\bar{\varnothing}T_{1-3}$ (°C)	ΣJN (mm)	ΣN_{4-6} (mm)	E (dt/ha)	$\bar{\varnothing}JT$ (°C)	$\bar{\varnothing}T_{1-3}$ (°C)	ΣJN (mm)	ΣN_{4-6} (mm)	E (dt/ha)
1996	6,5	-2,1	638	206	64,0	7,4	-0,9	753	201	84,1
1997	8,4	2,7	680	186	73,1	7,8	1,1	637	184	74,1
1998	8,7	3,3	752	159	83,6	9,1	3,7	473	133	68,5
1999	9,1	2,2	689	206	86,1	7,5	0,9	871	291	82,4
2000	9,8	2,3	752	97	78,5	8,9	0,2	699	166	86,1
2001	8,5	1,9	750	165	82,5	7,7	-0,3	629	154	80,4
2002	9,2	3,3	884	141	89,9	8,0	-0,6	808	330	80,5
2003	9,2	0,2	522	137	65,8	7,9	1,2	821	158	85,5
2004	8,5	1,3	863	389	88,5	7,5	-1,1	594	171	77,6
2005	8,6	0,4	863	183	86,6	8,0	1,4	594	133	77,9
2006	9,3	1,6	674	152	70,1	8,0	1,0	798	258	95,7

In allen betrachteten Einzeljahren gibt es wetterseitig signifikante Differenzen, sowohl bei den Temperaturen ($\Delta \bar{\varnothing}JT$: -1,6 ... 0,9 °C, $\Delta \bar{\varnothing}T_{1-3}$: -1,9 ... 3,9 °C) als auch bei den Niederschlägen ($\Delta \Sigma JN$: -279 ... 279 mm; $\Delta \Sigma N_{4-6}$: -218 ... 189 mm) und seiner Verteilung. Daraus folgen natürlich auch Abweichungen bei den mit dem Modell YIELDSTAT geschätzten Winterweizenerträgen (ΔE : -15,1 ... 25,6 dt ha⁻¹). Besonders ausgeprägt sind die Ertragsunterschiede in den Jahren 1996, 2003 und 2006, wo die Erträge bei Verwendung der WEREX-A1B-FEU-Daten signifikant höher liegen. Der Hauptgrund ist in der besseren Wasserversorgung ($\Delta \Sigma JN$ bis ca. 300 mm) zu sehen und im Jahr 1996 zusätzlich auch noch in den höheren Temperaturen. In den Jahren 1998 und 2004 dagegen liegen die Erträge bei Verwendung der WEREX-A1B-FEU-Daten signifikant niedriger, was auf eine geringere Wasserversorgung bei gleichzeitig auch niedrigeren Temperaturen zurück zu führen ist. Eine ähnliche Situation ist auch bei den anderen Fruchtarten und Boden-Klima-Regionen zu beobachten.

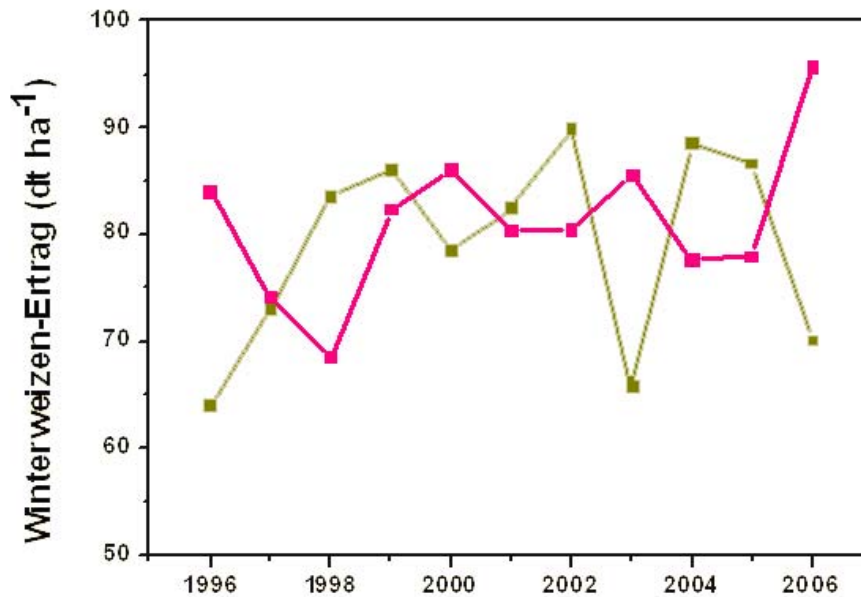


Abbildung 29: Vergleich der mit YIELDSTAT für das Mittelsächsische Lössgebiet berechneten Winterweizenerträge (reale Wetterdaten oliv, WEREX-A1B-Daten rot; DWD-Station Chemnitz; 1996 - 2006)

Für einen Ertragsvergleich bei unterschiedlichen Wetterdatengrundlagen darf daher niemals auf Einzeljahre zurückgegriffen werden. Hierfür sind jeweils mindestens 10-jährige Zeiträume zu berücksichtigen, über die dann eine Ertragsmittelung erfolgen muss. Erst der Vergleich dieser zeitraumgemittelten Erträge lässt eine Aussage zu, wie groß der mittlere Fehler ist, der durch den Wechsel von der Realwetter-Datenbasis zur WEREX-A1B-Datenbasis hervorgerufen wird.

In Tabelle 14 sind für die einzelnen Boden-Klima-Regionen beispielhaft für Winterweizen, Winterrapen und Silomais die über den Zeitraum 1996 - 2006 gemittelten YIELDSTAT-Erträge, die zum einen auf der Basis der realen Wetterdaten und zum anderen auf der Basis der WE-REX-A1B-FEU-Daten bzw. WEREX-A1B-TRO-Daten berechnet wurden, gegenüber gestellt.

Vergleicht man in Tabelle 14 die YIELDSTAT-Erträge als Mittel über die beiden WEREX-Realisierungen (WEREX-A1B-FEU und WEREX-A1B-TRO) mit den YIELDSTAT-Erträgen bei Nutzung des realen Wetters, dann ergibt sich gemittelt über alle fünf Boden-Klima-Regionen eine Abweichung von $0,82 \text{ dt ha}^{-1}$ für Winterweizen, von $0,64 \text{ dt ha}^{-1}$ für Winterrapen und von $-11,3 \text{ dt ha}^{-1}$ für Silomais. Die prozentualen Abweichungen sowohl der WEREX-A1B-FEU-Realisierung als auch der WEREX-A1B-TRO-Realisierung bezogen auf die mit YIELDSTAT realisierte Ertragsschätzung mit realen Wetterdaten liegen in der Regel im Bereich bis 10 % und in den meisten Fällen sogar weit darunter. Eine Abweichung größer 10 %, aber kleiner 15 % tritt nur bei der WEREX-A1B-FEU-Realisierung in der Boden-Klima-Region „Sächsisches Heidegebiet, Riesaer-Torgauer Elbtal

(West)“ auf. Das deutet darauf hin, dass hier im Zeitraum 1996 - 2006 eine große Diskrepanz besteht zwischen den realen Wetterdaten und den WEREX-A1B-FEU-Daten.

