

# Standortbasierte Ertragsmodellierung von Pappel- und Weidenhybriden

Site-based yield modelling of poplar and willow hybrids

*Daniel Amthauer Gallardo, Martin Hofmann und Heinz Röble*

## Zusammenfassung

Der Anbau von schnellwachsenden Baumarten in kurzen Umtriebszeiten kann einen Beitrag zum Klimaschutz und zur Energiesicherung leisten. Unter günstigen Bedingungen reichen deren Naturalerträge bis zu 20  $t_{(atro)}$  je ha und Jahr. Sichere Ertragsersparungen in Abhängigkeit von bodenkundlichen und klimatischen Standortbedingungen sind jedoch auf derzeitiger Informationsgrundlage nicht möglich. Die Entwicklung von standortbasierten Ertragsmodellen ist das Hauptziel des Verbundvorhabens ProLoc (HOFMANN et al., in diesem Band S. 9 ff.).

Für diesen Beitrag wurden Modelle für jeweils einen Pappelklon (Max 1) und einen Weidenklon (Tordis) erarbeitet. Als abhängige Variable wurde der durchschnittliche Gesamtwuchs (dGZ) in  $t_{(atro)}$  je ha und Jahr am Ende der ersten dreijährigen Rotation verwendet. Die gewählte Methode war die der schrittweisen multiplen Regression mit vorgeschalteter Korrelationsanalyse zur Reduzierung von Prädiktoren.

Die Modellierung über alle Standorte (N = 27) brachte nur mäßige Ergebnisse. Das Modell bei Max 1 verwendete als unabhängige Variablen die nutzbare Feldkapazität (nFK) und die Bodenzustandsstufe. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß

( $R^2_{\text{kor}})$  betrug 0,50. Bei der Weide bestand das Modell ausschließlich aus der Kenngröße nFK und zeigte ein  $R^2_{\text{kor}}$  von 0,26. Durch das Clustern der Standorte nach der Hauptbodenart konnten die Bestimmtheitsmaße der Modelle deutlich verbessert werden.

*Hauptbodenart Sand:* Bei dieser Hauptbodenart waren die Bodenzahl, die Ackerzahl, der mittlere prozentuale Schluffgehalt (U %), die nFK, der Quotient zwischen nFK und Luftkapazität (LK) sowie die Niederschlagssumme (N 4,7) und die Trockenheitsindexsumme der Monate April bis Juli (TI 4,7) mit dem dGZ mäßig bis hoch korreliert. Mit dem dGZ invers korreliert waren der prozentuale Sandgehalt (S %) und die Temperatursumme der Monate Juli und August (T 7,8). Das bei der Weide ermittelte Modell beinhaltete die Variablen S %, T 7,8 sowie nFK/LK. Das  $R^2_{\text{kor}}$  des Tordis-Modells beträgt 0,96. Das Max 1-Modell verwendete die Variablen nFK/LK und T 7,8, das  $R^2_{\text{kor}}$  betrug 0,94.

*Weitere Bodenarten – Lehme, Schluffe, Tone:* Anders als bei den Sandböden waren hier die klimatischen Bedingungen kaum bis gar nicht mit dem dGZ korreliert. Vielmehr waren bodenphysikalische Kennwerte die ertragsbestimmenden Variablen. Die entwickelten Modelle beider Prüfglieder bestanden demnach nur aus der Kenngröße nFK. Eine lineare Anpassung erbrachte ein  $R^2_{\text{kor}}$  von 0,54 bei Max 1 bzw. von 0,82 bei Tordis. Eine Optimierung durch nichtlineare Funktionsanpassung führte zu einer Verbesserung der Modelle. Bei Max 1 stieg das  $R^2_{\text{kor}}$  durch sigmoidale Anpassung auf 0,77. Bei Tordis wurden die besten Ergebnisse durch eine logarithmische Anpassung erzielt. Das Bestimmtheitsmaß erhöhte sich auf 0,85.

**Stichworte:** Pappel, Weide, Ertragsmodellierung, Multiple Regression, Bodenphysik, KUP

## Abstract

The planting of fast-growing tree species in short rotation periods can contribute to climate protection and to a reliable energy supply. Under favourable conditions their natural yields reach up to 20 dry Mg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. However, reliable yield predictions in relation to the prevailing soil and climatic site conditions cannot be made given the current data availability. The development of site-based yield models is the primary aim of ProLoc (HOFMANN et al. 2012, p. 9 ff.).

To this end, models for one poplar clone (Max 1) and one willow clone (Tordis) are being developed. As dependent variable, the mean annual increment (MAI) in dry Mg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> at the end of the first three-year rotation was used. The method selected involved a step-wise multiple regression method preceded by correlation analysis to reduce the predictors.

The modelling of all sites (N=27) produced only mediocre results. The model for Max 1 used the independent variables available water storage capacity (AWSC)

and soil status class. The corrected coefficient of determination ( $R^2_{\text{korrr}}$ ) was 0.50. For willow, the model consisted entirely of the parameter AWSC and produced an  $R^2_{\text{korrr}}$  value of 0.26. By clustering the sites according to soil type, the coefficient of determination for the model improved markedly.

