

Modellierung biomassedominierter Energiesysteme

Methodenentwicklung anhand eines Fallbeispiels im
Ost-Pamir, Tadschikistan

Von der Fakultät 2: Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität
Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte
Abhandlung

Vorgelegt von
Georg Hohberg
aus Berlin

Hauptberichter: Prof. em. Dr.-Ing. Giselher Kaule

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Siedentop

Tag der mündlichen Prüfung: 06.10.2015

Institut für Landschaftsplanung und Ökologie der Universität Stuttgart

2015

VORWORT

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Landschaftsplanung und Ökologie der Universität Stuttgart, wo ich das von der VolkswagenStiftung geförderte Projekt „*Transformation Processes in the Eastern Pamirs of Tajikistan. The presence and future of energy resources in the framework of sustainable development*“ bearbeitete. Mein besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Giselherr Kaule für die Übernahme des Hauptberichts, sowie für die fachliche Betreuung meiner Arbeit. Herrn Dr. rer. nat. Schwarz-von Raumer danke ich für die Schaffung sehr angenehmer Arbeitsbedingungen und eines Arbeitsklimas, das von einem hohen Maß an gegenseitigem Vertrauen und konstruktiver Zusammenarbeit geprägt ist. Für die Übernahme des Mitberichts danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Siedentop.

Bei Jonathan Massheder und Jasper Taylor von Simulistics Ltd. möchte ich mich für den intensiven Austausch über das auf der Software Simile basierte *Energiemodell Alichur* bedanken.

Dschoomart Otombaev und Sherali Zhunusov danke ich stellvertretend für die Einwohner der Ortschaft Alichur für ihre Unterstützung, welche mir als Außenstehendem ein Verständnis des beschriebenen Energiesystems erst ermöglicht hat. Auch Fanny Kreczy und Harald Zandler, sowie Dr. rer. nat. Kim Vanselow und Tobias Kraudzun bin ich zum Dank für eine gute und oft uneigennützigte Zusammenarbeit verpflichtet.

Kiowa Alraune, Julia Hohberg, Simon Hohberg, Sarina Hohberg und Eva-Maria Stumpp danke ich für das Lektorieren dieser Arbeit.

Schließlich möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Familie Sarina Hohberg, Sophie Hohberg und Henrik Hohberg dafür bedanken, dass sie immer für mich da sind.

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IX
TABELLENVERZEICHNIS	XIII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XV
REGIONALE BEGRIFFE.....	XVII
ZUSAMMENFASSUNG	XIX
ABSTRACT.....	XXI
1 EINFÜHRUNG IN DAS THEMA	1
1.1 PROBLEMBESCHREIBUNG.....	1
1.1.1 <i>Energiesysteme und Biomasse</i>	<i>1</i>
1.1.2 <i>Das Tereskensyndrom im Ost-Pamir</i>	<i>3</i>
1.2 ZIELSTELLUNG UND AUFBAU DER ARBEIT	4
1.3 ARBEITSHYPOTHESEN.....	5
2 METHODEN DER SIMULATION VON ENERGIESYSTEMEN	9
2.1 SYSTEMANALYSE UND ENERGIESYSTEME	9
2.1.1 <i>Systemanalyse</i>	<i>9</i>
2.1.2 <i>Energiesystemanalyse</i>	<i>14</i>
2.2 KRITERIEN FÜR DIE KLASSIFIKATION VON MODELLEN ZUR ANALYSE VON ENERGIESYSTEMEN	17
2.2.1 <i>Änderungsverhalten und zeitliche Kontinuität.....</i>	<i>17</i>
2.2.2 <i>Raumbezug und räumliche Kontinuität.....</i>	<i>18</i>
2.2.3 <i>Lösungsansatz der Modellgleichungen</i>	<i>19</i>
2.2.4 <i>Modellstruktur.....</i>	<i>21</i>
2.2.5 <i>Betrachtungsweise des modellierten Systems</i>	<i>21</i>
2.3 BIOMASSEDOMINIERTER ENERGIESYSTEME	22
2.3.1 <i>Besonderheiten biomassedominierter Energiesysteme</i>	<i>23</i>
2.3.2 <i>Modellanforderungen zur Abbildung biomassedominierter Energiesysteme....</i>	<i>26</i>
2.4 SIMULATIONSMETHODEN FÜR DIE ENERGIESYSTEMMODELLIERUNG.....	28
2.4.1 <i>Geoinformationssysteme</i>	<i>28</i>
2.4.2 <i>MESAP PlaNet.....</i>	<i>30</i>
2.4.3 <i>Zelluläre Automaten.....</i>	<i>33</i>
2.4.4 <i>Agentenbasierte Modelle</i>	<i>34</i>
2.4.5 <i>System Dynamics.....</i>	<i>35</i>
2.5 GEGENÜBERSTELLUNG DER MODELLIERUNGSANSÄTZE UND WAHL EINES MODELLIERUNGSANSATZES ZUR ABBILDUNG BIOMASSEDOMINIRTER ENERGIESYSTEME	37

3	ALICHUR, FALLBEISPIEL FÜR EIN BIOMASSEDOMINIERTES ENERGIESYSTEM	41
3.1	LITERATURANALYSE	42
3.2	DIE GEOGRAFIE VON ALICHUR	45
3.2.1	<i>Morphologie und Klima</i>	45
3.2.2	<i>Böden</i>	47
3.2.3	<i>Vegetation</i>	50
3.2.4	<i>Geschichtlicher Hintergrund</i>	54
3.2.5	<i>Natürliche Ressourcen und Energiepotenziale im Ost-Pamir</i>	56
3.3	DAS ENERGIESYSTEM VON ALICHUR.....	63
3.3.1	<i>Bedarf nach Energiedienstleistungen</i>	63
3.3.2	<i>Gegenwärtig verwendete Energieträger und deren Nutzungsmuster</i>	65
3.3.3	<i>Struktur des Energiesystems im RES</i>	72
3.3.4	<i>Für die Simulation in Simile verwendete Modellstruktur</i>	73
4	ZENTRALE ASPEKTE DER MODELLSTRUKTUR UND MODELLPARAMETRISIERUNG	75
4.1	GEGENWÄRTIGER ENERGIEMIX	75
4.1.1	<i>Struktur und Organisation der Haushaltsinterviews</i>	75
4.1.2	<i>Maßeinheiten</i>	77
4.1.3	<i>Prüfung und Bereinigung von Inkonsistenzen</i>	82
4.1.4	<i>Ergebnis der Haushaltsbefragungen</i>	85
4.1.5	<i>Heizwertanalyse</i>	88
4.1.6	<i>Synthese Energiemix Alichur 2012</i>	92
4.2	RÄUMLICHE BETRACHTUNG DER ZWERGSTRAUCHERnte	93
4.2.1	<i>Erntegebietskarte</i>	94
4.2.2	<i>Räumliche Auflösung der sich aus den Haushaltsinterviews ergebenden Zwergstrauchernte</i>	98
4.2.3	<i>Aufnahme von GPS-Erntetracks</i>	101
4.2.4	<i>Fachinterviews LKW Fahrer</i>	103
4.2.5	<i>Zur Güte der Aufnahmeansätze</i>	104
4.3	RÄUMLICHE DYNAMIK UND ERNTEINTENSITÄT	107
4.3.1	<i>Raumwiderstand der individuellen Zwergstrauchernte</i>	109
4.3.2	<i>Raumwiderstand der Gruppenernte</i>	113
4.3.3	<i>Intensität der Zwergstrauchernte</i>	124
4.4	BESTANDES- UND WUCHSPARAMETER DER ZWERGSTRÄUCHER	127
4.4.1	<i>Zwergstrauchbestand</i>	128
4.4.2	<i>Zwergstrauchbiomassepotenzial</i>	130
4.4.3	<i>Zwergstrauchbiomassezuwachs</i>	132
4.5	BEWEIDUNG	138
4.5.1	<i>Weidekapazität</i>	138
4.5.2	<i>Gegenwärtige Beweidungssituation</i>	146
4.5.3	<i>Dungproduktion</i>	149
4.6	FUNKTIONALE VERKNÜPFUNGEN IM ENERGIEMODELL ALICHUR.....	152

5	TECHNISCHE UMSETZUNG, MODELLANALYSE UND MODELLANWENDUNG	155
5.1	TECHNISCHE UMSETZUNG	155
5.2	MODELLANALYSE	157
5.2.1	<i>Sensitivitätsanalyse</i>	157
5.2.2	<i>Modellkalibrierung und Modell-Warm-up-Phase</i>	163
5.2.3	<i>Betrachtungen zur Modellgüte</i>	166
5.3	MODELLANWENDUNG	174
5.3.1	<i>Szenarien</i>	174
5.3.2	<i>Simulationsergebnisse</i>	178
6	SCHLUSS	201
6.1	SYNTHESE.....	201
6.2	KRITISCHE BETRACHTUNGEN	205
6.3	AUSBLICK	207
	LITERATURVERZEICHNIS.....	209
	ANHANG.....	220
I.	FRAGEBOGEN HAUSHALTSBEFRAGUNG ALICHUR 2013	220
II.	KORREKTURSCHLÜSSEL UND KODIERUNG	225
III.	KARTE ERNTEGEBIETE ALICHUR.....	229
IV.	KARTE RÄUMLICHE AUSDEHNUNG DER ZWERGSTRAUCHERNTEN VON ALICHUR	231
V.	MODELL RAUMWIDERSTAND INDIVIDUELLE ERNTE	233
VI.	MODELL RAUMWIDERSTAND GRUPPENERNTE	234
VII.	ENERGIEMODELL ALICHUR	235

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNG 2-1: SCHRITTE DER MODELLBILDUNG NACH GRIMM UND RAILSBACK.....	13
ABBILDUNG 2-2: ENERGIESYSTEM ALS ANEINANDERKETTUNG VON PROZESSEN UND GÜTERN.	15
ABBILDUNG 2-3: KLASSIFIZIERUNG VON MODELLEN ZUR ANALYSE VON ENERGIESYSTEMEN NACH MÖST UND FICHTNER.....	17
ABBILDUNG 2-4: STÜCKWEISE LINEARISIERUNG EINES NICHTLINEAREN PROZESSES.	20
ABBILDUNG 2-5: FUNKTIONALER AUFBAU VON MESAP.	30
ABBILDUNG 2-6: GÜTER UND PROZESS IM RES..	32
ABBILDUNG 3-1: LAGE DER ORTSCHAFT ALICHUR IM <i>JAMOAT</i> ALICHUR, <i>RAJON</i> MURGHAB, GBAO.	41
ABBILDUNG 3-2: KLIMADIAGRAMM ALICHUR.	47
ABBILDUNG 3-3: GEOLOGIE DES OST-PAMIR.....	48
ABBILDUNG 3-4: VERTEILUNG DER IM UNTERSUCHUNGSGEBIET VORHERRSCHENDEN BÖDEN.	49
ABBILDUNG 3-5: VEGETATIONSVERTEILUNG IM <i>JAMOAT</i> ALICHUR NACH VANSELOW.	53
ABBILDUNG 3-6: HISTORISCHE SCHWANKUNGEN IM OST-PAMIR VERWENDETER ENERGIETRÄGER..	56
ABBILDUNG 3-7: WASSERKRAFTWERK AK SUU NAHE DER ORTSCHAFT MURGHAB.	58
ABBILDUNG 3-8: FLÄCHEN IM <i>JAMOAT</i> ALICHUR, DIE FÜR EINE BIOMASSENUTZUNG DURCH DIE LOCALE BEVÖLKERUNG IN FRAGE KOMMEN.	61
ABBILDUNG 3-9: A) ANTROCKNEN DES GESTOCHENEN <i>KUIK</i> IM STALL, B) DURCHTROCKNEN IN DER SONNE... ..	69
ABBILDUNG 3-10: GÄNGIGE ENERGIETRÄGER IN ALICHUR..	71
ABBILDUNG 3-11: RES DES ENERGIESYSTEMS ALICHUR.....	73
ABBILDUNG 3-12: ZUR SIMULATION IN SIMILE VERWENDETE MODELLSTRUKTUR EINES ENERGIESYSTEMS DER ORTSCHAFT ALICHUR.	74
ABBILDUNG 4-1: KARTE DER ORTSCHAFT ALICHUR MIT BEFRAGTEN HAUSHALTEN.	76
ABBILDUNG 4-2: AUFTEILUNG DER GEERNTETEN ZWERGSTRÄUCHER AUF DIE IN TEILKAPITEL 4.3.2. BESCHRIEBENEN ERNTEARTEN..	87
ABBILDUNG 4-3: ENERGIEMIX VON ALICHUR (JAHR 2012).	93
ABBILDUNG 4-4: ERNTEGEBIETE UND HERLEITUNG DER ERNTEGEBIETSGRENZEN..	97
ABBILDUNG 4-5: RÄUMLICHE AUFTEILUNG DER ZWERGSTRÄUCHERERNTEN IM GEBIET ALICHUR (JAHR 2012) DIFFERENZIERT NACH ERNTEARTEN.....	100
ABBILDUNG 4-6: ERNTESTRACKS (JAHRE 2012-2014) UND IN DER HERBSTSAISON 2013 LAUT EXPERTEN- INTERVIEW MITTELS GRUPPENERNTE GEERNTETE ZWERGSTRÄUCHERMENGEN.....	106
ABBILDUNG 4-7: PRINZIPIALKIZZE DER FUNKTION <i>KOSTENENTFERNUNG</i> IN ARC INFO.....	108
ABBILDUNG 4-8: KORRELATION DER VARIABLEN <i>STEIGUNG</i> UND <i>GESCHWINDIGKEIT</i> BEI DER INDIVIDUELLEN ERNTE..	111
ABBILDUNG 4-9: KOSTENENTFERNUNG DER INDIVIDUELLEN ERNTE. AUFLÖSUNG: 900 m ² (RECHTECK).....	112
ABBILDUNG 4-10: KOSTENENTFERNUNG DER INDIVIDUELLEN ERNTE. AUFLÖSUNG: 1 km ² (SECHSECK).....	113
ABBILDUNG 4-11: WEGENETZ ALICHURS.....	115
ABBILDUNG 4-12: KORRELATION DER VARIABLEN <i>BEFAHRBARKEIT</i> UND <i>GESCHWINDIGKEIT</i> BEI DER GRUPPENERNTE.	118

ABBILDUNG 4-13: DURCHSCHNITTLICHE REISEGESCHWINDIGKEIT BEI DER GRUPPENERNTE NACH WEGABSCHNITTEN.....	119
ABBILDUNG 4-14: KORRELATION DER VARIABLEN <i>BEFAHRUNGSHÄUFIGKEIT</i> UND <i>GESCHWINDIGKEIT</i> BEI DER GRUPPENERNTE.	120
ABBILDUNG 4-15: KOSTENENTFERNUNG DER GRUPPENERNTE. AUFLÖSUNG: 900 m ² (RECHTECK).....	123
ABBILDUNG 4-16: KOSTENENTFERNUNG DER GRUPPENERNTE. AUFLÖSUNG: 1 km ² (SECHSECK).....	123
ABBILDUNG 4-17: VON ERNTEGRUPPEN AUFGESUCHTE ERNTEORTE IM ERNTEGEBIET GOROMDU.	127
ABBILDUNG 4-18: ZWERGSTRAUCHBIOMASSE IM UNTERSUCHUNGSGEBIET. AUFLÖSUNG: 900 m ² (RECHTECK).	129
ABBILDUNG 4-19: ZWERGSTRAUCHBIOMASSE IM UNTERSUCHUNGSGEBIET. AUFLÖSUNG: 1 km ² (SECHSECK).	129
ABBILDUNG 4-20: A) DIE LOGISTISCHE ZUWACHSFUNKTION.	135
ABBILDUNG 4-21: AUSWIRKUNGEN VERSCHIEDENER ZUWACHSRATEN AUF EINEN ZWERGSTRAUCHBESTAND.	137
ABBILDUNG 4-22: WINTERWEIDEN ALICHUR. AUFLÖSUNG: 900 m ² (RECHTECK)	144
ABBILDUNG 4-23: WINTERWEIDEN ALICHUR. AUFLÖSUNG: 1 km ² (SECHSECK).	145
ABBILDUNG 5-1: KONZEPT DER RÄUMLICHEN SIMULATION IN SIMILE.	156
ABBILDUNG 5-2: VORGEHEN BEI DER KOPPELUNG VON SYSTEM DYNAMICS UND GIS.....	156
ABBILDUNG 5-3: BEDIENFELD DES <i>ENERGIEMODELL ALICHUR</i>	158
ABBILDUNG 5-4: ZUR KALIBRIERUNG DES PARAMETERS <i>ANTEIL_BM_MAX</i> VERWENDETE KURVENSCHEINEN.	165
ABBILDUNG 5-5: SENSITIVITÄTSANALYSE DES PARAMETERS <i>ANTEIL_BM_MAX</i>	167
ABBILDUNG 5-6: SENSITIVITÄTSANALYSE DES PARAMETERS <i>ZSB_FAKT</i>	168
ABBILDUNG 5-7: SENSITIVITÄTSANALYSE DER PARAMETERS <i>ANTEIL_BH</i>	169
ABBILDUNG 5-8: SENSITIVITÄTSANALYSE DES PARAMETERS <i>BH_ERNTEGR</i>	170
ABBILDUNG 5-9: SENSITIVITÄTSANALYSE DES PARAMETERS <i>IH_ERNTEGR</i>	170
ABBILDUNG 5-10: SENSITIVITÄTSANALYSE DES PARAMETERS <i>BREITE_EB_BH</i>	172
ABBILDUNG 5-11: SENSITIVITÄTSANALYSE DES PARAMETERS <i>BREITE_EB_IH</i>	172
ABBILDUNG 5-12: IM <i>ENERGIEMODELL ALICHUR</i> SIMULIERTE SZENARIEN.....	175
ABBILDUNG 5-13: RÄUMLICHE AUSDEHNUNG DER INDIVIDUELLEN ZWERGSTRAUCHERNTE UND DER GRUPPENERNTE IN SZENARIOVARIANTE <i>BAU_A</i>	182
ABBILDUNG 5-14: VERBLEIBENDE BEERNTBARE BIOMASSE IM UNTERSUCHUNGSGEBIET UND VERLAUF DER N-WERT-KURVE IN SZENARIOVARIANTE <i>BAU_A</i>	183
ABBILDUNG 5-15: VERBLEIBENDE BEERNTBARE BIOMASSE IM UNTERSUCHUNGSGEBIET UND VERLAUF DER N-WERT-KURVE IN SZENARIOVARIANTE <i>BAU_B</i>	183
ABBILDUNG 5-16: ZWERGSTRAUCHBIOMASSE IM UNTERSUCHUNGSGEBIET IM JAHR 2068, SIMULIERT IN SZENARIOVARIANTE <i>BAU_A</i>	184
ABBILDUNG 5-17: ENTWICKLUNG DES VIEHBESATZES IM SZENARIO <i>BAU</i>	184
ABBILDUNG 5-18: AUS SZENARIOVARIANTE <i>BAU_A</i> RESULTIERENDER <i>ENERGIEMIX</i>	185
ABBILDUNG 5-19: RÄUMLICHE AUSDEHNUNG DER INDIVIDUELLEN ZWERGSTRAUCHERNTE UND DER GRUPPENERNTE IN SZENARIOVARIANTE <i>SB_A</i>	189
ABBILDUNG 5-20: VERBLEIBENDE BEERNTBARE BIOMASSE IM UNTERSUCHUNGSGEBIET UND VERLAUF DER N-WERT-KURVE IN SZENARIOVARIANTE <i>SB_A</i>	190

ABBILDUNG 5-21: VERBLEIBENDE BEERNTBARE BIOMASSE IM UNTERSUCHUNGSGEBIET UND VERLAUF DER N-WERT-KURVE IN SZENARIOVARIANTE SB_B.	190
ABBILDUNG 5-22: ZWERGSTRAUCHBIOMASSE IM UNTERSUCHUNGSGEBIET IM JAHR 2049, SIMULIERT IN SZENARIOVARIANTE SB_A.	191
ABBILDUNG 5-23: ENTWICKLUNG DES VIEHBESATZES IM SZENARIO SB.	191
ABBILDUNG 5-24: AUS SZENARIOVARIANTE SB_A RESULTIERENDER ENERGIEMIX.	192
ABBILDUNG 5-25: RÄUMLICHE AUSDEHNUNG DER INDIVIDUELLEN ZWERGSTRAUCHERNTEN UND DER GRUPPENERNTEN IN SZENARIOVARIANTE SOE_A.	196
ABBILDUNG 5-26: VERBLEIBENDE BEERNTBARE BIOMASSE IM UNTERSUCHUNGSGEBIET UND VERLAUF DER N-WERT-KURVE IN SZENARIOVARIANTE SOE_A.	197
ABBILDUNG 5-27: VERBLEIBENDE BEERNTBARE BIOMASSE IM UNTERSUCHUNGSGEBIET UND VERLAUF DER N-WERT-KURVE IN SZENARIOVARIANTE SOE_B.	197
ABBILDUNG 5-28: ZWERGSTRAUCHBIOMASSE IM UNTERSUCHUNGSGEBIET IM JAHR 2115, SIMULIERT IN SZENARIOVARIANTE SOE_A.	198
ABBILDUNG 5-29: ENTWICKLUNG DES VIEHBESATZES IM SZENARIO SOE.	198
ABBILDUNG 5-30: AUS DER SZENARIOVARIANTE SOE_A RESULTIERENDER ENERGIEMIX.	199

TABELLENVERZEICHNIS

TABELLE 2-1:	ZUSAMMENFASSUNG DER ANFORDERUNGEN AN EIN MODELL ZUR SIMULATION EINES BIO- MASSEDOMINIERTEN ENERGIESYSTEMS.	28
TABELLE 2-2:	EVALUATION VERSCHIEDENER MODELLIERUNGSANSÄTZE ZUR EIGNUNG FÜR DIE ENERGIESYSTEMMODELLIERUNG VON ALICHUR.	38
TABELLE 3-1:	GEGENÜBERSTELLUNG DER POTENZIALE VON DEZENTRALEN STROMERZEUGUNGSANLAGEN. .	62
TABELLE 4-1:	STATISTISCHE KENNWERTE DER GEMESSENEN <i>TENG SHYVAK</i> UND <i>TERESKEN</i>	78
TABELLE 4-2:	LADEDICHTEN DER MENGENMÄßIG BEDEUTSAMSTEN ENERGIETRÄGER IM <i>JAMOAT ALICHUR</i> . 79	
TABELLE 4-3	A)-E): ZUR MENGENANGABE VERWENDETE LKW-TYPEN MIT ZUGEHÖRIGEN KENNWERTEN. 81	
TABELLE 4-4:	ZUSAMMENSTELLUNG ERMITTELTEN MAREINHEITEN..	82
TABELLE 4-5:	MASSEN UND ANTEILE DER IN ALICHUR LAUT HAUSHALTSBEFRAGUNG VERWENDETEN ENERGIETRÄGER, BEZUGSJAHR 2012.	86
TABELLE 4-6:	ELEMENTARANALYSE BIOGENER ENERGIETRÄGER AUS ALICHUR...	89
TABELLE 4-7:	ENERGETISCHE EIGENSCHAFTEN DER IN ALICHUR VERWENDETEN ENERGIETRÄGER...	90
TABELLE 4-8:	HEIZWERTE DER UNTERSUCHTEN PROBEN IM ZUSTAND UNTERSCHIEDLICHER PROBEFEUCHTEN.	92
TABELLE 4-9:	KRITERIEN ZUR BEWERTUNG VON WEGEABSCHNITTEN IM WEGENETZ DER REGION ALICHUR.	116
TABELLE 4-10:	TÄGLICHER FUTTERBEDARF UND ANTEIL DER VERWERTBAREN ENERGIE NACH TIERART UND BE- WUCHSFORM.	139
TABELLE 4-11:	JÄHRLICH AUF DEN WINTERWEIDEN VON ALICHUR VERFÜGBARE FUTTERWERTE UND VON EINER EICHHERDE DURCHSCHNITTLICH VERWERTBARE ENERGIEMENGEN NACH VEGETATIONSKLASSEN.	141
TABELLE 4-12:	WEIDEKAPAZITÄT DER WINTERWEIDEN IM <i>JAMOAT ALICHUR</i> AUFGESCHLÜSSELT NACH BEWUCHSFORMEN.	144
TABELLE 4-13:	ANGABEN ZU VIEHZAHLEN IM UNTERSUCHUNGSGEBIET.....	147
TABELLE 4-14:	ERGEBNISSE DER EXPERTENINTERVIEWS ZU <i>KUIK</i> - UND DUNGPRODUKTIONSRATE.....	150
TABELLE 4-15:	JÄHRLICHE DUNGPRODUKTION IN ALICHUR PRO EINHEITSSHERDE.	152
TABELLE 4-16:	ZUR MODELLIERUNG DER ZWERGSTRAUCHERNTEN IM GEBIET ALICHUR VERWENDETE PARAMETER.....	154
TABELLE 5-1:	AUF SENSITIVITÄT UNTERSUCHTE PARAMETER.	161
TABELLE 5-2:	ANOVA SENSITIVITÄTEN (F-WERTE) EINZELNER UNTERSUCHTER PARAMETER DES <i>ENERGIEMODELL ALICHUR</i>	162
TABELLE 5-3:	PARAMETRISIERUNG DER SIMULIERTEN SZENARIEN.	178

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABM	Agentenbasierte Modellierung
ANOVA	Varianzanalyse (engl.: <i>analysis of variance</i>)
BAU	Szenario Business-as-usual
DGM	Digitales Geländemodell
EH	Einheitsherde
ET	Energieträger
GIS	Geoinformationssystem
HH	Haushalt
IFK	Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik der Universität Stuttgart
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MESAP	Modular Energy System Analysis and Planning toolbox
MW	Mittelwert
PEST	Parameterschätzungssoftware (engl.: <i>parameter estimation software</i>)
PlaNet	Planning Network
PV	Photovoltaik
RES	Referenzenergiesystem
RSA	Lokale Sensitivitätsanalyse (engl.: <i>regional sensitivity analysis</i>)
SB	Szenario Breckle
SD	System Dynamics
SME	Spatial Modeling Environment
SOE	Szenario Optimierung und Energieautarkie
Stabw	Standardabweichung
TIMES	The Integrated MARKAL-EFOM System
ZA	Zellulärer Automat
ZS	Zwergsträucher

REGIONALE BEGRIFFE

Gaz-66	Geländegängiger Lastkraftwagen russischer Produktion
hukumat	Lokale Verwaltung
jamoat	Kommune
kuik	Stallung
Lada Niva	Für leichtes Gelände geeigneter Geländewagen aus russischer Produktion
Mosquitsch	PKW aus russischer Produktion (nicht geländegängig)
rajon	Landkreis
tandor	Traditioneller kirgisischer Ofen für das Backen von Brot
taz	Tablett für den Brennstofftransport
teng	Zwergstrauchbündel
tezek	Getrocknete Kuhfladen
Uaz	Für schweres Gelände geeigneter Geländewagen aus russischer Produktion

ZUSAMMENFASSUNG

Die Bereitstellung und Nutzung biogener Energieträger unterscheidet sich in wesentlichen Aspekten von jener nichtregenerativer Energieträger. Aufgrund ihrer dezentralen und flächenintensiven Erzeugung sind biogene Energieträger durch einen starken Raumbezug, Konkurrenz zu anderen Landnutzungsformen, Rückkopplungen innerhalb des Erzeugungssystems, sowie durch Saisonalität und damit Einschränkungen in der Verfügbarkeit geprägt. Biomasse ist heute vor allem in Entwicklungsländern von großer Bedeutung für die Energiebereitstellung. Auch die Energieversorgung im tadschikischen Ost-Pamir, einer in Zentral Asien gelegenen und wenig entwickelten Hochgebirgsregion, ist maßgeblich durch biogene Energieträger geprägt. Ein großer Teil des Energiebedarfs wird hier durch Zwergsträucher (*Krascheninnikovia ceratoides* und *Artemisia spp.*) und Viehdung befriedigt. Die Zwergstrauchbestände des Ost-Pamir sind neben ihrer energetischen Verwendung auch als Nahrungsgrundlage für das Nutzvieh bedeutsam. Da bei einer Übernutzung der Zwergstrauchbestände zukünftig weniger Nutzvieh gehalten werden kann, jedoch ausbleibende Dungerträge zukünftig durch zusätzliche Zwergstrauchbiomasse kompensiert werden müssen, besteht die Möglichkeit einer selbstverstärkenden Wirkungskette. Die durch übermäßige Zwergstrauchernte hervorgerufene Degradation von Weideflächen im Ost-Pamir wurde von BRECKLE UND WUCHERER (2006, S.233) als *Tereskensyndrom* bezeichnet.

Die Methode der Energiesystemanalyse wird verwendet, um wissensbasierte Entscheidungsgrundlagen für die Energiepolitik zu liefern. Ein Standardwerkzeug der Energiesystemanalyse sind optimierende Energiesystemmodelle. Diese verstehen Energiesysteme als rein technisch-ökonomische Systeme. Biomasse-dominierte Energiesysteme hingegen stellen eine Verbindung aus technisch-ökonomischem System, biophysikalischem System und sozialem System dar.

Ziel dieser Arbeit ist es, durch Gegenüberstellung und Diskussion verschiedener Modellierungsansätze eine geeignete Methode zur Simulation von biomassedominierten Energiesystemen zu identifizieren und auf ein Fallbeispiel im Ost-Pamir anzuwenden. Im betrachteten Fallbeispiel soll geklärt werden, inwieweit die Zwergstrauchentnahme im Ost-Pamir eine Zerstörung ihrer Wachstumsgrundlagen bedingt und ob kurz bis mittelfristig mit einem Zusammenbruch der lokalen Energieversorgung gerechnet werden muss. Die Simulation von Entwicklungsszenarien soll zudem die

Bandbreite von möglichen Entwicklungen beschreiben und Optimierungspotenzial aufzeigen.

Ein System-Dynamics-GIS-Hybridansatz bietet die Möglichkeit der zeitlich kontinuierlichen, räumlich aufgelösten Modellierung, mit der auch Rückkopplungen in Systemen abgebildet werden können. Er ist daher für die Modellierung biomassedominierter Energiesysteme geeignet. Basierend auf dem beschriebenen Simulationsansatz und auf einer detaillierten Untersuchung des Energiesystems von Alichur, der zweitgrößten Siedlung des Ost-Pamir, wird das *Energiemodell Alichur* erstellt und parametrisiert. Nach eingehender Sensitivitätsanalyse und Validitätsprüfung werden im Energiemodell Alichur drei Szenarien simuliert: Szenario Business-as-usual (BAU, gleichbleibendes Management), Szenario Breckle (SB, verschlechtertes Management) und Szenario Optimierung und Energieautarkie (SOE, optimiertes Management). Die Simulationsergebnisse sämtlicher Szenarien zeigen, dass kurz- bis mittelfristig nicht mit einem Zusammenbruch des Energiesystems von Alichur gerechnet werden muss. Zwar ist zukünftig mit einem steigenden Aufwand für die Zwergstrauchernte zu rechnen, weil vermehrt auch ortsferne Bestände beerntet werden müssen. Aufgrund der Erntekultur, bei der bis zu 50 % der Zwergsträucher auf der Fläche verbleiben, ist jedoch eine völlige Degradation der Zwergstrauchbestände in der betrachteten Fallstudie nicht gegeben. Lediglich im ortsnahen Bereich erfolgt eine sehr intensive Zwergstrauchnutzung, die in den nächsten Dekaden kaum Zwergstrauchbiomassezuwachs erwarten lässt. Bei einem verschlechterten Ressourcenmanagement (Szenario SB) ist frühestens in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts mit einer Verknappung der erreichbaren Zwergstrauchbestände zu rechnen. Nicht eindeutig geklärt werden konnte die Frage, ob die gegenwärtige Zwergstrauchnutzung dauerhaft betrieben werden kann (Szenario BAU). Grundsätzlich ist bei optimiertem Management, verbunden mit moderaten Energieeinsparungen eine nachhaltige und autarke auf biogenen Energieträgern basierende Energieversorgung in der Region möglich (Szenario SOE). Die vermutete selbstverstärkende Wirkungskette zwischen thermischer Zwergstrauchnutzung und Weidekapazität kann in der Simulation nicht bestätigt werden.

ABSTRACT

Supply and utilization of biomass as an energy carrier differ significantly from those of non-regenerative energy carriers. Due to the decentral and space consuming production, biomass based energy carriers are characterized by strong spatial reference, competition with other forms of land-use, feedbacks within the energy system and seasonality causing restrictions in availability. Today, especially in developing countries, biomass is fundamental to energy supply. The energy supply of the Eastern Pamirs, a little developed high mountain region located in Tajikistan, Central Asia, is mainly dominated by biomass. A great share of the Eastern Pamirs' local energy demand is currently satisfied by dwarf shrubs (*Krascheninnikovia ceratoides* und *Artemisia spp.*) and animal manure. Besides of their energetic potential, dwarf shrubs are an important nutrient source for local livestock. If the inhabitants of Alichur would overuse the local dwarf shrub stands, less livestock could be kept in the case study region. In Addition, missing manure yields would have to be compensated by even higher dwarf shrub yields. Hence, there is a possibility of a self-reinforcing functional chain. BRECKLE AND WUCHERER (2006, S.233) refer to the degradation of pasture lands due to excessive dwarf shrub harvest in the Pamir mountains as *tereskensyndrome*.

Energy system analysis as a method is employed to generate a knowledge-based basis for decision-making. Optimizing energy system models are used as a standard tool in energy system analysis. They treat energy systems as purely technical-economical systems. However, energy systems dominated by biomass are combined systems containing technical-economical, biophysical and social aspects.

The aim of this study is to identify an appropriate method for the simulation of energy systems dominated by biomass and to apply this method to a case study in the Eastern Pamirs. In the case study considered it should be clarified, to what extend the dwarf shrub harvest causes degradation of dwarf shrub sites and if an energy system breakdown is likely on the short or medium term. Furthermore, by simulating different scenarios the range of possible developments within the energy system and the potential for optimization are to be identified.

A system dynamics-GIS-hybrid approach allows for temporally continuous and spatially explicit simulation and the consideration of feedbacks within systems. It is there-

fore suitable for modelling energy systems dominated by biomass. Based on this approach as well as on a detailed analysis of the energy system of Alichur, the second largest settlement in the Eastern Pamirs, the model *Energiemodell Alichur* is developed and parameterized. After a sensitivity analysis and a validity check, three scenarios are simulated in the model *Energiemodell Alichur*: Scenario Business-as-usual (BAU, unchanged resource management), Scenario Breckle (SB, unfavorable resource management) and Scenario optimization and energy autarky (SOE, improved resource management). The simulation results of all three scenarios show that in the short to medium term a collapse of the energy system of Alichur is unlikely to happen. While travelling distances to dwarf shrub harvesting sites are likely to increase in the future, based on current harvesting practices, a total degradation of all dwarf shrub sites within this timeframe is not probable. Currently, most dwarf shrubs are harvested decentrally at intensities leaving up to 50 % of dwarf shrub biomass on the site. Only sites close to the settlement of Alichur are cleared at intensities preventing considerable biomass regrowth within the near future. Considering an unfavorable resource management (Scenario SB), access to dwarf shrubs as an energy carrier will not be limited before the second half of this century. It cannot finally be clarified if the current dwarf shrub-harvest can be continued in a permanent manner (Scenario BAU). However, it is found that considering an optimized resource management combined with moderate energy savings, permanent self-sufficient energy supply within the case study region is possible (Scenario SOE). The assumed self-reinforcing functional chain regarding energetic dwarf shrub use and pasturing of livestock cannot be confirmed by the results of the model simulation.

1 EINFÜHRUNG IN DAS THEMA

1.1 PROBLEMBESCHREIBUNG

Der tadschikische Ost-Pamir stellt heute eine nahezu energieautarke Region dar. Dies ist einerseits bedingt durch die geographische Lage der Region, welche sich nahezu komplett auf einer Höhe von über 4.000 m befindet. Andererseits haben auch die politischen Entwicklungen seit 1991 dazu geführt, dass lange Zeit kein Austausch mit Nachbarregionen möglich war. Gegenwärtig wird in allen Siedlungen der Region der Großteil des jährlichen Energiebedarfs mit regionaler Biomasse befriedigt. Bisher werden Energiesysteme in der Systemforschung vorrangig als technische Systeme verstanden und mit Hilfe von optimierenden Energiesystemmodellen simuliert. Der lineare Ansatz der optimierenden Energiesystemmodellierung wurde für die Analyse von durch nichtregenerative Energieträger wie Öl, Gas, Kohle oder Nuklearenergie dominierten Energiesystemen entwickelt. Stehen jedoch regenerative biogene Energieträger wie Holz, Grünschnitt, Agrarprodukte oder Viehdung im Fokus eines Energiesystems, ergeben sich besondere Anforderungen an die Modellierung. Für die Analyse des Energiesystems im Ost-Pamir, wie auch für andere durch einen hohen Anteil an Biomasse charakterisierter Energiesysteme eignet sich die Methode der optimierenden Energiesystemmodellierung daher nicht. Zweck dieser Arbeit ist es, diese Lücke zu füllen und eine Modellierungsmethode zu entwickeln, die eine Analyse von biomassedominierten Energiesystemen wie im Ost-Pamir ermöglicht.

1.1.1 ENERGIESYSTEME UND BIOMASSE

Biogene Energieträger verfügen im Vergleich zu nichtregenerativen Energieträgern über besondere Eigenschaften. Hervorzuheben sind hier ein starker Raumbezug, Konkurrenz zu anderen Landnutzungsformen, Rückkopplungen innerhalb des Erzeugungssystems, Saisonalität und Einschränkungen bei der Verfügbarkeit. Aufgrund ihrer Eigenschaften stellen durch Biomasse geprägte Energiesysteme eine Verbindung aus technisch-ökonomischem System, biophysikalischem System und sozialem System dar. Zur Analyse dieser kombinierten Systeme werden, je nach Fragestellung und simuliertem Energiesystem, angepasste Simulationsmethoden benötigt.

In der Geschichte der Menschheit waren verschiedene Formen von Bioenergie lange Zeit der wichtigste Rohstoff zur Befriedigung sämtlicher Grundbedürfnisse. Bis Anfang des 19. Jahrhundert stellten biogene Energieträger wie Holz oder Holzkohle die

Hauptenergiequelle in Industrieländern dar. In einigen Entwicklungsländern haben sie noch heute diese überragende Bedeutung. Etwa 35 % des Energiebedarfs von drei Viertel der Weltbevölkerung oder 60 bis 90 % des Energiebedarfs der weltweit ärmsten Entwicklungsländer wurden im Jahr 2009 mit Bioenergie gedeckt (ROSILLO CALLÉ 2009, S. 3). In den Entwicklungsländern wird Biomasse in traditioneller Form, meist ohne vorherige Umwandlung in höherwertige Energieträger, direkt zur Energiegewinnung verwendet. Dort spielen biogene Energieträger momentan durch ihre regionale Verfügbarkeit und den meist im Vergleich zu nichtregenerativen Energieträgern niedrigeren Preis eine wichtige Rolle. Einerseits ist zwar zu vermuten, dass der exzessive Gebrauch von Biomasse in einigen Entwicklungsländern oft nicht nachhaltig und aus Mangel an Alternativen erfolgt. So könnten bei weiterer Entwicklung dieser Länder, analog zum Europa des 19. Jahrhunderts, fossile Energieträger zunehmend Biomasse als Energieträger verdrängen. Andererseits ist auch eine Verknappung fossiler Brennstoffe absehbar und die beschriebene Entwicklung daher nicht zwingend. Heute ist der weltweite Anteil biogener Energieträger am Energiemix trotz Entwicklungsfortschritten in einigen Entwicklungs- und Schwellenländern entgegen der allgemeinen Annahme gleichbleibend oder sogar steigend, (ROSILLO CALLÉ 2009, S. 2). Auch in Industrieländern gewinnt Bioenergie zunehmend wieder an Bedeutung. Bedingt durch die Notwendigkeit, ihren Treibhausgasausstoß zu verringern, setzen viele Industrieländer mehr und mehr auf regenerative Energieträger. Biomassebasierte Energieträger sind die *Alleskönner* unter den regenerativen Energieträgern, da sie sich verstromen, verflüssigen, vergasen und relativ gut speichern lassen. Bioenergie wird als klimaneutral betrachtet, weil bei der Verbrennung von Biomasse entstehender Kohlenstoff zuvor von eben diesen verbrannten Pflanzen der Atmosphäre entzogen wurde. Zudem können biogene Energieträger regional erzeugt werden. Die Verwendung biogener Energieträger hilft daher, die Abhängigkeit von Energieimporten aus Drittländern zu verringern. Viele Industriestaaten streben aufgrund der positiven Eigenschaften biogener Energieträger eine Vergrößerung des Biomasseanteils an ihrem Energiemix an. Beispielsweise hat die deutsche Regierung im Biomasseaktionsplan aus dem Jahr 2010 sich das Ziel gesetzt, den Anteil der Biomasse am Primärenergieverbrauch von 4,9 % im Jahr 2007 auf 11% im Jahr 2020 zu erhöhen (BMU UND BMELV 2010, S. 10). Bereits heute werden 10,4 % des weltweiten Energiebedarfs aus Biomasse gewonnen (SCHEFFRAN UND BENDOR 2009, S. 6).

1.1.2 DAS TERESKENSYNDROM IM OST-PAMIR

Der Energiebedarf der Bewohner des Ost-Pamir wird gegenwärtig hauptsächlich durch das Verbrennen von Zwergsträuchern getrocknetem Viehdung gedeckt. Als holziges Brennmaterial werden zwei Arten von Sträuchern verwendet: *Krascheninnikovia ceratoides* (lokal: *teresken*) und *Artemisia spp.* (lokal: *shyvak*). Diese Zwergsträucher sind sich in ihrer Erscheinung und in ihrem Heizwert sehr ähnlich, *teresken* kommen jedoch eher im östlichen Teil der Region, *shyvak* mehr im westlichen Teil vor. Laut BRECKLE UND WUCHERER (2006, S. 232) stellen die Zwergsträucher im Ost-Pamir nicht nur einen wichtigen Energieträger, sondern auch die Hauptnahrungsquelle für das Nutzvieh dar. Es findet also eine konkurrierende Nutzung der Zwergsträucher einerseits als Brennmaterial und andererseits als Futterquelle statt. Die thermische Nutzung der Zwergsträucher aus der Vergangenheit hat laut BRECKLE UND WUCHERER (2006, S. 232) heute bereits die Tragfähigkeit der nahe an den Siedlungen gelegenen Weiden stark beeinträchtigt. BRECKLE UND WUCHERER (2006, S. 233) bezeichnen die beobachteten Degradationserscheinungen durch die Zwergstrauchentnahme als *Tereskensyndrom*. Sollte das *Tereskensyndrom* in der von BRECKLE UND WUCHERER (2006, S. 232) beschriebenen Weise die Qualität der Weideflächen beeinflussen, wäre zu erwarten, dass dadurch zukünftig der Viehbesatz und damit auch der verfügbare Dung abnehmen. Dies würde den Druck auf die Zwergsträucher als Brennmaterial zusätzlich erhöhen, was schließlich zu einem Zusammenbruch der Energieversorgung führt. KRAUDZUN ET AL. (2014, S. 56) weisen darauf hin, dass der Begriff *Tereskensyndrom* die gegenwärtige Situation im Ost-Pamir möglicherweise nicht adäquat beschreibt. So hat sich der Anteil der Zwergsträucher am lokalen Energiemix in den vergangenen Jahren zugunsten von Dung und Kohle verringert. Zudem kann nicht mit Sicherheit bestätigt werden, dass die von BRECKLE UND WUCHERER (2006, S. 232) beschriebenen Degradationseffekte in dem befürchteten Ausmaß tatsächlich auftreten. Mit einer quantitativen Aussage zur Energiesystementwicklung halten sich jedoch auch KRAUDZUN ET AL. (2014) zurück. Stattdessen wird eine zeitlich und räumlich aufgelöste Betrachtung der Zwergstrauchentnahme, sowie die Untersuchung der Wechselbeziehungen zwischen Beweidung und thermischer Zwergstrauchnutzung gefordert. Weiterhin sollte geklärt werden, welche Rolle Kohleimporte zukünftig im Energiesystem spielen können (KRAUDZUN ET AL. 2014, S. 58).

1.2 ZIELSTELLUNG UND AUFBAU DER ARBEIT

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Simulation von Energiesystemen, welche durch einen hohen Anteil biogener Energieträger charakterisiert sind. Mittels Gegenüberstellung von relevanten Modellierungsansätzen und den speziellen Anforderungen biomassedominiertes Energiesysteme an die Modellierung von Energiesystemen wird zunächst ein geeigneter Modellansatz, der über die Möglichkeiten klassischer Energiesystemmodelle hinaus geht, hergeleitet. Um explizit die Besonderheiten biogener Energieträger abbilden zu können, soll der entwickelte Modellierungsansatz sowohl zeitlich als auch, dort wo dies zielführend ist, räumlich dynamisch sein und Rückkopplungen zwischen Energienutzung und lokalem Ökosystem berücksichtigen. Mit dem entwickelten Ansatz sollen sich sowohl die konkurrierende Nutzung verschiedener biogener Energieträger auf einer begrenzten Fläche untereinander, als auch mit nichtregenerativen, also nicht flächengebundenen, Energieträgern darstellen lassen. Damit eine sowohl zeitlich aufgelöste, als auch räumlich dynamische Modellierung ermöglicht wird, ist es notwendig, systemübergreifend zu arbeiten. Auf diese Weise können die Vorteile von zeitlich dynamischen, aber nicht räumlich aufgelösten Modellen mit denen von räumlich aufgelösten, aber zeitlich statischen Modellen kombiniert werden. Die erstellte Modellierungsmethode fungiert als Werkzeug für die Bildung von nachhaltigen dezentralen Energienutzungskonzepten. Sie ist frei erweiterbar und kann zur Simulation verschiedenartiger biomassedominiertes Energiesysteme verwendet werden.

Der ermittelte Modellierungsansatz findet mit der Betrachtung einer Fallstudie, der im tadschikischen Ost-Pamir gelegenen Ortschaft Alichur, praktische Anwendung. Im Anwendungsprozess wird das Potenzial der hergeleiteten Modellierungsmethode verdeutlicht. Während der Modellentwicklung erfolgt zunächst eine detaillierte, räumlich differenzierte Analyse des im Fallbeispiel betrachteten Energiesystems. Aufbauend auf dieser Analyse werden die wesentlichen Komponenten des Energiesystems und ihre Wirkungsweisen identifiziert, so dass ein relevantes Energiesystemmodell basierend auf der vorher ermittelten Modellierungsmethode erstellt werden kann. Das zu diesem Zweck erstellte Energiemodell soll als *Energiemodell Alichur* bezeichnet werden. Nach der Modellentwicklung erfolgt die Parametrisierung des *Energiemodell Alichur*. Hierfür werden die relevanten Modellparameter hergeleitet. Auf den Schritt der Modellparametrisierung folgt die Modellanalyse, welche sich aus Sensitivitätsanalyse und Kalibrierung, sowie einer Abschätzung der Modell-

unsicherheiten zusammensetzt. Abschließend werden Modellszenarien auf Grundlage der dem Modell zugrunde liegenden Fragestellungen erstellt und im *Energiemodell Alichur* simuliert.

Im *Energiemodell Alichur* sollen nur die für den privaten Konsum relevanten Energieträger betrachtet werden. Diese sind: Zwergsträucher, tierischer Dung und Kohle. In der Ortschaft ist nahezu keine Industrie vorhanden. Wo Energienutzung für gewerbliche Zwecke stattfindet, ist diese sehr kleinmaßstäbig und wird von den Bewohnern selbst nicht vom privaten Energiekonsum differenziert. Ebenfalls soll der Verkehrssektor keine Betrachtung im *Energiemodell Alichur* finden, weil Benzin sich nicht mittelbar durch biogene Energieträger kompensieren lässt. Der Fokus des Modells soll auf der Versorgungsseite liegen, es sollen jedoch auch Rückkopplungen zwischen Energieträgerverfügbarkeit und Energienachfrage betrachtet werden.

1.3 ARBEITSHYPOTHESEN

Die Zielstellung dieser Arbeit lässt sich in zwei Arten von Arbeitshypothesen zusammenfassen: Hypothesen, welche die Methodenentwicklung betreffen und Hypothesen mit Bezug auf das Energiesystem von Alichur. Hypothese 1 und 2 beziehen sich auf die Methodenentwicklung, Hypothese 3 bis 5 auf das Fallbeispiel Alichur.

Hypothese 1) Von biogenen Energieträgern geprägte Energiesysteme lassen sich mit optimierenden Energiesystemmodellen, einem Standardtool der Energiewirtschaft, nicht adäquat abbilden.

Es wird angenommen, dass biogene Energieträger im Vergleich zu nicht-regenerativen Energieträgern durch besondere Eigenschaften charakterisiert sind. Diese Eigenschaften lassen sich nicht adäquat in für die Betrachtung von konventionellen Energieträgern entwickelten Energiesystemmodellen abbilden. Die Arbeiten von SCHRADINGER (2010) und HAUSL UND BIBERACHER (2012) bekräftigen diese Vermutung. Aufbauend auf einer Beschreibung der Besonderheiten biomassedominierter Energieträger soll in dieser Arbeit eine Aufstellung der für die Simulation von biomassedominierten Energiesystemen benötigten Modelleigenschaften erfolgen. Die Untersuchung der Hypothese erfolgt mittels Vergleich der für die Simulation von Biomasse in Energiesystemen benötigten Fähigkeiten mit den Möglichkeiten der optimierenden Energiesystemmodellierungssoftware MESAP PlaNet.

Hypothese 2) Das Energiesystem von Alichur (Tadschikistan) ist geeignet, um die besonderen Anforderungen biomassedominiertes Energiesysteme an Energiesystemmodelle zu verdeutlichen.

Es wird angenommen, dass die isolierte Lage Alichurs ein nahezu autarkes Energiesystem bedingt, welches stark von lokalen regenerativen Energieträgern geprägt ist. Da die Ortschaft Alichur sich in einer Region befindet, die durch eine sehr geringe Biomasseproduktion charakterisiert ist, spielen zudem räumliche Entfernungen eine große Rolle. Im Energiesystem von Alichur treten somit die für biogene Energieträger charakteristischen Eigenschaften besonders hervor. Eine modellgestützte Analyse des Energiesystems soll zeigen, welche Rolle biogene Energieträger und deren räumliche Verteilung im Energiesystem von Alichur spielen, um diese These zu bearbeiten.

Hypothese 3) Die Energienutzung in Alichur erfolgt nicht nachhaltig und ist Teil des *Tereskensyndroms*. Der Energiebedarf der Bevölkerung von Alichur wird daher zukünftig ohne Optimierung oder externe Subventionen nicht mehr befriedigt werden können.

Die Übernutzung der Zwergstrauchbestände (insbesondere von *Krascheninnikovia ceratoides*, *teresken*) im Pamir als Folge von ausbleibenden Energieimporten seit dem Zerfall der Sowjetunion wird von BRECKLE UND WUCHERER (2006, S. 232) mit Hilfe des Begriffs *Tereskensyndrom* beschreiben. In einer Reihe von Arbeiten wird ein teils dramatisches Bild der Degradation von übernutzten Zwergstrauchflächen gezeichnet (vgl. BREU 2006, DOMEISEN 2003, DROUX UND HOECK 2004, HURNI, ET AL. 2004). Durch die Entnahme von Zwergsträuchern werden diese immer seltener und schwerer zu erreichen. Im Vergleich zur Nutzung findet kein nennenswerter Zuwachs statt. Als Konsequenz werden Zwergsträucher zukünftig als Energieträger ausfallen. Da sie nicht durch andere lokale Energieträger kompensiert werden können, kann dann der Energiebedarf der Bevölkerung von Alichur nicht mehr gedeckt werden. Zur Klärung der Hypothese ist die Erstellung eines Energiemodells der Ortschaft Alichur notwendig. Als Szenario *Business-as-usual* (BAU) kann die Hypothese in diesem Energiesystemmodell überprüft werden.

Hypothese 4) Das Energiesystem von Alichur ist durch eine selbstverstärkende Wirkungskette bedroht: Durch eine Übernutzung der Zwergsträucher wird dem Weidevieh eine wichtige Futterquelle entzogen, wodurch sich der Anteil des Energieträgers Dung am Energiemix verringert. Es werden zunehmend mehr Zwergsträucher benötigt, um diesen Ausfall zu kompensieren.

BRECKLE UND WUCHERER (2006, S. 232) stellen fest, dass *teresken* im Ost-Pamir nicht nur als Energiequelle zum Heizen und Kochen Verwendung findet, sondern vielmehr gleichzeitig auch die Hauptnahrungsquelle für das Weidevieh darstellt. Die außerordentliche Bedeutung der Zwergsträucher für die lokale Viehwirtschaft wird in KREUTZMANN (2009, S. 7) zusätzlich mit der Aussage, Zwergsträucher hätten das ganze Jahr über einen hohen Proteingehalt und seien im Winter im Gegensatz zu Gräsern auch unter einer dünnen Schneedecke vom Weidevieh noch erreichbar, bekräftigt. Es scheint daher, als gäbe es einen direkten Zusammenhang zwischen dem Bestand an Zwergsträuchern und dem Viehbesatz bzw. der Dungproduktion im Ost-Pamir, welcher folgerichtig bei Übernutzung der Zwergstrauchbestände zu jener in dieser Hypothese beschriebenen Wirkungskette führen muss. Zur Überprüfung der Hypothese gilt es zunächst zu kontrollieren, ob der von BRECKLE UND WUCHERER (2006, S. 232) und KREUTZMANN (2009, S. 7) beschriebene Zusammenhang im untersuchten Energiesystem bestätigt werden kann. Wird der erwartete Zusammenhang bekräftigt, muss dieser in das *Energiemodell Alichur* integriert werden. Die Simulation eines Szenarios *Breckle* (SB) im *Energiemodell Alichur* soll schließlich klären, ob das aktuelle Ausmaß der Zwergstrauchernte den Viehbesatz gegenwärtig oder in absehbarer Zeit gefährdet.

Hypothese 5) Es ist möglich, durch Optimierung der gegenwärtigen Nutzungsmuster den aktuellen Energiebedarf der Bevölkerung von Alichur nachhaltig auf der zur Verfügung stehenden Fläche nur aus Biomasse (Dung und Zwergsträucher) zu befriedigen.

Dieser Hypothese zugrunde liegt die Annahme, dass die Nutzungsweise der lokalen regenerativen Energieträger gegenwärtig nicht optimal erfolgt. Dieser Aspekt wurde in der Fachliteratur bisher nicht oder nur ansatzweise diskutiert. KRAUDZUN ET AL. (2014, S. 56) schreiben, dass seit Beginn der 1990er Jahre der Anteil der Zwergsträucher am Energiemix im Ost-Pamir unter anderem aufgrund eines zunehmenden

Anteils von Dung zurückgegangen ist. Zusätzlich ist jedoch auch denkbar, dass die Ernteweise der Zwergsträucher nicht am Zuwachsoptimum dieser Pflanzenart erfolgt und, dass durch ein verbessertes Erntemanagement ein höherer Zuwachs erzielt werden könnte. Wie hoch insgesamt das Optimierungspotenzial liegt und ob es ausreichend ist, um den Energiebedarf der Ortschaft Alichur autark zu befriedigen, soll die Simulation eines Szenarios *Optimierung und Energieautarkie* (SOE) im *Energiemodell Alichur* zeigen.

Zur Bearbeitung der sich auf das Fallbeispiel Alichur beziehenden Hypothesen 3 bis 5 ist ein grundlegendes Verständnis des betrachteten Energiesystems notwendig. Energiesysteme sind in der Regel äußerst komplex. Aufgrund ihrer Komplexität lassen sie sich nur mit Hilfe von Modellen analysieren. Die aufgestellten Hypothesen 3 bis 5 lassen sich daher nur mit einem geeigneten Energiesystemmodell bearbeiten.

2 METHODEN DER SIMULATION VON ENERGIESYSTEMEN

Im ersten Teil dieses Kapitels (2.1) wird kurz das Konzept der Systemanalyse vorgestellt und in diesem Zusammenhang eine Beschreibung der Begriffe *Energiesystem* und *Energiesystemanalyse* gegeben. Teilkapitel 2.2 nennt und erläutert im Kontext dieser Arbeit relevante Kriterien für die Klassifikation von Ansätzen zur Energiesystemmodellierung. In Teilkapitel 2.3 werden die spezifischen Ansprüche, welche eine Analyse biomassedominierten Energiesysteme an die Wahl eines Modellierungsansatzes stellen, herausgearbeitet. Dazu werden die in Teilkapitel 2.2 besprochenen Kriterien verwendet. Fünf verschiedene Simulationsmethoden werden mit ihren Stärken und Schwächen in Teilkapitel 2.4 vorgestellt. Abschließend wird in Teilkapitel 2.5 die Wahl eines zur Analyse biomassedominierten Energiesysteme geeigneten Modellierungsansatzes durch Vergleich der Modellansprüche aus Teilkapitel 2.3 mit den in Teilkapitel 2.4 beschriebenen Ansätzen begründet.

2.1 SYSTEMANALYSE UND ENERGIESYSTEME

Der Begriff *Energiesystem* ist eine Spezifizierung des Begriffs *System*. Energiesysteme sind daher Systeme, die mit Hilfe der Systemanalyse untersucht werden können. Im Folgenden werden das Konzept der Systemanalyse beschrieben und mit diesem im Zusammenhang stehende Begriffe definiert. Anschließend wird der Begriff *Energiesystem* in Teilkapitel 2.1.2 näher erläutert.

2.1.1 SYSTEMANALYSE

Die Systemanalyse baut auf dem Konzept der Systemtheorie auf. Sie ist eine ganzheitliche Betrachtungsweise, welche 1945 als Reaktion auf die isolierte Betrachtungsweise der Fachwissenschaften gebildet wurde (FREY 2006, S. 11). Ziel der Systemanalyse ist die Ermittlung von Eingangs-Ausgangs-Beziehungen (VARJÚ 1977, S. 4). Die Systemanalyse versteht die Welt als komplexes System, welches sich analysieren lässt, indem es in Teilsysteme unterteilt wird. Resultierende Teilsysteme können ihrerseits auf mehreren Ebenen in weitere Subsysteme untergliedert werden. Am Ende dieser Kette stehen analysierbare Teilsysteme, die sich auf einen speziellen Aspekt des komplexen Systems *Welt* beschränken. Eine Beschreibung dieser Systeme mit Methoden der Mathematik macht sie quantifizierbar. Die Systemanalyse handelt somit „[...] von der Beschreibung von (Teil-) Systemen unserer Welt mit den Mitteln der Mathematik“ (IMBODEN ET AL. 2003, S. 3). Systeme werden in der Systemanalyse durch Modelle abgebildet. Im Folgenden werden die Begriffe *System* und

Modell näher erläutert. Des Weiteren wird auf den Prozess der Modellbildung eingegangen.

System

VARJÚ (1977, S. 1) definiert *System* als „die Gesamtheit von solchen Teilen, die zueinander, zum Ganzen und in der Regel auch zur Umwelt in irgendeiner Beziehung stehen, aufeinander wirken und sich gegenseitig beeinflussen“. Von besonderer Bedeutung ist die Bedingung einer Beziehung zwischen den Systemkomponenten. Eine bloße Ansammlung von Teilen ist nicht als System zu bezeichnen, solange zwischen den Teilen keine Beziehungen bestehen. IMBODEN ET AL. (2003, S. 5) nennen die Beziehungen zwischen Systemkomponenten *innere Relation* und die Beziehungen zwischen Systemkomponenten und ihrer Umwelt *äußere Relation*. Durch seine innere und äußere Relation ist ein System mehr als die Summe seiner Teile. Die Systemgrenze grenzt das System von seiner Umwelt ab. Äußere Relationen wirken von der Systemumgebung auf das System. Ein System wirkt jedoch nicht auf seine Umgebung, weil diese im Vergleich zum System unendlich groß oder unendlich robust ist (IMBODEN ET AL. 2003, S. 5–6). Die Wahl der Systemgrenze ist zum Teil subjektiv und hängt von der betrachteten Fragestellung ab.

Modell

Im Zentrum der Systemanalyse steht das Prinzip, vereinfachte Bilder von komplexen Systemen zu konstruieren. Diese vereinfachten Bilder werden *Modelle* genannt (IMBODEN ET AL. 2003, S. 3–4). Nach STACHOWIAK (1973, S. 131–133) besitzen Modelle die Merkmale *Abbildung*, *Verkürzung* und *Pragmatismus*. Ein Modell ist stets eine Abbildung eines Originals, d.h. es repräsentiert ein natürliches oder künstliches Original. Die Darstellung im Modell ist im Vergleich zum Original verkürzt. Verkürzung ist notwendig, um ein Modell analysierbar zu machen. Durch Verkürzung finden im Modell nur die für den Modellzweck relevanten Attribute des durch sie repräsentierten Originals Beachtung. Bedingt durch die Verkürzung sind Modelle nur eingeschränkt gültig. Sie erfüllen ihre Funktion lediglich für bestimmte Subjekte, innerhalb definierter Zeitintervalle und für einen bestimmten Zweck. Diese Einschränkung wird als *Pragmatismus* bezeichnet. Von Bedeutung ist also nicht nur, was ein Modell abbildet, sondern auch für wen, wann und wozu es dies tut (STACHOWIAK 1973, S. 133). Je nach Betrachtungsweise und Fragestellung kann es für ein System unendlich viele mögliche Modelle geben. IMBODEN ET AL. (2003, S. 7) bezeichnen Modelle als

„die Brille, durch die das System betrachtet wird, damit wir uns in der realen Welt besser zurecht finden“. Mathematische Modelle beschreiben die Wechselwirkungen zwischen den Systemvariablen und der Systemumgebung auf der Basis von mathematischen Gleichungen. In der Konsequenz wird das beschriebene System mathematisch berechenbar.

Modellbildung

Modellbildung ist ein Prozess (THULKE ET AL. 1999, S. 197). GRIMM UND RAILSBACK (2005, S. 27–37) gliedern den Prozess der Modellbildung in die sechs Schritte: *Problemformulierung*, *Hypothesenformulierung*, *Wahl der Modellstruktur*, *Modellimplementierung*, *Modellanalyse* und *Modellkommunikation*. Ähnliche Gliederungen werden auch von anderen Autoren verwendet (z.B. KÜLL UND STÄHLY 1999, S. 6–7). Die Modellierung erfolgt nicht streng als sequenzieller Ablauf der genannten Schritte, sondern als teilweise parallele und überlappende Abfolge (KÜLL UND STÄHLY 1999, S. 6). Zudem sind Rückkopplungen zwischen den einzelnen Modellbildungsschritten zu beachten. Aufgrund der zahlreichen Rückkopplungen im Prozess der Modellbildung sprechen GRIMM UND RAILSBACK (2005, S. 27) von einem *Modellierungszyklus*. Der Modellierungszyklus nach GRIMM UND RAILSBACK (2005, S. 27–37) ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Seine sechs Phasen werden im Folgenden kurz erläutert.

a) Problemformulierung

Da Modelle nach STACHOWIAK (1973, S. 131–133) eine verkürzte Abbildung der Realität darstellen, bilden sie nicht alle Aspekte dieser ab. Die Formulierung einer möglichst konkreten Forschungsfrage bzw. eines konkreten Modellzwecks hilft bei der Entscheidung, welche Teile der Realität in einem zu erstellenden Modell enthalten sein sollen. Ist der Zweck eines zu erstellenden Modells nicht eindeutig geklärt, müssen in Modellen komplexer Systeme zu viele Größen betrachtet werden, so dass konkrete Modellaussagen nicht möglich sind.

b) Hypothesenformulierung

Bereits vor der Modellierung sollte der Modelleur über ein gewisses Verständnis des zu beschreibenden Systems verfügen. Dieses Vorwissen wird als konzeptionelles Modell bezeichnet. Es fußt zum einen auf den Erfahrungen, die der Modelleur in der Vergangenheit mit dem zu beschreibenden System gemacht hat, und zum anderen auf der Theorie, die er über dieses entwickelt hat. Mit Hilfe seines konzeptionellen

Modells kann der Modelleur Hypothesen aufstellen. Hypothesen sind mögliche Antworten auf die im ersten Schritt des Modellierungszyklusses gestellten Forschungsfragen. Während der Formulierung von Hypothesen kann sich herausstellen, dass die erste Problemformulierung abgeändert werden muss. In diesem Fall müssen die beiden Modellierungsschritte wiederholt werden, bevor zum nächsten Schritt übergegangen werden kann.

c) Wahl der Modellstruktur

Um die Arbeitshypothesen zu quantifizieren, müssen sie auf eine Modellstruktur übertragen werden. Hierzu sollen zunächst die Modellvariablen, die sie beeinflussenden Prozesse und die Modellparameter identifiziert und beschrieben werden. Die Erstellung eines Kausaldiagramms (Siehe Teilkapitel 2.4.5) kann hilfreich sein, um sich die Zusammenhänge in einem System graphisch zu verdeutlichen. Eine Schwierigkeit bei der Wahl der Modellstruktur liegt in der Beschränkung auf möglichst wenige Modellvariablen. Jede zusätzliche Variable bedeutet einen zusätzlichen Aufwand bei der Entwicklung, Parametrisierung, Implementierung, Analyse und die Kommunizierbarkeit eines Modells. Teil der Modellstruktur sind auch die räumliche und die zeitliche Modellauflösung. Die zeitliche Modellauflösung setzt sich zusammen aus Zeitschritt und Zeitspanne, die räumliche aus Rastergröße und betrachtetem Raum. Am Ende dieses Schrittes ist es möglich, dass sich die Forschungsfrage oder die Arbeitshypothesen als nicht zielführend herausstellen und Phasen a und b wiederholt werden müssen.

d) Modellimplementierung

Steht das Modelldesign, muss eine Software für die Modellimplementierung gefunden werden. Die Wahl der Software sollte sich an den Ansprüchen der Modellstruktur orientieren. Sobald eine passende Software gefunden wurde, kann mit der Übertragung der Modellstruktur in das Computerprogramm begonnen werden. Als erster Schritt wird hier ein Nullmodell, das heißt ein extrem vereinfachtes Modell des abzubildenden Systems, entworfen. Das Nullmodell dient dazu, den Modellierungszyklus in Gang zu bringen. Durch stetiges Wiederholen von Modellentwurf und Modellanalyse (Phase e) entsteht ein zunehmend komplexeres Modell, das den Modellansprüchen immer besser gerecht wird. Teil der Modellimplementierung ist auch die Parametrisierung der Modellvariablen und -parameter.

e) Modellanalyse

Ziel der Modellanalyse ist die Verbesserung des erstellten Modells. Für die Modellanalyse wird dazu das Verhalten verschiedener Modellversionen mit dem Verhalten des realen Systems verglichen und bewertet. Modellverbesserungen können beispielsweise durch das Weglassen von für die Forschungsfrage irrelevanter Komponenten, sowie durch eine Anpassung der Modellauflösung oder der Modellstruktur erreicht werden. Der beschriebene Verbesserungsbedarf kann eine Wiederholung der bereits genannten Arbeitsphasen a bis d erfordern. Der Modellierungszyklus endet sobald ein Modell konkrete und belastbare Antworten auf die anfänglich gestellte Forschungsfrage gibt.

f) Modellkommunikation

Der letzte und nicht zu unterschätzende Teil der Modellbildung ist die Modellkommunikation. Die Modellergebnisse und das Modell selbst müssen von den Modellnutzern verstanden und angenommen werden. Hierfür kann es notwendig sein, die Modellstruktur noch einmal zu vereinfachen. Erst wenn die Modellkommunikation erfolgreich ist, wird der Modellbildungsprozess beendet.

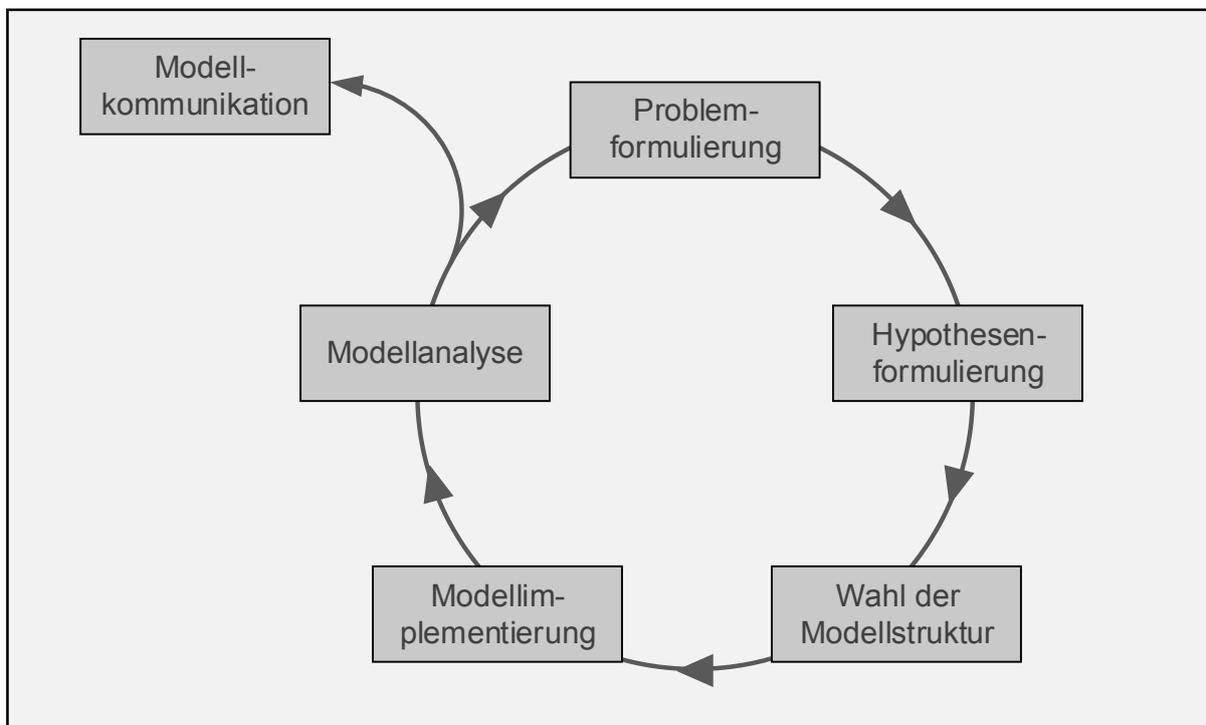


Abbildung 2-1: Schritte der Modellbildung nach GRIMM UND RAILSBACK (2005, S. 37), verändert.

2.1.2 ENERGIESYSTEMANALYSE

Nach MÖST UND FICHTNER (2009, S. 11) soll die Energiesystemanalyse „*helfen Entscheidungen in Energiepolitik und Energieforschung im Hinblick auf Technologien und Infrastrukturen für Energiebereitstellung und Energieumwandlung wissenschaftlich und systematisch zu unterstützen*“. Mit Hilfe von Modellen lassen sich komplexe Energiesysteme analysieren. Der zweite Report des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) zum Stand des Klimawandels enthält eine wissenschaftliche Einführung des Energieökonomen Prof. Dr. Dr.h.c. Nebojsa Nakicenovic zum Thema *Energie* und den damit verbundenen Fachbegriffen (WATSON ET AL. 1996). Nach Nakicenovic besteht ein Energiesystem aus den zwei Teilen Energieversorgung und Energienachfrage (WATSON ET AL. 1996, S. 77). Der Energieversorgungsteil eines Energiesystems setzt sich zusammen aus einer Kette komplexer Prozesse vom Rohstoffabbau über die Umwandlung von Primärenergieträgern in leichter handhabbare Sekundärenergieträger bis hin zur Verteilung der Energie an die Orte, an denen ein Energiebedarf besteht. Die Energieversorgungskette mündet in der Bereitstellung von Energiedienstleistungen wie Licht, Wärme oder Bewegung. Da Energieflüsse und die treibenden Faktoren auf der Nachfrageseite eng miteinander verknüpft sind, müssen beide Seiten eines Energiesystems betrachtet werden (GARGIULO 2009, S. 108). Das schematische Diagramm in Abbildung 2-2 bildet Nakicenovics Verständnis des Begriffs *Energiesystem* ab und gibt Beispiele für verschiedene Energieträger und Energiedienstleistungen. Dieser Beschreibung folgend ist ein Energiesystem ein technisch-ökonomisches System bestehend aus einer gerichteten Aneinanderkettung von Gütern und Prozessen, die nacheinander durchlaufen werden. MÖST UND FICHTNER (2009, S. 18) fassen den Begriff *Energiesystem* weiter als Nakicenovic. Sie schreiben, dass der Begriff *Energiesystem*, abhängig von der betrachteten Fragestellung über den rein technischen Aspekt hinaus vielfältige Faktoren und Rahmenbedingungen beinhaltet (MÖST UND FICHTNER 2009, S. 11). So können beispielsweise auch der demographische Wandel in einer betrachteten Region oder politische, soziale- und ökonomische Faktoren eine Rolle im betrachteten Energiesystem spielen. Für die Energiesystemanalyse kann es folglich bedeutend sein auch diese Größen als Teil des Energiesystems und nicht lediglich als exogene Faktoren zu berücksichtigen.

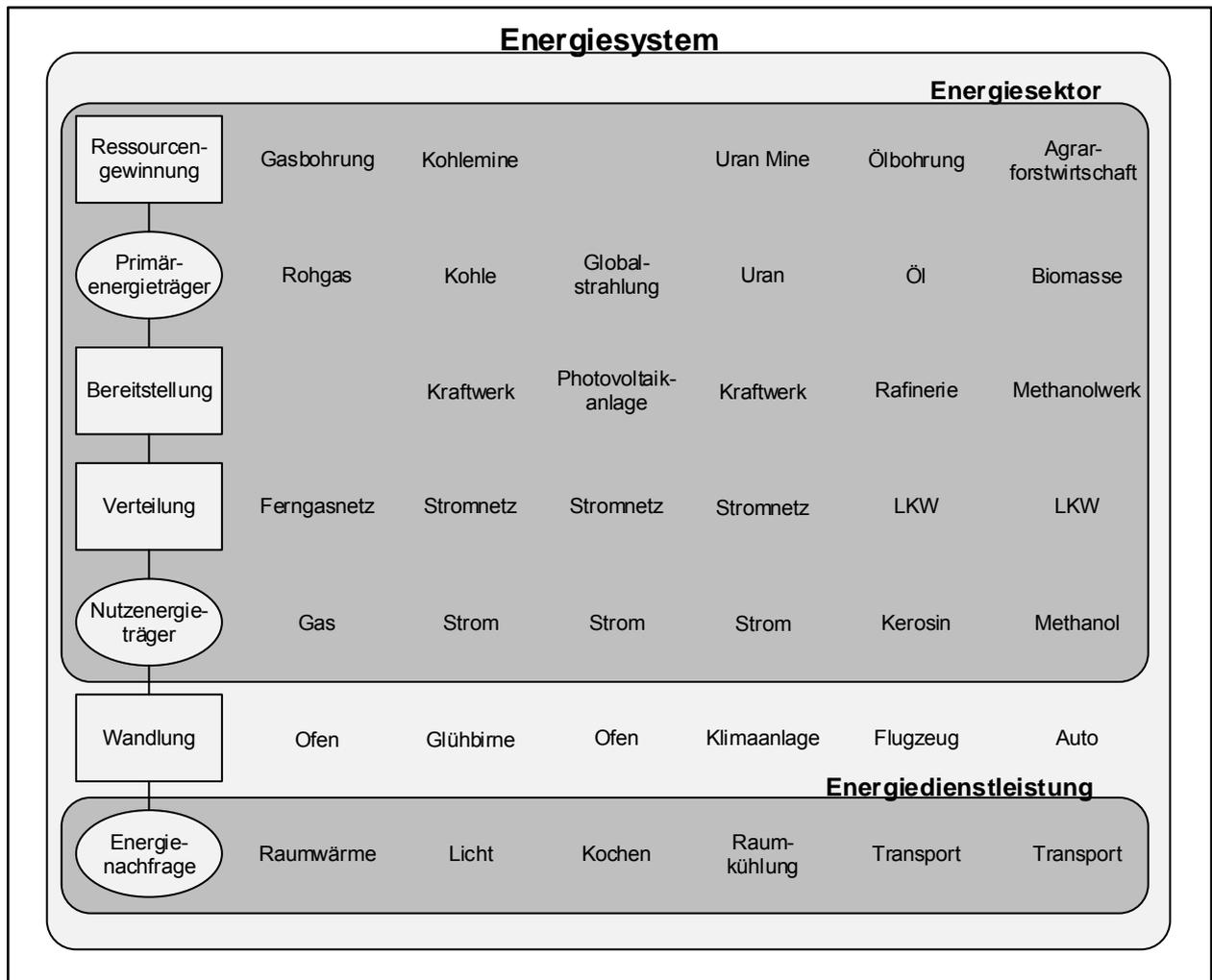


Abbildung 2-2: Energiesystem als Aneinanderkettung von Prozessen und Gütern nach Nakicenovic, schematisches Diagramm mit Beispielen. Quelle: WATSON ET AL. (1996, S. 77), verändert.