Tabelle 14: Vergleich der über 11 Jahre (1996 - 2006) gemittelten YIELDSTAT-Erträge für Winterweizen, Winterraps und Silomais, berechnet auf der Basis von realen Wetterdaten sowie WEREX-A1B-Daten, aufgesplittet für die einzelnen Boden-Klima-Regionen des Freistaates Sachsen (in Klammern – prozentuale Abweichung bezogen auf die Ertragsschätzung mit realem Wetter)

Boden-Klima-Region Fruchtart	YIELDSTAT-Ertrag (dt ha ⁻¹)		
	reales Wetter	WEREX-A1B-FEU	WEREX-A1B-TRO
Oberlausitz, Sächsische Schweiz			
Winterweizen	70,2	68,5 (2,4 %)	74,9 (6,7 %)
Winterraps	36,6	38,1 (4,1 %)	38,7 (5,7 %)
Silomais	431	429 (4,6 %)	434 (7,0 %)
Erzgebirgskamm und -vorland, Vogtland, Elsterbergland			
Winterweizen	72,4	67,5 (6,8 %)	71,6 (1,1 %)
Winterraps	37,8	36,0 (4,8 %)	37,6 (0,5 %)
Silomais	461	405 (12,1 %)	422 (8,4 %)
Mittelsächsisches Lössgebiet			
Winterweizen	78,8	81,0 (2,8 %)	72,1 (8,5 %)
Winterraps	40,4	39,7 (1,7 %)	38,5 (4,7 %)
Silomais	486	478 (1,6 %)	429 (11,7 %)
Sächsisches Heidegebiet, Riesaer-Torgauer Elbtal (Ost)			
Winterweizen	56,7	61,3 (8,1 %)	55,8 (1,6 %)
Winterraps	35,5	37,6 (5,9 %)	34,4 (3,1 %)
Silomais	382	392 (2,6 %)	352 (7,8 %)
Sächsisches Heidegebiet, Riesaer-Torgauer Elbtal (West)			
Winterweizen	65,4	74,9 (14,5 %)	69,4 (6,1 %)
Winterraps	35,4	39,9 (12,7 %)	37,3 (5,3 %)
Silomais	396	454 (14,6 %)	406 (2,5 %)

Bezogen auf die einzelnen Boden-Klima-Regionen schwanken die über die beiden WEREX-A1B-Realisierungen gemittelten Abweichungen bei Winterweizen zwischen - 2,8 ... 4,0 dt ha⁻¹ (1,4 ... 10,2 %), bei Winterraps zwischen - 1,3 ... 1,9 dt ha⁻¹ (1,4 ... 9,0 %) und bei Silomais zwischen - 47 ... 34 dt ha⁻¹ (0,1 ... 10,2 %).

Die bei gleicher Modellgrundlage (hier Modell YIELDSTAT) durch den Wechsel von der Realwetter-Datenbasis zur WEREX-A1B-Datenbasis hervorgerufenen Abweichungen bei den errechneten YIELDSTAT-Erträgen für Winterweizen, Winterraps und Silomais liegen in einem relativ kleinen Bereich. Damit ist gerechtfertigt, dass Klimaszenario-Simulationen auf der Basis von WEREX-A1B-Daten durchgeführt werden können, ohne bei den abzuleitenden Gesamtaussagen einen großen zusätzlichen Fehler zu machen. Voraussetzung aber ist immer, dass für diese Aussagen größere

Zeiträume berücksichtigt werden, niemals Einzeljahre. Bei klimabezogenen Szenariosimulationen sollten für vergleichende Betrachtungen die berücksichtigten Zeiträume 30 Jahre umfassen (FRANKE 2008).

8 Klimaszenario-Simulationen mit WEREX-A1B-Daten – Ergebnisse und Diskussion

Eine belastbare Abschätzung klimaänderungsbedingter Ertragsveränderungen kann nur auf der Basis von Mittelwerten über langjährige Zeitspannen vorgenommen werden. Seitens der Klimatologie werden dafür Zeiträume von 30 Jahren angestrebt (FRANKE 2008). In der vorliegenden Studie wurden hierfür die beiden 30-jährigen Zeitperioden 1976 - 2005 und 2021 - 2050 in Betracht gezogen. Um die Ertragssimulationen mit homogenen Datensätzen durchführen zu können, wurden für beide Zeitperioden, sowohl für die vergangene als auch für die in der Zukunft liegende, auf die WEREX-A1B-Daten (Kontrolllauf und Projektion) zurückgegriffen.

Um auch eine Aussage zur Variation in den Ertragsänderungen zu erhalten, wurden die Szenariosimulationen mit dem Modell YIELDSTAT zur Ertragsschätzung für die beiden WEREX-Realisierungen „feucht“ (WEREX-A1B-FEU) und „trocken“ (WEREX-A1B-TRO) durchgeführt, wobei je drei Varianten gerechnet werden:

- Variante 1 : ohne CO₂-Düngungseffekt, ohne wissenschaftlich-technischen Fortschritt
 (kurz: ohne CO₂, ohne Trend)
- Variante 2 : mit CO₂-Düngungseffekt, ohne wissenschaftlich-technischen Fortschritt
 (kurz: mit CO₂, ohne Trend)
- Variante 3 : mit CO₂-Düngungseffekt, mit wissenschaftlich-technischen Fortschritt
 (kurz: mit CO₂, mit Trend).

Die dabei mit dem Modell YIELDSTAT erzielten Ergebnisse werden zum einen für den gesamten Freistaat Sachsen zusammengefasst und zum anderen für die einzelnen Boden-Klima-Regionen:

- Erzgebirgskamm und -vorland, Vogtland, Elsterbergland
- Oberlausitz, Sächsische Schweiz
- Mittelsächsisches Lössgebiet
- Sächsisches Heidegebiet, Riesaer-Torgauer Elbtal (westlicher Teil)
- Sächsisches Heidegebiet, Riesaer-Torgauer Elbtal (östlicher Teil).

Bei den flächenbezogenen Simulationsrechnungen werden regionalisierte WEREX-A1B-Daten genutzt.

8.1 Freistaat Sachsen

Für Variante 1 (ohne CO₂, ohne Trend) sind in Abbildung 30 für Winterweizen, Winterroggen und Wintergerste und in Abbildung 31 für Winterraps und Silomais die Ergebnisse der Ertragssimulation der beiden Zeiträume 1976 - 2005 und 2021 - 2050 gegenübergestellt.