*Main soil type sand:* For this main soil type the german soil quality indices (Ackerzahl and Bodenzahl) the mean percentage silt content (U %), the AWSC, the quotient between AWSC and soil air capacity (AC) as well as total precipitation (N 4.7) and the sum drought index for the months from April to July (TI 4.7) correlated moderately to highly with the mean annual increment. The percentage sand content (S %) and the summer temperature of the months July and August (T 7.8) were inversely correlated with the MAI. The model developed for willow comprised the variables S%, T 7.8 and AWSC/AC. The  $R^2_{\text{korrr}}$  of the Tordis model was 0.96. The Max 1 model used the variables AWSC/AC and T 7.8, while the  $R^2_{\text{korrr}}$  value was 0.94.

*Other soil types – loam, silt, clay:* In contrast to the sandy soils, the climatic conditions here correlated barely or not at all with the MAI. Rather, soil physical parameters represented the variables that determined yield. The model developed of both test variants consisted only of the parameter AWSC. A linear fit resulted in an  $R^2_{\text{korrr}}$  of 0.54 for Max 1 and of 0.82 for Tordis. An optimisation by fitting a non-linear function improved the model. For Max 1 the  $R^2_{\text{korrr}}$  increased by fitting a sigmoidal curve to 0.77. For Tordis, the best results were obtained by a logarithmic fit. The coefficient for determination increased to 0.85.

**Keywords:** poplar, willow, yield modelling, multiple regression, soil physics, short rotation coppice

## 1 Einführung

Die derzeit politisch-gesellschaftlich getragene Diskussion zur Neustrukturierung der Energieversorgung in Deutschland befördert den verstärkten Einsatz von erneuerbaren Energien. Dabei spielt die Bioenergie, welche nach Definition aus Biomasse gewonnen wird, eine sehr wichtige Rolle. Ein besonders hohes Potenzial hat dieser Sektor der erneuerbaren Energien in der Bereitstellung von Wärmeenergie durch Holzbiomasse.

Der zukünftig zu erwartende Bedarf an Holzbiomasse für Wärmeerzeugung lässt sich nach Studien von MANTAU (2008) nicht durch eine verstärkte Mobilisierung von Waldholz decken. Hier kann die Anlage von energieeffizienten Kurzumtriebsplantagen (KUP) einen wichtigen Beitrag zur Energiebereitstellung leisten. Da diese Energie dezentral gewonnen wird, tragen KUPs zur Unabhängigkeit von Energieimporten bei und gleichzeitig werden Struktur und Wertschöpfung im ländlichen Raum gestärkt.

Trotz der genannten Vorteile kann auf derzeitiger Informationsgrundlage das standortbasierte Ertragspotenzial von Kurzumtriebsplantagen überregional nicht genau abgeschätzt werden. Ziel des ProLoc-Projekts ist die Entwicklung eines Ertragsmodells auf statistisch-empirischer Grundlage zur Abschätzung des Ertragspotenzials ausgesuchter Pappel- und Weidenhybriden auf landwirtschaftlichen Flächen in kurzer Rotation. Hierzu wurden im Jahr 2008 insgesamt 37 Versuchsflächen, mit jeweils drei Pappel- und zwei Weidenhybriden in vierfacher Wiederholung, angelegt. Eine große Amplitude der Standortcharakteristika, sowohl bodenkundlich als auch klimatisch erlaubt einen weiten Anwendungsbereich.

Dieser Beitrag wurde aus den vorläufigen Modellierungsergebnissen zweier ausgewählter Klone, ein Pappelklon (Max 1) und ein Weidenklon (Tordis), erarbeitet.

## 2 Material und Methoden

Kennwerte des Bodenwasser- und Lufthaushaltes, der Bodenfruchtbarkeit/Nährstoffversorgung, des Niederschlagsregimes und des Temperaturhaushalts können als Indikatoren für das Baumwachstum gesehen werden (PETZOLD et al. 2009, PRETZSCH 2001). Mit dem Ziel, die ertragsbestimmenden Faktoren und somit Inputgrößen für das Modell zu identifizieren, sind aus den genannten Indikatoren Variablen festgelegt worden (s. Tab. 1). Diese Größen, die als unabhängige Variablen bei der Auswertung zum Einsatz kommen, wurden im Rahmen der Standortscharakterisierungen aufgenommen und dokumentiert.

Tabelle 1: *Ausgewählte Parameter der Modellentwicklung (verändert nach AMTHAUER GALLARDO, in Vorbereitung)*

<b>Wasserversorgung</b>	<b>Nährstoffversorgung Bodenfruchtbarkeit</b>	<b>Durchwurzelung Sauerstoffversorgung</b>	<b>Wärme</b>
N-Summen	Bodenzahl/Ackerzahl	Luftkapazität	T- Summen
Trockenheitsindex	N-, P-, K- und Mg- Vorräte	Lagerungsdichte	
Nutzbare Feldkapazität	Humusgehalt	Korngrößenverteilung	

Auf die Aufnahmemethodik sowie auf die genaue Definition dieser Variablen wird in den folgenden Kapiteln näher eingegangen. Weitere Beschreibungen über die Aufnahmemethodik sowie Standortcharakterisierung sind in den Beiträgen von HEYN u. WACHENDORF (in diesem Band S. 127 ff.) sowie HOFMANN et al. (in diesem Band S. 9 ff.) zu finden.

