

Entwicklung eines Ertragspotenzialmodells für Pappel mittels (geoinformatisch)-statistischer Tests zur Modellgüte und fachlicher Plausibilitätsprüfung

Modelling of Potential Poplar Yield by Applying Statistic Quality Factors and Plausibility Checks

Elke Dietz¹, Ute Bachmann-Gigl, Nele Sutterer, Frank Burger¹, Herbert Borchert¹

¹Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft · elke.dietz@lwf.bayern.de

Zusammenfassung: Im Projekt KUP-Scout wurde die erste flurstückscharfe Pappel-Ertragskarte für ganz Bayern zu Beratungszwecken zur Unterstützung der Energiewende entwickelt und in das Bayerische Waldinformationssystem integriert. Ziel war es, ein an bayerische Verhältnisse optimal angepasstes Ertragsmodell, das realistische Erträge prognostiziert, entweder selbst zu entwickeln oder bereits vorhandene Modelle zu nutzen und entsprechend zu modifizieren. Der Fokus lag daher auf einer hohen Flächenauflösung und Modellgüte. Neben der fachlichen Plausibilisierung der Modelle erfolgten eine statistische Prüfung der Güte, Analysen zur Sensitivität sowie den flächigen Gültigkeitsbereichen. Auf diese Weise konnte das optimale Basismodell ermittelt und über Korrekturfaktoren regionale Defizite ausgeglichen werden.

Schlüsselwörter: KUP-Ertragsmodelle, Modelle Gültigkeitsbereiche, Modellerstellung

Abstract: *The project KUP-Scout developed a plot detailed digital map to predict the yield of poplar in short rotation coppice for Bavaria. This map was implemented in the Bavarian Forest Information System and planned to be used as consultations material to support “Energiewende”. The objective was to develop or utilise an existing yield predicting model that represents the Bavarian growth conditions for poplar perfectly and gives realistic yield estimation. The realization process was focused on high resolution of geo data and high model quality. Therefore plausibility checks, statistic quality factors, sensitivity analyses were carried out and validity ranges of input data were detected. This way the best model was found out and improved using adjustment factors to compensate regional deficiency.*

Keywords: *Yield estimation for short rotation coppice, model validity range*

1 Motivation

Schätzungen der Ertragsfähigkeit bayerischer Landwirtschaftsflächen für Kurzumtriebsplantagen (KUP) wurden benötigt, um die Einbindung von Holz aus KUP in lokale und (über-)regionale Energieversorgungskonzepte Bayerns zu vereinfachen. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des Projektes KUP-Scout (2013-2016), gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, ein GIS-basiertes Ertragsmodell für Bayern entwickelt, damit potenzielle Pappel-Erträge auf Landwirtschaftsflächen berechnet und in Kartenform dargestellt werden können. Das Informationssystem KUP-Scout, bestehend aus dieser Ertragskarte und einem Kartenstapel mit Fachinformationen, sollte in das bereits bestehende Bayerische Waldinformationssystem (BayWIS) sowie in das landwirtschaftliche Flächeninformationssystem iBalis eingebunden und zu Beratungszwecken genutzt werden.

Zudem sollte nach Projektende eine weniger detailgenaue Version für den interessierten Bürger im Netz bereitstehen.

2 Methode

Das fachliche Ziel war es, ein an bayerische Standort- und Klimabedingungen optimal angepasstes Modell zu entwickeln, um die Vorhersagegenauigkeit der potenziell zu erwartenden Erträge möglichst realistisch zu gestalten. Für die Umsetzung des Vorhabens wurde zunächst davon ausgegangen, dass möglicherweise vorhandene Ertragsmodelle für KUP für Bayern, ggf. nach Modifikation, anwendbar wären. Daher wurden zunächst die bereits bestehenden Ertragsmodelle gesichtet. Parallel dazu sollte ein eigenes Modell entwickelt werden. Alle Modelle wurden auf ihre Güte getestet. Das Modell, das hier am besten abschnitt, wurde als Basismodell ausgewählt, das um mögliche Modelldefizite zu füllen, noch an bayerische Bedingungen angepasst wurde.