Bei allen fünf Fruchtarten kann man bei der räumlichen Verteilung der Erträge eine deutliche Übereinstimmung mit der Verteilung der unterschiedlichen Böden im Freistaat Sachsen erkennen, d.h. auf den besten Böden werden in beiden Simulationszeiträumen die höchsten Erträge erzielt. Ein Ertragsvergleich zwischen den beiden Simulationszeiträumen lässt in den Abbildungen 30 und 31 eine leichte Abnahme der Erträge in 2021 - 2050 gegenüber 1976 - 2005 erkennen. Bei einem genauen Vergleich erkennt man, dass die Ertragsänderung nicht überall gleich ist. So gibt es Regionen in Sachsen, in denen ohne Berücksichtigung des wissenschaftlich-technischen Fortschritts und des CO₂-Düngungseffektes mit einem Ertragszuwachs zu rechnen ist, wie aus dem Maximalwert in Tabelle 15 sowohl für die „feuchte“ (WEREX-A1B-FEU) als auch für die „trockene“ WEREX-Realisierung (WEREX-A1B-TRO) hervor geht. Eine Ausnahme bildet hier lediglich der Silomais, bei dem die maximalen Ertragsänderungen nur geringfügig negativ sind.

Bei den Veränderungen im Ertrag zwischen 1976 - 2005 und 2021 - 2050 treten innerhalb Sachsens deutliche territoriale Unterschiede auf. Regionalisiert für Sachsen gibt Abbildung 32 Variante 1 für alle betrachteten Fruchtarten die relativen Ertragsunterschiede zwischen den beiden Zeiträumen wieder, und zwar als Mittel aus beiden WEREX-Realisierungen (WEREX-A1B-FEU und WEREX-A1B-TRO).

Territorial liegen die Gebiete mit einem zu erwartenden leichten Ertragszuwachs im südlichen und südwestlichen Teil von Sachsen, d. h. im Erzgebirge (bis östlich der Elbe) sowie im südlichen Vogtland und im Elsterbergland. Sie konzentrieren sich dabei auf die Boden-Klima-Region „Erzgebirgskamm und -vorland, Vogtland, Elsterbergland“. Die größten relativen Ertragsverluste in der betrachteten Variante 1 finden sich im östlichen Teil der Boden-Klima-Region „Sächsisches Heidegebiet, Riesaer-Torgauer Elbtal“ (leichte Böden mit geringer Wasserhaltefähigkeit). Nicht ganz so deutlich ausgeprägte Ertragsverluste sind im Vogtland, im Erzgebirgsvorland, im westlichen Teil der Boden-Klima-Region „Mittelsächsisches Lössgebiet“ und im Gebiet zwischen Torgau und Leipzig zu erkennen.

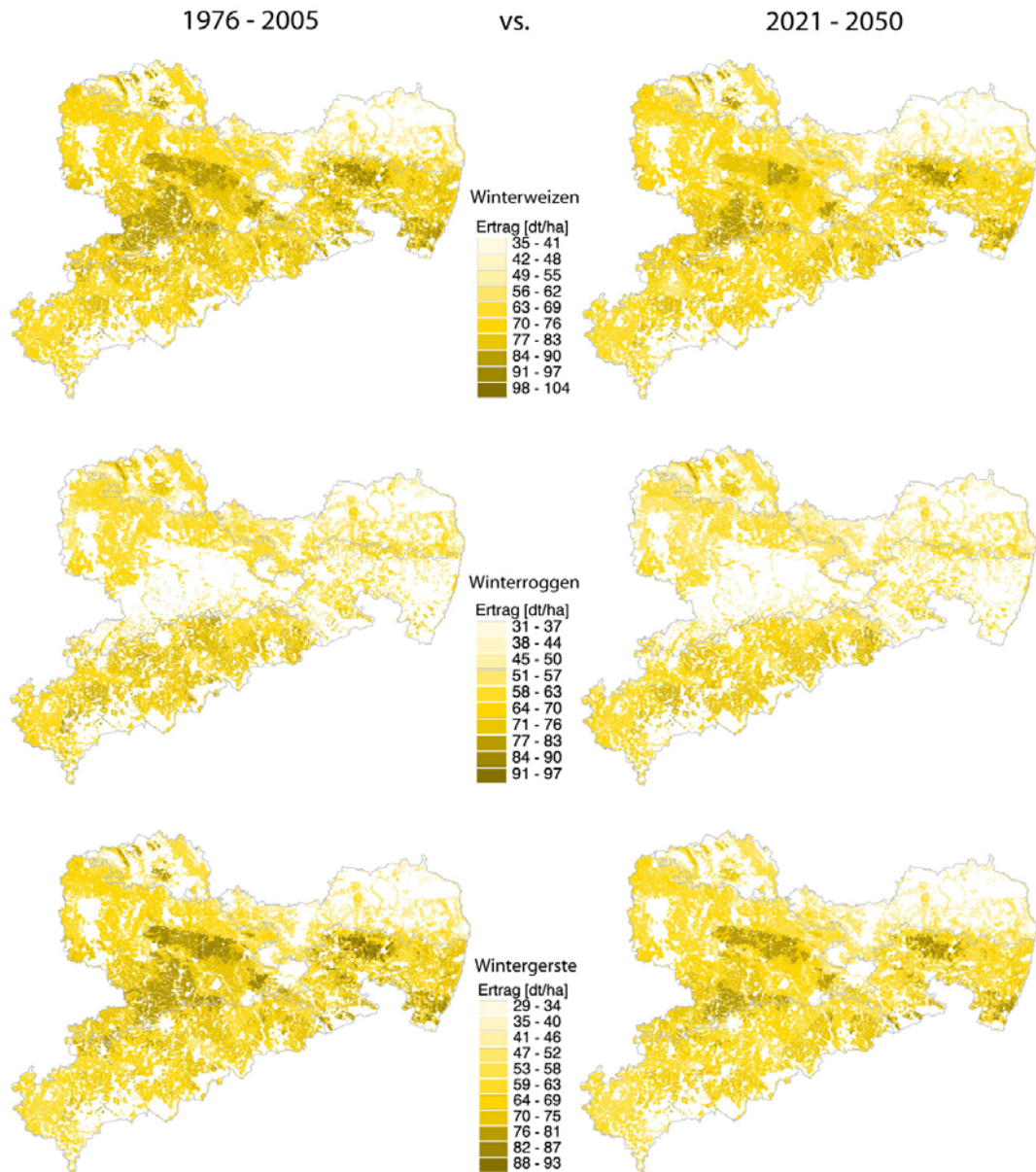


Abbildung 30: Erträge für Winterweizen (oben), Winterroggen (Mitte) und Wintergerste (unten) im Vergleich 1976 - 2005 vs. 2021 - 2050, regionalisiert für den Freistaat Sachsen (Basis: Modell YIELDSTAT, WEREX-Realisierung: WEREX-A1B-FEU)

