

Sedimentfrachtprognosen mit GIS

- Neue Strategien für globale Modellgleichungen unter besonderer Berücksichtigung von Staudämmen und des zeitlichen Wandels -

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften

am Fachbereich Material- und Geowissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt

vorgelegt von
Holger Schäuble

Erstreferent: Prof. Dr. Matthias Hinderer
Koreferent: Prof. Dr. Stephan Kempe

Eingereicht am 11.11.2005, Disputation am 21.12.2005

Darmstadt 2005

D17

Meinen Eltern Ingeborg Schäuble und Eugen Schäuble (gest. 1972) gewidmet.

Ein Sedimentfrachtmodell hat immer recht,
nur die Wirklichkeit ist manchmal etwas ungenau.

frei nach Douglas Adams
(„The Hitch Hiker’s Guide to the Galaxy“)

Vorwort:

Die Idee zu dieser Dissertation entstand am Geologischen Institut der Universität Tübingen nach mehreren Gesprächen mit Prof. Dr. Gerhard Einsele und Prof. Dr. Matthias Hinderer. Hintergrund war der Wunsch, mit Hilfe eines Geoinformationssystems ein globales Modell zur Prognose der Sedimentfracht zu erstellen. Dabei sollten die umfangreichen Messdaten über Sedimentablagerungen verwendet werden, die während mehrerer Teilprojekte im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 275 „Klimagekoppelte Prozesse in meso- und känozoischen Geoökosystemen“ gesammelt worden waren.

Diese Pläne wurden jedoch im Verlauf dieser Arbeit auf mehrfache Weise geändert. Zum einen erzwang die ersatzlose Streichung des SFB 275 und die Berufung meines Betreuers Prof. Dr. Matthias Hinderer an die TU Darmstadt eine komplette Neuorientierung, sowohl in finanzieller als auch in räumlicher Hinsicht (= Einreichung eines eigenen Forschungsantrags an die Deutsche Forschungsgemeinschaft und der darauf folgende Umzug nach Darmstadt). Zum anderen erwiesen sich die ursprünglichen Pläne, ein alle Klimazonen umfassendes und hoch verlässliches Modell zu entwickeln, als nicht durchführbar, da die notwendigen Daten zur Zeit noch nicht verfügbar sind. So musste eine Entscheidung zwischen zwei Alternativen getroffen werden, einem globalen aber ungenaueren Modell oder einem hoch verlässlichen regionalen Modell, bei dem jedoch nicht alle Klimazonen berücksichtigt werden können. Als Ausweg aus dem Dilemma zwischen globalem Anspruch und dem Diktat des Faktischen wurde beschlossen, zwei Ansätze parallel zueinander zu verfolgen: Die Erstellung eines heute schon anwendbaren globalen Modells und die Entwicklung neuartiger Strategien anhand einer regionalen Studie mit den USA als repräsentatives Testgebiet. Die gewonnenen Ergebnisse können in Zukunft zu stark verbesserten globalen Modellen führen. Mit der vorliegenden Dissertation wurde dafür ein erster Grundstein gelegt.

Mein ganz besonderer Dank gilt zwei Personen, meinem Betreuer Prof. Dr. Matthias Hinderer, ohne dessen umfassende Unterstützung die vorliegende Arbeit nicht existieren würde und Dipl.-Geol. Simone Patton für ihre immer aufmunternde Art und die kritische Durchsicht der vorliegenden Arbeit. Darüber hinaus bin ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für ihre Förderung zu großem Dank verpflichtet, ebenso den vielen Kollegen im In- und Ausland, insbesondere Dr. Oswald Marinoni und Prof. Dr. Stefan Weinbruch (beide Darmstadt), Prof. Dr. Gerhard Einsele, Dr. habil. Rudolf Lidl und Jürgen Ulshöfer (alle Tübingen), Dr. Lyle Steffen (Lincoln, USA), Prof. Dr. William Renwick (Miami, USA) und Prof. Dr. Albert Roeseboom (Stellenbosch, Südafrika), aber auch vielen anderen, die aus Platzgründen leider nicht erwähnt werden können, vergebt mir...☺. Zu guter Letzt und vor allem aber danke ich meinem Tübinger und Darmstädter Freundeskreis: Ihr habt den größten Anteil daran, dass meine Nerven letztendlich doch nicht das Schicksal der von mir modellierten Sedimentmassen erleiden mussten: „Verwittert, weggeschwemmt und auf grausame Weise an der Biegung des Flusses begraben!“