Die Umsetzung erfolgte in 6 Schritten:

1. **Modellauswahl** – Sichtung vorhandener Ertragsmodelle und Vorauswahl von vier Modellen. Ggf. **Neuparametrisierung** und Erstellen von zwei **eigenen Ertragsmodellen** auf der Datengrundlage von 44 KUP-Praxisflächen in Bayern (HSWT¹, ASP², LWF³).
2. **Datenaufbereitung** bayernweiter Eingangsdaten für die Ertragsmodelle (Punkt- und Flächendaten (z. B. Bodenprofile, Flächendaten z. B. Bodenkarte, Klimadaten etc.); Verknüpfen von Punkt- und Flächendaten (z. B. Regionalisierung der Bodendaten).
3. **Tests zur Modellgüte** (statistische Tests, Sensitivität etc.) an KUP-Praxisflächen, Flächenabdeckung der Eingangsdaten und Häufigkeitsverteilung flächig; Beurteilung der Modelleignung für die bayerische Fläche. **Auswahl eines Basismodells**.
4. **Anpassung des Basismodells** an Klima- und Grundwasserbedingungen Bayerns über Korrekturfaktoren (Petzold, 2013) und an physiologische, klimatische Wachstumsgrenzen sowie an in Bayern gängige Umtriebszeiten (Horn, 2013) und Umsetzungen der Anpassungen auf die Fläche. Ausweisung von Sonderflächen.
5. **Plausibilisierung** extremer Ertragsergebnisse
6. **Datenbereitstellung** auf verschiedene Nutzergruppen zugeschnitten. Zur Beratung an den Ämtern für Landwirtschaft Integration der Daten in das Bayerische Flächeninformationssystem (BayWIS) unter Nutzung bereits bestehender Funktionalitäten. Für den interessierten Bürger weniger detailgenau im Internet unter www.kupscout-bayern.de.

Ein zentrales Thema des Projektes war die Beurteilung der Modellgüte. Hierbei bestand die Herausforderung unter anderem darin, GIS-Funktionalitäten mit statistischen Beurteilungskriterien zu koppeln, um somit die Modellgüte, bezogen auf die Flächenverteilung, beurteilen zu können und iterativ über mehrere Verfahrensschritte das ausgewählte Basismodell zu verbessern und so an die bayerischen Verhältnisse anzupassen. Zudem war von Genehmigungs-

¹ Hochschule Weihenstephan-Triesdorf.

² Bayerisches Amt für forstliche Saat- und Pflanzenzucht.

³ Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft.

seite her im Endprodukt, der Pappel-Ertragskarte, die Ausweisung von Sonderflächen gefordert, bei denen der Anlage von KUP möglicherweise naturschutzfachliche/rechtliche Gründe entgegenstehen. Ziel ist es, diese Flächen bereits bei der Beratung und im Genehmigungsverfahren zur Anlage einer KUP zu berücksichtigen.

Im Fokus dieser Publikation stehen die GIS-relevanten Themen des Projektes wie die Modellauswahl, Regionalisierung der Bodendaten (Datenaufbereitung), Flächenabdeckung und Häufigkeitsverteilung der Eingangsdaten (Tests zur Modellgüte) und die Anpassung des Basismodells.

2.1 Modellauswahl, Neuparametrisierung, eigene Ertragsmodelle

Unterschiedliche Modellansätze wurden gesichtet und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit beurteilt. Kriterien für die Modellauswahl waren u. a., dass die Eingangsgrößen die wesentlichen physiologisch relevanten Wachstumsgrößen für Pappel enthielten. Außerdem mussten die zur Berechnung auf der Landwirtschaftsfläche benötigten Daten für Bayern möglichst flächendeckend vorhanden sein oder aus anderen verfügbaren Datengrundlagen berechnet werden können. Auf Basis bayerischer Ertragsdaten aus den 44 KUP-Praxisflächen wurde in einem ersten Schritt die Neuanpassung (Neuparametrisierung) an den oben ausgewählten originären Ertragsfunktionen durchgeführt und die Verbesserungen quantifiziert. Die Anpassung erfolgte durch eine Neuschätzung der Regressionskoeffizienten. Zudem wurden ebenfalls auf Grundlage der bayerischen KUP-Praxisflächen zwei eigene Ansätze zur Modellierung der Ertragsleistung, unter Verwendung der Eingangsdaten und Erträge, getestet. Zur Anwendung kamen multiple lineare sowie schrittweise (stepwise forward) Regressionsverfahren.