## 2.1 Wasserversorgung

Zur Charakterisierung der Wasserversorgung werden die Niederschlagssummen, Trockenheitsindizesummen und die nFK herangezogen. Der Niederschlag wurde in Form von unterschiedlich langen Summen aus dem Zeitraum zwischen Februar und Oktober berücksichtigt (s. Tab. 2). An dieser Stelle ist anzumerken, dass bei den klimatischen Variablen Niederschlag, Temperatur und Trockenheitsindex, mittlere Summen bzw. Mittelwerte aus den drei Beobachtungsjahren ermittelt wurden. Aufgrund ihrer zeitverzögerten Auswirkung auf das Wasserangebot wurden die Niederschläge aus den Monaten Februar, März und April, die nach Definition nicht zur forstlichen Vegetationsperiode gehören, bei der Summenbildung ebenfalls verwendet.

*Tabelle 2: Niederschlagsvariablen dargestellt in unterschiedlich lange Monatssummen (verändert nach AMTHAUER GALLARDO, in Vorbereitung). Zahlen indizieren Monatsnummer (Januar 1, Februar 2 usw.)*

Niederschlagsvariablen						
N 2-3	N 2-4	N 2-5	N 2-6	N 2-7	N 2-8	N 2-9
N 3-4	N 3-5	N 3-6	N 3-7	N 3-8	N 3-9	N 4-5
N 4-6	N 4-7	N 4-8	N 4-9	N 5-6	N 5-7	N 5-8
N 5-9	N 6-7	N 6-8	N 6-9	N 7-8	N 7-9	N 8-9

Die Darstellung der Wechselwirkung zwischen Temperatur und Niederschlag in einer kombinierten Variablen erfolgt über den Trockenheitsindex nach DE MARTONNE (Niederschlagssumme [mm]/(Temperaturmittelwert [°C] + 10), DE MARTONNE 1926). Neben den Niederschlagsvariablen wurden auch bei den Trockenheitsindizesummen unterschiedlich lange Zeiträume, zwischen Februar und Oktober, berücksichtigt (s. Tab. 3). Die Klimadaten wurden ausschließlich von Stationen des deutschen Wetterdiensts bezogen. Die maximale Entfernung der Klimastationen zum Standort betrug ca. 28 km, wobei die meisten Stationen sich in einem Umkreis von 10 km zu den Versuchsflächen befanden.

*Tabelle 3: Variablen des Trockenheitsindizes dargestellt in unterschiedlich langen Monatssummen (verändert nach AMTHAUER GALLARDO, in Vorbereitung). Zahlen indizieren Monatsnummer (Januar 1, Februar 2, usw.)*

Trockenheitsindex						
TI 2-3	TI 2-4	TI 2-5	TI 2-6	TI 2-7	TI 2-8	TI 2-9
TI 3-4	TI 3-5	TI 3-6	TI 3-7	TI 3-8	TI 3-9	TI 4-5
TI 4-6	TI 4-7	TI 4-8	TI 4-9	TI 5-6	TI 5-7	TI 5-8
TI 5-9	TI 6-7	TI 6-8	TI 6-9	TI 7-8	TI 7-9	TI 8-9

Die Ermittlung der Variablen nFK erfolgte nach der bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5 (AG BODEN 2005). Zur indirekten Bestimmung werden Daten der Bodenart, der Trockenrohddichte sowie des Humusgehaltes benötigt. Bestimmt wurde die nFK getrennt für zwei Bodentiefen, und zwar von 0-30 und 30-60 cm. Für die Modellberechnungen wurden die aufsummierte nFK-Werte der Tiefe 0 bis 60 cm verwendet.

## 2.2 Nährstoffversorgung und Bodenfruchtbarkeit

Kennwerte der bundesweit durchgeführten Reichsbodenschätzung, wie Boden- und Ackerzahl, stellen in der vorliegenden Modellentwicklung eine wichtige Informationsgrundlage dar. Das Nutzen dieser Standortinformationen für die modellhafte Abschätzung von Erträgen landwirtschaftlicher und forstlicher Kulturen belegten bereits u. a. BROZIO et al. (2009) und ALI (2009). Diese Daten sind über die offizielle Anlaufstelle der zuständigen Finanzämter gesammelt worden. Die meisten Standorte im Verbundvorhaben wiesen eine ehemalige Nutzung als Acker oder Baumschulfläche auf und sind nach dem Ackerschätzungsrahmen bewertet. Im Falle einer ehemaligen Bewirtschaftung als Grünland erfolgte die Bewertung in Anlehnung an die Kennzahlen benachbarter Ackerflächen.