Inhaltsverzeichnis:

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Begriffsdefinitionen	VIII

1. Problemstellung und Zielsetzung 1

1.1 Sedimentfracht und Geosysteme	1
1.2 Fragestellung und Inhalt	7

2. Allgemeine Sedimentfrachtmodelle 11

2.1 Grundsätzliche Prognosekonzeptionen.....	11
2.2 Überregionale Sedimentfrachtmodelle	19
2.2.1 Korrelationen und einfache Modellgleichungen.....	21
2.2.2 Multivariate Regressionsmodelle.....	22
2.3 Probleme bestehender Modellgleichungen	25
2.3.1 Sediment-, Geodaten und Größe der Einzugsgebiete	28
2.3.2 Aktivphasen, Passivphasen und zeitlicher Wandel.....	32
2.3.3 Staudämme, Reservoirs und natürliche Seen.....	35
2.3.4 Mittelwerte und räumliches Zusammenspiel der Steuerfaktoren	38
2.3.5 Sonstige Probleme.....	40

3. GIS-basiertes Sedimentfrachtmodell AGISY 42

3.1 Grundlegendes Modellkonzept	42
3.1.1 Die 1. Stufe von AGISY – Ein konventionelles Regressionsmodell.....	43
3.1.2 Die 2. Stufe von AGISY – Optimierung mit hydrologischem Routingverfahren	44
3.2 Staudämme und Senken bei der Optimierung	50
3.3 Sedimentfracht und sedimentologisch relevantes Einzugsgebiet	54
3.4 Messzeitspezifische Klimaparameter	56

4. Verwendetes Datenmaterial 58

4.1 Messdaten zur Sedimentfracht	58
4.1.1 Globale Daten zur Sedimentfracht.....	59
4.1.2 Suspensionsfrachten und Staudämme in den USA	62
4.2 Geodaten der Einzugsgebiete.....	71
4.2.1 Globale Geodaten.....	73
4.2.2 Geodaten der USA	75
4.3 Potentielle Steuervariablen	78

5. Ergebnisse und Prognosemodelle	91
5.1 Ergebnisse zu grundlegenden Fragestellungen	91
5.1.1 Mindestmessdauer von Staudamm- und Suspensionsdaten (5/25-Regel)	91
5.1.2 Höhe des repräsentativen Ereignisses beim Sedimenttransport.....	95
5.1.3 Quantifizierung des Einflusses von Staudämmen und Seen.....	99
5.1.4 Wirksame Steuerfaktoren der Sedimentfracht	104
5.2 Modellkonzeptionen für die USA und weltweit	107
5.3 Globale Modelle zur Simulation der Sedimentfracht	111
5.3.1 Makroskalige Regressionsmodelle	111
5.4. Spezielle Modelle zur Simulation der Sedimentfracht für die USA	115
5.4.1 Stufe 1 von AGISY – Makroskalige Regressionsmodelle.....	115
5.4.2 Stufe 2 von AGISY – Iterativ optimierte Modellgleichungen mit STools	118
6. Bewertung und praktische Anwendungen	128
6.1 Aussagekraft von Sedimentfrachtmodellen	128
6.2 Praktische Anwendungen	135
6.2.1 Flächendeckende Karten und Szenarien zur Sedimentfracht.....	135
6.2.2 Globaler fluviatiler Sedimenteintrag in die Ozeane.....	140
6.2.3 Sedimentfracht von Flüssen im zeitlichen Wandel.....	143
7. Zusammenfassung	147
8. Literaturverzeichnis	150
Anhang	
A. Geodaten – Metadaten und digitale Karten.....	A - 1
B. Globale Modellgleichungen zur Simulation der Sedimentfracht.....	A - 12
C. Potentielle Steuervariablen der Sedimentfracht – USA und Global	A - 13
D. Globales und US-spezifisches GIS mit Sedimentfrachtdatenbank	A - 18
E. USGS Suspended Sediment Database – Quelldaten und Auswertung	A - 22
F. USSED und USTRAPS – Datenbanken über Sedimentfracht und -fallen in den USA.....	A - 24
G. Global- und Detailstudie – Deskriptive Statistik und Korrelationen	A - 28
H. Global- und Detailstudie – Modelle zur Simulation der Sedimentfracht.....	A - 33
I. Manual - Sediment Yield Tools 1.03 für ArcView 3.x.....	A - 37
J. Inhalt und Verzeichnisstruktur der beiliegenden CD-ROM	A - 66

