

Ein Ansatz zur räumlich-dynamischen Modellierung am Beispiel der Tereskenernte im Ostpamir

Georg HOHBERG

Universität Stuttgart · georg.hohberg@ilpoe.uni-stuttgart.de

Dieser Beitrag wurde durch das Programmkomitee als „reviewed paper“ angenommen.

Zusammenfassung

Ein großer Teil der täglich getroffenen menschlichen Entscheidungen beeinflusst Ökosysteme. Gleichzeitig beeinflusst der Ökosystemzustand jedoch auch die Managemententscheidungen der Menschen, die von deren Ökosystemdienstleistungen profitieren. Ein Verständnis der räumlichen Dynamiken mit Bezug auf die zeitliche Entwicklung in Ökosystemen ist daher eine zwingende Voraussetzung für ein erfolgreiches Umweltmanagement (vergl. COSTANZA & VOINOV 2004). Dies ist auch für die Ernte von Biomasse im Ostpamir gegeben.

Ein dynamisches Modell basierend auf dem System Dynamics Ansatz (FORRESTER 1961) beschreibt systemrelevante Rückkopplungen zwischen Pflanzenbestand, dessen Zuwachs und der Managemententscheidung wo und wie viel Biomasse auf einer Fläche geerntet wird. Die dem Modell zugrunde liegenden raumbezogenen Daten werden in einem Geoinformationssystem (GIS) aufgearbeitet und für den Import in das System Dynamics Modell vorbereitet. Über eine GIS-Schnittstelle werden die Raumdaten in das Modell importiert und dort dynamisch in Modellrechnungen verarbeitet. Die Auswirkungen von Managemententscheidungen auf die Vegetation der Projektregion werden direkt graphisch veranschaulicht.

1 Einleitung

1.1 Problematik und Lage des Untersuchungsgebietes

Vor dem Hintergrund sich verknappender fossiler Energieträger und damit einhergehender geopolitischer Abhängigkeiten ist das Schlagwort „Energieautarkie“ zunehmend in der politischen Diskussion. Befürworter der Energieautarkie sehen neben dem Hauptargument, der Unabhängigkeit von Energieexportnationen, eine Vielzahl weiterer positiver Auswirkungen. Dabei ist es oft ein weiter Weg zur Unabhängigkeit von importierten Energieträgern. Beispielsweise SCHMIDT et al. (2012) untersucht Energieautarkieszenarien für eine ländliche Region Österreichs. Schlussfolgerung dieser Untersuchung ist, dass das Erreichen von Energieautarkie bis 2020 für die beschriebene Region sowohl hohe Kosten für die Verbraucher als auch einen Rückgang der lokalen Nahrungsmittelproduktion bedeuten würde (SCHMIDT et al. 2012).

Im Gegensatz zur gegenwärtig geplanten Energieautarkie in einigen Industriestaaten kam es Anfang der 90er-Jahre zu einem unvorbereiteten plötzlichen Umsturz im Energiesektor des zentralasiatischen Staates Tadschikistan. Tadschikistan war bis 1991 Teilrepublik der Union der Sozialistischen Sowjetrepubliken und wurde als solche massiv mit Energieimporten aus Russland subventioniert. Die im Osten Tadschikistans gelegene autonome Region Berg-Badaghshan deckte 1974 96 % seines Energieverbrauchs durch Energieimporte aus Russland (KLEANDROV 1974, HOECK et al. 2007). Mit dem Kollaps der Sowjetunion und dem Beginn des tadschikischen Bürgerkrieges 1991 wurden diese Energieimporte nahezu komplett eingestellt. Im Jahre 2007 wurden Schätzungen zufolge 98 % des Energiebedarfs Berg-Badaghshans lokal erzeugt (HOECK et al. 2007). Die plötzlich einsetzende unfreiwillige De-facto-Energieautarkie führte zu einem enormen Druck auf die lokalen Ressourcen.

Die autonome Region Berg-Badaghshan erstreckt sich über den größten Teil des Pamir Hochgebirges. Mit weniger als 100 mm Niederschlag pro Jahr und einer Jahresdurchschnittstemperatur von weniger als 0 °C in Murghab, der größten Stadt im Tadschikischen Ostpamir, ist die Bioproduktion in der Region sehr gering (VANSELOW 2011). Die lokale Vegetation ist in weiten Teilen dominiert durch die Zwergsträucher *Artemisia leucotricha* und *Krascheninnikovia ceratoides* (Teresken). Die beiden Zwergsträucher sowie getrockneter Dung aus der Viehhaltung decken seit 1991 den Großteil der lokalen Energieversorgung im Ostpamir.