Die pflanzenverfügbaren Gehalte der Nährstoffe P, K und Mg sowie der Gesamtstickstoffgehalt (Nt) wurden an allen Standorten für die Tiefen 0-30 und 30-60 cm im Jahr 2009 im Rahmen der Standortcharakterisierung bestimmt. Die Nährstoffvorräte pro Hektar wurden unter Einbeziehung der Trockenrohddichte sowie der Stoffkonzentrationen errechnet. Diese so hergeleiteten Vorräte an pflanzenverfügbarem P, K und Mg sowie Gesamtstickstoff in der Tiefe 0-60 cm sind als Variablen für die Modellbildung geprüft worden. Die Menge an organischer Substanz pro Hektar für die Tiefe 0-60 cm fand ebenfalls in der statistischen Analyse Berücksichtigung.

### 2.3 Durchwurzelbarkeit und Sauerstoffversorgung

Die Luftkapazität, welche als ein Maß für die Sauerstoffversorgung fungiert, wurde nach den Kalkulationstabellen der KA Boden 5 (AG BODEN, 2005) in den Tiefen zwischen 0-30 cm und 30-60 cm errechnet. Hierzu waren, analog zum Herleiten der nFK, Informationen zur Bodenart, Trockenrohichte und Humusgehalt notwendig. Als Variable für die Modellierung ist die Summe der Luftkapazität in der Untersuchungstiefe 0-60 cm gewählt worden. Die mittlere Lagerungsdichte sowie die Gehalte an Sand, Schluff und Ton in der Tiefe 0-60 cm waren Variablen für die statistische Analyse.

### 2.4 Wärmehaushalt

Die Berücksichtigung des Faktors Wärme findet über Temperatursummen verschiedener Monate statt. Der Zeitraum zur Variablenbildung lag zwischen März und September (s. Tab. 4).

*Tabelle 4: Temperaturvariablen dargestellt in unterschiedlich langen Monatssummen (verändert nach AMTHAUER GALLARDO, in Vorbereitung). Zahlen indizieren Monatsnummer (Januar 1, Februar 2, usw.)*

Temperaturvariablen						
T 3-4	T 3-5	T 3-6	T 3-7	T 3-8	T 3-9	T 4-5
T 4-6	T 4-7	T 4-8	T 4-9	T 5-6	T 5-7	T 5-8
T 5-9	T 6-7	T 6-8	T 6-9	T 7-8	T 7-9	T 8-9

### 2.5 Abhängige Modellvariablen

Hauptzielvariable des Modells ist die Biomasse pro Flächeneinheit, welche als durchschnittlicher Gesamtzuwachs (dGZ) in  $[t_{\text{atro}}\text{ha}^{-1}\text{a}^{-1}]$  ausgedrückt wurde. Die Bestimmung des durchschnittlichen Gesamtzuwachses erfolgte durch die systematische, destruktive Aufnahme von 24 Pflanzplätzen einer jeder Kernparzelle des Versuches (detaillierte Informationen zum Versuchsaufbau sind bei HOFMANN et al., in diesem Band S. 9 ff., zu finden). Dabei wurde das Frischgewicht der einzelnen Pflanzplätze, unabhängig von der Anzahl an Höhentrieben, gemessen. Die Ermittlung des Trockensubstanzgehaltes fand an drei Pflanzplätzen pro Teilparzelle statt. Diese Proben wurden aus allen Triebabschnitten sowie Astmaterial zusammengestellt und sind bis zur Gewichtskonstanz (bei 105 °C) getrocknet. Die atro-Gewichte pro Pflanzplatz sind über die Umrechnung der Frischgewichte mit dem Trockensubstanzanteil hergeleitet worden. Anschließend erfolgte die Hochrechnung auf den Hektarwert, wobei eine einheitliche Begründungsdichte von 11.111 Pflanzplätzen pro Hektar zugrundegelegt wurde. Der dGZ schließlich

ergibt sich durch Division der Biomasse pro Hektar mit der Anzahl der Wuchsperioden (im vorliegenden Beitrag waren drei Wuchsperioden zu verzeichnen).

### 2.5.1 Statistische Analyse

Die statistische Auswertung wurde mittels SPSS (Version 18) vorgenommen.

Die Erstellung des Modells beinhaltet mehrere Rechenschritte (s. Abb. 1). Der erste Schritt zur Identifizierung von ertragsbestimmenden Variablen war eine Korrelationsanalyse, welche je nach Variablenkategorie (ordinal bzw. metrisch skaliert) entweder nach Pearson oder nach Spearman durchgeführt wurden. Mit den signifikant korrelierten Variablen wurde in einem zweiten Schritt eine schrittweise lineare Regression zur Schätzung des dGZ-Biomasse über alle Standorte durchgeführt. Durch diese Methode werden signifikante Variablen in Abhängigkeit von ihrem Erklärungsbeitrag automatisch ausgewählt und in die Regression einbezogen (WÖSTEN et al. 2001). Zur Beurteilung der Schätzgenauigkeit wurde das korrigierte Bestimmtheitsmaß ( $R^2_{\text{kor}}$ ) für jedes Modell errechnet.

Da die zusammenfassende Auswertung aller Standorte keine zufriedenstellenden Ergebnisse erbrachte, wurde versucht, durch Bildung von Standortgruppen (Clustering) mit ähnlichen bodenphysikalischen Eigenschaften höhere Schätzgenauigkeiten zu erreichen. Ergänzend erfolgte durch Transformation der Eingangsvariablen eine Bildung neuer bzw. aggregierter Variablen. Außerdem wurde die Eignung nichtlinearer Ansätze wie logarithmischer, polynomischer, Potenz- sowie sigmoidaler Funktionen geprüft.