2.2 Datenaufbereitung

Als Punktdaten lagen 60.000 Einzeldaten von etwa 3.000 Bodenprofilen, die aus Geländeaufnahmen und Laboranalysen stammen vor (BIS; Bodeninformationssystem Bayern des LfU⁴). Diese wurden fachlich auf Plausibilität geprüft, vervollständigt und daraus mit sogenannten **Pedotransferfunktionen (PTF)** Bodenkennwerte (Bodenbasisdaten) modelliert (Abb. 1). Mit PTF wurden unter anderem die Trockenrohdichte (TRD), nutzbare Feldkapazität (nFK, Eingangsparameter für die Modelle), Feinbodenart, Skelettgehalt, Profilmächtigkeit, Entkalkungstiefe und Tiefenverlauf der Basensättigung (KOE) berechnet. Die Zuweisung der Bodenprofile zu den Legendeneinheiten der Bodenkarte erfolgte nach fachlichen Kriterien (inhaltliche Übereinstimmung zwischen den Profildaten und der Beschreibung der Bodeneinheit) in Kombination mit der räumlichen Lageübereinstimmung des Bodenprofils in der zugehörigen Bodeneinheit. Auf diese Weise wurden die einzelnen Bodenprofile mit ihren Kennwerten, als sogenannte „Leitprofile“ der jeweiligen Legendeneinheit zugeordnet. Die gesamte Berechnung der Bodenkennwerte erfolgte mittels einer eigenen ACCESS-basierten Datenbankanwendung (PTF-DB) in drei Schritten. Zunächst wurden alle Bodenbasisdaten auf Horizontebenen berechnet (Schritt 1), dann auf die Profilebenen aggregiert (Schritt 2) und daraus über mehrere typische Bodenprofile, gemäß der Charakteristik der Bo-

⁴ Bayerisches Landesamt für Umwelt.

deneinheit, gewichtet mittlere Kennwerte je Bodeneinheit errechnet (Schritt 3). Die räumliche Datengrundlage bildete die Übersichtsbodenkarte 1:25.000 (ÜBK25) des LfU. Einige Bodeneinheiten der ÜBK25 umfassen mehr als einen Bodentyp (Komplexeinheiten). Diese Einheiten resultieren aus der Kartierung im Maßstab 1:25.000, die es nicht erlaubt, kleinräumige Wechsel innerhalb dieser Bodeneinheiten zu erfassen. Im Rahmen eines Vorgängerprojektes wurde ein Verfahren (Häring et al., 2012) umgesetzt, mit dessen Hilfe ein Großteil dieser Komplexeinheiten reliefbasiert (Catena-Prinzip) räumlich differenziert wurde (Disaggregation). Diese **Disaggregation** führt in weiten Bereichen der ÜBK25 zu einer Verfeinerung des Maßstabs (ÜBKdis). Diese höher auflösenden Bodendaten bilden die räumliche Datengrundlage des Projektes KUP-Scout. Für die **Regionalisierung der Bodenbasisdaten** (Abb. 1) wurden die Geodaten (Vektordatensatz) der ÜBKdis zusammen mit den Ergebnistabellen aus der Berechnungsdatenbank (PTF-DB) in ein GIS importiert. Da jedes Polygon der ÜBKdis mit einer ID der jeweiligen Bodeneinheit attribuiert ist, konnten die Ergebnistabellen der PTF-DB über diesen Schlüssel mit dem Geodatensatz verknüpft werden. So kann z. B. die nutzbare Feldkapazität der verschiedenen Bodeneinheiten in der Fläche dargestellt und als Eingangsparameter für die flächenhafte Berechnung des Ertragspotenzials genutzt werden.