Tabelle 15: Absolute (dt ha⁻¹) und relative (%) Ertragsänderungen für den Zeitraum 2021 - 2050 im Vergleich zu 1976 - 2005 bezogen auf den Freistaat Sachsen (Variante 1: ohne CO₂-Düngungseffekt, ohne wissenschaftlich-technischen Fortschritt, WEREX-A1B-Realisierungen: WEREX-A1B-FEU, WEREX-A1B-TRO)

Fruchtart	Realisierung	absolute Änderung (dt ha ⁻¹) 2021 - 2050 vs. 1976 - 2005			relative Änderung (%) 2021 - 2050 vs. 1976 - 2005		
		Min.	Max.	Mittel	Min.	Max.	Mittel
Winterweizen	feucht	-6,4	4,9	-3,4	-10,4	7,5	-4,6
	trocken	-6,8	5,7	-3,6	-12,6	8,5	-5,2
Winterroggen	feucht	-6,9	5,0	-3,1	-12,5	7,4	-5,0
	trocken	-7,5	5,2	-3,4	-15,4	7,8	-5,7
Wintergerste	feucht	-6,4	5,0	-3,4	-13,1	7,9	-5,2
	trocken	-6,8	5,7	-3,6	-15,6	8,9	-5,6
Winterriaps	feucht	-4,5	2,5	-2,0	-16,0	6,4	-6,1
	trocken	-7,1	1,0	-4,7	-22,2	2,7	-13,7
Silomais	feucht	-73,5	-5,7	-37,6	-17,8	-1,1	-8,9
	trocken	-68,4	-7,6	-42,1	-21,2	-1,5	-10,9

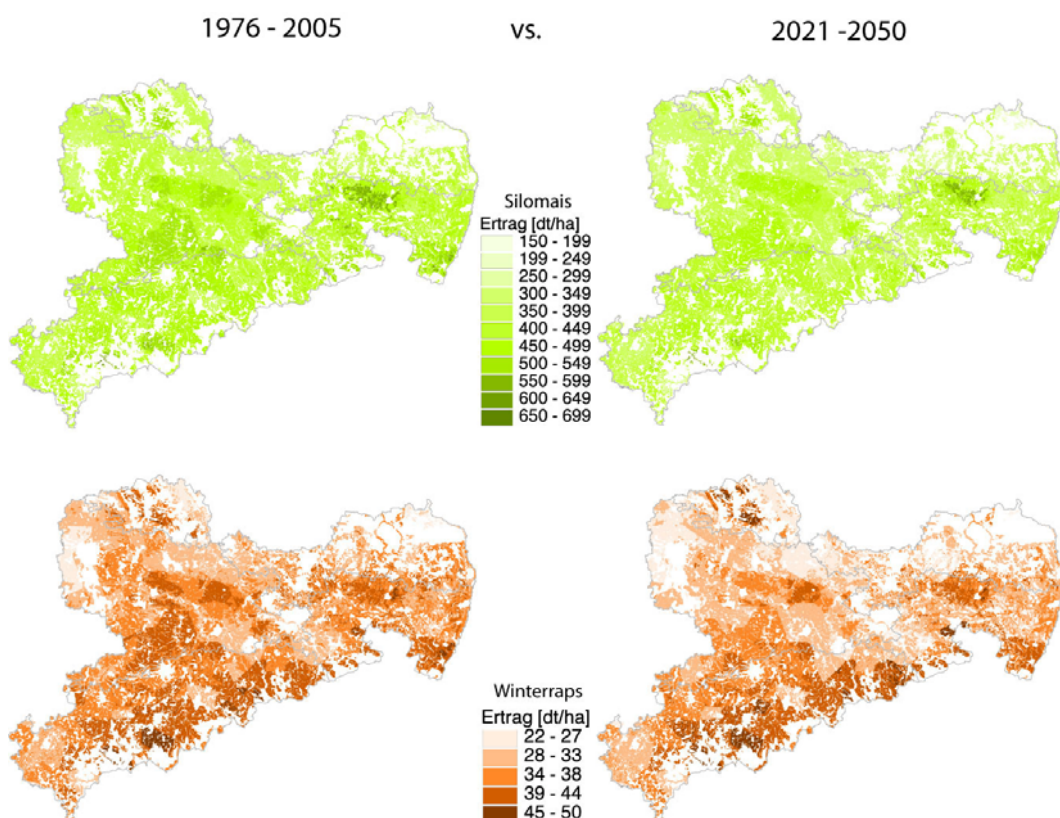


Abbildung 31: Erträge für Silomais (oben) und Winterriaps (unten) im Vergleich 1976 - 2005 vs. 2021 - 2050, regionalisiert für den Freistaat Sachsen (Basis: Modell YIELDSTAT, WEREX-Realisierung: WEREX-A1B-FEU)

Werden bei den Szenariosimulationen zusätzlich noch der CO₂-Düngungseffekt und der angenommene züchtungs- und anbautechnologiebedingte positive Ertragstrend (Variante 2 (mit CO₂, ohne Trend) und Variante 3 (mit CO₂, mit Trend)) berücksichtigt, dann ergeben sich bei allen betrachteten Fruchtarten, außer bei Silomais, in den Jahren 2021 - 2050 gegenüber 1976 - 2005 signifikante Ertragszunahmen. Bei Silomais, bei dem mit 1,363 dt ha⁻¹ a⁻¹ ausgangs infolge von Züchtung und Technologie nur ein relativ geringer Trendzuwachs angenommen wurde, ergibt sich danach nur ein geringer Ertragsverlust in den Jahren 2021 - 2050 gegenüber 1976 - 2005. Bei Anbau neuer, wesentlich ertragreicherer Sorten (z. B. Energiemais-Sorten), die die verlängerte Vegetationsperiode und die günstigeren Temperaturbedingungen besser in Biomassewachstum bzw. Ertrag umsetzen können, sind für 2021 - 2050 auch hier positive Ertragsänderungen zu erwarten.