Abbildungsverzeichnis:

1: Rezente Suspensionsfracht in den größten Einzugsgebieten der Welt.....	2
2: Sedimentfrachten in Abhängigkeit verschiedener geoökologischer Prozesse	2
3: Verfüllung von Stauseen durch Sedimentablagerungen am Beispiel des Lake Accontink	4
4: Sedimentfracht und geoökologische Eigenschaften in einem Einzugsgebiet	6
5: Arten des Sedimenttransports in einem Flusssystem	12
6: Modelltypen zur Simulation der Sedimentfracht	14
7: Grundprinzipien allgemeiner Sedimentfrachtmodelle	18
8: Sedimentfracht nach verschiedenen Autoren am Beispiel Afrikas	26
9: Sedimentfracht nach verschiedenen Modellen am Beispiel Afrikas.....	27
10: Aussagekraft globaler Sedimentfrachtmodelle	28
10: Aktiv- und Passivphasen beim Sedimenttransport.....	34
11: Einflüsse von Staudämmen auf die Sedimentfracht.....	36
12: Staudammvolumen und Messzeiten am Beispiel der USA.....	37
13: Verbreitung von Großstaudämmen nach den Schätzungen der WCD	38
14: Modelltypen zur Analyse von Einzugsgebieten.....	38
15: Sedimentaustag und räumliches Zusammenspiel von Niederschlag und Gefälle, dargestellt am Beispiel zweier Einzugsgebiete mit gleichen Durchschnittswerten	39
16: Rolle der Tektonik als möglicher Steuerfaktor der Sedimentfracht.....	40
17: Regressionsgerade und Konfidenzintervalle der Schätzformel.....	44
18: Optimierung einer Modellformel mit AGISY, dargestellt am Beispiel eines einzelnen Einzugsgebiets.....	46
19: Programmfenster von STools 1.03 für ArcView.....	47
20: Erfassung des räumlichen Zusammenspiels am Beispiel einer einfachen Modell- gleichung mit $SSY = f(\text{Rain}, \text{Slope})$	48
21: Ablaufdiagramm zur Erstellung eines Sedimentfrachtmodells mit AGISY anhand eines hypothetischen Beispiels basierend auf den Steuerfaktoren Rain und Slope	49
22. Berücksichtigung des Senkeneinflusses bei der Simulation mit STools.....	50
23: Funktionsweise von AGISY mit Berücksichtigung von Staudämmen	53
24: Nominale und korrigierte Sedimentfracht.....	55
25: Ermittlung messzeitspezifischer Klimaparameter am Beispiel zweier Messstationen	57
26: Globale Sedimentfrachtdatenbank GLOSSY – Messstellen, Abdeckung und Datenquellen	60
27: Globale Sedimentfrachtdatenbank GLOSSY – Verteilung der Sedimentfracht	61
28: Sedimentfrachtdatenbank der USA – Messstellen und Hindernisse im Einzugsgebiet	63
29: Sedimentfrachtdatenbank der USA – Sedimentfracht bezogen auf Einzugsgebiete.....	63
30: Automatisierte Analyse der USGS Suspended Sediment Database am Beispiel des Messprotokolls vom Merrimack River (MA, USA)	66
31: Probleme bei der Georeferenzierung von Messstellen mit einem zu kleinen Einzugsgebiet	68
32: Messdaten zur Sedimentfracht und Auswahl nach Anwendung verschiedener Ausschlusskriterien	69