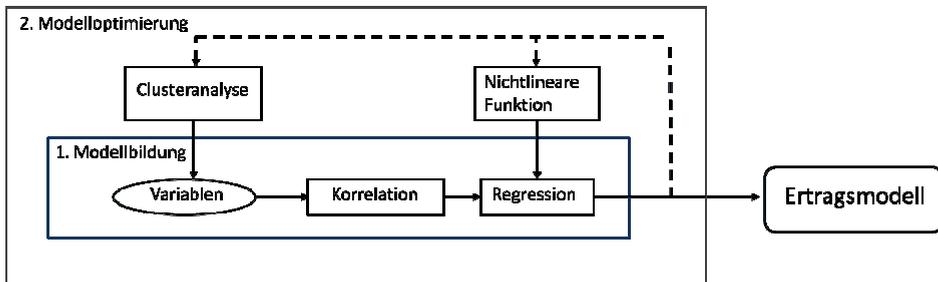


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte der Modellentwicklung (verändert nach AMTHAUER GALLARDO, in Vorbereitung)

### 3 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden wird hauptsächlich auf die Ergebnisse der Regressionsanalyse eingegangen. Eine umfassende Darstellung der Ergebnisse zur Korrelationsanalyse ist bei HOFMANN et al. (in diesem Band S. 9 ff.) zu finden.

#### 3.1 Ergebnisse bei zusammenfassender Auswertung aller Standorte

Als ertragsbestimmende Variablen für den dGZ konnten die Bodenzustandsstufe, die Bodenzahl, die Ackerzahl, der pH-Wert, die nFK, die Niederschlagssumme im Frühjahr sowie der Trockenheitsindex des Zeitraums zwischen April und Juli identifiziert werden. Der Einfluss der Nährstoffversorgung konnte als sehr gering eingestuft werden. Weder der Humusgehalt noch die Vorräte an pflanzenverfügbarem P, K und Mg zeigten eine signifikante Beziehung mit der Biomasseleistung. Einzig Nt bei Max 1 zeigte eine signifikante Beziehung zum dGZ. Insgesamt waren alle Variablen mit Ausnahme der nFK mit dem dGZ nur gering korreliert.

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen Ergebnisse der Regressionsanalyse. Das bei Max 1 erzielte Modell wies ein  $R^2_{\text{kor}} = 0,5$  auf. Dabei berücksichtigte Variablen waren die Bodenzustandsstufe und die nFK. Das Tordis-Modell zeigte ein sehr geringes  $R^2_{\text{kor}} = 0,26$ . Die dabei berücksichtigte Variable war die nFK. Modelle einer solch niedrigen Genauigkeit sind für die Praxisanwendung nicht geeignet.

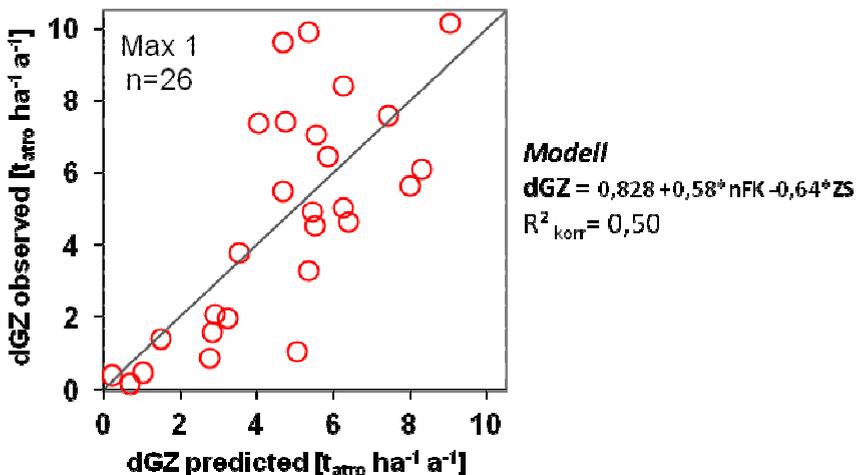


Abbildung 2: Beobachteter gegen modellierten dGZ sowie Modellausdruck und  $R^2_{\text{kor}}$  beim Prüfling Max 1, alle Standorte

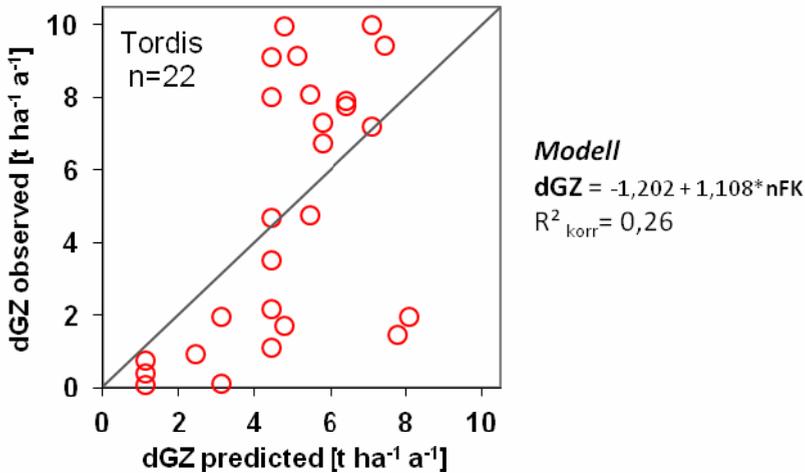


Abbildung 3: Beobachteter gegen modellierten dGZ sowie Modellausdruck und  $R^2_{\text{korr}}$  beim Prüfglied Tordis, alle Standorte