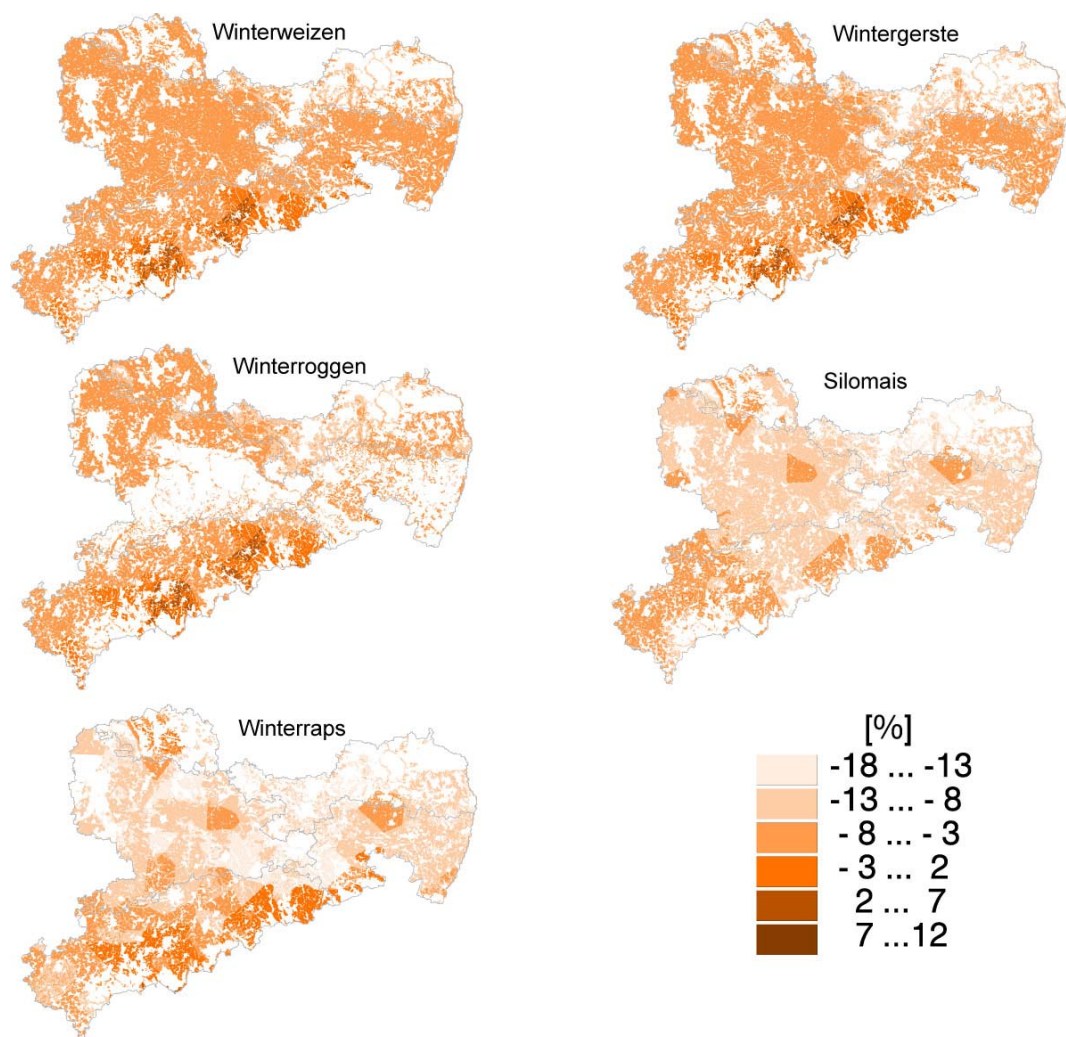


Abbildung 32: Relative Ertragsänderungen 1976 - 2005 vs. 2021 - 2050 für Winterweizen, Winterroggen, Wintergerste, Winterraps und Silomais als Mittel der WEREX-Realisierungen WEREX-A1B-FEU und WEREX-A1B-TRO (Variante 1), regionalisiert für den Freistaat Sachsen

In Tabelle 16 werden für die fünf betrachteten Fruchtarten und beide WEREX-Realisierungen (WEREX-A1B-FEU, WEREX-A1B-TRO) die Ertragsänderungen in den Jahren 2021 - 2050 gegenüber 1976 - 2005 für die Variante 1, die Variante 2 und die Variante 3 zusammengefasst.

Tabelle 16: Ertragsänderungen im Freistaat Sachsen für Winterweizen, Wintergerste, Winterroggen, Winterraps und Silomais in 2021 - 2050 gegenüber 1976 - 2005 für Variante 1, Variante 2 und Variante 3 (WEREX-A1B-Realisierungen: WEREX-A1B-FEU, WEREX-A1B-TRO)

Fruchtart	Realisierung	Ertragsänderung 2021/2050 vs. 1976/2005					
		Variante 1		Variante 2		Variante 3	
		abs. Abw. (dt ha ⁻¹)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt ha ⁻¹)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt ha ⁻¹)	rel. Abw. (%)
Winterweizen	WEREX-A1B-FEU	- 3,4	- 4,6	0,1	0,0	12,5	17,0
	WEREX-A1B-TRO	- 3,6	- 5,2	- 0,3	- 0,6	12,1	17,2
Winterroggen	WEREX-A1B-FEU	- 3,1	- 5,0	- 0,1	- 0,4	5,4	8,2
	WEREX-A1B-TRO	- 3,4	- 5,7	- 0,5	- 1,1	4,9	7,9
Wintergerste	WEREX-A1B-FEU	- 3,4	- 5,2	- 0,3	- 0,5	8,9	11,8
	WEREX-A1B-TRO	- 3,6	- 5,6	- 0,7	- 1,3	8,4	13,4
Winterraps	WEREX-A1B-FEU	- 2,0	- 6,1	- 0,6	- 2,2	7,1	19,8
	WEREX-A1B-TRO	- 4,7	- 13,7	- 3,4	- 10,1	4,4	12,4
Silomais	WEREX-A1B-FEU	- 37,6	- 8,9	- 33,7	- 8,0	- 11,4	- 2,7
	WEREX-A1B-TRO	- 42,1	- 10,9	- 38,5	- 9,9	- 16,2	- 4,2

Während die Unterschiede bei den Ertragsänderungen zwischen den WEREX-Realisierungen (WEREX-A1B-FEU und WEREX-A1B-TRO) bei den drei Wintergetreidearten und bei Silomais nicht sehr groß sind, sind sie bei Winterraps deutlich größer, was auf eine größere, den Ertrag negativ beeinflussende Reaktion von Winterraps auf den Trockenstress besonders im Frühsommer hinweist.

Ein weiterer sehr wichtiger Faktor für die Landwirtschaft ist die Ertragsstabilität. Da eine Zunahme von Witterungsextremen wahrscheinlich ist, ist auch mit zunehmenden Ertragsschwankungen zwischen den Einzeljahren zu rechnen. Diese Hypothese wird durch die Simulationsrechnungen bestätigt. Die für ganz Sachsen auf den durchschnittlichen Landesertrag bezogenen klimaänderungsbedingten relativen Ertragsschwankungen nehmen zu, mit einem leichten Trend der Zunahme von Jahren mit relativ geringer Ertragshöhe (Tabelle 17). Das trifft bei allen betrachteten Fruchtarten für beide WEREX-Realisierungen (WEREX-A1B-FEU, WEREX-A1B-TRO) zu.