33: Probleme und Lösungen beim Aufbau der Staudammdatenbank USTRAPS.....	71
34: Schritte zum globalen und US-spezifischen GIS	72
35: Verfügbare Datensätze und Struktur des globalen GIS.....	74
36: Verfügbare Datensätze des US-spezifischen GIS	76
37: Bedeutung der Reihenfolge bei der Reklassifizierung und Aggregation von Geodaten am Beispiel des Waldanteils.....	89
38: GIS-gestützte Ableitung von potentiellen Steuervariablen im Zusammenhang mit der Erstellung eines Sedimentfrachtmodells	90
39: 5/25-Regel und die Genauigkeit von Suspensions- (USGS) und Staudammdaten (RESIS) in Abhängigkeit von der Mindestmessdauer	92
40: Suspensionsfrachtmessungen und Ableitung des repräsentativen Ereignisses	96
41: Größe von Einzugsgebieten in den USA im Zusammenhang mit dem Staudambau im 20. Jahrhundert	101
42: Auswirkungen von Staudämmen auf die Sedimentfracht in den USA	103
43: Relativer Einfluss der Steuerfaktoren auf die Sedimentfracht	105
44: Humide und aride Gebiete im globalem Maßstab.....	113
45: Optimierung mit AGISY am Beispiel der Modellgleichung 2.1.....	120
46: US-spezifische Modellgleichungen.....	122
47: Sensivität der Parameter von Modellgleichung 2.1.....	127
48: Berechnung hochauflösender Karten zur Sedimentfracht mit STools und der bestmöglichen US-Modellformel.....	136
49: Sedimentfracht in den USA – Gemessene und simulierte Werte.....	136
50: Veränderung der Sedimentfracht SSY_{sim} in den USA.....	138
51: Globaler Sedimentexport in die Ozeane.....	142
52: Potentielle Sedimentfracht in US-amerikanischen Flüssen im Zeitraum von 1980-1997	144
53: Entwicklung des potentiellen und realen Sedimentexports US-amerikanischer Flüsse in die Ozeane im Verlauf des 20. Jahrhunderts.....	145

Tabellenverzeichnis:

1: Charakteristika denudativ-fluviatiler Erosionsmodelle und allgemeiner Sedimentfrachtgleichungen.....	14
2: Sedimentfrachtberechnung mit Erosionsmodellen am Beispiel der USLE.....	16
3: Denudativ-fluviatile Bodenerosionsmodelle und ihre Eigenschaften in Bezug auf Sedimentfrachtprognosen.....	16
4: Sedimentfrachtmodelle und Untersuchungen über Steuerfaktoren der Sedimentfracht	20
5: Globale Modelle und quantitative Untersuchungen zur Sedimentfracht	24
6: Daten und Einzugsgebiete bei globalen Sedimentfrachtmodellen	31
7: Steuerfaktoren, welche die Höhe der Sedimentfracht beeinflussen	32
8: Typen globaler Sedimentfrachtmodelle	48
9: Methoden und Formeln zur Berechnung der Trap-Efficiency	51
10: Auswertung der Optimierungssimulationen mit STools am Beispiel der hypothetischen Modellformel $SSY = Rain^a * Slope^b$	54
11: Ausgangsdaten zur Erstellung der Datenbanken USSED und USTRAPS – Daten und Eigenschaften	64
12: Schritte zur Korrektur von Sedimentfrachtdaten in der USSED Datenbank	67
13: Digitale Geodaten des globalen GIS	74
14: Digitale Geodaten des US-amerikanischen GIS	76
15: Potentielle Steuervariablen des globalen und US-spezifischen GIS	79
16: Abgeleitete Variablen beim globalen und US-spezifischen GIS	80
17: Klimatische Variablen und ihre Berechnungsformeln	82
18: Komplexe Parameter zur Evapotranspiration und Abflussmenge	83
19: Reklassifikation von Vegetationsdaten am Beispiel des NLCD Datensatzes.....	88
20: Zeitliche Varianz der Sedimentfracht.....	96
21: Repräsentatives Ereignis im Verhältnis zur Größe von Einzugsgebieten.....	98
22: Modellkonzeptionen für ein neues Sedimentfrachtmodell.....	109
23: Neu berechnete globale Modellgleichungen	112
24: Bestmögliche globale Modellgleichung	114
25: Neu berechnete US-spezifische Modellgleichungen.....	115
26: US-spezifische Modellgleichungen vor und nach der Optimierung mit AGISY und STools.....	121
27: Optimale Modellgleichung für die USA nach der Anwendung von AGISY	125
28: Formeln zur Berechnung der Sensivität von Steuerfaktoren.....	126
29: Sedimentfracht SSY_{sim} für die Zeiträume von 1980-1997, 1900-1919 und Annahmen für hypothetische Zukunftsszenarien.....	138
30: Globaler Sedimenttransport in die Ozeane nach Schätzungen verschiedener Autoren	141