Nach ihrem Betrachtungshorizont werden Modelle zur Analyse von Energiesystemen in Modelle mit kurzfristigem, mittelfristigem und langfristigem Betrachtungszeitraum klassifiziert (MÖST UND FICHTNER 2009, S. 15). Langfristige Modelle zur Analyse von Energiesystemen bilden einen Zeitraum von bis zu 50 Jahren ab. Sie eignen sich zur Analyse der Auswirkungen von Energie- und Umweltpolitik auf ein betrachtetes Energiesystem (MÖST UND FICHTNER 2009, S. 16). Da die langfristige Entwicklung von Energiesystemen im Fokus dieser Arbeit steht, werden hier nur langfristige Modelle zur Analyse von Energiesystemen betrachtet. MÖST UND FICHTNER (2009, S. 15–23) teilen Modelle zur Analyse von Energiesystemen weiter grob in Simulationsmodelle und optimierende Energiesystemmodelle ein. Neben diesen zwei Hauptklassen beschreiben sie noch eine Gruppe mit weiteren Ansätzen, die sich unter bestimmten Voraussetzungen zur Analyse von Energiesystemen eignen. Hier sind beispielsweise Geoinformationssysteme (GIS) (vgl. BILL 2010a) zur Auswertung von raumbezogenen Daten, die Methode der Ökobilanzierung (vgl. WÖRNER UND DOLL 1996) zur Ab-

schätzung der Folgen unternehmerischen Handelns und das Verfahren der Pinch-Analyse (vgl. RADGEN 1996) zur Minimierung von Wärmeenergieverlusten genannt. Optimierende Energiesystemmodelle sind ein Standardwerkzeug der Energiesystemanalyse (MÖST UND FICHTNER 2009, S. 19). Sie repräsentieren eine technische Abbildung des Energiesektors, wie sie Nakicenovic in seiner Beschreibung des Begriffs *Energiesystem* darstellt. Beruhend auf dem Ansatz der linearen Programmierung handelt es sich bei optimierenden Energiesystemmodellen um Energie- und Stoffflussmodelle, die einen Energiesektor von der Primärenergie bis zur Energiedienstleistung als gerichteten Graphen nachbilden (MÖST UND FICHTNER 2009, S. 19). Ziel der optimierenden Energiesystemmodelle ist „*die Ermittlung eines unter gegebenen Rahmendbedingungen optimalen Versorgungssystems*“ (MÖST UND FICHTNER 2009, S. 20). Als Partialmodelle beinhalten optimierende Energiesystemmodelle nur einen Teil der auf das Energiesystemmodell wirkenden Faktoren innerhalb ihrer Systemgrenzen. Beispiele für optimierende Energiesystemmodelle sind MESAP PlaNet (SCHLENZIG 1998), LEAP (HEAPS 2012) und EFOM (VOORT 1985). Die zweite Hauptklasse zur Analyse von Energiesystemen bilden nach MÖST UND FICHTNER (2009, S. 20) die Simulationsmodelle. Diese stellen die Auswirkungen vorgegebener Handlungsoptionen in den Vordergrund der Energiesystembetrachtung. Es findet primär keine Systemoptimierung sondern vielmehr eine Marktsimulation statt (MÖST UND FICHTNER 2009, S. 22). Simulationsmodelle sind leicht erweiterbar. Bei Bedarf können zusätzlich zu den technischen Komponenten weitere auf ein Energiesystem wirkende Mechanismen innerhalb der Modellgrenzen betrachtet werden. Dem Ansatz der Simulationsmodelle können System Dynamics Modelle (FORRESTER 1961), Agentenbasierte Modelle (vgl. RAILSBACK UND GRIMM 2012) oder die Simulation mittels zellulärer Automaten (vgl. MAINZER UND CHUA 2012) zugeordnet werden. Abbildung 2-3 gibt eine Übersicht über die Klassifizierung von Modellen zur Analyse von Energiesystemen nach MÖST UND FICHTNER (2009, S. 15–23) mit zugehörigen Modellierungsansätzen bzw. Softwarepaketen.

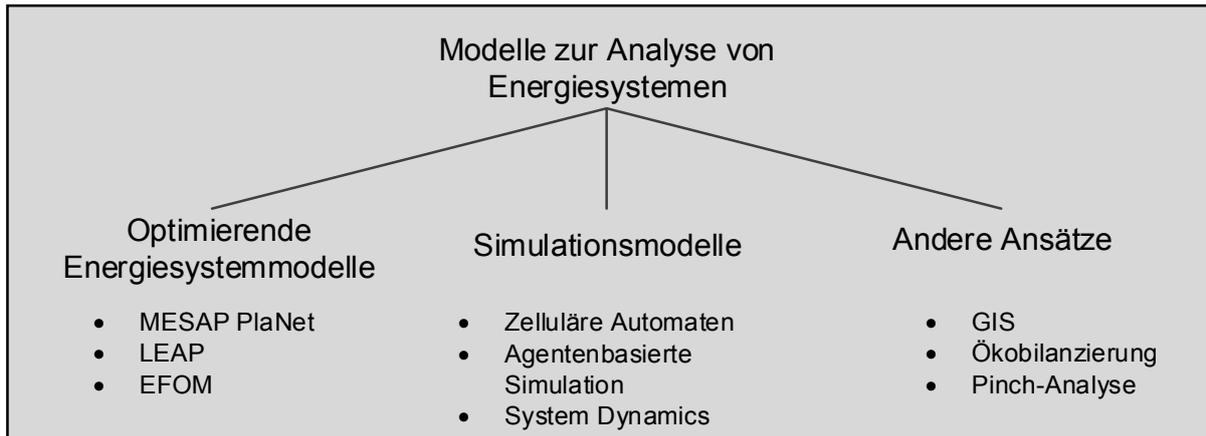


Abbildung 2-3: Klassifizierung von Modellen zur Analyse von Energiesystemen nach MÖST UND FICHTNER (2009, S. 15–23) mit Beispielen. Eigene Darstellung.

2.2 KRITERIEN FÜR DIE KLASSIFIKATION VON MODELLEN ZUR ANALYSE VON ENERGIESYSTEMEN

Die von MÖST UND FICHTNER (2009, S. 15–23) vorgeschlagene Einteilung von Modellen zur Analyse von Energiesystemen in optimierende Energiesystemmodelle, Simulationsmodelle und andere Modellierungsansätze ist nur eine von vielfältigen Möglichkeiten zur Klassifikation dieser. Weitere Möglichkeiten hierzu beschreiben KÜLL UND STÄHLY (1999), VENTOSA ET AL. (2005), VOINOV (2008) und ZHANG UND FOLMER (1998). Es gilt jedoch zu beachten, dass eine allgemeingültige und erschöpfende Klassifikation von Modellen weder möglich noch zielführend ist. Dies ist zum einen durch die vielfältig vorhandenen methodischen Ansätze und zahlreichen Mischformen bedingt. Zum anderen ist es zweckmäßig, Modelle zur Analyse von Energiesystemen im Hinblick auf ihren Modellierungszweck zu kategorisieren. Im Zuge dieser Arbeit wurden für die Wahl eines Modellierungsansatzes unter Berücksichtigung der gegebenen Fragestellungen folgende Kriterien als relevant für einen Vergleich verschiedener Modellierungsansätze eingeschätzt: *Änderungsverhalten der Modellvariablen und zeitliche Kontinuität, Raumbezug und räumliche Kontinuität, Art der betrachteten Gleichungen und Gleichungssysteme, sowie Modellstruktur.* Diese werden im Folgenden näher erläutert.

2.2.1 ÄNDERUNGSVERHALTEN UND ZEITLICHE KONTINUITÄT

Mathematische Modelle können nach dem Änderungsverhalten ihrer Modellvariablen unterschieden werden in statische und dynamische Modelle. Wird einer äußeren Relation ein genau definierter Wert der simulierten Systemvariablen zugeordnet, so wird das betrachtete Modell als statisch bezeichnet (IMBODEN ET AL. 2003, S. 18). Statische Modelle können keine zeitliche Veränderung beschreiben. VARJÚ (1977, S. 5)

nennt statische Systeme daher *gedächtnislos*. Ein klassisches Beispiel für ein statisches Modell ist eine Landkarte. Dynamische Modelle beschreiben zeitabhängige Antworten auf Veränderungen der äußeren Relation. Sie besitzen Speicherelemente, wodurch eine Systemreaktion nicht mehr nur von der gegenwärtigen äußeren Relation abhängt. Vielmehr spielt auch der Systemzustand zum Zeitpunkt des Einflusses eine Rolle für die Systemreaktion (VARJÚ 1977, S. 5). Dynamische Modelle reagieren somit nicht augenblicklich auf äußere Relationen, sondern passen sich allmählich dem neuen Systemzustand an (IMBODEN ET AL. 2003, S. 23). Dynamische Modelle werden zusätzlich unterschieden in kontinuierliche und diskrete dynamische Modelle. Kontinuierliche dynamische Modelle beschreiben die zeitliche Veränderung von Systemvariablen als Ableitung der Systemvariablen nach der Zeit, also kontinuierlich mittels Differenzialgleichungen. Diskrete dynamische Modelle hingegen beschreiben die zeitliche Veränderung von Systemvariablen mit Hilfe von Differenzgleichungen, also diskontinuierlich oder schrittweise.

Dynamische Modelle eignen sich besonders für die Simulation von in Umweltsystemen ablaufenden Prozessen. Veränderungen in Umweltsystemen finden nahezu immer als Entwicklungsprozess statt. Kontinuierliche Modelle bilden Veränderungen in Umweltsystemen ohne Sprünge ab, was oft den Eigenschaften natürlicher Prozesse entspricht. Werden kurze Zeiträume und einzelne Individuen betrachtet, finden zwar nicht alle Prozesse in Umweltsystemen kontinuierlich statt, stehen lange Zeiträume und große Mengen im Fokus der Modellierung, eignet sich jedoch auch dort eine kontinuierliche Betrachtungsweise besser als eine diskrete.

2.2.2 RAUMBEZUG UND RÄUMLICHE KONTINUITÄT

Wird angenommen, dass sich Systemvariablen in einem Modell lediglich abhängig von der Zeit, nicht aber vom Raum ändern, so wird von einem *Boxmodell* oder einem nicht räumlich aufgelösten Modell gesprochen (IMBODEN ET AL. 2003, S. 27). Boxmodelle gehen von völliger Homogenität im Raum aus. Es wird entweder ein spezifischer Punkt im Raum betrachtet, oder mit Flächendurchschnittswerten gerechnet (VOINOV 2008, S. 23). Boxmodelle sind für die Simulation geeignet, wenn der simulierte Raum entweder sehr homogen ist oder die räumliche Verteilung der simulierten Variablen für den Modellzweck keine Rolle spielt. Modelle, in denen räumliche Heterogenität angenommen wird, d.h. bei denen mindestens eine Modellvariable abhängig sowohl von der Zeit, als auch von ihrem Ort ist, werden als dynamische räumlich

aufgelöste Modelle bezeichnet. Räumlich aufgelöste Modelle betrachten den Raum kontinuierlich oder diskret, analog der Betrachtungsweise von zeitlicher Kontinuität bei dynamischen Modellen. Bei einer diskreten Betrachtungsweise wird der Raum in voneinander abgegrenzte gleichförmige Elemente zerteilt (tesselliert). Die kontinuierliche Betrachtungsweise beschreibt den Raum mit Hilfe von Differenzialgleichungen oder partiellen Differenzialgleichungen (VOINOV 2008, S. 24). Eine räumlich aufgelöste Betrachtungsweise empfiehlt sich dann für die Modellierung, wenn Variablen oder Prozesse im Modell stark durch räumliche Heterogenität beeinflusst werden und diese Effekte entscheidend für das Modellierungsziel sind.

2.2.3 LÖSUNGSANSATZ DER MODELLGLEICHUNGEN

Dynamische, zeitlich kontinuierliche Modelle beruhen, wie weiter oben beschrieben, auf Differenzialgleichungen. Die am einfachsten zu analysierende Klasse dieser Modelle bilden die linearen dynamischen Systeme (WUNSCH 1986, S. 15). Ein System ist dann linear, wenn es dem Superpositionsprinzip entspricht (VARJÚ 1977, S. 7). Superposition bedeutet, dass die Magnitude der Eingangsgröße proportional zur Magnitude der Ausgabegröße des Systems ist (Proportionalität) und das System simultane Eingangsgrößen voneinander unabhängig behandelt, diese somit nicht innerhalb des Systems interagieren (Additivität). Die Bedingungen für Linearität implizieren, dass ein lineares System kein Systemverhalten produzieren kann, welches nicht schon in der äußeren Relation vorhanden ist. Lineare Systeme werden durch lineare Differenzialgleichungen beschrieben. Lineare Differenzialgleichungen besitzen analytische Lösungen und lassen sich beliebig kombinieren, um komplizierte Modelle zu konstruieren (IMBODEN ET AL. 2003, S. 43). Ökologische Systeme sind charakterisiert durch Nichtlinearität (COSTANZA UND VOINOV 2004, S. 7). Nichtlinearität in Differenzialgleichungen erlaubt Rückkopplungen innerhalb eines betrachteten Systems (FORRESTER 1969, S. 108). Kontinuierliche nichtlineare Systeme werden durch nichtlineare Differenzialgleichungen beschrieben. Diese lassen sich nur in Spezialfällen analytisch lösen (IMBODEN ET AL. 2003, S. 127). Sie können jedoch oft stückweise durch analytisch lösbare lineare Modelle angenähert werden (IMBODEN ET AL. 2003, S. 43). Lineare Annäherungen können den Charakter nichtlinearer Systeme allerdings nur innerhalb eines sehr beschränkten Variationsbereichs der Systemvariablen abbilden. Abbildung 2-4 zeigt beispielhaft die stückweise Linearisierung eines nichtlinearen Prozesses. In der Regel werden nichtlineare Differenzialgleichungen numerisch gelöst. FORRESTER (1969, S. 108) stellt fest, dass sich Nicht-

linearität einfach beherrschen lässt, wenn man sich vom Gedanken einer eleganten analytischen Lösung verabschiedet.

Hinsichtlich der Lösungsansätze von Gleichungssystemen werden im Folgenden zwei Modelltypen unterschieden: 1. Modelle, welche die zugrunde liegenden Modellgleichungen analytisch lösen. Hier ist eine Betrachtung von nichtlinearen Gleichungen nicht möglich, weil analytische Lösungen für diese nicht gefunden werden können. Zur Betrachtung von nichtlinearen Zusammenhängen in solchen Modellen müssen diese zunächst linearisiert werden. Die Abbildung des betrachteten Systems besitzt dann jedoch nur in einem eng begrenzten Bereich, in dem die Linearisierung einen geringen Fehler aufweist, Gültigkeit und die Betrachtung von Rückkopplungen im System ist nicht möglich. 2. Modelle, die Modellgleichungen numerisch, also schrittweise lösen. Eine numerische Lösung ist, je nach Größe der betrachteten Zeitschritte, mit Ungenauigkeiten behaftet. Numerische Lösungen können dafür aber auch ohne Probleme für nichtlineare Gleichungen gefunden werden. Modelle, die Nichtlinearität numerisch lösen, geben somit bei ausreichend klein gewählten Zeitschritten annähernd genaue Lösungen und erlauben die Abbildung von Rückkopplungen in Systemen.

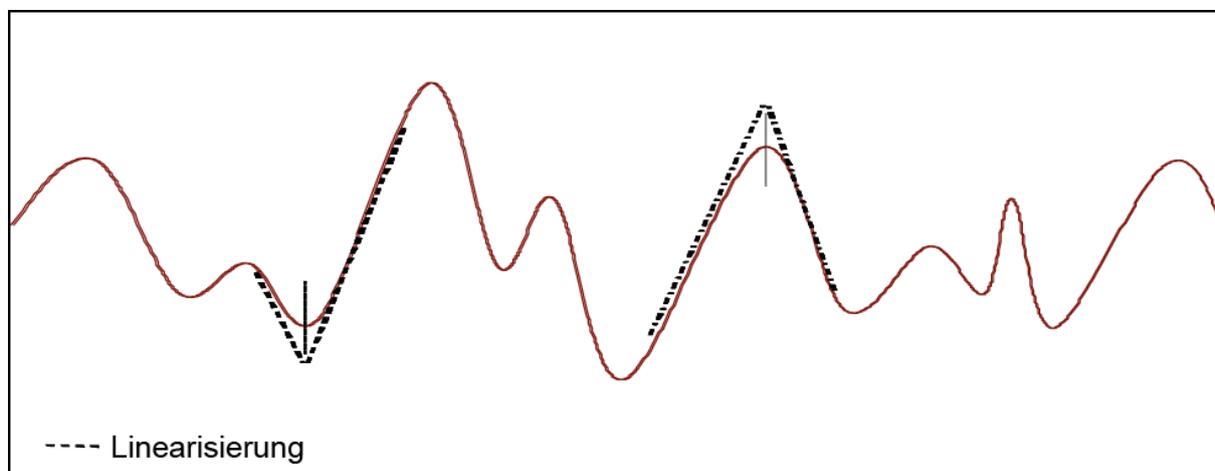


Abbildung 2-4: Stückweise Linearisierung eines nichtlinearen Prozesses. Quelle: RICHARDSON (2003, S. 6), verändert.

2.2.4 MODELLSTRUKTUR

Nach ihrer Struktur können mathematische Modelle in empirisch (Black Box) und prozessorientiert (White Box) untergliedert werden. Empirische Modelle bringen Modelleingangs- und Ausgabegrößen mit Hilfe mathematischer Formeln in Zusammenhang (VOINOV 2008, S. 24). Der mathematische Zusammenhang ist dabei eine abstrakte Generalisierung von Beobachtungswerten der Vergangenheit, physikalische Gesetzmäßigkeiten oder operationale Zusammenhänge spielen keine Rolle. Empirische Modelle eignen sich, um mit relativ geringem Aufwand Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgabegrößen wiederzugeben. Eine Fortschreibung des empirischen Zusammenhangs zwischen Modelleingangs- und Ausgabegröße in die Zukunft ist nur bedingt aussagekräftig, da empirische Modelle lediglich Effekte abbilden können, die auch in der Vergangenheit stattgefunden haben. Empirische Modelle ermöglichen zudem keine Einsicht in die Funktionsweise eines modellierten Systems. Prozessorientierte Modelle dagegen bilden tatsächlich im System stattfindende Prozesse vereinfacht ab (VOINOV 2008, S. 24). Sie erlauben Einsicht in die innere Modellstruktur und sind insbesondere für die Analyse und Vorhersage geeignet. Im Gegensatz zu empirischen Modellen ist der Datenaufwand für prozessorientierte Modelle relativ hoch. Simulationsmodelle enthalten meist sowohl empirische, als auch prozessorientierte Komponenten. Sie sollen daher in dieser Arbeit in *stark prozessorientiert*, *teilweise prozessorientiert* und *stark empirisch* klassifiziert werden.

2.2.5 BETRACHTUNGSWEISE DES MODELLIERTEN SYSTEMS

Komplexe Prozesse können in Modellen aus zwei grundsätzlich verschiedenen Wirkrichtungen betrachtet werden: *Top-down* (von oben nach unten) oder *Bottom-up* (von unten nach oben). Der klassische Betrachtungsansatz beschreibt Systeme vom Großen hin zum Speziellen, Top-down. Top-down Modelle gehen von der Entwicklung eines gedanklichen Grundgerüsts, das möglichst allgemeingültig angewendet werden kann, aus (GRIMM 1999, S. 139). Es werden daher bei Top-down Modellen Details wie zufällige Ereignisse und individuelle Variabilität ausgeblendet. Das allgemeingültige Grundgerüst wird im down-Prozess aufs Spezielle, beispielsweise in der Populationsbiologie auf individuelle Populationen, übertragen (GRIMM 1999, S. 139). Mit dem Aufkommen von zellulären Automaten und später der agentenbasierten Modellierung (Siehe 3.4.3. und 3.4.4.) hielt die Bottom-up Betrachtungsweise Einzug in die Modellierung. Beim Bottom-up Ansatz entsteht komplexes meist nichtlineares Systemverhalten aus der Handlungsweise einzelner Systemkomponenten, nicht aus

der Systemstruktur (SCHOLL UND PHELAN 2004, S. 2). Der Bottom-up Ansatz wird synonym als Bottom-up künstliche Intelligenz bezeichnet. HORGAN (1995, S. 76) kritisiert, (Bottom-up) künstliche Intelligenz basiere auf einem verführerischen Trugschluss. So wurde aus den zwei beobachteten Tatsachen, dass erstens einfache Regeln zu extrem komplexem Verhalten führen können und, dass zweitens die reale Welt extrem komplexes Verhalten beinhaltet, darauf geschlossen, dass einfache Regeln für das komplexe Verhalten in der Welt verantwortlich sind und leistungsstarke Computer mit Hilfe dieser Regeln die Komplexität in der Welt erklären können (HORGAN 1995, S. 76). GRIMM (1999, S. 139) stellt fest, dass eine Systembetrachtung mittels Bottom-up Ansatz wichtige Systemkomponenten ausklammert, und noch in keiner Wissenschaft Theorien alleine auf Grundlage einer Bottom-up Betrachtung entwickelt wurden. Er plädiert vielmehr für eine Verbindung aus beiden Ansätzen. So könnte ein gedankliches Grundgerüst mittels Top-down Ansatz entwickelt und mittels Bottom-up Ansatz getestet werden (GRIMM 1999, S. 139).

2.3 BIOMASSEDOMINIERT E ENERGIESYSTEME

Biomasse als Energieträger unterscheidet sich in mehreren Gesichtspunkten von nichtregenerativen Energieträgern wie Kohle, Atomkraft oder Öl. Folglich weisen auch biomassedominierte Energiesysteme Besonderheiten auf, die mit klassischen optimierenden Energiesystemmodellen nicht abgebildet werden können. Als biomassedominierte Energiesysteme werden in dieser Arbeit Energiesysteme bezeichnet, in denen biogene Energieträger einen bedeutenden Teil des gegenwärtigen oder eines potenziellen zukünftigen Energiemixes ausmachen. In solchen Energiesystemen üben die Produktion, die Bereitstellung und die Nutzung biogener Energieträger signifikanten Einfluss auf das Verhalten des Gesamtsystems aus. Bioenergie bezeichnet aus Biomasse gewonnene Energie. STMUG (2011, S. 40) definiert Biomasse als „*alle nicht-fossilen Stoffe organischen Ursprungs*“ Biomasse kann primär nur von Photosynthese betreibenden Pflanzen erzeugt werden. Nach Umwandlungsprozessen entstehen Sekundärstoffe wie beispielsweise tierischer Dung, der auch zur Biomasse gezählt wird. ROSILLO CALLÉ (2009, S. 43–44) unterteilt Biomasse grob in holzige und nicht-holzige Biomasse. Weiter werden, je nach Herkunft der Biomasse, acht verschiedene Kategorien unterschieden: Natürliche Wälder und Waldgesellschaften, Waldplantagen, Agro-industrielle Plantagen, Bäume außerhalb von Wäldern und Waldgesellschaften, Landwirtschaftliche Pflanzen, Agrarrückstände, Verarbeitungsrückstände und Viehdung.

2.3.1 BESONDERHEITEN BIOMASSEDOMINierter ENERGIESYSTEME

In Abbildung 2-2 ist eine Gut-Prozess-Gut-Kette dargestellt, bei der mittels Agrarforstwirtschaft Biomasse erzeugt wird, die dann im Methanolwerk zu Methanol verarbeitet wird und schließlich ein Fahrzeug antreibt, welches eine Nachfrage an Bewegung befriedigt. Die Betrachtung des biogenen Energieträgers Methanol erfolgt in dieser Abbildung nach Nakicenovics Verständnis des Begriffs *Energiesystem*. Diese Betrachtung ist zielführend, solange Biomasse in einem betrachteten Energiesystem (auch zukünftig) eine untergeordnete Rolle spielt. Werden jedoch signifikante Mengen eines biogenen Energieträgers benötigt, wird schnell deutlich, dass die Agrarforstwirtschaft nicht, wie in Abbildung 2-2 suggeriert, unabhängig von Zeit und Raum einen konstanten Input an Biomasse in das betrachtete System liefern kann. Tatsächlich stehen aufgrund eines begrenzten Raumangebotes unterschiedliche biogene Energieträger sowohl in ständiger Konkurrenz zueinander, als auch zur Nahrungsmittelproduktion und anderen flächenintensiven Nutzungsformen. Auch folgen Produktion und Ernte und somit die Verfügbarkeit von Biomasse einer gewissen Saisonalität. Dies zeigt, dass für die Verfügbarkeit von Biomasse eine Reihe an Einflüssen bedeutsam sind, welche bei der Betrachtung von konventionellen Energieträgern keine Rolle spielen. Im Folgenden werden diese Besonderheiten biogener Energieträger, welche eine angepasste Betrachtungsweise für biomassedominierte Energiesysteme erfordern, näher beschrieben und mit Beispielen aus der aktuellen Forschung veranschaulicht.

Raumbezug

Bei biogenen regenerativen Energieträgern spielen räumliche Aspekte bereits auf der lokalen bis regionalen Ebene eine wichtigere Rolle als bei nicht-regenerativen Energieträgern. Die Produktion von Biomasse findet dezentral statt und ist sehr flächenintensiv. Regionale Faktoren wie Bodengüte, Hangneigung oder Wasserhaushalt sind zu beachten. Da Biomasse im Vergleich zu fossilen Energieträgern eine geringe volumetrische Energiedichte besitzt und daher schlecht zu transportieren ist, wird der Position von Produktion und Nachfrage bzw. Wandlung im Raum eine besondere Bedeutung zugeschrieben.

HAUSL UND BIBERACHER (2012, S. 492) identifizieren vier Teilbereiche, in denen räumliche Aspekte für eine Energiesystemoptimierung eine Rolle spielen können: Potenzial, Transport, Wandlung und Bedarf. Für welchen Teilaspekt und Energieträger

eine (mit zusätzlichem Aufwand verbundene) räumliche Betrachtung notwendig ist, hängt jedoch von der betrachteten Skala ab (HAUSL UND BIBERACHER 2012, S. 492). So mag beispielsweise eine räumliche Betrachtung des Transports von Öl oder Kohle auf einer globalen bis nationalen Skala zielführend sein, während dies auf einer regionalen bis lokalen Skala nicht sinnvoll erscheint. Hier können Effizienz- einbußen durch den Transport für diese Energieträger als vernachlässigbar angenommen werden. Für Biomasse spielt dieser Aspekt bereits auf der regionalen Skala wegen der geringen volumetrischen Energiedichte im Vergleich zu Kohle oder Öl eine große Rolle. Auch im Hinblick auf die Aspekte Potenzial, Wandlung und Bedarf ist bei biogenen Energieträgern bereits auf der lokalen bis regionalen Skala der Raum entscheidend. Während für das Biomassepotenzial beispielsweise die raumbundenen Standorteigenschaften zu beachten sind, ist der Standort des Biomassebedarfs oder der Wandlungseinrichtungen entscheidend für die Länge der Transportwege und damit für die Effizienz des Energieträgers.

KAPPLER ET AL. (2009) untersuchen in diesem Zusammenhang die Wirtschaftlichkeit eines dezentralen Schnellpyrolyseverfahrens mit Hilfe dessen die volumetrische Energiedichte von Biomasse um das bis zu Zehnfache erhöht werden kann. Dadurch ließe sich der Transportaufwand für die Verwendung biogener Energieträger in einer zentralen Vergärungsanlage verringern. Sollte sich das Verfahren wirtschaftlich umsetzen lassen, könnte das an der zentralen Vergärungsanlage verfügbare Biomasseaufkommen deutlich gesteigert werden.

Flächenkonkurrenz

Da Biomasse regenerativ ist, also stetig neu produziert wird, stehen verschiedene biogene Energieträger untereinander und mit anderen Formen der Flächennutzung in ständiger Konkurrenz um ein begrenztes Flächenangebot. Um den Einfluss einer intensivierten Biomasseproduktion auf die Nahrungsmittelproduktion und die forstwirtschaftliche Produktion in der österreichischen Region Sawwald zu quantifizieren, verbinden SCHMIDT ET AL. (2012) ein regionales Energiemodell mit einem Landnutzungsmodell. Dabei wird das Landnutzungsmodell zur Herleitung von regionalen Biomasseversorgungskurven für die Teilgebiete der Projektregion genutzt, während das gekoppelte optimierende Energiesystemmodell den Energiemix mit den geringsten Kosten für die einzelnen Teilgebiete ermittelt. Im Ergebnis stellen SCHMIDT ET AL. (2012, S. 1) fest, dass eine energieautarke Versorgung der österreichischen Region

Sauwald, welche zu großen Teilen auf Energie aus Biomasse beruht, mit hohen Kosten und einem Rückgang der lokalen Nahrungsmittelproduktion, Futtermittelproduktion und forstwirtschaftlichen Produktion einhergehen würde.

PAPACHRISTOS UND ADAMIDES (2012) entwickeln ein System Dynamics Modell zur Beurteilung von Förderstrategien für die Biokraftstoffproduktion in der Europäischen Union. Kern dieses Modells ist der Zusammenhang zwischen Biokraftstoffproduktion und Nahrungsmittelproduktion. Hier kommt es bei begrenzter Anbaufläche zu einer Verringerung der Nahrungsmittelproduktion sobald der Anbau von Energiepflanzen stark zunimmt. Dieser Effekt wird zwar durch Innovationen im Bereich der Biokraftstoffproduktion, die zukünftig pro Fläche einen höheren Biokraftstofftrag erlauben, abgeschwächt, dennoch gelangen PAPACHRISTOS UND ADAMIDES (2012, S. 20) zu der Überzeugung, dass eine unkontrollierte Förderung des Anbaus biogener Energieträger die Nahrungsmittelversorgungssicherheit einkommensschwacher Bevölkerungsgruppen in der EU gefährden kann.

Rückkopplungen

An Produktion und Bereitstellung von energetisch genutzter Biomasse sind eine Vielzahl von Akteuren beteiligt, die individuelle Entscheidungen treffen. Die Entscheidungsprozesse sind oft komplex und von Rückkopplungen bestimmt. In einer Studie zu Potenzial, Kosten und Konsequenzen für ein regionales Energieautarkieszenario in Österreich stellt SCHRADINGER (2010) fest, dass eine Versorgung mit Bioenergie stets Veränderungen in Zeit und Raum unterliegt. Dies ist dadurch bedingt, dass die Menge in einem bestimmten Zeitraum produzierter Bioenergie neben den lokalen Umweltbedingungen, auch von den Managemententscheidungen der lokalen Akteure und von aktuellen Absatzbedingungen für Biomasse abhängen (SCHRADINGER 2010, S. 6).

SCHEFFRAN UND BENDOR (2009) betrachten in einem zeitlich und räumlich dynamischen Modell den Biomassepflanzenanbau in Illinois (USA). Sie stellen fest, dass die Entscheidungen lokaler Biomasseproduzenten von Marktsignalen abhängen, welche wiederum durch das Verhalten der Gesamtheit aller Biomasseproduzenten in einer betrachteten Region bedingt sind (SCHEFFRAN UND BENDOR 2009, S. 13). Die Bereitstellung von biogenen Energieträgern ist demnach durch ein Komplexes Netz an Rückkopplungen beeinflusst (SCHEFFRAN UND BENDOR 2009, S. 13).

Saisonalität und Versorgungsunsicherheit

Die Verfügbarkeit von landwirtschaftlich erzeugter Biomasse unterliegt starken saisonalen Schwankungen. Während im Herbst direkt nach der Ernte viel Biomasse zu relativ geringen Kosten verfügbar ist, steigt der Biomassepreis im weiteren Jahresverlauf bis zur folgenden Erntesaison an. Dieser Preisanstieg ist bedingt durch die Lagerkosten und den Trockenmasseverlust (Zersetzung) der Biomasse. Lagerkosten von Rohbiomasse sind wegen des ungünstigen Energie-Volumenverhältnisses der Rohbiomasse deutlich höher als bei energiedichteren Energieträgern. Durch Zersetzung bedingte Trockenmasseverluste sind abhängig von der Lagerungsart der Biomasse. Bei einer kostengünstigen Lagerung im Freien können die Trockenmasseverluste innerhalb eines Jahres mehr als 25 % der ursprünglich geernteten Rohbiomasse ausmachen (SMITH ET AL. 2013, S. 104). Eine Alternative zur Lagerung von Rohbiomasse ist die Pelletisierung. Zwar ist der Prozess des Pelletisierens mit zusätzlichen Kosten verbunden, jedoch lassen sich Biomassepellets wegen ihrer hohen volumetrischen Energiedichte ohne große Masseverluste auch über längere Zeiträume aufbewahren. CARNOHAN (2014) präsentiert eine Studie, in der er mit Hilfe eines dynamischen System Dynamics Modells die Kosten für die Pelletisierung von agrarischer Rohbiomasse mit den Einsparungen durch eine erhöhte Versorgungssicherheit und geringere Trockenmasseverluste vergleicht. Er resümiert, dass sich die durch Biopellets erreichte Reduzierung der Versorgungsunsicherheit positiv auf die Betriebskosten von Bioraffinerien auswirkt (CARNOHAN 2014, S. 20). Für Holzbiomasse spielt die Saisonalität der Ernte eine eher untergeordnete Rolle. Jedoch können auch hier, im Vergleich zur landwirtschaftlich erzeugten Biomasse allerdings in geringerem Maße, Versorgungsunsicherheiten z.B. durch Kalamitäten auftreten.

Bedingt durch die hier genannten Eigenschaften biogener Energieträger müssen diese als eine Verbindung aus technisch-ökonomischem, naturwissenschaftlichem und sozialwissenschaftlichem System betrachtet werden.

2.3.2 MODELLANFORDERUNGEN ZUR ABBILDUNG BIOMASSEDOMINierter ENERGIE-SYSTEME

In Kapitel 2.2 wurden Kriterien für die Wahl eines für diese Arbeit geeigneten Modellierungsansatzes vorgestellt. Diese Kriterien werden hier aufgegriffen, so dass dargelegt werden kann welchen Anforderungen ein für die Simulation von biomasse-dominierten Energiesystemen geeigneter Ansatz genügen muss.

Eine entscheidende Zielgröße in der Energiesystemanalyse ist die Entwicklung des betrachteten Systems über die Zeit. Für die Energiesystemmodellierung wird daher ein zeitlich dynamisches Modell benötigt. Da in der Regel aggregierte Werte und lange Betrachtungszeiträume von Interesse sind, soll zudem eine zeitlich kontinuierliche Simulation einer diskreten Betrachtungsweise vorgezogen werden. Bei dieser liegt der Schwerpunkt auf der Entwicklung des Gesamtsystems, nicht auf individuellen Ereignissen. Wie in Teilkapitel 2.3.1 beschrieben, kommt in biomassedominierten Energiesystemen der räumlichen Dimension eine besondere Rolle zu. Aus diesem Grund muss die Möglichkeit zur räumlichen Betrachtung, zumindest von Teilaspekten des betrachteten Energiesystems, bestehen. Auch verbessert eine räumliche Modellauflösung sowohl die Veranschaulichung, als auch die Kommunizierbarkeit eines Modells (BENDOR UND KAZA 2012, S. 112–114). Natürliche Phänomene wie räumliche Biomasseverteilung sind in der Regel unscharf begrenzt und daher kontinuierlich im Raum. Objekte, die in der Realität kontinuierlich sind, lassen sich im Modell sowohl diskret als auch kontinuierlich abbilden (BILL 2010a, S. 22–23). Die diskrete Abbildung solcher Objekte besitzt Vorteile gegenüber der kontinuierlichen Abbildung. Messwerte, wie beispielsweise Satellitenaufnahmen, besitzen eine diskrete Form. Die Ableitung einer kontinuierlichen Funktion für solche Messwerte birgt einen erheblichen Aufwand und ist mitunter für das Modellierungsziel nicht zielführend. Das Energiemodell soll dementsprechend den betrachteten Raum diskret abbilden. Komplexe Rückkopplungen spielen in biomassedominierten Energiesystemen eine herausragende Rolle. Solche Rückkopplungen bedingen Nichtlinearität im Modell. Es ist somit notwendig, einen Simulationsansatz zu wählen, der Modellgleichungen numerisch löst. Ein Energiemodell soll sowohl zum Verständnis eines beschriebenen Energiesystems beitragen, als auch Aussagen über mögliche Entwicklungen innerhalb des Systems treffen können. Dafür ist es erforderlich, dass eine Einsicht in weite Teile der Modellstruktur gegeben ist. Aus diesem Grunde sind für die Analyse von biomassedominierten Energiesystemen stark prozessorientierte Methoden geeignet. Bei der Energiesystembetrachtung steht das generelle Systemverhalten im Vordergrund. Es ist sinnvoll, in erster Linie einen konzeptionellen Rahmen zu erarbeiten und ausgehend von diesem dort wo dies möglich und zielführend ist, ins Detail zu gehen. Dieses Vorgehen entspricht dem des *Top-down* Modellierungsansatzes.

Insgesamt wurden in Kapitel 2.2 fünf Kriterien zur Klassifikation von mathematischen Modellen, die für die Auswahl eines Simulationsansatzes biomassedominierter Ener-

giesysteme geeignet sind, vorgestellt. Tabelle 2-1 gibt eine Zusammenfassung der betrachteten Kriterien und der hier herausgearbeiteten Modellanforderungen an die jeweiligen Kriterien. Diese Kriterien stellen eine Anforderungsliste an das zu erstellende Modellierungswerkzeug dar. Da Modelle in der Praxis nicht ausschließlich einem Modellierungskonzept entsprechen, bedeutet der erstellte Anforderungskatalog jedoch nicht, dass andere Ausprägungen der beschriebenen Komponenten in einem biomassedominierten Energiesystem keine Anwendung finden dürfen. So ist es beispielsweise sinnvoll, nur einzelne Komponenten eines Modells räumlich aufgelöst zu betrachten und den Datenaufwand für die Modellierung dadurch gering zu halten.

Tabelle 2-1: Zusammenfassung der Anforderungen an ein Modell zur Simulation eines biomassedominierten Energiesystems.

Kriterium	Änderungsverhalten	Raumbezug	Lösung der Modellgleichungen	Modellstruktur	Betrachtungsweise
Modellanforderung	Dynamisch kontinuierlich	Räumlich aufgelöst, diskret	Numerisch	Stark prozessorientiert	Top-down

2.4 SIMULATIONSMETHODEN FÜR DIE ENERGIESYSTEMMODELLIERUNG

Für die Simulation von Energiesystemen existieren zahlreiche optimierende Energiesystemmodelle der Energiewirtschaft. Im Folgenden Abschnitt wird das optimierende Energiesystemmodell *Modular Energy System Analysis and Planning toolbox* (MESAP) stellvertretend für diese Klasse der Modelle zur Analyse von Energiesystemen vorgestellt. Ebenso werden die drei Simulationsansätze Zelluläre Automaten, Agentenbasierte Simulation und System Dynamics, sowie die Simulation mit Hilfe von Geoinformationssystemen (GIS) vorgestellt. Die in 3.2. erarbeiteten Klassifizierungskriterien werden für eine Gegenüberstellung der betrachteten Modellierungsmethoden verwendet.

2.4.1 GEOINFORMATIONSSYSTEME

BILL (2010a, S. 8) definiert ein Geoinformationssystem (GIS) als „*rechnergestütztes System, das aus Hardware, Software und Daten besteht und mit dem sich raumbezogene Problemstellungen in unterschiedlichsten Anwendungsgebieten modellieren und bearbeiten lassen*“. Ein GIS ist damit, im Unterschied zu anderen Informationssystemen, ein Werkzeug zur Verwaltung und Behandlung von raumbezogenen Phänomenen (CHANG 2014, S. 2–3). Geoinformationssysteme sind objektbezogen

ausgelegt, in einem GIS abgebildete Objekte sind direkt oder indirekt mit einer Position auf der Erde verknüpft. Es werden zwei verschiedene Arten der Objektklassifizierung unterschieden: Vektordaten und Rasterdaten. Vektordaten sind eine auf Punkten und Kanten beruhende Beschreibung von Raumdaten. Sie existieren in drei geometrischen Formen: Als Punkt, Linie (Punkte verbunden mit Kanten) oder als Polygon (Punkte verbunden mit Kanten, die eine Fläche einschließen). Vektordaten eignen sich besonders zur Beschreibung diskreter Geoobjekte. Als Tessellation z.B. in Form von Dreiecken oder Sechsecken finden sie jedoch auch für die Abbildung kontinuierlicher Phänomene Anwendung (BILL 2010a, S. 30–31). Rasterdaten beziehen sich im Gegensatz zu Vektordaten direkt auf Flächen. Ihr geometrisches Grundelement ist das Pixel, welches den Raum überschneidungs- und lückenlos abdeckt (BENDOR UND KAZA 2012, S. 116). Rasterdaten bilden einen Raum somit kontinuierlich ab. Es bestehen jedoch keine logischen Verknüpfungen zwischen den Pixeln, so dass eine Ordnung nur nach der Position der Pixel möglich ist. Neben ihrer Position können Objekten (Vektordaten und Rasterpixeln) beliebig viele weitere Attribute zugeordnet werden (BILL 2010a, S. 9). BILL (2010a, S. 36) beschreibt vier funktionale Komponenten eines GIS: Erfassung, Verwaltung, Analyse und Präsentation. Der Schwerpunkt von GIS liegt in der Verwaltung und Analyse raumbezogener Daten. In einem GIS eingegebene Daten können mit Hilfe einer Vielzahl von Werkzeugen interaktiv verarbeitet und ausgewertet werden. So werden aus Rohdaten beispielsweise durch Verknüpfung oder statistische Auswertung neue Informationen gewonnen. Für die Präsentation von Geoinformationen mittels GIS wird zumeist eine Karte als visueller Output gewählt. Die in der Regel sehr ausgereifte Präsentationsform von Geoinformationssystemen besitzt im Vergleich zur Ausgabe von beispielsweise Zahlenkolonnen den großen Vorteil einer sehr hohen Verständlichkeit und Akzeptanz gegenüber dem Benutzer (BILL 2010a, S. 40).

Seit Mitte der 1990er Jahre stehen eine Reihe von kommerziellen GIS Softwareprodukten zur Nutzung an Desktop PCs und für die mobile Verwendung zur Verfügung. Seit Mitte der 2000er Jahre sind zudem auch Open-Source GIS Anwendungen verfügbar. Mögliche Desktopanwendungen für die Modellierung sind das Open-Source Programm QGIS (QGIS 2014) oder die kommerzielle Anwendung Arc Info (ARC INFO 2013). Geoinformationssysteme eignen sich besonders für die Bearbeitung und Präsentation von Daten in der räumlichen Dimension. Sie bieten gegenwärtig jedoch nahezu keine Möglichkeit, auch die zeitliche Dimension abzubilden. Für

eine zeitlich-dynamische Modellierung müsste der GIS Ansatz mit einem anderen Modellierungsansatz in einem Hybridmodell kombiniert werden.

2.4.2 MESAP PLANET

MESAP (*Modular Energy System Analysis and Planning toolbox*) ist ein optimierendes Energiesystemmodell aus dem Bereich der Energiewirtschaft. Es steht in diesem Kapitel stellvertretend für die von MÖST UND FICHTNER (2009, S. 15–23) beschriebene Klasse der optimierenden Simulationsmodelle. MESAP wurde seit 1984 am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energie Anwendung (IER) der Universität Stuttgart als Modellierungsumgebung für die Analyse von Energiesystemen, die Validierung möglicher Zukunftsstrategien und das Monitoring bereits umgesetzter Maßnahmen entwickelt (REMME 2002, S. 59–60). Im Jahr 2001 übernahm die Firma seven2one Informationssysteme GmbH die Weiterentwicklung und den Vertrieb der Software; aktuell ist die Version MESAP 5 auf dem Markt (SEVEN2ONE 2014). Die Modellierungsumgebung MESAP ist modular aufgebaut und besteht aus drei Hauptkomponenten: Dem MESAP Informationssystem, Rechenmodulen und Werkzeugen, die von einigen Rechenmodulen verwendet werden können (REMME 2002, S. 64). Abbildung 2-5 von REMME (2002, S. 64) visualisiert den modularen Aufbau von MESAP.

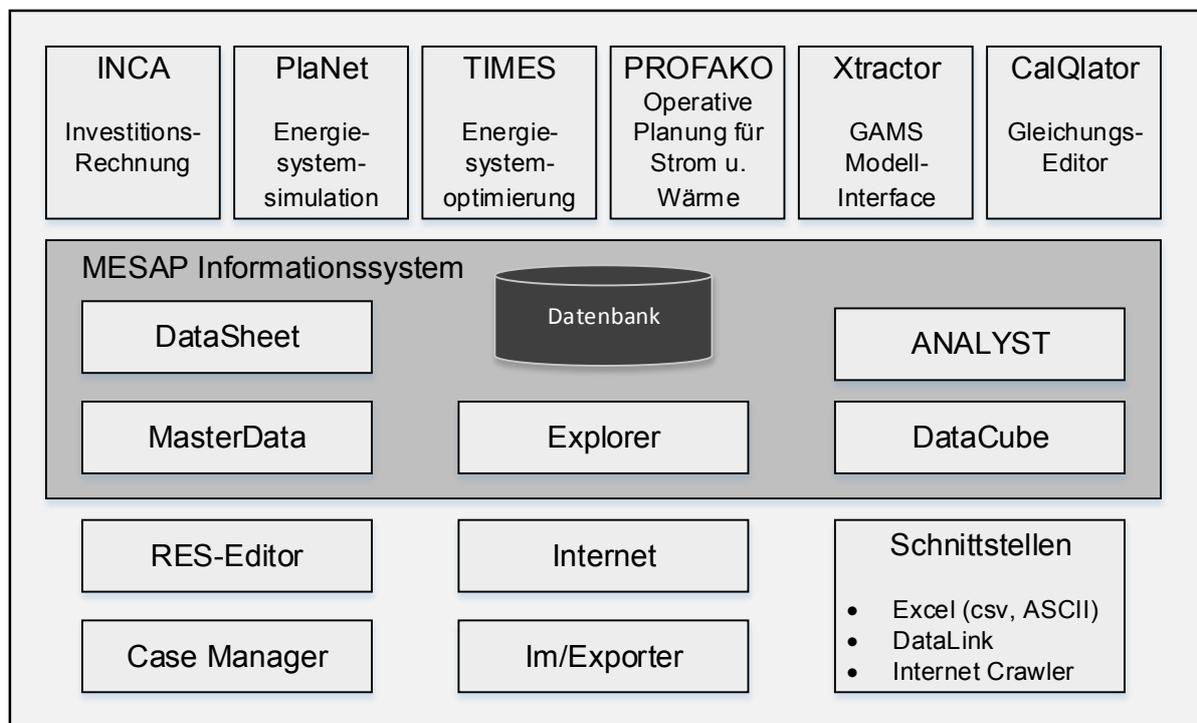


Abbildung 2-5: Funktionaler Aufbau von MESAP. Quelle: REMME (2002, S. 64), verändert.

Kern der MESAP Software ist die zentrale Datenbank, welche als Informationssystem angelegt ist und eine effiziente Datenhaltung, sowie den Austausch der Daten mit kommerziellen Softwarepaketen ermöglicht. Der Zugriff auf die Datenbank erfolgt über den MESAP Explorer. Die beiden Tools *Data Sheet* und *Data Cube* stehen zur Dateneingabe und zur einfachen Datenanalyse zur Verfügung. Sechs in MESAP integrierte Rechenmodule eignen sich für spezifische Anwendungen innerhalb der Energiewirtschaft: INCA, PlaNet, PROFAKO, XTRACTOR, CalQlator und TIMES. Im Hinblick auf die Fragestellung der vorliegenden Arbeit ist insbesondere das Rechenmodul PlaNet (Planning Network) relevant. PlaNet wurde für die Modellierung von Energiesystemen entwickelt, es werden hier Stoffströme und bei Bedarf auch Kosten abgebildet. Weiterhin soll hier auch das Rechenmodul TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) Erwähnung finden. Dieses ist speziell für die Optimierung von Energiesystemen ausgelegt. Die zusätzlichen Rechenwerkzeuge in MESAP beinhalten unter anderem den Referenzenergiesystem (RES) Editor. Dieser steht bei den Rechenmodulen PlaNet und TIMES zur Verfügung. Der RES ist in diesen Modulen als graphische Oberfläche integriert und stellt die Verbindung zwischen Datenbank und spezifischem formalem mathematischem Modell her. Die RES-Darstellung basiert auf Nakicenovics (WATSON ET AL. 1996, S. 77) Verständnis von Energiesystemen als gerichtete Aneinanderkettung von Gütern und Prozessen, die nacheinander durchlaufen werden. Es beschreibt die Topologie eines Energiesektors in Form einer Netzwerkdarstellung, bei der Güter und Prozesse über Flüsse in einem Netzwerk miteinander verbunden sind. Sämtliche Schritte von der Primärenergieträgermobilisierung, über Energieträgertransport und -umwandlung bis hin zur Nutzung werden graphisch als Kasten (Prozess) dargestellt. Die Prozesse sind mittels Verknüpfungen mit Gütern verbunden. Güter werden graphisch als vertikale Linien abgebildet. Abbildung 2-6 zeigt ein einfaches RES, das die Ernte von Zwergsträuchern aus der Landschaft mittels Erntegruppe beschreibt.

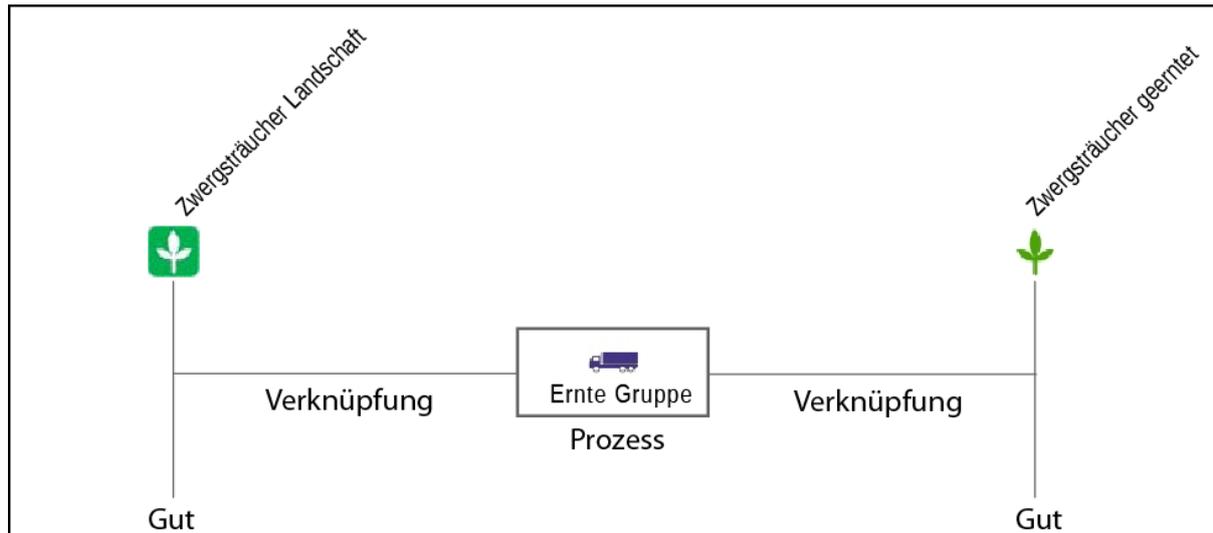


Abbildung 2-6: Güter und Prozess im RES. Eigene Darstellung.

Weiterhin erlaubt der PlaNet RES-Editor eine Strukturierung von Energiesystemen in Regions-, Technologie- und andere hierarchische Ebenen (REMME 2002, S. 65). Auf diese Weise können auch komplexe Energiesysteme übersichtlich dargestellt werden. Durch die Trennung von Datenbank, Rechenmodulen und mathematischen Modellen können mehrere Rechenmodule, z.B. PlaNet und TIMES auf die gleiche Datengrundlage zugreifen (SCHLENZIG 1998). PlaNet ist zeitreihenbasiert und ermöglicht sowohl das Interpolieren zwischen Daten einer historischen Zeitreihe, als auch das Fortschreiben historischer Daten basierend auf einer Trendanalyse. Mittels Szenarioanalyse können die Eingangsvariablen des Energiemodells variiert werden. Die ausgehend von RES-Struktur und Datenbank generierten mathematischen Energiemodelle sind lineare, sequenziell lösbare Gleichungssysteme (SCHLENZIG 1998).

Der Software MESAP liegt der Ansatz der linearen Programmierung zugrunde. MESAP eignet sich zur Optimierung von Energieversorgungssystemen. Als Planungsinstrument der Energiewirtschaft ist MESAP besonders für die Haltung großer Datenmengen nützlich (SIEGMUNDT 2012). Durch seine modulare Struktur können mathematische Modelle mit verschiedenen Zielstellungen basierend auf einer gemeinsamen Datenbank erstellt werden. MESAP sieht explizit die Abbildung und Auswertung von Zeitreihen vor. Mittels RES-Editor können auch komplexe Systeme übersichtlich abgebildet werden. Aufgrund dieser Eigenschaften finden MESAP Modelle vor allem bei der Planung komplexer, aber mit einer guten Datenbasis ausgestatteter Systeme, wie dies etwa bei Stromnetzen der Fall ist, Anwendung. Die IAEA (2000, S. 104) beschreibt den Datenaufwand für die Modellierung in MESAP als mittel bis hoch. Als Partialmodell (MÖST UND FICHTNER 2009, S. 20) bildet MESAP inner-

halb seiner Systemgrenzen nur den technischen Teil von Systemen ab. Wichtige Parameter wie Energieträgerpreise oder Energienachfrage müssen als exogen angenommen werden. Rückkopplungen aus dem Systemgeschehen auf diese Parameter können nicht abgebildet werden. Dadurch bedingt kann auch strategisches Verhalten mit dieser Modellierungsmethode nicht simuliert werden.

2.4.3 ZELLULÄRE AUTOMATEN

Ein Zellulärer Automat (ZA) ist ein diskretes dynamisches System bestehend aus einer netzförmigen Anordnung von identischen Zellen. Dabei nimmt jede Zelle einen Zustand einer endlichen Menge von möglichen Zuständen an. In der Regel ist diese Menge von möglichen Zellzuständen sehr gering. Zellen ändern ihren Zustand auf Grundlage von Zustandsübergangsregeln, die den neuen Zellzustand ausgehend vom bisherigen Zellzustand sowie dem Zustand der Nachbarschaftszellen bestimmen. Alle Zellzustände nutzen die gleiche Zustandsübergangsregel und alle Zellen werden gleichzeitig aktualisiert. Der Aktualisierungsprozess wird kontinuierlich in diskreten Zeitschritten wiederholt, so dass sich eine zeitliche Entwicklung des Systems ergibt (ROZENBERG ET AL. 2012, S. 4). Die Entwicklung des Gesamtsystems wird durch das Verhalten der Rasterzellen, nicht durch einen zentralen Prozess gesteuert. ZA können somit als *Bottom-up Ansatz* angesehen werden. Aufgrund der räumlichen Zellanordnung als Netzstruktur ergibt sich eine Richtungsabhängigkeit im System (ZUSE 1975). Die Berechnung geht damit immer von einer Zelle aus und pflanzt sich von dort fort, bis die letzte Zelle im System berechnet ist. Das Konzept der ZA wurde in den 1940er Jahren von S. Ulan und J. von Neumann entwickelt (SANTÉ ET AL. 2010). In den 1970er Jahren trugen ZA zur Entwicklung der Spieltheorie in der Mathematik bei. Heute finden sich vielfältige Anwendungen von ZA unter anderem in den Bereichen Physik, Naturwissenschaften, Mathematik und Landschaftsplanung (SANTÉ ET AL. 2010).

Vorteile von ZA sind ihre Einfachheit, Flexibilität und intuitive Bedienbarkeit. Aus einfachen Zustandsübergangsregeln und mit nur wenigen möglichen Zellzuständen ergeben sich schnell hoch komplexe Dynamiken. ZA bieten zudem die Möglichkeit, sowohl die räumliche als auch die zeitliche Dynamik eines Prozesses abzubilden und lassen sich relativ einfach in GIS einbinden (PEREZ UND DRAGICEVIC 2012). ZA werden in der Regel in Kombination mit weiteren Simulationsansätzen als Hybridmodelle verwendet. Beispiele für solche Hybridmodelle sind ZA in Verbindung mit Fuzzylogik,

Markkowsketten, logistische Regression oder neuronale Netze (MUNSHI ET AL. 2014, S. 69). Auch für die Simulation von Energiesystemen eignen sich ZA in erster Linie als Hybridmodelle in Kombination mit einem Modellierungsansatz, der die nicht räumlichen Komponenten des Systems adäquat abbildet. Ein Beispiel für ein Hybridmodell mit ZA aus der Energiesystemmodellierung ist die *Arbeit Modellierung systemübergreifender Energie- und Kohlenstoffbilanzen in Entwicklungsländern* von FREY (2006). Darin stellt FREY (2006) ein Hybridmodell zur Energie- und Kohlenstoffbilanzierung in Entwicklungsländern bestehend aus MESAP und ZA vor. Ein struktureller Nachteil von ZA ist, dass der Informations- und Materialfluss immer nur zwischen zwei benachbarten Zellen stattfinden kann. Zellzustandsübergänge können somit nur durch Ereignisse in der betreffenden Zelle oder seiner direkten Nachbarschaft ausgelöst werden. Ist ein System von zentral gesteuerten Prozessen dominiert, kann dieses nicht adäquat abgebildet werden.

2.4.4 AGENTENBASIERTE MODELLE

Agentenbasierte Modellierung (ABM) ist eine Modellierungsmethode für das Erstellen, die Analyse und das Experimentieren mit Modellen, bei denen Individuen miteinander und mit ihrer Umwelt interagieren (GILBERT 2008, S. 2). In der ABM modellierte Individuen sind Identitäten, die individuelle Entscheidungen treffen, also beispielsweise einzelne Personen, Gruppen, Länder oder Ähnliches. Die modellierten Individuen besitzen einen vordefinierten Regelsatz und eine Menge von möglichen Zuständen, die sie annehmen können. Während eines Simulationsschrittes sammeln die Individuen Informationen über ihre gegenwärtige Situation und gleichen diese mit dem Regelsatz ab, der bestimmt wie sie auf diese Situation reagieren (HELD ET AL. 2014, S. 6). Wie bei der Interaktion zwischen den Zellen von zellulären Automaten entsteht bei der ABM das Systemverhalten durch die Aktion und Interaktion von Individuen, also *Bottom-up* von unten nach oben. Komplexes Systemverhalten ist demnach nicht das Produkt einer zentralen Koordinierung, sondern vielmehr von Aktionen und Reaktionen auf der Mikroebene. Bei ABM führen simple Eingangseinstellungen mitunter zu spektakulären Verhaltensmustern, so dass Makroeffekte durch Mikroprozesse erklärt werden können (LUSTICK 2012). ABM können grundsätzlich sowohl mit als auch ohne Raumbezug simuliert werden (HELD ET AL. 2014). Bei der räumlichen Simulation ist im Gegensatz zu ZA der Informations- und Materialfluss bei ABM nicht auf die direkte Nachbarschaft von Individuen begrenzt. Des Weiteren sind die Individuen nicht an ihren Aufenthaltsort gebunden und können diesen innerhalb

des Systems wechseln. LUSTICK (2012) interpretiert ABM daher als eine Erweiterung von ZA. ABM können Nichtlinearität und damit Rückkopplungen im System abbilden (RAHMANDAD UND STERMAN 2008, S. 999). Obwohl das Konzept der ABM noch relativ jung ist, finden sich Anwendungen in den verschiedensten Wissenschaftsbereichen, beispielsweise in der Ökologie, der Verhaltensforschung oder der Energiewirtschaft (z.B. GENOESE ET AL. 2009 und KREMERS UND VIEJO 2009).

Mit Hilfe von ABM können kausale Erklärungen für das Verhalten von Systemen gefunden werden. Es wird nicht einfach ein beobachtetes Systemverhalten fortgeschrieben. Durch den weitläufigen Verzicht auf Aggregation bilden ABM zudem heterogene Systeme sehr realitätsnah ab. So können die handelnden Individuen oftmals eins zu eins in die reale Welt übertragen werden. ABM sind daher besonders geeignet wenn sich ein System nicht durch Aufgliederung in kleinere Teile beschreiben lässt, sondern die Systemstruktur eine entscheidende Rolle spielt (HELD ET AL. 2014). Auch für die Simulation von Energiesystemen gibt es Anwendungsbeispiele von ABM, wie HODGE ET AL. (2008) oder GONZALEZ DE DURANA ET AL. (2014). Trotz der beschriebenen Vorteile, die der hohe Detailgrad von ABM bietet, birgt dieser jedoch auch Nachteile im Vergleich zu anderen Simulationsansätzen. RAHMANDAT UND STERMAN (2008, S. 999) erwähnt hierbei zunächst den hohen Rechenaufwand, den ein hoher Detailgrad zwangsläufig mit sich bringt. Zudem muss aufgrund des hohen Simulationsaufwandes die Modellgrenze (bei begrenztem Zeit und Geldaufwand) eng gesetzt werden. Wichtige Teile des betrachteten Systems, welche möglicherweise systemrelevante Rückkopplungen zu den betrachteten Systemkomponenten aufweisen, müssen zwangsläufig als externe Parameter betrachtet werden. Wertvolle Einblicke in das Systemverhalten können hierbei verloren gehen (RAHMANDAD UND STERMAN 2008, S. 999). LUSTICK (2012) beklagt zudem die Praxisferne von ABM und eine nahezu vollständige Künstlichkeit der Simulationsresultate, weil die ABM keine gemessenen Felddaten direkt berücksichtigt.

2.4.5 SYSTEM DYNAMICS

System Dynamics (SD) ist eine Methode für Analyse und Management komplexer Systeme, die zeitlich dynamisch sind (FORD 2009, S. 7). Der Schwerpunkt des SD Ansatzes liegt auf der Darstellung und dem Verständnis von Kausalzusammenhängen in Systemen (STERMAN 2000). Wichtig ist das Verhalten des Systems als Ganzes. Dies steht im Gegensatz zur analytischen Herangehensweise, die ein Sys-

tem als Summe von Teilsystemen auffasst und versucht, Systeme durch Desintegration in kleinere Teilsysteme zu beschreiben (VOINOV 2008, S. 26). SD Modelle können als qualitative Kausaldiagramme (Causal Loop Diagrams) und als quantitative Flussdiagramme (Stock and Flow Diagram) umgesetzt werden. Kausaldiagramme bilden Systeme als Wirkungsketten ab. Der Schwerpunkt liegt hier auf in sich geschlossenen Wirkungsketten. Diese werden in selbstverstärkend (positive Polarität) und ausgleichend (negative Polarität) eingeteilt (FORD 2009, S. 99–100). Kausaldiagramme werden mitunter als ein Schritt in der Modellentwicklung aufgefasst, an dessen Ende ein qualitatives Modell steht. COYLE (2000, S. 240–241) widerspricht dieser Auffassung und betont, dass auch qualitative Modelle vollwertige System Dynamics Modelle darstellen können. Bei der quantitativen SD Modellierung wird ein betrachtetes System visuell als Blockschaltbild aus Speichern und Flüssen dargestellt. Zustandsgrößen (Speicher) akkumulieren Material- oder Informationsströme (Flüsse), Variablen und Einflüsse regeln die Flusströme. Die System Dynamics Schreibweise geht auf FORRESTER (1961), den geistigen Vater der SD Theorie, zurück. Sie ist heute eine sowohl intuitive, als auch weit verbreitete Methode zur Beschreibung dynamischer Systeme (MUETZELFELDT UND MASSHEDER 2003, S. 348). Zur Berechnung von SD Modellen werden die den Blockschaltbildern zugrundeliegenden Differenzialgleichungen in Differenzgleichungen umgeschrieben und numerisch gelöst. Wegen der ihnen zugrunde liegenden Differenzialgleichungen werden SD Modelle synonym auch als *Gleichungsbasierte Modelle* oder *Aggregierte Modelle* bezeichnet (BENDOR 2014). Der SD Ansatz aggregiert Individuen für die Simulation in homogenen Speichern. Systemverhalten in SD Modellen entsteht demnach anders als bei der ABM nicht durch interagierende Individuen, sondern Top-down, von oben herab (FORD 2009, S. 337), (SCHOLL UND PHELAN 2004, S. 1). Ursprünglich wurde der SD Ansatz nicht für die räumlich aufgelöste Modellierung konzipiert. Implizit spielten Raumdaten jedoch bereits in frühen SD Modellen eine wichtige Rolle, wie etwa in Forresters Urban Dynamics (FORRESTER 1969). VOINOV (2008, S. 365) nennt zwei Programme, die gegenwärtig eine explizite räumliche Auflösung von SD Modellen ermöglichen: Spatial Modeling Environment (SME) (MAXWELL UND COSTANZA 1997) und Simile (MUETZELFELDT UND MASSHEDER 2003). Grundsätzlich steht demnach einer Koppelung von SD und GIS nichts entgegen (vgl. auch BENDOR UND KAZA 2012, S. 115).

SD eignet sich besonders dann für die Modellierung, wenn ein System durch komplexe Rückkopplungen charakterisiert ist und der Einfluss dieser Rückkopplungen für das Systemverständnis höher bewertet wird als der Einfluss von Netzwerkstrukturen und individueller Heterogenität. Durch die Verwendung des aggregierenden SD Ansatzes kann die Systemgrenze bei gleichen Ressourcen deutlich weiter gesetzt werden als in der individuenbasierten ABM. Es können somit zusätzliche potenziell wichtige Wirkungskreise in dem Modell betrachtet werden (RAHMANDAD UND STERMAN 2008, S. 1013). Klassische Beispiele für die Anwendung des SD Ansatzes sind die Wirtschaftskybernetik und die Sozialforschung. Darüber hinaus ist SD heute jedoch eine allgemein akzeptierte Methode in der Analyse von Umweltsystemen und findet Anwendungen z.B. bei Umweltverträglichkeitsprüfungen oder im Bereich der Ressourcenwirtschaft (XU UND COORS 2012, S. 273). Für die Energiesystemmodellierung sind SD Modelle geeignet, um strategisches Verhalten und Marktimperfectionen wie Zeitverzögerungen abzubilden, weil bei SD Modellen keiner einheitlichen Zielfunktion gefolgt wird (MÖST UND FICHTNER 2009, S. 21). Beispiele hierfür sind TURAN UND YÜCEL (2014) und BIER UND FORD (2007). Weitere Anwendungsbeispiele für SD Modelle in der Energiewirtschaft sind Untersuchungen zur Ressourcenverfügbarkeit. Eine Übersicht über wichtige Modelle zu diesem Thema gibt FORREST (2006).

2.5 GEGENÜBERSTELLUNG DER MODELLIERUNGSANSÄTZE UND WAHL EINES MODELLIERUNGSANSATZES ZUR ABBILDUNG BIOMASSEDOMINIERTER ENERGIESYSTEME

Die in den Teilen 2.4.1 bis 2.4.5 diskutierten Simulationsmethoden werden in Tabelle 2-2 anhand der in Teilkapitel 2.2 beschriebenen Klassifikationskriterien zusammenfassend gegenübergestellt. Zusätzlich zu diesen Ansätzen werden zwei Hybridansätze in den Vergleich mit einbezogen. Als mögliche Hybridansätze wurden eine Verbindung von MESAP mit ZA und eine Kombination von SD mit GIS ausgewählt. Die Bildung von Hybridmodellen zur Analyse von Energiesystemen ist dann sinnvoll, wenn keine Simulationsmethode gefunden werden kann, die in von sich aus sämtliche gestellte Modellanforderungen erfüllt. In dieser Arbeit wurden die zwei beschriebenen Hybridansätze in den Vergleich aufgenommen, weil keiner der beschriebenen dynamischen Top-down Ansätze, weder MESAP noch SD, eine räumliche Modellierung ermöglicht. Der Vergleich der in Teilkapitel 2.3.2 erarbeiteten Anforderungen an ein Modell zur Analyse von biomassedominierten Energiesystemen (Siehe Tabelle 2-1) mit Tabelle 2-2 soll im Folgenden dafür verwendet werden, eine für die Analyse biomassedominierter Energiesysteme geeignete Methode zu bestimmen.

Tabelle 2-2: Evaluation verschiedener Modellierungsansätze zur Eignung für die Energiesystemmodellierung von Alichur.

Simulationsansatz	Kriterium Modellierungsansatz nach MÖST UND FICHTNER (2009, S. 15-23)	Änderungsverhalten	Zeitlich kontinuierlich	Räumlich aufgelöst	Einschränkungen bei der räumlichen Simulation	Lösungsansatz der Modellgleichungen	Modellstruktur	Betrachtungsweise
GIS	anderer	Statisch	--	Ja	Keine	--	--	--
MESAP PlaNet	OEM	Dynamisch	Nein	Nein	--	Analytisch	TP	Top-down
ZA	SM	Dynamisch	Nein	Ja	Nur NE	Numerisch	SP	Bottom-up
ABM	SM	Dynamisch	Nein	Ja	Keine	Numerisch	SP	Bottom-up
SD	SM	Dynamisch	Ja	Nein	Keine	Numerisch	SP	Top-down
MESAP mit ZA	Hybrid	Dynamisch	Nein	Ja	Nur NE	Analytisch Numerisch	TP	Top-down dominiert
SD mit GIS	Hybrid	Dynamisch	Ja	Ja	Keine	Numerisch	SP	Top-down

- NE ...Nachbarschaftseffekte
- OEM ...Optimierendes Energiesystemmodell
- SM ...Simulationsmodell
- SP ...Stark Prozessorientiert
- TP ...Teilweise Prozessorientiert

Sowohl MESAP als optimierendes Energiesystemmodell, als auch sämtliche Simulationsansätze ermöglichen eine zeitlich dynamische Simulation. Lediglich GIS kann keine zeitlichen Systemveränderungen abbilden. Zeitlich kontinuierlich simulieren nur SD sowie das Hybridmodell bestehend aus SD und GIS. Als Instrument zur Bearbeitung von Geodaten eignet sich GIS besonders für die räumliche Simulation. Auch die dynamischen Ansätze ZA und ABM sind für die Modellierung räumlicher Effekte ausgelegt. Bei der räumlichen Simulation mittels ZA gilt jedoch zu beachten, dass der Informationsaustausch im Raum nur zwischen benachbarten Zellen stattfindet. Eine solche Einschränkung gibt es bei ABM nicht. Weder MESAP noch SD sind in ihrer ursprünglichen Form für eine räumlich explizite Simulation vorgesehen. MESAP kann, beispielsweise durch Kombination mit einem ZA, zu einem räumlich aufgelösten Hybridmodell erweitert werden. Grundsätzlich wäre auch ein Hybridmodell bestehend aus MESAP und ABM denkbar, um eine räumlich aufgelöste Modellierung

zu ermöglichen. Beim SD Ansatz kann eine räumlich explizite Systembetrachtung durch Replikation des Modells in einem Zellraster erreicht werden. Die Software Simile und Spatial Modeling Environment (SME) bieten hierfür Möglichkeiten. Zur Aufarbeitung von Geodaten vor der Simulation und für die Visualisierung der Modellierungsergebnisse eignet sich ein GIS. Die räumlich explizite Simulation mittels Replikation von SD Modellen wird hier als SD-GIS Hybridansatz bezeichnet. Bei dem optimierenden Energiesystemmodell MESAP erfolgt die Lösung der zugrundeliegenden Modellgleichungen analytisch. Bei allen anderen zeitlich dynamischen Modellierungsansätzen werden numerische Lösungsverfahren angewendet. Dort können im Gegensatz zu MESAP auch Rückkopplungen im System abgebildet werden. In MESAP-ZA-Hybridmodellen werden die mit dem ZA modellierten Teilaspekte des Modells numerisch gelöst. Von den verglichenen Methoden zur Analyse von Energiesystemen ist der MESAP zugrundeliegende Ansatz am stärksten analytisch geprägt. Sowohl bei SD als auch bei ABM und ZA steht eine prozessorientierte Betrachtungsweise im Vordergrund. ABM und ZA sind klassische Bottom-up Simulationsansätze, während bei MESAP und SD Systemverhalten von der übergeordneten Systemstruktur ausgeht. Auch bei den beiden in Tabelle 2-2 verglichenen Hybridansätzen dominiert die Top-down Betrachtungsweise.

Als Top-Down Ansätze kommen grundsätzlich nur System Dynamics und MESAP für die Simulation von biomassedominierten Energiesystemen in Frage. MESAP erfüllt als spezifisches Planungswerkzeug der Energiewirtschaft sämtliche generellen Anforderungen an die Energiesystemmodellierung: Es ist zeitlich dynamisch, teilweise prozessorientiert und charakterisiert durch eine Top-down Betrachtungsweise. Weiterhin erlaubt MESAP durch die Verwendung der RES-Struktur eine sehr übersichtliche Abbildung eines betrachteten Energiesystems. Nachteile von MESAP sind die zeitlich diskrete Betrachtungsweise und ein extrem hoher Datenbedarf. Defizite treten zudem bei den speziellen Anforderungen der Simulation von Biomasseflüssen in Energiesystemen auf. MESAP als optimierendes Energiesystemmodell folgt einer vorgegebenen Zielfunktion und kann kein strategisches Verhalten abbilden. Rückkopplungen im System finden keine Beachtung und eine explizit räumlich aufgelöste Simulation ist nicht vorgesehen. KÜLL UND STÄHLY (1999, S. 1) bemerken, dass bei vielen dynamischen Systemen mit gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen den Modellvariablen „*nur noch Simulationsmodelle einsetzbar* [sind].“ Um mit MESAP dennoch in Teilaspekten räumlich aufgelöst und unter Berücksichtigung von gegen-

seitigen Abhängigkeiten zwischen den Modellvariablen simulieren zu können, müsste MESAP in einem Hybridmodell mit einem Simulationsmodell kombiniert werden. Eine vorgefertigte Schnittstelle zur Kombination mit Simulationsmodellen ist in MESAP jedoch nicht vorhanden. Daher stellt die Erstellung eines Hybridmodells bestehend aus MESAP und einem Simulationsmodell einen erheblichen Aufwand dar. Im Fall einer Kombination von MESAP mit einem ZA bestünde zudem der Nachteil, dass zentral gesteuerte Prozesse nicht abgebildet werden können. Diese sind jedoch oft charakteristisch in der Energiesystemmodellierung.

Der System Dynamics Ansatz erfüllt sämtliche in Tabelle 2-1 beschriebenen Kriterien. Der Schwerpunkt des zu erstellenden Energiemodells liegt auf dem Systemverständnis. Grundsätzlich eignet sich SD genau zu diesem Zweck. Mit SD Modellen kann strategisches Verhalten in einem imperfekten durch verschiedene Einflüsse geprägten Markt abgebildet werden (MÖST UND FICHTNER 2009, S. 21). Problematisch ist die fehlende oder implizite Betrachtung von Raum in klassischen SD Modellen. Dieser Nachteil wird durch die Verwendung einer räumlich disaggregierenden SD Software in Kombination mit einem GIS ermöglicht. Für die Abbildung biomasse-dominierter Energiesysteme ist daher ein Hybridansatz bestehend aus SD und GIS geeignet. In dieser Arbeit wird die SD Software Simile mit dem GIS Arc Info kombiniert. Simile hat gegenüber der ebenfalls in Frage kommenden SD Software SME den Vorteil, ein eigenständiges Softwarepaket basierend auf einer dem SD Formalismus nahen grafischen Programmierung zu sein. SME auf der anderen Seite stellt eher eine Schnittstelle zwischen der nicht räumlich simulierenden SD Software Stella und der Programmiersprache C++ dar (VOINOV 2008, S. 193). Für die Verwendung von SME sind somit über die Beherrschung des SD Formalismus hinaus Kenntnisse der Programmiersprache C++ notwendig. Die verwendete GIS Software Arc Info von ESRI birgt gegenüber dem open Source Programm QGIS den Vorteil, dass ESRI in Deutschland und weltweit Marktführer im Bereich der Desktop GIS ist. Zudem wurde die Firma ESRI bereits 1969 gegründet (ESRI 2014), so dass die Software Arc Info ein ausgefeiltes, vor allem aber auch in der Wissenschaft bewährtes Werkzeug ist.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird das Energiesystem der im Ost-Pamir gelegenen Ortschaft Alichur als Fallstudie mit einem Hybridmodell bestehend aus Simile und Arc Info erstellt. Das Modell wird als *Energiemodell Alichur* bezeichnet. Das *Energiemodell Alichur* bildet ein biomassedominiertes Energiesystem sowohl räumlich als auch zeitlich dynamisch ab.