Das von der VolkswagenStiftung finanzierte Projekt „Transformation Processes in the Eastern Pamirs of Tajikistan. The presence and future of energy resources in the framework of sustainable development“ hat eine explizite und umfassende Betrachtung der Rohstoffnutzung zur Energieversorgung in der Ostpamirregion zum Ziel. Es soll geklärt werden wie sich die Tereskenbestände unter der gegenwärtigen Nutzung entwickeln und wie diese Entwicklung wiederum die zukünftige Ressourcennutzung beeinflusst. Verschiedene Nutzungsszenarien werden dazu direkt mit einer möglichen Veränderung der lokalen Zwergstrauchbestände im Raum gekoppelt. Eine erste Fallstudie wird im Einzugsgebiet des Ortes Alichur im Süd-Westen des Projektgebietes erarbeitet.

1.2 Fragestellung

Die Kernfrage der hier besprochenen Arbeit lautet: Wie können der Tereskenernteprozess nachvollziehbar abgebildet und die räumlichen Auswirkungen verschiedenen Ernteverhalten auf die Vegetation dynamisch simuliert werden?

Für eine dynamische Simulation des Verhaltens bei der Ernte der Teresken im Ostpamir eignet sich ein System Dynamics Ansatz (FORRESTER 1961). Bei diesem Ansatz stehen die Wechselwirkungen von sozio-ökonomischen, ökologischen und technologischen Zusammenhängen im Vordergrund. Wichtig ist dabei, dass die Zielstellung keine quantitativ korrekte Vorhersage eines zukünftigen Systemzustands beinhaltet. Vielmehr wird nach dem grundsätzlichen Systemverhalten gesucht. Räumliche Daten werden in Geoinformationssystemen dargestellt, bearbeitet oder analysiert. Komplexe dynamische Simulationen sind dort nur schwer abzubilden und mit langen Rechenzeiten verbunden. Wie eingangs beschrieben ist jedoch eine räumliche Darstellung der bei der Tereskenernte ablaufenden dynamischen Interaktionen zwischen Managemententscheidung und Raum zwingend notwendig, um das Energiesystem des Ostpamirs zu verstehen. Diese räumliche Darstellung

der dynamischen Prozesse im Ostpamir lässt sich durch die Verbindung des prozessorientierten System Dynamics Ansatzes mit einem GIS realisieren. Obwohl System Dynamics Modelle ursprünglich nicht für die Simulation im Raum entwickelt wurden, gab es in der Vergangenheit erfolgreiche Projekte, in denen System Dynamics Modelle mit GIS gekoppelt wurden.

VOINOV (2008) beschreibt zwei Programme, die für eine räumlich explizite Simulation von System Dynamics Modellen und damit für eine Koppelung mit GIS infrage kommen: „*Spatial Modeling Environment*“ (SME) (MAXWELL & COSTANZA 1997) und SIMILE (MUETZELFELDT & MASSHEDER 2003). Während SME eher „...eine Schnittstelle zwischen Stella (System Dynamics Software) und C++ Programmcode...“ ist (VOINOV 2008, 194), stellt die Software SIMILE ein eigenständiges Programm mit eigenem Formalismus dar. COSTANZA (2004) gibt eine Übersicht über Projekte, in denen mittels SME eine dynamische Modellierung mit räumlicher Auflösung umgesetzt wurde (COSTANZA & VOINOV 2004). Sämtliche von COSTANZA (2004) beschriebenen Projekte basieren auf quadratischen Rasterzellen. Eine Simulation von Quadratrastern ist jedoch nicht optimal, wenn den Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den simulierten Zellen ein hoher Stellenwert zugeschrieben wird. Zur Simulation von Nachbarschaftseffekten sind Hexagone deutlich besser als Quadrate geeignet, weil bei dieser Form der Tesselation nur gleichberechtigte Nachbarschaften existieren und somit keine Diagonalnachbarschaften auftreten (BIRCH et al. 2007). Im Falle des zu simulierenden Energiesystems im Ostpamir sind die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Rasterzellen von großer Bedeutung. Dies gilt insbesondere auch im Hinblick auf die zukünftige Weiterentwicklung der Modellstruktur. Um die Vorteile einer regelmäßigen, kleinteiligen und auf Hexagonzellen basierenden Tesselation z. B. bei der Verwendung als Aggregierungseinheit nutzen zu können, wurde bei der Simulation auch bewusst auf eine Unterteilung des Untersuchungsgebietes in aus territorialen Einheiten hergeleitete Polygone verzichtet. Die Software SIMILE ist in der Lage, als räumliche Bezugseinheit neben Quadraten auch Hexagone zu verwenden (MUETZELFELDT & MASSHEDER 2003). MUETZELFELDT (2011) beschreibt zwei Modelle als Beispiele für die Möglichkeit mit der Software SIMILE, Hexagonzellen als räumliche Einheit in der dynamischen Simulation zu verwenden (MUETZELFELDT et al. 2011). Den von MUETZELFELDT beschriebenen Modellen liegen jedoch keine importierten Geoinformationen zugrunde. Es wird vielmehr von den Modellen selbst ein fiktiver Raum erstellt, in dem die simulierten Prozesse ablaufen. Zusammenfassend ist festzustellen, dass räumlich explizite dynamische Simulationsmodelle unter Verwendung externer Geoinformationsdaten in Hexagonzellen bisher keine nennenswerte Verbreitung gefunden haben. Ein Import externer Geoinformationen ist in der Software SIMILE jedoch ausdrücklich vorgesehen. Dies wird hier am Beispiel der Tereskenernte im Ostpamir gezeigt.