### 3.2 Ergebnisse bei Clusterung nach bodenphysikalischen Eigenschaften

Bei der Clusterung nach bodenphysikalischen Eigenschaften wurden zwei Gruppen ausgeschieden: Die erste Gruppe bildeten die Standorte mit der Hauptbodenart Sand. Die zweite Gruppe setzte sich aus den Standorten mit den Hauptbodenarten Schluff, Lehm und Ton zusammen, die sich hinsichtlich ihrer bodenphysikalischen Charakteristika insbesondere bez. Wasser- und Lufthaushalt deutlich von der ersten Gruppe abgrenzen lassen.

#### 3.2.1 Hauptbodenart Sand

Das Schätzmodell für Max 1 berücksichtigte als Erklärungsvariablen die Kenngrößen nFK/LK und T 7,8 (Temperatursumme des Zeitraums zwischen Juli und August) und wies ein  $R^2_{\text{korr}}$  von 0,92 auf (s. Abb. 4).

Der Quotient nFK/LK ist eine der transformierten Eingangsvariablen. Die LK verhält sich bei sandigen Bodenarten invers proportional zur nFK. Aus diesem Grund wirkt sich die Division von nFK, mit der LK als Divisor, verschärfend auf die Größe der nFK. Somit gilt die Variable nFK/LK in diesem Fall als eine Variable der Wasserversorgung. Die zweite Eingangsvariable im Max 1-Modell war T 7,8. Obwohl generell von einer wachstumsbegünstigenden Wirkung durch Wärme ausgegangen werden kann, zeigten die Hochsommertemperaturen (Monate Juli und August) eine invers korrelierte Beziehung mit dem dGZ. Die inverse Beziehung kann durch den Einfluss der Sommertemperaturen auf die Transpiration der Pflanzen und auf die Bodenevaporation erklärt werden. Das zur Verfügung stehende Wasser wird aus diesem Grund reduziert und das Wachstum dadurch gehemmt.

Die Variable nFK/LK war mit 0,745 für den größten Teil der Modellgenauigkeit verantwortlich. Eine Verbesserung des  $R^2_{\text{korr}}$  der Regression im Umfang von ca. 18 % wurde durch die Berücksichtigung der Variable T 7,8 erzielt.

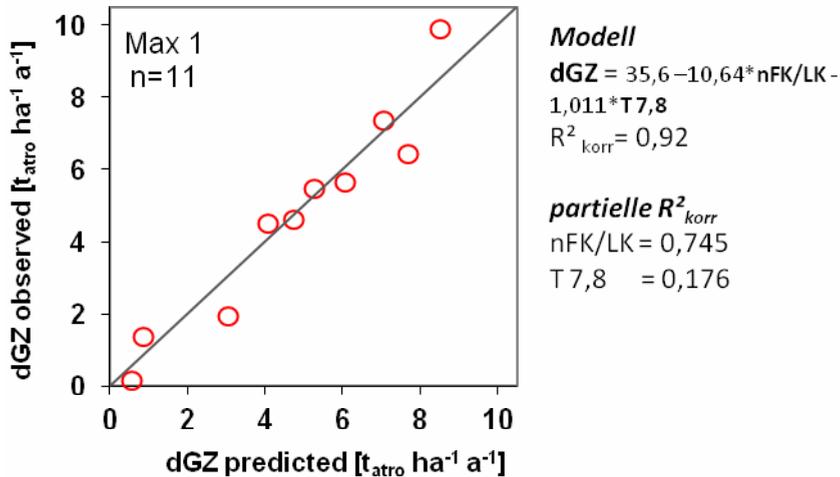


Abbildung 4: Beobachteter gegen modellierten dGZ, Modellausdruck, Modell- $R^2_{\text{korr}}$  und partielle  $R^2_{\text{korr}}$  beim Prüfglied Max 1, Hauptbodenartcluster Sand

Das Tordis-Modell wies, wie das Max 1-Modell, eine sehr hohes  $R^2_{\text{korr}}$  auf (0,96). Die Modellvariablen waren (mit steigendem  $R^2_{\text{korr}}$ ): nFK/LK (0,072), T 7,8 (0,188) und der prozentuale Sandgehalt (0,698) (s. Abb. 5).