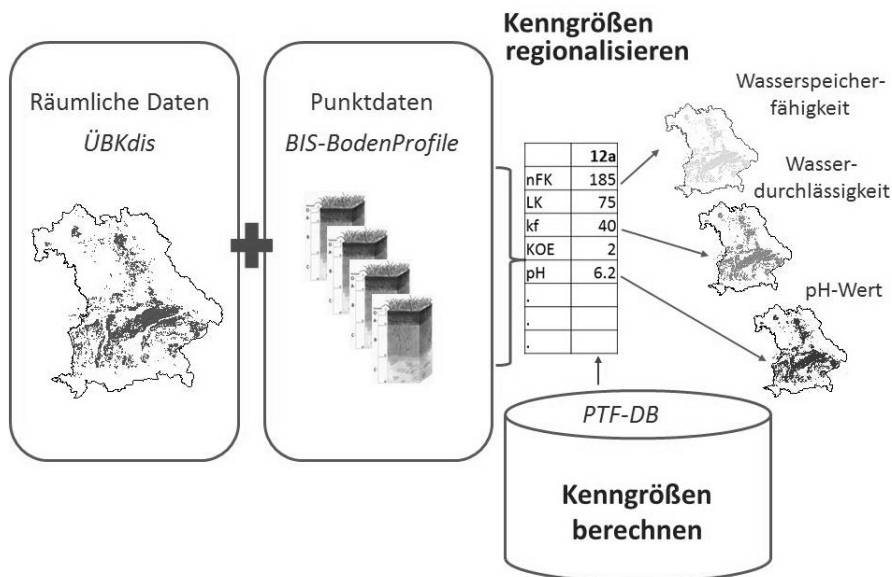


Abb. 1: Schema der Regionalisierung von Bodenbasisdaten

Für die **Ausweisung von Sonderflächen** waren zunächst die Versagensgründe für die Anlage einer KUP juristisch abzuklären. Um die Flächen im GIS herauszufiltern, bei denen mit einem Versagen oder Auflagen zu rechnen ist, mussten die juristischen Aussagen auf entsprechende Flächeneigenschaften heruntergebrochen werden. Für die bayernweite Ausweisung dieser Flächen wurden vorhandene Flächendaten aus Naturschutz, Landschaftspflege und Archäologie verknüpft und nach den anhand der juristischen Klärung erstellten Kriterien gefiltert, ausgewiesen und im System KUP-Scout als Kartenstapel bereitgestellt.

2.3 Tests zur Modellgüte

Statistische Tests an den ausgewählten Modellen

Die Ergebnisse aller Modelle wurden anhand statistischer Größen u. a. Verzerrung (Bias), Präzision, Treffergenauigkeit (Pretzsch & Dursky, 2001), Root Mean Square Error (RMSE) verglichen und beurteilt, wie gut diese für die Praxisflächen zutreffen (Modellgüte).

Sensitivitätsanalyse der Ertragsmodelle an Praxisflächen

Die Gewichtung der Variablen in den einzelnen Biomassefunktionen (und damit ihr Einfluss auf den modellierten Ertrag) wurde mithilfe einer Sensitivitätsanalyse überprüft. Hierbei wurde für jede Variable der Mittelwert aus allen Praxisflächen, sowie Minimum und Maximum des Wertespektrums ermittelt. Um einen „Referenzertrag“ (= Ertragsmittel) zu erhalten, wurden die Ertragsmodelle zuerst mit den Praxisflächen-Mittelwerten ihrer Eingangsvariablen gerechnet. In weiteren Schritten wurden dann nacheinander für jede Variable die Extrema (Minimum, Maximum) eingesetzt und das jeweilige Ertragsmodell gerechnet.

Gültigkeitsbereiche der Modelle – Flächenabdeckung der Eingangsdaten und Häufigkeitsverteilung

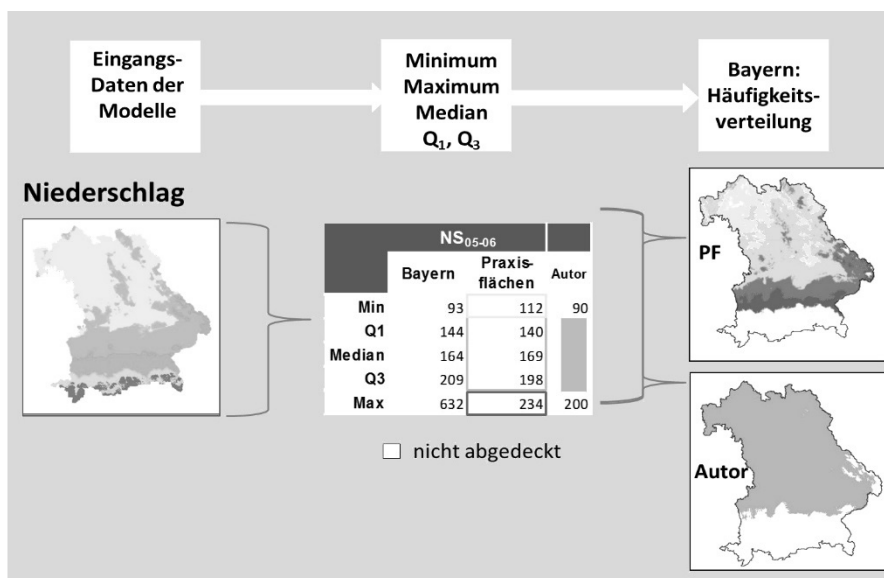


Abb. 2: Schema der Vorgehensweise zur Ermittlung der Häufigkeitsverteilung der in den Ertragsmodellen verwendeten Modellvariablen (Beispiel Niederschlag von Mai bis Juni); PF = Praxisflächen