3 ALICHUR (TADSCHIKISTAN), FALLBEISPIEL FÜR EIN BIOMASSE-DOMINIERTES ENERGIESYSTEM

Die Ortschaft Alichur befindet sich in der autonomen Provinz Gorno-Badakhshanskaja awtonomnaja oblast (GBAO) der zentralasiatischen Republik Tadschikistan. Die autonome Region GBAO erstreckt sich über den gesamten tadschikischen Teil des Pamir Hochgebirges. Das Pamirgebirge gliedert sich etwa entlang der östlichen geographischen Länge $72^{\circ}45'$ in West und Ost-Pamir (VANSELOW 2011, S. 25). Die Region GBAO ist untergliedert in sieben Landkreise (*rajons*) und eine kreisfreie Stadt. Der *rajon* Murghab mit der Hauptstadt Murghab erstreckt sich über den tadschikischen Ost-Pamir und ist weiter untergliedert in sechs Kommunen (*jamoats*). Die Ortschaft Alichur liegt auf $37^{\circ} 45' 05''$ nördlicher Breite und $73^{\circ} 15' 49''$ östlicher Länge im Ost-Pamir im *rajon* Murghab, *jamoat* Alichur auf einer Höhe von 3.863 m. Physiogeographisch befindet sie sich in der Alichurebene zwischen der nördlichen und der südlichen Alichurkette. Abbildung 3-1 gibt eine Übersicht über die Lage des *rajons* Murghab, des *jamoat* Alichur und der Ortschaft Alichur.

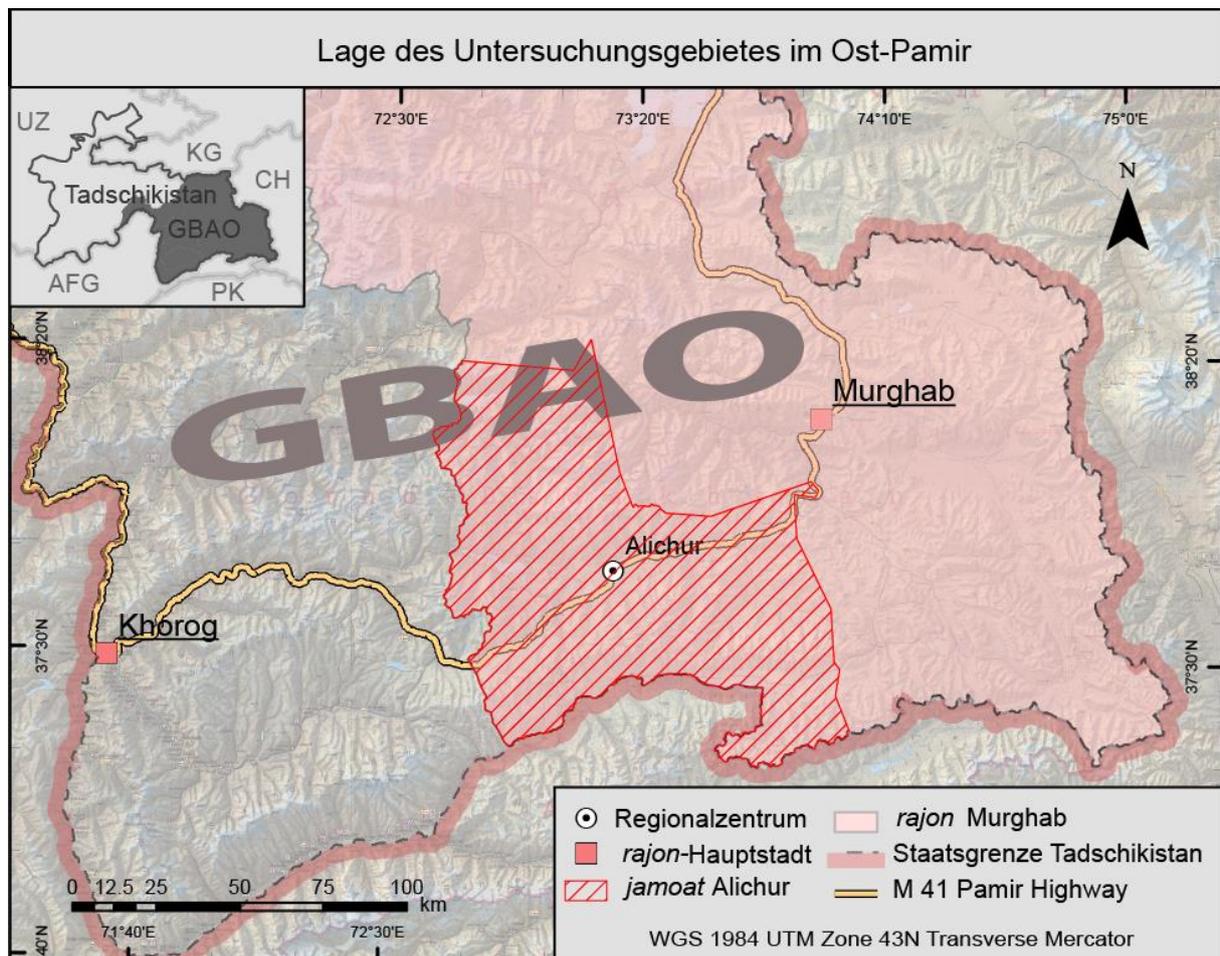


Abbildung 3-1: Lage der Ortschaft Alichur im *jamoat* Alichur, *rajon* Murghab, GBAO. Eigene Darstellung.

Mit seiner isolierten Lage im Ost-Pamir ist das Energiesystem der Ortschaft Alichur durch einen sehr geringen Anteil an Energieimporten und Energieexporten charakterisiert. Wie im gesamten Ost-Pamir spielt in Alichur die Nutzung lokaler Biomasse, zumeist Zwergsträucher und getrockneter Viehdung, gegenwärtig eine entscheidende Rolle für die Energieversorgung. Zur Datenbeschaffung für eine wissenschaftliche Untersuchung mittels Vollerhebung hat Alichur als mittelgroße Siedlung mit etwas mehr als 1.000 Einwohnern eine geeignete Größe. Für nahezu das gesamte relevante Territorium rund um den Ort Alichur liegen eine Vegetationskarte und Informationen zum Weidepotenzial aus VANSELOW (2011) vor. Diese sind für eine Modellrechnung von hohem Wert.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit soll das Energiesystem Alichurs symptomatisch für biomassedominierte Energiesysteme im Allgemeinen als Fallstudie betrachtet werden. Hierzu wird der in Teilkapitel 2.5 dargelegte Modellierungsansatz einer Kombinierten SD-GIS Modellierung anhand des Fallbeispiels praktisch umgesetzt. In diesem Kapitel findet einer Literaturanalyse (Teilkapitel 3.1), gefolgt von einer detaillierten Beschreibung der Geographie Alichurs in Teilkapitel 3.2, statt. In Teilkapitel 3.3 wird eine Übersicht über das Energiesystem Alichurs gegeben.

3.1 LITERATURANALYSE

Einen Überblick über die Situation im Untersuchungsgebiet und mögliche für die Energiesystemanalyse relevante Prozesse ergibt eine Literaturanalyse. Der tadschikische Ost-Pamir ist eine in der Fachliteratur gegenwärtig wenig beschriebene Region. Es existieren russischsprachige wissenschaftliche Abhandlungen aus Zeiten der Zugehörigkeit Tadschikistans zur Sowjetunion, sowohl über die Energieversorgung (u.a. KLEANDROV 1974), als auch über Ökologie und Viehwirtschaft des (Ost-) Pamir (u.a. TSATSENKIN UND KASACH 1970, YUSUFBEKOV UND KASACH 1972, STESHENKO 1956). Während KLEANDROV (1974) allenfalls für ein Verständnis der historischen Energieversorgung in der Region und damit des Transformationsprozesses direkt nach der Unabhängigkeit Tadschikistans taugt, sind die ökologischen Parameter aus den naturwissenschaftlichen Abhandlungen teilweise für eine Systembeschreibung geeignet. Wegen der isolierten Lage des Untersuchungsgebietes kann davon ausgegangen werden, dass die Faktoren Ökologie, Beweidung und Energienutzung eng miteinander verknüpft sind. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden Parameter für ein Energiemodell von Alichur mitunter aus diesen historischen

Quellen hergeleitet. Von 1991 bis Anfang der 2000er Jahre fand wegen des tadschikischen Bürgerkrieges und der sich daran anschließenden chaotischen Verhältnisse nahezu keine Forschung in der Region statt. Wissenschaftliche Publikationen mit Bezug zum Pamir sind aus dieser Zeit daher nicht verfügbar.

Seit Anfang der 2000er Jahre wird im Pamir wieder vermehrt wissenschaftlich gearbeitet. Die Forschung im Pamir wurde seither auch durch Entwicklungszusammenarbeit finanziert. In den Jahren 2002 bis 2003 entstanden im Rahmen des von der Swiss Agency for Development finanzierten *Pamir Strategy Project* (BREU UND HURNI 2003) einige wissenschaftliche Arbeiten, vor allem Diplomarbeiten, zu den Themen *Beweidung, Ökologie und Lebensstrategien im Pamir* (u.a. DOMEISEN 2003). Indirekt steht auch die im Zusammenhang mit den Themen *Energie und Beweidung* oft zitierte Diplomarbeit *Energy for Gorno Badakhshan: Hydropower and the cultivation of firewood* (DROUX UND HOECK 2004) im Zusammenhang mit diesem Projekt. Der Arbeit von DROUX UND HOECK (2004) lässt sich ein sehr guter Überblick über die Energieproblematik der Bevölkerung des tadschikischen Pamir entnehmen. Ergänzt wird die Diplomarbeit von DROUX UND HOECK (2004) durch einen Zeitschriftenaufsatz zum Energiekonsum und die damit einhergehenden Degradationserscheinungen im West-Pamir aus dem Jahr 2007 (HOECK ET AL. 2007). Dieser lässt auch Schlüsse auf die Situation im Ost-Pamir zu. Ebenfalls aus Mitteln der Entwicklungszusammenarbeit finanziert wurde das von 2008 bis 2014 von der Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) durchgeführte Projekt *Sustainable Management of Natural Resources in Gorno Badakhshan* (GIZ 2008). Auch in diesem Projekt entstanden Schriften, vor allem Projektberichte, mit Relevanz für das Thema *Energie* im Pamir. Besonders relevant für diese Arbeit ist der Projektbericht des Subprojektes *Biomass Energy Use in GBAO, Tajikistan* (GTZ 2008). Generell ist die Arbeit der GIZ jedoch nur begrenzt als Datengrundlage für eine wissenschaftliche Betrachtung der Problematik geeignet. Als staatliche Entwicklungszusammenarbeitsorganisation ist die GIZ auf die Ausführung der mit ihrem Auftraggeber vereinbarten technischen Zusammenarbeit angelegt. Klassische Forschung wird mit den Mitteln der GIZ nicht betrieben. Dementsprechend bleiben die Projektberichte der GIZ, was den wissenschaftlichen Anspruch angeht, eher oberflächlich und sind für diese Arbeit hauptsächlich als allgemeine Einführung in die Problematik geeignet. Detaillierte Erkenntnisse auf dem Bereich Beweidung bietet hingegen die Arbeit *The high-mountain pastures of the Eastern Pamir (Tajikistan). An evaluation of the ecological basis and the*

pasture potential von VANSELOW (2011). Diese Arbeit wurde im Zuge des VolkswagenStiftung-geförderten Projekts *Transformation Processes in the Eastern Pamir of Tajikistan. Changing Land Use Practices, Possible Ecological Degradation and Sustainable Development* von 2007 bis 2010 erstellt. Zwei Diplomarbeiten von KRECZI (2011) und BIMÜLLER (2009) befassen sich mit sozialen Aspekten des Transformationsprozesses im Ost-Pamir und mit den Böden der Region und stehen ebenfalls im Zusammenhang mit diesem Projekt. In Folge des Projektes entstand zudem eine wissenschaftliche Veröffentlichung zum Thema *Tereskensyndrom*, die im Ost-Pamir verortet ist und sich mit der Degradation von Weideflächen durch übermäßige Brennstoffgewinnung widmet (KRAUDZUN ET AL. 2014). Diese Veröffentlichung beschäftigt sich kritisch mit dem gegenwärtig unzureichenden Wissensstand über relevante Wirkungsmechanismen zwischen thermischer Biomassennutzung, Beweidung und Degradation im Ost-Pamir. Auch bedeutend für die Energiesystembetrachtung des Ortes Alichur ist die Arbeit *Energy and Land Use in the Pamir-Alai Mountains* von FÖRSTER ET AL. (2011). Diese Abhandlung vergleicht Energienutzungs- und Rohstoffverbrauchsmuster von fünf Orten im Pamir und Alai. Einer der behandelten Orte, Bash-Gombe, befindet sich in direkter Nachbarschaft zu Alichur.

Neben der vom Ausland finanzierten Forschung betreiben auch die tadschikischen Wissenschaftler des Pamir Biologischen Instituts in Khorog Forschung zu den Wechselwirkungen zwischen Beweidung, thermischer Biomassennutzung und dem Ökosystem des Pamir. Das Pamir Biologische Institut verfügt über eine Forschungsstation in Chechekty, gelegen im Ost-Pamir. Leider ist diese jedoch in einem so schlechten Zustand, dass dort gegenwärtig keine Forschung betrieben wird. AKNASAROV (2012), bis 2014 Leiter des Pamir Biologischen Instituts, fasst seine Forschungserkenntnisse der letzten Jahre in dem Bericht *Pastbishcha vostochnogo pamira i priyemy ikh uluchsheniya* (Die Weiden des östlichen Pamir und Möglichkeiten ihrer Verbesserung) zusammen. Dieser Bericht beinhaltet interessante Anknüpfungspunkte an die sowjetische Forschung vor 1991 und behandelt auch Aspekte der gegenwärtigen Energienutzung im Ost-Pamir. Insgesamt, werden in dem Bericht wesentliche wissenschaftliche Standards jedoch nicht kontinuierlich eingehalten, so dass einige Erkenntnisse des Berichtes nicht überprüfbar sind.

Alles in allem vermittelt die Literaturrecherche einen groben Überblick über die Energieproblematik im Ost-Pamir. Potenziell wichtige Wirkungsmechanismen im Energiesystem werden angesprochen, jedoch zumeist nur oberflächlich behandelt.

Bei den aktuellen Publikationen zum Thema handelt es sich beinahe ausnahmslos um Projektberichte der Entwicklungszusammenarbeit und Diplomarbeiten. Besonders die Diskussion um das *Tereskensyndrom* verläuft in der Literatur, wie in KRAUDZUN ET AL. (2014) erwähnt, weitestgehend abseits einer ausreichend wissenschaftlich fundierten Basis. Für eine Analyse des Energiesystems Alichurs ist es somit zwingend notwendig, zusätzlich zur existierenden Literatur vor allem auch quantitative Daten vor Ort zu erheben.

3.2 DIE GEOGRAFIE VON ALICHUR

Die Geographie von Alichur ist im Wesentlichen beeinflusst durch die isolierte Hochgebirgslage im Ost-Pamir. Klima, Böden, Vegetation und zu Teilen auch die Geschichte und gegenwärtige Situation der Ortschaft sind Produkt dieser extremen Lage. In diesem Teilkapitel werden diese geographischen Elemente näher beschrieben, um eine Basis für die Analyse des lokalen Energiesystems zu schaffen.

3.2.1 MORPHOLOGIE UND KLIMA

Während der West-Pamir charakterisiert ist durch ein bewegtes Relief mit engen Tälern und Gipfeln von bis zu 7.495 m Höhe (Pik Ismoil Somoni), ist der Ost-Pamir geprägt von weiten ariden Hochebenen auf 3.700 m bis 4.000 m Höhe mit Gipfeln von zumeist zwischen 5.000 m und 5.500 m (YUSUFBEKOV UND KASACH 1972, S. 7). Er ist im Westen, Norden und Osten von über 7.000 m hohen, im Süden von über 6.000 m hohen Gebirgszügen begrenzt. Diese halten feuchte Luftmassen von seinem inneren Teil fern (WALTER UND BRECKLE 1986, S. 328). TSATSENKIN UND KASACH (1970, S.8) geben den mittleren Jahresniederschlag auf den Ebenen des Ost-Pamir mit 60 mm bis 120 mm an. Die geringen Niederschläge auf den Ebenen nehmen jedoch mit zunehmender Höhe deutlich zu. TSATSENKIN UND KASACH (1970, S.8) verweisen auf ein an der Pamir Biologischen Station (3.800 m) gemessenes Höhenprofil von Niederschlagsmessungen. Hier wurden in 3.800 m 60 mm bis 100 mm, in 4.200 m 180 mm bis 250 mm und in 4.700 m 300 bis 400 mm Niederschlag gemessen. In den obersten Zonen der Berge fallen bis zu 500 mm Niederschlag pro Jahr (YUSUFBEKOV UND KASACH 1972, S. 10). Auch RAJKOVA (1930) (in STESHENKO 1956, S. 15-16) stellt fest, dass der über einen Zeitraum von fünf Jahren gemessene mittlere Jahresniederschlag von Murghab (3.612 m) mit 61 mm (Minimum 21 mm, Maximum 159 mm) deutlich niedriger ausfällt als der an der etwa 200 m höher gelegenen Pamir Biologischen Station. Hier gibt er einen Wert von etwa 100 mm (Mini-

mum 40 mm, Maximum 150 mm) für den 11-jährigen Zeitraum von 1941 bis 1951 an. Nach VANSELOW (2011, S. 29) besteht zusätzlich zum Höhen-Niederschlagsgradienten ein West-Ost Niederschlagsgradient auf den Ebenen des Ost-Pamir. Auch wenn konkrete Niederschlagsmessungen für Alichur fehlen, kann aufgrund der Lage von Alichur westlich von Murghab und der Höhe der Ortschaft etwa 250 m über Murghab davon ausgegangen werden, dass die jährliche Niederschlagsmenge in Alichur deutlich größer ist als in Murghab. Sie könnte demnach etwa bei 120 mm, am oberen Ende der von TSATSENKIN UND KASACH (1970, S. 8) angegebenen Spanne, liegen. Über das Jahr verteilt fällt im Ost-Pamir ein Großteil der Niederschläge in den Frühjahrs- und Sommermonaten, weniger in den Wintermonaten und am Wenigsten im Herbst (STESHENKO 1956, S. 16). Die langjährige Jahresmitteltemperatur in Murghab geben YUSUFBEKOV UND KASACH (1972, S. 8) mit -1 °C an. Für Alichur liegen Temperaturmesswerte von Oktober 2012 bis Oktober 2014 von ZANDLER (unveröffentlicht) vor. Die Jahresmitteltemperatur liegt in diesem Zeitraum bei $-2,8\text{ °C}$. Die gemessene Maximaltemperatur ist $25,7\text{ °C}$, die Minimaltemperatur $-41,5\text{ °C}$. Abbildung 3-2 zeigt das Klimadiagramm von Alichur basierend auf den von ZANDLER (unveröffentlicht) erhobenen Werten. Die Luftfeuchte in Alichur ist mit 29 % bis 50 % im Sommer (Mai bis September) und 40 % bis 71 % im Winter (Oktober bis April) vergleichsweise gering. Der Verlauf der in Abbildung 3-2 dargestellten relativen Luftfeuchte spiegelt die beschriebene saisonale Niederschlagsverteilung teilweise wider. So wurde die niedrigste Luftfeuchtigkeit mit 27 % im September, dem Monat mit dem vermutlich niedrigsten Niederschlag, gemessen. Ebenso wurden in den niederschlagsreicheren Frühjahrsmonaten Luftfeuchtigkeiten ermittelt, welche über dem ganzjährigen Mittel liegen. Der Verlauf der Temperaturkurve zeigt einen Peak bei $11,3\text{ °C}$ im Juli, während der Monat Januar mit durchschnittlich $-21,5\text{ °C}$ der kälteste Monat im Untersuchungsgebiet ist.

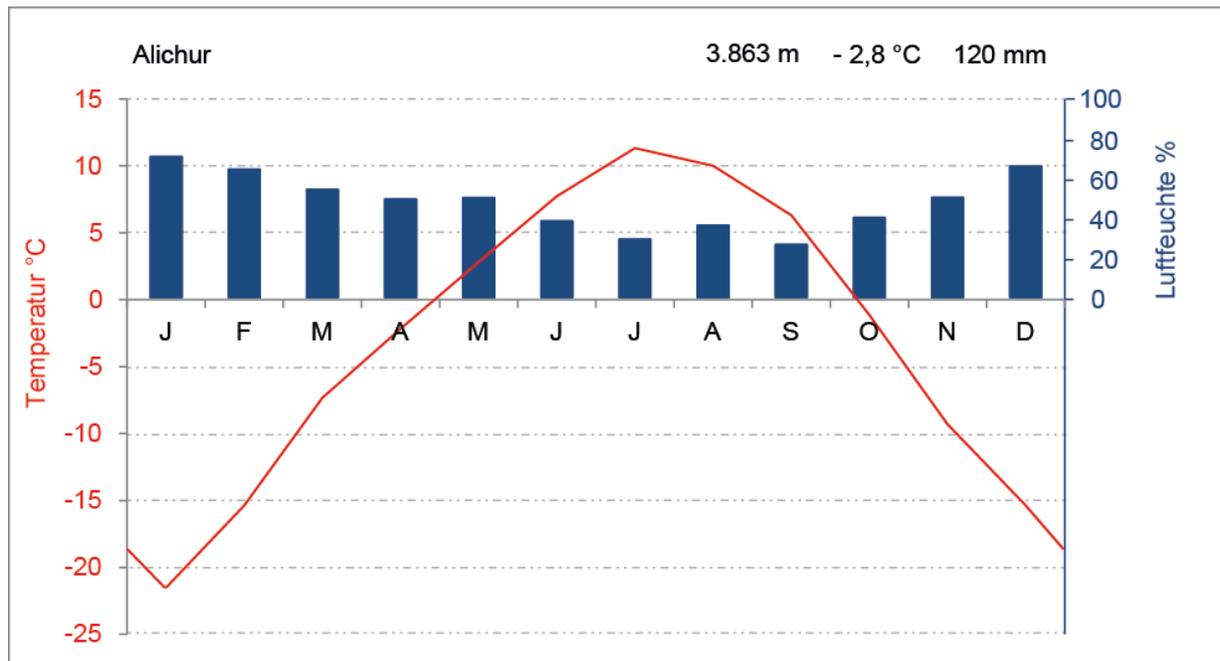


Abbildung 3-2: Klimadiagramm Alichur. Eigene Darstellung. Datengrundlage: ZANDLER (unveröffentlicht).

3.2.2 BÖDEN

Die Pedogenese des Ost-Pamir ist geprägt durch das aride Klima und die vorherrschenden ganzjährig niedrigen Temperaturen. Extreme Trockenheit und niedrige Temperaturen führen zu geringer biologischer Aktivität, die kaum Bodenbildung zulässt. Die Böden des Ost-Pamir sind daher größtenteils so wenig entwickelt, dass das geologische Ausgangsmaterial die Eigenschaften dieser maßgeblich bestimmt.

Der Pamir befindet sich in einer geologisch sehr aktiven Region. Es treffen hier mehrere tektonische Platten aufeinander. Dies führt zu einer starken seismischen Aktivität (BREU UND HURNI 2003, S. 9). KHAIN (1994, S. 223) teilt den Pamir, nach SHVOL'MAN (1977), entlang seiner Tektonik in fünf geologische Zonen ein: *Nordpamir*, *Zentralpamir*, *Rushan-Pshart Zone*, *Südwestpamir* und *Südostpamir*. Das *jamoat* Alichur zeichnet sich durch eine sehr große geologische Heterogenität aus. Der Norden des *jamoat* befindet sich in der *Rushan-Pshart Zone*, der Osten in der *Südost Zone* und der Westen in der *Südwest Zone*. Die *Rushan-Pshart Zone* besteht aus einem ehemaligen Grabenbruch, welcher an keiner Stelle breiter als 20 km ist und im Paläozoikum die Kontinentalblöcke des Zentral- und des Süd-Pamir trennte (KHAIN 1994, S. 227). Er setzt sich im Norden aus terrestrischen paläozischen Sedimenten, im Zentrum aus einer Übergangszone bestehend aus marinen mesozoischen Sedimenten und im Süden aus ophiolitischen Serien zusammen. Der Südwest-Pamir ist charakterisiert durch präkambische Metamorphite und jurassisch-miozänen Plutonitkomplexe. Der Südost-Pamir hingegen wird von karbonathaltigen Sedimentablagerungen

dominiert, welche aus dem Becken des Südwest-Pamir ausgeblasen wurden (BREU UND HURNI 2003, S. 9). BIMÜLLER (2009) hat auf Grundlage von NEDZVEDSKY (1968), KHAIN (1994) und eigenen Erhebungen eine Karte zur Geologie des Pamir erstellt, welche Grundlage der Abbildung 3-3 ist. Die geologische Karte allein eignet sich jedoch nicht zur Bestimmung der lokalen Standortsbedingungen, weil die Geologie der Region stark tektonisch verworfen und morphologisch überformt ist.

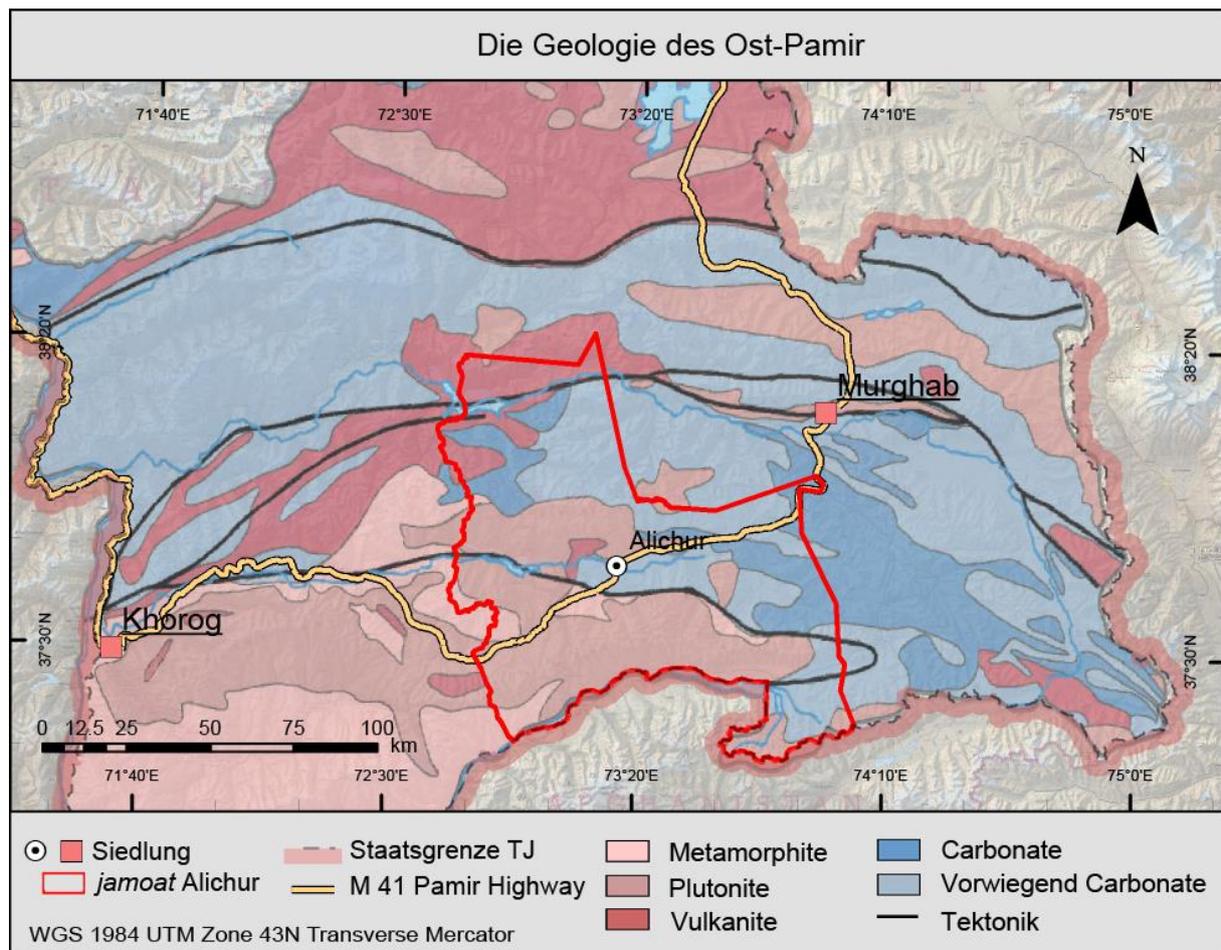


Abbildung 3-3: Geologie des Ost-Pamir. Quelle: BIMÜLLER (2009, S. 18), verändert.

Der Großteil der Böden im Untersuchungsgebiet ist aufgrund der vorherrschenden klimatischen Bedingungen wenig entwickelt. Diese Böden zeichnen sich durch eine geringe Mächtigkeit, einen hohen Skeletanteil und einen geringen Humusgehalt aus. Solche Böden finden sich vor allem entlang von Hängen und Bergkuppen. Einzig an den Flussläufen akkumulieren sich nennenswerte Mengen an Biomasse. Hier ist die Biomasseproduktion wegen der zusätzlichen Wasserversorgung und der, relativ zum Rest des Gebietes, höheren Temperatur am Größten. Die absolut jedoch nach wie vor sehr niedrigen Temperaturen lassen eine Zersetzung der Streu kaum zu. Abbildung 3-4 zeigt die Verteilung der im *jamoat* Alichur vorherrschenden Böden. Die

Karte beruht auf einer Darstellung aus BIMÜLLER (2009) nach KERZUM (1968). Das Untersuchungsgebiet ist demnach charakterisiert durch Wüstenböden in den Tälern südlich von Alichur und in der Ebene im Westen der Ortschaft. Wüstensteppenböden befinden sich in den Tälern nördlich von Alichur. Vereinzelt sind Quellrasen- und Sumpfböden entlang des Flusses Alichur zu finden. Ein großer Teil des *jamoat* Alichur wird zudem von Schnee, Eis und Geröll bedeckt. BIMÜLLER (2009, S. 110–115) identifiziert im Rahmen einer Feldstudie sechs Bodentypen nach der World Reference Base for Soil Resources (WRB) Klassifikation in den *jamoats* Murghab und Alichur: *Arenosole*, *Leptosole*, *Regosole*, *Chernozeme*, *Kastanozeme* und *Cambisole*.

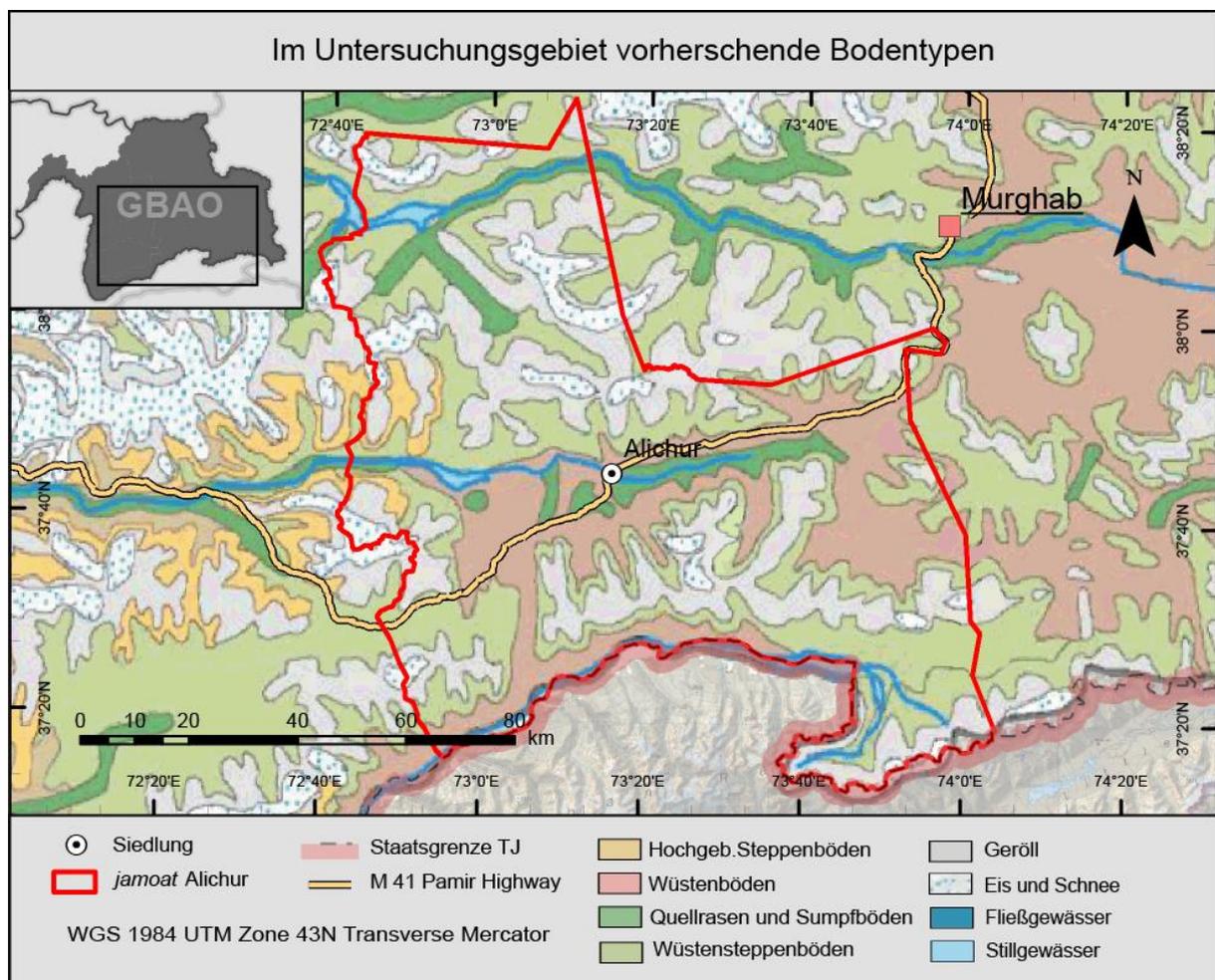


Abbildung 3-4: Verteilung der im Untersuchungsgebiet vorherrschenden Böden. Quelle: BIMÜLLER (2009, S. 24), verändert.

Arenosole sind sandige Böden ohne Profildifferenzierung. Sie kommen auf silikatreichem Ausgangsmaterial vor (ZECH ET AL. 2014, S. 70). Dieses Ausgangsmaterial wird vor allem in der geologischen Zone des Südost-Pamir vorgefunden. BIMÜLLER (2009, S. 110) beschreibt eine Probe aus dem Bash-Gombez Tal südöstlich von Alichur. *Leptosole* sind flachgründige, sehr skelettreiche azonale Böden, die hauptsächlich an Hängen vorkommen. Sie repräsentieren Initialphasen der Bodenbildung oder durch Erosion bedingte Degradationsstadien (ZECH ET AL. 2014, S. 112). Ihre Verbreitung im Untersuchungsgebiet dürfte in etwa der Ausdehnung der Wüstenböden in den Tälern südwestlich von Alichur in Abbildung 3-4 entsprechen. *Regosole* weisen, wie *Leptosole*, nur initiale Pedogenese auf, gründen im Unterschied zu diesen jedoch auf Lockergestein (ZECH ET AL. 2014, S. 114). Sie sind im Untersuchungsgebiet vermutlich auf der Alichurebene, dort wo keine Quellrasen vorhanden sind, anzufinden. *Chernozeme* befinden sich unter den Quellrasen entlang des Alichurflusses. Sie sind charakterisiert durch eine starke Humusanreicherung und basische Bedingungen (ZECH ET AL. 2014, S. 42). Die Verbreitung der *Chernozeme* im Untersuchungsgebiet entspricht in etwa derer der Quellrasen- und Sumpfböden. *Kastanozeme* sind flachgründiger und humusärmer als *Chernozeme* (ZECH ET AL. 2014, S. 44). Sie sind eher an Hängen verbreitet und sind im Ost-Pamir von Alpinen Matten bedeckt (LEYER UND WESCHE 2007, S. 114). Es wird angenommen, dass *Kastanozeme* im Untersuchungsgebiet nur sehr vereinzelt vorkommen und als Bodentyp eine untergeordnete Bedeutung spielen. *Cambisole* sind durch den Prozess der Verbraunung charakterisierte Böden. Sie sind vorwiegend mit *Regosolen* und *Leptosolen* vergesellschaftet (ZECH ET AL. 2014, S. 28).

3.2.3 VEGETATION

Die Vegetation des Ost-Pamir ist in erster Linie durch das extreme Hochgebirgsklima bedingt, welches keine höhere Vegetation zulässt. Die bestimmenden Größen sind Temperatur und Wasserverfügbarkeit. Die Temperaturen im Ost-Pamir erlauben Vegetationswachstum nur in einer relativ kurzen Periode. Die Vegetationsperiode dauert, je nach Höhenlage, von zwischen Mitte April und Anfang Mai bis September (SAMIMI ET AL. 2011, S. 3). Für die Verfügbarkeit von Wasser spielt neben den spärlichen Niederschlägen besonders das Oberflächenwasser eine wichtige Rolle. Die Zunahme der Niederschläge in größeren Höhen werden durch die sinkenden Temperaturen überlagert (SAMIMI ET AL. 2011, S. 3). Laut AGAKHANJANZ UND BRECKLE (2004, S. 154) ist der Ost-Pamir von einer Artemisia-Ceratoides-Kryophytenwüste bedeckt.

Die dominierenden Pflanzenarten sind hier die Zwergsträucher *Krascheninnikovia ceratoides* (*teresken*) und *Artemisia spp.* (*shyvak*). STANYUKOVICH (1973), zitiert in WALTER UND BRECKLE (1986, S. 331), erwähnt eine Untergliederung der Vegetation in zwei unscharf voneinander getrennte Höhenstufen, über denen nahezu keine Vegetation mehr vorkommt: Eine *subalpine Stufe* (3500 m bis 4200 m) und eine *alpine Stufe* (4200 m bis 4700 m). Die *subalpine Stufe* ist von einer *teresken*-Wüste, oft mit *shyvak*, seltener mit Polsterpflanzen oder Gräsern bedeckt. In der *alpinen Stufe* herrschen Krautpflanzen, bei höheren Niederschlägen auch Polsterpflanzen vor (STANYUKOVICH (1973), zitiert in WALTER UND BRECKLE 1986, S. 331). Aufgrund der widrigen Wuchsbedingungen spielt die landschaftliche Heterogenität für die Vegetation des Pamir eine besondere Rolle. Es ergeben sich, je nach vorherrschendem Mikroklima, auch unabhängig von der Höhenzonierung sehr uneinheitliche Vegetationsmuster (AGAKHANJIJANZ UND BRECKLE 2004, S. 152).

VANSELOW (2011) hat im Zuge seiner Arbeit *The high mountain pastures of the Eastern Pamir (Tajikistan)* Vegetationsaufnahmen im *jamoat* Alichur und dem östlich daran angrenzenden *jamoat* Kona Kurghan durchgeführt. Auf 212 Einzelflächen wurden sämtliche vorkommende Pflanzenarten bestimmt. Mittels Clusteranalyse wurden aus diesen Daten sechs Vegetationsklassen (Klassen a bis e) gebildet. Zusätzlich wurden ökologische Parameter wie Bedeckungsgrad und maximale Wuchshöhe in den Einzelflächen aufgenommen. Die Vegetationsklassen a) bis d) sind durch die Dominanz des Zwergstrauches *Krascheninnikovia ceratoides* charakterisiert. Diese Vegetationsklassen weisen eher geringe Bedeckungsgrade auf, wobei der größte Anteil der Bedeckung durch Zwergsträucher zustande kommt. Die Vegetationsklassen e) und f) sind von Seggen, Gräsern und Krautpflanzen bestimmt und weisen relativ hohe Bedeckungsgrade von bis zu 65 % auf. Folgende Vegetationsklassen wurden ermittelt:

a) Wüste

Zeigerarten dieser Vegetationsklasse sind Weideunkräuter wie *Zygophyllum obliquum* und *Christolea crassifolia*. Zwergsträucher kommen relativ zu den anderen Zwergstrauch-Vegetationsklassen (Klassen b) bis d) mit geringem Bedeckungsgrad vor (3 %). Der Gesamtbedeckungsgrad ist mit etwa 5 % sehr gering.

b) Zwergstrauchwüste

Hier sind *Artemisia rhodantha* und *Krascheninnikovia ceratoides* besonders häufig. Der Bedeckungsgrad der Zwergsträucher ist mit ca. 7,5 % höher als der der Wüste. Die Gesamtbedeckung beträgt etwa 11 %.

c) Zwergstrauch-Polstersteppe (Tereskentyp)

Krascheninnikovia ceratoides Zwergsträucher und *Acantholimon diapensioides* Polster zusammen mit Gräsern wie *Poa attenuata* dominieren in dieser Vegetationsklasse. Der Gesamtbedeckungsgrad beträgt 22 %, der Bedeckungsgrad der Zwergsträucher 7,5 %.

d) Zwergstrauch-Polstersteppe (Artemisiatyp)

Auch diese Vegetationsklasse zeichnet sich durch die Dominanz von Zwergsträuchern, Polsterpflanzen und Gräsern aus. Hier kommt im Unterschied zur Vegetationsklasse c jedoch vorwiegend der Zwergstrauch *Artemisia leucotricha* vor. *Krascheninnikovia ceratoides* und *Acantholimon diapensioides* treten ebenfalls in dieser Vegetationsklasse auf. Sie erreichen im Durchschnitt einen Bedeckungsgrad von 14,5 %. In Summe erreichen alle Pflanzen in dieser Vegetationsklasse eine Bedeckung von 25,5 %.

e) Quellrasen

Zeigerarten für Quellrasen sind neben den drei Seggenarten *Carex pseudofoetida*, *Kobresia royleana* und *Carex melanantha* die Krautpflanzen *Taraxacum spec.*, *Oxytropis glabra*, *Poa pratensis* und *Potentilla multifida*. Quellrasen weisen im Durchschnitt 63 % Bedeckung auf.

f) Alpine Matten

Auch die Klasse der Alpinen Matten wird von Seggen dominiert, jedoch mit geringerem Bedeckungsgrad als auf Quellrasen. Die Vorkommen der Krautpflanzen und Gräser *Lloydia serotina*, *Smelowskia calycina*, *Leontopodium ochroleucum*, *Draba altaica* und *Potentilla pamirica* sind Zeigerarten für die Abgrenzung von Alpinen Matten zu Quellrasen. In Summe erreichen Alpine Matten einen durchschnittlichen Bedeckungsgrad von 65 %.

Ein Vegetationsmodell für das gesamte Untersuchungsgebiet errechnet VANSELOW (2011) mittels Random Forest Algorithmus. Dabei wurden die Daten aus den Feldproben mit verschiedenen Einflussvariablen wie z.B. Topographie, Spektraldaten, Niederschlag, geographischer Rechtswert, welche aus Fernerkundungsdaten bezogen wurden, verrechnet (VANSELOW 2011, S. 91). Hier spielten RapidEye Satellitendaten eine entscheidende Rolle (BALCKBRIDGE AG 2014). Diese waren zum Zeitpunkt der Arbeit jedoch nur für einen Ausschnitt des betrachteten Untersuchungsgebietes verfügbar, so dass der westliche Teil des *jamoat* Alichur in dieser Vegetationskarte keine Beachtung findet. Abbildung 3-5 zeigt die Abdeckung des *jamoat* Alichur mit VANSELOWS (2011, S 91) Vegetationskarte (farbiger Bereich).

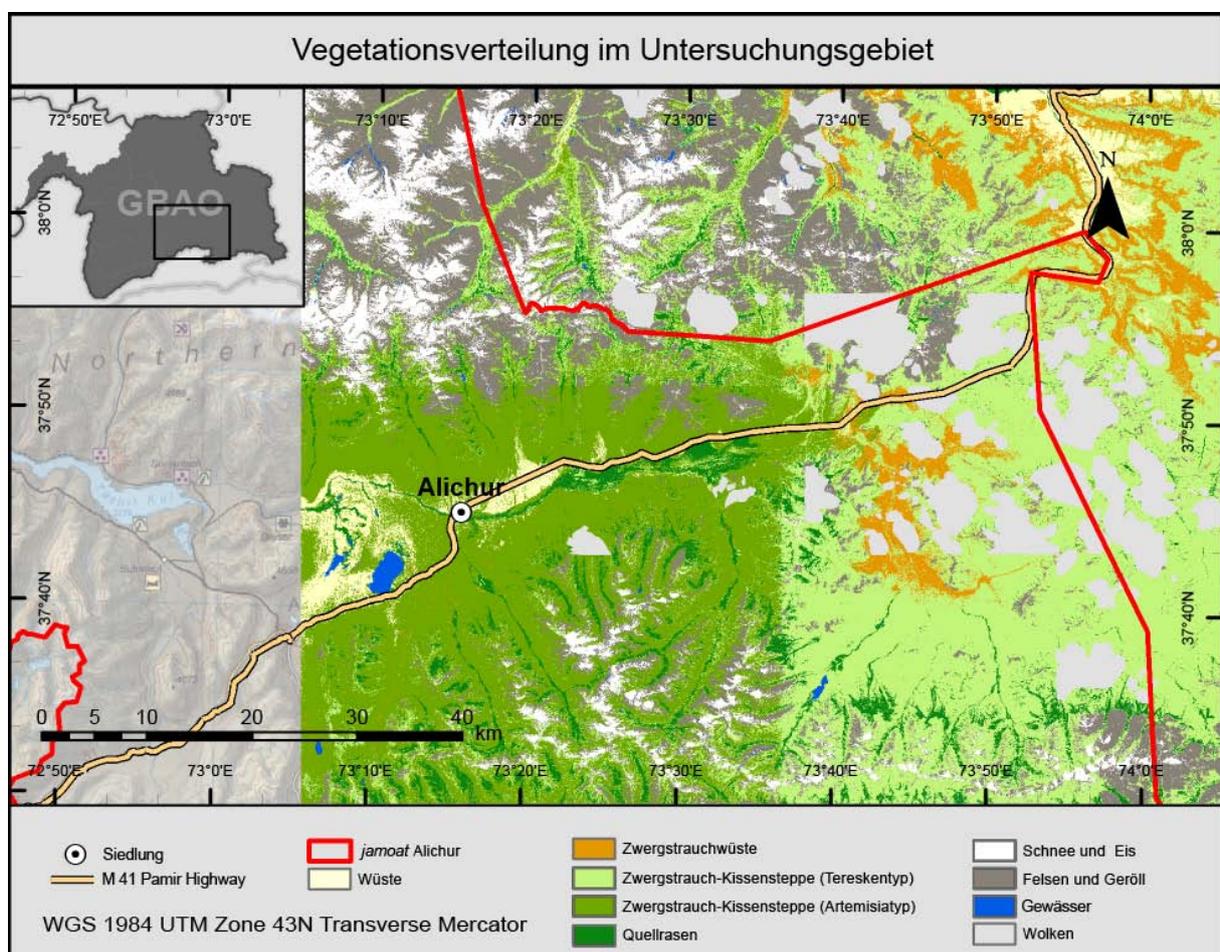


Abbildung 3-5: Vegetationsverteilung im *jamoat* Alichur nach VANSELOW (2011). Eigene Darstellung.

Das *jamoat* Alichur ist dominiert von Zwergstrauch-Polstersteppe (Artemisiatyp), welche sowohl große Teile der Alichurebene, als auch die nördlichen und südlichen Seitentäler dieser bedeckt. Im Schwämbbereich des Alichurflusses, der das *jamoat* von Ost nach West durchfließt, herrschen Quellrasen vor. Etwas westlich und östlich von Alichur sind Flächen von Wüste bedeckt. Die extremen Höhenlagen nördlich von

Alichur sind weitestgehend vegetationslos. Ganz im Osten des *jamoat* wird die Zwergstrauch-Polstersteppe (Artemisiatyp) von Zwergstrauch-Polstersteppe (Tereskentyp) abgelöst. Hier herrscht vereinzelt auch Zwergstrauchwüste vor. Alpine Matten finden sich nicht auf relevanten Flächengrößen im *jamoat* Alichur.

3.2.4 GESCHICHTLICHER HINTERGRUND

Ende des 19. Jahrhunderts gelangte die Region des heutigen GBAO unter den Einfluss des Russischen Kaiserreichs. 1924 wurde Tadschikistan als autonome Sowjetrepublik und 1925 die autonome Provinz GBAO gegründet. Die Grenzziehung Tadschikistans orientierte sich an ethnischen Zugehörigkeiten der lokalen Bevölkerung. Dabei sollte die Sowjetrepublik Tadschikistan vorrangig Heimat der iranisch-sprechenden Bevölkerung der UdSSR sein (KREUTZMANN 2002, S. 36). Tatsächlich war eine klare Grenzziehung zwischen den Ethnien nicht möglich, so dass beispielsweise im Ost-Pamir die Kirgisen, ein Turkvolk, die Bevölkerungsmehrheit stellen. Bis zur Gründung der Tadschikischen SSR lebte die Bevölkerung des Ost-Pamir, abgesehen von dem russischen Garnisationsposten *Pamirski Post* nahe Murghab, ausschließlich nomadisch. Während der Sowjetherrschaft setzte eine rasante Entwicklung des Pamir ein, welche begleitet wurde von einem Programm zur Sesshaftmachung der nomadisch lebenden Bevölkerung. Von 1931 bis 1934 wurde der Pamir Highway vom kirgisischen Osch bis nach Khorog quer durch den Ost-Pamir gebaut. Mit dem Pamir Highway verbunden war ein Netz an Infrastruktur unter anderem von Straßenmeistereien und Übernachtungsmöglichkeiten. Die Ortschaft Alichur entwickelte sich aus solch einer Versorgungsstation für die Reisenden auf dem Pamir Highway.

Ab Ende der 30er Jahre erfolgte die Elektrifizierung des Ost-Pamir, infolge derer 1940 das erste Wasserkraftwerk der Region ans Netz ging. Strom wurde seither hauptsächlich fürs Kochen und für Kleinelektrogeräte verwendet. In Alichur wurde Strom mit Dieselgeneratoren erzeugt und war bis zum Zerfall der UdSSR nur zu bestimmten Tageszeiten verfügbar (KURBONBEKOV 2013). Zum Heizen wurden im Ost-Pamir bis Anfang der 60er Jahre vornehmlich getrockneter Dung und Zwergsträucher verwendet. Diese Energieträger wurden bereits von der nomadischen Bevölkerung vor der Zeit der Sowjetherrschaft gebraucht. Der neue sesshafte Lebensstil und die seit der Gründung der Tadschikischen SSR anwachsende Bevölkerung des Ost-Pamir führte bis Anfang der 60er Jahre zu Degradationserscheinungen an den

lokalen Zwergstrauchbeständen und damit verbunden mutmaßlich zu einem Rückgang der Weidekapazität. Wirtschaftlich war der Ost-Pamir innerhalb der UdSSR vor allem für die Weideviehhaltung von Bedeutung. Als Reaktion auf die mutmaßliche Degradation der Weidekapazität und der damit einhergehenden Gefahr für die lokale Viehwirtschaft erfolgte im Jahr 1961 durch das Zentralkomitee der kommunistischen Partei ein Verbot der thermischen Nutzung von Zwergsträuchern in den Siedlungen des Ost-Pamir (KRAUDZUN ET AL. 2014, S. 53). Nicht betroffen von diesem Verbot waren lediglich die mobilen Schäfer auf den Weiden. Zusätzlich zu dem Verbot wurde mit der Gründung eines Kohlefonds, von welchem die Bewohner des Ost-Pamir Kohle zu subventionierten Preisen einkaufen konnten, Kohle als Energieträger eingeführt. Als Konsequenz ging ab 1961 der Verbrauch von Zwergsträuchern im Ost-Pamir auf das Ausmaß von vor der russischen Herrschaft zurück (KRAUDZUN ET AL. 2014, S. 53). ZIBUNG (2002) und KLEANDROV (1974) (in HOECK ET AL. 2007, S. 54) schreiben, dass während der späten Sowjetherrschaft 96 % der im Ost-Pamir verbrauchten Energieträger importiert wurden. Dieser Zustand änderte sich abrupt mit der Unabhängigkeit Tadschikistans. Ab 1992 setzten die Nahrungsmittel- und Brennstofflieferungen in die Region GBAO aus und die Kohlesubventionen wurden gestrichen (KRAUDZUN ET AL. 2014, S. 53). Kohle war, sofern sie überhaupt verfügbar war, als Heizmittel nun nicht mehr erschwinglich und wurde nahezu nicht mehr verwendet. Auch der getrocknete Dung konnte wegen des Dieselmangels nicht mehr von den Sommerweiden transportiert werden (OTOMBAEV 2013a). So verblieben zunächst nur die Zwergsträucher und der Dung des in und nahe der Ortschaften gehaltenen Viehs als Brennmittel. Das bis heute bestehende Verbot der thermischen Nutzung von Zwergsträuchern wird seit 1992 de facto von der örtlichen Verwaltung nicht mehr durchgesetzt. Der mit der Unabhängigkeit Tadschikistans eingesetzte Transformationsprozess von der Planwirtschaft sowjetischer Prägung hin zur Marktwirtschaft (BREU ET AL. 2005, S. 139) ist auch heute noch nicht komplett abgeschlossen. Seit Mitte der Nullerjahre ist Kohle saisonal wieder im Ost-Pamir verfügbar und erlangt zunehmend eine größere Bedeutung für den lokalen Energiemix. Eine Abschätzung der seit Ende des 19. Jahrhunderts im Ost-Pamir verwendeten Energieträger gibt Abbildung 3-6, welche in modifizierter Weise aus KRAUDZUN ET AL. (2014, S. 53) übernommen wurde.

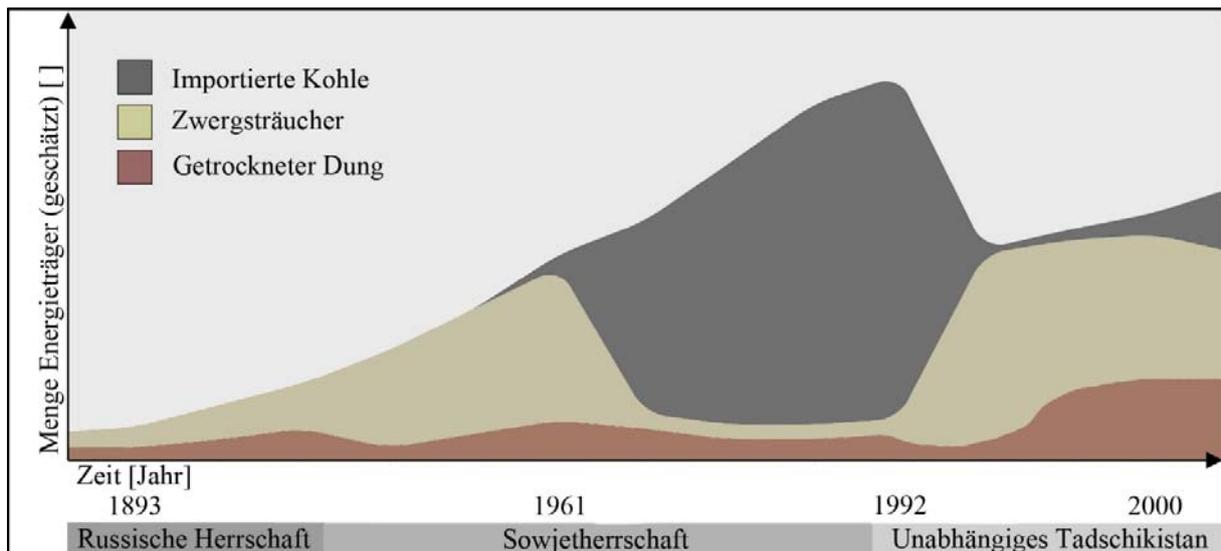


Abbildung 3-6: Historische Schwankungen im Ost-Pamir verwendeter Energieträger. Subjektives Modell. Quelle: KRAUDZUN ET AL. (2014), verändert.

Nach den *jamoats* Murghab und Karakul besaß das *jamoat* Alichur im Jahr 2010 laut offiziellen Angaben mit 1.788 Einwohnern die drittgrößte Einwohnerzahl im *rajon* Murghab (UN 2010). Die Einwohnerzahl des *jamoat* Alichur teilt sich auf die Ortschaften Alichur, Bulun-Kul und Bash-Gombež auf. Im Jahr 2013 wurden 210 Haushalte mit 1.176 Einwohnern in der Ortschaft Alichur gezählt. Von diesen hielten sich zu diesem Zeitpunkt 1.069 Personen permanent in Alichur auf. Die Bevölkerung Alichurs setzte sich 2013 aus 75 % Kirgisen und 25 % Tadschiken (*Pamiri*) zusammen.

3.2.5 NATÜRLICHE RESSOURCEN UND ENERGIEPOTENZIALE IM OST-PAMIR

Den lokalen Ressourcen des Ost-Pamir kommt wegen der eingeschränkten Erreichbarkeit der Region heute eine besondere Bedeutung zu. Abgesehen von einem kleineren Kohlevorkommen sind im Ost-Pamir jedoch keine fossilen Energieressourcen vorhanden. Für eine weitestgehend autarke Energieversorgung spielen daher vor allem die Potenziale verschiedener erneuerbarer Energiequellen eine entscheidende Rolle. In diesem Teilkapitel werden die wichtigsten Energiepotenziale in der Region mit einem Fokus auf die Ortschaft Alichur vorgestellt und anschließend verglichen.

Kohle

Das einzige Kohlevorkommen des Ost-Pamir liegt in Chechtebe, *rajon* Murghab, etwa 70 km südöstlich der Ortschaft Murghab. In diesem Vorkommen werden 750.000 t Kohle vermutet (DROUX UND HOECK 2004, S. 81). In der Vergangenheit wurde in Chechtebe in kleinem Maßstab Kohle gefördert. Offiziell wird die Miene in Chechtebe jedoch seit geraumer Zeit wegen der schlechten Qualität der geförderten Kohle, sowie wegen Sicherheitsrisiken nicht mehr betrieben (DROUX UND HOECK 2004, S. 81). Mit einer baldigen großmaßstäbigen Ausbeutung des Vorkommens ist aufgrund der schlechten Infrastruktur und der minderwertigen Kohlequalität nicht zu rechnen. Es ist kaum anzunehmen, dass sich das beschriebene Vorkommen in naher Zukunft auf die lokale Energieversorgung im Ost-Pamir auswirken wird.

Wasserkraft

BREU UND HURNI (2003, S. 35) beschreiben Wasserkraft als die wichtigste Energiequelle des GBAO. Insgesamt schätzen sie das hydroelektrische Potenzial des GBAO auf 1.000 bis 4.000 MW. Im Wesentlichen bestimmen die zwei Größen Abflussmenge und überwundene Höhendifferenz das hydroelektrische Potenzial eines Flusses. Im Gegensatz zum West-Pamir, woher der größte Teil des von BREU UND HURNI (2003, S. 35) ermittelten hydroelektrischen Potenzials resultiert, überwinden die größten Flüsse des Ost-Pamir (im Wesentlichen sind dies die Flüsse Alichur bzw. Gunt und Murghab) auf ihrem Weg über die Hochebenen des Ost-Pamir nur geringe Höhenunterschiede. Zudem sind im Ost-Pamir, am Oberlauf von Gunt und Murghab, die Abflussmengen deutlich geringer als im West-Pamir. Die Zuflüsse zu Gunt und Murghab, welche sich aus den steileren Seitentälern der Hochebenen ergießen, führen nicht ganzjährig Wasser und liegen in deutlicher Entfernung zu den Hauptsiedlungen. Für die Elektrifizierung Murghabs wurde im Jahr 1964 das Wasserkraftwerk Ak Suu mit einer installierten Nennleistung von 0.64 MW (Durchschnittliche Leistung im Jahr 2004 etwa 0,2 MW) nahe Murghab errichtet (DROUX UND HOECK 2004, S. 220). Um eine Fallhöhe von knapp 4 m zu gewährleisten waren hier mehr als 4 km Kanal nötig. Abbildung 3-7 zeigt das Wasserkraftwerk Ak Suu mit Teilen seiner Zu- und Abflüsse im Bildvordergrund. Im Hintergrund können der Fluss Murghab und direkt dahinter der Ort Murghab erahnt werden. Das Beispiel des Wasserkraftwerks von Murghab verdeutlicht die Höhe der Investitionskosten mit denen selbst bei der Errichtung kleiner Wasserkraftanlagen im Ost-Pamir gerechnet werden muss. In der nahen Vergangenheit versuchte eine mit deutschen Geldern finanzierte

Entwicklungsinitiative, im Ost-Pamir potenzielle Wasserkraftwerksstandorte zur Verbesserung der Energieversorgung Murghabs zu identifizieren. Im Ergebnis der Untersuchung konnten jedoch keine geeigneten Standorte gefunden werden (KRAUDZUN 2014, S. 560). Auch für Alichur war zu Zeiten der Zugehörigkeit Tadschikistans zur Sowjetunion ein Kleinwasserkraftwerk geplant. Hier sollte am Fluss Alichur, welcher ein Zufluss des Flusses Gunt ist, eine Wasserkraftanlage mit 0,55 MW Nennleistung entstehen (IHTSSR 1984 in DROUX UND HOECK 2004, S. 224). Da jedoch der Alichurfluss, ähnlich dem Fluss Murghab, ein extrem niedriges Gefälle aufweist und stark mäandierend durch die Alichurebene fließt, war die Errichtung des Wasserkraftwerks bis Ende 1991 nicht rentabel.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das hydroelektrische Potenzial im Ost-Pamir, anders als im West-Pamir, eher gering ist und selbst Wasserkraftanlagen mit Leistungen von weniger als 1 MW nur mit sehr hohem Aufwand realisiert werden können. HOECK ET AL. (2007, S. 170) sehen hingegen Potenzial bei der Errichtung von dezentralen Kleinstwasserkraftanlagen zur Versorgung einzelner Haushalte mit Nennleistungen von 1,5 kW pro Anlage. Eine solche Anlage könnte jährlich bis zu 13.140 kWh (47,3 GJ) an Strom produzieren.



Abbildung 3-7: Wasserkraftwerk Ak Suu nahe der Ortschaft Murghab. Eigene Darstellung.

Sonnenenergie

ZANDLER (unveröffentlicht) hat in der Ortschaft Alichur von Oktober 2013 bis Oktober 2014 Globalstrahlungswerte gemessen. Es ergaben sich monatliche Durchschnittswerte von zwischen 203 W/m^2 und 516 W/m^2 . Im ganzjährlichen Durchschnitt wurden 364 W/m^2 ermittelt. Bei angenommenem Wirkungsgrad einer Photovoltaikanlage von 10 % bis 15 % läge der jährliche Ertrag in Alichur somit bei etwa 320 kWh bis

480 kwh (1,1 GJ bis 1,7 GJ) pro Quadratmeter. Zum Vergleich: In Deutschland ergeben sich bei gleichem Wirkungsgrad durchschnittlich 150 kwh/ m² jährlicher Ertrag.

Die intensive Sonneneinstrahlung im Ost-Pamir ließe sich mit Hilfe von Solarthermieanlagen noch effizienter als mit Photovoltaik nutzen. Bei der Solarthermie wandelt ein Sonnenkollektor auf ihn auftreffende Sonnenstrahlung in Wärme um. Diese kann direkt ohne weiteren Wandlungsschritt zur Erwärmung von Brauchwasser oder zur Wohnraumbeheizung verwendet werden. Die Wirkungsgrade von Solarthermieanlagen sind abhängig von der Differenz zwischen Außen- und Betriebstemperatur und liegen im Bereich von 50 % bis 70 % (EISENBEIß ET AL. 2000, S. 24). Bei einer durchschnittlichen Globalstrahlung von 364 W/m² wären mittels Solarthermie bei einem Wirkungsgrad von 60 % pro Jahr und Quadratmeter etwa 1.900 kwh (6,9 GJ) an Energie nutzbar.

Windkraft

Für Alichur liegen Windgeschwindigkeitsmessungen (4 m über Boden) aus den Jahren 2013 und 2014 vor (ZANDLER, unveröffentlicht). Aus den Messdaten ergeben sich monatliche Mittelwerte von zwischen 1,9 m/s und 4,7 m/s. Im Jahresmittel wurde eine Windgeschwindigkeit von 3,6 m/s ermittelt. Mit Hilfe von Formel 3-1 lässt sich die Leistung des auf eine Windkraftanlage auftreffenden Windes ermitteln.

$$P = \frac{1}{2} * \rho * \pi * r^2 * v^3 \quad \text{Formel 3-1}$$

P...Leistung des auf eine Windkraftanlage treffenden Windes [W]

ρ...Dichte des Windes [kg/m³]

r ...Radius des Rotors [m]

v...Windgeschwindigkeit [m/s]

Die Windleistung ist in der dritten Potenz abhängig von der Windgeschwindigkeit, in der zweiten Potenz vom Rotorradius der Windkraftanlage und in der ersten Potenz von der Luftdichte. Die Luftdichte ist wiederum abhängig von Luftdruck, Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Da für Alichur keine Luftdruckmessungen vorliegen, soll die Näherungsformel von KUNZ (1999) zur Ermittlung der Luftdichte in Hochgebirgsregionen Anwendung finden:

$$\rho = a * e^{-b*z} \quad \text{Formel 3-2}$$

a...1,247015

b...0,000104

z...Höhe über Meer [m]

Nach Formel 3-2 weist die Luft in Alichur (3.863 m) in etwa eine Dichte von $0,834 \text{ kg/m}^3$ auf. Wird beispielsweise eine typische Kleinwindkraftanlage mit einem Rotorradius von 1,5 m angenommen, ergibt Formel 3-1 eine auf die Windkraftanlage treffende Leistung von 138 W. Bei einem Wirkungsgrad von 40 % wären noch 55 W (483 kWh/a) nutzbar. Es ist anzunehmen, dass in größeren Höhen deutlich höhere Windgeschwindigkeiten vorherrschen. Wegen des hohen Gewichts von Windgeschwindigkeit und Windradgröße in Formel 3-1 ließen sich daher mit höheren Anlagen und größeren Rotorblättern deutlich größere Erträge erzielen.

Geothermie

Aus der geologischen Beschreibung des *jamoat* Alichur in Teilkapitel 3.2.1 wird ersichtlich, dass sich das Gebiet in einer tektonisch sehr aktiven Region befindet. So gibt es 17 km westlich der Ortschaft Alichur einen kleinen Geysir und etwa 30 km in der gleichen Richtung nahe der Ortschaft Bulun-Kul die heiße Quelle von Issyk Bulak. An dieser tritt Wasser mit einer Temperatur von bis zu $70 \text{ }^\circ\text{C}$ an die Erdoberfläche BILL (2010b, S. 151). Die beiden genannten Quellen stellen jedoch wegen ihrer Entfernung zur Ortschaft Alichur keine Option für die Energieerzeugung in diesem Ort dar. Möglicherweise könnte durch Bohrungen nahe der Ortschaft Alichur geothermisches Potenzial erschlossen werden.

Biomasse

In Teilkapitel 3.2.3 wurde die Vegetation des Ost-Pamir als eine extrem spärliche beschrieben. Wegen der schlechten Wuchsbedingungen ist die Biomassedichte sehr gering. Auf der anderen Seite jedoch steht ein extrem großes Gebiet einer kleinen Anzahl an Menschen zur Verfügung. Allein die Größe des *jamoat* Alichur entspricht mit etwa 8.700 km^2 mehr als der dreifachen Fläche des Saarlands. Laut UN (2010) leben jedoch nur 1.788 Menschen in den Ortschaften Alichur, Bash-Gombez und Bulun-Kul. Es ergibt sich eine Bevölkerungsdichte von 0,2 Menschen pro Quadratkilometer. Tatsächlich ist nicht das gesamte *jamoat* Alichur für seine Bewohner ohne weiteres erreichbar. Zudem findet nach WALTER UND BRECKLE (1986, S. 331), wie in Teilkapitel 3.2.3 beschrieben, Pflanzenwachstum im Ost-Pamir hauptsächlich in der subalpinen Stufe, also in Höhen von bis zu 4200 m, statt. Für eine grobe Abschätzung des Biomassepotenzials sollen daher nur jene Gebiete, welche sich in und nahe der Alichurebene unter 4.200 m Höhe befinden und nicht von Wasser bedeckt sind, betrachtet werden. Abbildung 3-8 zeigt die Flächenverteilung dieser Gebiete.

Insgesamt entsprechen 1.800 km² den aufgestellten Bedingungen. Damit verbleiben für jeden Einwohner des *jamoat* Alichur statistisch gesehen gut 1 km² bzw. 100 ha Fläche zur Nutzung. VANSELOW (2011, S. 137–146) ermittelt für die in diesem Gebiet vorherrschende Vegetationsform der Zwergstrauch-Polstersteppe, Artemisiatyp (Siehe Abbildung 3-5) einen oberirdischen Biomassegehalt von etwa 1.800 kg/ha. Selbst bei einer jährlichen Nutzung von lediglich 2 % der vorhandenen Biomasse wären für jeden Bewohner des *jamoat* Alichur theoretisch 3,6 t Biomasse verfügbar. Die Nutzung der Biomasse kann entweder direkt, z.B. durch Verbrennung von geeigneten Pflanzen, oder indirekt durch Vergärung von Grünschnitt, sowie Verbrennung von Viehdung erfolgen.

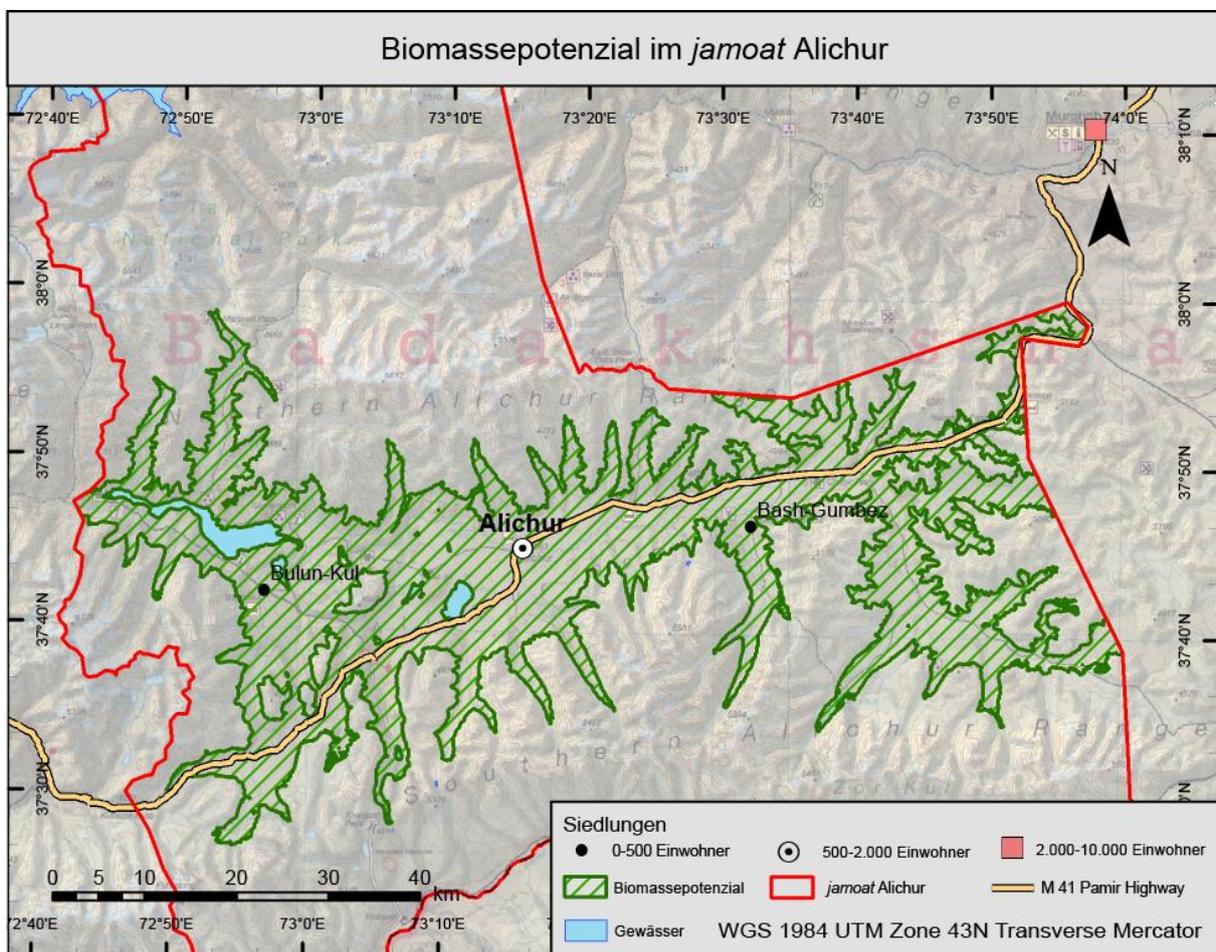


Abbildung 3-8: Flächen im *jamoat* Alichur, die für eine Biomassenutzung durch die lokale Bevölkerung in Frage kommen. Eigene Darstellung.

Wasserkraft, Sonnenenergie und Windkraft eignen sich in erster Linie zur Stromerzeugung. In der Ortschaft Alichur ist gegenwärtig kein funktionstüchtiges Stromnetz vorhanden. Bis 1992 wurden in Alichur Inselnetze ohne Verbindung zum gesamt-tadschikischen Stromnetz betrieben. Insgesamt vier Dieselgeneratoren versorgten den lokalen Viehzuchtbetrieb, die Schule und das angegliederte Internat, sowie

jeweils acht Stunden täglich die privaten Haushalte über vier nicht miteinander verbundene Stromnetze mit Energie (KHUDONAZAR 2013). Heute sind einzig der Generator und die Stromverbindung von Schule und Internat intakt. Masten und Leitungsreste der anderen drei Stromnetze sind teilweise noch vorhanden. Sollte ein Stromnetz für die gesamte Ortschaft hergestellt werden, ist wegen dem schlechten Zustand der Netzinfrastruktur mit hohen Investitionskosten zu rechnen. Die ermittelten elektrischen Energiepotenziale von Wasserkraft, Sonnenenergie und Windkraft eignen sich daher zunächst nur für einen dezentralen Einsatz auf Haushaltsebene. Auch hier treten jedoch Probleme bei der Energiespeicherung auf. In Tabelle 3-1 werden die Leistungen von drei dezentralen Kleinanlagen verglichen. Der Vergleich der gegenübergestellten Anlagen zeigt, dass für eine kleinmaßstäbige Stromerzeugung in Alichur Kleinstwasserkraftwerke und Photovoltaik Anlagen geeignet sind. Kleinwindräder hingegen lassen nur eine vergleichsweise geringe Leistung erwarten und scheinen für die Stromerzeugung in Alichur nicht geeignet zu sein.

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung der Potenziale von dezentralen Stromerzeugungsanlagen. Eigene Daten.

	Anlage	Leistung	Strommenge/ Jahr
Wasser	Kleinstwasserkraftwerk	1.500 W	13.140 kwh
Sonne	PV Anlage	350 W/m ²	3.066 kwh/m ²
Wind	Kleinwindrad (3 m Rotordurchmesser)	55 W	482 kwh

PV...Photovoltaik

Für die Erzeugung von Wärme sind in Alichur in erster Linie Solarthermie und die Nutzung lokaler Biomasse geeignet. Sollte die Mine von Chechekte in Zukunft wieder Kohle fördern, könnte auch Kohle vorübergehend einen größeren Teil des Wärmebedarfs in der Region decken.