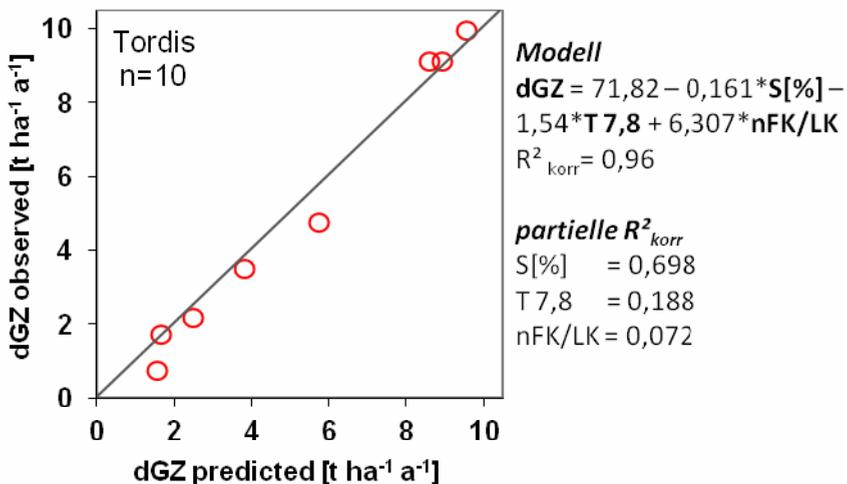


Abbildung 5: Beobachteter gegen modellierten dGZ, Modellausdruck, Modell- $R^2_{\text{korr}}$  und partielle  $R^2_{\text{korr}}$  beim Prüfglied Tordis, Hauptbodenartcluster Sand

Physikalisch werden mit diesem Modell ähnliche Prozesse abgebildet wie bei Max 1. Der Sandgehalt ist mit der nFK in starkem Maß invers korreliert. Die ertragsmindernde Auswirkung der Sommertemperatur ist hier genau wie bei Max 1 festzustellen. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse der Regressionsanalyse beider Klone den sehr starken Einfluss der Wasserversorgung auf das Wachstum von Kurzumtriebsplantagen mit Pappel und Weiden.

### 3.2.2 Hauptbodenarten Lehm, Schluff und Ton

Bei diesem Standortcluster zeigten die Ergebnisse der Korrelationsanalyse, abweichend vom Cluster Hauptbodenart Sand, eine sehr geringe Beziehung des dGZ mit den klimatischen Variablen. Vielmehr wiesen bodenphysikalische Kennwerte wie die nFK und der prozentuale Schluffgehalt die stärkste Beziehung zum dGZ auf. Demnach überraschte nicht, dass die Modelle beider Prüfglieder nur die Variable nFK beinhalteten (s. Abb. 6 und Abb. 7).

Die Verwendung eines sigmoidalen anstelle eines linearen Regressionsmodells für Max 1 führte zu einer deutlich erhöhten Güte der Anpassung, das  $R^2_{\text{kor}}$  stieg von 0,54 auf 0,77. Umgerechnet bedeutet dies eine Verbesserung von fast 50 % in der Genauigkeit.

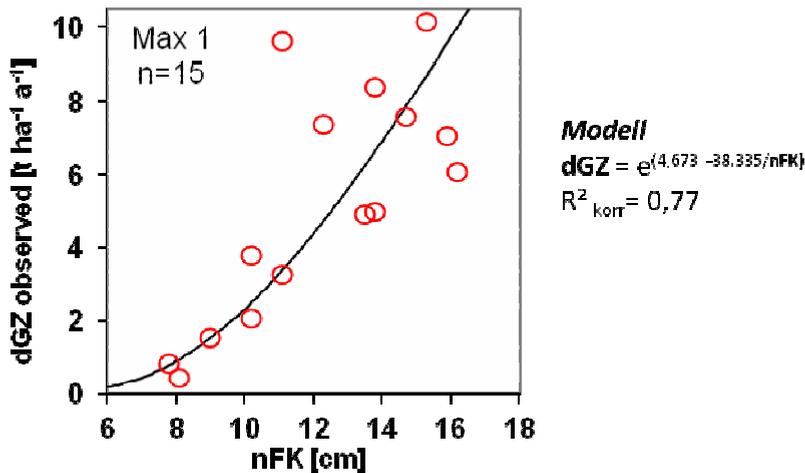


Abbildung 6: dGZ in Abhängigkeit der nFK; nichtlineare Modellanpassung und  $R^2_{\text{kor}}$  beim Prüfglied Max 1, Hauptbodenartcluster Schluff-Lehm-Ton

Das Tordis-Modell zeigte mit einer linearen Funktion ein  $R^2_{\text{kor}}$  von 0,82. Eine logarithmische Anpassung hatte nur eine geringfügige Verbesserung des  $R^2_{\text{kor}}$  (0,85) zur Folge.