Der Gültigkeitsbereich des Modells für die bayerische Fläche ergibt sich aus der Flächenabdeckung der Eingangsparameter, die die Autoren zur Modellentwicklung verwendet haben. Dieser Test gibt Auskunft, für welche Flächen in Bayern (Analogieregionen) die Modelle überhaupt anwendbar und die errechneten Ergebnisse gültig sind. Das Modell schneidet am besten ab, bei dem möglichst viele Eingangsparameter möglichst viel der bayerischen Fläche

abdecken. Die Praxisflächen wurden demselben Test unterzogen, um zu sehen, in welchen Bereichen die Erträge der Praxisflächen zur Validierung der Modellergebnisse verwendbar sind (Abb. 2). Die reine Flächenabdeckung des Modells wurde in einem zweiten Schritt mit der flächigen Häufigkeitsverteilung der Eingangsdaten Bayerns bzw. der Praxisflächen kombiniert. Hierbei wurden Wertebereiche zwischen Minimum, 1. Quartil, Median, 3. Quartil und Maximum aufgespannt. Das Modell schnitt am besten ab, bei dem die häufigsten Daten die größte Flächenabdeckung im vom Modell aufgespannten Gültigkeitsbereich aufweisen und die Verteilung von Bayern und Praxisflächen am besten übereinstimmen. Zudem konnte mit diesem Schritt die Lage der Randbereiche der Modelle identifiziert werden und in Überlegungen einfließen, wie das entsprechende Modell erweitert, ggf. extrapoliert oder durch zusätzliche Funktionen verbessert werden kann.

2.4 Anpassung des Basismodells

Regional notwendige Anpassungen, unter Einbeziehung weiterer Standortfaktoren, z. B. Grundwassereinfluss und Temperaturlimit, die im Modell keine Berücksichtigung fanden, wurden über Korrekturfaktoren (Petzold 2013) auf das Modell aufgeprägt.

2.5 Plausibilisierung extremer Erträge

Es stellte sich die Frage, ob extreme Erträge für die entsprechenden Regionen unter Berücksichtigung der Bodenverhältnisse plausibel sind bzw. was die Ursache dieser Erträge ist. Ziel war es daher, diese Standorte zu plausibilisieren. Die Erträge hängen sehr stark von den Wasserhaushaltsparametern des Bodens, insbesondere der nutzbaren Feldkapazität (nFK), ab. Diese wiederum wird durch die Korngrößenzusammensetzung (Bodenart) des Bodens und seine Lagerungsdichte bestimmt. Daher war sicherzustellen, dass die Einheiten der verwendeten Bodenkarte (ÜBKdis) hinsichtlich ihrer Bodenarten für die entsprechenden landwirtschaftlichen Flächen repräsentativ sind und mit der Bodenart in der Bodenschätzungskarte übereinstimmen. In einer Kombination von GIS- und Datenbankauswertungen wurden etwa 600.000 Einzelflächen nach Häufigkeiten, der in der Bodenschätzung vorkommenden Bodenarten je ÜBKdis-Einheit, ausgewertet. Die Auswertung wurde mit den in der ÜBKdis für diese Einheit geforderten Bodenarten verglichen. Der prozentual von den Flächen der Bodenschätzung abgedeckte Anteil wurde je Legendeneinheit bestimmt und mit „wahr“ gekennzeichnet, fehlende Übereinstimmung mit „falsch“.

3 Ergebnisse

3.1 Modellauswahl, eigene Modelle, Neuparametrisierung

Die Prüfung der in den Modellen abgebildeten physiologischen Zusammenhänge ergab, dass vier der gesichteten Modelle alle Anforderungen auf Plausibilität und Kausalität erfüllten: Murach et al (2008), Ali (2009), Aust (2012), Amthauer Gallardo (2014). Im Folgenden werden die Modelle nur noch mit Namen und Modell (Murach, Ali, Aust Amthauer Gallardo) bezeichnet.

Das Modell Murach basiert auf Flächen in Sachsen, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Bayern, Hessen und Niedersachsen ($n = 18$). Der für den Ertrag relevante Parameter ist das sogenannte „Transpirationswasserangebot“, das Wasser, welches den Pappeln für die Transpiration in der Vegetationsperiode zur Verfügung steht. In die Funktion von Ali zur Schätzung des Ertrags über die Bestandsoberhöhe flossen Daten aus Sachsen ($n = 6$) ein. Die Modellparameter sind Sprossalter, Niederschlagssumme, Ackerzahl sowie die nutzbare Feldkapazität. Das Modell Aust nutzt Flächen aus Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Frankreich ($n = 47$) und verwendet als Eingangsgröße die Wasserverfügbarkeit in der Vegetationszeit, in die, mittels Reliefkorrektur, auch der Wasserzu- und -abfluss mit eingehen. Amthauer Gallardo entwickelte unter anderem klonspezifische Ertragsfunktionen aus einem deutschlandweiten Datenpool ($n = 33$). Als Modellvariablen verwendete er die nutzbare Feldkapazität und den Trockenheitsindex nach De Martonne (1926), der sich aus Niederschlagssumme und Temperaturmittel zusammensetzt. Der eine bayerische Modellansatz (multiple lineare Regression) umfasst eine einfache Wasserbilanz aus Niederschlagssumme und nutzbarer Feldkapazität, das Bestandsalter, die Pflanzdichte sowie den Umtrieb als Faktor. Das zweite bayerische Modell greift den Ansatz von Amthauer Gallardo auf, der die Körnung des Bodens (Hauptbodenart) als signifikanten Einflussfaktor auf den Zuwachs berücksichtigt. Für das Modell wurden Ertragsdaten der Praxisflächen ($n = 44$) von Max-Klonen (Alter 5 und 6 Jahre) verwendet.