Abkürzungsverzeichnis:

AGISY	Advanced GIS-based Sediment Yield Modeling
AGNPS	Agricultural Non-Point Source Pollution Model
ANSWERS	Area Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation
Area _i	Fläche eines einzelnen Einzugsgebiets im km ²
Area _{sed}	Sedimentologisch relevantes Einzugsgebiet in km ²
Area _{topo}	Topographisch relevantes Einzugsgebiet in km ²
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BAFG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
C _{area}	Faktor zur Korrektur der Sedimentfracht um die Staudammeinflüsse
C/I	Capacity/Inflow Relationship in m ³ /(m ³ /a)
CN	Curve Number, dimensionslose Zahl zwischen 0 und 100
DA-System	Denudations-Akkumulations-System
eff	Effizienz einer Modellgleichung nach NASH & SUTCLIFFE (1970)
ESRI	Environmental Systems Research Institute
ERF	Enhanced River Reach File des U.S. Geological Survey
EPIC	Erosion-Productivity Impact Calculator
EROSION3D	Programm zur Simulation der Bodenerosion
EUROSEM	European Soil Erosion Model
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GEMS	Global Environment Monitoring System
GIS	Geographisches Informationssystem
GLOBE	Globales Höhenmodell der National Oceanic and Atmospheric Administration
GLORI	Global River Index, analoge Datenbank von MILLIMAN et al. (1995)
GRDC	Global Runoff Data Centre
GTOPO30	Global Topographical Elevation Dataset
HYDAT	Hydrological Database
HYDRO1k	Hydrologisch korrektes globales digitales Höhenmodell
HYF	Hydrography Features of the USA Datenbank des U.S. Geological Survey
IAHS	International Association of Hydrological Sciences
ICOLD	International Commission on Large Dams
IGBP	International Geosphere-Biosphere Programme
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IWMI	International Water Management Institute
LISREL	Linear Structural Relationship
LULC	Land Use and Land Cover Dataset
NASA	North American Space Agency
NEDC	National Employee Development Center
NGDC	National Geophysical Data Center
NID	National Dam Inventory Database

NLCD.....	National Land Cover Dataset
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NRCS	National Resources Conservation Center
ORNL.....	Oak Ridge National Laboratory
Pixel	Picture Element (Einzelnes Element eines digitalen Bildes)
P_i	Einzelnes Pixel
PRISM.....	Parameter-elevation Regressions on Independed Slopes Model
RESIS.....	Reservoir Sedimentation Information System
RUSLE.....	Revised Universal Soil Loss Equation
r	Korrelationskoeffizient nach Pearson
r^2	Bestimmtheitsmaß
SCS	Soil Conservation Service
SDB-Reader	Suspended Sediment Database Reader
SDR.....	Sediment Delivery Ratio in %
SFB275	Sonderforschungsbereich 275 der Universität Tübingen („Klimagekoppelte Prozesse in meso- und känozoischen Geoökosystemen“)
SRTM.....	Shuttle Radar Topography Mission
SSD	Suspended Sediment Database des U.S. Geological Survey
SSL.....	Suspended Sediment Load in t/km^2
SSY	Suspended Sediment Yield in $t/km^2/a$
SSY_i	Suspended Sediment Yield, simulierter lokaler Austrag durch ein Raster Overlay
SSY_{korrr}	Suspended Sediment Yield, um Staudammeinfluss korrigierter Originalwert
SSY_{mean}	Suspended Sediment Yield, Mittelwert aller Einzugsgebiete
SSY_{orig}	Suspended Sediment Yield, angegebener Originalwert in Datenbanken
SSY_{sim}	Suspended Sediment Yield, simulierter mittlerer Austrag des Gesamtgebiets
SSY_{val}	Suspended Sediment Yield, reale Messdaten
$SSY_{100\%}$	Suspended Sediment Yield, um Trap-Efficiency korrigierter Originalwert
SQR_{mean}	Mittlere quadratische Abweichung
STools	Sediment Yield Tools (Hydrologisch-sedimentologisches Simulationsprogramm)
SWAT	Soil & Water Assessment Tool
TE.....	Trap-Efficiency in %
TE_{eff}	Effektive Trap-Efficiency in % unter Berücksichtigung der Einflussdauer
TE_{real}	Baulich bedingte Trap-Efficiency in %
UNESCO.....	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USACE	United States Army Corps of Engineers
USDA.....	United States Department of Agriculture
USGS	United States Geological Survey
USLE.....	Universal Soil Loss Equation
USSED.....	eigene Datenbank über Sedimentfrachten in den USA
USTRAPS	eigene Datenbank über Sedimentfallen in den USA
WEPP	Water Erosion Prediction Project
WCD	World Commission on Dams
WSC.....	Water Survey of Canada