2 Methode

2.1 System Dynamics

System Dynamics ist ein visueller Modellierungsansatz für die Erstellung qualitativer und quantitativer Modelle. Zur quantitativen Modellierung werden in System Dynamics Modellen Differentialgleichungen in Form von Speichern und Flüssen visuell dargestellt. Dies

bedeutet, dass Zustandsgrößen (Speicher) Material- oder Informationsströme (Flüsse) akkumulieren. Abbildung 1 fasst die Komponenten der System Dynamics Software SIMILE zusammen. Den System Dynamics Modellen zugrunde liegende nicht-lineare Differenzialgleichungen werden von der System Dynamics Software in Differenzengleichungen umgeschrieben und numerisch gelöst. Es ergeben sich auf der visuellen Modellierungsoberfläche Blockschaltbilder. Die System Dynamics Schreibweise (FORRESTER 1961) ist heute eine intuitive und weitverbreitete Art, zeitkontinuierliche Systeme darzustellen (MUETZELFELDT & MASSHEDER 2003). Durch die visuelle Darstellung in Blockschaltbildern lassen sich Rückkoppelungen im System leicht identifizieren. Der System Dynamics Ansatz findet überall dort Verwendung, wo Systeme durch komplexe Rückkoppelungen geprägt sind. Klassische Beispiele sind die Wirtschaftskybernetik, die Sozialforschung, aber auch die Betrachtung von Umweltsystemen (VOINOV 2008).



Abb. 1: Komponenten des System Dynamics Ansatzes am Beispiel der Software SIMILE (MUETZELFELDT & MASSHEDER 2003)

Auch für die Betrachtung der Tereskenernte im Ostpamir ist der System Dynamics Ansatz geeignet. Beispielhaft für systemrelevante Rückkoppelungen bei der Tereskenernte sei hier das Feedback zwischen der Menge auf einer Fläche verbleibender Teresken und dem Zuwachs auf dieser Fläche genannt.

Die Zuwachsmo­dellierung der Teresken erfolgt analog der logistischen Wachstumskurve nach RICKLEFS (1990, 329). Der Tereskenzuwachs stellt sich dort als Funktion der Bestandsdichte in Form einer nach unten geöffneten Parabel mit den X-Achsen Schnittpunkten Null und „volle Bestockung“ dar. Bei sehr geringer und bei sehr hoher Bestandesdichte ist der Tereskenzuwachs folglich gering, während sich bei mittlerer Bestandesdichte ein Zuwachsoptimum findet. Bei der beschriebenen Funktion handelt es sich um ein autonomes nichtlineares Modell (IMBODEN & KOCH 2003), welches sich in einem System Dynamics Modell nachsimulieren lässt. Eine Verringerung des Tereskenbestandes wird mittels zweier Flüsse simuliert: „Natürlicher Zerfall“ und „Ernte“. Die Menge der natürlicherweise absterbenden (zerfallenden) Tereskenmasse ist lediglich von der Zeit und der vorhandenen Tereskenmasse abhängig und wäre in einem unbeeinflussten System mit dem Zuwachs im Gleichgewicht. Der Fluss „Ernte“ wird als Funktion des Bedarfs, der vorhandenen Tereskenmasse und einer Erntegrenze, d. h. eines Mindestmaßes an verbleibender Tereskenmasse dargestellt. Abbildung 2 zeigt das System Dynamics Modell „Teresken Alichur“.