3.2 Modelltests

Die **Sensitivitätsanalyse** zeigt, dass beim Modell Amthauer Gallardo negative Zuwächse auftreten, wenn alle Variablen den geringsten auf den Praxisflächen vorkommenden Wert annehmen. Das Modell weist also eine begrenzte Gültigkeit an trockenen oder flachgründigen Standorten auf. Das Modell Aust weist die höchste Sensitivität bei hohen Werten der Klimatischen Wasserbilanz auf; hierbei hat die Reliefkorrektur den stärksten Einfluss. Hohe Erträge werden vorwiegend von Relief und Exposition gesteuert. Das Modell Ali errechnet, wenn alle Modellvariablen Maximalwerte erreichen, unrealistisch hohe Erträge. Das Modell scheint tendenziell zu überschätzen. Das Modell Murach wird primär vom Wasserhaushalt gesteuert. Die Höhe des kapillaren Aufstiegs stellt den einflussreichsten Parameter auf die modellierte Zuwachsleistung dar. Betrachtet man für jedes Modell und jeden Eingangsparameter die **Flächenabdeckung**, so zeigen Analogieregionen, die **Gültigkeitsbereiche** des Modells an. Für das Modell Murach zeigte sich, dass es lediglich in den niederschlagsärmeren Regionen Bayerns Gültigkeit besitzt. Darüber hinaus wäre das Modell zu extrapolieren. Ertragsprognosen in diesen Regionen sind fraglich. Das Modell Amthauer Gallardo basiert auf Trockenindizes, die nur im trockenen Nordosten Bayerns, in Unterfranken, vorkommen. Die Bodenwasservariablen (nFK) der Modelle Aust und Murach weisen große Analogieregionen auf und kommen sehr nahe an das bayerische Spektrum heran; das Modell Ali schneidet geringfügig schlechter ab. Das dort verwendete Temperaturmittel deckt sich fast mit den in Bayern vorkommenden Werten (Abb. 3). Das Spektrum der von Ali zur Modellerstellung verwendeten Ackerzahlen deckt einen Großteil der Fläche Bayerns ab. Das Modell Aust schneidet zwar hinsichtlich der Analogeregionen am besten ab. Es beinhaltet jedoch die Problematik, dass die klimatische Wasserbilanz und hier insbesondere ihre Reliefkorrektur, gemäß der Sensitivitätsanalyse im Modell den wichtigsten Eingangsparameter darstellt. Die originale fachliche Vorgehensweise der Reliefkorrektur nach Aust (2012) konnte in Bayern nicht zufriedenstellend nachvollzogen werden. Die in Bayern verwendeten Daten zur Relief-

korrektur basieren auf einem eigenen Rechenweg unter Verwendung des TPI und der nur in Bayern vorhandenen GMK (Geomorphographische Karte; Häring et al., 2012). Dies kann zu anderen Ergebnissen führen als die Anwendung der originalen Methodik. Hierdurch ist die positive Aussagekraft der Analogieregionen und damit das positive Abschneiden des Modells fraglich.