3.3 DAS ENERGIESYSTEM VON ALICHUR

Eine eingehende Untersuchung der Energieversorgung und der Energieträgernutzung in der Ortschaft Alichur erfolgte während mehrerer Aufenthalte im Ort in den Jahren 2013 und 2014. Dieses Teilkapitel widmet sich den strukturellen Zusammenhängen im lokalen Energiesystem, die Ergebnis dieser Untersuchungen sind. Der Fokus liegt dabei auf der Energieversorgungsseite. In Teilkapitel 3.3.1 erfolgt eine qualitative Erläuterung des für Alichur typischen Bedarfs nach Energiedienstleistungen. Diese wird gefolgt von einer Beschreibung der verwendeten Energieträger und der identifizierten Nutzungsmuster in Teilkapitel 3.3.2. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird in Teilkapitel 3.3.3 im RES Nakicenovics Beschreibung (WATSON ET AL. 1996, S. 77) eines Energiesystems folgend eine Güter-Prozess-Kette mit den verwendeten Energieträgern, den relevanten Umwandlungsprozessen und der Nachfrage nach Energiedienstleistungen präsentiert und näher beschrieben. Das in Teilkapitel 3.3.4 vorgestellte Modellierungskonzept berücksichtigt die in Teilkapitel 2.3.2 diskutierten Anforderungen biogener Energieträger an die Energiesystemmodellierung, die mit dem in 3.3.3 vorgestellten Schema nicht abgebildet werden können.

3.3.1 BEDARF NACH ENERGIEDIENSTLEISTUNGEN

Die im Untersuchungsgebiet in Anspruch genommenen Energiedienstleistungen lassen sich grob in Wärme, Kochen, Brotbacken und Licht und elektrische Geräte einteilen. Im Folgenden werden diese Energiedienstleistungen näher erläutert.

Wärme

Bedingt durch die extremen Umweltbedingungen ist ein hoher Bedarf an Wärme charakteristisch für Alichur. Die Heizperiode dauert neun Monate, von September bis Mai. Gegenwärtig wird in dieser Zeit pro Haus in der Regel nur ein Winterzimmer in, dem das gesamte Familienleben stattfindet, geheizt. Im Winter brennt der Ofen Tag und Nacht, das Anfeuern des Ofens entfällt in dieser Zeit. In den Übergangsjahreszeiten brennen die Öfen nachts aus und müssen morgens neu befeuert werden. In einigen wenigen Haushalten werden zwei Winterzimmer beheizt. Der Großteil der Häuser in Alichur besitzt zwei oder mehr Zimmer. In Zeiten der Zugehörigkeit Tadschikistans zur Sowjetunion, als Kohle zu subventionierten Preisen verfügbar war, wurden im Winter mehrere Zimmer bewohnt und beheizt. Es kann davon ausgegangen werden, dass der gegenwärtige Wärmekonsum nicht dem tatsächlichen

Bedarf der Bewohner Alichurs nach Wärme entspricht. Im Fall einer verbesserten Brennstoffversorgung ist ein steigender Wärmebedarf nicht unwahrscheinlich.

Kochen

Heizen und Kochen sind während der Winterzeit eng miteinander verbunden. Gekocht wird auf dem Ofen, der für das Heizen des Winterzimmers verwendet wird. Der bereits brennende Ofen muss für das Kochen lediglich angeschürt werden. Eine Differenzierung zwischen Energieverbrauch für Heizen und Kochen ist in dieser Zeit schwierig. Im Sommer hingegen wird eigens für das Kochen und das Erwärmen von Wasser Feuer im Ofen entfacht. Dies geschieht in der Regel in dem Ofen, mit dem im Winter geheizt und gekocht wird. Teilweise findet statt des Winterofens ein dünnwandiger Ofen aus Stahlblech, welcher sich besonders schnell anheizen lässt, Anwendung für das Kochen. Im Sommer werden schnell brennende Energieträger für das Kochen verwendet.

Brotbacken

Brot wird in Alichur je nach Haushaltsgröße mindesten einmal pro Woche in einem traditionellen Ofen gebacken. Dieser Ofen (kirk. *tandor*) befindet sich außerhalb des Hauses und wird im Sommer wie im Winter eigens zum Zweck des Brotbackens angefeuert. Um den Geschmack des Brotes zu beeinflussen, werden nur bestimmte Energieträger für das Brotbacken verwendet.

Licht und elektrische Geräte

Jeder Haushalt in Alichur besitzt elektrische Kleingeräte. Typischerweise sind dies Mobiltelefone und kleine Fernseher. Für die Raumbelichtung werden pro Haushalt meist ein oder zwei LED-Glühbirnen verwendet. Es besteht somit in jedem Haushalt gegenwärtig ein geringer Bedarf an Strom. Dieser Bedarf würde sich bei verbesserter Stromversorgung mit hoher Wahrscheinlichkeit erhöhen. In der Vergangenheit wurden bei besserer Stromversorgung beispielsweise elektrische Kochfelder verwendet.

3.3.2 GEGENWÄRTIG VERWENDETE ENERGIETRÄGER UND DEREN NUTZUNGSMUSTER

Zum Zeitpunkt der Untersuchung wurden in Alichur die Energieträger Zwergsträucher, tierischer Dung, Kohle, Strom, sowie Benzin und Kerosin verwendet. In diesem Teilkapitel sollen die unterschiedlichen Ausprägungen, die Gewinnung, die Verbreitung, sowie die energetischen Eigenschaften dieser Energieträger näher erläutert werden.

Zwergsträucher

Den Zwergsträuchern *teresken* und *shyvak* (Abbildung 3-10 a) spielen heute eine tragende Rolle für die Energieversorgung der Bevölkerung von Alichur. In ihrer Wuchsform unterscheiden sich *shyvak* und *teresken* auf den ersten Blick nur wenig. Der für die energetische Nutzung wichtigste Unterschied zwischen den beiden Pflanzen liegt in der Anatomie ihrer Wurzel. Die Wurzel der *tereske* ist größer ausgeprägt als die von *shyvak*-Pflanzen. Da sich der Großteil der verholzten Biomasse bei beiden Pflanzen in der Wurzel befindet, weisen *teresken*-Individuen meist größere Massen als *shyvak*-Individuen auf. Weiterhin wachsen *shyvak*-Pflanzen weiter verzweigt als *teresken*-Pflanzen. Insgesamt lassen sich *teresken* besser als *shyvak* transportieren, weil bei *teresken* leichter höhere Packdichten erreicht werden können. Für die Energieträgerwahl der lokalen Bevölkerung spielt dieser Umstand jedoch eine untergeordnete Rolle. Zwar würde der Großteil der Bevölkerung von Alichur bei gleicher Verfügbarkeit *teresken* *shyvak* vorziehen. Da die Verfügbarkeit beider Pflanzen jedoch beschränkt ist, wird in der Praxis die am Leichtesten zu erreichende Pflanzenart verwendet.

Zwergsträucher sind grundsätzlich universell für alle benötigten Energiedienstleistungen in den Bereichen Backen, Kochen und Heizen einsetzbar. Hierbei gibt es jedoch Abstufungen in der Zweckmäßigkeit. Wegen ihrer leichten Entflammbarkeit werden Zwergsträucher dort, wo schnell Wärme erzeugt werden muss, besonders effektiv verwendet. Dies trifft in erster Linie auf das Kochen im Sommer und das Anfeuern des Ofens zu. Geeignet sind sie auch zum Brotbacken wobei die Zwergstrauchglut für ein besonderes Aroma sorgt. Für das Heizen eines Ofens sind Zwergsträucher nur eingeschränkt brauchbar. Direkt nach der Unabhängigkeit Tadschikistans wurden sie als Ersatzbrennstoff für ausbleibende Kohleimporte gebraucht (KRAUDZUN ET AL. 2014, S. 49). Auch heute stellen sie noch, wenn auch bereits in geringerem Maße als noch in den 1990er Jahren, einen wichtigen Energieträger für das

Heizen in Alichur dar. Zunehmend werden lang brennende Energieträger wie Dung oder Kohle bevorzugt, um den bestehenden Bedarf an Wärme zu befriedigen. Zwergsträucher finden gegenwärtig vor allem in armen Haushalten zum Heizen Anwendung, weil sie kostenfrei in der Umgebung Alichurs beschafft werden können. Kosten entstehen jedoch für den Transport der Pflanzen. Die Zwergstrauchernte wird nicht zentral koordiniert. Trotzdem erfolgt sie in Alichur nach festen Mustern, welche sich seit Beginn der 1990er Jahre etabliert haben. Alles in allem wurden vier Erntemuster identifiziert: *Individuelle Ernte*, *Gruppenernte*, *kombinierte Ernte* und *Motorradernte*.

a) Individuelle Ernte

Ein großer Teil der Einwohner von Alichur sammelt in fußläufiger Entfernung der Ortschaft Zwergsträucher und transportiert diese mit einem Esel. Meist ist eine Person alleine, seltener sind zwei Personen gemeinsam auf diese Weise unterwegs. Anfang der 1990er Jahre konnten Zwergsträucher mit dieser Methode in der nahen Umgebung der Ortschaft Alichur gesammelt werden. Gegenwärtig werden für einen Erntegang zu Fuß bis zu 6.5 km zurückgelegt, was inklusive der Ernte bis zu acht Stunden in Anspruch nimmt. Geerntete Zwergsträucher werden zu Bündeln (lokal: *teng*) gebunden und auf einen Esel geschnallt. Nicht jeder Haushalt in Alichur verfügt über einen Esel. Dies stellt für die entsprechenden Haushalte eine Hürde für diese Ernteform dar. Selten sammeln Personen in direkter Umgebung der Ortschaft kleine Zwergsträucher, die sich nicht zu Bündeln binden lassen. Diese Zwergsträucher werden in einem Sack verstaut und zu Fuß transportiert. Die bei dieser Ernteweise zurückgelegte Distanz ist mit bis zu 3 km deutlich geringer als bei der häufigeren Ernte mit einem Esel. Individuell wird in den Monaten, in denen der Boden in den entsprechenden Erntegebieten tagsüber frost- und schneefrei ist, geerntet. Die Investitionskosten für die individuelle Ernte sind gering, da keine direkten Verbrauchskosten anfallen. Im Verhältnis zum Zeitaufwand fällt die Ernte jedoch eher niedrig aus, weil die Wegzeiten sehr hoch sind.

b) Gruppenernte

Im Frühjahr (Mai) und im Herbst (Oktober) fahren Erntegruppen gemeinsam mit einem LKW zur Zwergstrauchernte. Beerntet werden exklusiv Gebiete mit hoher Zwergstrauchdichte. Diese befinden sich gegenwärtig in einer Entfernung von bis zu 45 Minuten Fahrzeit von der Ortschaft Alichur. Die geernteten Zwergsträucher

werden lose auf den LKW verladen, was im Vergleich zum Binden von *teng* Zeit spart. Eine Erntefahrt nimmt etwa sieben bis zwölf Stunden in Anspruch. Geerntet wird für einen Haushalt pro Fahrt. Der Vorstand dieses Haushalts organisiert, je nach Größe des LKW, bis zu acht Erntehelfer im Vorfeld der Fahrt. Meist handelt es sich dabei um Verwandte und Freunde. Die Erntehelfer arbeiten kostenfrei, erhalten jedoch ein Mittag- und Abendessen während des Erntetages. Zusätzlich dürfen sie eine kleinere Menge an Zwergsträuchern, zwei *teng*, für ihren Eigenbedarf ernten und kostenfrei transportieren. Größtenteils praktizieren auch die Erntehelfer die Gruppenernte zur Energieträgerbevorratung für ihren Haushalt und erwarten ihrerseits Hilfe bei dieser Tätigkeit. Auch der LKW Fahrer stellt seine Dienste kostenfrei zur Verfügung. Er beteiligt sich nicht an der Ernte, erhält jedoch ebenfalls zwei Mahlzeiten und zwei *teng* Zwergsträucher pro Fahrt. Das Benzin für die Fahrt stellt der Haushalt, der die Fahrt initiiert. In Alichur gibt es sieben LKW-Besitzer, die ihre Dienste in der betreffenden Zeit für diese Ernteform zur Verfügung stellen. Die Investitionskosten für die Gruppenernte sind vergleichsweise hoch. Neben den finanziellen Aufwendungen für Benzin und Essen werden auch eigene Arbeitskraft und gute soziale Kontakte benötigt. Dennoch beteiligt sich ein sehr hoher Anteil der Bewohner Alichurs an dieser Ernteform. Das Verhältnis von Arbeitszeit zu Ernteertrag ist wegen der großen transportierten Menge und des Zeitersparnisses für das Binden der *tengs* bei der Gruppenernte besser als bei der individuellen Ernte oder der Motorradernte.

c) Motorradernte

Die Ernte mit dem Motorrad wird meist von einer Person alleine praktiziert. Diese fährt zur Ernte mit einem Motorrad, oft mit Beiwagen, in bis zu 16 km entfernte Gebiete. Meist werden Gebiete von maximal 10 km Entfernung besucht. Sämtliche mit dem Motorrad aufgesuchte Gebiete wurden bereits von einer Erntegruppe beerntet, so dass die Zwergstrauchbestände dort ausgedünnt sind. Für die Ernte zu Fuß oder mit dem Esel sind diese Gebiete zu weit entfernt von der Ortschaft Alichur. Für eine erneute Beerntung durch eine Erntegruppe sind sie nicht dicht genug bestanden. Die Menge der bei einer Fahrt mit dem Motorrad eingeholten Zwergsträucher entspricht etwa der zweifachen Menge eines Erntegangs bei der individuellen Ernte. Die Motorradernte wird nur von sehr wenigen Bewohnern von Alichur betrieben. Sie wird über die Deckung des eigenen Brennstoffbedarfs hinaus meist auch für den Verkauf von Zwergsträuchern praktiziert.

d) Kombinierte Ernte

Bei der kombinierten Ernte wird die Erntetätigkeit mit dem Weiden von Vieh kombiniert. Diese Ernteform wird von Schäfern praktiziert, die sich den Sommer über auf einer Sommerweide aufhalten. Dort ernten sie zu Fuß Zwergsträucher und fahren diese in den Ort Alichur, sobald sie im Herbst selbst mit dem Vieh dorthin ziehen. Seltener werden die Zwergsträucher, zu *teng* gebunden, auf der Sommerweide an Selbstabholer verkauft. Ein Großteil der Erntegebiete liegt in einiger Entfernung zur Siedlung Alichur. Die Erntegebiete werden meist wenig intensiv, weil nur von wenigen Personen und nur im Sommer, beerntet.

Dung

Für den Energiemix von Alichur sind zwei auf Dung basierende Energieträger bedeutsam: Stalldung (*kuik*) und getrocknete Dungfladen (*tezek*). Im Folgenden werden die beiden Energieträger näher beschrieben.

(1) *kuik*

kuik (Abbildung 3-10 b) ist getrockneter und zu Ziegeln geschnittener Stalldung von Ziege, Schaf, Hausrind oder Yak. Im Estand steht das Vieh in seinen Exkrementen und verdichtet diese durch sein Eigengewicht. Bei Yak und Kuh werden bei diesem Prozess höhere Dichten erreicht als bei dem Kleinvieh Schaf und Ziege. In der Mischung aus Exkrementen finden sich auch Woll- und Futterreste, sowie andere faserige Verunreinigungen. Weist die Exkrementenschicht eine Dicke von 10 cm bis maximal 20 cm auf, wird diese mit einem Spaten in Ziegel von etwa 20 cm x 25 cm Größe gestochen. Dies geschieht zwei Mal pro Sommer- und zwei Mal pro Winter-saison. Die gestochenen Ziegel werden erst im Stall angetrocknet (Abbildung 3-9 a) und später außerhalb des Stalls aufgetürmt, um in der Sonne durchzutrocknen (Abbildung 3-9 b). Nach einer Trockenphase von bis zu einem Jahr ist das *kuik* durchgetrocknet und bereit zur thermischen Verwertung. Die Bewohner von Alichur unterscheiden aufgrund der unterschiedlichen Dichten zwischen *kuik* vom Kleinvieh und *kuik* vom Großvieh. *kuik* vom Großvieh erzielt wegen seiner größeren energetischen Dichte im Verkauf höhere Preise als *kuik* vom Kleinvieh. Die Produktion des *kuik* erfolgt in den Weidegebieten. Die Sommerweiden liegen teilweise in erheblicher Entfernung zum Ort Alichur. Hier fallen zusätzlich zum Rohstoffpreis, der an den Viehbesitzer oder den Hirten zu entrichten ist, relevante Transportkosten an. Die Ladedichte von *kuik* ist deutlich höher als jene der Zwergsträucher bei der Gruppen-

ernte, daher sind auch die Transportkosten relativ zum Energiegehalt des *kuik* niedriger als beim Transport von Zwergsträuchern.

kuik wird von nahezu allen Haushalten in Alichur verwendet und ist ein über die Grenzen Alichurs hinaus viel gehandelter Energieträger. Die Verbrennung des *kuik* verläuft eher schwelend. Beim Verheizen bildet sich eine lang vorhaltende Glut. *kuik* wird heute hauptsächlich zum Heizen im Winter, in den Übergangsjahreszeiten und teilweise auch im Sommer gebraucht. Nach Aussage der älteren Bewohner Alichurs wurde auch vor 1992 in den privaten Haushalten Alichurs im Sommer und in den Übergangsjahreszeiten ausschließlich mit *kuik* geheizt. Lediglich von November bis Februar wurde damals *kuik* mit Kohle substituiert (JOLAKEEV 2014). Während vor 1992 meist in Kerosin getauchtes *kuik* zum Anfeuern der Öfen benutzt wurde, wird diese Methode heute nur noch selten praktiziert. Heute wird Brot hauptsächlich mit Zwergstrauchglut gebacken. Zu Sowjetzeiten war wegen des Zwergstrauchernteverbots das Brotbacken mit *kuik* gängig. Dies wird heute jedoch eher selten praktiziert, weil sich Zwergsträucher durch ihr progressives Brennverhalten besser zum schnellen Anheizen des Ofens eignen. Da Kochen und Heizen meist kombiniert stattfinden, spielt *kuik* auch für die Essenszubereitung eine wichtige Rolle. Muss der Ofen zum Kochen im Sommer extra angeheizt werden, werden häufiger Zwergsträucher als *kuik* verwendet. Theoretisch lassen sich mit *kuik* sämtliche Energiedienstleistungen verrichten, für die gegenwärtig Zwergsträucher gebraucht werden. Praktisch sind jedoch Zwergsträucher für das Ofenanfeuern, das Brotbacken und teilweise das Kochen im Sommer besser geeignet.

a)



b)



Abbildung 3-9: a) Antrocknen des gestochenen *kuik* im Stall, b) Durchtrocknen in der Sonne. Eigene Darstellung.

(2) *tezek*

Als *tezek* (Abbildung 3-10 c) werden getrocknete Fladen von Yak oder Kuh bezeichnet. Diese werden direkt von der Weide gesammelt und weisen bei ähnlichem Heizwert eine deutlich geringere Dichte als *kuik* auf. *tezek* kann kostenfrei auf den Weideflächen gesammelt werden. Das Sammeln erfolgt zu Fuß mit einem bis zu 50 kg *tezek* fassenden Sack. Der Energieträger kann mitunter direkt nach dem Sammeln verwendet werden, weil die Fladen zu diesem Zeitpunkt bereits geraume Zeit auf der Weide getrocknet sind. Das Sammeln und Bringen von *tezek* ist im Vergleich zum Transport von *kuik* sehr zeitaufwändig. Der Energieträger *tezek* ist gleichmäßig über eine sehr große Fläche verstreut und kann zu Fuß nur in kleinen Mengen und in der Nähe der Ortschaft transportiert werden. Mit der beschriebenen Methode sind sowohl der Energieträger als auch sein Transport ohne monetäre Kosten möglich. Dies macht *tezek* gegenwärtig vor allem für eher arme Haushalte attraktiv. Zu Beginn der 1990er Jahre, als in Alichur eine akute Energieknappheit herrschte, wurde *tezek* in größeren Mengen gebraucht. Heute trägt der Energieträger nur zu einem geringen Anteil zum Gesamtenergiemix Alichurs bei.

tezek wird energetisch ähnlich wie *kuik* verwendet. Der Energieträger ist wegen seiner geringen Dichte, die regelmäßiges Nachheizen nötig macht, zum Heizen deutlich unbeliebter als *kuik*. Beim Kochen im Sommer und Brotbacken fällt diese negative Eigenschaft eher weniger ins Gewicht.

Kohle

Kohle (Abbildung 3-10 d) ist der bevorzugte Energieträger der Bevölkerung Alichurs. Der hohe Bedarf an Wärme, besonders im Winter, lässt sich relativ sauber und mit wenig Arbeitskraft mit Kohle befriedigen. Seit Ende der 1990er Jahre wird Kohle wieder im Ost-Pamir gehandelt (KRAUDZUN ET AL. 2014, S. 54). Gegenwärtig nutzen einige der wohlhabenderen Haushalte Alichurs Kohle zur Deckung eines Teils ihres Winterwärmebedarfs. Zum Einsatz kommt Roh-Steinkohle aus dem kirgisischen Alai. Für das Kochen im Sommer und das Brotbacken ist Kohle nicht geeignet. Auch als Kohle während der Sowjetzeit reichlich vorhanden war, wurde sie nicht für diese Zwecke gebraucht. Ein geringes Kontingent an Kohle wurde im Winter 2012/13 von Gebietsverwaltung und Rotem Kreuz in Alichur zu subventionierten Preisen verkauft.

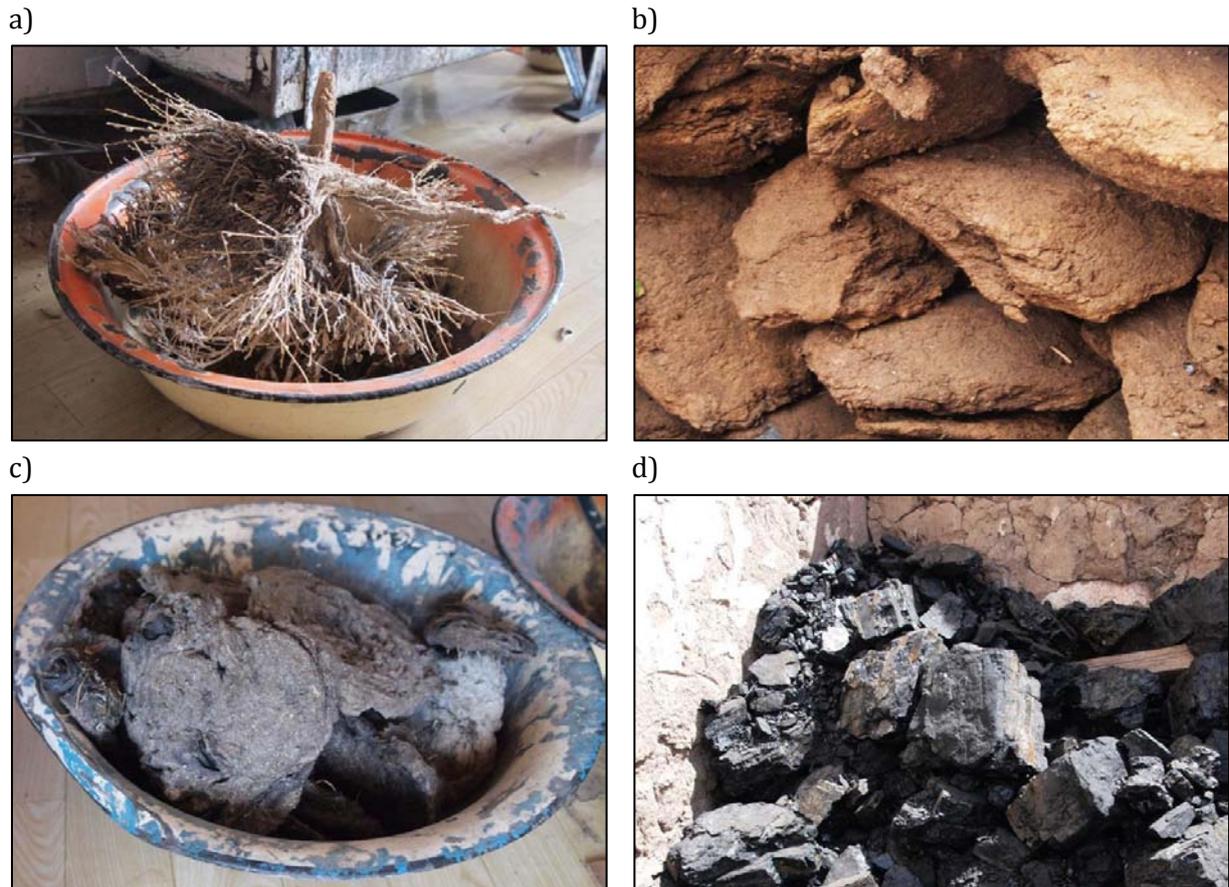


Abbildung 3-10: Gängige Energieträger in Alichur. a) Zwergsträucher (hier: *teresken*), b) *kuik*, c) *tezek* und d) Kohle. Eigene Darstellung.

Andere Energieträger

(1) Strom

Strom wird in Alichur in der Regel dezentral über Kleinsolaranlagen erzeugt. Jeder Haushalt wurde in den vergangenen Jahren entweder von der Gebietsverwaltung oder vom Roten Kreuz mit einem kleinen Solarpanel, einer Batterie mit einer Kapazität von 24 Ah, einer LED-Glühbirne und einem kleinen Fernseher mit DVD-Spieler ausgestattet. Limitierender Faktor bei der Stromerzeugung ist die Batterie, welche in einigen Haushalten auf eigene Kosten gegen ein Modell mit größerer Kapazität ausgetauscht wurde. In mehreren Haushalten sind zudem Generatoren, meist älterer Bauart aus der Zeit als noch keine Solaranlagen verfügbar waren, vorhanden. Aufgrund des hohen Benzinpreises erfolgt die Stromerzeugung gegenwärtig jedoch nahezu ausschließlich aus Sonnenenergie. Einige Haushalte verfügen über Elektrokochplatten, die sich theoretisch zum Kochen im Sommer eignen würden. Diese benötigen jedoch 220 Volt Netzspannung, welche nur mit einem Generator erzeugt werden kann, und werden heute daher faktisch nicht verwendet.

(2) Benzin/ Kerosin

Die wichtigste Bedeutung hat der Energieträger Benzin im Energiesystem Alichurs für den Transport von Zwergsträuchern und *kuik*. Selten wird Benzin für den Betrieb von Generatoren eingesetzt. Kerosin kann in Verbindung mit *kuik* theoretisch zum Anfeuern eines Ofens oder des *tandors* verwendet werden.

3.3.3 STRUKTUR DES ENERGIESYSTEMS IM RES

In Abbildung 3-11 ist ein RES des Energiesystems von Alichur dargestellt. Der Energiefluss im RES findet von links nach rechts, von Energiequelle zu Energiedienstleistung statt. Ganz links im RES finden sich in vertikaler Anordnung die für das Energiesystem relevanten Energiequellen Globalstrahlung, *teresken* und *shyvak* in der Landschaft, sowie Weideflächen. Die Energiequellen werden mittels Ernte- bzw. Umwandlungsprozess in die nutzbaren Energieträger Strom, Zwergsträucher, *kuik* und *tezek* umgewandelt. Diese sind in der Mitte der Grafik vertikal angeordnet. Die Umwandlungsprozesse werden durch horizontale Linien repräsentiert. Um aus der Energiequelle Weideland *kuik* und *tezek* zu generieren, ist ein Zwischenschritt nötig. Hier wird über Beweidung aus Grasland zunächst der in Rohform nicht nutzbare Energieträger Dung, welcher in einem weiteren Schritt in die nutzbaren Energieträger *kuik* und *tezek* prozessiert wird. Ebenfalls bei den nutzbaren Energieträgern finden sich die importierten Energieträger Kohle und Benzin. Benzin wird, im RES, dargestellt durch von rechts nach links laufende horizontale Verbindungslinien, für den Transport von Zwergsträuchern und *kuik* verwendet. Die Energiebilanzen dieser nutzbaren Energieträger verringern sich um die in Form von Benzin benötigte Transportenergie. Die nutzbaren Energieträger können für die in Teilkapitel 3.3.1 beschriebenen Energiedienstleistungen verwendet werden, welche sich vertikal angeordnet ganz rechts im RES befinden. Wie in Teilkapitel 3.3.2. näher erläutert eignen sich dabei nicht alle Energieträger zur Erbringung jeglicher Energiedienstleistung. Im RES sind mögliche Energieträger-Energiedienstleistungskombinationen durch horizontale Verbindung zwischen Energieträger und Energiedienstleistung gekennzeichnet. Das RES gibt eine anschauliche Übersicht über mögliche Energieträger-Energiedienstleistungskombinationen und zeigt die relevanten Umwandlungsprozesse auf. Hierbei geht es jedoch nicht über die Funktion eines allgemeinen Übersichtschemas hinaus.

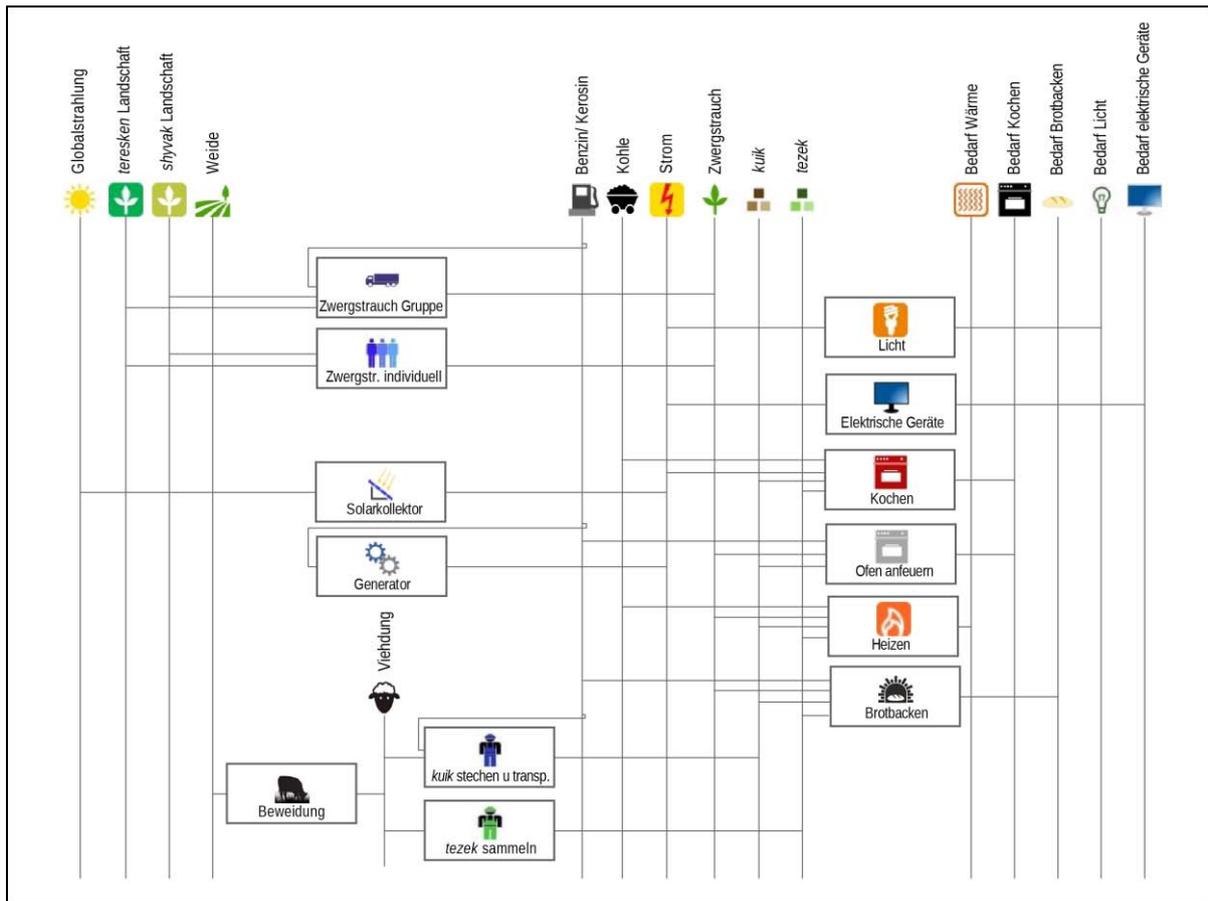


Abbildung 3-11: RES des Energiesystems Alichur, erstellt mittels MESAP, PlaNet RES-editor. Eigene Darstellung.

3.3.4 FÜR DIE SIMULATION IN SIMILE VERWENDETE MODELLSTRUKTUR

In Abbildung 3-12 ist eine Modellstruktur dargestellt, welche den Schwerpunkt auf die Abhängigkeiten der einzelnen Systemkomponenten im Energiesystem von Alichur legt. Hier werden weniger die einzelnen Umwandlungsprozesse im Detail betrachtet, als die Wirkmechanismen, welche zur Ausprägung des Energiemixes von Alichur führen. Unter dem Begriff Energiemix wird hier der Anteil, den die Energieträger *kuik*, Kohle und Zwergstrauch (ZS) in zeitlicher Auflösung zur Deckung des Gesamtenergiebedarfs Alichurs beisteuern, verstanden. Relevant für die Ausprägung des Energiemixes sind Abbildung 3-12 zufolge insbesondere die Teilmodelle Zwergsträucher und Beweidung, welche über die Verfügbarkeit bzw. den Preis der Energieträger Zwergstrauch und *kuik* bestimmen. Die Teilmodelle werden zunächst durch eine Reihe exogener Eingangsparameter, welche teilweise räumlich aufgelöst sind, parametrisiert. Während das Teilmodell Zwergsträucher selbst auch räumlich aufgelöst dargestellt wird, bildet das Teilmodell Beweidung die Summe der Weidekapazität aller relevanten Weideflächen ohne räumliche Auflösung ab. Während der Simulation ergeben sich im Modell bedeutende Rückkopplungen: Die Menge von Zwerg-

sträuchern, die in vorherigen Zeitschritten dem System durch thermische Nutzung entnommen wurden, beeinflusst direkt die gegenwärtige und die zukünftige Verfügbarkeit dieser Ressource. Mittelbar werden durch eine übermäßige Entnahme von Zwergsträuchern auch die Weidekapazität und die Verfügbarkeit von Dung negativ beeinflusst. Zielvariablen der verwendeten Modellstruktur sind unter anderem zeitlich aufgelöst: Der Energiemix Alichurs, die Weidekapazität, die Differenz zwischen Zuwachs und Verbrauch der Zwergsträucher als Anzeiger für den Grad der Nachhaltigkeit der Zwergstrauchnutzung und eine räumlich aufgelöste Karte, die den Zustand der Zwergstrauchbestände in den relevanten Gebieten darstellt.

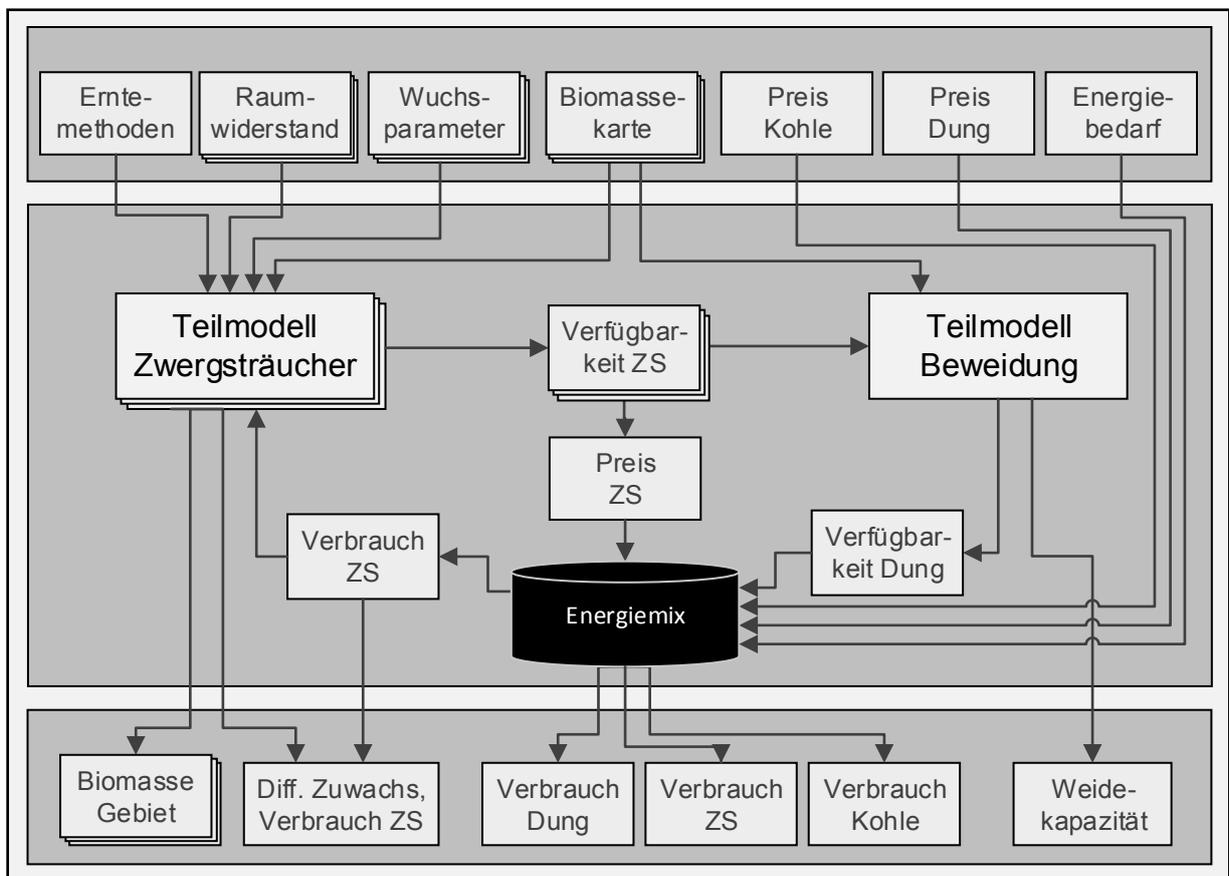


Abbildung 3-12: Zur Simulation in Simile verwendete Modellstruktur eines Energiesystems der Ortschaft Alichur. Eigene Darstellung.

4 ZENTRALE ASPEKTE DER MODELLSTRUKTUR UND MODELLPARAMETRISIERUNG

Nachdem im vorherigen Kapitel das Energiesystem der Region Alichur qualitativ beschrieben und eine allgemeine Modellstruktur präsentiert wurde, sollen in diesem Kapitel modellrelevante Zusammenhänge und Eingangsparameter für eine quantitative Simulation des besprochenen Systems dargelegt werden. Hierfür wird zunächst der Energiemix der Gemeinde Alichur aus dem Bezugsjahr 2012 ermittelt (Teilkapitel 4.1). In Teilkapitel 4.2 und 4.3 werden räumliche Aspekte der gegenwärtigen Zwergstrauchnutzung in der Projektregion aufgegriffen. Die räumliche Verfügbarkeit der biogenen Energieträger Zwergsträucher und Dung wird in den Teilkapiteln 4.4 und 4.5 diskutiert. Abschließend werden in Teilkapitel 4.6 die funktionalen Verknüpfungen der Energieträger Kohle, *kuik*, *tezek* und Zwergsträucher im *Energiemodell Alichur* besprochen.

4.1 GEGENWÄRTIGER ENERGIEMIX

Für die Ermittlung des Energiemixes von Alichur war es notwendig, die in einem Bezugsjahr konsumierten Massen an relevanten Energieträgern zu bestimmen. Über die Angabe der konsumierten Massen hinaus, wird auch der nutzbare Energiegehalt der verwendeten Energieträger benötigt um die konsumierten Massen energetisch miteinander vergleichen zu können. Dieser Logik folgend wird in diesem Teilkapitel zunächst die haushaltsweise Ermittlung der im Bezugsjahr konsumierten Energieträgermassen beschrieben (4.1.1 bis 4.1.3). Die Daten aus den Haushaltsinterviews werden anschließend auf die gesamte Ortschaft Alichur hochgerechnet (4.1.4). In Teilkapitel 4.1.5 wird der Begriff *Heizwert* eingeführt. Nachfolgend werden die im Labor ermittelten Heizwerte aller für Alichur relevanter Energieträger gegenübergestellt. In Teilkapitel 4.1.6 erfolgt als Synthese der beiden vorangegangenen Teilkapitel die Darstellung des Energiemixes von Alichur im Jahr 2012.

4.1.1 STRUKTUR UND ORGANISATION DER HAUSHALTSINTERVIEWS

Zur Schaffung einer quantitativen Datengrundlage für das zu erstellende Energiesystemmodell der Gemeinde Alichur wurde in Zusammenarbeit mit KRECZI (in Bearbeitung) ein Fragebogen für Haushaltsbefragungen im Untersuchungsgebiet erstellt und vor Ort getestet. Während des Tests waren mehrere Anpassungen des Fragebogens nötig. Nach diesen Anpassungen konnte die vorgefundene Situation, vor

allem der Aspekt der Rohstofferte, adäquat im Fragebogen abgebildet werden. Die finale Version des Fragebogens bestand aus sechs Abschnitten, von denen sich drei Abschnitte direkt mit dem Verbrauch und der Beschaffung von Brennmaterial beschäftigen (Abschnitte 2, 3 und 4). Befragungsabschnitt 2 behandelte zudem neben dem quantitativen auch den räumlichen Aspekt der Energieträgernutzung. Ein Abschnitt des Fragebogens behandelte das Thema *Haus* (Abschnitt 1). Dort wurden sowohl die bauliche Beschaffenheit des bewohnten Hauses, als auch vorgenommene Energieeffizienzmaßnahmen und die Art der Stromversorgung abgefragt. In Abschnitt 5 des Fragebogens geht es um Mobilität, welche im Ost-Pamir stark mit der finanziellen Situation und somit mit der Energieträgerwahl auf Haushaltsebene verbunden ist. Im letzten Befragungsabschnitt (Abschnitt 6) wurden schließlich allgemeine Haushaltscharakteristika wie Viehbesitz, monetäres Einkommen, Haushaltsgröße, etc. abgefragt. Der Komplette Fragebogen findet sich in Anhang I.

Im März 2013 wurde in Alichur eine Vollerhebung mit dem beschriebenen Fragebogen durchgeführt. Zwei Teams bestehend aus lokalen Mitarbeitern besuchten für die Erhebung systematisch alle Haushalte Alichurs. Als Orientierungsgrundlage diente ihnen die in Abbildung 4-1 dargestellte Karte von KRECZI (unveröffentlicht). In Abbildung 4-1 sind sämtliche von den Befragungsteams angetroffenen Haushalte nummeriert, so dass die erhobenen Fragebögen räumlich zugeordnet werden können.

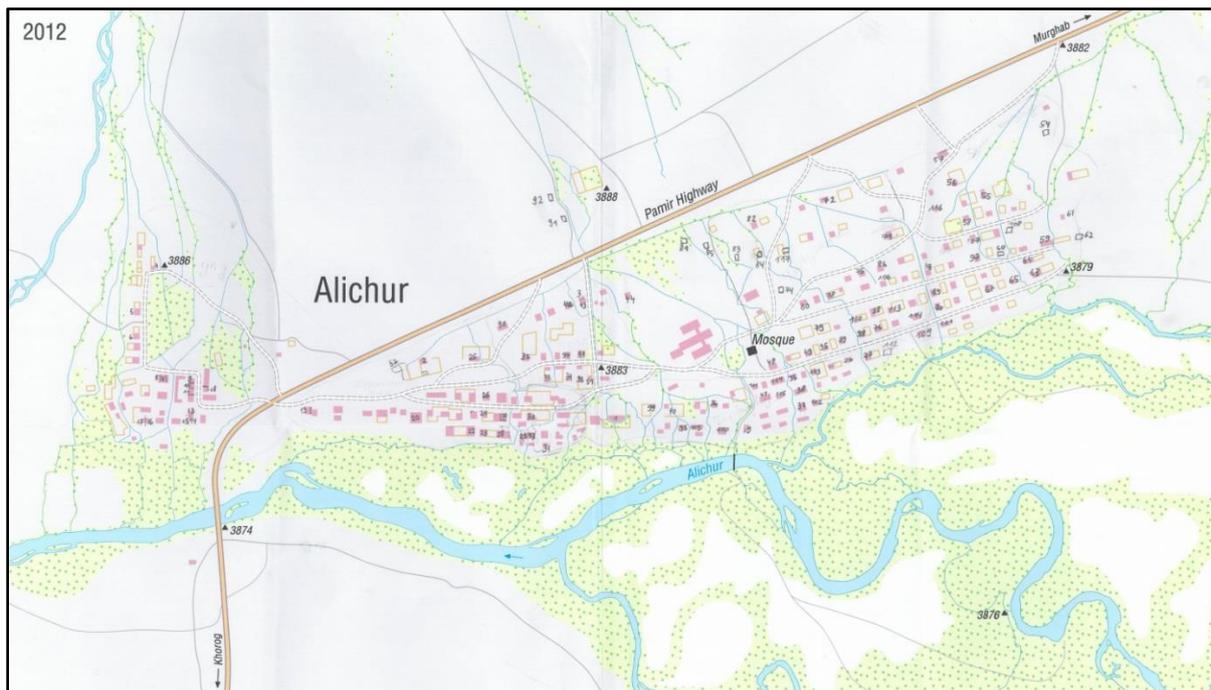


Abbildung 4-1: Karte der Ortschaft Alichur mit befragten Haushalten. Quelle: KRECZI (unveröffentlicht).

4.1.2 MAßEINHEITEN

Bereits in der Testphase des Fragebogens stellte sich heraus, dass die Bewohner von Alichur verlässliche Angaben zu ihrem Energiekonsum nur in den von ihnen bei der Energieträgerbeschaffung oder beim Heizen verwendeten Einheiten machen können. Lediglich im Fall von Kohle erfolgte eine Angabe in metrischen Einheiten. Mengenangaben von Zwergsträuchern, sowohl *teresken* als auch *shyvak*, wurden, sofern es sich nicht um große Mengen handelte, bevorzugt in *teng* gemacht. Die Bewohner Alichurs berichteten, dass sich eine einheitliche Methode zum Binden von *teng* in Alichur direkt im Anschluss an die Unabhängigkeit Tadschikistans und den damit ausbleibenden Energieimporten entwickelte. Da *teng* in Alichur auch gehandelt werden, kann davon ausgegangen werden, dass ein einheitliches Gewicht für diese Maßeinheit mit Gültigkeit für die gesamte Ortschaft Alichur existiert und dieses mit statistischen Methoden ermittelt werden kann. Es gilt jedoch zu beachten, dass das Gewicht eines *teng shyvak* und eines *teng teresken* aufgrund der unterschiedlichen Pflanzenanatomien verschieden sind. Folglich müssen *teng* dieser beiden Zwergstraucharten unterschieden werden. In Gesprächen mit Einwohnern aus Alichur wurde wiederholt erwähnt, dass *teng teresken* schwerer wären als *teng shyvak*. Dies wurde mit einer höheren Dichte von *teresken*-Pflanzen im Vergleich zu *shyvak*-Pflanzen bei gleichem *teng*-Volumen beider Pflanzenarten begründet. Während der Projektlaufzeit wurden mit Hilfe einer Federwaage 57 *teng teresken* und *shyvak* gewogen. *teng shyvak* hatten im Mittel ein Gewicht von 29,8 kg, während der Mittelwert eines *teng teresken* 38,5 kg betrug. Die Standardabweichung lag bei den gemessenen *shyvak*-Proben bei 7,0 kg, bei den *teresken*-Proben bei 2,7 kg. Leider war die Stichprobenanzahl der gemessenen *teng teresken* mit drei Stück für eine statistische Aussage allein nicht ausreichend. Inhaltlich lässt sich die die höhere Masse eines *teng teresken* im Vergleich zu einem *teng shyvak* jedoch mittels der von den Bewohnern Alichurs angeführten Argumentation begründen. Mangels Alternativen wird für *teng teresken* der ermittelte, statistisch nicht aussagekräftige, aber inhaltlich begründete, Mittelwert von 38,5 kg angenommen. Für die Mengenangabe *teng shyvak* wird im Folgenden 30 kg verwendet. Dieser Wert kann durch die hohe Stichprobenanzahl und moderate Standardabweichung als statistisch gesichert gelten. Tabelle 4-1 fasst die ermittelten statistischen Kennwerte der aufgenommenen *teng teresken* und *shyvak* zusammen.

Tabelle 4-1: Statistische Kennwerte der gemessenen *teng shyvak* und *teresken*. Eigene Daten.

	<i>teng shyvak</i>	<i>teng teresken</i>
Mittelwert	30 kg ^a	38,5 kg ^a
Stichprobenanzahl	54	3
Standartabweichung	7,0 kg	2,7 kg

^a auf 0,5 gerundet

Neben der Mengenangabe *teng* wurde in seltenen Fällen für Zwergsträucher die Mengenangabe *Sack* verwendet. Bei der Auswertung der Haushaltsinterviews wurde angenommen, dass ein *Sack* Zwergsträucher einem halben *teng* der jeweiligen Pflanzenart entspricht. Auch für Kohle, *tezek* und *kuik* wurde die Einheit *Sack* im Interview als Maßeinheit angegeben. Im Fall von Kohle entspricht ein *Sack* 50 kg, im Fall von *tezek* 20 kg, bei *kuik* 30 kg. Der Wert für Kohle kann dabei als gesichert gelten, während die Werte für *tezek* und *kuik* grobe Annäherungen darstellen. In den Haushaltsinterviews wurde die Maßeinheit *Sack* für *kuik* äußerst selten verwendet, eine Verwendung des Rohstoffs *tezek* wurde generell nur vereinzelt angegeben. Aufgrund der geringen Bedeutung der Einheit *Sack* wurde auf eine aufwändige Stichprobenname verzichtet.

Große Mengen Zwergsträucher und *kuik* werden in Alichur in LKW-Ladungen gehandelt. Es existiert jedoch kein einheitliches Maß *LKW-Ladung*. Vielmehr werden verschiedene LKW-Typen für den Transport und damit auch für den Handel dieser Energieträger verwendet. Während der Haushaltsinterviews wurde die Mengenangabe *LKW-Ladung* zur eindeutigen Zuordnung stets durch eine LKW-Typenbezeichnung ergänzt. Insgesamt wurden in den Haushaltsinterviews fünf verschiedene LKW-Typen genannt: Uaz-3303, Gaz-52 (Bauidentisch mit Gaz-10), Gaz-53, Gaz-66 und Zil-130. Die Energieträger werden lose auf die LKW geladen, so dass kleinere Ladeeinheiten nicht direkt zur Herleitung der LKW-Ladeflächen verwendet werden können. Alle der genannten LKW-Typen wurden in Alichur vorgefunden und ihre Ladeflächen zur Volumenermittlung vermessen. Für den Transport von Zwergsträuchern werden in Alichur zusätzliche Holzaufbauten auf die LKW-Ladeflächen aufgebracht. Für die Ermittlung des Zwergstrauchladevolumens wurden alle in Alichur verfügbaren Aufbauten gemessen. Für die LKW-Typen Uaz-3303 und Gaz-53 konnten keine Holzaufbauten vermessen werden, hier wurden die Größenmaße der Aufbauten bei den Fahrern erfragt. Auch für den Transport von *kuik* werden in Alichur Bordwanderhöhungen an den Ladeflächen der LKW montiert.

Diese sind jedoch deutlich stabiler und niedriger als die Aufbauten für den Zwergstrauchtransport. In Alichur wurden *kuik*-Transporte der LKW-Typen Uaz-3033 und Zil-130 vermessen. Die Ladehöhen für den *kuik*-Transport der nicht vermessenen LKW-Typen wurden auf Grundlage der vermessenen LKW approximiert. Es wurde zudem ein Aufschlag von 10 % auf die gemessene Ladeboardhöhe erteilt, weil *kuik* auf der LKW-Ladefläche aufgetürmt wird und teilweise über die Bordwand hinaussteht. Zur Bestimmung der Lademasse war es nötig, zusätzlich zum Ladevolumen die Ladedichte der einzelnen Energieträger zu ermitteln. Für den Energieträger *kuik* erfolgten dafür zwei Stichprobenmessungen. Im Sommer 2012 wurde ein Uaz-3033 und im Herbst 2013 ein Zil-130 beprobt. Für die Messungen wurde jeweils der Mittelwert eines Stücks *kuik* ermittelt (Stichprobenzahl = je 30 Stück) und dieser mit der Gesamtanzahl der geladenen *kuik*-Stücken multipliziert. Es ergaben sich Lademassen von 1.620 kg (Uaz-3033) und 2.450 kg (Zil-130), sowie Ladedichten von 371 kg/m³ (Uaz-3033) und 272 kg/m³ (Zil-130). Der relativ hohe Unterschied der Ladedichten lässt sich durch den Feuchtigkeitsgehalt des Dungs erklären. So hatte die Stichprobe vom Sommer 2012 weniger Zeit zu trocknen als die vom Herbst 2013. Für die weiteren Berechnungen soll der Mittelwert beider Stichproben, 322 kg/m³, verwendet werden. Die LKW-Ladedichten der Zwergsträucher *teresken* und *shyvak* konnten nicht analog zur Ladedichte von *kuik* ermittelt werden. Das Gewicht der einzelnen Pflanzenindividuen ist sehr gering, so dass eine LKW-Ladung aus etwa 3.000 Pflanzen besteht. Um dennoch eine Abschätzung für die gesuchten Werte zu bekommen, wurden zwei Zwergstrauchernter unabhängig voneinander befragt, wie viele *teng* einer LKW-Ladung Gaz-66 entsprechen. Der LKW-Typ Gaz-66 bot sich für eine solche Abschätzung besonders an, weil im Herbst 2013 etwa 85 % aller Erntefahrten mit diesem LKW-Typ absolviert wurden (Siehe Teilkapitel 4.2.3). Die Zwergstrauchernter antworteten übereinstimmend, dass die Zwergstrauchladung eines Gaz-66 etwa 30 *teng teresken* oder *shyvak* entspräche. Mit dem spezifischen Gewicht für *teng shyvak* und *teresken* aus Tabelle 4-1 ergeben sich Ladedichten von 100 kg/m³ für *teresken* und 78 kg/m³ für *shyvak*. Diese sind in Tabelle 4-2 gegenübergestellt.

Tabelle 4-2: Ladedichten der mengenmäßig bedeutsamsten Energieträger im *jamoat* Alichur. Eigene Daten.

Energieträger	<i>teresken</i>	<i>shyvak</i>	<i>kuik</i>
Ladedichte	100 kg/m ³	78 kg/m ³	322 kg/m ³

Tabelle 4-3 gibt eine Übersicht über die erwähnten fünf LKW-Typen. Dargestellt sind jeweils für die Ermittlung der Lademassen relevante Parameter, sowie die berechneten Lademassen *shyvak*, *teresken* und *kuik*. Zur Überprüfung der Lademassen *kuik* wird zudem die jeweils zulässige Nutzlast aller LKW-Typen dargestellt. Diese entspricht bei den LKW-Typen Uaz-3033, Gaz-52 und Gaz-66 etwa den ermittelten Lademengen *kuik*. Bei den Typen Gaz-53 und Zil-130 wird die zulässige Nutzlast mit der ermittelten Lademenge *kuik* nicht erreicht. Insgesamt scheinen die ermittelten Lademengen *kuik* in einem realistischen Bereich zu liegen. Auch die Zwergstrauchlademengen wurden zusätzlich mit Hilfe einer Stichprobe überprüft. So wurden während des Beladens eines LKW Gaz-66 500 Pflanzen *Shyvak* abgezählt und ihr Anteil an der Gesamtladung abgeschätzt. Das mittlere Gewicht einer geernteten *shyvak* Pflanze in Alichur wird von ZANDLER (in Bearbeitung) mit 325 g beziffert. Der Anteil der 500 abgezählten Pflanzen an der Gesamtladung betrug etwa 10 % bis 20 %. Es ergibt sich ein Wert zwischen 813 kg und 1.625 kg für eine Gaz-66-Ladung *shyvak*. Zwar ist dieser Wert sehr ungenau, dennoch bestätigt er die Größenordnung der in Tabelle 4-3 angegebenen Werte.

Neben den beschriebenen LKW werden zwei weitere Fahrzeugtypen für den Transport von Zwergsträuchern verwendet: Der Kleintransporter *Mosquitsch Izh-27151* und Motorräder mit Beiwagen der Marke Ural. Im Unterschied zu den weiter oben beschriebenen LKW werden die Zwergsträucher bei diesen Fahrzeugen nicht lose sondern in *teng* gebündelt transportiert. Es konnte daher die Einheit *teng* zur Herleitung der Ladekapazität verwendet werden. Nach eigenen Beobachtungen, welche durch die Aussagen lokaler Dorfbewohner bestätigt wurden, wird der *Mosquitsch Izh-27151* in der Regel mit sechs *teng* und die Motorräder mit sieben *teng* beladen. Die beschriebenen Fahrzeuge wurden in den Haushaltsinterviews nur mit den Energieträgern *teresken* und *shyvak* in Verbindung gebracht.

Angaben zum täglichen Brennstoffverbrauch wurden in *Stück*, *Eimer* (Kohle und *kuik*), *taz* (eine Art Tablett für den Brennstofftransport, benutzt für *teresken*, *shyvak* und *kuik*), sowie in *Schaufeln* (Kohle) gemacht. Auch diese Einheiten wurden durch Stichprobennahme ermittelt. Es stellte sich jedoch heraus, dass sich diese Einheiten in den verschiedenen Haushalten Alichurs deutlich unterscheiden. Den beschriebenen Einheiten kommt in der Auswertung der Haushaltsinterviews daher nur eine abschätzende Rolle zu. In Tabelle 4-4 sind abschließend sämtliche für die Mengenbestimmung in Alichur ermittelten lokalen Einheiten zusammengefasst.

Tabelle 4-3 a)-e): Zur Mengenangabe verwendete LKW-Typen mit zugehörigen Kennwerten. Eigene Darstellung und eigene Daten.

a)		<p>Uaz-3303</p> <p>Ladefläche: 4,8 m² Ladehöhe ZS: 1,7 m Masse <i>teresken</i>: 820 kg Masse <i>shyvak</i>: 640 kg Ladehöhe <i>kuik</i>: 0,88 m Masse <i>kuik</i>: 1.360 kg Zulässige Nutzlast: 1.300 kg</p>
b)		<p>Gaz-52</p> <p>Ladefläche: 6,7 m² Ladehöhe ZS: 1,7 m Masse <i>teresken</i>: 1.140 kg Masse <i>shyvak</i>: 890 kg Ladehöhe <i>kuik</i>: 0,88 m Masse <i>kuik</i>: 1.900 kg Zulässige Nutzlast: 2.500 kg</p>
c)		<p>Gaz-53</p> <p>Ladefläche: 8.1 m² Ladehöhe ZS: 1,7 m Masse <i>teresken</i>: 1.380 kg Masse <i>shyvak</i>: 1.070 kg Ladehöhe <i>kuik</i>: 0.88 m Masse <i>kuik</i>: 2.300 kg Zulässige Nutzlast: 4.500 kg</p>
d)		<p>Gaz-66</p> <p>Ladefläche: 6.9 m² Ladehöhe ZS: 1,7 m Masse <i>teresken</i>: 1.160 kg Masse <i>shyvak</i>: 900 kg Ladehöhe <i>kuik</i>: 0.88 m Masse <i>kuik</i>: 1.940 kg Zulässige Nutzlast: 2.000 kg</p>
e)		<p>Zil-130</p> <p>Ladefläche: 8.5 m² Ladehöhe ZS: 2,0 m Masse <i>teresken</i>: 1.700 kg Masse <i>shyvak</i>: 1.330 kg Ladehöhe <i>kuik</i>: 0.99 m Masse <i>kuik</i>: 2.740 kg Zulässige Nutzlast: 6.000 kg</p>

Tabelle 4-4: Zusammenstellung ermittelter Maßeinheiten. Eigene Daten.

	<i>teresken</i>	<i>shyvak</i>	<i>kuik</i>	<i>tezek</i>	Kohle
Uaz-3303	820 kg	640 kg	1.360 kg	--	--
Gaz-52	1.140 kg	890 kg	1.900 kg	--	--
Gaz-53	1.380 kg	1.070 kg	2.300 kg	--	--
Gaz-66	1.160 kg	900 kg	1.940 kg	--	--
Zil-130	1.700 kg	1.330 kg	2.740 kg	--	--
Izh-27151	230 kg	180 kg	--	--	--
Ural	270 kg	210 kg	--	--	--
teng	38,5 kg	30,0 kg	--	--	--
Sack	19.5 kg	15.0 kg	30 kg	20 kg	50 kg
Eimer	--	--	4,2 kg	--	6,0 kg
taz	1,5 kg	1,5 kg	5,0 kg	--	--
Stück	0,157 kg	0,325 kg	3,250 kg	--	--
Schaufel	--	--	--	--	0,9 kg

Uaz-3303 ... zur Massenermittlung herangezogene Einheit

Eimer für die größenordnungsmäßige Abschätzung verwendete Einheit

4.1.3 PRÜFUNG UND BEREINIGUNG VON INKONSISTENZEN

In Anschluss an die Datenerhebung wurden sämtliche Interviewdaten in ein Datenverarbeitungssystem übertragen und die von den Haushalten angegebenen Mengen mit Hilfe der Umrechnungsgrößen aus Tabelle 4-4 in metrische Einheiten konvertiert. Um zusätzliche Fehlerquellen auszuschließen erfolgte die Digitalisierung durch eine direkt an den Haushaltsbefragungen beteiligte Person. Auch wenn Übertragungsfehler auf diese Weise minimiert werden konnten, lassen sie sich dennoch nicht vollständig ausschließen. Es ist weiterhin davon auszugehen, dass auch während der Befragung in Alichur, teils durch Missverständnisse zwischen Befragern und Befragten, teils aus anderen Gründen, Fehler entstanden. Um diesen Fehlern entgegenzuwirken mussten die erhobenen Haushaltsdaten zunächst auf Inkonsistenzen überprüft werden, bevor eine quantitative Datenauswertung stattfinden konnte. Die Inkonsistenzprüfung basiert auf einem Vergleich der drei Befragungsabschnitte, die sich dem Thema Energie widmen (Abschnitte 2, 3 und 4). Während sich Befragungsabschnitt 2 des Fragebogens der Häufigkeit und Menge der Ernte von Zwergsträuchern widmet, wurden in Abschnitt 3, nach Sommer und Winter unterschieden, tägliche Brennstoffnutzungsmuster abgefragt. Befragungsabschnitt 4 beinhaltet eine

Zusammenstellung aller innerhalb eines Jahres verwendeten Brennstoffe, sowie deren Quellen und Kosten für die Beschaffung. Bei der Inkonsistenzprüfung wurde nach Widersprüchen zwischen diesen drei Fragebogenteilen gesucht. So sollten die Angaben zur Zwergstrauchernte aus Abschnitt 2 in etwa dem auf ein ganzes Jahr hochgerechneten Brennstoffverbrauch aus Befragungsabschnitt 3 und der in Abschnitt 4 genannten Menge für die jährliche Bevorratung entsprechen. Wurde beispielsweise in Befragungsabschnitt 2 des Fragebogens angegeben, dass dreimal im Jahr mit einem Gaz-66 *shyvak* geerntet wird (ca. 2.700 kg), so sollte sich aus den Angaben in Abschnitt 3 ein täglicher Verbrauch von etwa 7,4 kg (2.700 kg/365 Tage) ergeben. Gleichzeitig sollte auch in Befragungsabschnitt 4 angegeben sein, dass jährlich neben anderen Energieträgern drei Gaz-66 *shyvak* verbraucht werden. Beim Vergleich der Antworten aus den einzelnen Fragebogenteilen zeigten sich folgende Charakteristika:

Befragungsabschnitt 2

- Es wurden größtenteils gut abgesicherte Einheiten wie LKW oder *teng* verwendet, teilweise wurden aber auch Mengenangaben in kleinen Einheiten gemacht (z.B. *Sack*), bei denen Ungenauigkeiten bei der Konvertierung ein starkes Gewicht haben.
- Zuweilen werden Teile der genannten Zwergstrauchmengen nicht für den Eigenverbrauch, sondern zum Verkauf verwendet. Diese sind hier jedoch nicht gesondert erfasst.
- Die Angaben zur Regelmäßigkeit der Ernte sind häufig vereinfacht, weil sich unregelmäßige Erntemuster im Fragebogen schwer abbilden lassen.

Befragungsabschnitt 3

- Es wurden hauptsächlich Mengenangaben in sehr kleinen Einheiten gemacht (*Stück, taz, Eimer, Schaufel*), bei denen die Umrechnung in metrische Einheiten vergleichsweise ungenau ist und Konvertierungsfehler ein starkes Gewicht haben.
- Die Angaben sind pauschalisiert, weil nicht den ganzen Winter bzw. Sommer über in gleicher Weise verfahren wird, tatsächlich wird die Feuerungsweise vor allem entsprechend der Außentemperatur angepasst.
- Vereinzelt wurden die gemachten Angaben dem Fragebogen angepasst, so dass in jeder Spalte eine Nennung erfolgen konnte.

Befragungsabschnitt 4

- Es wurden größtenteils große Einheiten (*LKW*) verwendet.
- Möglichkeiten für Fehlinterpretationen der gemachten Angaben sind kaum vorhanden.

Die Antworten aus Befragungsabschnitt 4 des Fragebogens gelten als am besten abgesichert, weil hier weder bei der Umrechnung der Einheiten noch bei der Interpretation der Antworten große Fehler zu erwarten sind. Ebenso sind die Angaben in Abschnitt 2 relativ verlässlich. Hier treten nur bei der Verwendung schlecht abgesicherter Einheiten und bei unregelmäßigem Ernteverhalten Unsicherheiten auf. Im Gegensatz hierzu sind die Werte aus Befragungsabschnitt 3 des Fragebogens nicht für eine quantitative Analyse der verwendeten Energieträger geeignet. Zum einen zeigte sich, dass sich das Heizverhalten der Bewohner Alichurs nicht pauschal in Winter- und Sommerverhalten einteilen lässt. Zum anderen wurden Mengenangaben in sehr kleinen Einheiten gemacht, die sich, wie weiter oben beschrieben, nur sehr ungenau quantifizieren lassen und bei denen sich schon kleine Fehler stark auf den Gesamtwert auswirken.

Alles in allem wurden für die Plausibilitäts- und Konsistenzprüfung die Werte aus den Befragungsabschnitten 2 und 4 verglichen. Bei leichten Abweichungen, die sich nicht durch den Zukauf oder Verkauf von Zwergsträuchern erklären lassen, wurden die Mengenangaben aus Befragungsabschnitt 4 denen aus Abschnitt 2 vorgezogen. Ergaben sich jedoch große, nicht erklärbare Unterschiede zwischen den Zwergstrauchmengen in den Befragungsabschnitten 2 und 4, wurden die betreffenden Haushalte nacherhoben. Die Werte aus Befragungsabschnitt 3 fanden bei der Datenkorrektur keine Beachtung, weil sie für die Ermittlung des Jahresverbrauchs ungeeignet erschienen. In Anhang II findet sich der verwendete Korrekturschlüssel mit Erläuterungen.

Im Zuge der Bereinigung von Inkonsistenzen ergab sich ein Bedarf für eine Nacherhebung von 17 der ursprünglich befragten Haushalte. Während der Nacherhebung im Herbst 2013 konnten 14 dieser Haushalte erneut befragt werden. Drei Haushalte konnten nicht nacherhoben werden und fanden in der Auswertung der Haushaltsinterviews keine Beachtung.

4.1.4 ERGEBNIS DER HAUSHALTSBEFRAGUNGEN

a) Mengen der verwendeten Energieträger

Für die Haushaltsbefragung wurden in einer Vollerhebung alle 210 Haushalte in Alichur aufgesucht. Insgesamt wurde mit 114 gültigen Fragebögen eine Stichprobengröße von 54 % erreicht. In Tabelle 4-5 sind die im Bezugsjahr 2012 verwendeten Energieträger nach durchschnittlichem Verbrauch pro Haushalt, Anteil an Haushalten, welche den Energieträger in ihrem Energiemix berücksichtigen, und auf die Ortschaft Alichur hochgerechnetem Gesamtverbrauch gegenübergestellt. Der mengenmäßig bedeutendste Energieträger ist mit einem durchschnittlichen Verbrauch pro Haushalt und Jahr von gut 6.000 kg *kuik*. Lediglich ein Haushalt gab an, diesen Energieträger nicht zu verwenden. Dem einheitlichen Nutzungsmuster dieses Energieträgers entsprechend ergab sich eine vergleichsweise geringe Standardabweichung von rund 1.800 kg. Der Anteil aller Haushalte Alichurs, die *kuik* zum Heizen verwenden, liegt bei über 99 %. Der ebenfalls auf Viehdung basierende Energieträger *tezek* hingegen wird nur von 26 % aller Haushalte verwendet und findet mit durchschnittlich knapp 400 kg pro Haushalt und Jahr nur in geringem Maße Verwendung. Die im Vergleich zur Nutzungsmenge hohe Standardabweichung von etwa 800 kg verdeutlicht die uneinheitliche Verwendung dieses Energieträgers. Zusammen werden im Durchschnitt pro Haushalt und Jahr knapp 6.500 kg Viehdung in Form von *kuik* und *tezek* verheizt. Die Standardabweichung dieses Wertes beträgt etwa 3.000 kg. Ebenfalls bedeutend ist die Masse an Zwergsträuchern, von denen durchschnittlich etwa 3.400 kg pro Haushalt und Jahr für energetische Zwecke in Alichur verwendet werden. Die Standardabweichung beträgt hier rund 1.800 kg. Etwa 97 % aller Haushalte greifen auf diesen Energieträger zurück. Die pro Haushalt durchschnittlich verwendete Masse an Zwergsträuchern setzt sich etwa zu einem Drittel aus *teresken* und zu zwei Dritteln aus *shyvak* zusammen. Mit 87 % aller Haushalte verwenden deutlich mehr Einwohner *shyvak* als *teresken*, welches nur in etwa 54 % aller Haushalte gebraucht wird. Kohle wird im Durchschnitt mit einer Menge von etwa 650 kg pro Haushalt und Jahr mengenmäßig eher wenig konsumiert. Der Anteil der Haushalte, die diesen Energieträger verwenden liegt mit 77 % jedoch relativ hoch, die Standardabweichung des Kohleverbrauchs beträgt etwa 600 kg. Auf die gesamte Ortschaft Alichur hochgerechnet ergeben sich folgende jährliche Energieträgerverbrauchsmengen: 707 t Zwergsträucher bestehend aus 282 t

teresken und 425 t *shyvak*, 1.353 t Viehdung bestehend aus 83 t *tezek* und 1.270 t *kuik*, sowie 138 t Kohle.

Tabelle 4-5: Massen und Anteile der in Alichur laut Haushaltsbefragung verwendeten Energieträger, Bezugsjahr 2012. Eigene Daten.

Energieträger	MW Verbrauch/ HH	Stabw. Verbrauch/ HH	Anteil HH, die ET verwenden	Gesamtverbrauch Alichur
<i>teresken</i>	1.343 kg	1.795 kg	54 %	282 t
<i>shyvak</i>	2.024 kg	1.532 kg	87 %	425 t
Zwergsträucher	3.367 kg	1.824 kg	97 %	707 t
<i>kuik</i>	6.047 kg	2.786 kg	99 %	1.270 t
<i>tezek</i>	396 kg	817 kg	26 %	83 t
Dung ges.	6.442 kg	2.976 kg	99 %	1.353 t
Kohle	655 kg	615 kg	77 %	138 t

ET ...Energieträger
 HH ...Haushalt
 MW ...Mittelwert
 Stabw. ...Standartabweichung

b) Zwergstrauchernte

In den Haushaltsbefragungen wurde zwischen Zwergstrauchernte und Zwergstrauchverbrauch unterschieden. Während ein Teil der Bevölkerung Alichurs Zwergsträucher zwar verwendet, aber nicht selber erntet, existieren auf der anderen Seite Haushalte, die Zwergsträucher gezielt für den Verkauf ernten. Als bevorzugte Erntemethoden für den Verkauf von Zwergsträuchern wurden die Motorradernernte und die kombinierte Ernte identifiziert. Laut Haushaltsbefragung wurden in Alichur im Jahr 2012 138 t Zwergsträucher verkauft. Im gleichen Zeitraum wurden jedoch von der lokalen Bevölkerung nur 56 t Zwergsträucher zur thermischen Nutzung gekauft. Die Differenz zwischen den beiden Werten, 82 t Zwergsträucher, hat das Energiesystem von Alichur in diesem Zeitraum als Energieexport, beispielsweise nach Bulun-Kul und Bash-Gombež verlassen. Die Menge der 2012 im Gebiet Alichur geernteten Zwergsträucher liegt demnach mit 789 t um 82 t höher als die der thermisch verwendeten Zwergsträucher. Von den 789 t der im Jahr 2012 geernteten Zwergsträucher wurden 140 t (18 %) durch Individuelle Ernte, 349 t (44 %) durch Gruppenernte, 172 t (22 %) durch Motorradernernte und 128 t (16 %) durch kombinierte Ernte bereitgestellt (Siehe Teilkapitel 3.3.2 zu den Erntearten). Aus diesen Zahlen ist ersichtlich, dass der Anteil der Gruppenernte die anderen drei Ernteformen mit einem Anteil von 44 % deutlich

dominiert. Individuelle Ernte, Motorradernernte und kombinierte Ernte liefern mit Anteilen von 16 % bis 22 % an den geernteten Zwergstrauchmengen sehr ähnliche Anteile. Abbildung 4-2 fasst die Aufteilung der geernteten Zwergsträucher auf die in Teilkapitel 3.3.2 beschriebenen Erntearten graphisch zusammen.

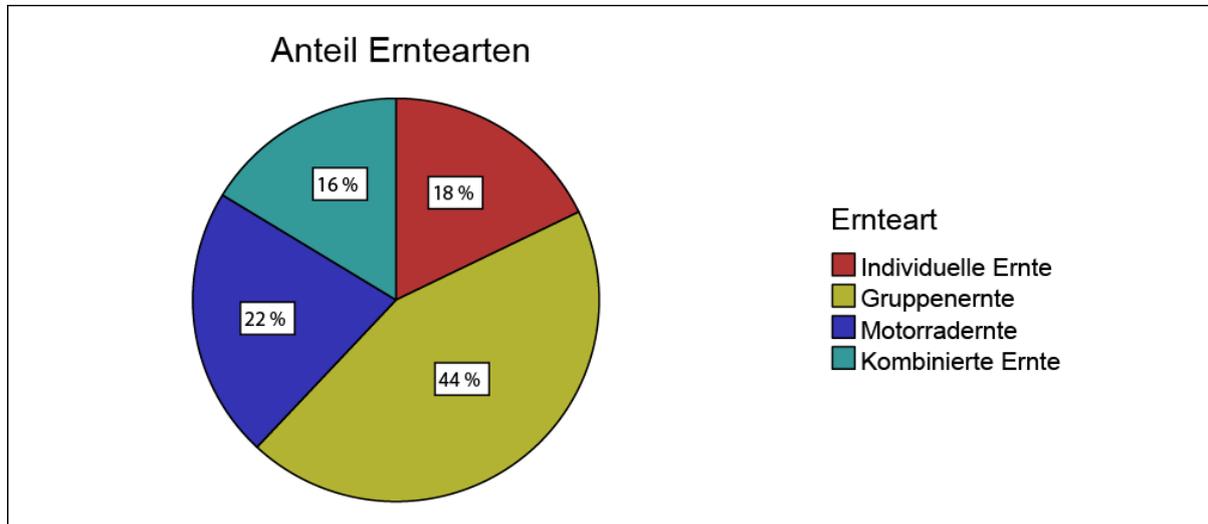


Abbildung 4-2: Aufteilung der geernteten Zwergsträucher auf die in Teilkapitel 4.3.2. beschriebenen Erntearten. Eigene Darstellung.

c) Stromverbrauch

Die Haushaltsinterviews ergaben, dass 53 % der Haushalte Alichurs über einen Generator und 94 % über einen Solarkollektor mit dazugehörigem Akkumulator verfügen. Wie in Teilkapitel 3.3.2 erwähnt, werden die vorhandenen Generatoren aufgrund der hohen Benzinkosten für den alltäglichen Bedarf in der Regel nicht eingesetzt. Es muss zudem davon ausgegangen werden, dass ein nicht zu vernachlässigender Anteil der im Haushaltsinterview angegebenen Generatoren nicht funktionsbereit ist. Für die Herleitung des Strombedarfs sollen nur die Solarkollektoren betrachtet werden. Der Großteil aller Haushalte Alichurs betreibt seinen Solarkollektor zusammen mit einem vom *hukumat* (lokale Verwaltung) oder vom Roten Kreuz als Hilfslieferung zur Verfügung gestellten Akkumulator. Dieser weist eine Ladung (Q) von 24 Ah und eine Spannung (U) von 12 V auf. Mit Formel 4-1 ergibt sich eine Energiemenge von 288 Wh, die maximal in der Batterie gespeichert werden kann.

$$W = Q * U$$

Formel 4-1

W ...Energie [J]
 Q ...Ladung [As]
 U ...Spannung [V]

Der Typ der als Hilfslieferung bereitgestellten Solarzellen weist eine Größe von 0,5 m² auf. Wird die in Teilkapitel 3.2.5 für das Solarpotenzial Alichurs ermittelte durchschnittliche Leistung von 350 W/m² zugrunde gelegt, ergibt sich für den beschriebenen Typ Akkumulator nach Formel 4-2 bei einer Leistung der Solarzelle von 175 W/m² (1/2 m²) eine Ladedauer von gerade einmal einer Stunde und 39 Minuten.

$$t = W/P \qquad \text{Formel 4-2}$$

t ...Zeit [s]
 W ...Energie [J]
 P ...Leistung [J/s]

Der Engpass der Stromversorgung liegt hier also bei der Stromspeicherung. Die Stromnutzung erfolgt in Alichur größtenteils abends. Es wird angenommen, dass nicht mehr als das 1,5-fache der im Akkumulator gespeicherten Energiemenge pro Tag und Haushalt genutzt werden können. Dies ergibt einen täglichen Verbrauch von 432 Wh pro Haushalt. Auf 210 Haushalte und 365 Tage hochgerechnet resultiert ein Jahresstromverbrauch von 33.113 kwh oder 119.2 GJ für ganz Alichur.