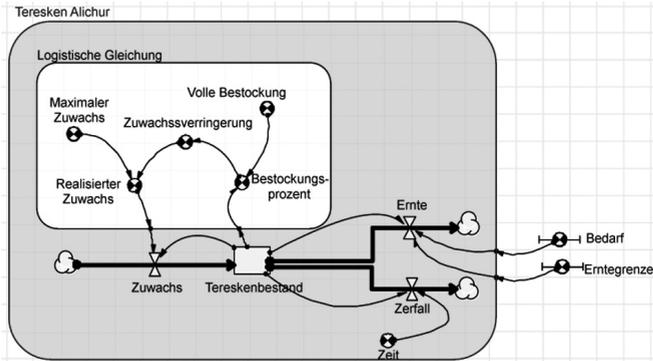


Abb. 2:
System Dynamics Modell
„Teresken Alichur“

System Dynamics Modellierungsumgebungen bieten meist die Möglichkeit, auf einem Bedienfeld Systemrelevante Variablen während der Simulation kontinuierlich zu verändern. Diese Bedienfelder werden häufig „Flugsimulatoren“ genannt. Komplexe System Dynamics Modelle erfüllen dabei einen ähnlichen Zweck wie Flugsimulatoren für Piloten; sie helfen Handlungsträgern ihren Instinkt für Managemententscheidungen zu schärfen, ohne direkt die negativen Auswirkungen von Fehlentscheidungen tragen zu müssen (FORD 2009). Abbildung 3 zeigt den „Flugsimulator“ des Modells „Teresken Alichur“ mit den zwei Variablen Parametern „Tereskenbedarf pro Jahr“ („Bedarf pro Jahr“) und „Mindestens verbleibende Tereskenmasse pro Zelle“ („Mindverbl“).

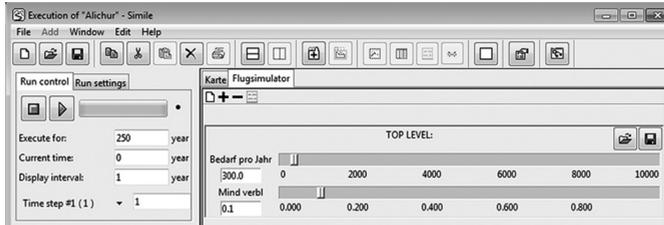


Abb. 3:
„Flugsimulator“ des
Modells „Teresken
Alichur“

2.2 Räumlich explizite Modellierung von System Dynamics Modellen

Die „Landschaft“ des räumlich expliziten Modells „Teresken Alichur“ wird mithilfe eines Zellrasters beschrieben. In jeder Rasterzelle läuft instanziiert das gleiche dynamische Modell. Ausgehend vom Ort Alichur erfolgt die Ernte zuerst in den Rasterzellen mit der geringsten Kostenentfernung. Die Ernte in einer Rasterzelle ist jedoch nur möglich, wenn diese ausreichend mit Teresken bestockt ist. Liegt der Bestockungsgrad einer Zelle unter der Erntegrenze, wird dort solange nicht weiter geerntet, bis durch den kontinuierlichen Zuwachs eine gewisse Mindestbestockung dieser Zelle wieder gegeben ist. Abbildung 4 zeigt den schematischen Aufbau des räumlich expliziten Modells „Teresken Alichur“.

