

1 EINLEITUNG

1.1 Einführung

Nachhaltigkeit, die zentrale Forderung der UN-Umweltkonferenz 1992, ist ein Begriff, der seit mehr als 200 Jahren die Arbeitsweise der Forstwirtschaft in Ländern wie Deutschland bestimmt hat. Die nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen ist eine Herausforderung der heutigen Gesellschaft. Im forstlichen Bereich drückt sich das zunehmende Interesse der Gesellschaft für die Erhaltung der Wälder und der Umwelt im Begriff einer nachhaltigen Bewirtschaftung aus. Die Bewirtschaftung der Wälder, also der forstlichen Ressourcen, muss als ganzheitliche Verpflichtung im Sinne nicht nur der ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekte, sondern auch lokal, regional, national und global gesehen werden. Die Diskussionen um die Erweiterung des Nachhaltigkeitsbegriffs im Rahmen von internationalen Waldkonferenzen führten zu einer Resolution über die nachhaltige Bewirtschaftung der Wälder.

Seit der Umweltkonferenz von Rio de Janeiro 1992 und der Annahme der *Agenda 21* hat sich die Staatengemeinschaft verpflichtet, die Nachhaltigkeit der Waldwirkungen zu erweitern und gleichrangig für die Erhaltung der biologischen Vielfalt, Produktivität, Erneuerungsfähigkeit und Vitalität zu sorgen (Glück, 1993). Konkret wurden die Kriterien für eine nachhaltige Forstwirtschaft auf den Forstministerienkonferenzen zum Schutz der Wälder in Europa von Helsinki (1993) und Lissabon (1998) und die Kriterien für die Erhaltung und nachhaltige Bewirtschaftung in den gemäßigten und borealen Zonen formuliert. An diesen Initiativen beteiligen sich heutzutage mehr als 100 Länder (FSC, 2005).

Die Kriterien der nachhaltigen Bewirtschaftung sollten in den Planungsprozess eingebracht und in der strategischen Forsteinrichtung bzw. Forstplanung integriert werden. Wichtige Hilfsmittel dafür können Wachstumsmodelle mit zielführenden Methoden wie der Simulation sein, denn sie ermöglichen dem Forstplaner, verschiedene Handlungsalternativen und langfristige Konsequenzen für die Entwicklung des Waldes zu prognostizieren. Darüber hinaus lassen die Simulationsmodelle als Werkzeug der nachhaltigen Bewirtschaftung komplizierte Prognosen, etwa die Entwicklung mehrerer Straten bei Anwendung verschiedener Durchforstungsverfahren und deren Konsequenzen, abbilden. Der Umstand ist insofern bedeutsam, als forstwirtschaftliche

Maßnahmen in Waldbeständen um so präziser und zielführender geplant werden können, je genauer deren Wachstumsdynamik vorausgesagt werden kann.

Die Hilfsmittel für die Bewirtschaftung, die in den Wäldern verwendet werden, sind in vielen Orten der Welt ähnlich; dennoch können nur wenige waldbauliche Handlungsalternativen für ein spezifisches Waldgebiet verallgemeinert werden. Daher ist es notwendig, die Dynamik des Wachstums und die Entwicklung der heimischen Wälder zu kennen. Die Forsteinrichtung sollte sich nicht nur auf eine genaue Einschätzung des Produktionsvolumens bzw. der Marktleistungen des Betriebs und des Schutzes der Wälder beschränken, sondern auch bestrebt sein Bewirtschaftungsmethoden für alle Wald- und Bestandsstrukturen, inklusive der landes- und volksculturellen Leistungen zu finden.

Die Simulationsmodelle sind heutzutage für die umfassende Planung der waldbaulichen Alternativen unentbehrlich. Sie können wichtige Hilfsmittel für Szenarienvergleiche, Zustandsanalysen und Entscheidungsunterstützung sein. Mit ihnen kann außerdem versucht werden, die maximale Produktivität und ökonomische Rentabilität des Waldes zu erreichen. Seit ungefähr zwei Jahrzehnten wurden weltweit verschiedene Waldwachstumsmodelle zur Nachhaltigkeitskontrolle entwickelt, die in Waldwachstumssimulatoren implementiert wurden. Ein Grund für die Vielfalt von Waldwachstumssimulatoren liegt darin, dass kein Wachstumsmodell oder Simulator für die Lösung aller Waldsituationen geeignet ist, sondern meist für spezielle Aufgaben einer Region entwickelt worden ist.