4.1.5 HEIZWERTANALYSE

Um die in den Haushaltsinterviews ermittelten Energieträgermassen untereinander vergleichen zu können, ist die Kenntnis der energetischen Eigenschaften aller verwendeten Energieträger nötig. Die maximale bei der Verbrennung einer definierten Masse eines Energieträgers freisetzbare Energie, d.h. die in einem Energieträger chemisch gebundene Energie, wird mit Hilfe der Kenngrößen *Heizwert* und *Brennwert* beschrieben (KALTSCHMITT ET AL. 2009, S. 348). KALTSCHMITT ET AL. (2009, S. 348) definieren *Heizwert* als „...die Wärmemenge..., die bei der vollständigen Oxidation eines Brennstoffs ohne Berücksichtigung der Kondensationswärme (Verdampfungswärme) des im Abgas befindlichen Wasserdampfes freigesetzt wird“. Im Gegensatz zum Heizwert bezieht sich die Angabe des Brennwertes auf „...die bei der vollständigen Oxidation eines Brennstoffs freigesetzte Wärmemenge..., die verfügbar wird, wenn auch die Kondensationswärme des bei der Verbrennung gebildeten Wasserdampfes nutzbar gemacht wird“ (KALTSCHMITT ET AL. 2009, S. 349). Wie in den Definitionen beschrieben, liegt der Unterschied zwischen den beiden Größen in der Betrachtung des bei der Verbrennung entstehenden Wasserdampfes. Quellen dieses Wasserdampfes sind im verbrennenden Energieträger freies oder gebundenes Wasser, aber auch Wasser, das bei der Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff entsteht. Der Heizwert eines Energieträgers liegt somit immer, auch bei wasserfreien Proben,

unter seinem Brennwert. Kondensationswärme kann nur in speziell für den Anfall von Kondensat angelegten Kaminsystemen wie beispielsweise Brennwertkesseln genutzt werden. Diese Anlagen kommen jedoch bei der Verbrennung biogener Energieträger in der Regel nicht zum Einsatz (KALTSCHMITT ET AL. 2009, S. 349). Daher stellt hier der Heizwert die maßgebliche Größe zur Bestimmung der in einem Energieträger gebundenen chemischen Energie dar.

Bei biogenen Energieträgern ist der Heizwert abhängig vom Anteil oxidierbarer Elemente. Diese sind in erster Linie Kohlenstoff und Wasserstoff. Weiterhin sind auch weniger konzentriert vorkommende oxidierbare Elemente wie Schwefel und Stickstoff in biogenen Energieträgern enthalten (KALTSCHMITT ET AL. 2009, S. 351). Tabelle 4-6 zeigt eine Elementaranalyse von vier Proben der in Alichur verwendeten biogenen Energieträger. Für die Analyse wurden Proben aus der Brennmaterialbevorratung einzelner Einwohner Alichurs entnommen. Die Analyse wurden vom Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik der Universität Stuttgart (IFK) durchgeführt (IFK 2013). Die Werte aus Tabelle 4-6 beziehen sich auf einen wasserfreien Probenzustand.

Im Vergleich der Energieträger untereinander ist auffällig, dass die Kohlenstoffanteile der untersuchten Zwergsträucher *teresken* und *shyvak* mit über 50 % deutlich höher als jene der auf Viehdung basierenden Energieträger *kuik* und *tezek* liegen, welche um Werte von 40 % schwanken. Die Wasserstoffgehalte der untersuchten Energieträger sind mit Werten zwischen 4,5 % und 6 % sehr ähnlich. Die Energieträger *kuik* und *tezek* weisen leicht höhere Stickstoffgehalte als *teresken* und *shyvak* auf. Der Schwefelgehalt liegt bei allen Energieträgern nahe oder unter der Nachweisgrenze. Die elementare Zusammensetzung der untersuchten Energieträger lässt, aufgrund des größeren Kohlenstoffgehaltes, einen höheren Heizwert bei *teresken* und *shyvak* im Vergleich zu *kuik* und *tezek* vermuten.

Tabelle 4-6: Elementaranalyse biogener Energieträger aus Alichur. Die angegebenen Werte beziehen sich auf einen wasserfreien Probenzustand. Quelle: IFK (2013).

Energieträger	Kohlenstoff (C)	Wasserstoff (H)	Stickstoff (N)	Schwefel (S)
<i>teresken</i>	50,2 %	5,69 %	0,97 %	n. b. <0, 30 %
<i>shyvak</i>	51,5 %	5,98 %	0,89 %	n. b. <0, 30 %
<i>kuik</i>	37,6 %	4,57 %	1,73 %	0,60 %
<i>tezek</i>	43,3 %	5,40 %	2,71 %	n. b. < 0,30 %

n. b. ... nicht bestimmbar

Neben der elementaren Zusammensetzung eines Energieträgers wird der Heizwert wesentlich durch den Wasser- und Aschegehalt beeinflusst. Sowohl zunehmende Wasser-, als auch Aschegehalte führen zu einer Verringerung des Heizwertes eines Energieträgers (KALTSCHMITT ET AL. 2009, S. 352). Der Anteil an flüchtigen Bestandteilen wirkt sich hingegen nicht auf den Heizwert, sondern vielmehr auf das Brennverhalten eines Energieträgers aus. Energieträger mit hohem Gehalt an flüchtigen Stoffen brennen progressiv, während ein niedriger Anteil an flüchtigen Stoffen für degressives Brennverhalten sorgt. Die oben genannten Kennwerte, sowie der Brennwert im wasserfreien Zustand der vier untersuchten Energieträger sind in Tabelle 4-7 dargestellt. Eine Analyse der in Alichur verwendeten Steinkohle fand nicht statt. Hier konnte auf Analysewerte der Firma Celsius, welche Teilhaber einer Kohlemine im kirgisischen Sary Mogol ist, zurückgegriffen werden (REA 2013). Gegenwärtig stammt sämtliche im Ost-Pamir verwendete Kohle aus dieser Mine. REA (2013) gibt Spannen der relevanten Analysewerte an, weil hier mehrere Proben analysiert wurden. Für die Angaben zum Energieträger Steinkohle in Tabelle 4-7 wurden die Mittelwerte der angegebenen Spannen verwendet. Angaben zum wasserfreien Brennwert der analysierten Kohleproben werden in REA (2013) nicht gemacht. Die in REA (2013) auf einen analysefeuchten Zustand bezogenen Angaben zu Aschegehalt und zum Anteil an flüchtigen Stoffen wurden auf wasserfreie Proben umgerechnet.

Tabelle 4-7: Energetische Eigenschaften der in Alichur verwendeten Energieträger. Quellen: IFK (2013), REA (2013).

Energieträger	Feuchtegehalt	Aschegehalt wasserfrei	Flüchtige Stoffe wasserfrei	Brennwert wasserfrei
<i>teresken</i>	6,63 %	7,45 %	73,5 %	20,6 MJ/kg
<i>shyvak</i>	5,49 %	6,75 %	74,4 %	21,4 MJ/kg
<i>kuik</i>	6,62 %	29,0 %	58,4 %	15,2 MJ/kg
<i>tezek</i>	7,06 %	21,5 %	64,7 %	17,7 MJ/kg
Steinkohle	7,00 %	18,6 % ^a	28,4 % ^a	--

^a berechnet

Die beiden untersuchten Zwergstrauchproben *shyvak* und *teresken* sind sich in ihren energetischen Eigenschaften sehr ähnlich. Die Probe *shyvak* weist mit 5,49 % einen leicht geringeren Feuchtigkeitsgehalt als die Probe *teresken* mit 6,63 % auf. Da jeweils nur eine Probe untersucht wurde, kann nicht davon ausgegangen werden, dass der leicht niedrigere Feuchtigkeitsgehalt von *shyvak* im Vergleich zu *teresken* reprä-

sentativ ist. Auch der Aschegehalt der *shyvak*-Probe ist mit 6,75 % etwas geringer als der Aschegehalt der *teresken*-Probe, welcher 7,45 % ausmacht. Beide Proben enthalten etwa 74 % flüchtige Stoffe. Der ermittelte Brennwert der *shyvak*-Probe ist mit 21,4 MJ/kg um 0,8 MJ/kg höher als der Brennwert der *teresken*-Probe. Die beiden Energieträger *kuik* und *tezek* weisen ähnliche Analysefeuchten wie die untersuchten Zwergsträucher auf. Hier liegen diese im Rahmen von 6,62 % (*kuik*) bis 7,06 % (*tezek*). Die Aschegehalte der auf Viehdung basierenden Energieträger sind deutlich höher als jene der Zwergsträucher. Während die untersuchte *kuik*-Probe einen Aschegehalt von 29,0 % aufweist, liegt dieser bei der *tezek*-Probe bei 21,5 %. Die Energieträger *kuik* und *tezek* enthalten einen deutlich niedrigeren Anteil an flüchtigen Stoffen als die untersuchten Zwergstrauchproben. Bei *kuik* wurden 58,4 % flüchtige Stoffe, bei *tezek* 64,7 % bestimmt. Entsprechend der hohen Asche- und niedrigeren Kohlenstoffgehalte ergeben sich bei den auf Dung basierenden Energieträgern deutlich geringere Brennwerte als bei den untersuchten Zwergstrauchproben. So weist die untersuchte Probe *kuik* einen Brennwert von 15,2 MJ/kg auf, während die *tezek*-Probe mit 17,7 MJ/kg einen etwas höheren Wert erreicht. Die Angaben zu den untersuchten Steinkohleproben weisen einen mittleren Feuchtegehalt von 7,0 % aus. Der Aschegehalt der Kohleproben liegt mit 18,6 % ebenso wie der Anteil flüchtiger Stoffe in einem für Steinkohle recht hohen Bereich. Dies deutet auf eine geringere Kohlequalität mit vergleichsweise niedrigem Brennwert hin.

Bei der Heizwertanalyse durch das IFK wurden Heizwerte im analysefeuchten Zustand und im wasserfreien Probenzustand ermittelt. Die in REA (2013) zum Heizwert der Steinkohle gemachten Angaben beziehen sich rein auf analysefeuchte Probenzustände. Für einen Vergleich der verschiedenen Energieträger untereinander sind die Angaben zu den analysefeuchten Heizwerten wenig geeignet. Da bei den biogenen Energieträgern jeweils nur eine Probe untersucht wurde, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die ermittelten Feuchtegehalte nicht repräsentativ sind. Der Heizwert im wasserfreien Zustand ist zwar für einen Vergleich der Energieträger untereinander geeignet, er stellt jedoch kein Maß für die tatsächlich verfügbare Energiemenge pro Masse Energieträger dar. Zur Berechnung des Energiemixes, d.h. des Anteils der einzelnen Primärenergieträger am Gesamtenergieverbrauch der Ortschaft Alichur, wird jedoch die tatsächlich nutzbare Energiemenge pro Masse Energieträger benötigt. Um die Heizwerte der verschiedenen Energieträger miteinander vergleichen zu können und dennoch die verfügbare Energiemenge nicht zu

überschätzen, wurden für alle analysierten Energieträger Heizwerte bezogen auf einen Feuchtegehalt von 7 % errechnet. Hierzu wurde die Formel 4-3, welche KALTSCHMITT ET AL. (2009, S. 352) entnommen ist, verwendet.

$$H_u = \frac{H_{u(wf)} * (100 - w) - 2,443 * w}{100} \quad \text{Formel 4-3}$$

H_u ...Heizwert der Biomasse [MJ/kg]

$H_{u(wf)}$...Heizwert der Biomasse im wasserfreien Zustand [MJ/kg]

w ...Wassergehalt [%]

Tabelle 4-8 stellt die analysierten und berechneten Heizwerte der untersuchten Proben gegenüber. Bei einem als realistisch eingeschätzten Feuchtegehalt von 7 % weisen die auf Dung basierenden Energieträger *kuik* und *tezek* mit 13,0 MJ/kg und 15,2 MJ/kg die geringsten Heizwerte auf. *teresken* und *shyvak* unterscheiden sich in ihren Heizwerten nur wenig. Bei 7 % Probenfeuchte werden hier Heizwerte von 17,8 MJ/kg und 18,5 MJ/kg erreicht. Wie zu erwarten weist die Steinkohleprobe aus der Sary Mogol Miene den höchsten Heizwert der verglichenen Energieträger auf. Hier wurde für eine Probenfeuchte von 7 % ein Heizwert von 23,0 MJ/kg ermittelt.

Tabelle 4-8: Heizwerte der untersuchten Proben im Zustand unterschiedlicher Probefeuchten. Quellen: IFK (2013), REA (2013).

Energieträger	Feuchtegehalt Probe	Heizwert analysefeucht	Heizwert wasserfrei	Heizwert 7 % (berechnet)
<i>teresken</i>	6,63 %	17,9 MJ/kg	19,3 MJ/kg	17,8 MJ/kg
<i>shyvak</i>	5,49 %	18,9 MJ/kg	20,1 MJ/kg	18,5 MJ/kg
<i>kuik</i>	6,62 %	13,1 MJ/kg	14,2 MJ/kg	13,0 MJ/kg
<i>tezek</i>	7,06 %	15,2 MJ/kg	16,6 MJ/kg	15,2 MJ/kg
Steinkohle	7,00 %	23,0 MJ/kg	24,9 MJ/kg ^a	23,0 MJ/kg

^a berechnet

4.1.6 SYNTHESE ENERGIEMIX ALICHUR 2012

Durch Multiplikation der in 4.1.4 dargestellten Energieträgermassen mit den in 4.1.5 diskutierten Heizwerten und unter Einbezug des in 4.1.4 hergeleiteten Stromverbrauchs wurden die im Jahr 2012 in Alichur verwendeten Energiemengen je Energieträger ermittelt. In Summe wurden im Jahr 2012 in Alichur 34,0 TJ an Energie für sämtliche in 3.3.1 beschriebene Energiedienstleistungen verwendet. Dabei entfielen auf die einzelnen Energieträger folgende Werte: 5,0 TJ (14,7 %) *teresken*, 7,9 TJ (23,2 %) *shyvak*, 16,5 TJ (48,7 %) *kuik*, 1,3 TJ (3,7 %) *tezek*, 3,2 TJ (9,3 %)

Kohle und 0,1 TJ (0,4 %) Strom. Abbildung 4-3 fasst den Energiemix vom Alichur graphisch zusammen. Den bedeutendsten Anteil am Energiemix der Ortschaft Alichur haben demnach mit über 52 % die auf Viehdung basierenden Energieträger *kuik* und *tezek*. Die Zwergsträucher *teresken* und *shyvak* stehen mit zusammen fast 38 % Anteil am Energiemix von ihrer Bedeutung her an zweiter Stelle. Der einzige nicht lokal generierte Energieträger Steinkohle hat lediglich einen Anteil von etwas mehr als 9 % am Energiemix. Die Menge an verwendetem Strom macht weniger als 0,5 % der insgesamt verbrauchten Energie aus.

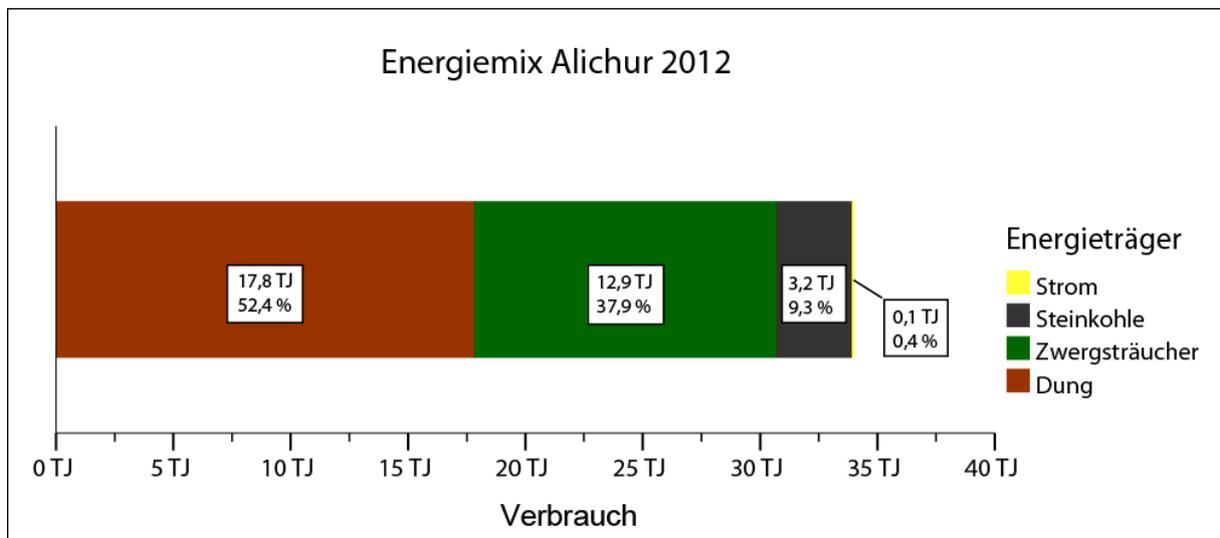


Abbildung 4-3: Energiemix von Alichur (Jahr 2012). Eigene Daten.

4.2 RÄUMLICHE BETRACHTUNG DER ZWERGSTRAUCHERENTE

Da es sich bei den im Energiemix von Alichur verwendeten Zwergsträuchern um einen biogenen Energieträger mit starkem Raumbezug handelt, werden neben der Menge der verwendeten Biomasse auch Daten zur räumlichen Ausdehnung der Ernte für eine Energiesystembetrachtung benötigt. Diese Notwendigkeit ergibt sich aus den in Teilkapitel 2.3.1 beschriebenen Eigenschaften von Biomasse als Energieträger. Als Grundlage für eine räumliche Betrachtung der Zwergstrauchernte wird in diesem Teilkapitel zunächst eine Erntegebietskarte der betrachteten Region Alichur vorgestellt (Teilkapitel 4.2.1). In Teilkapitel 4.2.2 erfolgt mit Hilfe dieser Karte eine raumbezogene Auswertung der Zwergstrauchernte auf Basis der Haushaltsinterviews aus dem Jahr 2013. Unabhängig von den Haushaltsbefragungen wurden im Zeitraum 2013 bis 2014 GPS Tracks von den unterschiedlichen Zwergstraucherntemethoden aufgezeichnet. Diese werden in Teilkapitel 4.2.3 diskutiert. In Teilkapitel 4.2.4 erfolgt die Auswertung der mit LKW Fahrern in der Herbsterntesaison

2013 geführten Fachinterviews zum Thema Gruppenernte. Abschließend wird in Teilkapitel 4.2.5 die Qualität der vorgestellten Erhebungsmethoden diskutiert.

4.2.1 ERNTEGEBIETSKARTE

Zweck der Erntegebietskarte soll die Abbildung des gesamten potenziell für die Zwergstrauchernte zur Verfügung stehenden Gebietes rund um die Ortschaft Alichur sein. Bei der Konzeptionierung der Erntegebietskarte wurde davon ausgegangen, dass das von der Bevölkerung Alichurs beerntbare Gebiet nicht identisch mit den administrativen Grenzen des *jamoat* Alichur ist. Dies liegt einerseits daran, dass sich neben der Ortschaft Alichur auch die Ortschaften Bulun-Kul und Bash-Gombez im *jamoat* Alichur befinden. Diese Ortschaften beanspruchen Gebiete des *jamoat* Alichur zur Zwergstrauchernte exklusiv für sich. Weiterhin sind Teile des *jamoat* Alichur von der Ortschaft Alichur aus mit den für die Zwergstrauchernte eingesetzten Transportmitteln nicht erreichbar. Diese Gebiete können nicht als für die Zwergstrauchernte verfügbar betrachtet werden. Auch zeigte sich während der Arbeit vor Ort, dass sich die administrativen Grenzen nicht immer mit den von der lokalen Bevölkerung wahrgenommenen Grenzen decken. Neben der absoluten Ausdehnung des Zwergstraucherntegebietes soll die erstellte Karte zudem die Abgrenzung einzelner Erntegebiete voneinander abbilden. Die in den Haushaltsinterviews genannten Erntegebiete wurden als Bezugsgröße verwendet. Als Grundlage für die Erntegebietskarte diente folgendes Kartenmaterial:

- a. Digitales Geländemodell (DGM) (METI & NASA 2009)
- b. Google Maps (GOOGLE MAPS 2013)
- c. Sowjetische Militärkarte (GENERAL'NYY SHTAB SSSR 1985-1991) Blätter 62 bis 64, 74 bis 76 und 86 bis 88.

Die Erntegebietskarte wurde in einem mehrstufigen Arbeitsverfahren erstellt. Die Arbeitsschritte fanden abwechselnd im Projektgebiet und außerhalb des Projektgebietes statt.

Der erste Schritt der Kartenerstellung wurde im Frühjahr 2013 in Alichur durchgeführt. Hier wurden zunächst alle in den Haushaltsinterviews genannten Erntegebietsbezeichnungen gesammelt. In Zusammenarbeit mit ortskundigen Bewohnern von Alichur wurde grob die Lage der einzelnen Gebiete im digitalen Höhenmodell verzeichnet. Anschließend wurden die Abgrenzung des Alichur zugehörigen Ernte-

gebietes nach Westen in Richtung Bash-Gombez, nach Osten in Richtung Bulun-Kul, sowie die maximale Erreichbarkeit in Nord- und Südrichtung diskutiert. Innerhalb der Zugehörigkeitsgrenzen liegende und in den Haushaltsinterviews nicht genannte Erntegebiete wurden in der Karte ergänzt. Der ungefähre Verlauf der einzelnen Erntegebietsgrenzen wurde besprochen.

Im zweiten Schritt wurden in erster Näherung die Grenzen der einzelnen Erntegebiete im GIS errechnet. Als Erntegebietsgrenzen wurden folgende topographische Merkmale verwendet:

- a. Höhenlinien
- b. Wassereinzugsgebiete
- c. Flüsse
- d. Seen
- e. Die Grenzen der Ortschaft Alichur
- f. Straßen
- g. Flächenschlusslinien
- h. Beschreibungen von Ortsansässigen

Die verwendeten Höhenlinien und Wassereinzugsgebiete wurden aus dem DGM errechnet. Zur Bestimmung der Wassereinzugsgebiete war es zudem notwendig, das lokale Flussnetz zu digitalisieren. Dies erfolgte auf Grundlage des Google Maps Satellitenbildes (GOOGLE MAPS 2013). Die berechneten Wassereinzugsgebiete wurden zur Abgrenzung der in benachbarten Tälern gelegenen Erntegebiete benutzt. Google Maps Satellitenbilder wurden auch als Grundlage für die Digitalisierung der im Projektgebiet gelegenen Seen, sowie der Ortschaft Alichur verwendet. Das Straßennetz Alichurs wurde größtenteils anhand von im Projektgebiet aufgenommenen GPS-Tracks neu erstellt. Wo keine GPS-Tracks vorhanden waren, wurde auf Google Maps Daten, sowie auf Daten aus den sowjetischen Militärkarten zurückgegriffen. Details zur erstellten Wegenetzkarte finden sich in Teilkapitel 4.3.2. Flüsse, Seen und Straßen wurden in erster Linie als direkte, in der Landschaft sichtbare, Erntegebietsgrenzen interpretiert. Wo die von den Bewohnern Alichurs beschriebenen Erntegebietsgrenzen im Abstand zu diesen Objekten verlaufen, wurden Pufferzonen zur Beschreibung der Grenzen verwendet. In geringem Maßstab wurden

dort, wo keine natürlichen, im Gelände sichtbaren, Grenzen gefunden werden konnten, schließlich auch Flächenschlusslinien zwischen topographischen Merkmalen für die Herleitung der Erntegebietsgrenzen verwendet. Selten konnten die von den Anwohnern Alichurs beschriebenen Grenzverläufe keinen topographischen Informationen sinnvoll zugeordnet werden. Hier wurden die entsprechenden Erntegebietsgrenzen allein anhand dieser Beschreibungen festgelegt. Am Ende des zweiten Arbeitsschrittes stand eine vorläufige Erntegebietskarte der Region Alichur.

Im Herbst 2013 erfolgte eine Validierung der vorläufigen Erntegebietskarte im Projektgebiet. Dafür wurde die Karte zunächst ortskundigen Bewohnern Alichurs vorgestellt und strittige Erntegebietsgrenzen identifiziert. Anschließend wurden die erfassten Problemgebiete aufgesucht und unklare Grenzen mittels GPS aufgenommen. Nach der Validierung im Projektgebiet wurden die als fehlerhaft identifizierten Gebietsgrenzen korrigiert. Hierzu wurden die aufgenommenen GPS-Punkte verwendet. Abbildung 4-4 zeigt eine verkleinerte Version der erarbeiteten Erntegebietskarte nach der Validierung. In Anhang III ist die Erntegebietskarte in Originalgröße enthalten. Die Karte enthält 638 km Grenzen, von denen sich 43 % an Wassereinzugsgebieten, 19 % an Straßen, 18 % an Flussläufen und Seen, 11 % an Höhenlinien, 5 % an Flächenschlusslinien und 1 % an Ortschaften orientieren. 3 % der Grenzlänge wurden ohne Berücksichtigung topographischer Merkmale auf Grundlage der Beschreibungen der ortsansässigen Bevölkerung erstellt. In seiner Ausdehnung wird das Erntegebiet im Norden von der nördlichen Alichurkette und im Süden von der südlichen Alichurkette begrenzt. Nach Westen und Osten grenzt das Erntegebiet unmittelbar an die Gebiete der Ortschaften Bulun-Kul und Bash-Gombez. Im Südwesten und Nordosten reicht das Erntegebiet bis an die Grenze des *jamoat* Alichur heran.

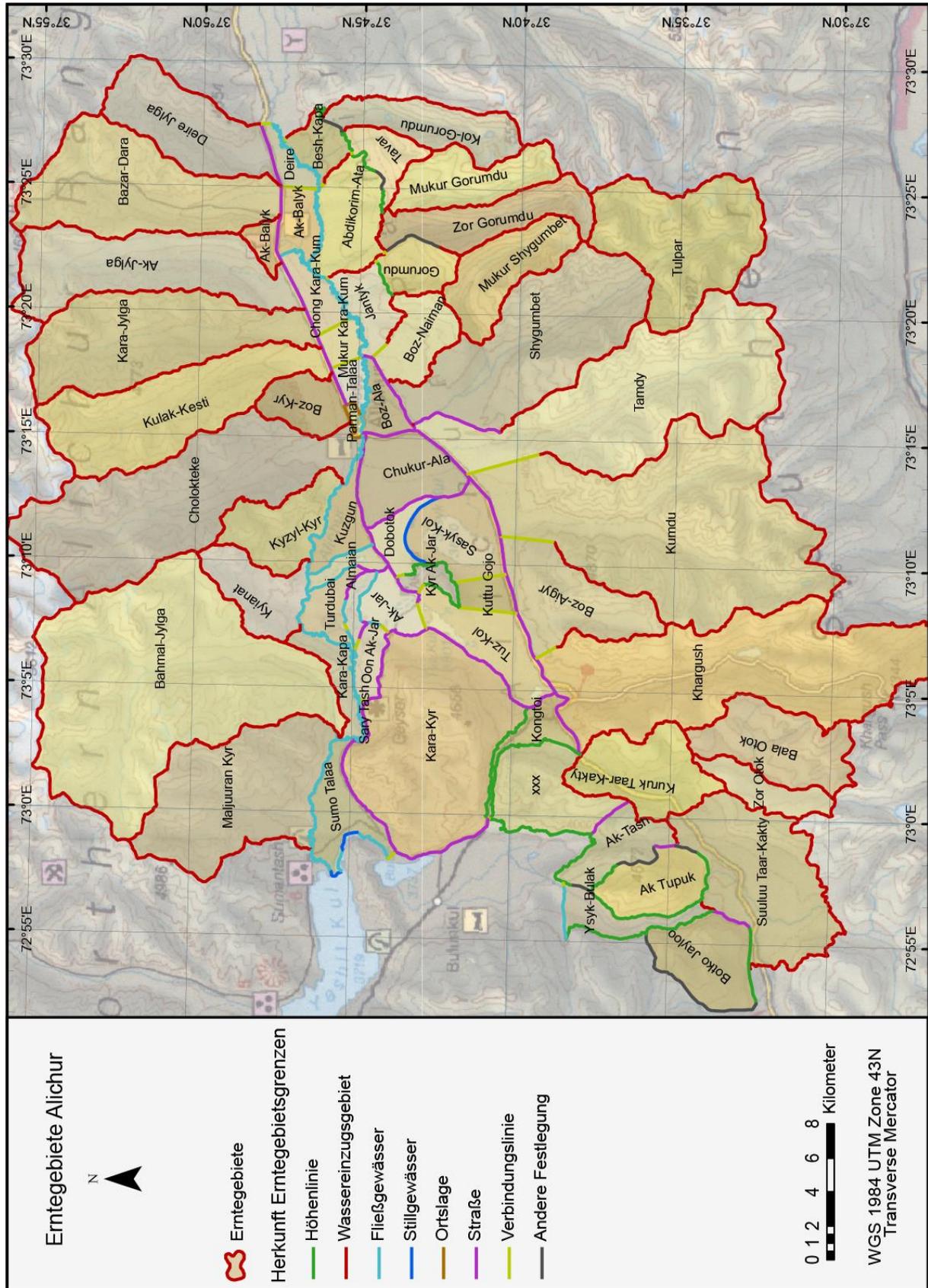


Abbildung 4-4: Erntegebiete und Herleitung der Erntegebietsgrenzen. Eigene Darstellung.

4.2.2 RÄUMLICHE AUFLÖSUNG DER SICH AUS DEN HAUSHALTSINTERVIEWS ERGEBENDEN ZWERGSTRAUCHERNTEN

Mit Hilfe der Erntegebietskarte aus Abbildung 4-47 konnten 82 t der im Umfeld von Alichur laut Haushaltsbefragung im Jahr 2012 geernteten 789 t Zwergsträucher räumlich zugeordnet werden. Die nicht räumlich zuordenbaren 7 t Zwergsträucher resultieren aus dem in Teilkapitel 4.1.3 beschriebenen Verfahren zur Bereinigung von Inkonsistenzen. In den Haushaltsinterviews wurden 27 der insgesamt 61 Erntegebiete mit der Zwergstrauchernte im Jahr 2012 in Verbindung gebracht (Abbildung 4-5). Dabei konnte allerdings lediglich zugeordnet werden, welche Massen in den betreffenden Gebieten geerntet wurden, nicht jedoch wo genau in den Erntegebieten die Ernte stattfand. Es wird angenommen, dass die Zwergstrauchernte in den Tälern bevorzugt am Taleingang und am Talboden betrieben wird.

Abbildung 4-5 zeigt eine relativ ausgewogene Verteilung der geernteten Zwergstrauchmassen. Während 68 % der geernteten Zwergstrauchmenge aus acht Gebieten mit Erntemengen zwischen 49 t und 88 t stammt, werden 32 % der Gesamternte aus 19 zum Teil weit verteilten Gebieten bezogen. Hier sind mit relevanten Mengen auch Gebiete wie Boz-Ala, Boz-Kyr oder Chukur-Ala in direkter Nachbarschaft zu Alichur vertreten. Aufgegliedert nach den in Teilkapitel 3.3.2 beschriebenen Nutzungsmustern ergibt sich ein differenzierteres Bild. So wurde *individuelle Ernte* in zwölf Gebieten angegeben, welche in maximal 5 km Luftlinie an die Ortschaft Alichur grenzen. *Gruppenernte* auf der anderen Seite wurde vorwiegend dezentral in über die gesamte Erntegebietskarte verteilten Gebieten praktiziert. Schwerpunkte der Gruppenernte befanden sich in deutlichem Abstand zur Ortschaft Alichur, aber entlang des Pamir Highways, in den Gebieten Deire Jylga (14 km Luftlinie), Tuzkul (10 km Luftlinie) und Kuruk Taar-Kakty (22 km Luftlinie). Auch aus dem Cholokteke Tal stammen relevante Mengen an Zwergsträuchern, die mit dieser Methode geerntet wurden. Hier ist eine Abschätzung der zurückgelegten Entfernung jedoch schwierig, weil das Gebiet direkt an die Ortschaft Alichur grenzt und sich über eine Länge von 20 km erstreckt. Insgesamt wurden 19 Gebiete im Jahr 2012 mittels Gruppenernte beerntet. Die Motorradernernte konzentriert sich in Abbildung 4-5 auf Gebiete in mittlerer Entfernung zu Alichur. Zwar wurde hier auch der etwa 19 km von Alichur entfernte Talabschnitt Tulpa beerntet, der Großteil der Massen (89 %) jedoch stammt aus Gebieten mit einer Entfernung von weniger als 12 km Luftlinie zur Ortschaft Alichur. *Kombinierte Ernte* fand 2012 in geringem Ausmaß in fast allen beernteten

Gebieten statt. Eine Ausnahme stellt lediglich das Tamdy-Tal dar. Dort wurden mehr als 75 % der Zwergsträucher (52 t) kombiniert geerntet. Dieser hohe Anteil lässt sich durch den lokalen dominanten Schäfer erklären, der eine unkontrollierte Zwergstrauchernte unterbindet und die dadurch freien Kapazitäten selbst nutzt. In Gebieten ohne Beweidung findet keine kombinierte Ernte statt. In Anhang IV befindet eine im Vergleich zu Abbildung 4-5 großmaßstäbigere Karte der Zwergstrauchernte rund um Alichur.

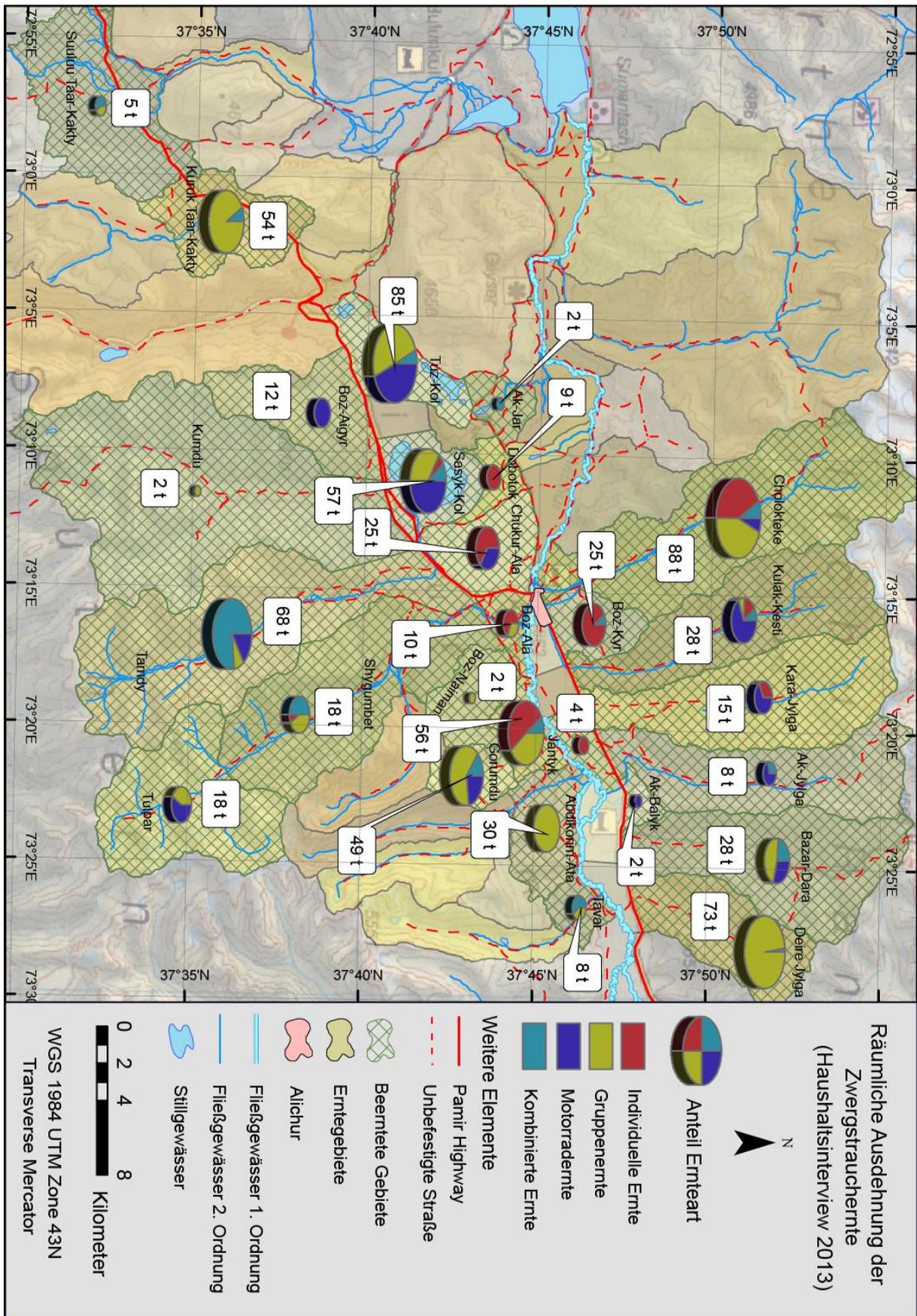


Abbildung 4-5: Räumliche Aufteilung der Zwergstrauchernte im Gebiet Alichur (Jahr 2012) differenziert nach Erntearten. Eigene Darstellung.

4.2.3 AUFNAHME VON GPS-ERNTETRACKS

Ergänzend zu den groben räumlichen Daten aus den Haushaltsinterviews wurden mittels GPS-Gerät Tracks von Zwergstrauchernteaktionen aufgezeichnet. Die Aufzeichnungen erfolgten durch die in die Ernte involvierten Personen selbst. Bei den GPS-Track-Aufzeichnungen wurden während der Erntetätigkeiten in regelmäßigen Abständen Standortpunkte mit Informationen wie Position, Reisegeschwindigkeit und zurückgelegter Entfernung vom GPS-Gerät gespeichert. Pro Erntefahrt wurden so bis zu 3.000 Standortpunkte aufgenommen. Die Aufnahme der Standortpunkte erfolgte automatisiert. Im Vergleich zu den subjektiv geprägten Haushaltsbefragungen stellen die aufgezeichneten Erntetracks daher eine objektive Datenquelle dar. Neben den automatisiert erhobenen Standortpunkten wurden von den Leitern der Ernteaktionen Angaben zum verwendeten Transportmittel, den beteiligten Personen und bei der Motorrad- und Gruppenernte auch zum Benzinverbrauch gemacht. Einen Nachteil der angewandten Methode stellt der hohe Aufwand dar, der mit der Aufnahme von GPS-Tracks verbunden ist. Im Verhältnis zur gesamten jährlichen Ernte können hier daher nur relativ geringe Stichprobenzahlen erreicht werden. Die Aussagekraft dieser Methode für eine quantitative Abschätzung der Zwergstrauchernte im Raum ist somit begrenzt. Ungeachtet dessen liefern GPS-Erntetracks wichtige Informationen über die genaue Lage der aufgesuchten Ernteorte innerhalb der definierten Erntegebiete, sowie über die zurückgelegten Wegstrecken und Reisezeiten. In Summe wurden sieben Tracks der individuellen Zwergstrauchernte, 15 Tracks der Gruppenernte und drei Tracks der Motorradernnte aufgenommen (Abbildung 4-6).

Die aufgezeichneten Tracks der *individuellen Ernte* wurden im Zeitraum März 2013 bis März 2014 erstellt. Sie repräsentieren die Erntetätigkeiten von sechs verschiedenen Personen. Im Mittel wurden bei der individuellen Zwergstrauchernte 4,1 km pro Erntegang in eine Richtung zurückgelegt. Der am weitesten entfernte Ernteort lag 6,2 km entfernt von Alichur, der nächste nur 1,6 km entfernt. Die zurückgelegten Entfernungen korrelieren deutlich mit dem zum Transport der Zwergsträucher verwendeten Transportmittel. In vier der sieben aufgezeichneten Fälle wurden die geernteten Zwergsträucher mit einem Esel transportiert. Hier ergaben sich Reiseentfernungen zum Ernteort von 4,8 km bis 6,2 km. Im Mittel wurden 5,4 km zurückgelegt. Bei den drei ohne Esel durchgeführten Erntegängen erfolgte der Zwergstrauchtransport ausschließlich zu Fuß. Dabei wurden Strecken von 1,6 km bis 3,1 km zwischen Ernteort und der Ortschaft Alichur überbrückt. Mit einer Entfernung von durchschnittlich

2,4 km lagen die beernteten Gebiete bei dieser Variante der individuellen Ernte deutlich näher an der Ortschaft Alichur als beim Transport mit einem Esel. Die aufgezeichneten Tracks führen in die Erntengebiete Chukur-Ala, Cholokteke, Boz-Kyr, Jantyk und Boz-Ala. Dies sind allesamt Gebiete, die auch in den Haushaltsinterviews mit einem hohen Anteil an individueller Ernte in Verbindung gebracht wurden. In das Cholokteke Tal nordwestlich von Alichur führen zwei der aufgenommenen Erntetracks. An der Lage der Tracks ist gut erkennbar, dass sich die Angaben zu den individuell beernteten Massen aus Teilkapitel 4.2.2 mit großer Wahrscheinlichkeit nicht auf das gesamte Erntegbiet sondern lediglich auf die zu Fuß schnell erreichbaren Gebietsteile am Taleingang beziehen. Die Erntetrackverläufe orientieren sich nur teilweise am vorhandenen Wegenetz. Sie sind charakterisiert durch eine nahezu der Luftlinie folgenden Streckenführung. Nur teilweise mussten, beispielsweise zur Querung des Flusses Alichur, kleinere Umwege in Kauf genommen werden. Dies war bei den Erntetracks nach Chukur-Ala (ein Track) und nach Jantyk (zwei Tracks), wo zunächst zwei Brücken angelaufen wurden, der Fall. Der Erntetrack Richtung Boz-Ala hingegen folgt streng der Luftlinie zwischen Erntegbiet und Ortschaft, obwohl dabei der Alichurfluss überquert wird. Dieser Track wurde im März 2014 aufgenommen, als der Alichurfluss gefroren und ein Umweg über die vorhandenen Brücken nicht notwendig war. Dieser Umstand erklärt auch die Kürze des mit nur 1,6 km Länge kürzesten der aufgenommenen Tracks. Hier konnte eine Abkürzung genommen werden, die den größten Teil des Jahres über nicht zugänglich ist.

15 Tracks von Gruppenerntefahrten wurden zwischen Juli 2013 und März 2014 aufgezeichnet. Die Fahrten wurden von 15 unterschiedlichen Familien organisiert und von sieben verschiedenen LKW-Fahrern durchgeführt. Die angefahrenen Gebiete lagen in Entfernungen von 7,6 km bis 21,6 km zur Ortschaft Alichur. Im Durchschnitt wurden 16,3 km in eine Richtung zurückgelegt. Anders als bei der individuellen Ernte orientieren sich die Fahrstrecken bei der Gruppenernte streng an den vorhandenen Straßen. Der Alichurfluss konnte nur auf dem Pamir Highway oder mit zusätzlichem Zeitaufwand an zwei Furten überquert werden. Hierzu mussten teilweise deutliche Umwege in Kauf genommen werden. Aufgezeichnet wurden sieben Erntetracks nach Goromdu, drei Tracks nach Kol-Goromdu, zwei Tracks nach Deire und jeweils ein Track nach Boz-Naiman, Kara-Jylga und Sasyk-Kol. Dreizehn der aufgezeichneten Tracks entstanden in der Herbsterntesaison 2013 in einem Zeitraum vom 25.9. bis zum 27.11. Ein Erntetrack nach Deire, sowie der Erntetrack nach Sasyk-Kol wurden

im Sommer 2013 (Deire) und im Frühjahr 2014 (Sasyk-Kol) aufgenommen. Für die Gruppenernte wurden größtenteils LKW des Typ GAZ-66 verwendet. Der durchschnittliche ermittelte Benzinverbrauch dieses Fahrzeugtyps lag bei 101 l/100 km.

Trotzdem die Gesamtmasse der mittels *Motorrad* transportierten Zwergsträucher in Alichur signifikant ist, wird diese Erntemethode nur von relativ wenigen Personen betrieben. Geeignete Personen für die Aufzeichnung von Motorraderntetracks zu finden war daher ungleich schwieriger als bei den beiden bereits beschriebenen Erntemethoden. Insgesamt konnten nur drei Erntefahrten von zwei verschiedenen Motorradfahrern aufgezeichnet werden. Die aufgezeichneten Fahrten fanden im Frühjahr 2014 statt. Durchschnittlich wurde bei den untersuchten Fahrten 6.8 km zum Ernteort zurückgelegt. Während zwei Fahrten in das Kulak-Kesti Tal 7,0 und 7,2 km von Alichur entfernt gingen, führte eine Fahrt nach Chong Kara-Kum in 6 km Entfernung von Alichur. Im Vergleich mit der in Teilkapitel 4.2.2 beschriebenen Ausdehnung der Motorradernte erscheinen die aufgezeichneten Motorradtracks relativ kurz. Die geringe Stichprobenzahl lässt vermuten, dass die aufgezeichneten Tracks nicht repräsentativ für die räumliche Verteilung der mit dem Motorrad geernteten Zwergstrauchmassen sind. Für Rückschlüsse auf die für die Motorradernte typische Fahrtroutenwahl jedoch eignen sich die aufgezeichneten Motorraderntetracks. So scheinen die aufgenommenen Tracks zu zeigen, dass das Straßennetz für die Motorradernte weniger bedeutend ist als für die Gruppenernte. Zwar beginnen und enden die aufgenommenen Tracks stets auf ausgewiesenen Fahrwegen, dennoch weicht der Routenverlauf zwischendurch deutlich von diesen ab. Der durchschnittliche Benzinverbrauch der Motorradernte lag bei 18 l/100 km.

4.2.4 FACHINTERVIEWS LKW FAHRER

Zur unabhängigen Überprüfung der raumbezogenen Daten aus den Haushaltsinterviews wurden im Herbst 2013 sieben in der Gruppenernte aktive LKW-Fahrer in Alichur zu ihren gegenwärtigen Erntetätigkeiten befragt. Insgesamt wurden von den Fahrern Angaben zu 48 Fahrten in der Herbstsaison 2013 gemacht. Wird der in Teilkapitel 4.1.4 hergeleitete Wert für die jährliche Zwergstrauchernte (789 t) und den Anteil der Gruppenernte an der geernteten Zwergstrauchmasse (44 %) zugrunde gelegt, so ergibt sich bei zwei jährlichen Erntesaisons pro Saison eine mittels Gruppenernte geerntete Zwergstrauchmasse von etwa 174 t. Bei einer Ladekapazität von 900 kg *shyvak* pro Gaz-66 (Tabelle 4-3 d) werden pro Erntesaison in Alichur etwa

193 Gruppenerntefahrten durchgeführt. Die von den LKW-Fahrern genannten 48 Erntefahrten repräsentieren demnach etwa 25 % der in dieser Saison durchgeführten Gruppenerntefahrten. Von den LKW-Fahrern wurden insgesamt acht verschiedene Erntegebiete benannt. Auf den Gesamtverbrauch Alichurs hochgerechnet wurde der größte Anteil der Zwergsträucher in der Herbstsaison 2013 mit 73 t in Goromdu geerntet. Mengelmäßig folgten die Gebiete Besh-Kapa (37 t), Kol-Goromdu (26 t), Deire (18 t) und Abdikorim-Ata (11 t). In Sasyk-Kol, Cholokteke und Kara-Jylga wurden jeweils etwa 3 t Zwergsträucher geerntet (Abbildung 4-6).

4.2.5 ZUR GÜTE DER AUFNAHMEANSÄTZE

Im Vergleich zwischen den räumlichen Ergebnissen der Experteninterviews und der Haushaltsinterviews (Teilkapitel 4.2.2) werden Unterschiede bei der Auswahl der benannten Gruppenerntegebieten deutlich. Während beispielsweise die Erntegebiete Goromdu und Besh-Kapa in den Haushaltsinterviews nur an sechster bzw. dreizehnter Stelle der mittels Gruppenernte geernteten Zwergstrauchmassen rangierten, kam den entsprechenden Gebieten in den Experteninterviews die größte Bedeutung zu. Die in 4.2.3 vorgestellten Gruppenerntetracks scheinen eher die Ergebnisse der Experteninterviews, als die der Haushaltsinterviews zu bestätigen. Die Unterschiede zwischen den beiden Befragungen lassen sich teilweise mit den verschiedenen Bezugszeiträumen erklären. So beziehen sich die Haushaltsinterviews auf das gesamte Erntejahr 2012, d.h. sowohl die Frühjahrs-, als auch die Herbsterntesaison. Die Experteninterviews und der Großteil der GPS-Tracks hingegen beziehen sich ausschließlich auf die Herbstsaison 2013. Es ist möglich, dass im Frühjahr wegen der schlechteren Erreichbarkeit einiger Erntegebiete beispielsweise aufgrund von Eismassen, welche die Furten über den Alichurfluss versperren, eher nahegelegene oder direkt über den Pamir Highway erreichbare Gebiete, wie das Cholokteke-Tal oder die Gebiete Tuz-Kol und Kuruk Taar-Kakty, angefahren werden. Weiterhin ist auch denkbar, dass in den Haushaltsinterviews, die nicht immer von den an der Gruppenernte beteiligten Familienmitgliedern beantwortet wurden, Nennungen von bereits vor 2012 angefahrenen Gebieten erfolgten. Neben allen Unterschieden und Unsicherheiten bestätigen die Daten aus den Experteninterviews und die aufgenommenen GPS-Tracks jedoch grundsätzlich die in Abbildung 4-5 dargestellten räumlichen Erntemuster der Gruppenernte. So stellten sich bei den Experteninterviews und den Erntetracks bis auf das Gebiet Kol-Goromdu durchweg Erntegebiete als bedeutsam dar, in denen auch in den Haushaltsinterviews relevante Mengen an

Zwergsträuchern mittels Gruppenernte akquiriert wurden. Die Unterschiede in der räumlichen Zwergstrauchernte zwischen den Haushaltsinterviews (Bezugsjahr 2012) und den Experteninterviews (Bezugszeitpunkt Herbstsaison 2013) können auch als räumliche Verschiebung der Ernteschwerpunkte bei der Gruppenernte interpretiert werden. Bei den Schwerpunktgebieten aus den Experteninterviews handelt es sich im Vergleich zu anderen bereits beernteten Gebieten um schwerer zu erreichende bzw. weiter entfernte Bereiche. Einzig die Ernte in dem Gebiet Kuruk-Taar Kakty, welches im Jahr 2012 mit einer Entfernung von 22 km Luftlinie zur Ortschaft Alichur das am weitesten entfernte Erntegebiet darstellte, scheint nicht in die beschriebene Entwicklung zu passen. Dieses Erntegebiet war laut Haushaltsinterviews im Jahr 2012 mit einer Erntemenge von gut 48 t Zwergsträuchern das zweitbedeutendste Gruppenerntegebiet, wurde aber in den Experteninterviews gar nicht genannt. Hier ist denkbar, dass die Ernte in diesem Gebiet wegen der guten Zugänglichkeit über den Pamir Highway bevorzugt im Frühjahr stattfindet. Weiterhin ist auch möglich, dass die Fahrer, welche die Gebiete westlich von Alichur anfahren, in den Experteninterviews nicht adäquat vertreten waren.

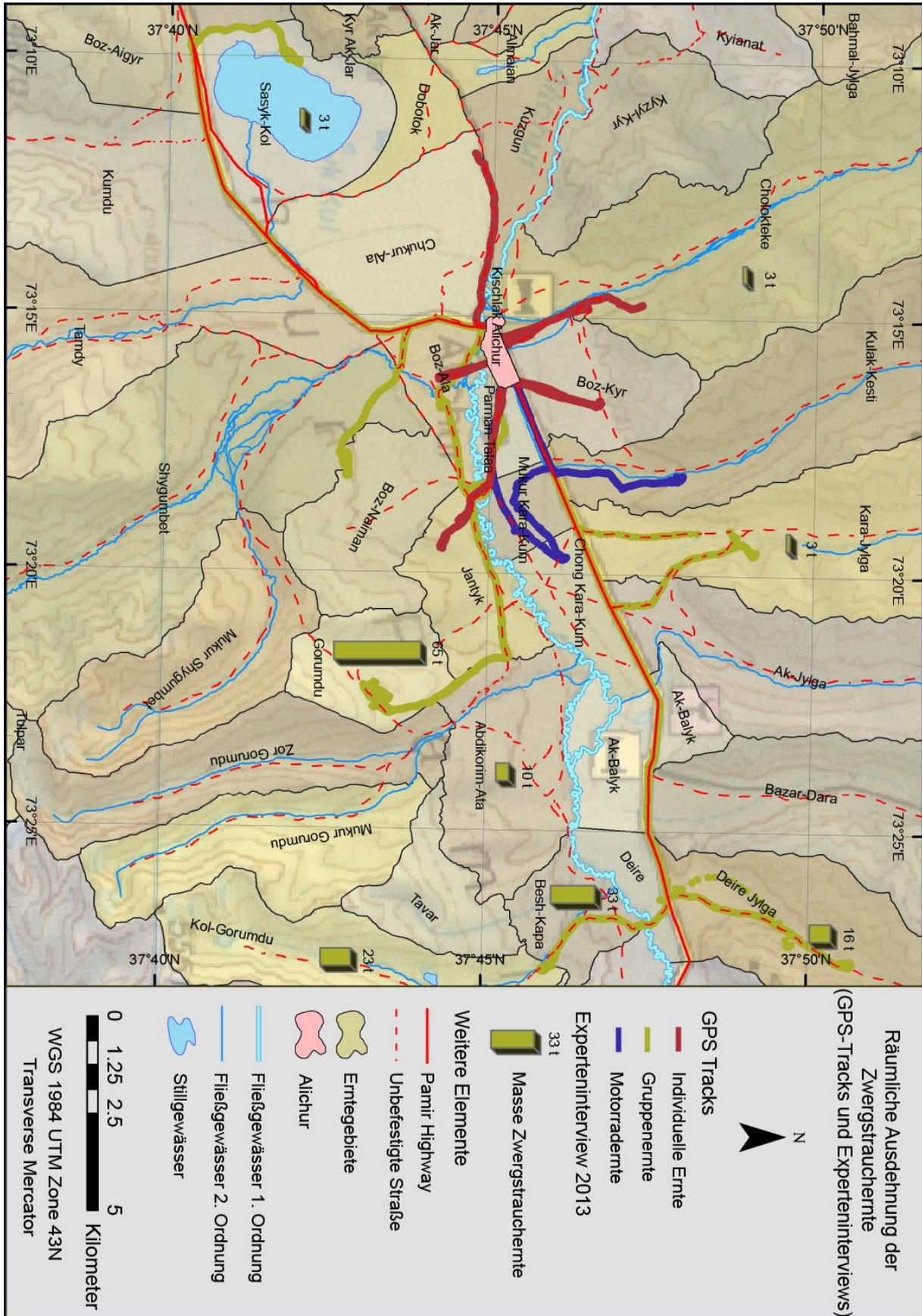


Abbildung 4-6: Erntetracks (2012-2014) und in der Herbstsaison 2013 laut Experteninterview mittels Gruppenernte geerntete Zwergstrauchmassen. Eigene Darstellung.

4.3 RÄUMLICHE DYNAMIK UND ERNTEINTENSITÄT

Als Hauptkriterien für die Auswahl eines Ernteortes wurden die relative Entfernung zur Ortschaft Alichur, sowie die am Ernteort vorhandene beerntbare Zwergstrauchbiomasse identifiziert. In diesem Kapitel soll näher erläutert werden, in welcher Weise die Lage eines Ernteortes die räumliche Ausdehnung der Zwergstrauchernte beeinflusst. Wie Teilkapitel 4.2 gezeigt hat, ist nicht allein die Luftlinienentfernung für die Wahl bestimmter Ernteorte maßgeblich. Vielmehr spielen bei der motorisierten Ernte das Vorhandensein und die Qualität von Fahrwegen eine wichtige Rolle. Barrieren, wie beispielsweise der nur an bestimmten Stellen überquerbare Fluss Alichur, wirken sich auf die Erntegebietswahl, sowohl der motorisierten Erntearten, als auch der individuellen Ernte aus. Der Begriff *Raumwiderstand* stammt aus der Verkehrsplanung und wird von SCHWEDES (2013, S. 40) definiert als der „*notwendige Aufwand zur Raumüberwindung*“. Dieser Begriff berücksichtigt neben der Entfernung zwischen zwei Punkten auch die Komponenten *Kosten* und *Zeitaufwand* (SCHWEDES 2013, S. 40). Wegen seiner umfassenden Betrachtungsweise von Raum soll der Begriff *Raumwiderstand* im Folgenden zur Beschreibung der Entfernung zwischen Alichur und den potenziellen Ernteorten in der Umgebung der Ortschaft verwendet werden. Die Funktion *Kostenentfernung* der Software Arc Info wird zur Berechnung von Raumwiderständen verwendet. Ergebnis der Funktion ist ein Raster, welches die Kostenentfernung, also die mindestens benötigten Kosten zum Erreichen jeder Rasterzelle in einem zuvor definierten Raum ausgehend von einer oder mehreren Bezugszellen, darstellt. Als Eingangsgrößen werden ein Bezugsraster, in dem die Bezugszellen verzeichnet sind, sowie ein Kostenraster benötigt. Das Kostenraster enthält Informationen zu den für die Durchquerung sämtlicher Rasterzellen notwendigen Kosten. Dabei ist es unerheblich, um welche Art von Kosten es sich handelt. So können beispielsweise die zur Durchquerung einer Rasterzelle benötigten Treibstoffkosten oder der benötigte Zeitaufwand betrachtet werden. Zellen des Kostenrasters, für welche keine Kosten angegeben sind, gelten als unüberwindbare Hindernisse. Hier sind Umwege nötig, um die hinter den Hindernissen liegenden Rasterzellen zu erreichen. Basierend auf diesen Daten ermittelt die Funktion *Kostenentfernung* die niedrigsten akkumulativen Kosten, welche notwendig sind, um jede Zelle im betrachteten Raster ausgehend von den Bezugszellen zu erreichen. Abbildung 4-7 verdeutlicht die Funktionsweise der Funktion *Kostenentfernung* der Software Arc Info.

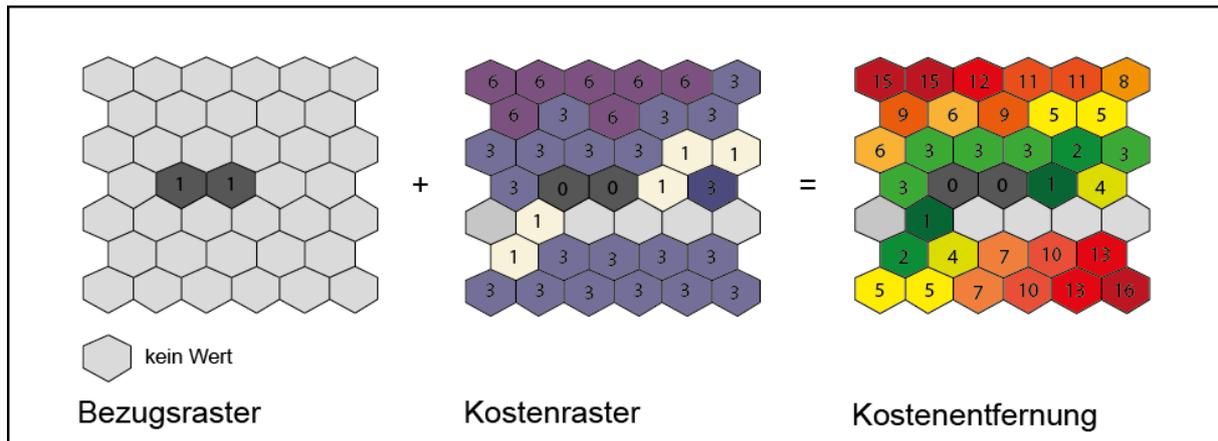


Abbildung 4-7: Prinzipskizze der Funktion *Kostenentfernung* in Arc Info. Eigene Darstellung.

Die Auswertung der GPS-Tracks in Teilkapitel 4.2.3 hat gezeigt, dass sich vor allem die beiden Erntearten individuelle Ernte und Gruppenernte in ihrer Ausdehnung und Routenwahl unterscheiden. Entscheidender Faktor für die Wahl einzelner Ernteorte scheint neben der Biomasseverfügbarkeit im Raum der Zeitaufwand zu sein, welcher benötigt wird, um einen Ernteort von Alichur aus zu erreichen. In den folgenden Teilkapiteln 4.3.1 und 4.3.2 werden Kostenentfernungskarten für die individuelle Ernte und für die Gruppenernte auf Basis der in Teilkapitel 4.2.3 vorgestellten GPS-Tracks hergeleitet. Als Grundlage für die Raumwiderstandsberechnung werden Kostenraster, welche den Zeitaufwand für die Durchquerung der einzelnen Rasterzellen je Ernteart enthalten, erstellt. Zur objektiven Herleitung der Kostenraster werden die in den GPS-Tracks gemessenen Reisegeschwindigkeiten mit topographischen Geländeeigenschaften, sowie dem Straßen- und dem Gewässernetz der Region korreliert. Die resultierenden Kostenentfernungskarten dienen im Weiteren als Grundlage zur Simulation der räumlichen Erntedynamik.

Wird den Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Zellen eines simulierten Rasters eine besondere Bedeutung zugemessen, liefert die üblicherweise gewählte Tessellation eines Raumes in ein Rechteckraster oftmals keine guten Ergebnisse (BIRCH ET AL. 2007, S. 347). Zwischen Rechteckzellen treten zwei Formen von Nachbarschaften auf: Direkte Nachbarschaften und Diagonalnachbarschaften. Hier resultieren, beispielsweise bei der Berechnung von Kostenentfernungen, Ungenauigkeiten. Diese Ungenauigkeiten gewinnen an Bedeutung, je grober die Auflösung des zur Simulation verwendeten Rasters gewählt wird. Im *Energiemodell Alichur*, bei welchem auf räumlicher Ebene großmaßstäbige Effekte im Fokus liegen, soll in einer dem Simulationszweck angemessenen groben räumlichen Auflösung simuliert werden. Hier sind bei Verwendung eines Rechteckrasters bedeutende Fehler zu er-

warten. Die beschriebenen Ungenauigkeiten lassen sich vermeiden, wenn der betrachtete Raum anstatt mit einer Rechtecktesselation mit Hilfe einer Hexagonal-tesselation abgebildet wird. Zwischen Hexagonzellen herrschen nur direkte, symmetrisch gleichberechtigte Nachbarschaften, welche für die Modellierung von Nachbarschaftseffekten von großem Vorteil sind (BIRCH ET AL. 2007, S. 352). Die räumliche Simulation im *Energiemodell Alichur* findet in einem Hexagonalraster mit einer Auflösung von 1 km² statt. Sämtliche Eingangsdaten, die in feinerer räumlicher Auflösung vorhanden sind werden für die Simulation auf das verwendete 1 km² Hexagonalraster aggregiert.

4.3.1 RAUMWIDERSTAND DER INDIVIDUELLEN ZWERGSTRAUCHERNTEN

Zur Berechnung des Kostenrasters für die individuelle Zwergstrauchernte wurden alle sieben aufgezeichneten GPS-Tracks der individuellen Zwergstrauchernte herangezogen. Die vergleichsweise geringe Stichprobenzahl ließ keine zusätzliche Unterscheidung nach den zwei vorkommenden Transportvarianten *mit dem Esel* und *zu Fuß* zu. Insgesamt standen 5.783 Wegpunkte aus den aufgezeichneten sieben Tracks für eine Auswertung zur Verfügung. Zur Herleitung des Kostenrasters wurde zunächst die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit zum Ernteort und zurück ermittelt. Hierzu war es nötig, die an den Ernteorten während des Erntevorgangs gespeicherten Wegpunkte von der Analyse auszuschließen. Weiterhin bei der Analyse nicht berücksichtigt wurden während der Wegzeiten eingelegte Pausen und der Einfluss von Flussquerungen auf die Reisegeschwindigkeit. So wurden schließlich nur Wegpunkte, welche nicht in der Ortschaft Alichur und mehr als 30 m von Flussquerungen entfernt liegen, sowie an denen die Reisegeschwindigkeit mehr als 1 km/h beträgt, ausgewertet. Diese Kriterien erfüllten 3.231 Wegpunkte. Die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit an diesen Wegpunkten betrug 4,7 km/h (4,9 km/h bei Wegpunkten mit Zwergstrauchtransport zu Fuß und 4,6 km/h bei Wegpunkten mit Zwergstrauchtransport mit einem Esels). Dabei unterschieden sich Hin- und Rückweg mit 4,9 km/h und 4,5 km/h nur wenig. Die graphische Abbildung der aufgezeichneten Reisegeschwindigkeiten gegen die jeweils vorherrschende Geländesteigung zeigt deutlich einen Zusammenhang zwischen den beiden Größen (Abbildung 4-8). Um diesen Zusammenhang statistisch zu untersuchen wurden die 3.231 Wegpunkte mit der jeweiligen an ihrer Position vorherrschenden Hangneigung, welche dem lokalen DGM (METI & NASA 2009) entnommen wurde, korreliert. Die überwundene Hangneigung betrug im Mittel 9,7° mit einer Standartabweichung von 6,0°. Mehr als 92,5 % der

aufgezeichneten Wegpunkte befindet sich an Steigungen mit einer Neigung von weniger als 20° . Auch alle aufgesuchten Ernteorte wiesen geringere Neigungen als 20° auf. Es wird angenommen, dass ein großer Teil der begangenen Hänge mit über 20° Gefälle nicht korrekt klassifiziert wurde. Dies ist begründet durch die mit $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ vergleichsweise grobe Auflösung des DGM, sowie durch Ungenauigkeiten bei der Positionsbestimmung. Die Positionierungsgenauigkeit des verwendeten GPS-Empfängers bewegt sich bei normalem Satellitenempfang im Rahmen von $\pm 10\text{ m}$ (GARMIN LTD. 2010, S. 31). Die Tatsache, dass keine längeren Reihen von Wegpunkten an steilen Hängen klassifiziert wurden, nähert die Annahme, dass es sich bei den Wegpunkten mit mehr als 20° Steigung zum großen Teil um Fehlklassifikationen handelt. Vereinfachend wird angenommen, dass Hänge mit mehr als 20° Steigung bei der individuellen Ernte gemieden werden.

Beide Größen, *Geschwindigkeit* und *Hangneigung* sind skalar und normalverteilt. Sie erfüllen somit die Bedingungen für eine Untersuchung mittels Pearson-Korrelation. Die Korrelation der beiden Variablen ergab eine hohe Signifikanz ($p < 0,001$), jedoch nur einen Korrelationskoeffizienten (r) von $-0,265$ ($r^2 = 0,070$). Ein niedriger Korrelationskoeffizient ist hier plausibel, weil zwei gegenteilige Effekte gemeinsam betrachtet wurden. So wirken sich Hangneigungen nur bremsend auf die Reisegeschwindigkeit aus wenn sie bergauf begangen werden. Werden sie bergab begangen, haben schwache Hangneigungen eher einen beschleunigenden Effekt. Eine Korrelation der nur bergauf bzw. nur bergab begangenen Hangneigungen mit der gemessenen Reisegeschwindigkeit hätte mit hoher Wahrscheinlichkeit höhere Korrelationskoeffizienten ergeben. Da bei der Zwergstrauchernte jedoch alle Neigungen zweimal begangen werden, ist lediglich die Summe der beiden Effekte von Interesse für diese Arbeit. Zur Untersuchung dieser wurden Hangneigungsklassen gebildet, für die jeweils Durchschnittsgeschwindigkeiten ermittelt wurden (Siehe Abbildung 4-8). Für eine Korrelation von Hangneigung und Reisegeschwindigkeit wurden nur die Hangneigungsklassen kleiner als 20° betrachtet. Die untersuchte Korrelation ist auf einem Niveau von $0,01$ relevant und weist einen Korrelationskoeffizienten (r) von $-0,986$ ($r^2 = 0,972$) auf. Der Zusammenhang zwischen Hangneigung und durchschnittlicher Reisegeschwindigkeit bei der individuellen Zwergstrauchernte kann also statistisch nachgewiesen werden. Aus sämtlichen Hangneigungs-Geschwindigkeitspaaren, die die Bedingung Hangneigung $\leq 20^\circ$ erfüllen, wurde die folgende für Hangneigungen von 0° bis 20° gültige Regressionsformel ermittelt (Formel 4-4).

$$f(x) = 5,142 - 0,051x$$

Formel 4-4

f ...Reisegeschwindigkeit [km/h]

x ... Hangneigung [°]

Formel 4-4 beschreibt die Abhängigkeit der Variablen *Reisegeschwindigkeit* von der Variablen *Hangneigung*. In völlig ebenem Gelände beträgt die Reisegeschwindigkeit 5,1 km/h. Mit zunehmender Hangneigung verringert sie sich um 0,051 km/h pro Grad Hangneigung. Es ist plausibel im Bereich von Hangneigungen zwischen 0° und 20° einen linearen Zusammenhang für die beiden Variablen Hangneigung und Geschwindigkeit anzunehmen, auch wenn Abbildung 4-8 eine leichte Abschwächung der bremsenden Wirkung zwischen den höheren Hangneigungsklassen im Vergleich zu den niedrigeren Hangneigungsklassen vermuten lässt. Mit einem Korrelationsindex (r^2) von 0,972 beschreibt eine Gerade die durchschnittliche Geschwindigkeitsabnahme pro Hangneigungsklasse ausreichend gut.

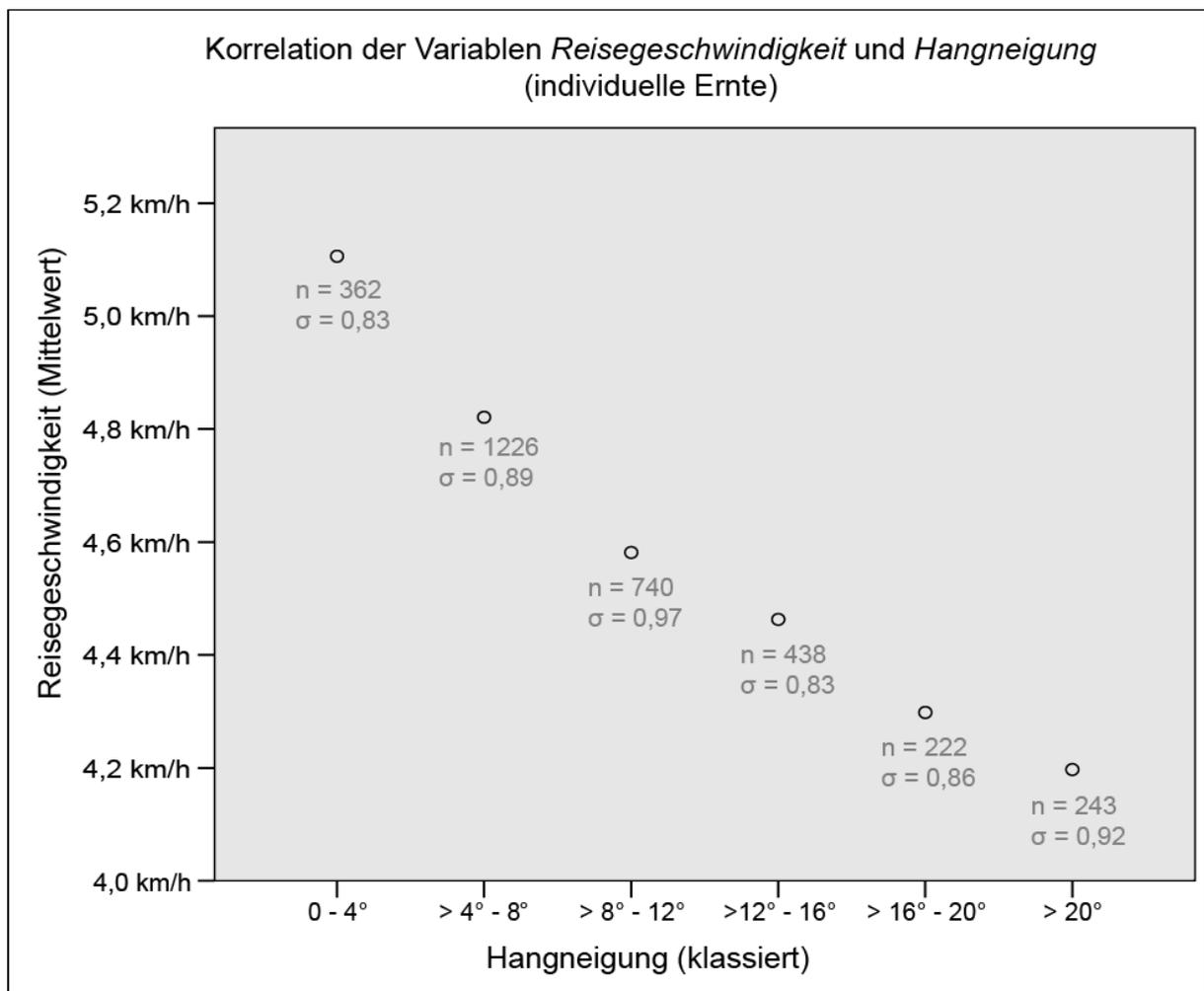


Abbildung 4-8: Korrelation der Variablen *Steigung* und *Geschwindigkeit* bei der individuellen Ernte. Eigene Darstellung.

Für das Kostenraster der individuellen Zwergstrauchernte wurde zunächst eine Auflösung von 30 m x 30 m (quadratisch) gewählt. Im Kostenraster ergibt sich die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit in einer Rasterzelle aus der jeweiligen Hangneigung eingesetzt in Formel 4-4. Zudem sind, wie im vorherigen Abschnitt dargelegt, nur Hangneigungen von bis zu 20° zu Fuß erreichbar. Der Fluss Alichur, sowie sämtliche Stillgewässer stellen ohne Hilfsmittel unüberwindbare Hindernisse dar. Der Alichurfluss kann zu Fuß nur auf der Pamir-Highway-Brücke direkt an der südwestlichen Ortsgrenze Alichurs und auf der Fußgängerbrücke zwischen den beiden Erntegebieten Mukur Kara-Kum und Jantyk überquert werden. In Verbindung mit einem auf der Ausdehnung der Ortschaft Alichur basierenden Bezugsraster wurde schließlich mittels der Funktion Kostenentfernung eine Kostenentfernungskarte der individuellen Ernte errechnet. Aus der so erstellten Kostenentfernungskarte der individuellen Zwergstrauchernte kann die benötigte Reisezeit zu sämtlichen Gebieten im Umfeld Alichurs entnommen werden (Abbildung 4-9). In Anhang V ist das komplette Modell, auf dem die Raumwiderstandskarte der individuellen Ernte beruht, im Arc Info *modelbuilder* dargestellt.