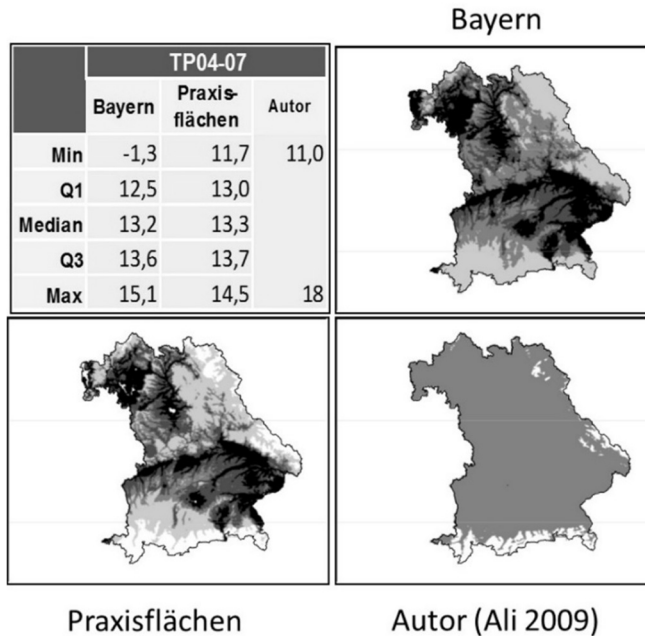


Abb. 3: Häufigkeitsverteilung der Eingangsdaten für Temperatur (April – Juli). Weiß keine Flächenabdeckung, hell Minimum, dunkel Maximum, mittlere Farbtöne Q1 – Q3; mittlere Farbtöne Karte „Autor“ Bereich zwischen Min und Max.

Weder über eine **Neuparametrisierung** noch über die Entwicklung **eigener Ertragsfunktionen** ließ sich eine verbesserte Vorhersage der Zuwachsleistungen gegenüber den Originalmodellen erzielen. Auf Grundlage der statistischen Auswertungen wurde deshalb das Modell nach Ali (2009) in seiner ursprünglichen Parametrisierung als „**Basismodell**“ ausgewählt und in einen weiteren Schritt an bayerische Verhältnisse angepasst.

3.3 Anpassung des Basismodells

Die Auswertung der Ergebnisse aus der statistischen Beurteilung der Modelle der Sensitivitätsanalysen und Gültigkeitsbereiche der Eingangsvariablen ergab, dass das Basismodell bestimmte Kombinationen von Standortvariablen z. B. geringer Niederschlag und hohe Temperaturen oder Grundwassereinfluss nicht abdeckte. Um die Ertragsmodellierung realistischer zu gestalten, wurden sogenannte Korrekturfaktoren angewendet (Petzold 2013). Diese berücksichtigten (1) niedrige Temperaturen, (2) Wassermangel sowie (3) kapillaren Aufstieg bzw. hoch anstehendes Grundwasser (Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht der Korrekturfaktoren zur regionalen Anpassung der Ertragsschätzungen (T: Jahresmittel-Temperatur, TSI: Trockenstress-Index, KWB: Klimatische Wasserbilanz, MNGW: Mittlerer Grundwasser Tiefstand).

Einflussgröße	Variablen	Logik	Korrekturfaktor
Niedrige Temperaturen	Jahresmitteltemperatur (T in °C)	T ≤ 5	0
		5 < T < 8	$1 - \exp(-0,95 * T - 5)^{1,1}$
Trockenheit	Trockenstress-Index (TSI = 0,5 * nFK _{1m} + KWB _{Maï-Oktobèr})	TSI ≤ 0	$5,92 * 10^{-4} * TSI + 1$
Grundwasser-einfluss	Jahresmitteltemperatur (T in °C), Abstand Geländeoberkante-Gr-Horizont (MNGW in cm)	T > 8 & MNGW ≤ 40 (mit Hinweis)	1,1
		T > 8 & 100 < MNGW ≤ 200	
		T > 8 & 40 < MNGW ≤ 100	1,25

3.4 Plausibilisierung extremer Erträge

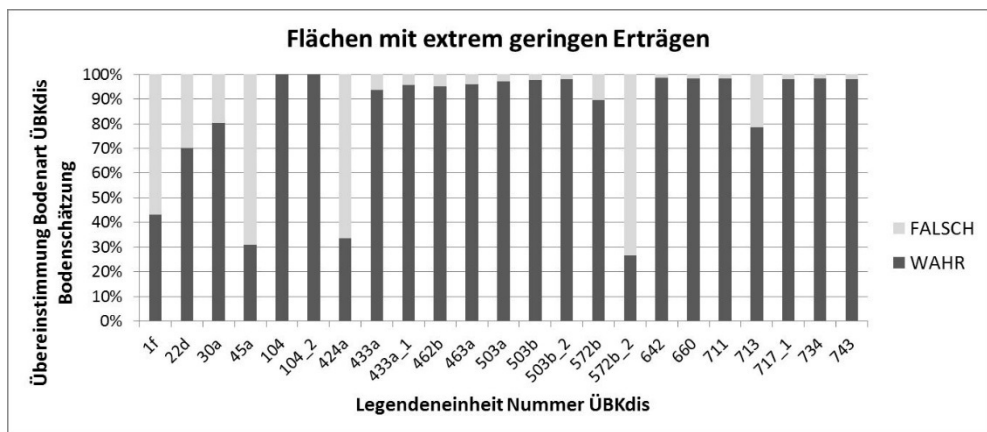


Abb. 4: Übereinstimmung (wahr) der Bodenart der UBKdis-Legendeneinheit und der Bodenschätzungskarte