Begriffsdefinitionen:

1. ***Sedimentfracht:*** Gesamtheit der in einem Flusssystem transportierten Sedimente, d.h. die Summe aus Boden-, Suspensions- und Lösungsfracht. In der vorliegenden Arbeit wird nur die Suspensionsfracht behandelt und der Begriff Sedimentfracht vereinfachend als Synonym für die Suspensionsfracht gebraucht.
2. ***(Geo)variable oder potentielle Steuervariable:*** Geoökologische Eigenschaften eines Einzugsgebiets, welche die Bodenerosion und den Sedimenttransport aufgrund von theoretischen Überlegungen mehr oder weniger stark beeinflussen. Ihr praktischer Einfluss muss im Gegensatz zu einem Steuerfaktor aber erst noch empirisch bzw. experimentell nachgewiesen werden.
3. ***Steuerfaktor:*** Geoökologische Eigenschaften eines Einzugsgebiets, welche die Bodenerosion und den Sedimenttransport entscheidend steuern. Mit diesem Begriff werden Variablen bezeichnet, deren Einfluss auf die Sedimentfracht sowohl theoretisch begründet als auch praktisch nachgewiesen ist, z.B. aufgrund Laboruntersuchungen oder statistisch-empirischen Untersuchungen.
4. ***Topographisches Einzugsgebiet:*** Das gesamte aus einem digitalen Höhenmodell ableitbare Einzugsgebiet von den Wasserscheiden bis zur Messstelle. Dazu gehören auch Flächen, die faktisch keine Sedimentfracht zur Messstelle liefern, z.B. aride Teilgebiete ohne Oberflächenabfluss, Flächen mit nicht erosionsfähigem Gesteinsuntergrund oder Gebiete hinter Sedimentsenken wie Staudämme oder natürliche Seen.
5. ***Sedimentologisch relevantes Einzugsgebiet:*** Derjenige Teil eines Einzugsgebiets, aus dem tatsächlich auch Sedimentfracht bis zur Messstelle gelangt. In der vorliegenden Arbeit wird dieser Begriff in einer eingeschränkten Bedeutung verwendet. Danach zählen zum sedimentologisch relevanten Einzugsgebiet alle Flächen, von welchen die Sedimentfracht ungehindert(!) zur Messstelle gelangen kann. Die Größe richtet also ausschließlich nach der Topographie und der Existenz von Staudämmen oder anderen Sedimentsenken. Ob im Einzugsgebiet tatsächlich Sedimentfracht mobilisiert wird ist nicht von Bedeutung, entscheidend ist die Existenz von Senken und die durch sie bewirkte Verminderung des Liefergebiets.
6. ***Zuverlässigkeit:*** Güte einer Regressionsgleichung und ihre Eignung als Modell zur Erklärung von Prozessen in der Realität. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff Zuverlässigkeit dann verwendet, wenn ein Modell folgende Aspekte besitzt: ein hohes Bestimmtheitsmaß ($r^2 > 0,5$), eine statistische Signifikanz (t- und F-Test bestanden mit $P < 0,05$) und in theoretischer Hinsicht überzeugende Variablen.