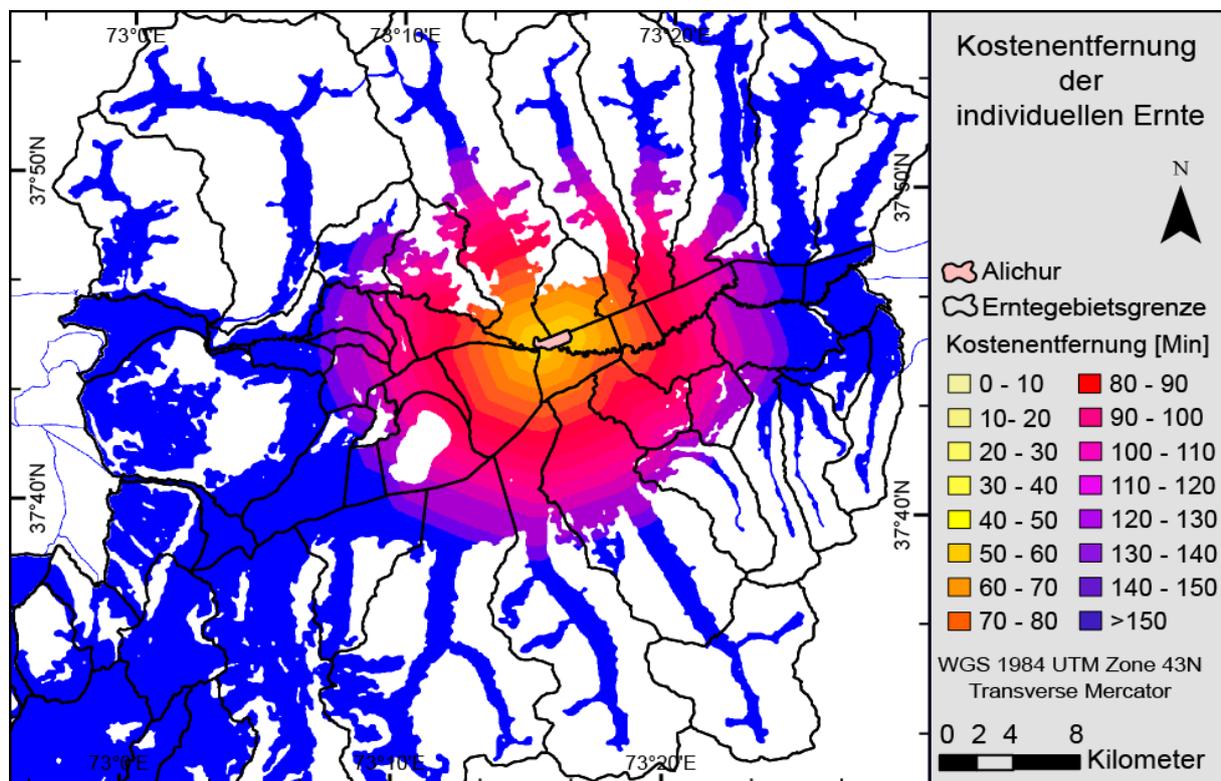


Abbildung 4-9: Kostenentfernung der individuellen Ernte. Auflösung: 900 m² (Rechteck). Eigene Darstellung.

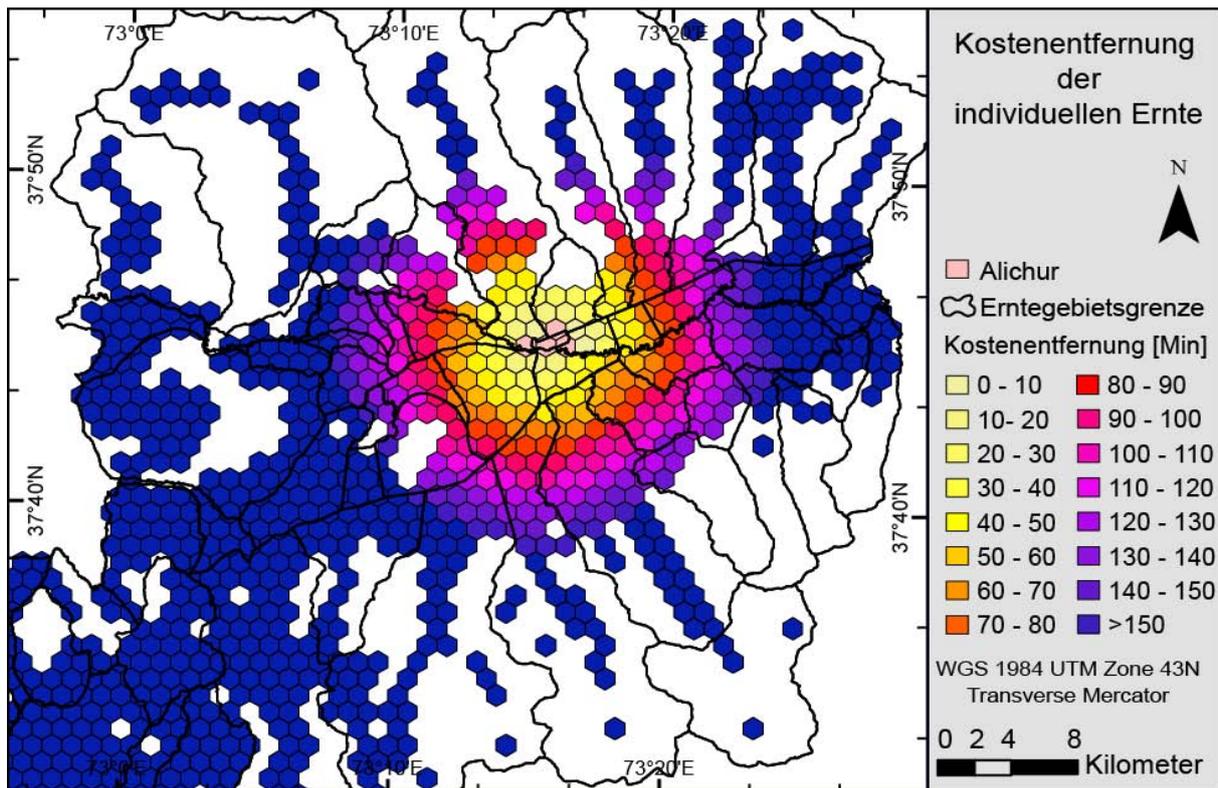


Abbildung 4-10: Kostenentfernung der individuellen Ernte. Auflösung: 1 km² (Sechseck). Eigene Darstellung.

Für eine ressourcensparende Simulation im *Energiemodell Alichur* wurde das Rechteckraster mit einer Auflösung von 30 m x 30 m auf ein Hexagonalraster mit einer Auflösung von 1 km² umgerechnet (Abbildung 4-10). Der Wert einer Hexagonzelle ergibt sich dabei aus dem Mehrheitswert der von ihr überlagerten Rechteckzellen.

4.3.2 RAUMWIDERSTAND DER GRUPPENERNTE

Anders als bei der individuellen Ernte hängt die Reisezeit zu den Zwergstraucherntebereichen bei der Gruppenernte entscheidend von der Anbindung der angefahrenen Gebiete an das lokale Wegenetz ab. Zur Herleitung eines für die Gruppenernte geltenden Kostenrasters war daher eine detaillierte Wegenetzkarte der Region von großer Bedeutung. Da es im *jamoat* Alichur außer dem Pamir Highway nahezu keine asphaltierten Straßen gibt, werden hauptsächlich Fahrspuren verschiedener Qualitäten befahren. Im Gegensatz zu den offiziellen befestigten Straßen sind die zumeist ungeplant entstandenen Fahrspuren schlecht dokumentiert und unterliegen teils zeitlichen Veränderungen. Die einzigen Karten, welche Teile dieses inoffiziellen Straßennetzes darstellen, sind sowjetische Militärkarten im Maßstab 1:100.000 (GENERAL'NYI SHTAB SSSR, 1985-1991) (Blätter 62 bis 64, 74 bis 76 und 86 bis 88). Diese Karten wurden jedoch bereits ab 1985 erstellt und sind daher nicht mehr aktuell. Um hier Abhilfe zu schaffen, wurde eine eigene Karte des lokalen Straßennetzes neu erstellt.

Datengrundlage dieser Karte waren mit einem GPS-Gerät aufgezeichnete Tracks aus eigenen Befahrungen. In Abschnitten, für die keine selbst aufgezeichneten Tracks vorhanden waren, wurde das in Google Maps hinterlegte Satellitenbild (GOOGLE MAPS 2013) zur Digitalisierung von Fahrspuren verwendet. In besonders entlegenen und sehr selten angefahrenen Teilen des *jamoat* Alichur konnten die dort wenig ausgeprägten Fahrspuren oft nicht mehr anhand des Satellitenbildes nachvollzogen werden. Hier wurden die sowjetischen Militärkarten als Grundlage zur Lokalisierung des ungefähren Wegeverlaufs verwendet. In Summe wurden 606 km Fahrwege digitalisiert. Von den wichtigsten und unmittelbar an die Ortschaft Alichur angrenzenden Straßenabschnitten wurden 113 km als GPS-Tracks aufgezeichnet. Etwa 196 km Straßenverlauf wurden mittels Satellitenbild digitalisiert. Insgesamt 297 km der entlegeneren Wegenetzabschnitte wurden mit Hilfe der sowjetischen Militärkarten aufgezeichnet (Abbildung 4-11 a). Das Wegenetz von Alichur wurde auf Grundlage der eigenen Befahrungen und in Zusammen mit dem lokalen Fahrer Mamatöre Zhaitshibekov (ZHAITSCHIBEKOV 2013), sowie dem Anwohner Alichurs Dschoomart Otombaev (OTOMBAEV 2013b) in 105 qualitativ homogene Wegabschnitte unterteilt. Durch Korrelation der mittels GPS-Tracks auf einzelnen Teilen des Wegenetzes gemessenen Durchschnittsgeschwindigkeiten mit den entsprechenden Wegabschnittsqualitäten sollten durchschnittliche Reisegeschwindigkeiten für das gesamte Wegenetz hergeleitet werden. Hierzu war es nötig, die Qualität der 105 Wegabschnitte zunächst quantitativ zu bewerten. Als potenziell für die Reisegeschwindigkeit bei der Gruppenernte relevante Faktoren wurden *Straßentyp*, *Befahrbarkeit* und *Häufigkeit der Befahrung* ausgewählt. Das Kriterium *Straßentyp* beschreibt, in welcher Weise ein Wegeabschnitt angelegt wurde und aus welchem Material seine Deckschicht besteht. Hier standen neben der Ausprägung *Asphaltstraße* die beiden Kategorien *befestigte Straße* und *Fahrspur* zur Auswahl. Während die Ausprägungen *Asphaltstraße* und *befestigte Straße* angelegte und mit Trag- und Deckschicht versehene Straßen beschreiben, handelt es sich bei *Fahrspuren* nicht um geplante technische Bauwerke. Zur Beurteilung der Befahrbarkeit sämtlicher Wegabschnitte wurden die lokal gängigen Fahrzeugtypen herangezogen. So können sich auf Wegabschnitten der höchsten Befahrbarkeitsklasse *Mosquitsch* sämtliche Fahrzeuge inklusive der PKW *Mosquitsch* und *Tangent* fortbewegen. Abschnitte mit den Befahrbarkeiten *Lada Niva* und *Uaz* können nur von für leichtes Gelände geeigneten Offroadfahrzeugen wie dem *Lada Niva*, bzw. von für schweres Gelände

geeigneten Fahrzeugen wie dem Jeep Uaz befahren werden. Die niedrigste Befahrbarkeitsklasse *Gaz-66* lässt nur eine Befahrung mit dem LKW Gaz-66 zu. Zur Beurteilung der Befahrungshäufigkeit wurden sieben Kategorien von *Mehr als einmal täglich* bis *Weniger als ein Mal pro Monat* gebildet. Die Bewertungskriterien und ihre Ausprägungen sind zusammenfassend in Tabelle 4-9 dargestellt. In Zusammenarbeit mit ZHAITSCHIBEKOV (2013) und OTOMBAEV (2013b) erfolgte eine Bewertung sämtlicher Wegabschnitte nach den aufgestellten Kriterien. Hierzu fand eine gezielte Befahrung von Teilen des Wegenetzes statt. Abbildung 4-11 b) und c) zeigen die Ergebnisse der Klassifizierung nach Befahrbarkeitsklassen und Befahrungshäufigkeit.

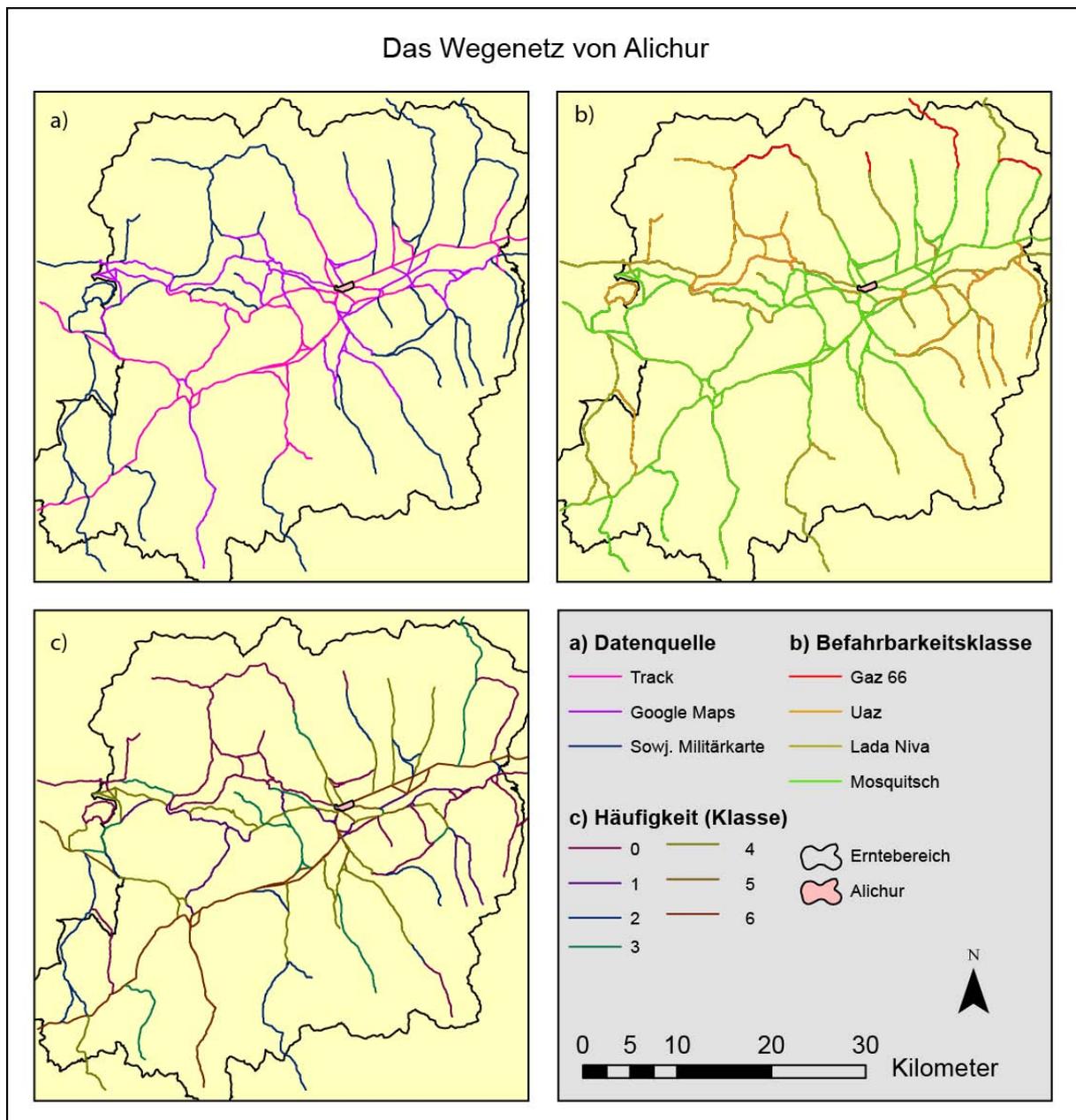


Abbildung 4-11: Wegenetz Alichurs, a) Datenquellen, b) Befahrbarkeitsklassen, c) Häufigkeiten der Befahrung nach Tabelle 4-9. Eigene Darstellung.

Ein weiterer Teil des lokalen Wegenetzes mit Bedeutung für die Reisezeit in die Zwergstraucherntegebiete sind Flussquerungen. Bis auf wenige Monate im Winter kann der Fluss Alichur nur über Brücken oder eingeschränkt auch über Furten durchquert werden. Abseits dieser positiven Kardinalpunkte ist eine motorisierte Querung des Alichur ausgeschlossen. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, existiert im Erntegebiet nur eine mit motorisierten Fahrzeugen überquerbare Brücke. Abseits dieser Brücke sind sechs nahezu gleichmäßig über den Verlauf des Alichur durch das Erntegebiet verteilte Furten vorhanden. Brücke und Furten wurden in die Wegenetzkarte Alichurs aufgenommen.

Tabelle 4-9: Kriterien zur Bewertung von Wegeabschnitten im Wegenetz der Region Alichur. Eigene Daten.

Kriterium	Ausprägung	Code
Straßentyp	Asphaltstraße	2
	Befestigte Straße	1
	Fahrspur	0
Befahrbarkeit	Mosquitsch	3
	Lada Niva	2
	Uaz	1
	Gaz-66	0
Befahrungshäufigkeit	Mehr als einmal pro Tag	6
	Einmal pro Tag	5
	Mehr als einmal pro Woche	4
	Einmal pro Woche	3
	Mehr als einmal pro Monat	2
	Einmal pro Monat	1
	Weniger als einmal	0

Zur Auswertung der Reisegeschwindigkeit standen 14 GPS-Tracks der Gruppenernte bestehend aus 24.813 Wegpunkten zur Verfügung. Die ausgewerteten GPS-Tracks wurden zwischen dem 25.9. und dem 27.11.2013 aufgenommen, stammen von fünf verschiedenen Fahrern und führen in fünf unterschiedliche Erntegebiete. Für eine Korrelation der aus den GPS-Tracks stammenden Wegpunkte mit den in der Straßenkarte dargestellten Wegabschnittsqualitäten wurden nur die Wegpunkte ausgewählt, welche sich im Bereich von 20 m links und rechts der in der Straßenkarte verzeichneten Wege befinden. Da bei der Gruppenernte die Fahrzeit nur einen relativ

kleinen Teil der insgesamt benötigten Zeit ausmacht, wurde ein Großteil der Wegpunkte an den Ernteorten aufgezeichnet. Aus diesem Grunde wurden, analog zu der Vorgehensweise bei der Erstellung der Kostenentfernungskarte für die individuelle Zwergstrauchernte, nur Wegpunkte, welche Geschwindigkeiten von über 1 km/h aufweisen und sich nicht direkt am Ernteort befinden, betrachtet. Verbleibende Punkthaufen mit Geschwindigkeiten von unter 5 km/h deuten auf Pausen auf der Fahrstrecke hin. Insgesamt wurden 146 dieser Wegpunkte per Hand von der Analyse der Durchschnittsgeschwindigkeiten ausgeschlossen. Weiterhin wurden sämtliche Wegpunkte im Umkreis von 150 m um Furten, sowie in der Ortschaft Alichur nicht für die Ermittlung der Durchschnittsgeschwindigkeit betrachtet. Nach Anwendung der beschriebenen Ausschlusskriterien verblieben für die Auswertung der durchschnittlichen Reisegeschwindigkeiten 3.675 Wegepunkte. Aus diesen Wegepunkten wurden schließlich Durchschnittsgeschwindigkeiten für alle Straßenabschnitte, auf denen mehr als 20 auswertbare Wegepunkte vorhanden waren, ermittelt. Insgesamt konnten durchschnittliche Geschwindigkeiten von 6,5 km/h bis 36 km/h auf 17 Wegabschnitten bestimmt werden. Von den befahrenen Wegabschnitten fiel nur der Abschnitt *Pamir Highway* in die Kategorie *Asphaltstraße* des Kriteriums *Straßentyp*. Alle anderen Wegepunkte lagen auf Abschnitten der Kategorie *Fahrspur*. Damit ließ sich das Kriterium *Straßentyp* nicht statistisch mit den aufgenommenen Geschwindigkeiten korrelieren. Im gesamten Erntegebiet Alichurs existiert außer dem Pamir Highway nur ein weiterer asphaltierter Straßenabschnitt, eine Straße, welche 20 km westlich von Alichur durch das Khargush-Tal über den Khargush-Pass nach Afghanistan führt. Insgesamt wurden 882 Wegpunkte für die Ermittlung der durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit auf dem Pamir Highway ausgewertet. Mit 36 km/h war diese deutlich höher als die Durchschnittsgeschwindigkeiten sämtlicher anderer Wegabschnitte. Wegen der Sonderstellung, die der Pamir Highway unter den Straßenabschnitten im Erntegebiet Alichurs einnimmt, wurden dieser von der Auswertung der Kategorien *Befahrbarkeit* und *Befahrungshäufigkeit* ausgenommen. Stattdessen wurde die durch die hohe Anzahl an auf dem Pamir Highway gelegenen Wegepunkten statistisch gut belegte Geschwindigkeit von 36,0 km/h für den gesamten Pamir Highway und die ebenfalls mit einer Asphaltdecke versehene Straße nach Afghanistan verwendet. Für eine Korrelation der Kriterien *Befahrbarkeit* und *Befahrungshäufigkeit* mit den Abschnittswisen Durchschnittsgeschwindigkeiten verblieben ohne den Pamir Highway 16 Straßenabschnitte. Da es sich bei den Kriterien

Befahrbarkeit und *Befahrungshäufigkeit* um ordinale Klassifizierungen handelt, wurde Spearmans Rangkorrelationskoeffizient (r_s) zur Bewertung der Korrelationsstärke verwendet.

Die graphische Gegenüberstellung von *Befahrbarkeit* und *Reisegeschwindigkeit* bei der Gruppenernte zeigt einen klaren Zusammenhang zwischen den beiden Größen. Während von den untersuchten Wegabschnitten jeweils vier Abschnitte in die *Befahrbarkeitskategorien Uaz* und *Lada Niva* fielen, enthielt die Kategorie *Mosquitsch* acht Wegabschnitte (Abbildung 4-13). Fahrten über Wegabschnitte der Klasse *Gaz-66* wurden nicht aufgezeichnet. Sowohl bei der Betrachtung der Einzelwerte (Abbildung 4-12), als auch der wegeabschnittswisen Durchschnittswerte (Abbildung 4-13), ist eine Zunahme der *Reisegeschwindigkeit* bei höheren *Befahrbarkeitsklassen* deutlich erkennbar. Die beiden Größen korrelieren mit einem Rangkorrelationskoeffizient (r_s) von 0,412 bei einem Signifikanzniveau von 0,001. Für die *Befahrbarkeitsklasse Uaz* wurde eine *Durchschnittsgeschwindigkeit* von 13,1 km/h ermittelt, für die Klasse *Lada Niva* 21,1 km/h und für die Klasse *Mosquitsch* 27,2 km/h.

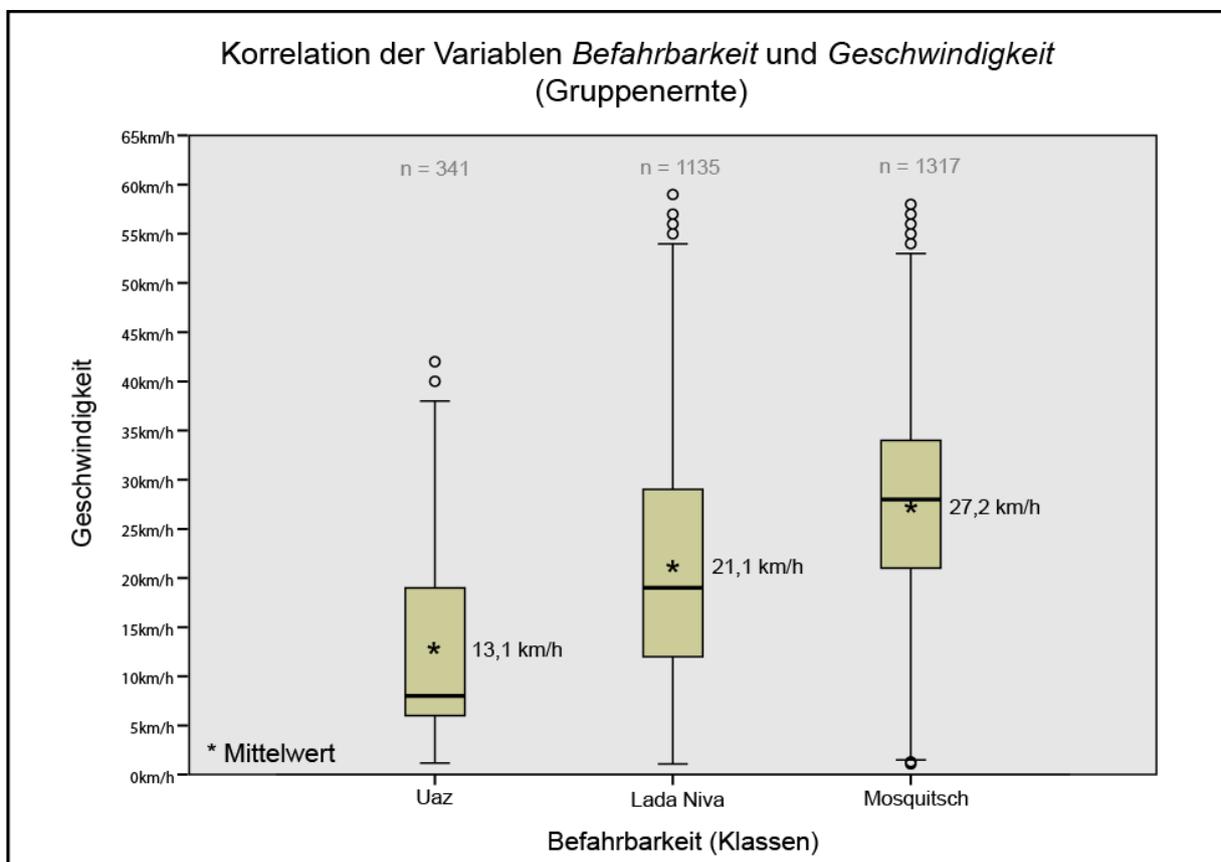


Abbildung 4-12: Korrelation der Variablen *Befahrbarkeit* und *Geschwindigkeit* bei der Gruppenernte. Eigene Darstellung.

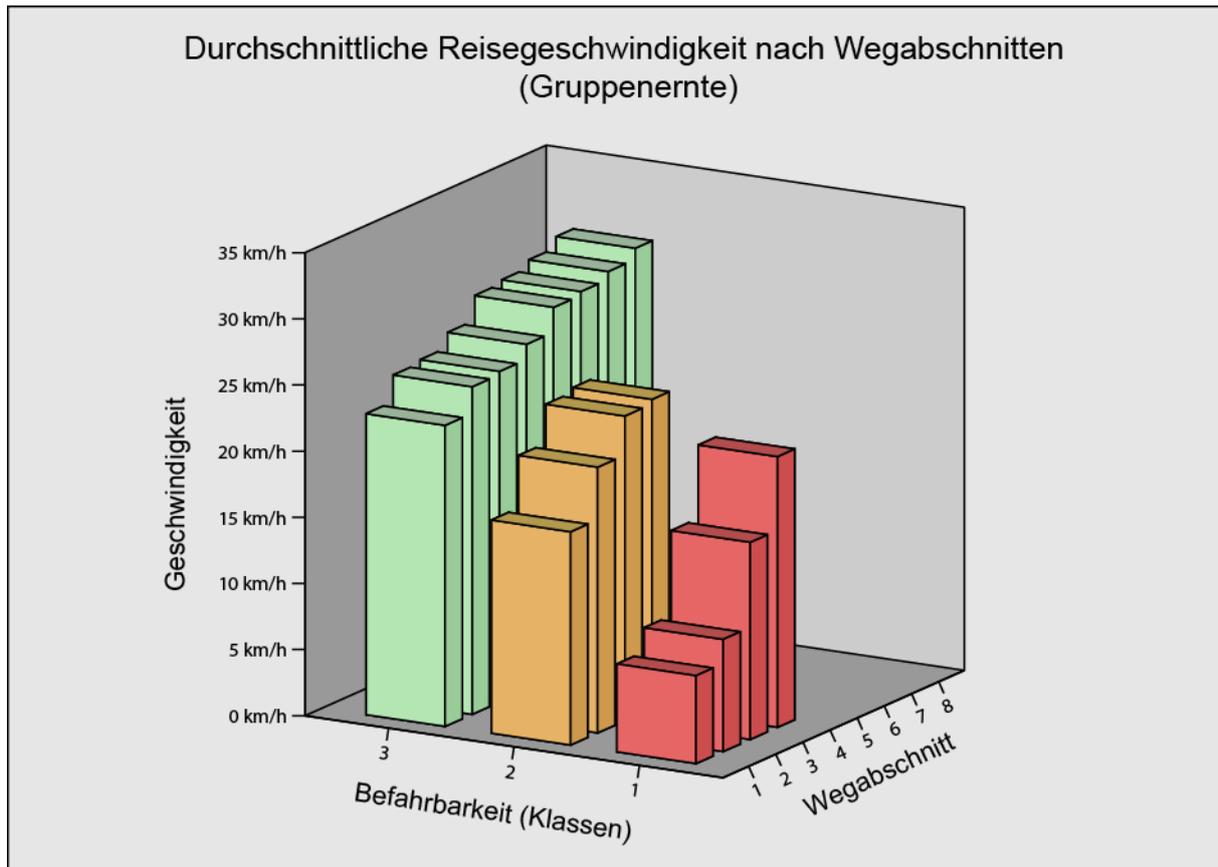


Abbildung 4-13: Durchschnittliche Reisegeschwindigkeit bei der Gruppenernte nach Wegabschnitten. Eigene Darstellung.

Wegepunkte wurden auf Straßenabschnitten der in Tabelle 4-9 dargestellten Befahrbarkeitsklassen 0 bis 5 aufgezeichnet. Die Stichprobenzahl war nicht in allen Klassen für eine statistische Auswertung ausreichend. So wurde beispielsweise nur ein Straßenabschnitt der Befahrungshäufigkeitsklasse 1 mit fünf Wegepunkten beprobt. In sämtlichen anderen Kategorien befanden sich zwei bis vier Wegabschnitte mit 152 bis 1.108 Wegepunkten. Um für die statistische Auswertung in etwa gleichgroße Klassen zu erhalten, wurden die Klassen 0 bis 3 zusammengefasst. Im Vorfeld der Auswertung wurden mit zunehmender Befahrungshäufigkeit (also von Klasse 0 zu Klasse 5) steigende Geschwindigkeiten erwartet. Dies ist in Abbildung 4-14 teilweise zu erkennen. In der Befahrungshäufigkeitsklasse 5 liegt die mittlere Geschwindigkeit mit 27,0 km/h deutlich über denen der Klassen 0 bis 3 und 4. Zwischen den zwei niedrigeren Befahrungshäufigkeitsklassen unterscheiden sich die Durchschnittsgeschwindigkeiten mit 19,8 km/h in Klasse 0 bis 3 und 21,6 km/h in Klasse 4 weniger. Das untere Quartil nimmt mit steigender Befahrungshäufigkeit zwischen den untersuchten Klassen jeweils um etwa 5 km/h zu. Die aufgezeichneten Spitzengeschwindigkeiten bestätigen den beschriebenen Trend nicht. So werden in den niedrigeren Befahrungshäufigkeitsklassen höhere Spitzengeschwindigkeiten erreicht

als in der Klasse 5. Die untersuchten Variablen Korrelieren mit einem Rangkorrelationskoeffizienten (r_s) von 0,271 auf einem Signifikanzniveau von 0,001.

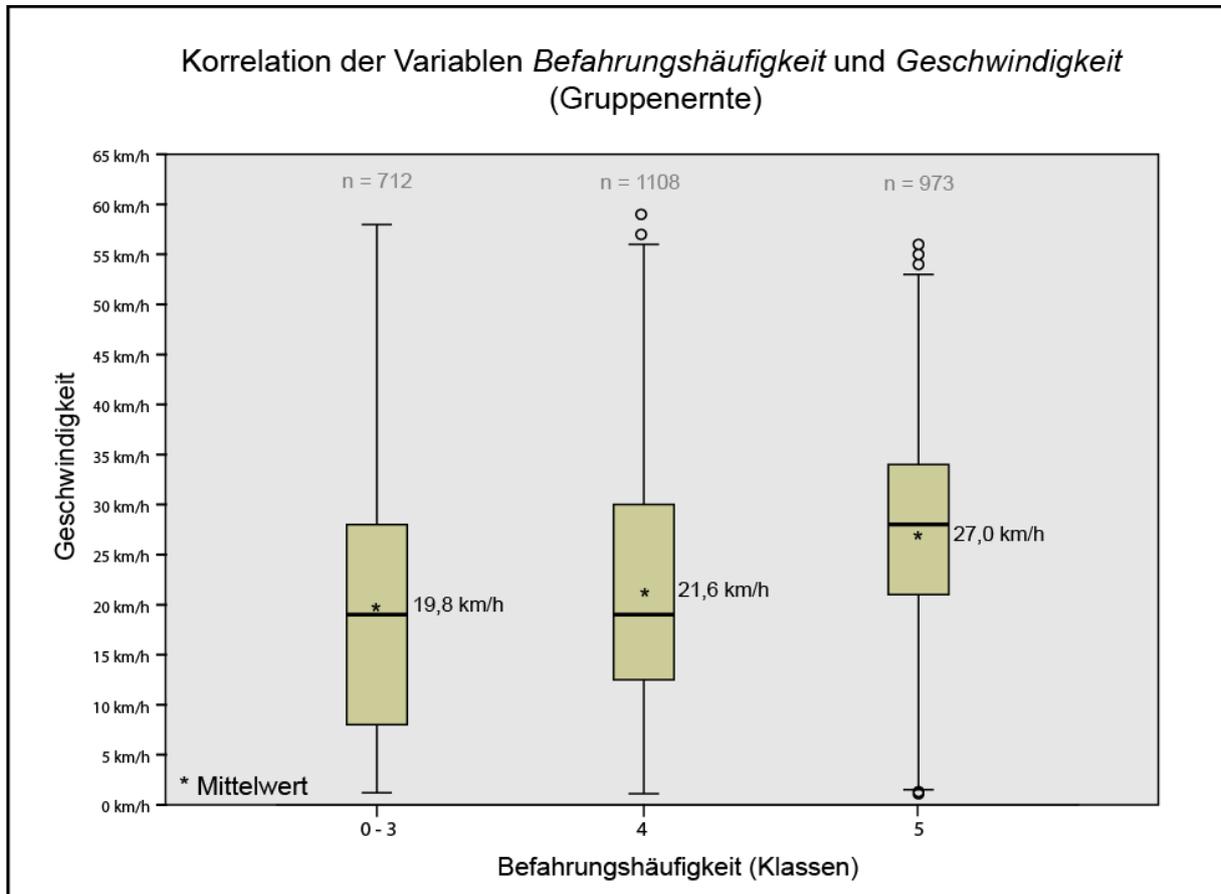


Abbildung 4-14: Korrelation der Variablen *Befahrungshäufigkeit* und *Geschwindigkeit* bei der Gruppenernte. Eigene Darstellung.

Für die Extrapolation der aufgezeichneten Geschwindigkeiten auf das gesamte Wegenetz Alichurs ist der Parameter *Befahrbarkeitsklasse* geeignet. Sowohl die graphische Darstellung (Abbildung 4-12 und Abbildung 4-13) als auch der Rangkorrelationskoeffizient und die Signifikanz der Korrelation beider Größen zeigen einen deutlichen statistischen Zusammenhang. Zwar weist auch der Parameter *Befahrungshäufigkeit* einen plausiblen Einfluss auf die Reisegeschwindigkeit bei der Gruppenernte auf. Verglichen mit dem Parameter *Befahrbarkeitsklasse* ist dieser jedoch schwächer ausgeprägt. Zudem befindet sich ein Großteil der aufgezeichneten Wegpunkte in Klassen mit hohen Befahrungshäufigkeiten, während große Teile des untersuchten Wegenetzes eher selten befahren werden. Zur Abschätzung der Reisegeschwindigkeit im gesamten Wegenetz wurden die Befahrbarkeitsklassenweise ermittelten durchschnittlichen Reisegeschwindigkeiten den entsprechenden nicht beprobten Wegabschnitten zugeordnet. Eine Ausnahme bildete nur der Pamir Highway. Hier wurde die auf Teilen des Pamir Highway ermittelte durchschnittliche Reisege-

schwindigkeit von 36 km/h auf die gesamte Straße extrapoliert. Wegabschnitten der Befahrbarkeitsklasse *Mosquitsch* wurde eine Geschwindigkeit von 27 km/h, Abschnitten der Klasse *Lada Niva* 21 km/h und Teilen der Befahrbarkeitsklasse *Uaz* die Reisegeschwindigkeit 13 km/h zugeordnet. Die Wegabschnitte der Befahrbarkeitsklasse *Gaz-66* wurden wie Gebietsteile ohne Erschließung behandelt. Wegeabschnitte dieser Befahrbarkeitsklasse kommen nur in den entlegensten Teilen des Erntegebietes an Talenden und auf Pässen vor (Abbildung 4-11 b). Um den zusätzlichen Zeitaufwand für die Überquerung des Alichur Flusses durch die lokalen Furten zu berücksichtigen, wurden sämtliche Wegepunkte im Umkreis von 150 m um die Furten gesondert ausgewertet. In Summe wurden acht auswertbare Flussquerungen durch zwei verschiedene Furten per GPS aufgezeichnet. Die durchschnittliche Differenz zwischen Eintritts- und Austrittszeit aus dem 150 m Umkreis der Furten betrug 5:00 Minuten. Dieser Wert wurde jeder der sechs Furten zugeordnet. Im Gegensatz zum Fluss Alichur gelten kleinere Wasserläufe in der Region nicht als unüberwindbare Hindernisse für die zum Transport der Zwergsträucher verwendeten LKW. Zwar können diese Wasserläufe in der Praxis auch nicht überall problemlos passiert werden, in der Regel ist eine Querung jedoch an so vielen Stellen möglich, dass deren Quantifizierung nicht zielführend wäre. Querungen untergeordneter Wasserläufe wurden nicht als Zwangsquerungen in der Wegenetzkarte berücksichtigt.

Der hauptsächlich zur Zwergstrauchernte eingesetzte LKW *Gaz-66* besitzt im unbeladenen Zustand eine maximale Steigfähigkeit von 30° (NTIS 1973, S. 3). Da die LKW bei der Gruppenernte jedoch bis zu 2 m hoch beladen werden, müssen solche extremen Steigungen gemieden werden. Die aufgenommenen Wegepunkte der Gruppenernte deuten darauf hin, dass maximal Steigungen mit einer Neigung von 20° befahren werden. Sämtliche aufgezeichnete Ernteorte und 97,6 % aller abseits der Straßen gespeicherten Wegepunkte befanden sich an Hängen mit weniger als 20° Neigung. Wie bei der Herleitung des Raumwiderstandes der individuellen Ernte wurden daher auch bei der Gruppenernte nur Steigungen keiner gleich 20° als erreichbar betrachtet. Eine Ausnahme bildeten hier lediglich Wegeabschnitte der Klasse *Gaz-66*. Diese befanden sich teilweise an Hängen, welche im DGM als steiler als 20° klassifiziert wurden. Gebiete bis zu 60 m links und rechts der betreffenden Wegeabschnitte wurden ebenfalls als befahrbar klassifiziert, auch wenn dort vom DGM Steigungen über 20° ausgewiesen wurden. Wie die Auswertung der GPS-Tracks zeigt, spielt die Reisegeschwindigkeit abseits des Wegenetzes für die Reisezeit zu

den Zwergstrauchernteorten eine eher untergeordnete Rolle. Der Großteil des beerntbaren Geländes liegt in unmittelbarer Nähe eines Weges. Die 14 ausgewerteten Gruppenerntetracks enthielten drei Abschnitte mit insgesamt 905 Wegepunkten in denen relevante Entfernungen über Gelände abseits des Wegenetzes zurückgelegt wurden. Zur Abschätzung der Reisegeschwindigkeit abseits des Wegenetzes wurde das Untersuchungsgebiet grob anhand des DGM und eigener Beobachtungen physiologisch in die zwei Kategorien *Ebene* und *Gebirge* gegliedert. Den physiologischen Gebieten wurde eine Durchschnittsgeschwindigkeit, welche sich deutlich nach unten von der Befahrbarkeitsklasse mit der niedrigsten Geschwindigkeit in den beiden Gebieten abgrenzt, zugeordnet. Die niedrigste Befahrbarkeitsklasse in der Kategorie *Ebene* bildete die Klasse *Lada Niva*, in der mit durchschnittlich 21 km/h gefahren wird. Die mittlere Geschwindigkeit abseits von Fahrwegen an Steigungen kleiner gleich 10° , welche in dieser physiologischen Klasse hauptsächlich vorkommen, liegt bei 16,0 km/h. Zur Ermittlung dieses Wertes wurden 614 Wegepunkte ausgewertet. Die niedrigste Befahrbarkeitsklasse der Kategorie *Gebirge* bildet die Klasse *Uaz*. Hier wird im Durchschnitt 13,0 km/h gefahren. Die abseits des Wegenetzes aufgenommenen Durchschnittsgeschwindigkeiten der Kategorie *Gebirge* befinden sich nahezu ausschließlich an Hangneigungen, welche nur knapp über 10° Steigung aufweisen. Sie können daher nicht als repräsentativ für die gesamte Kategorie gelten. Da repräsentative Aufnahmen aus dieser physiologischen Klasse fehlen, wurde die Reisegeschwindigkeit abseits des Wegenetzes empirisch hergeleitet. Mit 8 km/h wurde für Gebiete abseits des Wegenetzes in der physiologischen Klasse *Gebirge* eine Geschwindigkeit gewählt, die wie in der Kategorie *Ebene* um 5 km/h unter der Geschwindigkeit der niedrigsten Befahrbarkeitsklasse liegt.

Analog zur individuellen Zwergstrauchernte wurde für die Gruppenernte zunächst ein Kostenraster mit einer Auflösung von 30 m x 30 m mit Hilfe des Arc Info *model-builders* erstellt. Hier gingen sämtliche ermittelte Durchschnittsgeschwindigkeiten, das Fluss- und Gewässernetz der Region Alichur als unüberwindbare Hindernisse, sowie der zusätzliche Zeitaufwand zum Überqueren der Furten ein. Mittels des Bezugsrasters und der Funktion *Kostenentfernung* wurde schließlich die Kostenentfernungskarte der Gruppenernte erstellt (Abbildung 4-15). In Anhang VI ist das komplette Modell, auf dem die Kostenentfernungskarte der Gruppenernte beruht dargestellt. Das Rechteckraster wurde für die Simulation im *Energiemodell Alichur* in ein Hexagonalraster umgerechnet. Dabei ergab sich, analog zum Umrechnungsverfahren

ren bei der individuellen Zwergstrauchernte, der Wert der Hexagonzellen aus dem Mehrheitswert der überlagerten Rechteckzellen (Abbildung 4-16).

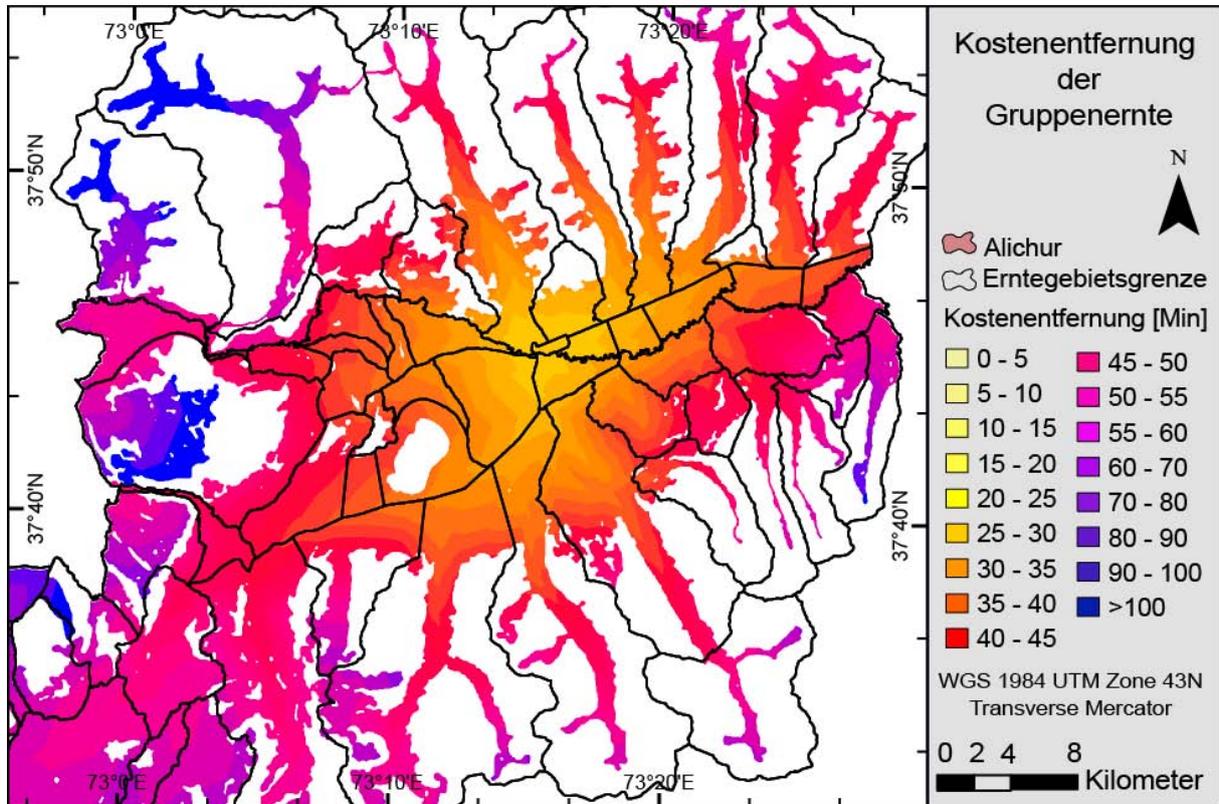


Abbildung 4-15: Kostenentfernung der Gruppenernte. Auflösung: 900 m² (Rechteck). Eigene Darstellung.

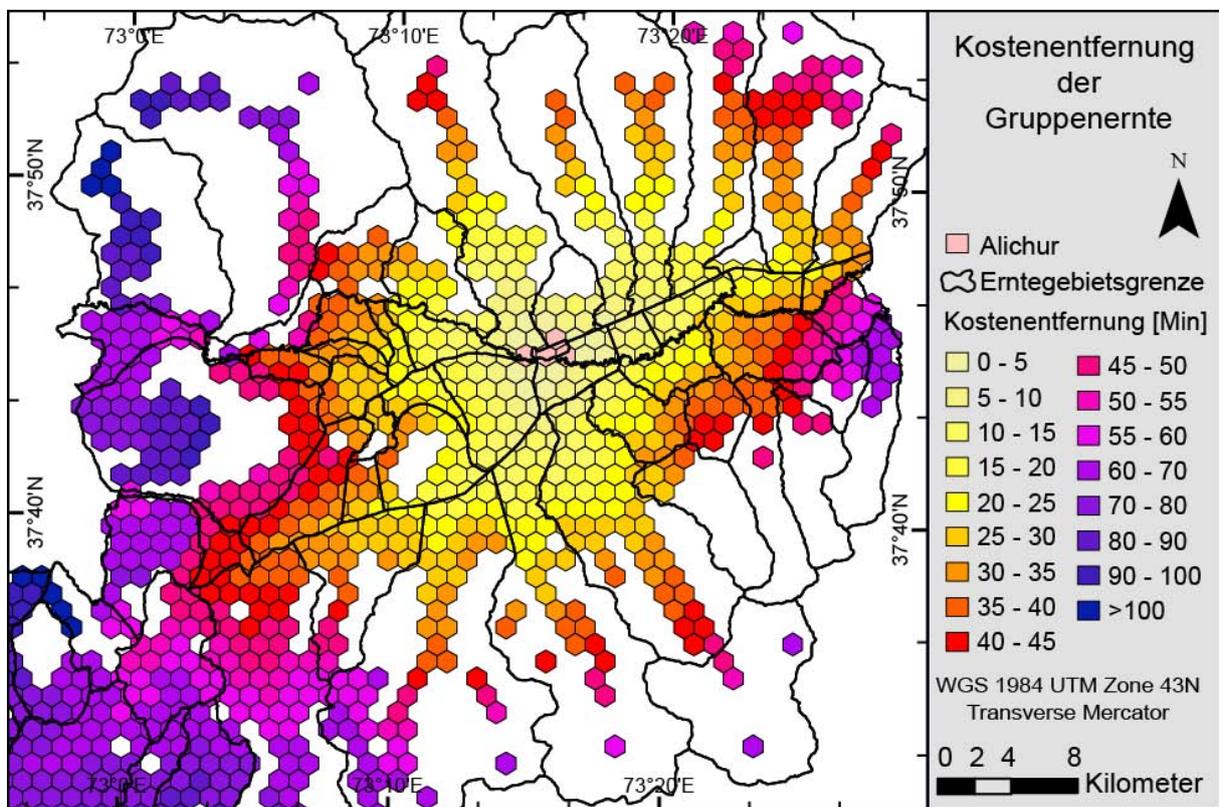


Abbildung 4-16: Kostenentfernung der Gruppenernte. Auflösung: 1 km² (Sechseck). Eigene Darstellung.

4.3.3 INTENSITÄT DER ZWERGSTRAUCHERNTEN

Für ein umfassendes Verständnis des Zwergstraucherntesystems von Alichur ist die Intensität mit der in den einzelnen Erntegebieten geerntet wird ein entscheidender Faktor. In der Forstwirtschaft wird das Verhältnis der vorhandenen Stammgrundfläche, also der Summe aller Stammquerschnittsflächen eines Bestandes zur Stammgrundfläche in einem gleichgroßen undurchforsteten Bestand als *natürlicher Bestockungsgrad* bezeichnet (KRAMER 1995, S. 148). Wegen der Anatomie der Zwergsträucher kann in Zwergstrauchbeständen keine Stammgrundfläche ermittelt werden. Alternativ wird hier der Begriff *natürlicher Bestockungsgrad* (nB°) zur Beschreibung des Verhältnisses von vorhandener Biomasse (n) zur auf einem Standort gegenwärtig maximal möglichen Zwergstrauchbiomasse, dem ökologischen Biomassepotenzial (k) benutzt (Formel 4-5). Der natürliche Bestockungsgrad ist eine einheitslose Größe. Das ökologische Biomassepotenzial eines Standortes bezieht sich auf die Biomasse, welche sich durch die natürliche Vegetation an einem Standort einstellen würde, wenn der menschliche Einfluss aufhörte. Dabei werden nicht nur die von Natur aus vorhandenen Geländefaktoren berücksichtigt, sondern auch unumkehrbare auf menschlichen Einfluss zurückzuführende Standortseigenschaften (vgl. REIDL ET AL. 2013). Die natürliche Vegetation wird analog dem Konzept der *potenziellen natürlichen Vegetation* als „*schlagartig sich einstellend*“ (TRAUTMANN 1966, S. 14) angenommen, so dass mögliche zukünftige Klimaänderungen oder andere im Laufe der Sukzession sich einstellende Standortänderungen vernachlässigt werden können.

$$nB^\circ = \frac{n}{k}$$

Formel 4-5

nB° ...Bestockungsgrad
 n ...Gegenwärtig vorhandene Biomasse
 k ...Ökologisches Biomassepotenzial

Es ist anzunehmen, dass die Intensität der Zwergstrauchernte sich von Erntearart zu Erntearart unterscheidet. Die individuelle Zwergstrauchernte weist aufgrund ihrer räumlichen Begrenzung auf wenige Kilometer rund um die Ortschaft Alichur einerseits und die hohe Anzahl an Teilnehmern an dieser Ernteform andererseits die höchste Intensität der beschriebenen Ernteformen auf. Wie in Teilkapitel 3.3.2 beschrieben, wird bei der individuellen Ernte in zwei Stufen, der Ernte mit dem Esel und, in Gebieten im Umkreis von bis zu 3 km zur Ortschaft Alichur, der Ernte zu Fuß, geerntet. Nach der zweiten Stufe, der Ernte zu Fuß, verbleiben nur thermisch nicht nutzbare sehr junge

Individuen. Zusätzlich wird die auf den bereits beernteten Flächen zuwachsende Biomasse durch ihre gute Erreichbarkeit von Alichur aus schnell aufgefunden und die betreffenden Bestände erneut beerntet bevor eine signifikante Erholung möglich ist. Diese Bestände befinden sich daher dauerhaft in einem Zustand sehr niedriger Bestockung. Eine Messung des natürlichen Bestockungsgrades nach der individuellen Ernte gestaltet sich aus vielerlei Gründen schwierig. Exemplarisch wurde bei einem individuellen Erntegang mit Esel der Anteil der entnommenen Zwergstrauchbedeckung an der Gesamtbedeckung untersucht. Die untersuchte Fläche befindet sich 6,2 km westlich von Alichur im Erntegbiet Chukur-Ala. Am diesem Ernteort kommen *teresken* nur an den Rändern von Senken, in denen ausreichend Schmelzwasser für die Pflanzen vorhanden und die Konkurrenz mit Gräsern gering ist, vor. Dieses Gebiet ist für eine großflächige Ernte wie die Gruppenernte nicht ertragreich genug. Da sich der aufgesuchte Ernteort zudem am Rande des individuell beernteten Gebietes befindet, wird angenommen, dass er sich vor der Ernte nahe seiner natürlichen Bestockung befand. Während der Ernte wurden in diesem Gebiet 67 % der Zwergstrauchbedeckung entfernt. Die beobachtete Nutzungsintensität jedoch bildet nur die erste Stufe der individuellen Zwergstrauchernte ab. Es ist wahrscheinlich, dass nach der zweiten Nutzungsstufe bei der individuellen Ernte der natürliche Bestockungsgrad weniger 0,2 beträgt.

Die Ernteintensität der Gruppenernte wurde grob anhand des Verhältnisses der Anzahl aller entnommenen Zwergsträucher zur Anzahl aller vor der Ernte vorhandenen Zwergsträucher abgeschätzt. Dazu wurden während der Herbstsaison 2013 bei sechs Erntegängen in vier verschiedenen Erntegebieten Probeflächen angelegt. In den Probeflächen wurden vor und nach der Ernte alle Zwergsträucher mit einem Umfang von über 1 m gezählt. Im Mittel wurden 49 % der Zwergsträucher mit einem Umfang größer als einen Meter aus den Probeflächen entfernt. Dabei lagen der maximale Anteil bei 65 % und der minimale Anteil bei 33 %. Um die großflächige Ernteintensität abzuschätzen, sollten zusätzlich Erntelücken in die Betrachtung einbezogen werden. Erntelücken entstehen dadurch, dass die von unterschiedlichen Erntegruppen beernteten Teilgebiete nicht nahtlos aneinander angrenzen. In der Herbstsaison 2013 wurden sieben jeweils im Abstand von etwa einer Woche durchgeführte Erntefahrten in das Erntegbiet Goromdu mittels GPS aufgezeichnet. Bis auf eine Erntefahrt (6.11.2013) wurde neben der Fahrt zum Erntegbiet auch die Erntetätigkeit selbst per GPS erfasst. Hier lässt sich die räumliche Ausdehnung der

einzelnen Ernteaktionen abschätzen. In Abbildung 4-17 ist gut erkennbar, dass die Gruppenernte nicht streng systematisch abläuft. Aufeinander folgende Ernteaktionen finden oft nicht in direkt aneinander angrenzenden Gebieten statt. Beispielsweise liegt zwischen dem am 22.10. und dem am 31.10. beernteten Gebiet eine Entfernung von fast 100 m. Diese Fläche blieb ungenutzt, bis am 15.11. eine weitere Erntegruppe in Teilen dieses Zwischenraumes erntete. Es ist sehr wahrscheinlich, dass durch das unstrukturierte Vorgehen bei der Gruppenernte relevante Mengen an Zwergsträuchern aller Altersklassen auf der Fläche verbleiben. Die beobachteten Ernteintensitäten, sowie das Auftreten von Erntelücken legten den Schluss nahe, dass der natürliche Bestockungsgrad mittels Gruppenernte beernteter Flächen größer als 0,5 ist und somit bei der Ernte weniger als 50 % eines Bestandes entnommen werden.

Für die Motorradernernte und die kombinierte Ernte konnten keine Messungen zur Ernteintensität durchgeführt werden. Bei der Motorradernernte werden hauptsächlich bereits zuvor mit der Gruppenerntemethode beerntete Gebiete angefahren. Daher verbleiben nach der Ernte niedrigere natürliche Bestockungsgrade als bei der Gruppenernte. Da die Motorradernernte jedoch in einem deutlich größeren Einzugsgebiet durchgeführt wird, als die individuelle Ernte, ist sie verglichen mit dieser weniger intensiv. Bei der kombinierten Ernte werden Zwergsträucher in fußläufiger Entfernung der Weidecamps geerntet. Es sind sehr wahrscheinlich nur Flächen im Umkreis von rund 1 km um die einzelnen Weidecamps betroffen. Da die kombinierte Zwergstrauchernte von Schäfern in den von ihnen selbst kontrollierten Weidegebieten betrieben wird, kann davon ausgegangen werden, dass diese der Ernte mit Blick auf den Erhalt der Weidekapazität vorgehen. Weiterhin ist pro Weidecamp nur eine Partei mit der Zwergstrauchernte befasst und die Weidecamps werden zweimal pro Jahr gewechselt. All diese Faktoren lassen vermuten, dass die kombinierte Zwergstrauchernte nicht intensiver betrieben wird als die Gruppenernte.

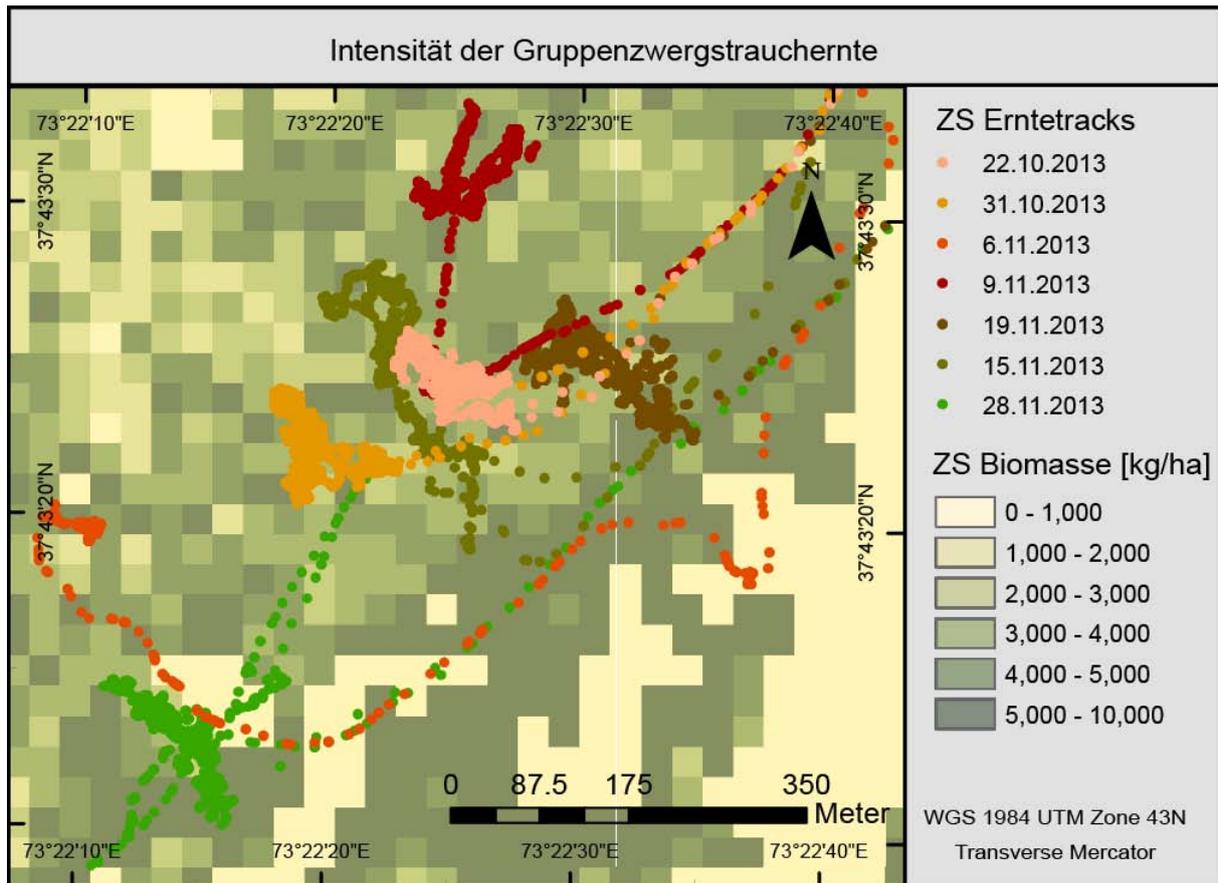


Abbildung 4-17: Von Erntegruppen aufgesuchte Ernteorte im Erntegebiet Goromdu. Daten: Eigene Daten (Erntetracks), ZANDLER ET AL. (2015) (Zwergstrauchbiomasse), Grafik: Eigene Darstellung.

4.4 BESTANDES- UND WUCHSPARAMETER DER ZWERGSTRÄUCHER

Neben der relativen Nähe zur Ortschaft Alichur wurde die räumliche Zwergstrauchbiomasseverteilung als entscheidendes Kriterium für die Wahl der Ernteorte identifiziert. Nach einer ausführlichen Darstellung der für die verschiedenen Ernteformen relevanten Bewegungsmuster und der Intensitäten, mit denen bei den unterschiedlichen Erntearten geerntet wird, widmet sich dieses Unterkapitel den Bestandes- und Wachstumsparametern der Zwergsträucher. In Teilkapitel 4.4.1 wird der gegenwärtige Zwergstrauchbestand in der betrachteten Region räumlich aufgelöst beschrieben. Um den gegenwärtigen natürlichen Bestockungsgrad abschätzen zu können, ist zusätzlich die Betrachtung des Zwergstrauchbiomassepotenzials entscheidend. Diese erfolgt in Teilkapitel 4.4.2 In Teilkapitel 4.4.3 wird eine Methode zur Herleitung des gegenwärtigen und des zukünftigen Biomassezuwachses vorgestellt. Zudem werden Zuwachswerte aus der Literatur besprochen.

4.4.1 ZWERGSTRAUCHBESTAND

Die Zwergstrauchbedeckung des Ost-Pamir wurde von ZANDLER ET AL. (2015) eingehend untersucht. ZANDLER ET AL. (2015) erstellen zunächst ein allometrisches Modell zur Beschreibung der Beziehung zwischen Zwergstrauchbedeckungsfläche und beerntbarer Zwergstrauchbiomasse auf Individuenbasis. Mit Hilfe des allometrischen Modells ermitteln ZANDLER ET AL. (2015) die Zwergstrauchbiomasse auf 122 Probe­flächen. In einem empirischen Modell werden die aufgenommenen Biomassen mit Fernerkundungsdaten von RapidEye (RAPIDEYE AG 2009), Landsat (USGS 2013) und ASTER (METI & NASA 2009) korrelieren (ZANDLER ET AL. 2015). Ergebnis des Gesamtmodells ist eine räumlich aufgelöste Zwergstrauchbiomassekarte der Region (Abbildung 4-18).

Die im untersuchten Gebiet ermittelten Biomassedichten liegen zwischen 0 kg/ha und 10.000 kg/ha, der Mittelwert beträgt 1.574 kg/ha und die Standardabweichung 1.818 kg/ha. Dichtere Zwergstrauchbestände kommen in Höhenlagen von 4.000 m bis 4.300 m, in den Tälern südlich von Alichur auch bis 4.400 m vor. Hier wurden Biomassedichten von etwa 2.000 kg/ha bis 5.000 kg/ha, selten darüber, klassifiziert. Diese Beobachtung deckt sich mit der in Teilkapitel 3.2.3 beschriebenen Höhenstufengliederung nach STANYUKOVICH (1973). Dort werden der subalpinen Stufe, welche sich unscharf begrenzt zwischen 3.500 m und 4.200 m befindet, dichtere Zwergstrauchbestände zugeordnet. Keine, oder annähernd keine Zwergstrauchbiomasse, befindet sich in der Alichurebene, entlang der Tiefenlinien, sowie oberhalb von 4.400 m. Im Gebiet rund um den See Sasyk-Kol und an den Hangfüßen werden von ZANDLER ET AL. (2015) Zwergstrauchbiomassen von etwa 500 kg/ha bis 2.000 kg/ha ausgewiesen. Die von ZANDLER ET AL. (2015) erstellte Biomassekarte deckt vier Erntegebiete nur teilweise und zwei Erntegebiete im äußersten Südwesten des Untersuchungsgebietes nicht ab.

Als Ausgangswerte für die Simulation im *Energiemodell Alichur* wurden die von ZANDLER ET AL. (2015) ermittelten Zwergstrauchbiomassedichten auf eine Auflösung von 1 km² aggregiert. Hierzu wurde jeweils der Mittelwert der von den Sechseckzellen überdeckten Rechteckzellen verwendet (Abbildung 4-19). Für die Sechseckzellen in den zwei Erntegebieten, welche durch die von ZANDLER ET AL. (2015) erstellte Biomassekarte nicht abgedeckt werden, wurde das durchschnittliche Biomassepotenzial eines repräsentativen Nachbargebietes verwendet. In der auf diese Weise

modifizierten Zwergstrauchbiomassekarte ergibt sich eine durchschnittliche Zwergstrauchbiomassedichte von 1.583 kg/ha im Untersuchungsgebiet.

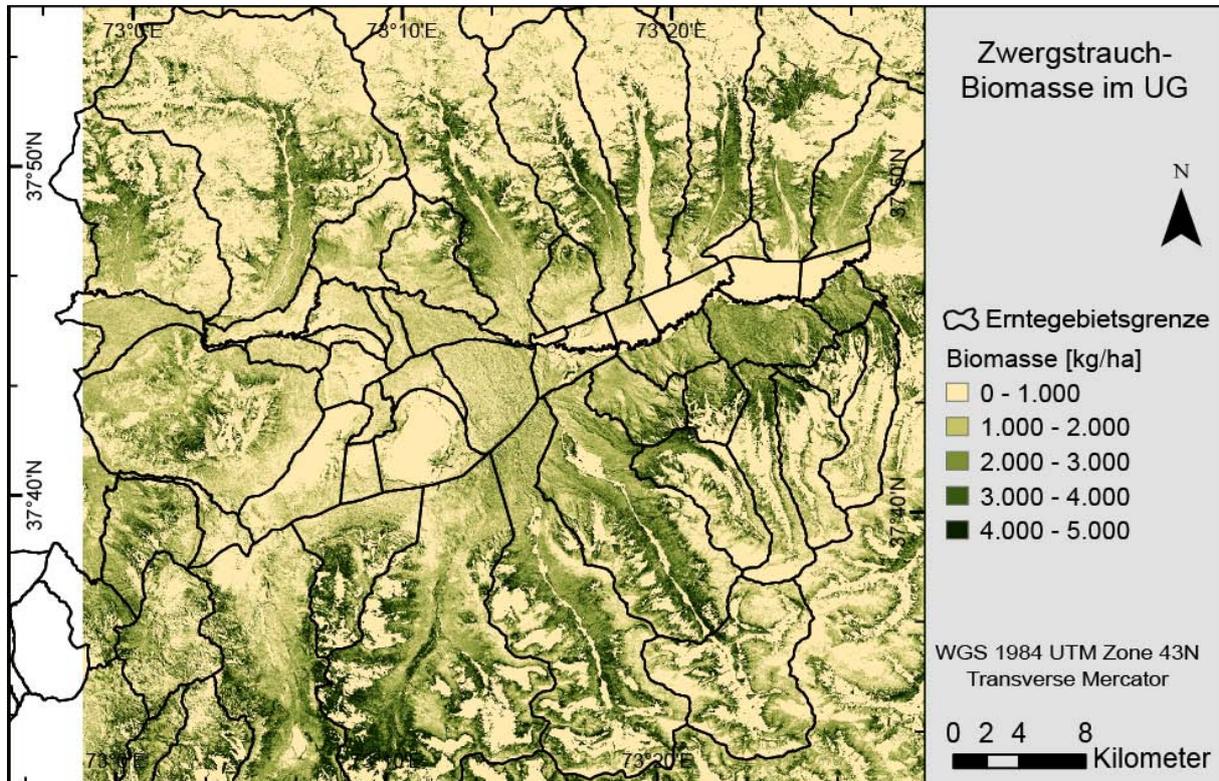


Abbildung 4-18: Zwergstrauchbiomasse im Untersuchungsgebiet. Auflösung: 900 m² (Rechteck). Daten: ZANDLER ET AL. (2015). Eigene Darstellung.

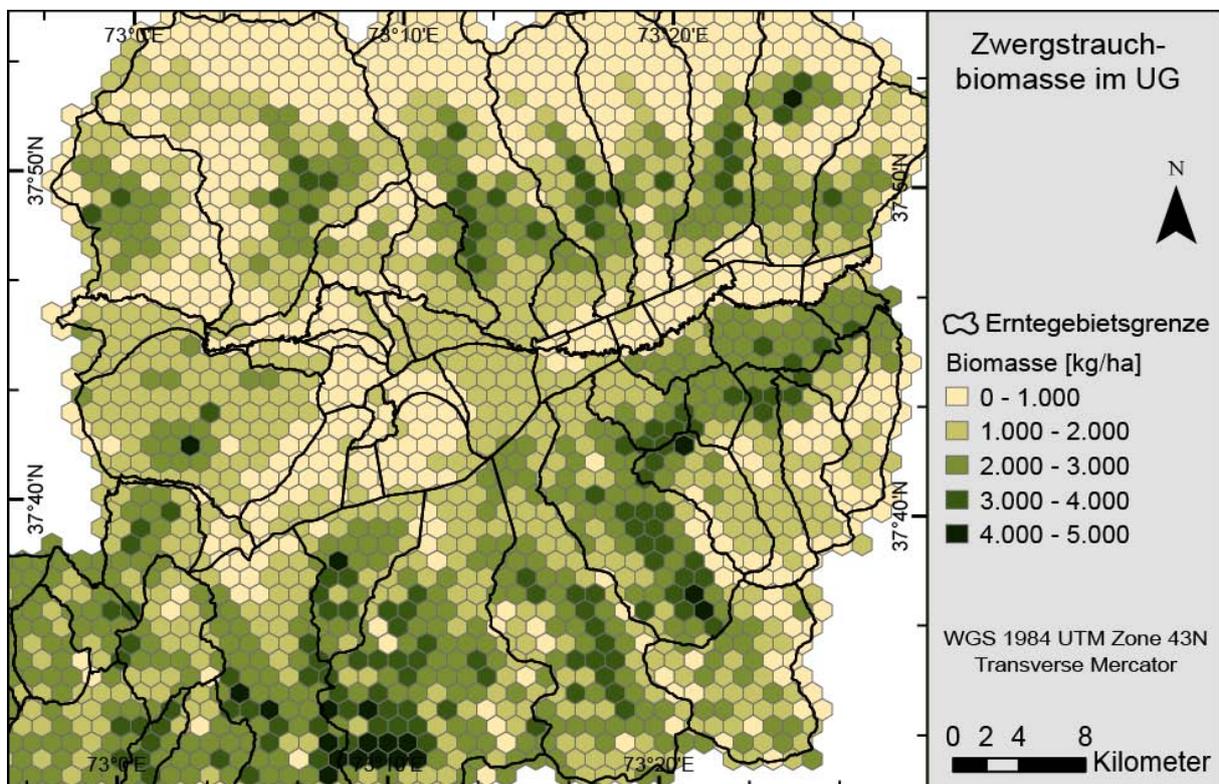


Abbildung 4-19: Zwergstrauchbiomasse im Untersuchungsgebiet. Auflösung: 1 km² (Sechseck). Daten: ZANDLER ET AL. (2015). Eigene Darstellung.

4.4.2 ZWERGSTRAUCHBIOMASSEPOTENZIAL

Die Vegetation des Ost-Pamir wird seit mindestens 12.000 Jahren anthropogen beeinflusst (RANOV UND SIDOROV 1965 in YUSUFBEKOV UND KASACH 1972, S. 83). Der heutige Vegetationszustand ist Produkt dieses langjährigen Einflusses und spiegelt oft nicht das natürliche Potenzial eines Standortes wieder. AKNASAROV (2012, S. 7) identifiziert drei anthropogene Faktorengruppen: *Thermische Biomassenutzung*, *Beweidung* und *technische Maßnahmen*. Lange Zeit erfolgte eine großmaßstäbliche Beeinflussung der Vegetation im Ost-Pamir ausschließlich über die Beweidung. Erst seit Beginn des 20. Jahrhunderts gewannen auch die beiden anderen Faktorengruppen an Bedeutung. Der Ausbau des Pamir Highways in den 1930er Jahren stellte die erste technische Maßnahme mit großflächigen Auswirkungen auf die Vegetation des Ost-Pamir dar. Gleichzeitig kam es regional nahe der nun gegründeten dauerhaften Siedlungen zu einer verstärkten thermischen Nutzung der lokalen Zwergstrauchbestände und des Viehdungs. Da die Ortschaft Alichur erst seit Mitte der 1970er Jahre nach einer staatlich verordneten Umsiedlung am heutigen Standort existiert, wurde die ortsnahe Vegetation hier allerdings erst ab 1992, dann jedoch intensiv, thermisch genutzt. In der Literatur zum Thema *Tereskensyndrom* wird teilweise der Eindruck erweckt, vor 1992 wären sämtliche ortsnahe Standorte im Ost-Pamir zwergstrauchbestanden gewesen (z.B. BRECKLE UND WUCHERER 2006, S. 233). Dem ist nicht so. Beispielsweise beschreibt der Forschungsbericht der deutschen Alai-Pamir-Exkursion von 1928 die Vegetation des Tals Kumde, dessen Taleingang nur etwa 10 km vom heutigen Alichur entfernt liegt, als „*sehr dürftig*“ (DEUTSCHE FORSCHUNG 1929, S. 133). Weiter heißt es: „*Weite Strecken der Talsohle bilden eine öde Sandfläche.*“ (DEUTSCHE FORSCHUNG 1929, S. 133). Hier ist die gegenwärtige karge Vegetationsbedeckung also nicht nur Folge einer anthropogenen Übernutzung, sondern Produkt der Standortseigenschaften. Folglich ist im untersuchten Gebiet das Zwergstrauchbiomassepotenzial (k) (Siehe Formel 4-5 in Teilkapitel 4.3.3) räumlich nicht konstant. Vielmehr wirken sich verschiedene räumlich stark variierende Faktoren auf die lokalen Biomassepotenziale aus. Das Mikroklima eines Standortes besitzt große Bedeutung für den lokalen Zwergstrauchzuwachs. Beispielsweise kann eine nördliche Hangexposition von Vorteil für die Wasserverfügbarkeit sein, während sich ein sandiges Ausgangssubstrat wie im Kumde Tal negativ auf diese auswirkt. Auch in dem von ZANDLER ET AL. (2015, S. 149) verwendeten Modell zur Simulation

von Zwergstrauchbiomasse im Ost-Pamir finden sich topographische Variablen unter den zehn besten Prädiktoren.

Aufgrund der heterogenen Standortbedingungen im Einzugsgebiet der Ortschaft Alichur erfolgt die Abschätzung des Zwergstrauchbiomassepotenzials räumlich aufgelöst. Der direkte Einfluss der Beweidung auf die Gesamtzwergstrauchbiomasse in der betrachteten Region ist im Vergleich zur Zwergstrauchernte gering und wird im Modell daher nicht abgebildet. YUSUFBEKOV UND KASACH (1972, S. 88) formulieren in ihrer Monografie *Teresken na Pamire (Teresken auf dem Pamir)* „Ganz sicher hat die direkte menschliche Aktivität einen deutlich größeren Einfluss auf die [teresken] Vegetation als die Beweidung [...]“. Im Vergleich zur Größe des betrachteten Raumes im Einzugsgebiet der Ortschaft Alichur fanden während der letzten Jahrzehnte keine technischen Maßnahmen mit signifikantem Einfluss auf die Zwergstrauchdichte in der Region statt. Auch technische Maßnahmen sollen im Modell daher nicht explizit betrachtet werden.