Tabelle 17: Klimaänderungsbedingte relative Ertragsschwankungen bezogen auf den durchschnittlichen Landesertrag für Winterweizen, Wintergerste, Winterroggen, Winterraps und Silomais für die WEREX-Realisierungen WEREX-A1B-FEU und WEREX-A1B-TRO (Freistaat Sachsen)

Fruchtart	Realisierung	relative Ertragsschwankung (%)		
		1976 - 2005	2021 - 2050	
			Variante 1	Variante 2
Winterweizen	WEREX-A1B-FEU	84,2	82,2	86,2
	WEREX-A1B-TRO	82,2	88,8	88,7
Winterroggen	WEREX-A1B-FEU	93,7	96,1	96,0
	WEREX-A1B-TRO	91,9	88,7	88,6
Wintergerste	WEREX-A1B-FEU	89,2	91,7	91,8
	WEREX-A1B-TRO	88,9	97,3	97,1
Winterraps	WEREX-A1B-FEU	77,7	82,6	82,5
	WEREX-A1B-TRO	84,5	101,0	95,1
Silomais	WEREX-A1B-FEU	102,1	109,0	119,8
	WEREX-A1B-TRO	101,8	104,0	104,2

8.2 Boden-Klima-Regionen

Trennt man die auf den gesamten Freistaat Sachsen bezogenen Ergebnisse der Klimaszenario-Simulationen nach den einzelnen Boden-Klima-Regionen, ergeben sich weitaus differenziertere Aussagen bezüglich der Höhe der Ertragsänderung, aber auch bezüglich des Bereiches der Ertragsvariation in den Einzeljahren. Bei Variante 1 (ohne CO₂, ohne Trend) schneidet die Boden-Klima-Region „Erzgebirgskamm und -vorland, Vogtland, Elsterbergland“ bezüglich der Ertragsänderung am besten ab. Hier sind im Regionsmittel bei allen Fruchtarten die geringsten Ertragsverluste zu erwarten. Dann folgen der westliche Teil der Boden-Klima-Region „Sächsisches Heidegebiet, Riesaer-Torgauer Elbtal“ und die Boden-Klima-Region „Oberlausitz, Sächsische Schweiz“. Am größten sind die negativen Ertragsänderungen im östlichen Teil der Boden-Klima-Region „Sächsisches Heidegebiet, Riesaer-Torgauer Elbtal“.

Während in den Boden-Klima-Regionen „Oberlausitz, Sächsische Schweiz“ und „Erzgebirgskamm und -vorland, Vogtland, Elsterbergland“ mit Berücksichtigung des CO₂-Düngungseffektes und ohne wissenschaftlich-technischen Fortschritt (Variante 2) für alle betrachteten Fruchtarten außer Silomais sowohl Standorte mit Ertragsverlusten als auch Standorte mit Ertragszuwachs vorkommen, treten bei Variante 1 in allen anderen Boden-Klima-Regionen für alle betrachteten Fruchtarten auf allen Standorten nur Ertragsverluste auf.

In Tabelle 18 sind für drei Simulationsvarianten (Variante 1 [ohne CO₂, ohne Trend], Variante 2 [mit CO₂, ohne Trend], Variante 3 [mit CO₂, mit Trend]) die absoluten und relativen Ertragsänderungen in den Jahren 2021 - 2050 im Vergleich zu 1976 - 2005 für die betrachteten Fruchtarten und die

beiden WEREX-Realisierungen WEREX-A1B-FEU und WEREX-A1B-TRO, getrennt für die einzelnen Boden-Klima-Regionen, dargestellt.

In den einzelnen Boden-Klima-Regionen liegen bei Variante 1 für die Wintergetreidearten und für Winterraps die relativen Ertragsauswirkungen in der gleichen Größenordnung. Nur bei Silomais sind die zu erwartenden relativen Ertragsverluste etwas größer.

Berücksichtigt man die CO₂-Düngungswirkung (Variante 2), so liegen die Erträge der betrachteten Fruchtarten mit Ausnahme von Silomais in den Jahren 2021 - 2050 in etwa in der gleichen Größenordnung wie 1976 - 2005. Eine Ausnahme bilden hier die Boden-Klima-Region „Erzgebirgskamm und -vorland, Vogtland, Elsterbergland“, in der sie im Mittel größer sind als 1976 - 2005, und die Boden-Klima-Region „Sächsisches Heidegebiet, Riesaer-Torgauer Elbtal (östlicher Teil)“, in der die Erträge in den Jahren 2021 - 2050 um 2 bis 4 Prozentpunkte unter den Erträgen von 1976 - 2005 liegen.

Bei zusätzlicher Berücksichtigung des für Sachsen zu erwartenden Ertragstrends (Variante 3) ergibt sich in allen Boden-Klima-Regionen mit Ausnahme von Silomais für alle anderen Fruchtarten in den Jahren 2021 - 2050 eine deutlich positive Ertragsänderung, die aber regionsabhängig zwischen den Fruchtarten unterschiedlich stark ausfällt. Aber auch bei Silomais werden in einzelnen Regionen in den Jahren 2021 - 2050 fast die Erträge von 1976 - 2005 erreicht. In den vier südlichen und westlichen Boden-Klima-Regionen Sachsens lässt sich hinsichtlich der relativen Ertragsänderung für die betrachteten Fruchtarten beginnend bei den positivsten Änderungen folgende Reihenfolge ableiten: Winterweizen, Winterraps, Wintergerste, Winterroggen, Silomais. In der Boden-Klima-Region „Sächsisches Heidegebiet, Riesaer-Torgauer Elbtal (östlicher Teil)“ tauschen in dieser Reihenfolge nur die Wintergerste und der Winterraps ihre Plätze.

Obwohl der Silomais als C4-Pflanze in seiner Biomasseproduktion positiv auf steigende Temperaturen reagiert, sind die mit dem Modell YIELDSTAT für den Zeitraum bis 2050 simulierten Ertragsänderungen negativ. Das könnte wie bereits erwähnt darin begründet sein, dass im Modell YIELDSTAT nur mit bisher in der Praxis zum Anbau gekommenen Maissorten gerechnet worden ist. Es wurden keine Energiemais-Hochleistungssorten unterstellt. Dazu kommt, dass in den nächsten Jahren bis 2050 die Temperaturen nur mäßig ansteigen, im Jahresdurchschnitt um + 1 K. Bezogen auf die Hauptwachstumsphase Mai-August liegt der Temperaturanstieg aber deutlich unter + 1 K. Damit wird der im Modell implementierte temperaturabhängige, mit steigender Temperatur positiv wirkende Ertragsterm durch den auf der Klimatischen Wasserbilanz basierenden, mit zunehmendem Trockenstress negativ wirkenden Ertragsterm in seiner Größe deutlich überkompensiert.