1.2 Die forstliche Region El Salto, Durango, Mexiko

Mit ca. 55 Millionen ha ist heute ungefähr 28% der gesamten Fläche Mexikos von Wäldern bedeckt (Corral *et al.*, 2006). Diese Wälder sind sehr unterschiedlich, ermöglichen verschiedene Nutzungen und sind lebenswichtig für die Landwirtschaft. Am meisten verbreitet sind Kiefern-Eichen Wälder. Sie bedecken 16% des nationalen Territoriums, entsprechend einer Fläche von 21,8 Mio. Hektar. Sie wachsen auf den Hängen der *Sierra Madre Oriental*, *Sierra Madre Occidental*, *Sierra Madre del Sur* und „*Eje Neovolcánico*“.

Etwa 21 Mio. Hektar der mexikanischen Wälder können für die Holzproduktion genutzt werden. Für sieben Mio. Hektar gibt es ein vom Umweltministerium „SEMARNAT“ anerkanntes Forsteinrichtungsprogramm. Am produktivsten wächst der

Wald in den Bundesländern Durango, Chihuahua, Michoacán, Guerrero und Oaxaca. In diesen Bundesländern wurden im Jahre 1997 5,7 Mio. m³ Kiefernholz gefällt. Das entspricht 74% der nationalen Holzproduktion (Corral *et al.*, 2006).

Die forstliche Region von El Salto, Durango umfasst ca. 580.000 Hektar und ist ein sehr wichtiges Holzproduktionsgebiet. Sie befindet sich im Bundesstaat Durango innerhalb der Gebirgsregion „*Sierra Madre Occidental*“ im Nordwesten Mexikos zwischen dem 23°30' - 24°15' Breiten- und 105°15' - 105°45' Längengrad, 100 km südwestlich von Durangos Hauptstadt (Abbildung 1-1). Das Gebiet erstreckt sich in einer Höhenlage von 1400 bis 2600 m ü. NN. Überwiegend herrscht gemäßigttes Klima mit Regenfällen. Die durchschnittliche Temperatur liegt bei 20° - 22° und der durchschnittliche jährliche Niederschlag reicht von 800 bis 1200 Millimeter.

Ungefähr 90% der Regionsfläche ist von Wäldern überzogen (Corral *et al.*, 2006), davon sind 2/3 Kiefern-Eichen-Bestände. Ungenutzte Gebiete mit kleinem Gebüsch finden sich westlich von der Gebirgsregion. Die Tabelle 1-1 gibt eine Übersicht über die unterschiedlichen Waldnutzungen in El Salto.

Tabelle 1-1: Klassifizierung der gesamten Fläche von El Salto, Durango, Mexiko

Flächenklassifizierung	Fläche (ha)	%
Wirtschaftswald	373,318	64
Forstbetriebe mit anderer Nutzung: Schutzwald (Bannwald), Forschung, Naturpark, Erholungswald	206,180	36
Total	579,498	100

Die Waldbewirtschaftung ist in der Region ein erheblicher Wirtschaftsfaktor, der Besitz, Arbeit und Einkommen betrifft und bei dem die Ressource Holz eine entscheidende Rolle spielt. Im genannten Gebiet werden ca. 920,000 m³ pro Jahr geerntet und verarbeitet (SEMARNAT, 2006), dies entspricht 44% der gesamten Holzerzeugung in Durango (2, 100,000 m³). Die Tabelle 1-2 zeigt den Vorrat und die jährliche Holzernte nach Artengruppen im Forstgebiet.



Abbildung 1-1: Geographische Lage der forstlichen Region von El Salto, Durango, Mexiko

Tabelle 1-2: Vorrat und jährliche Holzernte in der Region von El Salto (Durango, Mexiko) aus der Waldinventur von 2005

BAUMARTENGRUPPE	Vorrat (m ³)	Jährliche Holzernte (m ³)
Kiefernarten	45,000,000	690,000
Eichenarten	22,000,000	220,800
Andere Laubholzarten	4,600,000	9,200
Andere Nadelarten	950,000	-----
TOTAL	72,550,000	920,000