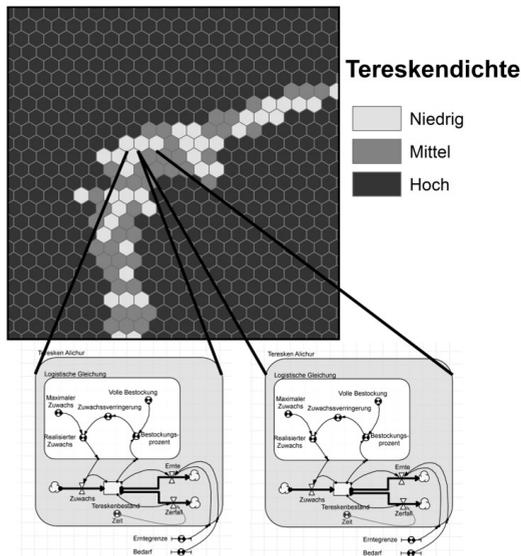


Abb. 4:
Räumliche Modellierung des System Dynamics Modells „Teresken Ali-chur“

2.3 Kopplung des System Dynamics Ansatzes mit GIS

Für die dynamische Simulation der Tereskenernte im Ostpamir werden als Eingangsgrößen aufbereitete Geodaten benötigt. Im Beispiel des Simulationsmodells „Teresken Ali-chur“ sind dies vordergründig Informationen zur Kostenentfernung. Andere Elemente wie Eigentumsverhältnisse oder Bodengüte wurden aus Vereinfachungsgründen in dieser Modellversion zunächst noch nicht betrachtet. Mittels des Arc GIS 10 Modelbuilders wurde für das nähere Umland des Ortes Alichur ein Kostenentfernungsraster erstellt. Die Kostenentfernung wurde hierzu aus den Elementen Infrastruktur, Flussnetz und Flussquerung ermittelt. Straßen und Wege sind mit vergleichsweise geringen Kosten verbunden. Im Gegensatz dazu stellen Fließgewässer erster Ordnung Barrieren dar, die nur an Flussquerungen überwunden werden können. In Abbildung 6 sind hohe Kostenentfernungen dunkel und niedrige heller eingefärbt. Direkt südlich des Ortes Alichur befindet sich beispielsweise eine Region, die aufgrund ihrer Unzugänglichkeit jenseits des Flusses Alichur eine hohe Kostenentfernung aufweist und daher dunkel eingefärbt ist. Um eine Weiterverarbeitung der Daten im System Dynamics Modell zu ermöglichen, wurden die im $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ Quadratraster errechneten Kostenentfernungen auf ein hexagonales Polygonraster mit einer Kantenlänge von 62 m umgerechnet. Die Errechnung des Polygonrasters geschah mittels der Software „Repeating Shapes“ (JENNESS 2012). Das resultierende Polygonraster besteht aus 10 ha großen Zellen. Für die aggregierte Kostenentfernung einer jeden Hexagonzelle wurde in der hier diskutierten Modellversion als erste Lösung der Mittelwert der in der Hexagonzelle befindlichen Rasterzellen angenommen. Bei diesem Upscalingverfahren konnte der Aggregationsfehler durch die Verwendung von Sechseckzellen im Vergleich zu einer Verwendung von quadratischen Zellen gering gehalten werden. Im weiteren Verlauf wurde die Kostenentfernung zum Dorf Alichur jeweils auf den Mittelpunkt einer jeden Sechseckzelle projiziert. Diese Werte wurden zusammen mit den Koordinaten der Zellmittelpunkte als Tabelle gespeichert und später in das System Dynamics Modell „Teresken Alichur“ importiert. Das Modell „Teresken Alichur“ errechnete aus den Zellmittelpunkten wieder Poly-

gonzellen, welche mit dem jeweiligen importierten Wert für die Kostenentfernung versehen wurden und somit mit den in Arc GIS errechneten Polygonzellen identisch sind. Eine dynamische Modellierung verschiedenen Tereskenernteverhaltens auf Grundlage der im GIS errechneten Kostenentfernungen zum Dorf Alichur war nun möglich. Die System Dynamics Software SIMILE bietet die Möglichkeit, die simulierten Raumdaten während der Laufzeit dynamisch anzuzeigen. Somit können die Auswirkungen der getroffenen Managemententscheidungen auf den simulierten Raum direkt überwacht werden. Da das Visualisierungstool der Software SIMILE jedoch sehr einfach gehalten ist, bietet sich für eine anschauliche Darstellung der Simulationsergebnisse deren Rückimport in ein GIS an. Die Abbildungen 5 und 6 fassen die Aufarbeitung der Geodaten für den Import in die System Dynamics Software in mehreren Schritten anschaulich zusammen.