Im *Energiemodell Alichur* werden zwei Arten von Zwergstrauchstandorten unterschieden: Zum Zeitpunkt des Simulationsstarts unbeerntete Zwergstrauchbestände und zu diesem Zeitpunkt bereits beerntete Bestände. Die gegenwärtig vorhandene Biomasse (n) der unbeernteten Bestände befindet sich an ihrem ökologischen Biomassepotenzial (k) (Siehe Formel 4-5 in Teilkapitel 4.3.3). Diese Zwergstrauchbestände weisen einen natürlichen Bestockungsgrad (nB°) von 1 auf. Im Gegensatz hierzu befinden sich die zum Zeitpunkt des Simulationsstarts bereits beernteten Bestände in einem Zustand $n < k$. Das ökologische Potenzial dieser Standorte entspricht dort nicht wie bei den unbeernteten Beständen der gegenwärtig vorhandenen Biomasse. Als Grenze zwischen zum Simulationsstart beernteten und unbeernteten Zwergstrauchbeständen soll eine Gruppenerntekostenentfernung von 45 Minuten angenommen werden. Dieser Wert entspricht dem aufgerundeten Mittelwert aller aufgenommenen Gruppenernte-GPS-Tracks. Für die Herleitung des Biomassepotenzials in den bereits beernteten Zwergstrauchgebieten wurden die in Teilkapitel 4.2.1 beschriebenen Erntegebiete als Bezugseinheit verwendet. Im Vergleich zum gesamten Untersuchungsgebiet handelt es sich bei den Erntegebieten zumeist um landschaftlich homogene Flächen, die folglich auch durch relativ homogene Standortbedingungen charakterisiert sind. Es wird davon ausgegangen, dass schlecht erreichbare Teile eines Erntegebietes in der Vergangenheit weniger anthropogen beeinflusst wurden, als leicht zugängliche Teile. Die Biomassedichte in

den schlecht erreichbaren Teilen eines Erntegebietes eignet sich daher zur Abschätzung des Zwergstrauchpotenzials in den bereits beernteten Teilen der Erntegebiete. Bei diesem Vorgehen gilt es jedoch zu beachten, dass die schlecht erreichbaren Erntegebietsteile durch ihre Lage oft bessere Zwergstrauchwuchsbedingungen aufweisen, als die gut erreichbaren Tallagen. Basierend auf den von ZANDLER ET AL. (2015) in einer Auflösung von 30 m x 30 m hergeleiteten Biomassedichten wurden Durchschnittswerte des Biomassepotenzials (k) für die zur Simulation gewählte räumliche Auflösung von 1 km² errechnet. Hierfür wurde in erster Annäherung angenommen, dass die in einer Sechseckzelle vorhandene Zwergstrauchbiomasse dann ihrem natürlichen Biomassepotenzial entspricht, wenn die in ihr enthaltene Zwergstrauchbiomasse höher oder gleich 50 % der Zwergstrauchbiomasse der am dichtesten bestockten Zelle des selben Erntegebietes ist. Liegt die Zwergstrauchbiomasse einer Zelle unter diesem Wert, so entspricht ihr Zwergstrauchbiomassepotenzial genau 50 % der Zwergstrauchbiomasse der am dichtesten bestockten Zelle des Erntegebietes.

4.4.3 ZWERGSTRAUCHBIOMASSEZUWACHS

Angaben zum Zwergstrauchzuwachs im Pamir werden in AKNASAROV (2012, S. 10), BRECKLE UND WUCHERER (2006, S. 232), CLEMENS (2001, S. 137), WALTER UND BRECKLE (1986, S. 337) und YUSUFBEKOV UND KASACH (1972, S. 7) gemacht. Die beschriebenen Zuwachsraten reichen von 20 kg/ha*a bis 500 kg/ha*a. WALTER UND BRECKLE (1986, S. 337) geben an, dass der Zuwachs von *teresken* mit 20 kg/ha*a bis 30 kg/ha*a deutlich geringer ist als jener von *shyvak*, welcher 40 kg/ha*a bis 480 kg/ha*a beträgt. AKNASAROV (2012, S. 10) und YUSUFBEKOV UND KASACH (1972, S. 5) hingegen nennen für *teresken* einen jährlichen Zuwachs von bis zu 500 kg/ha. Die Angaben für den Massenzuwachs von *teresken* aus CLEMENS (2001, S. 137) (70 kg/ha*a) und BRECKLE UND WUCHERER (2006, S. 232) (30 kg/ha bis 70 kg/ha*a, im Extremfall 150 kg/ha*a) liegen zwischen den von WALTER UND BRECKLE (1986, S. 337) und AKNASAROV (2012, S. 10) bzw. YUSUFBEKOV UND KASACH (1972, S. 5) gemachten Angaben. In der Größenordnung scheinen sie jedoch eher die von WALTER UND BRECKLE (1986, S. 337) vorgeschlagenen Zuwachsraten zu bestätigen.

Als Ausgangsparameter für die Modellierung des Zwergstrauchbiomassezuwachses im Untersuchungsgebiet sind die genannten Werte ohne weitere Betrachtungen nicht zielführend. Keine der Quellen nennt ausreichend Details, um die jeweiligen

Zuwachsraten richtig einordnen zu können. Es bleibt unklar, ob es sich bei den untersuchten Gebieten um natürliche, nicht anthropogen beeinflusste Bestände, oder um durch Beweidung bzw. Zwergstrauchentnahme beeinträchtigte Gebiete handelt. Beziehen sich die gemachten Angaben auf natürliche Bestände, so müsste die jährliche Zuwachsrate gleichzeitig der jährlichen Biomasseverlustrate durch absterbende Pflanzen und Pflanzenteile entsprechen. Der Nettozuwachs, also der jährliche Biomassezuwachs abzüglich des jährlichen Biomasseverlusts, in diesen Beständen betrüge null. Dies ist jedoch wenig wahrscheinlich, weil natürliche Bestände selbst im Ost-Pamir nur selten anzutreffen sind. Handelt es sich jedoch um anthropogen beeinflusste Bestände, könnten sich die gemachten Angaben sowohl auf den absoluten Biomassezuwachs, als auch auf den Nettozuwachs beziehen. Für die Modellierung des Zwergstrauchbiomassezuwachses ist vordergründig der Nettozuwachs eines Bestandes von Interesse, weil nur der Nettozuwachs eines Bestandes durch den Menschen genutzt werden kann. Tatsächlich sind Biomassezuwachsraten in der Natur nicht konstant. Der Zuwachs eines Bestandes hängt maßgeblich von der Anzahl der Zuwachsträger und von den verfügbaren Ressourcen ab. Auf einer leeren Fläche ohne Zuwachsträger kann keine Biomasse zuwachsen. Auch auf natürlichen Flächen, die bereits bis zum Biomassepotenzial bestockt sind, kann nur Zuwachs stattfinden, wenn Ressourcen durch das Absterben einzelner Individuen frei werden. In Teilkapitel 4.3.3 wurde für das Verhältnis von gegenwärtig vorhandener Zwergstrauchbiomasse (n) zum Zwergstrauchbiomassepotenzial des Standortes (k) der Begriff *natürlicher Bestockungsgrad* (nB°) eingeführt (Formel 4-5). Wird angenommen, dass die Ressourcenverfügbarkeit eines Bestandes maßgeblich durch interspezifische Konkurrenz begrenzt ist, beeinflusst der natürliche Bestockungsgrad des Bestandes dessen Zuwachsrate. Die Bestockungsgrade der Bestände, auf die sich die in der Literatur gemachten Angaben zum jährlichen Zwergstrauchbiomassezuwachs beziehen, sind nicht bekannt.

Die logistische Gleichung (RICKLEFS 1990) beschreibt das Nettowachstum von Populationen in einer Umgebung mit begrenzten Ressourcen. Grundlage der logistischen Gleichung ist ein exponentielles Wachstumsmodell, bei dem der jährliche Zuwachs eines Bestandes (dN/dt) Produkt aus dem Wachstumskoeffizienten (r) und der Populationsgröße (N) ist (Formel 4-6 aus RICKLEFS 1990, S. 315).

$$\frac{dN}{dt} = rN$$

Formel 4-6

$\frac{dN}{dt}$...Zuwachsrate
 r ...Wachstumskoeffizient
 N ...Populationsgröße

Im Gegensatz zu Modellen, die einen uneingeschränkten Populationszuwachs abbilden, ist der Wachstumskoeffizient (r) bei der logistischen Gleichung nicht konstant. Er ist hier umgekehrt proportional zur Populationsgröße (N), wie Formel 4-7 aus RICKLEFS (1990, S. 315) zeigt.

$$r = r_0 \left(1 - \frac{N}{K}\right)$$

Formel 4-7

r ...Wachstumskoeffizient
 r_0 ...Intrinsischer Zuwachs
 N ...Populationsgröße
 K ...Tragfähigkeit der Umwelt

Der intrinsische Zuwachs (r_0) ist der Zuwachskoeffizient, der unter optimalen Umweltbedingungen, wie sie etwa bei im Verhältnis zur Tragfähigkeit der Umwelt sehr kleinen Populationen herrschen, angenommen werden darf. Er sorgt für exponentielles Wachstum. Je näher sich die Populationsgröße (N) jedoch der Tragfähigkeit ihrer Umwelt (K) annähert, desto kleiner wird der Term $(1 - N/K)$, was zu einer Reduzierung des intrinsischen Zuwachses führt. Bei Populationen, deren Größe die Tragfähigkeit ihrer Umwelt erreicht haben, beträgt der Wachstumskoeffizient (r) schließlich null. Die logistische Gleichung (Formel 4-8 aus RICKLEFS 1990, S. 315) ergibt sich durch Einsetzen von Formel 4-7 in Formel 4-6.

$$\frac{dN}{dt} = r_0 N \left(1 - \frac{N}{K}\right)$$

Formel 4-8

$\frac{dN}{dt}$...Zuwachsrate
 r_0 ...Intrinsischer Zuwachs
 N ...Populationsgröße
 K ...Tragfähigkeit der Umwelt

Die logistische Kurve ist eine nach unten geöffnete Parabel mit Nullstellen an den Punkten $N = 0$ und $N = K$, sowie einem Maximum bei $N = K/2$ (Abbildung 4-20 a). Das Integral der logistischen Kurve beschreibt das Wachstum einer Population über die Zeit (Abbildung 4-20 b). Die Wachstumskurve ist charakterisiert durch einen S-förmigen Verlauf. Während der erste Teil der Wachstumskurve durch nahezu

ungehindertes exponentielles Wachstum geprägt ist, findet im zweiten Teil der Kurve, bedingt durch die Konkurrenz um begrenzte Ressourcen, nur noch gehemmttes Wachstum statt. Schließlich wird die Tragfähigkeit der Umwelt (K) angenähert.

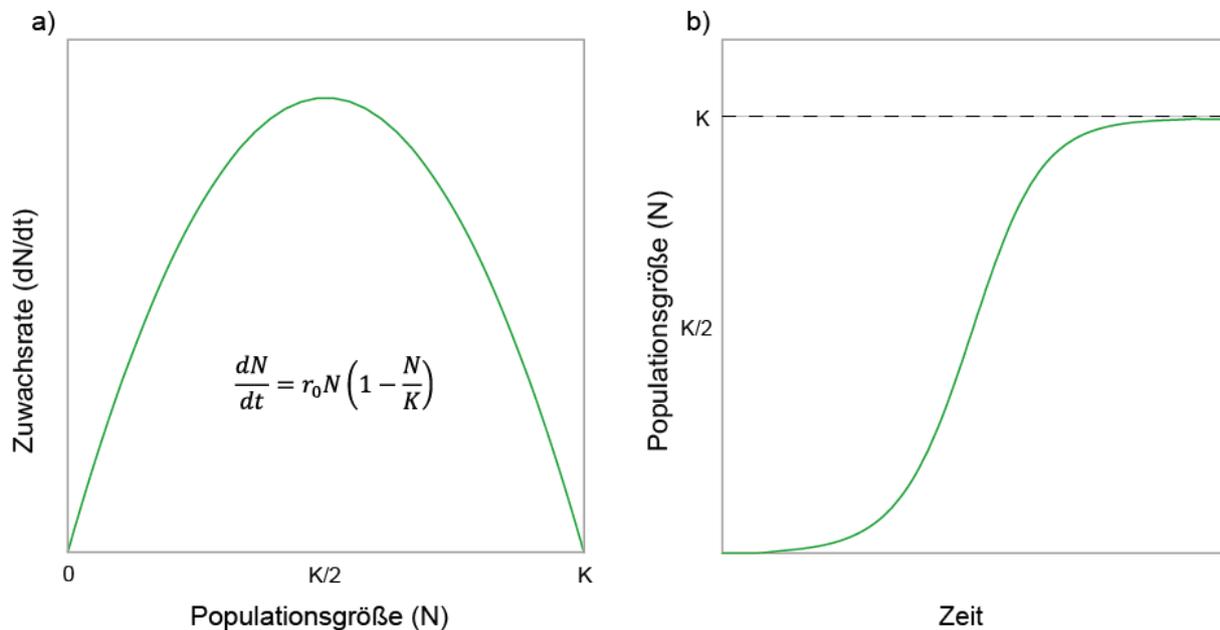


Abbildung 4-20: a) Die logistische Zuwachsfunktion mit Zuwachsraten von 0 bei den Populationsgrößen 0 und K , sowie einer maximalen Zuwachsrate bei $K/2$. b) S-förmige Zuwachskurve einer Population nach dem Modell des logistischen Zuwachses. Eigene Darstellung.

RICKLEFS' (1990) Konzept des logistischen Wachstums ist grundsätzlich für die Modellierung von natürlichem Biomassewachstum geeignet (FORD 2009, S. 80). Im Fall der Zwergstrauchbestände im *jamoat* Alichur darf davon ausgegangen werden, dass maßgeblich die intraspezifische Konkurrenz das Wachstum der Zwergsträucher begrenzt. Somit ist das Konzept des logistischen Wachstums zur Abbildung deren Wachstums tauglich. Auch wird bei den betrachteten Zwergstrauchbeständen von einem linearen Zusammenhang zwischen Biomassedichte und konkurrenzbedingter Zuwachsminderung, wie er beim Konzept des logistischen Zuwachses durch den Term $(1 - N/K)$ ausgedrückt wird, ausgegangen. Das Verhältnis der vorhandenen Zwergstrauchbiomasse (n) zur maximalen Zwergstrauchbiomasse eines Standortes (k) entspricht dem bereits diskutierten Begriff *natürlicher Bestockungsgrad*. Da der natürliche Bestockungsgrad sämtlicher simulierter Zellen bekannt ist, verbleibt mit dem intrinsischen Zuwachs (r_0) nur eine Unbekannte in der logistischen Gleichung. Der intrinsische Zuwachs ist eine pflanzenspezifische, standortunabhängige Größe. Er gilt damit in allen Teilen des Untersuchungsgebietes gleichermaßen.

Die Angaben zum Zwergstrauchzuwachs aus der Literatur sollen im Folgenden verwendet werden, um den intrinsischen Zuwachs der im Ost-Pamir vorkommenden Zwergsträucher grob abzuschätzen. Es wird angenommen, dass sich die Zuwachsraten aus AKNASAROV (2012, S. 10) und YUSUFBEKOV UND KASACH (1972, S. 7), welche relativ zu den in den anderen Quellen genannten Werten extrem hoch erscheinen, auf den jährlichen Biomasseertrag der Zwergsträucher, nicht aber auf deren Holzbiomassezuwachs beziehen. Diese Werte werden daher in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt. Die jährlichen Zuwachsangaben aus BRECKLE UND WUCHERER (2006, S. 232), CLEMENS (2001, S. 137) und WALTER UND BRECKLE (1986, S. 337) liegen im Bereich von 20 kg/ha*a bis 70 kg/ha*a. Um der verbleibenden Unsicherheit im *Energiemodell Alichur* zu genügen, werden Szenariovarianten mit drei Werten, einer hohen, einer mittleren und einer niedrigen Zuwachsrate beispielhaft betrachtet.

Wird angenommen, dass sich die jährlichen Zuwachsraten aus der Literatur auf den maximalen Nettozuwachs eines sich am Zuwachsoptimum ($n = 0,5 k$) befindenden Zwergstrauchbestand mit einem Zwergstrauchbiomassepotenzial von 5.000 kg/ha beziehen, so ergibt sich durch Umstellen der Formel 4-8 nach r_0 und Einsetzen der entsprechenden Werte der intrinsische Zuwachs. Dieser beträgt bei einem jährlichen Zuwachs von 70 kg/ha*a 5,6 % pro Jahr. Würde der maximale Nettozuwachs des gleichen Bestandes nur 45 kg/ha*a betragen, so betrüge der intrinsische Zuwachs (r_0) noch 3,6 % pro Jahr, bei 20 kg/ha*a läge der intrinsische jährliche Zuwachs des Bestandes bei 1,6 %. Abbildung 4-21 stellt die Auswirkungen der diskutierten intrinsischen Zuwächse auf die Entwicklung von Zuwachs (Abbildung 4-21 a) und Biomasse (Abbildung 4-21 b) eines Beispielbestandes über einen Zeitraum von 300 Jahren dar. Der betrachtete Beispielbestand besitzt eine Biomasse (n) von 17,6 kg/ha zu Simulationsbeginn, sowie eine maximale Zwergstrauchkapazität (k) von 5.000 kg/ha. ZANDLER (unveröffentlicht) hat im Jahr 2013 einen Murenabgang im Ost-Pamir untersucht. Auf der Mure ermittelt ZANDLER (unveröffentlicht) drei Jahre nach der vollständigen Verschüttung sämtlicher Vegetation eine Zwergstrauchbiomasse (*teresken*) von 17,6 kg/ha. Die maximalen Zuwachsraten, welche aus der Literatur entnommen wurden, würden in dem Beispielbestand nach 101 (+3) Jahren (maximaler Zuwachs = 70 kg/ha*a bei $r_0=5,6\%$), 157 (+3) Jahren (maximaler Zuwachs = 45 kg/ha*a bei $r_0=3,6\%$) und 353 (+3) Jahren (maximaler Zuwachs = 20 kg/ha*a bei $r_0 = 1,6\%$) erreicht. Mindestens 98 % der Bestandeskapazität (k) von 5.000 kg/ha erreicht der untersuchte Bestand bei einem intrinsischen Wachstum von

5,6 % innerhalb von 171 (+3) Jahren, bei einem intrinsischen Wachstum von 3,6 % innerhalb von 265 (+3) Jahren und bei einem intrinsischen Wachstum von 1,6 % erst nach 597 (+3) Jahren. WALTER UND BRECKLE (1986, S. 339) schreiben, dass die Zwergsträucher des Ost-Pamir 100 bis 300 Jahre alt, mitunter auch noch älter würden. Diese Angabe lässt vermuten, dass spätestens ab einem Alter von 200 Jahren Verfallserscheinungen an den einzelnen Pflanzen auftreten, ihr Nettozuwachs ab diesem Zeitpunkt also nicht mehr positiv ist. Sind genug Zwergstrauchindividuen vorhanden, sollte sich ein stark dezimierter Zwergstrauchbestand also innerhalb von etwa 200 Jahren ohne Störung nahezu auf sein ökologisch maximales Biomassepotenzial hin entwickeln. Diese Angabe lässt die höheren intrinsischen Zuwachsraten von 5,6 % und 3,6 % als wahrscheinlicher erscheinen als ein intrinsischer Zuwachs von 1,6 %. Der bei einem intrinsischen Zuwachs von 1,6 % pro Jahr benötigte Zeitraum von 600 Jahren, um das Standortpotenzial um 98 % auszuschöpfen wirkt selbst für eine langsam wachsende Pflanze wie die *tereske* nicht realistisch. Die Szenariovariante eines intrinsischen Zwergstrauchzuwachses von nur 1,6 % pro Jahr soll daher nicht weiter betrachtet werden.

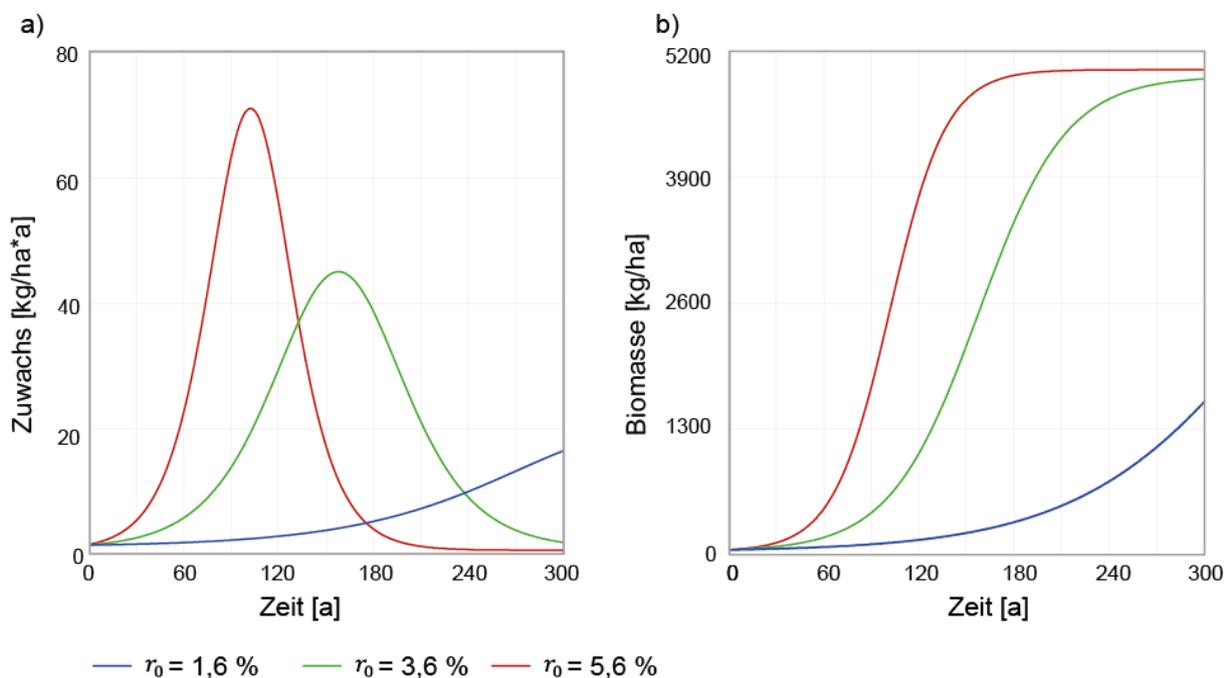


Abbildung 4-21: Auswirkungen verschiedener Zuwachsraten auf einen zum Simulationsbeginn mit 17,6 kg/ha bestehenden Zwergstrauchbestand, dessen maximale Zwergstrauchbiomasse (k) bei 5.000 kg/ha liegt. a) Entwicklung des Biomassezuwachses, b) Entwicklung der Zwergstrauchbiomasse über einen Zeitraum von 300 Jahren. Eigene Darstellung.

4.5 BEWEIDUNG

Wegen der extremen klimatischen Bedingungen sind im Ost-Pamir Regenfeldbau und Bewässerungsfeldbau unmöglich bzw. extrem eingeschränkt (KRAUDZUN (2009, S. 144)). Die Viehwirtschaft besitzt somit als exklusive agrarische Nutzungsform eine zentrale Bedeutung für die Region. Bereits vor der Eingliederung des Ost-Pamir in das Russische Kaiserreich betrieben die ethnischen Kirgisen in der Region ein auf einer nomadischen Lebensweise basierendes Weidemanagement (KREUTZMANN 2003). In einem Migrationszyklus wechselten sich Aufenthalte auf höhergelegenen Sommerweiden während der schneefreien Sommermonate mit solchen in tieferen und geschützten Lagen während der Wintermonate ab. Es existierten weder feste Sommer- noch feste Winterquartiere. Mitunter wurden mehrere 100 km zwischen den Sommer- und Wintergebieten zurückgelegt (KREUTZMANN 2003). Während der Zugehörigkeit Tadschikistans zur Sowjetunion erfolgte eine teilweise Sesshaftmachung der Viehhirten. In Dörfern wurden feste Winterquartiere eingerichtet, in denen auch während des nach wie vor stattfindenden Sommerumzugs ein Teil des Hausrates verblieb. Es bildete sich ein transhumantes Weidemanagement (vgl. SCHILLHORN 1995, S. 5–6), welches in veränderter Form auch heute noch Bestand hat. Traditionell wurden Yaks (*Bos grunniens*) und Alai-Fettschwanz-Schafe gehalten (BIMÜLLER 2009, S. 28). Heute werden neben den genannten Arten auch Hausziegen (*Capra aegagrus hircus*) und in geringerem Umfang Hausrinder (*Bos primigenius taurus*) gehalten. Für eine detaillierte Beschreibung der Viehwirtschaft im *rajon* Murghab wird auf KRAUDZUN (2012) verwiesen.

4.5.1 WEIDEKAPAZITÄT

Die Vegetation des Ost-Pamir wurde von VANSELOW (2011) eingehend untersucht. Bereits in Kapitel 3.2.3 wurde der das Untersuchungsgebiet abdeckende Teil aus VANSELOWS Vegetationskarte diskutiert. VANSELOW (2011) weist den in Abbildung 3-5 dargestellten Vegetationsklassen statistisch ermittelte Biomassedichten der Bewuchsformen *Zwergstrauch*, *Kräuter und Gräser*, sowie *Polsterpflanze* zu. Die Kombination der bewuchsformenweise ermittelten Biomassedichten mit entsprechenden Nährwertanalysen ermöglicht VANSELOW (2011) die Herleitung durchschnittlicher Nährwerte, die in sämtlichen klassifizierten Vegetationsklassen innerhalb einer Beweidungssaison verfügbar sind. Yak, Schaf und Ziege haben unterschiedliche Ansprüche an ihre Futterpflanzen. So können beispielsweise Ziegen bis zu 50 % der in Polsterpflanzen gespeicherten Proteine aufschlüsseln, während Yak und Schaf

hierzu nicht in der Lage sind. Die in VANSELOW (2011) erfolgte bewuchsformenweise Nährwertermittlung erlaubt es, für jede Tierart spezifische Weidekapazitäten zu errechnen. Zur Ermittlung der Weidekapazität in der Untersuchungsregion wurde vereinfachend eine *Einheitsherde* bestehend aus 1 Yak, 1,7 Schafen und 1,2 Ziegen angenommen, was der ermittelten Artenverteilung entspricht (Siehe Teilkapitel 4.5.2). In Tabelle 4-10 sind die verwertbaren Anteile der verschiedenen Bewuchsformen für die betrachteten Tierarten gegenübergestellt.

Tabelle 4-10: Täglicher Futterbedarf und Anteil der verwertbaren Energie nach Tierart und Bewuchsform.
Datengrundlage: VANSELOW (2011, S. 205–208).

Tierart	Yak	Schaf	Ziege	Einheitsherde
Futterbedarf	25,11 MJ/Tag	13,44 MJ/Tag	11,72 MJ/Tag	61,83 MJ/Tag
Nutzbarer Anteil Kräuter	80 %	80 %	80 %	80 %
Nutzbarer Anteil nicht verholzte ZS	70 %	70 %	70 %	70 %
Nutzbarer Anteil verholzte ZS	0 %	50 %	50 %	37 %
Nutzbarer Anteil Polster	0 %	0 %	50 %	15 %

ZS... Zwergsträucher

Limitierender Faktor für die Viehhaltung im Ost-Pamir sind die Winterweidekapazitäten (KRAUDZUN 2009, S. 144). Von besonderer Bedeutung sind hier die Quellrasen, die im Untersuchungsgebiet entlang des Flusses Alichur, insbesondere westlich der Ortschaft Alichur vorkommen. Diese sind einerseits für das Weidevieh wegen ihrer geschützten Lage am Talboden den größten Teil der Wintermonate über erreichbar. Andererseits bieten die auf den Quellrasen vorkommenden Gräser im Vergleich zu den zwergstrauchdominierten Sommerweiden ein energiereicheres, leichter verdauliches Futter. In eingeschränktem Maße ist auf den Quellrasen auch Heuernte möglich, welche für die winterliche Zufütterung von Jungtieren und Fortpflanzungsträgern benötigt wird. Neben den Quellrasen spielen die unteren Teile der an die Alichurebene angrenzenden Seitentäler eine wichtige Rolle als Winterweiden. Diese Seitentäler werden meist ganzjährig von einzelnen Familien bewirtschaftet, welche ihr Vieh in den Sommermonaten auf den oberen Talabschnitten und im Winter in den geschützteren Lagen am unteren Talende weiden (VANSELOW 2011, S. 208). Schließlich spielt auch die direkte Umgebung der Ortschaft Alichur eine wichtige Bedeutung als ganzjährliche Weide. Ein großer Teil der ansässigen

Bevölkerung verfügt über kleinere Viehbestände, welche ganzjährig in der Ortschaft gehalten und in ihrer direkten Umgebung geweidet werden. Nicht das gesamte in Teilkapitel 4.2.1 beschriebene Gebiet steht den Bewohnern Alichurs als Weidefläche zur Verfügung. Basierend auf historischen Nutzungsmustern, welche auch heute noch befolgt werden, werden in den Sommermonaten die südwestlichen Erntegebiete von Viehherden aus dem West-Pamir aufgesucht (KREUTZMANN 2008, S. 168). In diesen Gebieten befinden sich keine von der Bevölkerung Alichurs genutzten Winterweiden. Insgesamt wurden im Jahr 2009 von KRAUDZUN (unveröffentlicht) 21 Winterweidelager in der Umgebung der Ortschaft Alichur aufgesucht und beschrieben. Gegenwärtig werden von den Bewohnern Alichurs mindestens 23 Winterweiden regelmäßig angegangen. Nach VANSELOW (2011, S. 197) eignen sich im Ost-Pamir Hänge mit einer maximalen Steigung von 36° und Höhen von nicht mehr als 4.500 m zur Beweidung. Der Bewegungsradius des Weideviehs rund um die Weidelager wird von VANSELOW (2011, S. 196–197) mit 4 km im Sommer und 3,4 km im Winter für Yaks und mit 3 km im Sommer und 2,2 km im Winter für Schafe und Ziegen angegeben. Zur Ermittlung der für die Winterbeweidung verfügbaren Weidefläche wurde ein Beweidungsradius von 2,8 km, welcher dem Mittelwert der winterlichen Bewegungsradien entspricht, angenommen. Drei der Winterweidelager liegen außerhalb der von VANSELOW (2011) erstellten Vegetationskarte. Für diese Gebiete, die sich entlang des Alichurflusses im äußersten Westen der betrachteten Region befinden, wurde die durchschnittliche Vegetationsverteilung im Einzugsgebiet des nächstgelegenen und in vergleichbarer Lage situierten Winterweidelagers Oon Ak-Jar angenommen. Abbildung 4-23 und Abbildung 4-23 zeigen die Winterweidelager im Untersuchungsgebiet und die erreichbaren Winterweiden.

Insgesamt liegen 42.388 ha Winterweideide, die den Geländeanforderung von VANSELOW (2011, S. 197) genügen, in den Einzugsgebieten der Winterweidelager. 4.806 ha dieser Fläche werden nicht von VANSELOWS Karte abgedeckt. Zur Ermittlung des Winterfutterangebotes auf diesem Gebiet wurden 53 % Wüste, 2 % Zwergstrauch-Polstersteppe (Tereskentyp), 30 % Zwergstrauch-Polstersteppe (Artemisiatyp), 13 % Quellrasen und 1 % Wasser angenommen. Tabelle 4-11 stellt die von VANSELOW (2011, S. 198–203) ermittelten Futterpotenziale nach Vegetationsklassen und Bewuchsformen aufgegliedert dar. Diese ergeben sich aus den durchschnittlich in den einzelnen Vegetationsklassen vorkommenden Massen an Zwergsträuchern, Kräutern und Gräsern, sowie Polsterpflanzen multipliziert mit den

jeweiligen Energiegehalten. Weiterhin kann, wie in Tabelle 4-10 dargestellt, nicht das gesamte Futterpotenzial von den entsprechenden Tierarten aufgeschlüsselt werden. Als Produkt aus Futterpotenzial und verwertbarem Anteil ergibt sich das tierartenspezifische Weidepotenzial. Die für die angenommene Eichherde ermittelten Weidepotenziale sind aufgeschlüsselt nach Bewuchsformen in Tabelle 4-11 dargestellt. Die betrachteten Zwergstrauchbestände bestehen im Mittel zu etwa 70 % aus verholzter Biomasse. Diese kann lediglich von Schaf und Ziege zu 50 % aufgeschlossen werden (Siehe Tabelle 4-10). Daher sind die Differenzen zwischen dem enthaltenen Futterwert und der durch die Einheitsherde verwertbaren Energie hier sehr groß. Bei den Kräutern und Gräsern hingegen ist diese Differenz geringer ausgeprägt. Der Futterwert dieser Pflanzen wird von den gehaltenen Tieren zu 80 % verwertet (Siehe Tabelle 4-10). Polsterpflanzen sind nur in den beiden Zwergstrauch-Polstersteppen in relevanten Mengen vorhanden. Auch hier ergibt sich jedoch eine sehr große Differenz zwischen theoretisch verfügbarem und tatsächlich nutzbarem Futterwert. Der Futterwert dieser Pflanzen kann im Durchschnitt nur zu ca. 15 % vom Weidevieh aufgeschlüsselt werden (Siehe Tabelle 4-10).

Tabelle 4-11: Jährlich auf den Winterweiden von Alichur verfügbare Futterwerte und von einer Eichherde durchschnittlich verwertbare Energiemengen nach Vegetationsklassen. Datengrundlage: VANSELOW (2011, S. 147, 198-203).

Vegetationsklasse	Futterwert [MJ/ha*a]			Verwertbar durch EH [MJ/ha*a]			Weidekap. EH [MJ/ha*a]
	ZS	K.u.G.	Polster	ZS	K.u.G.	Polster	
Wüste	614	248	0	283	199	0	482
Zwergstrauchwüste	1.165	111	0	597	89	0	686
Zwergstrauch-Polstersteppe (Tereskentyp)	1.244	526	1.333	560	421	202	1.183
Zwergstrauch-Polstersteppe (Artemisiatyp)	1.763	429	3.312	850	343	502	1.695
Quellrasen	0	3.961	0	0	3.168	0	3.168
Alpine Matten	--	--	--	--	--	--	--
Fels- und Geröllvegetation	0	0	0	0	0	0	0

EH ...Einheitsherde
 ZS ...Zwergsträucher
 K.u.G....Kräuter und Gräser

Mit 8.145 ha Wüsten, 873 ha Zwergstrauch-Polstersteppen (Tereskentyp), 29.418 ha Zwergstrauch-Polstersteppen (Artemisiatyp), 228 ha Zwergstrauchwüsten, 2 ha Schnee und Eis, 137 ha Fels- und Geröllvegetation, 3.457 ha Quellrasen und 128 ha Wasser im Einzugsgebiet der Winterweiden ergeben sich schließlich Energiemengen von 27.932 GJ/a, die von Zwergsträuchern, 23.055 GJ/a, die von Kräutern und Gräsern und 14.939 GJ/a, die von Polsterpflanzen für die berücksichtigte Tierartenzusammensetzung in den Wintermonaten zur Verfügung stehen. In Summe sind dies 65.927 GJ/a. Der Anteil der Zwergsträucher macht mit 42 % den größten Anteil dieses Futterwertes aus. Kräuter und Gräser bestimmen 35 % des vorhandenen Winterfutters und Polsterpflanzen 23 %. VANSELOW (2011, S. 205,207-208) nimmt einen durchschnittlichen täglichen Futterbedarf von 25,11 MJ pro Yak, 13,44 MJ pro Schaf und 11,72 MJ für Ziegen an. Für eine *Einheitsherde* resultiert ein Futterbedarf von 13,2 GJ (Siehe Tabelle 4-10) bezogen auf eine siebenmonatige Wintersaison. Insgesamt können somit theoretisch 4.994 Einheitsherde-Einheiten auf dem betrachteten Gebiet eine Wintersaison von sieben Monaten geweidet werden.

Im *Energiemodell Alichur* soll die Weidekapazität der Winterweiden nicht als statisch betrachtet werden. Vielmehr steht bei der Modellierung die Veränderung der Weidekapazität als Reaktion auf die Entnahme von Zwergsträuchern zur thermischen Nutzung im Fokus. Um eine dynamische Modellierung der Weidekapazität zu ermöglichen, werden zur Berechnung der Weidekapazität lediglich die Futterwerte für die Bewuchsformen *Kräuter und Gräser*, sowie *Polster* aus VANSELOW (2011) übernommen. Der Futterwert der Bewuchsklasse *Zwergsträucher* hingegen wird aus der Zwergstrauchbiomassekarte von ZANDLER ET AL. (2015) abgeleitet. Hierzu wird die oberirdische Zwergstrauchbiomasse grob aus der von ZANDLER ET AL. (2015) gebietsweise ermittelte Zwergstrauchgesamtbiomasse berechnet. YUSUFBEKOV UND KASACH (1972, S. 67) stellen fest, dass sich zwischen 68 % und 93 % der Biomasse von *teresken* unter der Erdoberfläche befinden. Basierend auf dieser Angabe, sowie aus eigenen Erfahrungen wurde ein durchschnittlicher oberirdischer Biomasseanteil von 15 % im gesamten Untersuchungsgebiet angenommen. Die Zwergstrauchbiomassekarte von ZANDLER ET AL. (2015) verzeichnet 70.110 t Zwergstrauchbiomasse auf dem Gebiet der Winterweiden. 15 %, also 10.516 t dieser dürfen als oberirdische Biomasse angenommen werden. Im anhand des Flächenanteils sämtlicher Vegetationsformen mit Zwergstrauchanteil im Untersuchungsgebiet gewichteten Mittel sind davon 28 %, also 2.972 t, grüne und 72 %, 7.544 t, verholzte Biomasse. Ein

mittlerer Energiegehalt von 6,60 MJ/kg für grüne Biomasse und 5,59 MJ/kg für verholzte Biomasse ergibt einen Gesamtnährwert der auf dem Gebiet der Winterweiden vorhandenen Zwergstrauchvegetation von 19.615 GJ/a für grüne Biomasse und 42.158 GJ/a für verholzte Biomasse. Von diesen sind 29.380 GJ/a nach Tabelle 4-10 durch die Einheitsherde nutzbar. Dieser Wert liegt sehr nahe an den 27.932 GJ/a, welche für die Zwergstrauchfraktion mit Hilfe der vegetationklassenweisen Durchschnittswerte von VANSELOW (2011) ermittelt wurden. Die beiden verwendeten Datengrundlagen widersprechen sich in der betrachteten Region somit nicht. Werden die verwertbaren Futterwerte der Bewuchsformen *Kräuter und Gräser* und *Polsterpflanzen* zum ermittelten Futterwert der Zwergsträucher von 29.380 GJ/a hinzu addiert, ergibt sich eine Winterweidekapazität von 67.374 GJ/a (Tabelle 4-12), welche theoretisch genügt um 5.104 Einheitsherden über den Winter zu bringen.

Für die Simulation im *Energiemodell Alichur* wurde das 900 m² Raster (30 m x 30 m) auf ein 1 km² Hexagonalraster umgerechnet. Die Vegetationsklasse der Hexagonalzellen ergibt sich dabei aus dem Mehrheitswert der von diesen überdeckten Rechteckzellen. Da die Quellrasen im Untersuchungsgebiet hauptsächlich kleinräumig oder in Bändern entlang der Wasserläufe vorkommen, führt dieses Verfahren zu einer Unterrepräsentation der Quellrasen im Hexagonalraster (Siehe Abbildung 4-23). Dies wirkt sich auch auf die im *Energiemodell Alichur* abgebildete Weidekapazität aus. Der auf Grundlage des Hexagonalrasters ermittelte durch Kräuter und Polsterpflanzen bereitgestellte Futterwert ist mit 19.341 GJ/a geringer als der im Rechteckraster ermittelte Wert, welcher 23.055 GJ/a beträgt. Auf der anderen Seite ist die Vegetationsform *Wüste* im Hexagonalraster überrepräsentiert. Der mittels Hexagonalraster ermittelte Futterwert der Polsterpflanzen (15.766 GJ/a) ist größer als der entsprechende mittels Rechteckraster ermittelte Wert (14.939 GJ/a), weil in der Vegetationsklasse *Wüste* ein großer Teil der verwertbaren Futtermasse durch Polsterpflanzen bereitgestellt wird. Da für die Berechnung der Zwergstrauchmassen im Hexagonalraster der Durchschnitt und nicht der Mehrheitswert sämtlicher von einer Hexagonzelle überdeckten Rechteckzellen verwendet wurde, unterscheiden sich die auf Basis der beiden unterschiedlichen Rasterauflösungen ermittelten Zwergstrauchfutterwerte nahezu nicht. In Summe stehen im Hexagonalraster mit 64.497 GJ/a 2.877 GJ/a weniger an Weidekapazität zur Verfügung als im Rechteckraster, wo die Weidekapazität 64.487 GJ/a beträgt (Siehe Tabelle 4-12). Für die Simulation im *Energiemodell Alichur* wird die auf Grundlage des Hexagonalrasters

errechnete Weidekapazität von 64.487 GJ/a verwendet. Die durch die räumliche Verallgemeinerung entstandene Ungenauigkeit dieses Wertes wird als für die Aussagekraft des Modells vernachlässigbar interpretiert.

Tabelle 4-12: Weidekapazität der Winterweiden im *jamoat* Alichur aufgeschlüsselt nach Bewuchsformen. Datengrundlage: VANSELOW (2011) und ZANDLER ET AL. (2015).

Auflösung	Von Einheitsherde verwertbarer Futterwert			Weidekapazität Einheitsherde
	Zwergsträucher ^a	Kräuter und Gräser ^b	Polsterpflanzen ^b	
900 m ² (Rechteck)	29.380 GJ/a	23.055 GJ/a	14.939 GJ/a	67.374 GJ/a
1 km ² (Hexagon)	29.390 GJ/a	19.341 GJ/a	15.766 GJ/a	64.497 GJ/a

^a Datengrundlage: ZANDLER ET AL. (2015)

^b Datengrundlage: VANSELOW (2011)

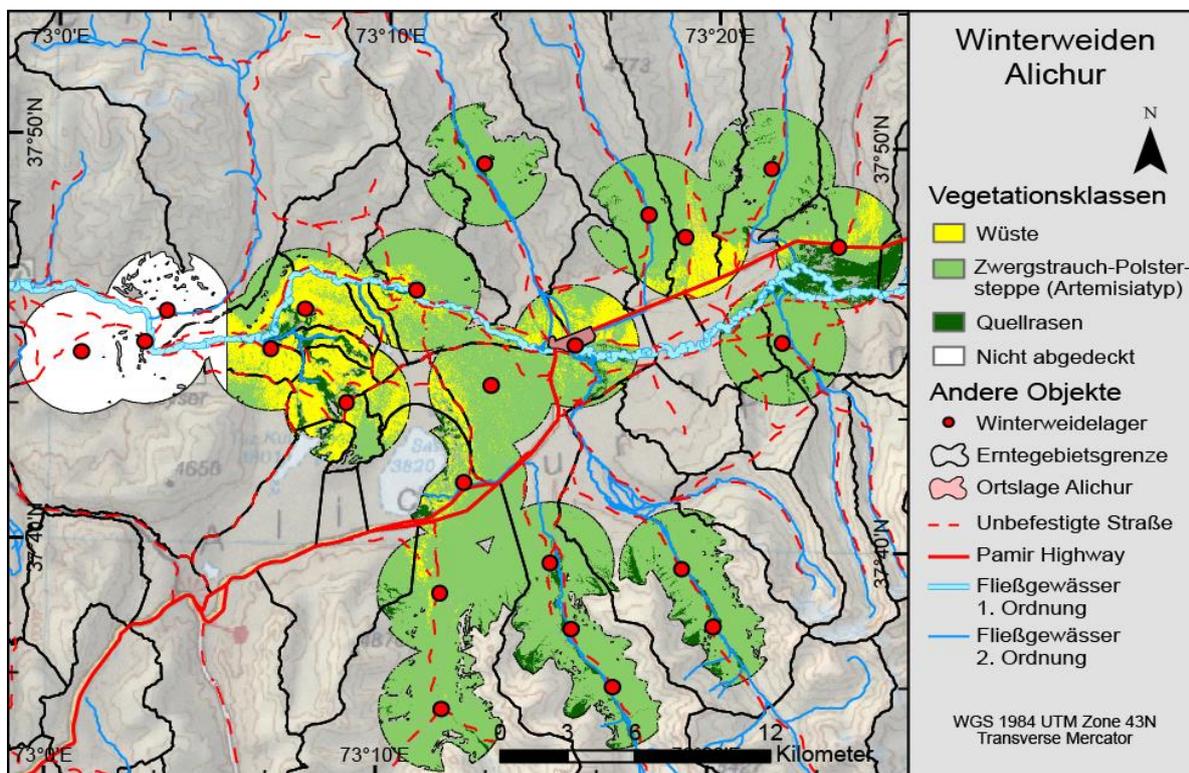


Abbildung 4-22: Winterweiden Alichur. Auflösung: 900 m² (Rechteck). Daten: KRAUDZUN (unveröffentlicht), VANSELOW (2011). Eigene Darstellung.

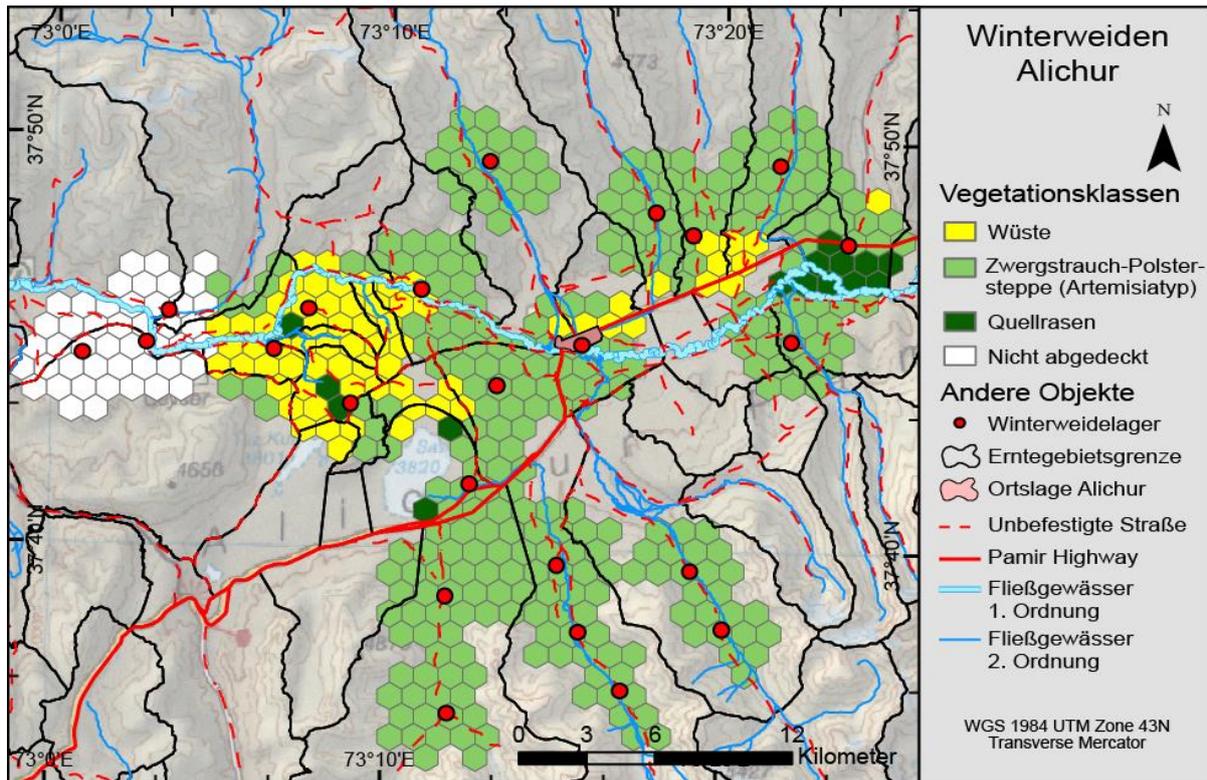


Abbildung 4-23: Winterweiden Alichur. Auflösung: 1 km² (Sechseck). Daten: KRAUDZUN (unveröffentlicht), VANSELOW (2011). Eigene Darstellung.

Die ermittelten Winterweidekapazitäten sind theoretische Größen, für die ein optimales saisonales Weidemanagement und eine während des gesamten Winters komplett zugängliche Vegetation vorausgesetzt wird. Tatsächlich sind Teile der Winterweiden phasenweise von einer Schneedecke bedeckt und für das Weidevieh unzugänglich. Auch beruhen die von VANSELOW (2011) getroffenen Annahmen zum Futterbedarf auf Durchschnittswerten, welche den tatsächlichen Bedarf eher unterschätzen. So wurde beispielsweise für die Ermittlung des Futterbedarfs von Yaks ein 145 kg schweres drei Jahre altes Tier angenommen. Milchgebende Yaks, die einen erheblichen Teil der Herde ausmachen, besitzen jedoch einen deutlich höheren Futterbedarf. Nicht berücksichtigt wurde außerdem, dass ein Teil der auf den genutzten Winterweiden verfügbaren Gräser im Sommer als Heu gewonnen wird und sich die im Winter zur Verfügung stehende Grasmenge somit verringert. Weiterhin wurden für die auf Grundlage von VANSELOW (2011) ermittelten bewuchsformenweisen Futterwerte einheitliche Vegetationsverteilungen angenommen, die in der Realität nicht anzutreffen sind. Wegen der oben genannten Faktoren wird davon ausgegangen, dass die tatsächliche Weidekapazität bei optimaler Nutzung um mindestens 25 % unter dem errechneten Wert liegt. Es verbleiben 48.737 GJ/a an Energie, die 3.664 Einheitsherden über sieben Monate ernähren können.

KRAUDZUN (2009, S. 151) weist darauf hin, dass im *jamoat* Murghab sämtliche siedlungsnahen als Winterweide geeigneten Standorte gegenwärtig ganzjährig vom Vieh der ortsansässigen Kleinstvieheigentümer aufgesucht werden. Hier wird ein Teil des Winterweidepotenzials bereits während der Sommersaison in Anspruch genommen. Eine ähnliche Situation wurde im Umkreis um die Ortschaft Alichur vorgefunden. Auch an anderen Stellen besteht gegenwärtig eine ineffiziente Nutzungsverteilung, zu deren Optimierung die mit der Landnutzungsverwaltung beauftragten Institutionen aufgrund ihrer finanziell-organisatorischen Situation momentan nicht in der Lage sind (KRAUDZUN 2009, S. 151). KRAUDZUN (2009, S. 151) berichtet von einer zunehmenden Konkurrenz um produktive Winterweiden. Dies legt den Rückschluss nahe, dass bei der gegenwärtigen Nutzungsweise das Winterweidepotenzial in der Region bereits nahezu ausgeschöpft wird.

4.5.2 GEGENWÄRTIGE BEWEIDUNGSSITUATION

Nach einem Zusammenbruch der lokalen Viehbestände im gesamten *rajon* Murghab während der 1990er und frühen 2000er Jahre haben sich diese seither wieder deutlich erholt. In erster Linie betroffen von dem Zusammenbruch während der 1990er und frühen 2000er Jahre waren die Bestände an Kleinvieh. Die Anzahl der im *rajon* Murghab gehaltenen Schafe und Ziegen verringerte sich in diesem Zeitraum von etwa 64.000 im Jahr 1991 auf weniger als 30.000 in den Jahren 2004 und 2005 (KRAUDZUN 2012, S. 94). In der zweiten Hälfte der 2000er Jahre erholte sich der Bestand auf etwa 48.000 Stück (2009) (KRAUDZUN 2012, S. 94). Der Bestand an Großvieh unterlag während des beschriebenen Zeitraums weniger starken Schwankungen und lag im Jahr 2009 mit etwas über 16.000 Stück sogar höher als jener im Jahr 1991, der mit gut 14.000 angegeben wird (KRAUDZUN 2012, S. 94). Auch wenn keine aktuellen Viehzahlen für den gesamten *jamoat* Murghab vorliegen, gibt es keinen Grund zur Annahme, dass sich der Trend der seit 2005 steigenden Viehzahlen seit dem Jahr 2009 umgekehrt hat.

Zur Abschätzung der aktuellen Viehzahlen im Untersuchungsgebiet wurde auf vier verschiedene Datenquellen zurückgegriffen. Zunächst wurden die im Frühjahr 2013 in Alichur durchgeführten Haushaltsinterviews ausgewertet. Dort wurde unter anderem der Viehbesitz der befragten Haushalte angegeben. Die in diesem Zusammenhang genannten Viehzahlen haben den Vorteil sich direkt den Bewohnern der Ortschaft Alichur zuordnen zu lassen. Nachteil dieser Datenquelle ist, dass die großen

Viehbesitzer der Region, welche sich ganzjährig auf den Weiden aufhalten, nicht erfasst wurden. Die aus den Haushaltsinterviews resultierende Viehzahl unterschätzt also die tatsächlich im Untersuchungsgebiet gehaltene Anzahl an Nutztieren. Offizielle Viehzahlen werden im *hukumat*, dem Verwaltungszentrum der Ortschaft Alichur, geführt. Hier konnten jedoch lediglich Angaben zu den im *jamoat* Alichur inklusive der Ortschaften Bash-Gombež und Bulun-Kul gehaltenen Viehzahlen gemacht werden. Auch diese Werte könnten den tatsächlichen Viehbestand unterschätzen. Die Viehhirten, welche ihre Viehzahlen selbst an die Gebietsverwaltung melden, könnten dazu geneigt sein, ihre Viehbestände zu niedrig anzugeben, weil ihre Steuerlast auf dieser Angabe beruht. Um die offiziellen Viehbestandeszahlen des *hukumats* zu überprüfen und um räumlich differenziertere Angaben zu erhalten wurde zusätzlich der in der Region tätige Veterinär aufgesucht und befragt. Obwohl zum Zeitpunkt des Interviews keine Impfpflicht für das Weidevieh existierte, gab dieser an, regelmäßig einen Großteil des Viehbestandes im *jamoat* Alichur zu besuchen. Der Veterinär konnte explizite Angaben zum der Ortschaft Alichur zurechenbaren Viehbestand machen. Im Zuge einer Untersuchung zur Viehwirtschaft des Ost-Pamir besuchte KRAUDZUN (unveröffentlicht) einen Großteil der Weidelager in der Region. Im Untersuchungsgebiet wurden in 21 von 23 identifizierten Winterweidelagern von KRAUDZUN die Viehzahlen erhoben. Die hier ermittelten Werte stellen die objektivste Datengrundlage dar. Da jedoch die Winterweiden im Einzugsgebiet der Ortschaft Alichur auch von Vieh aus den Ortschaften Bulun-Kul und Bash-Gombež besucht werden, beziehen sich die ermittelten Zahlen auf den Viehbesitz im gesamten *jamoat* Alichur. Tabelle 4-13 stellt die erhobenen Viehzahlen gegenüber.

Tabelle 4-13: Angaben zu Viehzahlen im Untersuchungsgebiet.

Datenquelle	Yaks	Kühe	Schafe	Ziegen
Haushaltsinterview 2013 ²	900	150	2.900	2.000
<i>hukumat</i> Alichur ^{a 1}		2.300		6.500
Veterinär Alichur ^{b 2}	1.500	200	3.000	1.500
Erhebung Kraudzun 2008 ^{c 1}		2.030		6.270

^a EGEMETULOV (2013), Mitarbeiter *hukumat* Alichur

^b ISMANOV (2013), staatlich bestellter Veterinär in Alichur

^c KRAUDZUN (unveröffentlicht)

¹ Ganzes *jamoat* Alichur

² *jamoat* Alichur ohne Bulun-Kul und Bash-Gombež

Sowohl die Angaben aus den Haushaltsbefragungen, als auch die des lokalen Veterinärs beziehen sich ausschließlich auf die Ortschaft Alichur. Für das Großvieh Yak und Kuh, wurden die Angaben des Veterinärs als aussagekräftiger eingeschätzt. Ein großer Teil der Yaks wird ganzjährig außerhalb der Ortschaft Alichur von Viehhirten gehalten, welche in den Haushaltsbefragungen nicht berücksichtigt wurden. Demgegenüber ist der Kleinviehbesitz nicht auf einzelne Viehbesitzer konzentriert. Hier liefern die Ergebnisse der Haushaltsbefragungen realistische Resultate. Da diese teilweise sogar höher liegen als die Angaben des Veterinärs wird den Ergebnissen der Haushaltsbefragungen an dieser Stelle mehr Glauben geschenkt als der Abschätzung des Veterinärs. Für die Abschätzung der gegenwärtigen Weideintensität wird abschließend ein Viehbesatz von 1.500 Yaks, 200 Kühen, 2.900 Schafen und 2.000 Ziegen angenommen. Dieses Verhältnis ist Berechnungsgrundlage für die Artenzusammensetzung der in Teilkapitel 4.5.1 beschriebenen Einheitsherde. Die Werte von KRAUDZUN (unveröffentlicht) und der lokalen Verwaltung geben wichtige Hinweise darauf, welcher Anteil der im vorherigen Kapitel errechneten Winterweidekapazität tatsächlich dem Viehbestand der Ortschaft Alichur zur Verfügung steht. Da sich die Viehzahlen von KRAUDZUN (unveröffentlicht) und der Gebietsverwaltung als nahezu deckungsgleich herausgestellt haben, kann angenommen werden, dass sich etwa 2.300 Stück Großvieh und 6.500 Stück Kleinvieh auf den betrachteten Winterweiden befinden.

Abzüglich des der Ortschaft Alichur zurechenbaren Viehbestandes weiden 600 Stück Großvieh und 1.600 Stück Kleinvieh aus Bulun-Kul und Bash-Gombez in den betrachteten Gebieten. Dies entspricht einem Anteil von 35 % des Großviehs und 33 % des Kleinviehs. Die Winterweidekapazität, die allein für den Viehbesatz Alichurs verfügbar ist, verringert sich folglich um etwa 35 %. Es verbleiben 31.443 GJ/a an Weidepotenzial, welche theoretisch 2.322 Einheitsherden ernähren könnten. Mit den 1.700 Einheitsherden, die gegenwärtig der Ortschaft Alichur zugerechnet werden können, werden aktuell somit 71 % der bei optimaler Bewirtschaftungsweise verfügbaren Weidekapazität in Anspruch genommen. Der gegenwärtige Viehbesatz von 1.700 Einheitsherden kann auf den Winterweiden durchschnittlich 9,8 Monate ernährt werden. Die Differenz zwischen diesem Wert und der für die Berechnung des optimalen Nutzungswertes zugrunde gelegten Nutzungsdauer von sieben Monaten bildet das Potenzial für Effizienzsteigerungen durch verbessertes Weidemanagement. Mit der gegenwärtigen durchschnittlichen Nutzungsdauer sämtlicher Winterweiden im

Einzugsgebiet Alichurs von 9,8 Monaten beträgt der saisonale Futterbedarf einer Einheitsherde auf den Winterweiden 18,5 GJ. Dieser Wert soll für die Modellierung der Weidekapazität im *Energiemodell Alichur* angenommen werden. Da davon ausgegangen wird, dass der gegenwärtige Viehbesatz dem momentan real verfügbaren Weidepotenzial entspricht kann eine Erhöhung des Besatzes lediglich durch eine effizientere Weidenutzung oder eine Verbesserung der Weidequalität, beispielsweise durch Zuwachs von Zwergsträuchern, erreicht werden. Umgekehrt wirkt sich eine Verschlechterung der Weidequalität, etwa durch die Entnahme von Zwergsträuchern, ohne ein verbessertes Weidemanagement direkt negativ auf die Besatzzahl aus.

4.5.3 DUNGPRODUKTION

Wie in Teilkapitel 3.3.2 dargestellt werden im Untersuchungsgebiet die zwei auf Dung basierenden Energieträger *kuik* und *tezek* verwendet. Die Verfügbarkeit dieser Energieträger wird von der Viehzahl und der Dungproduktionsrate pro Stück Vieh bestimmt. Zur Produktion des Stalldungs *kuik* steht der im Einstand produzierte Viehmist zur Verfügung. Verwendet wird der Mist aller in dieser Arbeit besprochenen Tierarten. Milchyaks, Jungtiere und einige Bullen verbringen die Nächte ganzjährig in einer Einpferchung, die zur *kuik*-Gewinnung geeignet ist. Ältere widerstandsfähige männliche Yaks, die etwa 50 % des Yakbestandes ausmachen, werden im Sommer über Nacht auf den Weiden belassen. In Summe fällt so etwa 25 % des Yaddungs im Einstand an und kann später als *kuik* gewonnen werden. Kühe werden in Alichur nur in direkter Nähe zur Ortschaft gehalten. Sie verbringen die Nächte immer im Stall und werden auch im Winter tagsüber nur bei geeignetem Wetter im Freien gehalten. Etwa zwei Drittel, also 67 % des Kuhdungs, werden zu *kuik* verarbeitet. Ziegen und Schafe werden nachts ständig in Stallungen gehalten und nur tagsüber auf die Weiden getrieben. An Tagen mit extremer Wetterlage werden sie im Winter auch tagsüber in den Stallungen belassen. Absolut sind etwa 50 % des Ziegen- und Schafdungs als *kuik* verfügbar. Die auf den Weiden produzierten Exkremente von Yak und Kuh werden in getrockneter Form als *tezek* bezeichnet. Diese machen den nicht für *kuik* verwendeten Anteil der Dungproduktion dieser Tierarten, also 75 % des Yaddungs und 33 % des Kuhdungs, aus. Der außerhalb der Stallungen produzierte Schaf- und Ziegendung eignet sich aufgrund seiner Konsistenz nicht als *tezek*.

Es wurde versucht, die Dungproduktionsrate anhand von Experteninterviews im Projektgebiet abzuschätzen. Zu diesem Zwecke wurden der staatlich bestellte Veterinär

Alichurs ISMANOV (2013) und der größte Viehbesitzer Alichurs BAIPOLOT (2013) zur Dungproduktionsrate der einzelnen Vieharten befragt. Die Leitfrage der Experteninterviews war: „Wieviel Vieh betreuen Sie und welche Menge *kuik*, gemessen in LKW Gaz-66, wird bei ihnen jährlich produziert?“. Auf Grundlage der gemachten Angaben und einer angenommenen Lademasse von 1.940 kg *kuik* pro Gaz-66 (Siehe Tabelle 4-3 d) wurden die jährlichen *kuik*-Produktionsraten der besprochenen Tierarten hergeleitet. Mit Hilfe der eingangs beschriebenen Angaben zu den *kuik*-Anteilen an der Gesamtdungproduktion lässt sich auch die Dungproduktion basierend auf den Experteninterviews rechnerisch ermitteln. In Tabelle 4-14 sind die aus den Angaben von ISMANOV (2013) und BAIPOLOT (2013) errechneten jährlichen *kuik*- und Dungproduktionsraten gegenübergestellt.

Tabelle 4-14: Ergebnisse der Experteninterviews zu *kuik*- und Dungproduktionsrate.

	Kuh		Yak		Schaf		Ziege	
	A	B	A	B	A	B	A	B
ISMANOV (2013)	--	--	194 kg	776 kg	39 kg	78 kg	39 kg	78 kg
BAIPOLOT (2013)	970 kg	1.448 kg	303 kg	1.213 kg	49 kg	97 kg	49 kg	97 kg

A... Jährliche *kuik*-Produktion eines Tieres errechnet auf Grundlage der Experteninterviews und einer Lademenge von 1.940 kg *kuik* pro Gaz-66 (Siehe Tabelle 4-3 d).

B... Jährliche Dungproduktion eines Tieres, errechnet aus Spalte A und dem *kuik*-Anteil an der Gesamtdungproduktion.

Der bei der Heizwertanalyse festgestellte Feuchtegehalt der untersuchten *kuik*-Probe liegt bei rund 7 % (IFK 2013) (Siehe 4.1.5). Es wird angenommen, dass sich auch die Angaben aus den Experteninterviews auf diesen Feuchtegehalt beziehen. Im Sommer 2012 wurde nahe der im kirgisischen Alai gelegenen Ortschaft Sary Mogol der Vorgang des *kuik*-Stechens in einem etwa 300 Schafe fassenden Stall detailliert untersucht. Hier wurde eine *kuik*-Produktionsrate von 172 kg pro Jahr und Tier festgestellt. Obwohl die Viehhaltung in Sary Mogol durch Verwandte der kirgisischen Bewohner des Ost-Pamir auf eine ähnliche Weise wie im Ost-Pamir erfolgt, unterscheiden sich die dortigen Umweltbedingungen deutlich von denen des Ost-Pamir. Das mildere Klima bedingt im Alai ein sehr viel größeres Angebot an Kräutern und Gräsern, was zu einem höheren Nährstoffumsatz beim Weidevieh im Vergleich zum Ost-Pamir führt. Weiterhin sind die Winter in der Region sehr schneereich, so dass die Tiere einen Großteil des Winters in den Stallungen verbringen. Eine *kuik*-Produktionsrate für Schafe und Ziegen von 172 kg pro Jahr ist daher im Ost-Pamir

mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht zu erreichen. Dennoch zeigt der Wert, dass beide Angaben aus den Experteninterviews zur *kuik*- und Gesamtdungproduktion des Kleinviehs eher niedrig, aber in der Größenordnung nicht unrealistisch angesetzt sind. BREU (2006, S. 148) und KADIAN UND KAUSHIK (2003, S. 64) geben die Produktion von feuchtem Dung bei Kühen im Pamir (BREU) und in Indien (KADIAN) mit 10 kg Dung pro Tag, bzw. 3.650 kg pro Jahr an. Bezogen auf eine Feuchte von 7 % und einem Trockenmasseanteil von 20 % ergibt sich ein Wert von 985,5 kg pro Jahr und Tier. Dieser liegt etwas unter den Werten aus den Experteninterviews, bestätigt diese jedoch ebenfalls in der Größenordnung.

Aus den Angaben zu den jährlichen Dung und *kuik*-Produktionsraten von BAIPOLOT (2013), welche als realistischer als jene von ISMANOV (2013) eingeschätzt werden, ergeben sich eine jährliche *kuik*-Produktion von 522 kg pro Einheitsherde und Jahr, sowie eine *tezek*-Produktion von 859 kg pro Einheitsherde und Jahr. Multipliziert mit den in Teilkapitel 4.5.2 hergeleiteten 1.700 Einheitsherden im Untersuchungsgebiet betragen die jährliche *kuik*-Produktion in Alichur etwa 888 t und die *tezek*-Produktion 1.460 t pro Jahr. Der für die *kuik*-Produktion hergeleitete Wert liegt unter dem in Teilkapitel 4.1.4 aus den Haushaltsbefragungen errechneten jährlichen *kuik*-Verbrauch der Ortschaft Alichur, welcher 1.270 t beträgt. Dies lässt vermuten, dass sämtlicher im Untersuchungsgebiet produzierter Stalldung gegenwärtig thermisch in Form von *kuik* verwertet wird. Gleichfalls erscheint es nicht plausibel, dass jährlich fast 400 t *kuik* nach Alichur importiert werden. In der Umgebung Alichurs sind diesbezüglich keine freien Kapazitäten vorhanden, aus denen der Brennstoff zu wirtschaftlichen Preisen bezogen werden könnte. Vielmehr scheinen BAIPOLOT (2013) und ISMANOV (2013) bei ihren Angaben die tatsächlichen *kuik*-Produktionsraten unterschätzt zu haben. Der Rohstoff *kuik* wird von den großen Viehbesitzern verkauft, eingetauscht, an Verwandte verschenkt und selbst verbraucht. Es ist denkbar, dass sich die Angaben von BAIPOLOT (2013) und ISMANOV (2013) lediglich auf die wirtschaftlich abgesetzten Teile der *kuik*-Produktion beziehen und den Eigenverbrauch bzw. die Hilfe für Verwandte, welche oft schwer quantifizierbar sind, unterschlagen. Im *Energiemodell Alichur* soll angenommen werden, dass der gegenwärtige *kuik*-Verbrauch von 1.270 t der jährlichen *kuik*-Produktion des gegenwärtigen Viehbestandes im Untersuchungsgebiet entspricht. Dies bedingt eine *kuik*-Produktionsrate von 747 kg pro Jahr und Einheitsherde. Wird die aus den Angaben von BAIPOLOT (2013) ermittelte Verteilung der Dungfraktionen zugrunde gelegt, ergibt sich entsprechend eine Gesamtdung-

produktion von 2.167 kg pro Einheitsherde und Jahr, eine *tezek*-Produktion von 1.228 kg pro Einheitsherde und Jahr, sowie eine nicht energetisch nutzbare Menge von 201 kg Dung pro Jahr und Einheitsherde (Tabelle 4-15). Anders als der Energieträger *kuik* wird das gegenwärtige energetische Potenzial an *tezek* von den Bewohnern Alichurs nur zu einem verschwindend geringen Anteil abgeschöpft. Während in Teilkapitel 4.1.4 ein jährlicher *tezek*-Verbrauch von 83 t angegeben wurde, beträgt das jährliche Potenzial dieses Energieträgers mit 2.088 t ein Vielfaches dieses Wertes. Gegenwärtig verbleiben etwa 2.347 t, 63 % der jährlichen Dungproduktion, auf den Weiden. 2.005 t von diesen wären theoretisch zusätzlich als *tezek* nutzbar.

Tabelle 4-15: Jährliche Dungproduktion in Alichur pro Einheitsherde (EH). Eigene Daten.

Dungproduktion gesamt	<i>kuik</i> -Produktion	<i>tezek</i> -Produktion	Nicht energetisch nutzbarer Dung
2.167 kg/ EH	747 kg/ EH	1.228 kg/ EH	201 kg/ EH
100 %	34 %	57 %	9 %

EH ...Einheitsherde

4.6 FUNKTIONALE VERKNÜPFUNGEN IM *ENERGIEMODELL ALICHUR*

Im *Energiemodell Alichur* wird die Befriedigung des in Teilkapitel 4.1.6 beschriebenen jährlichen Energiebedarfs von Alichur durch die Energieträger *Kohle*, *Zwergsträucher* und *Dung* simuliert. Die Verfügbarkeit des Energieträgers *Kohle* wird als externer Parameter behandelt. Sie wird nicht durch andere Modellvariablen beeinflusst. Die Nutzung und Verfügbarkeit der Zwergsträucher wird im *Energiemodell Alichur* räumlich aufgelöst betrachtet. Grundlage der räumlichen Simulation ist das Sechseckraster mit einer Auflösung von 1 km², für welches in Teilkapitel 4.4 Bestandes-, Potenzial- und Zuwachsparmeter der Zwergstrauchvegetation hergeleitet wurden. Um das Modell übersichtlich zu halten, werden nur die zwei Zwergstrauchernteformen *Gruppenernte* und *individuelle Ernte* abgebildet. Diese Ernteformen unterscheiden sich grundlegend in den für die räumliche Simulation der Zwergstrauchernte wichtigen Aspekten *Lage der Erntegebiete* und *Ernteintensität*, welche in den vorangegangenen Teilkapiteln beschrieben wurden. Die jährlich mittels *Motorradernte* geernteten Zwergstrauchmengen sollen für die Simulation jeweils zur Hälfte den Erntemethoden der Gruppenernte und individuellen Ernte zugeschlagen werden. Dies ist sinnvoll, weil sich einerseits das bei der Motorradernte angefahrte Territorium etwa zur Hälfte mit dem der Gruppenernte und dem der individuellen

Ernte deckt. Andererseits wird angenommen, dass sich auch die Ernteintensität dieser Ernteform zwischen den Intensitäten der individuellen Ernte und der Gruppenernte bewegt. Die mittels kombinierter Ernte geernteten Zwergstrauchmassen werden im *Energiemodell Alichur* komplett der Ernteart Gruppenernte zugeschlagen. Bei beiden Ernteformen wird wenig intensiv in entlegenen Gegenden des *jamoat* Alichur geerntet. In Teilkapitel 4.1.4 wurde ein Zwergstrauchverbrauch von 707 t durch die Bewohner der Ortschaft Alichur im Jahr 2012 beschrieben. Diese Zwergstrauchmenge wurde im Jahr 2012 zu 18 % durch individuelle Ernte, zu 44 % durch Gruppenernte, zu 22 % durch Motorradernernte und zu 16 % durch kombinierte Ernte bereitgestellt. Im *Energiemodell Alichur* werden vereinfachend Anteile von 29 % (203 t) individuelle Ernte und 71 % (504 t) Gruppenernte angenommen. Kriterium für die Beerntbarkeit einer Modellzelle ist die dort vorhandene Zwergstrauchbiomasse. Ist die Zwergstrauchbiomasse einer Modellzelle gleich oder höher als der Parameter *Erntegrenze*, so kann diese Zelle durch die Bewohner Alichurs beerntet werden. Wurde in einer Rasterzelle mit der Zwergstrauchernte begonnen, so wird diese bis zum Erreichen des Grenzwertes *Minimum verbleibend*, welcher niedriger als der Parameter *Erntegrenze* ist, fortgeführt. Wird durch die Zwergstrauchernte in einer Zelle eine Biomassedichte gleich dem Grenzwert *Minimum verbleibend* erreicht, so wird die Ernte in dieser Zelle so lange ausgesetzt, bis sich die Biomassedichte der Zelle durch Zuwachsen auf einen Wert gleich oder höher dem Parameter *Erntegrenze* erholt hat. Für die individuelle Zwergstrauchernte sind sämtliche in Abbildung 4-10 dargestellten Zellen erreichbar, sofern ihre Kostenentfernung von Alichur aus nicht mehr als 90 Minuten beträgt. Für die Gruppenernte stehen alle in Abbildung 4-16 dargestellten Modellzellen zur Verfügung. Rasterzellen werden in der Reihenfolge ihres Raumwiderstandes beerntet. Schnell erreichbare Modellzellen werden vor schlechter erreichbaren Zellen aufgesucht. Für die Ernteformen individuelle Ernte und Gruppenernte gelten unterschiedliche Ernteparameter (Tabelle 4-16) und Raumwiderstände (Teilkapitel 4.3.1 und 4.3.2). Sind zu einem Zeitpunkt nicht ausreichend mittels Gruppenernte beerntbare Zwergstrauchbestände im Untersuchungsgebiet vorhanden, so erhöht sich der Anteil der individuellen Ernte entsprechend, falls hier noch genügend Zwergstrauchbiomassepotenzial verbleibt. Gehen jedoch die mittels individueller Ernte beerntbaren Bestände im Umkreis von Alichur zur Neige, so kann die fehlende Zwergstrauchbiomasse nicht durch die Gruppenernte kompensiert

werden. In diesem Fall stoppt die Simulation, es kommt zu einem Systemzusammenbruch.

Tabelle 4-16: Zur Modellierung der Zwergstrauchernte im Gebiet Alichur verwendete Parameter.

Ernteart	Anteil an ZS Ernte	Erntegrenze	Minimum verbleibend
Individuelle Ernte	29 %	1.000 kg/ha	500 kg/ha
Gruppenernte	71 %	2.500 kg/ha	1.850 kg/ha

ZS...Zwergstrauch

Der Energieträger *Dung* wird in den Formen *tezek* und *kuik* im Modell abgebildet. Die Verfügbarkeit des Energieträgers *kuik* wird durch die zum aktuellen Zeitpunkt vorhandene Anzahl an Einheitsherden bestimmt. In Teilkapitel 4.5.2 wurde dargelegt, dass die gegenwärtige Viehzahl im Untersuchungsgebiet die mit dem gegenwärtigen Weidemanagement verfügbare Winterweidekapazität des Gebietes vollständig ausschöpft. Eine durch die Zwergstrauchernte hervorgerufene Verringerung der Winterweidekapazität führt im *Energiemodell Alichur* zwangsläufig zu einem Rückgang des verfügbaren *kuik*. Da gegenwärtig sämtlicher verfügbarer *kuik* von den Einwohnern Alichurs thermisch genutzt wird, muss in diesem Fall ein Teil des gegenwärtigen *kuik*-Konsums durch eine erhöhte Zwergstrauchernte kompensiert werden. Anhang VII a bildet das in der Software Simile erstellte System Dynamics Modell *Energiemodell Alichur* in der Parametrisierung des Szenarios BAU ab. In Anhang VII b sind sämtliche dem Modell zugrunde liegende Gleichungen aufgelistet.

5 TECHNISCHE UMSETZUNG, MODELLANALYSE UND MODELLANWENDUNG

Dieses Kapitel widmet sich der Anwendung des *Energiemodell Alichur* und mit der Modellanwendung verbundenen Aspekten. Im ersten Teil des Kapitels (Teilkapitel 5.1) wird kurz die technische Umsetzung des Modellierungsansatzes beschrieben. Die im zweiten Teilkapitel (Teilkapitel 5.2) behandelte Modellanalyse führt zu einer Beurteilung der Güte des *Energiemodell Alichur* für den Zweck dieser Arbeit. Schließlich folgt im Teilkapitel 5.3 die Modellanwendung.