Tabelle 18: Absolute und relative Ertragsänderungen in den Jahren 2021 - 2050 im Vergleich zu 1976 - 2005 für Winterweizen, Wintergerste, Winterroggen, Winterraps und Silomais für drei Simulationsvarianten (Variante 1 (ohne CO₂, ohne Trend), Variante 2 (mit CO₂, ohne Trend), Variante 3 (mit CO₂, mit Trend)), je für die WEREX-Realisierungen WEREX-A1B-FEU und WEREX-A1B-TRO sowie getrennt nach einzelnen Boden-Klima-Regionen

Fruchtart	Realisierung	Ertragsänderung 2021 - 2050 vs. 1976 - 2005					
		Variante 1		Variante 2		Variante 3	
		abs. Abw. (dt ha ⁻¹)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt ha ⁻¹)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt ha ⁻¹)	rel. Abw. (%)
Erzgebirgskamm und -vorland, Vogtland, Elsterbergland							
Winterweizen	WEREX-A1B-FEU	- 1,7	- 2,6	1,8	2,2	14,3	18,8
	WEREX-A1B-TRO	- 1,4	- 2,8	1,7	2,0	14,1	19,1
Winterroggen	WEREX-A1B-FEU	- 1,5	- 2,5	1,8	2,2	7,3	10,3
	WEREX-A1B-TRO	- 2,1	- 3,2	1,1	1,5	6,6	9,6
Wintergerste	WEREX-A1B-FEU	- 1,9	- 2,9	1,3	1,8	10,4	15,5
	WEREX-A1B-TRO	- 2,0	- 3,2	1,0	1,5	10,1	15,6
Winterraps	WEREX-A1B-FEU	- 0,7	- 2,1	0,9	1,9	8,7	22,3
	WEREX-A1B-TRO	- 3,5	- 9,9	- 2,1	- 6,2	5,7	14,9
Silomais	WEREX-A1B-FEU	- 32,4	- 7,3	- 28,2	- 6,4	- 5,9	- 1,3
	WEREX-A1B-TRO	- 35,5	- 8,7	- 31,7	- 7,8	- 9,4	- 2,3
Oberlausitz, Sächsische Schweiz							
Winterweizen	WEREX-A1B-FEU	- 3,6	- 4,8	- 0,1	- 0,2	12,4	15,8
	WEREX-A1B-TRO	- 4,6	- 5,9	- 0,9	- 1,3	11,6	15,4
Winterroggen	WEREX-A1B-FEU	- 3,8	- 5,9	- 0,8	- 1,3	4,7	7,0
	WEREX-A1B-TRO	- 4,3	- 6,9	- 1,4	- 2,3	4,1	6,4
Wintergerste	WEREX-A1B-FEU	- 3,9	- 5,7	- 0,7	- 1,1	8,4	12,0
	WEREX-A1B-TRO	- 4,4	- 6,8	- 1,4	- 2,2	7,7	11,6
Winterraps	WEREX-A1B-FEU	- 2,4	- 6,8	- 0,9	- 2,9	6,8	18,5
	WEREX-A1B-TRO	- 5,3	- 15,2	- 4,0	- 11,7	3,7	10,5
Silomais	WEREX-A1B-FEU	- 40,8	- 9,3	- 36,7	- 8,4	- 14,4	- 3,3
	WEREX-A1B-TRO	- 47,0	- 11,7	- 43,4	- 10,8	- 21,1	- 5,3

Fortsetzung Tabelle 18

Fruchtart	Realisierung	Ertragsänderung 2021 - 2050 vs. 1976 - 2005					
		Variante 1		Variante 2		Variante 3	
		abs. Abw. (dt ha ⁻¹)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt ha ⁻¹)	rel. Abw. (%)	abs. Abw. (dt ha ⁻¹)	rel. Abw. (%)
Mittelsächsisches Lössgebiet							
Winterweizen	WEREX-A1B-FEU	- 4,0	- 5,4	- 0,5	- 0,8	11,9	15,9
	WEREX-A1B-TRO	- 4,4	- 6,0	- 1,0	- 1,4	11,5	16,0
Winterroggen	WEREX-A1B-FEU	- 4,0	- 6,2	- 1,0	- 1,6	4,5	7,0
	WEREX-A1B-TRO	- 4,0	- 6,8	- 1,3	- 2,3	4,2	7,1
Wintergerste	WEREX-A1B-FEU	- 3,9	- 5,8	- 0,7	- 1,2	8,4	12,3
	WEREX-A1B-TRO	- 4,2	- 6,5	- 1,2	- 1,9	7,9	12,2
Winterraps	WEREX-A1B-FEU	- 2,7	- 6,9	- 1,4	- 4,1	6,4	18,8
	WEREX-A1B-TRO	- 5,1	- 15,5	- 4,0	- 12,0	3,8	12,6
Silomais	WEREX-A1B-FEU	- 36,6	- 9,5	- 35,8	- 8,6	- 13,4	- 3,2
	WEREX-A1B-TRO	- 44,0	- 11,4	- 40,5	- 10,5	- 18,2	- 4,7
Sächsisches Heidegebiet, Riesaer-Torgauer Elbtal (westlicher Teil)							
Winterweizen	WEREX-A1B-FEU	- 3,1	- 4,5	0,2	0,1	12,6	18,5
	WEREX-A1B-TRO	- 3,5	- 5,5	- 0,5	- 0,9	11,9	18,3
Winterroggen	WEREX-A1B-FEU	- 3,3	- 5,3	- 0,3	- 0,7	5,2	8,8
	WEREX-A1B-TRO	- 3,7	- 6,8	- 1,1	- 2,2	4,3	7,1
Wintergerste	WEREX-A1B-FEU	- 3,1	- 5,3	- 0,3	- 0,7	8,8	17,8
	WEREX-A1B-TRO	- 3,7	- 6,5	- 1,0	- 2,0	8,1	14,3
Winterraps	WEREX-A1B-FEU	- 1,6	- 5,4	- 0,3	- 1,5	7,5	22,8
	WEREX-A1B-TRO	- 4,3	- 12,4	- 3,0	- 8,9	4,8	13,3
Silomais	WEREX-A1B-FEU	- 31,1	- 8,0	- 27,4	- 7,1	- 5,1	- 1,4
	WEREX-A1B-TRO	- 37,9	- 10,5	- 34,6	- 9,7	- 12,3	- 3,4
Sächsisches Heidegebiet, Riesaer-Torgauer Elbtal (östlicher Teil)							
Winterweizen	WEREX-A1B-FEU	- 4,3	- 7,1	- 1,5	- 2,6	11,0	18,2
	WEREX-A1B-TRO	- 4,6	- 7,8	- 1,8	- 3,3	10,6	18,9
Winterroggen	WEREX-A1B-FEU	- 4,3	- 7,6	- 1,7	- 3,1	3,8	6,7
	WEREX-A1B-TRO	- 4,5	- 8,5	- 2,1	- 4,0	3,4	6,4
Wintergerste	WEREX-A1B-FEU	- 4,3	- 8,1	- 1,8	- 3,6	7,3	13,8
	WEREX-A1B-TRO	- 4,4	- 9,1	- 2,2	- 4,6	6,9	14,1
Winterraps	WEREX-A1B-FEU	- 3,0	- 9,2	- 1,8	- 5,4	6,1	17,8
	WEREX-A1B-TRO	- 5,4	- 16,5	- 4,2	- 13,1	3,5	11,0
Silomais	WEREX-A1B-FEU	- 42,3	- 11,3	- 38,9	- 10,4	- 16,6	- 4,4
	WEREX-A1B-TRO	- 46,0	- 13,6	- 43,0	- 12,8	- 20,7	- 6,1

Ein weiterer Grund für die vergleichsweise negativen Ergebnisse bei Silomais ist der im Modell für den Anfang des Simulationszeitraumes auf der Grundlage der vergangenen Ertragsentwicklung im Freistaat Sachsen relativ niedrig angesetzte züchtungs- und technologieabhängige Ertragstrend von nur 1.363 dt ha⁻¹ a⁻¹.