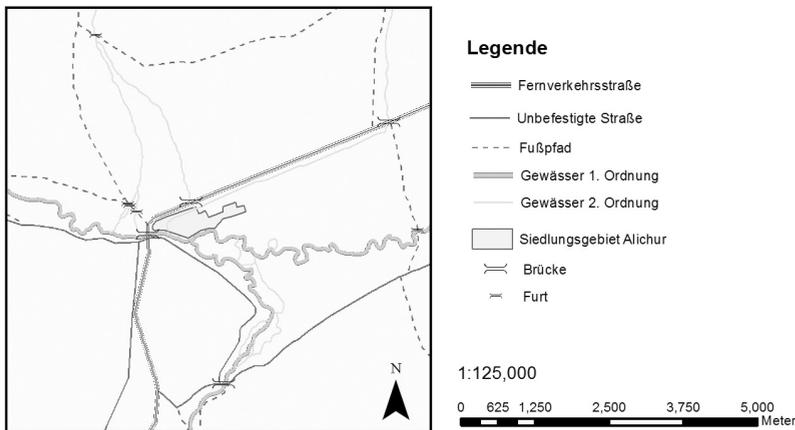


Abb. 5: Untersuchte Region rund um den Ort Alichur mit relevanter Infrastruktur

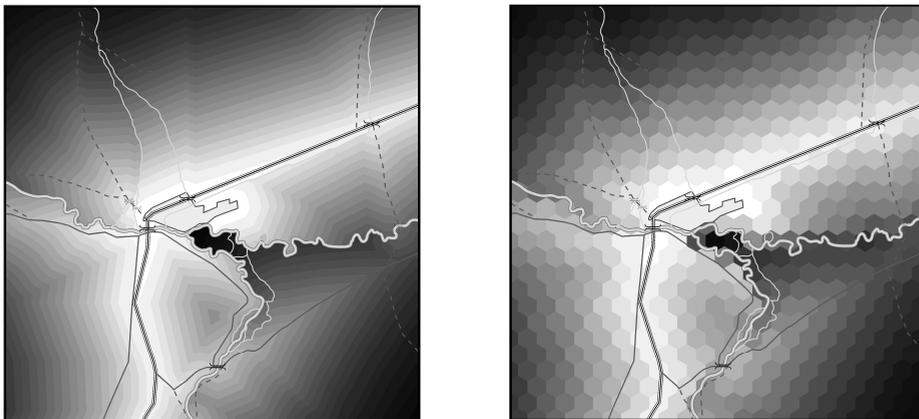


Abb. 6: Aus Infrastruktur und Flussnetz abgeleitete Kostenentfernung zum Ort Alichur, dunkle Töne bedeuten hohe Kosten, helle Töne bedeuten niedrige Kosten (links), Zusammenfassung der Kostentfernungen in 10 ha großen Hexagonzellen als Vorbereitung zur Implementation ins System Dynamics Modell (rechts)

3 Ergebnisse

Beispielhaft für mögliche Managementstrategien wurden zwei Szenarien mit dem Modell „Teresken Alichur“ simuliert. In „Szenario 10 %“ wurden Teresken in einer Zelle geerntet bis minimal 10 % des Bewuchses verblieben. Erneut wurde eine Zelle erst ab 20 % Bestockung beerntet. Bei diesem Szenario findet der Zuwachs am unteren Ende der in 2.1 beschriebenen Zuwachskurve statt. „Szenario 45 %“ hingegen beschreibt ein Ernteverhalten