Nach Anwendung der Korrekturfaktoren ergeben die Berechnungen auf einem Teil der bayrischen Fläche für KUP extrem geringe Erträge von < 3 t_{atro}. Es zeigte sich, dass die Bodenarten der Einheiten der ÜBKdis, die die Grundlage der Regionalisierung der Bodenkennwerte bildet, mit denen der Bodenschätzungskarte weitgehend übereinstimmen. Das heißt, dass die Datengrundlage (ÜBKdis) für die Berechnung der nutzbaren Feldkapazität für Standorte mit geringen Erträgen plausibel ist. Bei einigen sandig dominierten Legendeneinheiten (1f, 22d, 45a, 424a) gibt es Abweichungen. Hier enthalten die als sandig kartierten Einheiten gemäß Bodenschätzung auch lehmige und tonige Böden. Auch bei einer vorwiegend lehmigen (30a) und einer rein tonigen Einheit (572b_2) gibt es Abweichungen in den sandigen Bereich (Abb. 4). Eine Korrektur der Datengrundlage ÜBKdis wäre nur über eine Nachkartierung im Gelände möglich.

4 Fazit

Dank der umfangreichen Modellanalysen war es möglich, ein optimal an bayerische Verhältnisse angepasstes Ertragsmodell zu entwickeln, welches für die bayerischen Flurstücke realistisch Erträge schätzt und dieses in Form einer digitalen Pappel-Ertragskarte, angepasst an unterschiedliche Nutzergruppen, bereitzustellen. Die durchgeführten Tests zur Modellgüte zeigten sowohl die fachlichen als auch die regionalen Modelldefizite auf und ermöglichten es daher, die Modelle auch hinsichtlich ihrer regionalen Gültigkeit zu beurteilen und zu vergleichen. In Kombination mit fachlichen Kriterien aus der Sensitivitätsanalyse konnte sowohl fachlich als auch regional gezielt auf die Modelldefizite, beispielweise über klima- oder grundwasserbasierte Korrekturfaktoren, reagiert werden. Auf diese Weise konnte ein optimales Produkt, flurstückscharf als Beratungswerkzeug im BayWIS und in aggregierter Form im Internet für den interessierten Bürger unter www.kupscout-bayern.de bereitgestellt werden. Die angewandten Verfahren können für die Prüfung der räumlichen Übertragbarkeit von empirischen Modellen sowie die Evaluierung ihrer Gültigkeit genutzt werden.

Literatur

- Ali, W. (2009). *Modelling of Biomass Production Potential of Poplar in Short Rotation Plantations on Agricultural Lands of Saxony, Germany* (Dissertation). Technische Universität Dresden: Fachrichtung Forstwissenschaften.
- Amthauer Gallardo, D. (2014). *Standortbasierte Ertragsmodellierung von Pappel- und Weideklonen in Kurzumtriebsplantagen* (Dissertation). Technische Universität Dresden: Fakultät Umweltwissenschaften.
- Aust, C. (2012). *Abschätzung der nationalen und regionalen Biomassepotentiale* (Bd. Dissertation). Freiburg i. Brsg.
- De Martonne, E. (1926). Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité. *La Meteorologie*, 8, 449–458.
- Häring T., Dietz E., Osenstetter S., Koschitzki T., & Schröder B. (2012). Spatial disaggregation of complex soil map units: A decision tree based approach in Bavarian forest soils. *Geoderma*, 185-186, 37–47.
- Horn, H., Skibbe, K., & Röhle, H. (2013). Wuchsleistung von KUP aus Pappel in Folgerotationen. *AFZ der Wald*, 53–55.
- Murach, D., Murn, Y., & Hartmann, H. (2008). Ertragsermittlung und Potentiale von Agrarholz. *Forst und Holz*, 63(6), 18–23.
- Petzold, R. (2013). *Standortsökologische Aspekte und Anbaupotentiale von Kurzumtriebsplantagen in Sachsen* (Dissertation). Technische Universität Dresden: Fakultät Umweltwissenschaften.
- Pretzsch, H., & Dursky, J. (2001). Evaluierung von Waldwachstumssimulatoren auf Baum- und Bestandesebene. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.*, 172 (8-9), 146–150.