95% des Holzes wird von *Ejid*os und *Comunidades* (Kommunalwald) produziert und verwaltet. Die restlichen 5% der gesamten forstlichen Fläche von El Salto sind Eigentum von 60 privaten Forstverwaltungen. Die Baumarten mit der größten wirtschaftlichen Bedeutung sind Kiefern (*Pinus cooperi*, *P. durangensis* Martinez, *P. leiophylla* Schl. und Cham., *P. engelmannii* Carr, *P. cooperi* var *ornelasi*, *P. teocote* Schl et Cham und *P. herrerae* Martinez). Die anderen, weniger wertvollen und weniger verbreiteten Kiefernbaumarten, sind *P. ayacahuite* Ehrenb, *P. lumholtzii* Rob et Fern, *P. douglasiana* Martinez *P. michoacana cornuta* Martinez, *P. oocarpa*, Schiede. Außerdem werden auch einige Eichenarten und andere Nadelbaumarten, einschließlich der Gattungen *Arbutus*, *Juniperus*, *Pseudotsuga*, *Abies* und *Picea* bewirtschaftet.

1.2.1 Die Forsteinrichtung in der Region im letzten Jahrhundert

Die Nutzung des Kiefern-Eichenwaldes begann vor ca. 100 Jahren nach europäischen Methoden, die in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhundert entwickelt wurden (Corral *et al.*, 2006). Die Holzernte wird heute vom Forstministerium kontrolliert. Im Laufe der vergangenen 100 Jahre hat sich El Salto bedeutend entwickelt (Mussalem, 1976). Von 1918 bis 1943 wurden in Urwäldern die besten Bäume in großen Mengen gefällt. Die Bewirtschaftung war meistens eine Art von Hochdurchforstung, bei der nur die besten und die größten Bäume entnommen wurden. Zwischen 1918 und 1927 wurde auf eine systematische Bewirtschaftung überhaupt nicht geachtet.

1928 erzielten die Regelungen des ersten mexikanischen Waldgesetzes von 1926 eine Wirkung mit der Formulierung der ersten Forsteinrichtungsplanung, doch die vorgeschriebene Planung wurde von den Firmen nicht richtig eingehalten. Im Jahre 1943 wurde eine neue Forsteinrichtungsplanung erarbeitet und die „*mexikanische Forsteinrichtungsmethode*“ formuliert (MFM-Verfahren), nach der die Bäume selektiv gefällt wurden. Dieses Verfahren fußt auf der summarischen Ermittlung des Hiebsatzes für Bäume ab einem Mindestbrusthöhendurchmesser von 30 cm mit Rinde, wobei zwischen 35-50% des Volumens entnommen wurden. Die Bäume, die ein schlechtes Wachstum und niedrige Qualität aufwiesen, wurden im Bestand belassen. Bestandespflegemaßnahmen und Vornutzung waren in dieser Leitlinie nicht vorgesehen (Aguirre, 1989), was zu einer Verschlechterung der Kiefernwälder und einer Unternutzung des Leistungspotentials führte. Diese Methode wurde von 1944 zu bis 1977 angewandt (Rodríguez *et al.*, 1960; SAHR, 1984).

Zwischen 1975 und 1984 wurde das MFM-Verfahren verbessert, dessen Name später in mexikanische Methode für ungleichaltrige Forstnutzungsregelung (*Mexican Method of Irregular Forest Regulation*, MMIFR-System) geändert wurde. Diese Methode wird noch heutzutage in Durango verwendet (UCODEFO 6, 1993). Als Ergebnisse dieser angewendeten Methode sind in dem Gebiet El Salto Kiefernbestände mit unregelmäßiger Struktur entstanden.

1974 wurde ein neues Verfahren „*Methode für waldbauliche Entwicklung*“ (MWE-System) implementiert, das auf dem Grundsatz des Normalwaldes beruht, dessen Hauptziele die Intensivierung der Bestandesnutzung und die Verbesserung des Waldzustandes sind. Im Unterschied zu früher angewandten Methoden werden hier Pflegemaßnahmen, Vor- und Endnutzungen bestandesweise durchgeführt. Das MWE-

System zeichnet sich durch ein 60-jähriges Umtriebsalter mit einem 6-mal 10-jährigen Hiebturnus aus. Während des Umtriebs werden die folgenden Betriebsarten durchgeführt: Vordurchforstung, Durchforstung (normalerweise drei), Verjüngungshieb (durch die Mutterbaummethode) und beim zweiten Umtrieb Durchforstung mit gleichzeitigem Mutterbaumhieb.