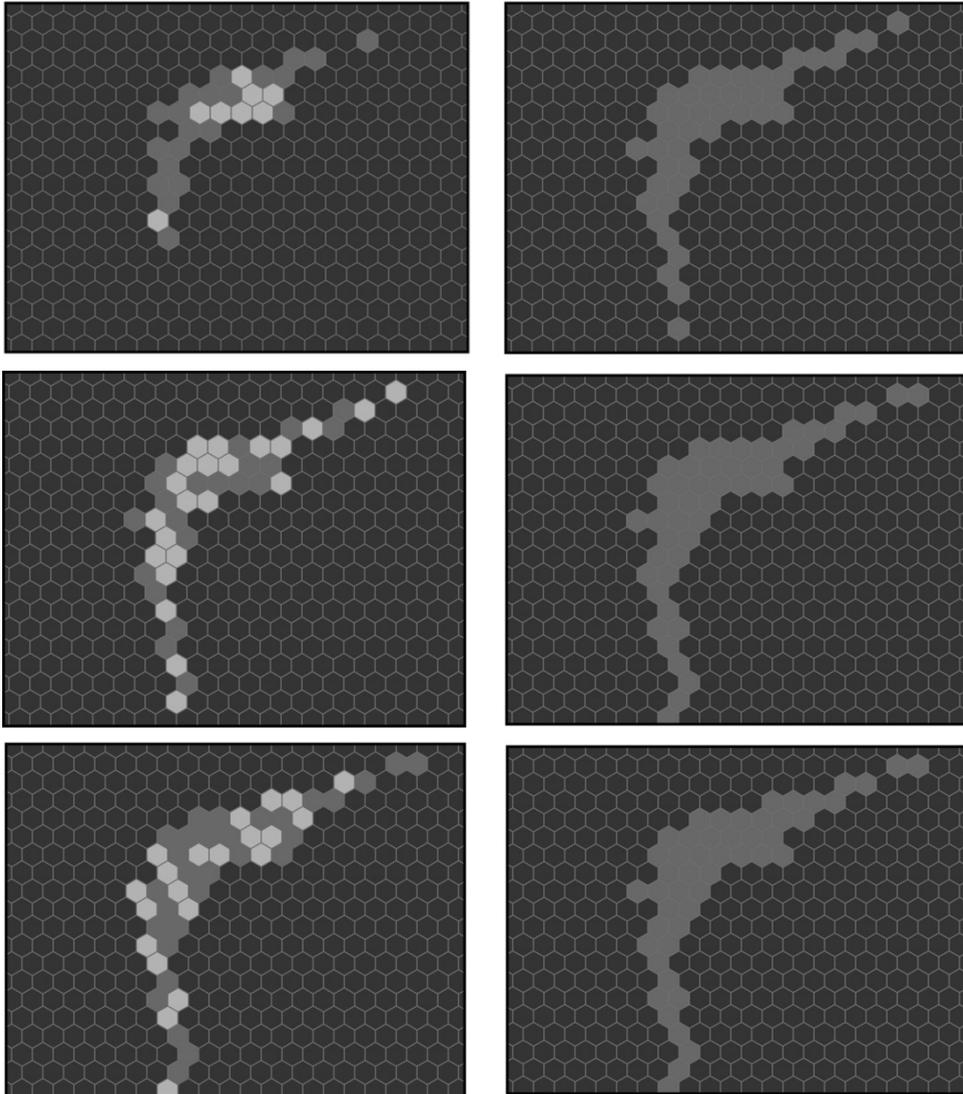


Abb. 7: Simulierte Tereskenbestockung in der Nachbarschaft um Alichur, Simulationsjahre 100, 200 und 300 (von oben nach unten), links „Szenario 10 %“, rechts „Szenario 45 %“ (Legende analog Abb. 4)

unter Ausnutzung des angenommenen Zuwachsoptimums bei 50 % Bestockung. Die Ernte findet in diesem Szenario bis zu einer Mindestbestockung von 45 % statt. Wird dieser Wert in einer Zelle unterschritten, wird dort erneut erst ab 55 % Bestockung geerntet. Abbildung 7 stellt die beiden simulierten Szenarien nach 100, 200 und 300 simulierten Jahren gegenüber.

In beiden Szenarien gut zu erkennen ist die Ernte entlang der Hauptstraße, die einen geringen Raumwiderstand aufweist. Nach 100 simulierten Jahren findet Tereskenernte in „Szenario 45 %“ auf deutlich größerem Raum statt als in „Szenario 10 %“. Dies war zu erwarten, da hier pro Flächeneinheit weniger Teresken entnommen werden können. Der höhere Zuwachs auf den bereits in den Vorjahren beernteten Flächen macht sich jedoch in den Simulationsjahren 200 und 300 bemerkbar. Während im Jahr 200 die für die Ernte beanspruchte Gesamtfläche in „Szenario 10 %“ noch etwas größer als in „Szenario 45 %“ ist, hat sich dieses Verhältnis im Jahr 300 der Simulation bereits umgekehrt. Auch ist zu diesem Zeitpunkt in „Szenario 45 %“ bereits beinahe ein Gleichgewichtszustand eingetreten. Verglichen mit dem Simulationsjahr 200 sind kaum neue Flächen zusätzlich beerntet worden. Der Zuwachs auf der bereits beernteten Fläche reicht somit nahezu für die Deckung des kompletten Tereskenbedarfs im Ort Alichur aus.

4 Diskussion und Ausblick

Ziel des Modells „Teresken Alichur“ war es, qualitative Aussagen über das Verhalten des Systems „Tereskenernte im Ostpamir“ zu treffen. Um einen stationären Systemzustand bestätigen zu können, war es notwendig, lange Simulationsläufe von vielen Jahrzehnten zu betrachten – zumal das Systemverhalten von einem nicht-linearen Zusammenhang, dem logistischen Wachstum der Tereskenbestände, dominiert wird. Es wurde gezeigt, wie sich mithilfe einer Verbindung des System Dynamics Ansatzes mit GIS Auswirkungen von Managemententscheidungen im Bereich der Tereskenernte aufzeigen lassen. Durch das Erreichen eines stationären Systemzustands konnte zudem veranschaulicht werden, dass die intuitive, aber nicht zielführende Auffassung, der Tereskenbedarf im Ostpamir müsse von dem vorhandenen Bestand abgezogen werden, um eine Abschätzung des zukünftigen Bestandes zu erlangen, für lange Zeiträume nicht gilt.