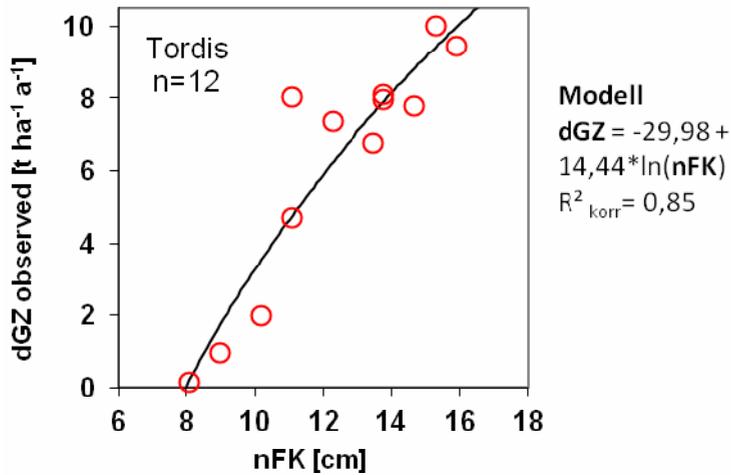


Abbildung 7:  $dGZ$  in Abhängigkeit der  $nFK$ ; nichtlineare Modellanpassung und  $R^2_{\text{korr}}$  beim Prüfglied Tordis, Hauptbodenartcluster Schluff-Lehm-Ton

Eine Erklärung für die geringe Relevanz von klimatischen Variablen kann in der ausgeprägten Wasserhaltekapazität dieser Böden liegen. So weist die Mehrheit der Böden in diesem Cluster höhere  $nFK$ -Werte auf als die Böden mit Hauptbodenart Sand. Zudem ist die Leitfähigkeit dieser Böden geringer als die der Sandböden, was ebenfalls zur Wasserspeicherung beiträgt. Aufgrund dieser Eigenschaften können die schwereren Böden offensichtlich die mangelnde Wasserversorgung während der sehr trockenen Monate in der ersten und zweiten Wuchperiode kompensieren. Es ist allerdings denkbar, dass mit zunehmender Beobachtungsdauer Klimateffekte einen größeren Einfluss bekommen.

#### 4 Fazit

Die Hauptbodenart hatte einen großen Einfluss sowohl auf die korrelierten Variablen als auch auf die Straffheit der Korrelation. Bei Berücksichtigung aller Standorte lagen die  $R^2_{\text{korr}}$  der durch multiple Regression errechneten Modelle unter 0,5. Erst die Gruppierung der Standorte nach der Hauptbodenart verbesserte die Güte der Modelle deutlich. Beim Cluster Sand wurden der Sandgehalt [%], die  $nFK/LK$  sowie die Temperatursumme zwischen Juli und August als unabhängige Variablen im Modell berücksichtigt. Bei den weiteren Hauptbodenarten (L, U, T) spielte die  $nFK$  eine bedeutsame Rolle.

Als Ausblick können folgende Fragen gestellt werden:

- Wie gestaltet sich die Dynamik der Erträge in den Folgerotationen?
- Gibt es bei Folgerotationen standortsspezifische Verläufe der Mehrerträge?

- Ist eine Verbesserung der Modellvorhersage durch direkte Bestimmungsmethoden bodenphysikalischer Kennwerte und Erschließung tieferer Bodenschichten realisierbar?

## Literatur

- AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Hannover, 438 S.
- ALI, W. (2009): Modelling of Biomass Production Potential of Poplar in Short Rotation Plantations on Agricultural Land of Saxony, Germany. Dissertation, Fachrichtung Forstwissenschaften, TU Dresden, 130 S.
- AMTHAUER GALLARDO, D. (in Vorbereitung): Erfassung und Modellierung von Klon-Standort-Wechselwirkungen bei Pappel und Weide auf landwirtschaftlichen Standorten in kurzen Rotationen
- BROZIO, S.; PIORR, H.-P.; ZEIDLER, M. u. TORKLER, F. (2009): Methodik zur Ermittlung standortspezifischer Bioenergiepotenziale unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien am Beispiel des Landes Brandenburg, 49-55, Kurzfassungen der Beiträge zum Workshop „Modellierung des Systems Nutzpflanze-Boden – Herausforderungen des 21. Jahrhunderts“, 26. und 27. Februar 2009, Kiel, 125 S.
- DE MARTONNE, E. (1926): Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité. La Meteorologie, 449-458
- MANTAU, U. (2008): Holzrohstoffbilanz Deutschland, Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung bis 2012. Hamburg: INFRO – Informationssysteme für Rohstoffe und Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft, 2008, 79 S.
- PETZOLD, R.; FEGER, K.H. u. RÖHLE, H. (2009): Standörtliche Voraussetzungen für Kurzumtriebsplantagen. In: BEMMAN, A. u. KNUST, C. (Hrsg.): AGROWOOD Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven, 44-53, Berlin, 342 S.
- PRETZSCH, H. (2001): Modellierung des Waldwachstums. Parey Buchverlag Berlin, 341 S.
- WÖSTEN, J.H.M.; PACHEPSKY, Y.A. u. RAWLS, W.J. (2001): Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing hydraulic characteristics. J. Hydrol. 251, 123-150

Korrespondierender Autor:

Daniel Amthauer Gallardo  
Kompetenzzentrum HessenRohstoffe e.V.  
Am Sande 20  
37213 Witzenhausen  
E-Mail: [d.amthauer@hero-hessen.de](mailto:d.amthauer@hero-hessen.de)  
URL: <http://www.hero-hessen.de/>

Dr. Martin Hofmann  
Kompetenzzentrum HessenRohstoffe (HeRo) e.V.

Prof. Dr. habil. Heinz Röhle  
TU Dresden, Institut für Waldwachstum und Forstliche Informatik