Bei der Bewertung der Simulationsergebnisse ist zu beachten, dass mit dem Regionalmodell WEREX IV vergleichsweise geringe Klimaänderungen bis 2050 projiziert werden. Die mittlere Temperatur steigt im Sommer für die Realisierung „feucht“ um + 0,9 bis + 1,3 K bzw. für die Realisierung „trocken“ um + 0,9 bis + 1,5 K. Der mittlere Niederschlag nimmt im Sommer um - 2,5 bis - 17,5 % (Realisierung „feucht“) bzw. um - 2,5 bis - 22,5 % (Realisierung „trocken“) ab, wobei der stärkste Rückgang im Norden und Osten Sachsens auftritt. Die Änderungen der mittleren Jahreswerte liegen überwiegend bei + 1 K für die Temperatur und - 2,5 bis - 12,5 % für den Niederschlag. Infolgedessen sind die Auswirkungen auf die Ertragsbildung meist gering. Mit einer stärkeren Ertragsbeeinflussung ist dann zu rechnen, wenn sich das künftige Klima im betrachteten Zeitraum extremer bzw. schneller verändert als gegenwärtig mit WEREX IV berechnet wurde. Ergebnisse anderer Regionalmodelle deuten darauf hin, dass unter demselben Emissionsszenario A1B auch stärkere Veränderungen im Zeitraum bis 2050 möglich sind.

Zusammenfassend kann abgeleitet werden, dass aufgrund der relativ geringen Änderungen im Klima auf der Basis der WEREX IV Klimaprojektionen für den Freistaat Sachsen und der daraus resultierenden Ertragsänderungen im Zeitraum bis 2050 die Vorzüglichkeit der einzelnen hier betrachteten Fruchtarten im Allgemeinen erhalten bleibt und daraus keine grundlegende Verschiebung der Anbaueignung untereinander abzuleiten ist.

Danksagung

Die vorliegende Studie wurde unter dem Dach des durch das BMBF geförderten Verbundprojektes LandCare 2020 realisiert. Die Autoren bedanken sich bei Prof. Dr. Christian Bernhofer und Johannes Franke vom Institut für Hydrologie und Meteorologie (Professur für Meteorologie) der TU Dresden für die Aufarbeitung und Bereitstellung der für die Klimaszenariorechnungen notwendigen WEREX-Daten für die Klima- und Niederschlagsmessstationen des Freistaates Sachsen. Ein Dank ist auch gerichtet an Joachim Kiesel und Carola Voigt vom Institut für Landschaftssystemanalyse des ZALF Müncheberg für die Aufbereitung und Bereitstellung der für die regionalen Simulationen notwendigen MMK- und sonstigen Karten für den Freistaat Sachsen. Der Dank der Autoren geht auch an Dr. Ulrich Henk vom Sächsischen Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft für seine aktive Unterstützung des gesamten Projektes.

9 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 – Erntemonat brachte viele Landwirte in Existenznot. Agrarmeteorologischer Monatsbericht für Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen. Jg. 2002 Nr. 8, 2 S.
- ALBERT, E. (2008): Ertragstrend 1992 - 2006 für die Hauptfruchtarten im Freistaat Sachsen und mögliche Trendextrapolationen bis 2050, persönliche Mitteilung
- FRANKE, J. (2008): Zeiträume für Klimaszenarien, 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
- 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.
- MANDERSCHIED, R. (2008): FACE-Experimente mit Mais im Rahmen von LandCaRe 2020. Mündliche Mitteilung.
- MIRSCHER, 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).

- MIRSCHER, 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.
- MIRSCHER, W.; WIELAND, R.; VOSS, M.; AJIBEFUN, I.A.; DEUMLICH, D. (2006c): Spatial Analysis and Modeling Tool (SAMT): 2. Applications. In: Ecological Informatics 1(2006), pp. 77 - 85.
- MIRSCHER, W.; WIELAND, R.; WENKEL, K.-O. (2003): Bedeutung der Modellwahl bei der Ertragsschätzung - 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.
- MIRSCHER, 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.
- SCHMIDT, R., DIEMANN, R. (Eds.) (1991): Erläuterungen zur Mittelmaßstäbigen Landwirtschaftlichen Standortkartierung (MMK). FZB Müncheberg, Müncheberg.
- WEIGEL, H.J.; MANDERSCHIED, R.; PACHOLSKI, A.; BURKART, S.; JANSEN, G. (2005): Mehr CO₂ in der Atmosphäre: Prima Klima für die Landwirtschaft?. ForschungsReport - Zeitschrift des Senats der Bundesforschungsanstalten, Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, 1/2005; S. 14 - 17.
- WIELAND, R.; VOSS, M.; HOLTSMANN, X.; MIRSCHER, W.; AJIBEFUN, I.A. (2006): Spatial Analysis and Modeling Tool (SAMT): 1. Structure and possibilities. In: Ecological Informatics 1(2006), pp. 67 - 76.
- 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

Impressum

- Herausgeber:** Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Internet: <http://www.smul.sachsen.de/lfulg>
- Autoren:** Dr. Wilfried Mirschel, Prof. Dr. Karl-Otto Wenkel, Dr. Ralf Wieland,
Karin Luzi
ZALF Müncheberg, Institut für Landschaftssystemanalyse
- Dr. habil. Erhard Albert
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
- PD Dr. Barbara Köstner
TU Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie,
Professur für Meteorologie
- Redaktion:** Dr. habil. Erhard Albert
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Gustav-Kühn-Str. 8, 04159 Leipzig
Telefon: 0341 9174-182
Telefax: 0341 9174-189
E-Mail: erhard.albert@smul.sachsen.de
- Endredaktion:** Öffentlichkeitsarbeit
Präsidialabteilung
- ISSN:** 1867-2868
- Redaktionsschluss:** August 2009

Für alle angegebenen E-Mail-Adressen gilt:

Kein Zugang für elektronisch signierte sowie für verschlüsselte elektronische Dokumente

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlhelfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.