Abschließend muss jedoch erwähnt werden, dass für eine erschöpfende Betrachtung der Tereskenernte im Ostpamir bisher eine entscheidende Rückkopplung fehlt: die Verbindung zwischen Tereskenbestand und Weidekapazität. Wie eingangs erwähnt, stellt getrockneter Dung neben Teresken den Hauptenergieträger in der Region dar. Eine zu intensive Tereskenernte würde die Weidekapazität voraussichtlich stark beeinträchtigen und dadurch die Dungproduktion verringern. Dies wiederum würde zu einer weiteren Erhöhung des Tereskenbedarfs führen. Im weiteren Verlauf der Projektarbeit wird deshalb eine breitere Datengrundlage für das Modell „Teresken Alichur“ geschaffen, um diese Rückkoppelung zwischen Tereskenernte und Weidekapazität zu berücksichtigen und auch eine Aussage über potenzielle Entwicklungen des Energiemixes in der Region zu treffen.

Literatur

- BIRCH, C., OOM, S. & BEECHAM, J. (2007), Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment and simulation in ecology. *Ecological Modelling*, 206, 347-359.
- COSTANZA, R. & VOINOV, A. (Eds.) (2004), *Landscape simulation modeling. A spatially explicit, dynamic approach*. Springer-Verlag, New York [etc.].
- FORD, A. (2009), *Modeling the Environment*. Second Edition. Island Press.
- FORRESTER, J. W. (1961), *Industrial dynamics*. Productivity Press, Cambridge, Mass.
- HOECK, T., DROUX, R., BREU, T., HURNI, H. & MASELLI, D. (2007), Rural energy consumption and land degradation in a post-Soviet setting – an example from the west Pamir mountains in Tajikistan. In: *Energy for Sustainable Development*, 11 (1), 48-57. http://www.nccr-central-asia.org/archive/Publications/Rural%20energy%20consumption_maselli.pdf (18.10.2012).
- IMBODEN, D. & KOCH, S. (2003), *Systemanalyse. Einführung in die mathematische Modellierung natürlicher Systeme*. Springer-Verlag, Berlin [etc.].
- JENNESS, J. (2012), Repeating shapes for Arc GIS: Jenness Enterprises. http://www.jennessent.com/arcgis/repeat_shapes.htm.
- KLEANDROV, I. M. (1974), *Die Wirtschaft Sowjet Badakhshans*. Dushanbe, Tadschikistan.
- MAXWELL, T. & COSTANZA, R. (1997), A language for modular spatio-temporal simulation. *Ecological Modelling*, 103 (2-3), 105-113.
- MUETZELFELDT, R. & MASSHEDER, J. (2003), The Simile visual modeling environment. *European Journal of Agronomy*, 18 (3-4), 345-358.
- MUETZELFELDT, R., MASSHEDER, J. & TAYLOR, J. (2011), *Simulistics. System Dynamics and object-based modeling and simulation software*. Simulistics Ltd. <http://www.simulistics.com/> (Aktualisierung/Prüfung: 30.01.2013).
- RICKLEFS, R. E. (1990), *Ecology*. 3. Aufl. W. H. Freeman, New York.
- SCHMIDT, J., SCHÖNHART, M., BIBERACHER, M., GUGGENBERGER, T., HAUSL, S., KALT, G. et al. (2012), Regional energy autarky: Potentials, costs and consequences for an Austrian region. *Energy Policy*, 47, 211-221.
- VANSELOW, K. A. (2011), *The high-mountain pastures of the Eastern Pamirs (Tajikistan). An evaluation of the ecological basis and the pasture potential*. Dissertation an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. <http://www.opus.u.b.uni-erlangen.de/opus/volltexte/2011/2354/pdf/KimVanselowDissertation.pdf> (Aktualisierung: 09.02.2011; Prüfung: 18.10.2012).
- VOINOV, A. (2008), *Systems science and modeling for ecological economics*. 1. Aufl. Elsevier Academic Press, Amsterdam/Boston.