1.2.2 Trends der nachhaltigen Forstwirtschaft in der Region

Die aktuellen Reformen der Landesforstverwaltungen von Mexiko fördern verschiedene Projekte für die Verbesserung der sozialen und ökologischen Qualität der Waldbewirtschaftung. Die verlässliche Einhaltung von anspruchsvollen Mindeststandards ist wichtiger denn je. FSC (*Forest Stewardship Council*) spielt in Mexiko, besonders in den forstlichen Regionen Durangos eine wichtige Rolle, um eine umfassend nachhaltige Waldbewirtschaftung, die auch Sozial- und Umweltansprüchen gerecht wird, zu unterstützen.

In den FSC-Standards werden ökologische Mindeststandards definiert. Sie garantieren, dass die ökologischen Grundfunktionen des Waldökosystems langfristig gewährleistet werden können (Prinzip 6 und 9) (FSC, 2005). Gleichzeitig wird jedoch ein Ausgleich zwischen den jeweils am Wald beteiligten Bevölkerungsgruppen gesucht (Prinzip 2-4, 8). Auch gerechte und sichere Arbeitsbedingungen werden durch die Standards vorgegeben (Prinzip 4). Trotz dieser hohen Anforderungen an einen umweltverträglichen Umgang mit Wald und soziale Gerechtigkeit bleibt die Nutzung des Waldes ein gleichwertiges Prinzip des FSC (Prinzip 5, 7 und 8). Die forstliche Zertifizierung soll daher eine nachhaltige Waldbewirtschaftung nach ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Prinzipien und Kriterien fördern, und dem Holzkäufer die Erhaltung und Förderung der nachhaltigen Waldbewirtschaftung bestätigen.

Die Umweltverbände, das Umweltministerium, die Besitzer und viele, die mit der Forst- und Holzwirtschaft in den forstlichen Regionen von Mexiko arbeiten, haben sich bereits auf eine Richtlinie für eine umweltverträgliche und sozial gerechte Waldbewirtschaftung in den wichtigsten forstlichen Regionen des Landes geeinigt.

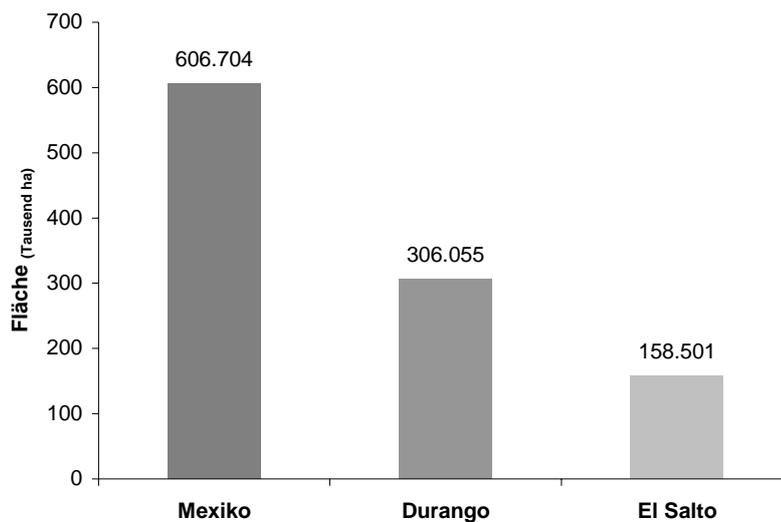


Abbildung 1-2: Zertifizierte Waldfläche in Mexiko im Vergleich zum Bundesland Durango und der forstliche Region El Salto (FSC, 2005)

Viele Forstbetriebe Durangos z. B. haben sich für eine nachhaltige Forstwirtschaft entschieden und ein FSC-Zertifikat erhalten. 50% (306,055 ha) der gesamten zertifizierten Waldfläche Mexikos befindet sich in Durango, davon fallen 158.501 ha (52%) in die forstliche Region von El Salto (Abb. 1-2). 2005 wurden in El Salto ungefähr 453.000 m³ der jährlichen Holzernte als zertifizierte Forstproduktion klassifiziert (59 %). Darüber hinaus haben mehrere *Ejidos*, *Comunidades* und Waldbesitzer auf eigene Initiative eine unabhängige Zertifizierung von Forstbetrieben eingeleitet.

Während der letzten Jahre wurden in dem Forstgebiet von El Salto, Durango, Mexiko einige Untersuchungen zur Waldbewirtschaftung durchgeführt (Aguirre, 1987; Corral und Radilla, 1996; Valles *et al.*, 1998; Corral *et al.*, 1999; Návar *et al.*, 2000; Corral *et al.*, 2004). Die Arbeiten von Corral *et al.* (1999) und Corral *et al.* (2004, 2005) sind hervorzuheben, die mehrere Volumengleichungen, Oberhöhenbonitätsfunktionen und Wachstums- und Zuwachsmodele für einige Kiefernbaumarten getestet haben. Außerdem hat Corral (2001) die Durchmesserstruktur für Misch- und ungleichaltrigen Bestände mit der Weibull-Dichtefunktion modelliert, wobei er mehrere Modelle zur Parametrisierung für die Hauptbaumarten von Kiefern und Eichen benutzt hat.

1997 wurde die Software „System of Forest Planning SPF 1.0“ (UCODEFO 6, 1997) für die Region El Salto entwickelt. Sie basiert auf einem positionsunabhängigen Einzelbaummodell. Biometrische Gleichungen wurden für die bedeutendsten Kiefernarten in der Region parametrisiert. Diese Funktionen definierten das biometrische System je Baumart und die spezifischen Eigenschaften im Waldwachstumssimulator für die Berechnung der potenziellen Nutzung jeder Waldabteilung.

2 WALDWACHSTUMSMODELLIERUNG

2.1 Überblick

Die Produktion und der Ertrag eines Waldes können durch eine Waldinventur und ein Produktionsmodell im gegenwärtigen Moment geschätzt werden. Waldwachstum und die Antwort des Waldbestandes auf verschiedene waldbauliche Behandlungen über die Zeit ist seit jeher eine der zentralen Hauptziele der Waldwachstumsforschung, da die richtige Wirtschaftsplanung auf Kenntnis der Wachstumsprozesse basiert. Waldwachstumssimulatoren werden heute nicht nur zur kurzfristigen Prognose bei der Fortschreibung von Inventurdaten eingesetzt, sondern auch zur Simulation unterschiedlicher Waldentwicklungspfade in realen oder hypothetischen Beständen (Gadow und Hui, 1999). Waldwachstumsmodelle sind außerdem effiziente Hilfsmittel für die Forsteinrichter, um die Entwicklung eines Waldbestandes zu prognostizieren und um die Entscheidungsfindung auf Bestandes-, Betriebs- und Großregionsebene (Gadow, 2003) zu unterstützen. Sie erleichtern die Auswahl der von den Zielen abhängigen besten Bewirtschaftungsvorschrift (Waldbauplanung). Darüber hinaus lassen sie im Voraus, die möglichen Konsequenzen von Steuerungsmaßnahmen wie Durchforstung sowie die Baumartenmischung hinsichtlich ihrer langfristigen Auswirkungen für die Forstwirtschaft erkennen.

Die Begriffe Bestandeswachstumsmodelle, Bestandesentwicklungsmodelle und Bestandessimulatoren sind Synonyme (Nagel, 1999). Jedoch gibt es geringe Unterschiede. Ein Wald- oder Bestandeswachstumssimulator wird als Computerprogramm zur Prognose des Wachstums eines bestimmten Waldgebietes und zum Vergleich unterschiedlicher Szenarien eingesetzt. Demgegenüber bilden Wachstumsmodelle nur Zusammenhänge zwischen biologischen Variablen eines Bestandes bzw. eines Baumes ab. Mit Simulationsmodellen lassen sich viele denkbare Szenarien der Bestandesentwicklung bei unterschiedlichen Behandlungen durchrechnen. Die Simulation ist eine Nachahmung, bei der das Jahrzehnte andauernde Wachstum in Sekundenschnelle in abstrakter Form mit einem Computer nachgebildet werden kann. Bei einem Wachstumsmodell ist folglich zu beachten, dass es lediglich eine biometrische Nachbildung des Wachstums darstellt, d.h. das Baumwachstum wird durch eine mathematisch- statistische Funktion beschrieben (Ledermann, 2003). Erst