5.1 TECHNISCHE UMSETZUNG

In Teilkapitel 2.4 wurde die Software Simile (MUETZELFELDT UND MASSHEDER 2003) als für den Modellierungszweck des *Energiemodell Alichur* geeignet identifiziert. Simile erlaubt neben der Abbildung zeitlicher Dynamik auch die Simulation räumlicher Dynamik. Räumliche Simulation erfolgt in Simile mittels: a) Diskretisierung des Raumes in Rasterzellen, b) Replikation von System Dynamics Modellen als Modellinstanzen und c) Zuordnung der Modellinstanzen zu Rasterzellen. In einem räumlich expliziten System Dynamics Modell enthält jede Rasterzelle eine Replikation des ursprünglichen System Dynamics Modells (Siehe Abbildung 5-1). Räumliche Simulation findet folglich mittels Disaggregation eines nicht räumlich aufgelösten Modells statt. In räumlich expliziten Simile Modellen können Zellnachbarschaften definiert und Nachbarschaftseffekte simuliert werden. Für die Übertragung von Raumdaten zwischen GIS und Simile werden Referenztabellen verwendet. In diesen Referenztabellen repräsentieren die Tabellenzeilen die Modellinstanzen des Simile Modells bzw. die Zellen des Rasters. Die Tabellenspalten enthalten neben einer Identifikationsnummer, die eine zweifelsfreie Zuordnung der Rasterzellen zu den Modellinstanzen zulässt, Informationen zu den aktuellen Zellzuständen (z.B. Zwergstrauchbiomasse, Weidekapazität) und unveränderlichen Zelleigenschaften (z.B. Kostenentfernung, Biomassepotential, Vegetationsgesellschaft). Nach der Simulation in Simile können die Modellvariablen sämtlicher Modellinstanzen aus Simile exportiert und im GIS im ursprünglich verwendeten Raster visualisiert werden. Abbildung 5-2 zeigt das Vorgehen bei der Koppelung von System Dynamics Modellen mit GIS.

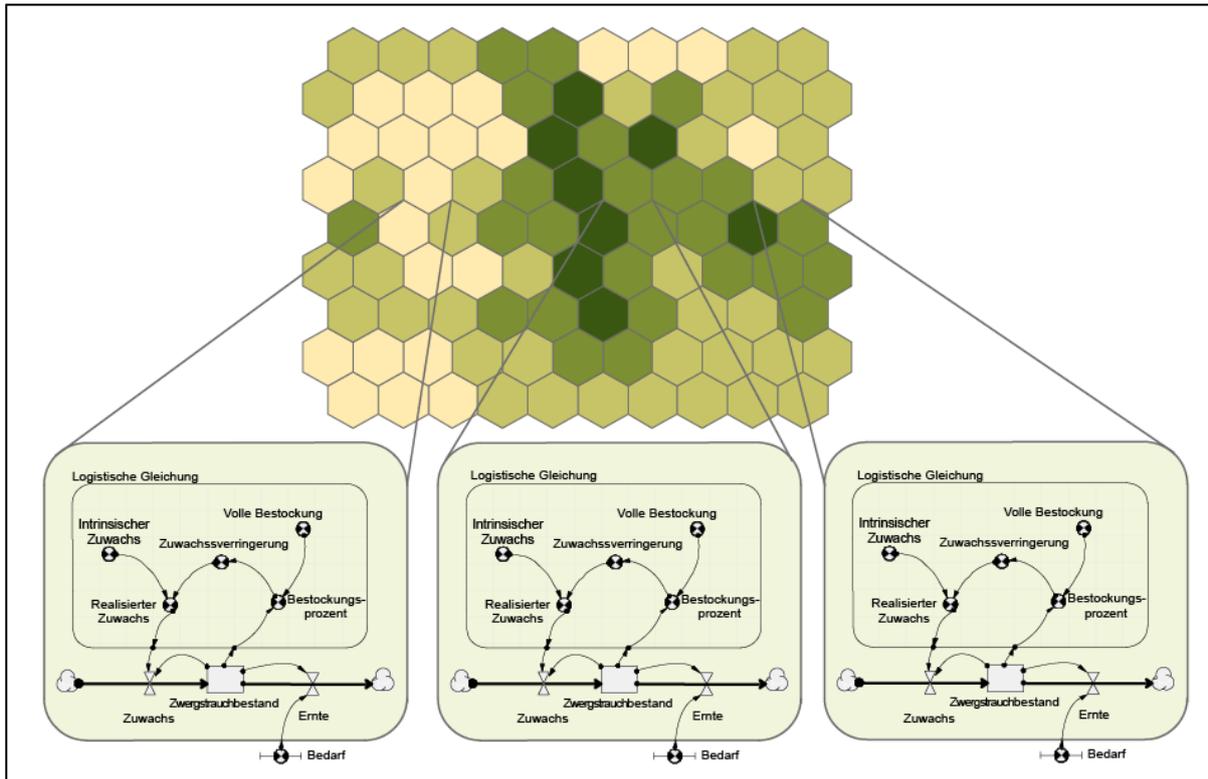


Abbildung 5-1: Konzept der räumlichen Simulation in Simile: System Dynamics Modelle erhalten ihren Raumbezug durch Disaggregation und Zuordnung von Modellinstanzen. Eigene Darstellung.

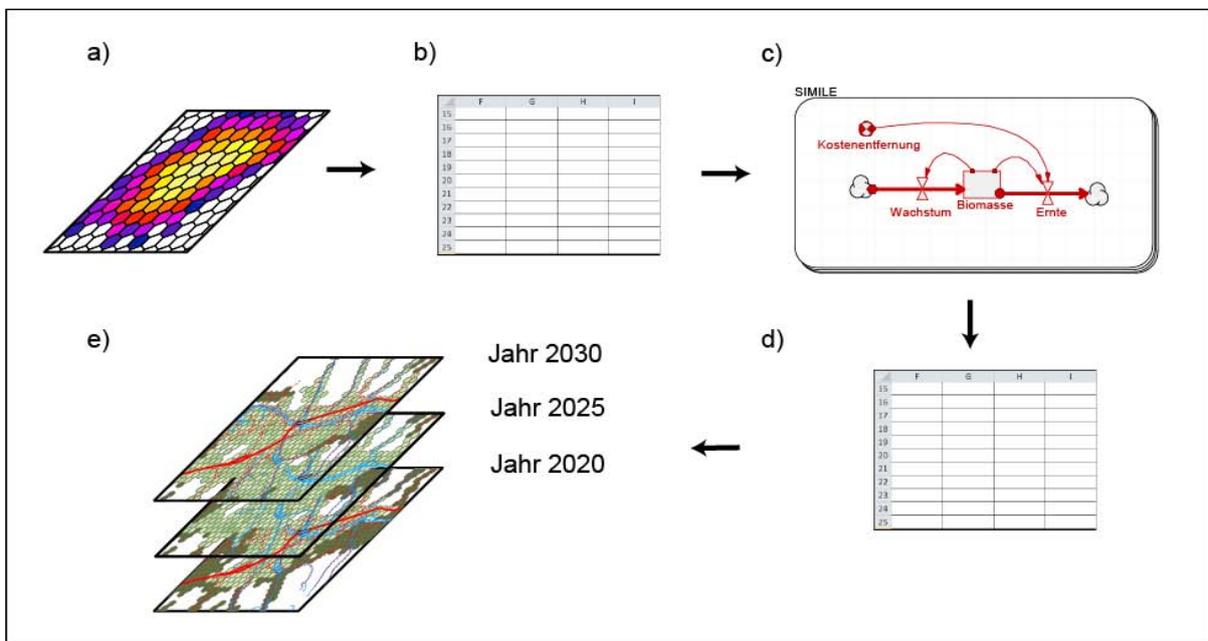


Abbildung 5-2: Vorgehen bei der Koppelung von System Dynamics und GIS : a) Im GIS aufbereitete Rasterdaten, b) Import der Rasterdaten in Simile mittels Referenztable, c) Simulation sämtlicher Rasterzellen als Modellinstanzen in Simile, d) Übertragung der Simulationsergebnisse von Simile ins GIS mittels Referenztable, e) Visualisierung der Simulationsergebnisse im ursprünglich verwendeten Raster. Eigene Darstellung.

5.2 MODELLANALYSE

Modelle, welche nicht rein auf physikalischen Gesetzen beruhen, bilden Systeme nach ihrer Parametrisierung nicht automatisch in geeigneter Weise ab. Dies gilt insbesondere dann, wenn Modellzusammenhänge nicht zwingend und Eingangsparameter mit hohen Unsicherheiten behaftet sind. Dies ist bei sozialen und ökologischen Modellen häufig der Fall. Nach GRIMM UND RAILSBACK (2005, S. 27) folgt auf den Schritt der Modellimplementierung die Modellanalyse (Siehe Abbildung 2-1). VOINOV (2008, S. 111) schreibt, es gäbe viele Möglichkeiten, Modelle zu analysieren und zu testen, jedoch stellen die Sensitivitätsanalyse und die Modellkalibrierung Standardanalysemethoden dar. In den folgenden Teilkapiteln werden die Sensitivitätsanalyse (5.2.1) und die Kalibrierung (5.2.2) des *Energiemodell Alichur* behandelt. In Teilkapitel 5.2.3 erfolgen schließlich allgemeine Betrachtungen zur Modellgüte.

5.2.1 SENSITIVITÄTSANALYSE

VOINOV (2008, S. 112) definiert die Methode der Sensitivitätsanalyse als „*Analyse des Modellverhaltens unter verschiedenen Eingangsbedingungen*“. Der Begriff *Modellverhalten* in VOINOVs Definition beschreibt die Entwicklung einer oder mehrerer Zielvariablen über die Zeit. Für die Klärung der in der Zielstellung dieser Arbeit dargelegten Arbeitshypothesen bietet sich eine quantitative Größe, welche die Nachhaltigkeit des betrachteten Energiesystems beschreibt, an. Eine solche Größe eignet sich gleichermaßen auch als Zielgröße für die Sensitivitätsanalyse. Nachhaltigkeit wird im Kontext *des Energiemodell Alichur* vereinfachend in ihrem ursprünglichen forstwirtschaftlichen Sinn verstanden. Nach CARLOWITZ (1732, S. 105-106) ist Kriterium für eine nachhaltige Ressourcennutzung, dass in einem betrachteten Zeitraum nicht mehr Biomasse genutzt wird, als nachwächst. Im *Energiemodell Alichur* wird zur Betrachtung des Nachhaltigkeitsgrades die Variable *N-Wert* verwendet. Der *N-Wert* ist als Quotient aus Biomassezuwachsrate und Biomasseernterate definiert (Siehe Formel 5-1).

$$N - Wert = \frac{\frac{dN}{dt}}{\frac{dE}{dt}} \quad \text{Formel 5-1}$$

$\frac{dN}{dt}$...Zuwachsrate

$\frac{dE}{dt}$...Ernterate

Ist der N-Wert gleich oder größer 1, so sind Zuwachs und Ernte ausgeglichen, bzw. der Zuwachs übersteigt die Ernte und die Zwergstrauchernte erfolgt nachhaltig. Bei einem N-Wert weniger als 1, findet zum betrachteten Zeitpunkt im System weniger Zwergstrauchzuwachs statt als Biomasse genutzt wird. Da im *Energiemodell Alichur* nur beerntete Bestände netto zuwachsen, ist zu erwarten, dass der N-Wert mit zunehmender Simulationsdauer steigt. Um zu beurteilen, ob die Zwergstrauchernte im Energiesystem von Alichur nachhaltig erfolgt, soll bei der Sensitivitätsanalyse eine Zeitspanne von 50 Jahren betrachtet werden. Tritt vor Ablauf dieser Simulationszeit ein Energiedefizit bei der Bevölkerung von Alichur auf, wird die weitere Ausführung des Modells gestoppt.

FORD (2009, S. 342) schreibt, dass eine umfassende Analyse sämtlicher Modellparameter auf Sensitivität bei komplexeren Modellen nicht möglich ist. Er schlägt daher vor, bereits während der Modellimplementierung ein Bedienfeld im Modell zu erstellen, welches zum Experimentieren mit dem Modell dient. Simile bietet die Möglichkeit, ein solches Bedienfeld zu erzeugen. Auf diesem Bedienfeld können Systemparameter während der Simulation dynamisch in einem vorher festgelegten Intervall verändert werden. Die Auswirkungen der Parameterveränderungen auf das Systemverhalten können schließlich direkt abgeschätzt werden. Abbildung 5-3 zeigt ein im *Energiemodell Alichur* erzeugtes Bedienfeld. Das Experimentieren mit einem Bedienfeld hilft dabei, schon früh im Modellierungsprozess Fehler in einem Modell zu finden und eine Vorauswahl besonders sensibler Parameter zu identifizieren. Es ersetzt jedoch nicht eine systematische Sensitivitätsanalyse.

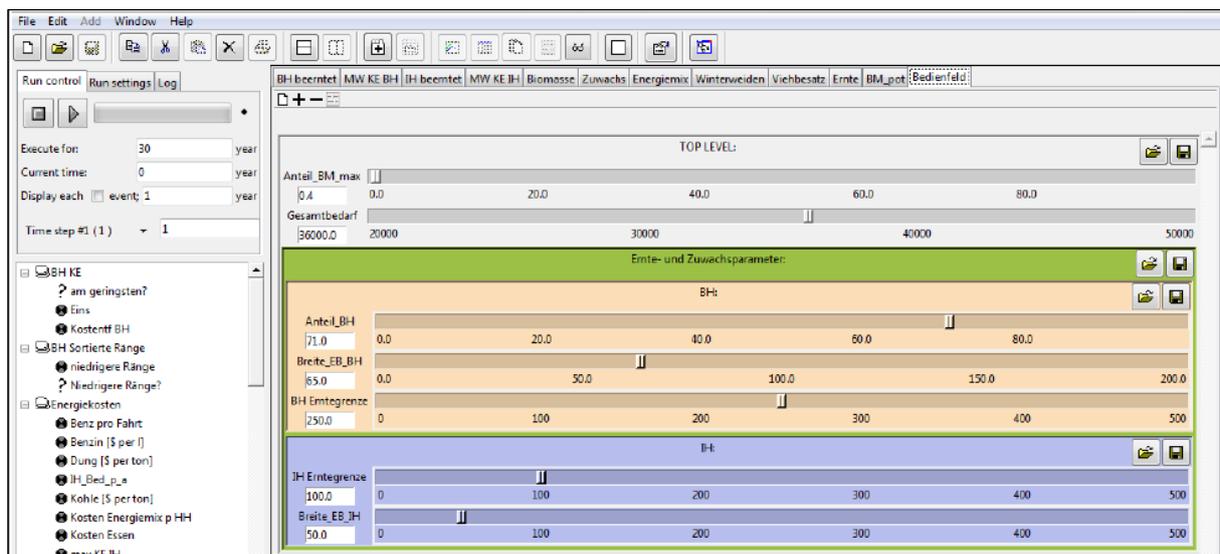


Abbildung 5-3: Bedienfeld des *Energiemodell Alichur*. Eigene Darstellung.

Für eine systematische Sensitivitätsanalyse bieten sich solche Parameter an, die im Prozess der Parametrisierung nur ungenau abgeschätzt werden konnten, sowie jene, die bereits während des Experimentierens mit dem Bedienfeld als sensitiv identifiziert wurden. TANG ET AL. (2007) vergleichen vier Sensitivitätsanalysemethoden anhand zweier hydrologischer Modelle: Die Parameterschätzungssoftware (*parameter estimation software*, PEST), Die lokale Sensitivitätsanalyse (*regional sensitivity analysis*, RSA), die Varianzanalyse (ANOVA), sowie den Sobol Index. Er resümiert, dass die ermittelten Parametersensitivitäten unter anderem stark von der verwendeten Sensitivitätsanalysemethode abhängen (TANG ET AL. 2007, S. 793). Bei TANGS Vergleich schnitten ANOVA und der Sobol Index deutlich besser ab als die Sensitivitätsanalysemethoden PEST und RSA. Dabei lieferte der Sobol Index die belastbarsten Sensitivitätsrankings. ANOVA jedoch schränkte den Rechenaufwand im Vergleich zum Sobol Index deutlich ein (TANG ET AL. 2007, S. 793). Für die Beurteilung der Sensitivität sämtlicher untersuchter Parameter des *Energiemodell Alichur* wurde ANOVA gewählt.

Die einfaktorielle ANOVA ist ein statistisches Verfahren zur Überprüfung des Einflusses einer unabhängigen Variable, die in einer begrenzten Anzahl verschiedener Stufen (Gruppen) vorkommt, auf eine abhängige Variable. Beim einfaktoriellen ANOVA Test werden die Mittelwerte der abhängigen Variable innerhalb von Gruppen, welche durch die Ausprägungen der unabhängigen Variablen definiert sind, verglichen. Voraussetzungen für die Anwendung der ANOVA sind Stetigkeit innerhalb der Daten und Normalverteilung. Alle im Zuge der Sensitivitätsanalyse untersuchten Parameter sind stetig. Die Darstellung der Zielgrößen in Histogrammen ergab annähernde Normalverteilungen. Der einfaktorielle ANOVA-Test ist daher für die Sensitivitätsanalyse des *Energiemodell Alichur* geeignet. Die Nullhypothese des ANOVA-Tests ist, dass die Varianz innerhalb der Gruppen gleich der Varianz zwischen den Gruppen ist. Das Verhältnis der Varianz innerhalb der Gruppen zur Varianz zwischen den Gruppen wird als *F-Wert* bezeichnet. Ein hoher F-Wert deutet auf eine signifikante Beziehung zwischen untersuchtem Parameter und Zielgröße hin. Dies bedeutet gleichzeitig eine hohe Sensitivität des entsprechenden Parameters (TANG ET AL. 2007, S. 801).

In Tabelle 5-1 sind sieben Parameter aufgelistet, die systematisch auf Sensitivität getestet wurden. Die Breiten der Testbereiche wurden nach STERMAN (2000, S. 884) jeweils etwa doppelt so weit wie der nach logischer Abschätzung wahrscheinliche

Wertebereich der jeweiligen Parameter gewählt. Die Schrittgröße der Sensitivitätsanalyse wurde der Größe der einzelnen Testbereiche angepasst. Sämtliche Parameter wurden in zwei Varianten, einer Variante mit niedrigem intrinsischem Zuwachs von 3,6 % (Variante a) und einer Variante mit hohem intrinsischem Zuwachs von 5,6 % (Variante b) auf Sensitivität hin überprüft. Die in den Varianten angenommenen intrinsischen Zuwachswerte entsprechen den in Teilkapitel 4.4.3 hergeleiteten Werten. Innerhalb einer getesteten Variante wurden sämtliche Modellparameter konstant gehalten und nur jeweils einer der untersuchten Parameter innerhalb des festgelegten Bereichs variiert. Getestet wurden *Eingangsparameter* und *Managementparameter*. Bei den Eingangsparametern handelt es sich um Zustandsgrößen zum Simulationsbeginn, die während der Modellparametrisierung nur ungenau abgeschätzt werden konnten. Sie beschreiben unveränderliche Annahmen. Die Managementparameter beziehen sich auf die beiden Ernteformen Gruppenernte und individuelle Ernte. Im Gegensatz zu den Eingangsparametern können die Managementparameter aktiv von der Bevölkerung Alichurs durch ihr Ernteverhalten beeinflusst werden.

Tabelle 5-1: Auf Sensitivität untersuchte Parameter.

Parameter	Parameterbeschreibung	Getesteter Bereich	Schrittgröße
<u>Eingangsparameter</u>			
Anteil_BM_max	Prozentualer Anteil der maximalen Zwergstrauchbiomassedichte innerhalb eines Erntegebietes, der das Zwergstrauchbiomassopotenzial zum Simulationsstart bereits beernteter Rasterzellen des entsprechenden Erntegebietes bestimmt	30 % bis 100 %	3,5 %
ZSB_Fakt	Faktor, welcher die auf Grundlage von ZANDLER ET AL. (2015) ermittelte Zwergstrauchbiomasse je Rasterzelle erhöht, bzw. verringert	0,7 bis 1,3	0,03
<u>Ernteparameter Gruppenernte</u>			
Anteil_BH	Anteil des Gesamtzwergstrauchbedarfs, der mittels Gruppenernte befriedigt wird	0 % bis 100 %	5 %
BH_Erntegr	Zwergstrauchbiomasse, ab der eine Rasterzelle mittels Gruppenernte als beerntbar gilt	1.000 kg/ha bis 4.000 kg/ha	150 kg/ha
Breite_Eb_BH	Breite des Erntebereichs der Gruppenernte (= BH_Erntegrenze-BH_min_verbl)	0 kg/ha bis 2.500 kg/ha	125 kg/ha
<u>Ernteparameter individuelle Ernte</u>			
IH_Erntegr	Zwergstrauchbiomasse, ab der eine Rasterzelle mittels individueller Ernte als beerntbar gilt	0 kg/ha bis 2.500 kg/ha	125 kg/ha
Breite_Eb_IH	Breite des Erntebereichs der individuellen Ernte (= IH_Erntegrenze-IH_min_verbl)	0 kg/ha bis 1.500 kg/ha	75 kg/ha

Tabelle 5-2 fasst die Sensitivitäten der untersuchten Parameter für die simulierten Varianten zusammen. In beiden Varianten weisen die Eingangsparameter *Anteil_BM_max*¹ und *ZSB_Fakt* die größten Sensitivitäten auf. Während die Sensitivität des Parameters *Anteil_BM_max* um Größenordnungen höher ist als die der Managementparameter, liegt der F-Wert des Parameters *ZSB_Fakt* nur leicht über den F-Werten der Managementparameter. Unter den Managementparametern sind jene Parameter, welche die Gruppenernte betreffen, sensitiver als diejenigen, welche sich auf die individuelle Ernte beziehen. Der sensitivste Managementparameter ist der Parameter *Anteil_BH*, welcher angibt zu welchen Anteilen der Zwergstrauchbedarf durch Gruppenernte und individuelle Ernte befriedigt wird. Der Vergleich zwischen den simulierten Varianten zeigt, dass eine höhere intrinsische Zuwachsrate

¹ Siehe Tabelle 5-1 für eine nähere Beschreibung der Parameter.

in erster Linie die Sensitivitäten der Eingangsparameter und der Ernteparameter der individuellen Ernte erhöht. Die Sensitivitäten der Gruppenernteparameter steigen hier nur minimal. Auch die Betrachtung der Beziehungen zwischen untersuchtem Parameter und N-Wert im Diagramm zeigt deutliche Unterschiede zwischen Eingangsparametern und Managementparametern. So nimmt die Varianz der N-Werte bei sämtlichen Managementparametern über die Zeit zu, während die Varianz der Eingangsparameter zum Simulationsbeginn am größten ist. Diese Beobachtung legt nahe, dass bei zunehmender Simulationsdauer die Sensitivität der Eingangsparameter im Verhältnis zu den Managementparametern abnimmt. Abbildung 5-5 bis Abbildung 5-11 zeigen die aus der Sensitivitätsanalyse sämtlicher untersuchter Parameter resultierenden Kurven.

Tabelle 5-2: ANOVA Sensitivitäten (F-Werte) einzelner untersuchter Parameter des Energiemodell Alichur. Hohe F-Werte weisen auf signifikante Zusammenhänge, d.h. eine hohe Sensitivität zwischen untersuchtem Parameter und Zielgröße hin.

	Variante a ($r_0 = 3,6\%$)	Variante b ($r_0 = 5,6\%$)
<u>Eingangsparameter</u>		
Anteil_BM_max	416	600
ZSB_Fakt	25	36
<u>Ernteparameter Gruppenernte</u>		
Anteil_BH	21	22
BH_Erntegr	16	16
Breite_Eb_BH	17	23
<u>Ernteparameter individuelle Ernte</u>		
IH_Erntegr	7	13
Breite_Eb_IH	5	10

5.2.2 MODELLKALIBRIERUNG UND MODELL-WARM-UP-PHASE

Das Variieren von Modellparametern zur Verbesserung der Übereinstimmung zwischen Simulationsergebnissen und Beobachtungen wird als Kalibrierung bezeichnet (DUNG 2011, S. 40). Ergebnis der Modellkalibrierung ist die optimale Abschätzung offener Modellparameter. Bei der Modellkalibrierung wird eine Zielgröße, welche mit Beobachtungswerten oder mit getroffenen Annahmen verglichen wird, festgelegt. Während klassischerweise der Begriff der Kalibrierung mit einem Abgleich zwischen Zielgröße und Messwerten in Verbindung gebracht wird, schreibt BEVEN (2009, S. 20–21), dass Induktion, also die Schlussfolgerung aus beobachteten Phänomenen auf allgemeine Erkenntnis, ein wichtiges Werkzeug der Kalibrierung von Umweltmodellen darstellt. Als Kalibrierungsparameter eignen sich solche Parameter, die als sensitiv bezüglich einer Zielgröße gelten.

Reale Systeme sind zeitlich nicht scharf begrenzt. Im Gegensatz zu realen Systemen bilden Simulationsmodelle einen Zeitrahmen vom künstlich festgelegten Modellstart bis zum Ablauf einer Modellierungsperiode ab. Systemzustände sind immer Produkt vergangener Entwicklungen. Simulationsmodelle generieren daher erst nach einer Vorlaufzeit realistische Werte. In der Modellierung gibt es mehrere Methoden, diese Vorlaufzeit zu berücksichtigen (Siehe ROBINSON 2007). Eine häufige Methode ist das Definieren einer Modell-Warm-Up-Phase, während derer sich ein Simulationsmodell in seinen Betriebszustand bewegt. Die während der Warm-Up-Phase produzierten Ausgabewerte werden von der Auswertung ausgeschlossen, eine Betrachtung der Ausgabedaten, z.B. für die Kalibrierung, erfolgt erst nach dem Ablauf der Warm-Up-Phase. Eine Warm-Up-Phase ist auch bei der Simulation des *Energiemodell Alichur* notwendig. Einerseits muss davon ausgegangen werden, dass die in Teilkapitel 4.4.1 vorgestellte Zwergstrauchbiomassekarte mit einem gewissen Fehler behaftet ist und daher die gegenwärtige Zwergstrauchbiomassedichte in der Untersuchungsregion nicht überall genau dem in der Karte verzeichneten Wert entspricht. Andererseits kommt es auch durch die grobe räumliche Modellauflösung von 1 km² im *Energiemodell Alichur* zu Fehlklassifikationen. So gelten beispielsweise im *Energiemodell Alichur* einige nahe der Ortschaft Alichur gelegenen Zwergstrauchbestände als mittels Gruppenernte beerntbar, obwohl sie sich teilweise auf Winterweiden oder in sehr steilem Gelände befinden. Während der Warm-Up-Phase werden diese Bestände abgeerntet. Für die Warm-Up-Phase wurden im *Energiemodell Alichur* zehn Jahre

veranschlagt. Während dieser Zeit wird ein Modellverhalten, welches dem *Business-as-usual Szenario* entspricht (Siehe Teilkapitel 5.3.1), angenommen.

Für die Kalibrierung des *Energiemodell Alichur* sollen sowohl Messgrößen, als auch logische Schlussfolgerungen verwendet werden. Als Zielgrößen der Modellkalibrierung wurden die gegenwärtigen Kostenentfernungen der individuellen Ernte und der Gruppenernte, sowie die Entwicklung der Dungverfügbarkeit bestimmt. Zur Kalibrierung der gegenwärtigen Kostenentfernungen stehen die in der raumbezogenen Analyse der Zwergstrauchernte gemessenen mittleren Kostenentfernungen von 43 Minuten für die Gruppenernte und von 44 Minuten für die individuelle Ernte als Zielwerte zur Verfügung. Die Ernteparameter *BH_Erntegr* und *Breite_Eb_BH*, sowie *IH_Erntegr* und *Breite_Eb_IH* gelten als sensitiv für die Kostenentfernungen der Gruppenernte und der individuellen Ernte und sind zudem nur ungenau bekannt. Nach der Modell-Warm-Up-Phase sollen die vom *Energiemodell Alichur* ausgegebenen Kostenentfernungen etwa den gegenwärtig gemessenen Kostenentfernungen entsprechen. Hierzu gilt es, die beschriebenen sensitiven Parameter entsprechend zu quantifizieren. Die Kalibrierung der Ernteparameter erfolgte bereits vor der systematischen Sensitivitätsanalyse mit Hilfe des Bedienfeldes im *Energiemodell Alichur*. Dies war notwendig, um für die Sensitivitätsanalyse, bei der jeweils nur ein Parameter variiert wurde, realistische Rahmenbedingungen zu generieren. Tabelle 4-16 (Teilkapitel 4.6) stellt die kalibrierten Ernteparameter gegenüber. Dieser Parametersatz ergibt im *Energiemodell Alichur* zum Simulationsbeginn im Jahr 2013 eine mittlere Kostenentfernung von 43 Minuten für die individuelle Ernte und von 42 Minuten für die Gruppenernte. Die Kalibrierung der Dungverfügbarkeit erfolgt, anders als die Kalibrierung der Kostenentfernung, nicht über Messwerte, sondern über logische Schlussfolgerungen. Der Vergleich der räumlichen Zwergstrauchernte (Siehe Teilkapitel 4.2) mit der Lage der Winterweiden (Siehe Teilkapitel 4.5.1) ergibt, dass gegenwärtig ein Nutzungskonflikt nur zwischen individueller Ernte und Winterweidenutzung, nicht aber zwischen Gruppenernte und Winterweidenutzung besteht. Folglich sollte sich im *Energiemodell Alichur* bei gleichbleibendem Ernteverhalten die Dungverfügbarkeit mit zunehmender Simulationsdauer nicht erhöhen. Ein Zuwachsen der Winterweiden mit Zwergsträuchern ist nicht plausibel, weil sich die Zwergstrauchbestände sämtlicher Winterweiden mit Ausnahme der ortsnahen, individuell beernteten Weiden, gegenwärtig nahe ihrer ökologischen Tragfähigkeit befinden. Die außerhalb der fußläufigen Entfernung Alichurs gelegenen Winter-

weiden wurden bisher nicht signifikant beerntet. Als mit Abstand sensitivster Parameter für die Zwergstrauchzuwachsrate wurde in der Sensitivitätsanalyse der Parameter *Anteil_BM_max* identifiziert. Zur Entscheidungsunterstützung, wie hoch der Parameter *Anteil_BM_max* gewählt werden soll, wurde die Auswirkung dieses Parameters auf die Winterweidekapazität systematisch untersucht. Abbildung 5-4 stellt die aus dieser Analyse für die betrachteten Varianten resultierenden Kurvenscharen gegenüber. *Anteil_BM_max*-Werte von über 50 % führen innerhalb des simulierten Zeitraumes in beiden Szenariovarianten zu einem Anstieg der Weidekapazität. Erst für Werte unterhalb von 38 % ergibt sich auch in Variante b eine deutliche Verringerung der Weidekapazität. Für das *Energiemodell Alichur* wurde als größtmöglicher plausibler Wert ein *Anteil_BM_max*-Wert von 36 % angenommen. Dies bedeutet, dass zum Zeitpunkt des Modellstarts bereits beerntete Zellen eine Zwergstrauchbiomassekapazität von 36 % der maximalen Zwergstrauchbiomassedichte in ihrem Erntegebiet besitzen, falls ihre gegenwärtige Zwergstrauchbiomassedichte nicht über diesem Wert liegt.

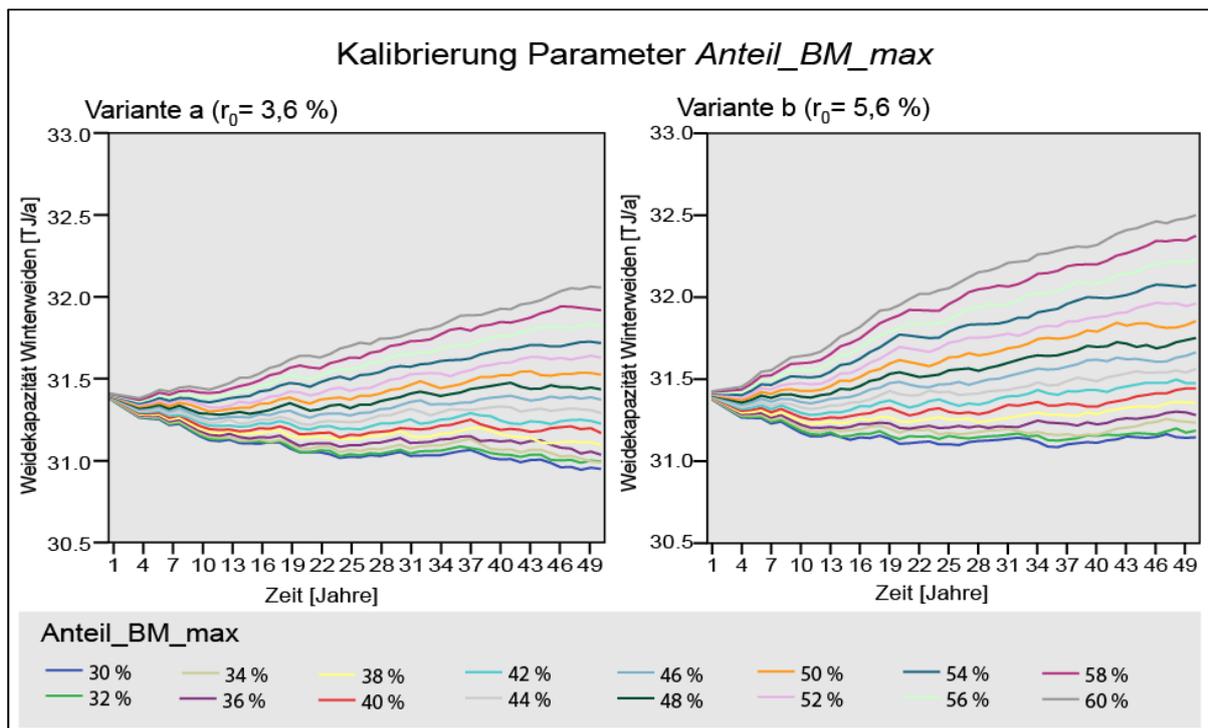


Abbildung 5-4: Zur Kalibrierung des Parameters *Anteil_BM_max* verwendete Kurvenscharen. Eigene Darstellung.

5.2.3 BETRACHTUNGEN ZUR MODELLGÜTE

Numerische Modelle von Umweltsystemen können nicht abschließend validiert werden (FORD 2009, S. 163), (ORESQUES ET AL. 1994, S. 641). Dies liegt daran, dass Modelle eine vereinfachte Abbildung der Realität darstellen (Siehe Teilkapitel 2.1.1) und somit nur Teilaspekte dieser abbilden (FORD 2009, S. 163). ORESQUES ET AL. (1994, S. 641) bezeichnen den Wert von Modellen als heuristisch. FORD (2009, S. 163) schlägt vor, Modelle von Umweltsystemen nicht vornehmlich nach ihrer Validität, sondern nach ihrem Nutzen für eine bestimmte Fragestellung zu beurteilen. GREENBERGER ET AL. (1976) in FORD (2009, S. 164) argumentieren, der Begriff *valide* bezeichne im Zusammenhang mit ökologischen Modellen eher einen Grad an Vertrauen in das Modellverhalten unter eingegrenzten Rahmenbedingungen und für einen bestimmten Modellzweck anstelle eines pauschalen Gütesiegels. Während der Begriff der Modellvalidierung häufig mit dem Abgleich von Simulationsergebnissen mit historischen Daten assoziiert wird, bezeichnet FORD (2009, S. 164) dieses Vorgehen nur als eine von vielen Möglichkeiten, die Glaubwürdigkeit in ein Simulationsmodell zu steigern. BEVEN (2009, S. 18–21) unterteilt die Simulation von Umweltsystemen in *Simulationen mit verfügbaren historischen Daten* und *Simulationen ohne verfügbare historische Daten*. Während im ersten Fall die historischen Daten dazu genutzt werden können, Randbedingungen einzugrenzen und auftretende Unsicherheiten zu quantifizieren, impliziert die Simulation von Modellen der zweiten Kategorie eine Form der deduktiven Schlussfolgerung (BEVEN 2009, S. 18). Er argumentiert, dass die Methode der deduktiven Schlussfolgerung eine lange Tradition in der Wissenschaft besitzt und ein anerkanntes Verfahren der wissenschaftlichen Arbeit darstellt (BEVEN 2009, S. 18–20). Bei Simulationen ohne historische Daten sind die Modellierungsergebnisse vollständig abhängig von den getroffenen (subjektiven) Ausgangsannahmen, deren Unsicherheiten sich durch das gesamte Modell fortschreiben. Die Beurteilung der Modellgüte mittels Fortschreibung von Ausgangsunsicherheiten wird als *forward uncertainty analysis* bezeichnet BEVEN (2009, S. 49). Im Prozess der *forward uncertainty analysis* ist es essenziell zu wissen, von welchen Eingangsparametern die Modellvorhersagen besonders stark beeinflusst werden. Hier liefert eine Sensitivitätsanalyse wichtige Hinweise. Auch FORD (2009, S. 166) bezeichnet das systematische Experimentieren mit Modellparametern, wie es während einer Sensitivitätsanalyse erfolgt, als einen der aufschlussreichsten Validierungstests. Das *Energiemodell Alichur* basiert in großen Teilen auf Messdaten,

die während der Feldaufenthalte im Projektgebiet aufgenommen wurden. Da historische Messwerte in der Modellregion jedoch nicht verfügbar waren, erfolgte die Modellvalidierung deduktiv. Die in Teilkapitel 5.2.1 beschriebene Sensitivitätsanalyse liefert eine geeignete Basis zur Beurteilung der Modellplausibilität. Im Folgenden sollen sämtliche aus der Sensitivitätsanalyse resultierenden Kurvenscharen zur Validierung des *Energiemodell Alichur* auf Plausibilität hin überprüft werden.

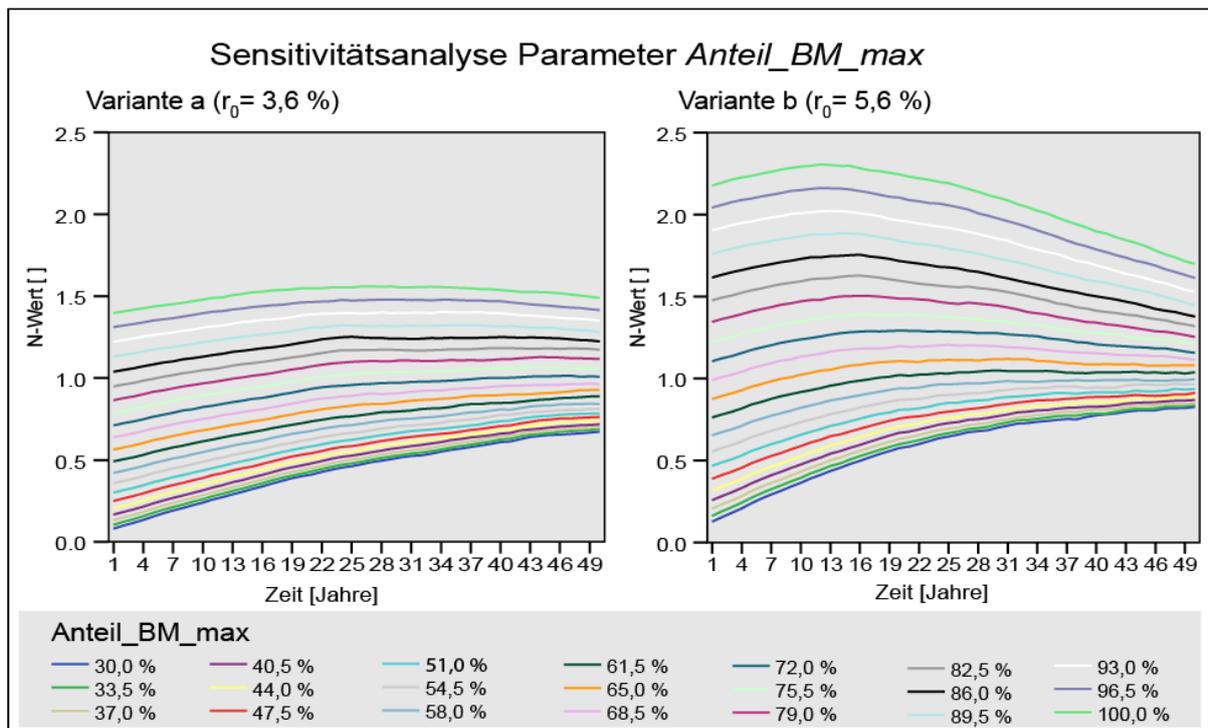


Abbildung 5-5: Sensitivitätsanalyse des Parameters *Anteil_BM_max*. Eigene Darstellung.

Mit steigendem Zwergstrauchpotenzial (untersuchter Parameter *Anteil_BM_max*, siehe Abbildung 5-5) ergeben sich im Modell höhere Zwergstrauchbiomassezuwachsrate und entsprechend höhere N-Werte. Dieser Effekt verringert sich mit fortschreitender Simulationsdauer, weil die Modellzellen dann zunehmend dichter mit Zwergsträuchern bestockt sind, was den weiteren Zwergstrauchbiomassezuwachs abschwächt. Zu fortgeschrittener Simulationszeit wird der Zwergstrauchzuwachs stärker durch die Zwergstrauchernte gesteuert, die Eingangsparameter für Biomasse und Biomassepotenzial verlieren an Einfluss auf den N-Wert. Dieser Effekt ist besonders in Variante b deutlich ausgeprägt. Bei sämtlichen Simulationen mit einem *Anteil_BM_max*-Wert von größer als 58,0 % in dieser Variante werden maximale N-Werte bereits vor Ablauf der simulierten 50 Jahre erreicht. Dies ist ein deutliches Zeichen für zu hoch angesetzte Zwergstrauchbiomassepotenziale. Der anfangs starke Zwergstrauchzuwachs in diesen Simulationsläufen lässt sich nicht durch die in

der Vergangenheit stattgefundene Zwergstrauchernte erklären. Weder in Variante a noch in Variante b findet innerhalb der simulierten 50 Jahre ein Zusammenbruch des *Energiemodell Alichur* statt. Die erreichbare Zwergstrauchbiomasse im System ist in beiden Varianten ausreichend, um das Energiesystem über die simulierte Zeit zu betreiben.

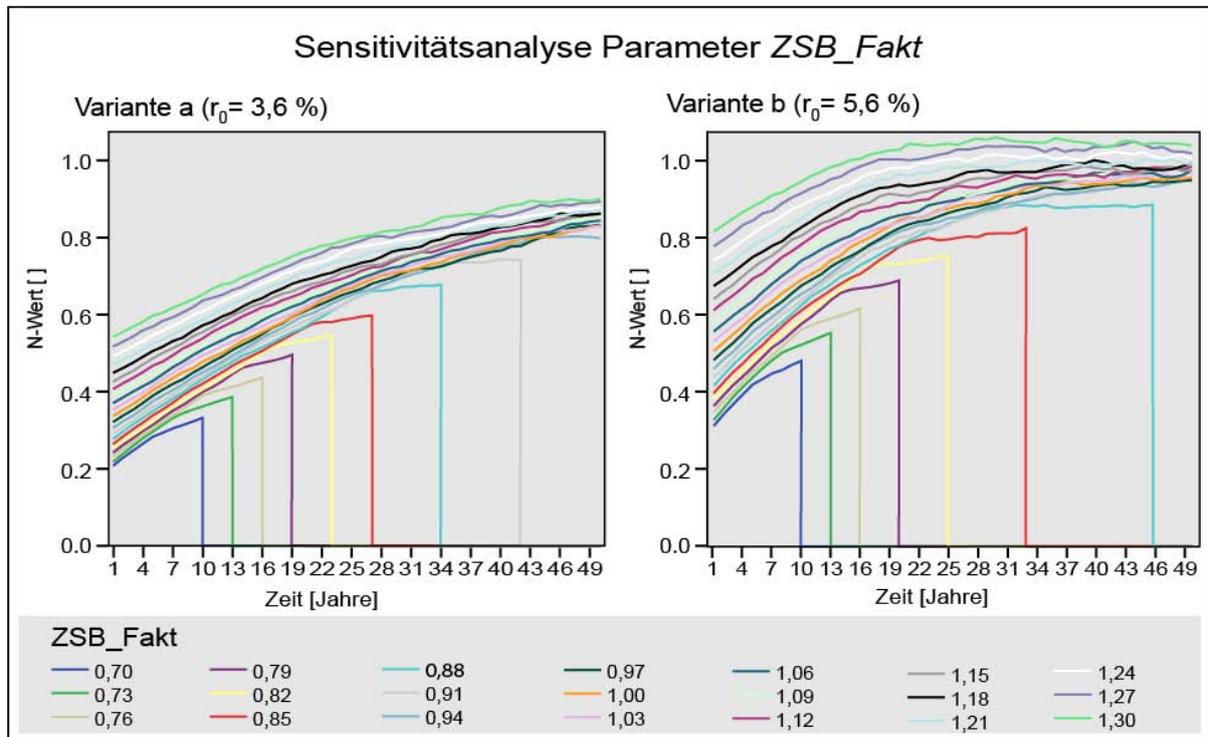


Abbildung 5-6: Sensitivitätsanalyse des Parameters *ZSB_Fakt*. Senkrechte Linien markieren den Zeitpunkt eines Systemzusammenbruchs. Eigene Darstellung.

Auch bei hohen Ausgangsbiomassewerten (Parameter *ZSB_Fakt*, siehe Abbildung 5-6) liegt der Zwergstrauchzuwachs über den entsprechenden Zuwachsraten niedrigerer Ausgangsbiomassewerte. Zwar beeinflusst die Höhe der angenommenen Biomassedichte nicht direkt den Zwergstrauchbiomassezuwachs, weil sich das Zwergstrauchbiomassepotenzial in den Erntegebieten relativ zur Eingangsbiomasse errechnet. Jedoch bewirken höhere Biomassedichten im Modell höhere Winterweidekapazitäten und somit höhere Dungverfügbarkeiten, die unmittelbar zu einem niedrigeren Zwergstrauchbedarf führen. Auch stehen bei höheren Biomassedichten mehr Zwergstrauchbestände für die Gruppenernte zur Verfügung. Mittels Gruppenernte beerntete Zwergstrauchbestände weisen höhere Zuwachsraten auf als mittels individueller Ernte beerntete Bestände. *ZSB_Fakt*-Werte unter 0,94 in Variante a und unter 0,91 in Variante b führen im simulierten Zeitraum von 50 Jahren zu einem Zusammenbruch des *Energiemodell Alichur*, weil die in den beerntbaren Beständen vorhandene Zwergstrauchbiomasse nicht zur Befriedigung des Bedarfs ausreicht. In

beiden Varianten beeinflusst die zu Beginn der Simulation angenommene Zwergstrauchbiomasse nach 50 Jahren Simulation kaum noch den N-Wert. Der Einfluss des globalen Parameters *ZSB_Fakt* auf den N-Wert verliert, mehr noch als der Parameter *Anteil_BM_max*, mit zunehmender Simulationsdauer an Bedeutung.

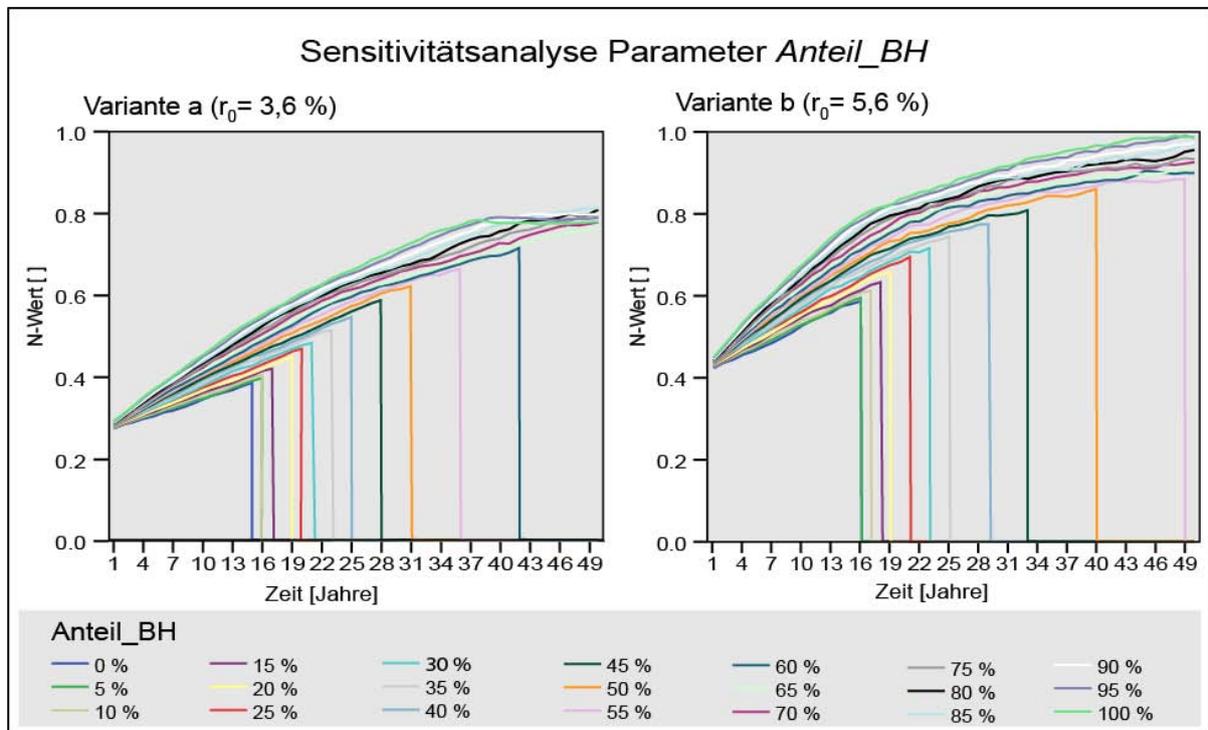


Abbildung 5-7: Sensitivitätsanalyse der Parameters *Anteil_BH*. Senkrechte Linien markieren den Zeitpunkt eines Systemzusammenbruchs. Eigene Darstellung.

Der Parameter *Anteil_BH* beschreibt die Aufteilung der Zwergstrauchernte zwischen den Ernteformen Gruppenernte und individuelle Ernte. Die Sensitivitätsanalyse dieses Parameters (Siehe Abbildung 5-7) zeigt, dass mit wachsendem Anteil der Gruppenernte der Zwergstrauchzuwachs und entsprechend der N-Wert steigt. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Simulationsdauer, sowie bei einer Erhöhung des jährlichen intrinsischen Zuwachses. Während bei der Gruppenernte die beernteten Zwergstrauchbestände stets nahe des Bereiches ihres optimalen Zuwachses gehalten werden, findet bei der individuellen Ernte der Zwergstrauchzuwachs am unteren Ende der Wachstumskurve statt und ist somit geringer. Da im betrachteten Zeitraum kontinuierlich neue Bestände beerntet werden, verstärkt sich dieser Effekt mit zunehmender Simulationsdauer. In Variante a verursachen Gruppenernteanteile von unter 65 % vor Ablauf der simulierten 50 Jahre einen Zusammenbruch des Energiesystems, weil beerntbare Zwergstrauchbestände in fußläufiger Entfernung nicht mehr erreichbar sind. In Variante b liegt dieser Wert aufgrund des höheren Zuwachses bei 60 %. Auch bei angestrebten Gruppenernteanteilen von über 85 % in Variante a

kann zum Simulationsende nicht der gesamte Gruppenerntebedarf befriedigt werden. Hier kann jedoch, bevor es zu einem Systemzusammenbruch kommt, auf einen höheren Anteil individuelle Ernte ausgewichen werden. Dies führt zu einem Abflachen der entsprechenden Zuwachskurven, bzw. N-Wertkurven.

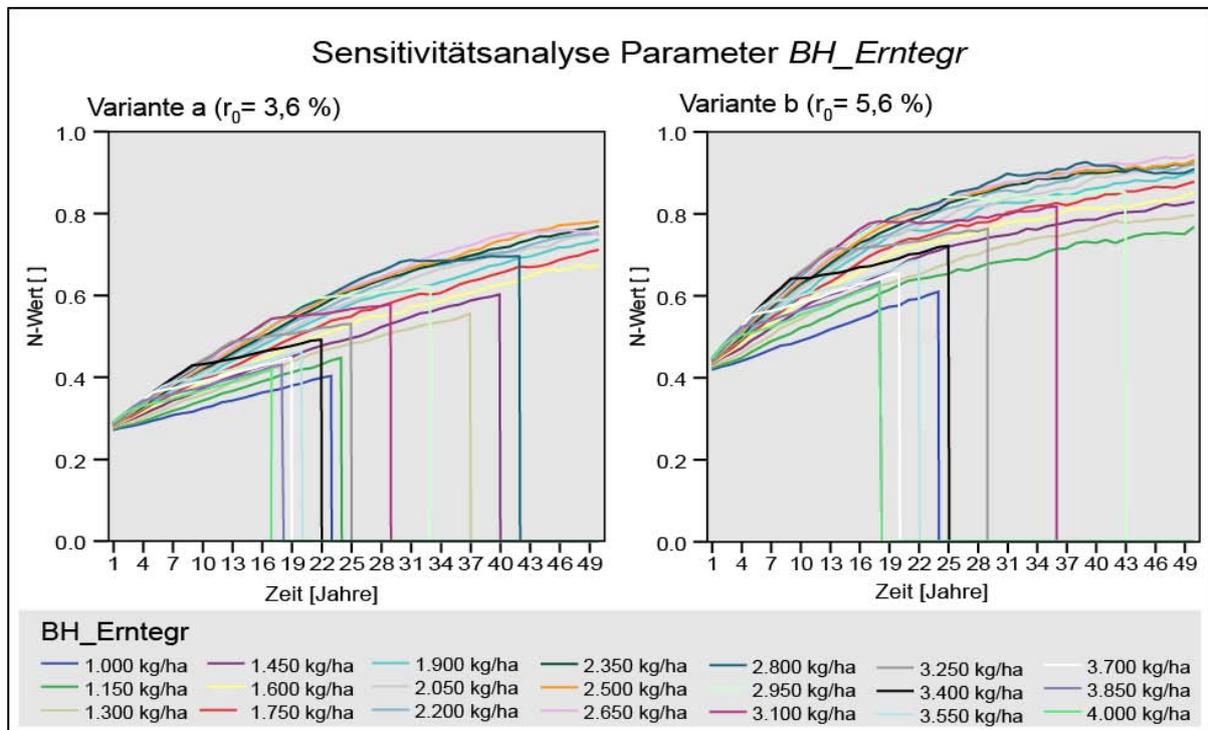


Abbildung 5-8: Sensitivitätsanalyse des Parameters *BH_Erntegr*. Senkrechte Linien markieren den Zeitpunkt eines Systemzusammenbruchs. Eigene Darstellung.

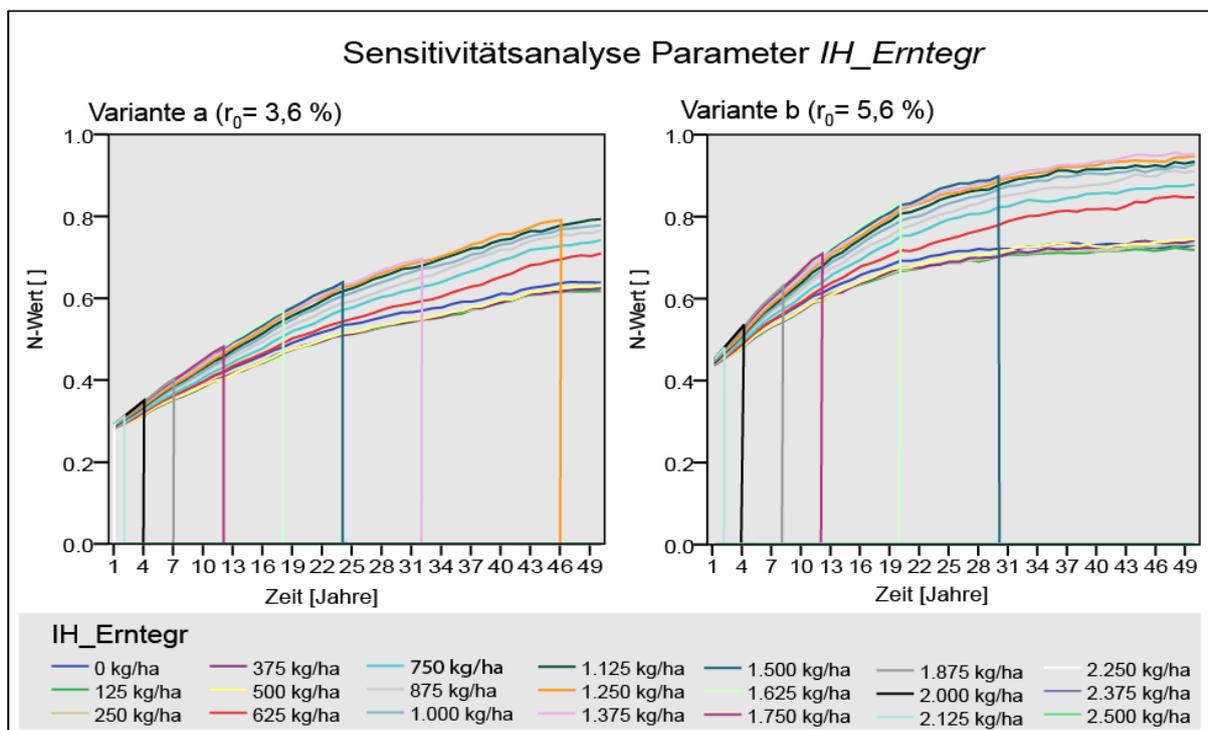


Abbildung 5-9: Sensitivitätsanalyse des Parameters *IH_Erntegr*. Senkrechte Linien markieren den Zeitpunkt eines Systemzusammenbruchs. Eigene Darstellung.

Die Parameter *BH_Erntegr* und *IH_Erntegr* definieren die Zwergstrauchbiomasse, welche mindestens in einer Zelle vorhanden sein muss, damit diese als durch die entsprechende Ernteform beerntbar gilt. Ähnlich dem Parameter *Anteil_BH* bestimmen auch diese Parameter, in welchem Abschnitt der logistischen Zuwachskurve die Zwergstrauchernte stattfindet. Im Gegensatz zum Parameter *Anteil_BH* jedoch gelten die Werte der Parameter *BH_Erntegr* und *IH_Erntegr* nur für einen Teil der Gesamternte. Da in der initialen Parametrisierung des *Energiemodell Alichur* mit 71 % der größere Teil der Zwergstrauchernte durch die Gruppenernte realisiert wird, ist der Parameter *BH_Erntegr* sensitiver als der Parameter *IH_Erntegr*. Die Sensitivitätsanalyse für den Parameter *BH_Erntegr* (Siehe Abbildung 5-8) ergibt zum Simulationseende (50 Jahre) einen maximalen N-Wert bei 2.500 kg/ha (Variante a) bzw. 2.650 kg/ha (Variante b). Hohe *BH_Erntegr*-Werte führen neben einem reduzierten Zuwachs auch dazu, dass durch die Gruppenernte sehr bald keine Bestände mehr als beerntbar gelten. Ein Großteil der Bestände im Umfeld von Alichur kann bei hohen *BH_Erntegr*-Werten die für die Gruppenernte benötigte Zwergstrauchbiomasse aufgrund seines niedrigeren Zwergstrauchbiomassepotenzials gar nicht erreichen. Die benötigten Zwergsträucher werden in diesem Fall vom Modell mittels individueller Ernte beerntet, was jedoch bald im fußläufig erreichbaren Umfeld der Ortschaft Alichur nicht mehr möglich ist. *BH_Erntegr*-Werte von über 2.650 kg/ha in Variante a und über 2.800 kg/ha in Variante b resultieren in Systemzusammenbrüchen vor Ablauf der simulierten 50 Jahre. Sehr niedrige Werte für den Parameter *BH_Erntegr* führen zu Konkurrenz zwischen Gruppenernte und individueller Ernte. Auch Simulationsläufe mit *BH_Erntegr*-Werten kleiner als 1.150 kg/ha in Variante b und kleiner als 1.600 kg/ha in Variante a verursachen Systemzusammenbrüche. Die aus der Sensitivitätsanalyse des Parameters *IH_Erntegr* resultierende Kurvenschar (Siehe Abbildung 5-9) zeigt eine Zweiteilung. Während die Kurven der Simulationsläufe mit *IH_Erntegr*-Werten unter 625 kg/ha nahezu übereinander liegen, resultieren höhere *IH_Erntegr*-Werte in beiden Varianten in höheren N-Werten. In Variante a führen *IH_Erntegr*-Werte größer als 1.125 kg/ha zum Systemzusammenbruch innerhalb der simulierten 50 Jahre, in Variante b Werte größer als 1.375 kg/ha. Während der Sensitivitätsanalyse wurde der Parameter *Breite_Eb_IH*, also die Differenz zwischen dem Parameter *IH_Erntegr* und der mindestens verbleibenden Zwergstrauchbiomasse, mit 500 kg/ha angenommen. Dadurch werden sämtliche individuell beerntete Bestände in den Simulationsläufen mit *IH_Erntegr*-Werten von 0 kg/ha bis

500 kg/ha leer gerntet. Auf diesen Beständen fand im weiteren Simulationsverlauf kein Zwergstrauchzuwachs statt. Die resultierenden N-Wertkurven liegen daher übereinander. Ähnlich dem Parameter *BH_Erntegr* führen auch beim Parameter *IH_Erntegr* hohe Werte zu Systemzusammenbrüchen, weil durch die hohen Grenzwerte keine beerntbaren Bestände im Umfeld von Alichur zu finden sind.

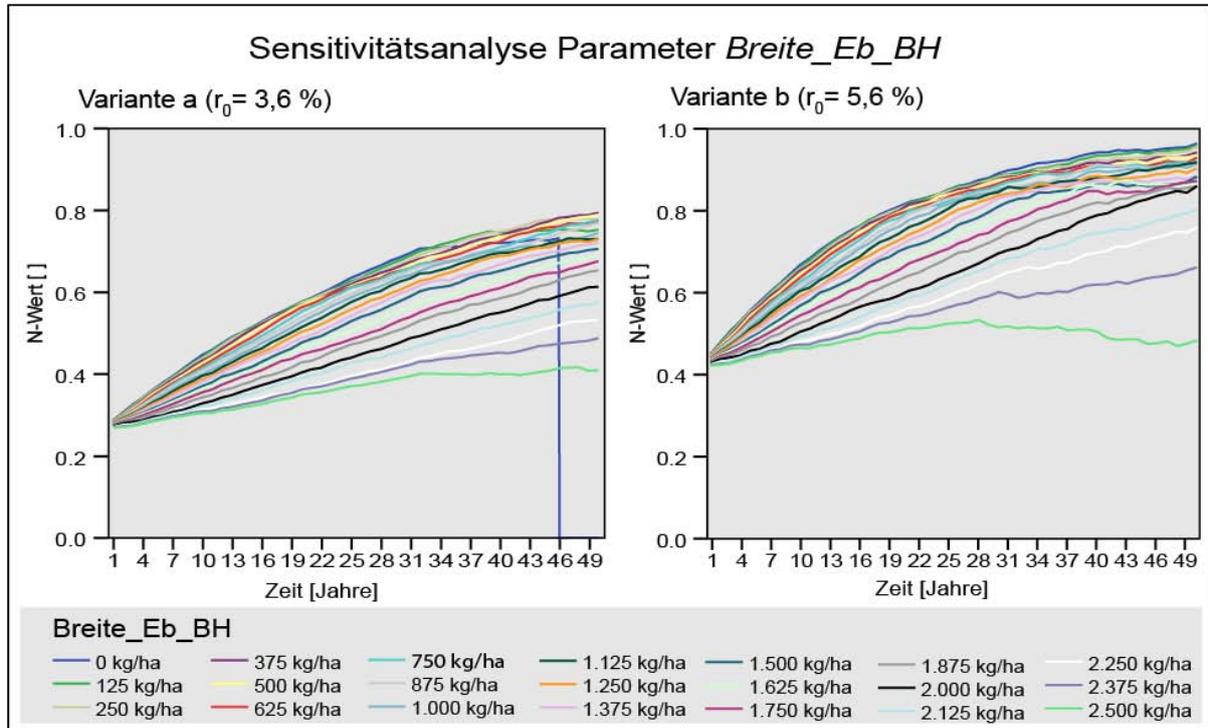


Abbildung 5-10: Sensitivitätsanalyse des Parameters *Breite_Eb_BH*. Eigene Darstellung.

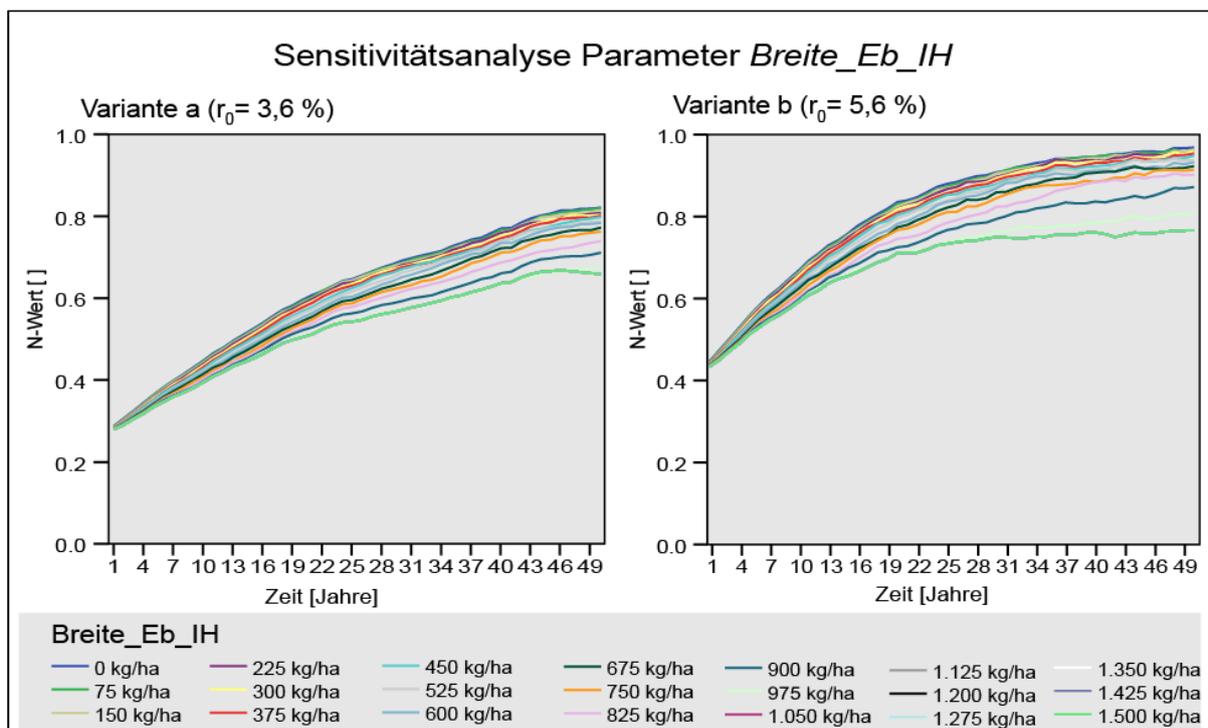


Abbildung 5-11: Sensitivitätsanalyse des Parameters *Breite_Eb_IH*. Eigene Darstellung.

Die Parameter *Breite_Eb_BH* und *Breite_Eb_IH* beschreiben die Verzögerung, mit der die Bevölkerung von Alichur eine Veränderung des Zwergstrauchbewuchses in ihrer Umgebung wahrnimmt. Betragen die Werte 0 kg/ha, wird jeglicher Zuwachs sofort in den entsprechenden Beständen abgeschöpft. In diesem Fall wird pro Zeitschritt auf einer Vielzahl von Beständen gleichzeitig jeweils eine sehr kleine Menge an Biomasse, nämlich genau der Zuwachs des vorherigen Zeitschritts, geerntet. Höhere Parameterwerte führen zu einer größeren Konzentration der Zwergstrauchernte auf einzelnen Gebieten innerhalb eines Zeitschritts. Die Sensitivitätsanalyse des Parameters *Breite_Eb_BH* (Siehe Abbildung 5-10) ergibt nach 50 Jahren Simulation in Variante a einen maximalen N-Wert bei 375 kg/ha, in Variante b bei 0 kg/ha. Je weiter entfernt die Parameter von diesen Werten liegen, desto geringer sind die resultierenden N-Werte. In Variante a bricht das Energiesystem bei einem *Breite_Eb_BH*-Wert von 0 kg/ha nach 46 Jahren zusammen. Zu diesem Zeitpunkt ist im Energiesystem nicht genügend fußläufige Zwergstrauchernte möglich, weil sämtliche Zuwächse im ortsnahen Bereich von der Gruppenernte abgeschöpft werden. Bei einem *Breite_Eb*-Wert von 2.500 kg/ha findet kein Zwergstrauchzuwachs im Bereich der Gruppenernte statt, weil hier sämtliche Bestände komplett abgeerntet werden (angenommener Parameter *BH_Erntegrenze* = 2.500 kg/ha). Für den Parameter *Breite_Eb_IH* resultieren nach einer simulierten Periode von 50 Jahren maximale N-Werte bei 0 kg/ha in beiden Varianten (Siehe Abbildung 5-11). Sämtliche Kurven mit *Breite_Eb_IH*-Werten größer gleich 1.000 kg/ha liegen in Abbildung 5-11 übereinander. Da der Parameter *IH_Erntegr* für die Sensitivitätsanalyse auf 1.000 kg/ha festgesetzt wurde und nicht weniger als 0 kg/ha Biomasse in einer Rasterzelle verbleiben können, werden die individuell beernteten Bestände in all diesen Simulationläufen komplett geleert. Auf diesen Beständen findet im weiteren Simulationsverlauf kein Zwergstrauchwachstum mehr statt. Innerhalb des simulierten Zeitraumes ist in beiden betrachteten Varianten genügend beerntbare Biomasse im System vorhanden, um einen Systemzusammenbruch zu vermeiden. Die generelle Erscheinung der aus der Sensitivitätsanalyse des Parameters *Breite_Eb_IH* resultierenden Kurvenscharen entspricht dem Bild der anderen aus der Sensitivitätsanalyse der Ernteparameter resultierenden Kurvenscharen: Eine zum Simulationsbeginn geringe Varianz in der Zielvariablen nimmt mit zunehmender Simulationsdauer zu. Dieser Effekt ist in Variante b stärker ausgeprägt als in Variante a.

Wie dargelegt wurde, entsprechen die aus den Sensitivitätsanalysen resultierenden Werte der Logik der im Untersuchungsgebiet vorgefundenen Wirkungsmechanismen. Es konnte somit kein den Grundannahmen des *Energiemodell Alichur* widersprechendes Systemverhalten festgestellt werden. Unter den untersuchten Rahmenbedingungen ist es daher legitim, das *Energiemodell Alichur* als für seinen Modellzweck geeignet und nützlich zu bezeichnen.

5.3 MODELLANWENDUNG

In diesem Teilkapitel wird beschrieben, wie das *Energiemodell Alichur* zur Klärung der dieser Arbeit zugrunde liegenden Untersuchungsfragen verwendet werden kann. Hierzu werden zunächst in Teilkapitel 5.3.1 drei verschiedene Szenarien vorgestellt. Die Simulationsergebnisse dieser Szenarien werden schließlich in Teilkapitel 5.3.2 besprochen und in den Kontext der Arbeitshypothesen 3 bis 5 aus Kapitel 1.3 gestellt.

5.3.1 SZENARIEN

Die Überprüfung der am Anfang dieser Arbeit aufgestellten Arbeitshypothesen zum Energiesystem von Alichur erfolgt mittels Simulation von Szenarien im *Energiemodell Alichur*. In diesen Szenarien werden einerseits unveränderliche Rahmenbedingungen und andererseits Managementstrategien variiert, um zu belastbaren Aussagen über mögliche zukünftige Entwicklungen des betrachteten Energiesystems zu gelangen. Der Schwerpunkt der Szenariosimulation liegt auf den Managementparametern. Die in der Sensitivitätsanalyse betrachteten *globalen Parameter* erwiesen sich im simulierten Zeitraum zwar durchweg als sehr sensitiv, andererseits beeinflussten sie die Simulationsergebnisse hauptsächlich zum Simulationsbeginn und verloren im weiteren Simulationsverlauf an Einfluss auf die betrachtete Zielgröße. Ein anderes Bild zeigte sich bei den Managementparametern, deren Einfluss auf das Energiesystem mit zunehmender Simulation stetig zunahm. In den zu betrachtenden Szenarien soll neben verschiedenen Managementparametern nur ein globaler Parameter, der intrinsische Zwergstrauchzuwachs, variiert werden. Sämtliche Managementszenarien werden hierzu in zwei Varianten, einer Variante mit intrinsischem Zuwachs von 3,6 % (Variante a) und einer Variante mit intrinsischem Zuwachs von 5,6 % (Variante b) simuliert. Insgesamt wurden drei Managementszenarien definiert: *Szenario Business-as-usual (BAU)*, *Szenario Breckle (SB)* und *Szenario Optimierung und Energieautarkie (SOE)*, welche nachfolgend näher erläutert werden. Zur

Szenariobetrachtung wurde das *Energiemodell Alichur* mit dem in Kapitel 4 hergeleiteten Parametersatz simuliert. Zwischen den Szenarien wurden nur die szenario-spezifischen Parameter variiert. Mit der Betrachtung der drei genannten Szenarien in jeweils zwei Varianten ergeben sich sechs Simulationsläufe. Die Bezeichnung der Simulationsläufe setzt sich aus dem Szenariokürzel und der Variante (a oder b) zusammen. Die ersten zehn Jahre jedes Modelllaufs wurden als Warm-Up-Phase mit der Parametrisierung des Szenarios BAU_a simuliert und nicht ausgewertet. Abbildung 5-12 gibt eine Übersicht über die im *Energiemodell Alichur* simulierten Szenarien.

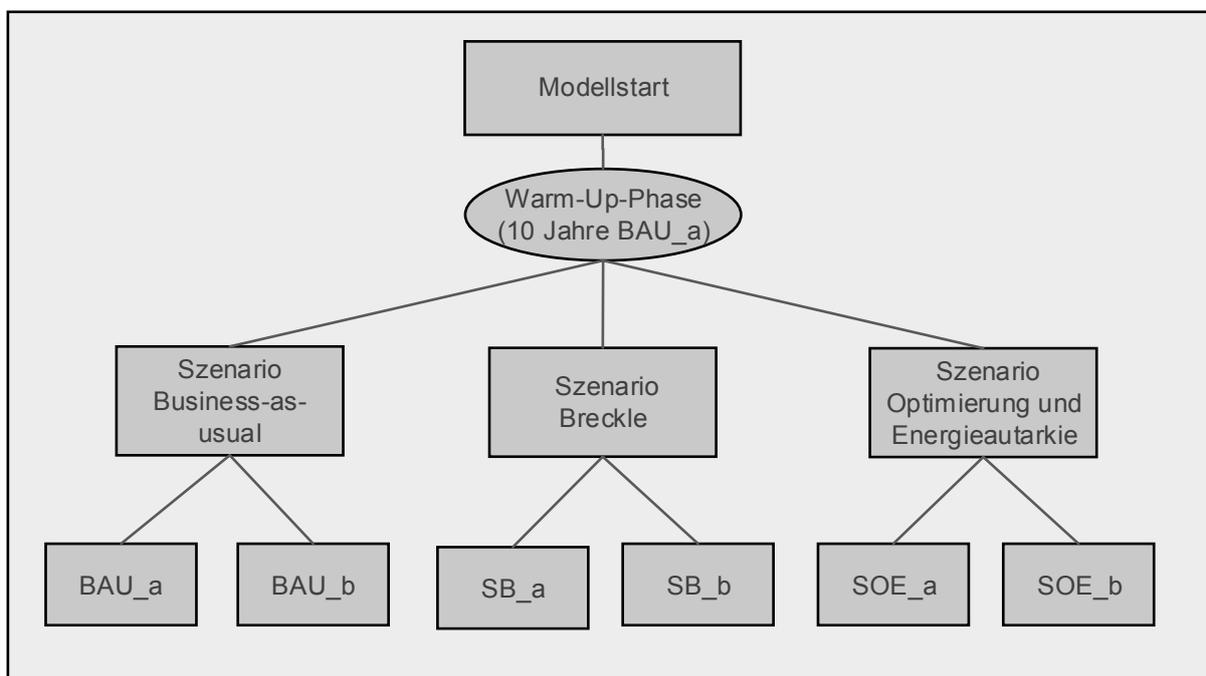


Abbildung 5-12: Im *Energiemodell Alichur* simulierte Szenarien. Eigene Darstellung.

Szenario Business-as-usual (BAU)

Das Szenario Business-as-usual schreibt die bei der Analyse des Energiesystems von Alichur vorgefundenen Nutzungsweisen in die Zukunft fort. Es werden dazu sowohl konstante Managementparameter, als auch konstante Rahmenbedingungen wie etwa ein gleichbleibender Energiebedarf angenommen. Eine absolute Konstanz sämtlicher Managementparameter und Rahmenbedingungen über einen längeren Zeitraum ist zwar nicht wahrscheinlich, dennoch lassen sich mit Hilfe des Szenarios Business-as-usual wichtige Erkenntnisse über die zukünftige Entwicklung des betrachteten Energiesystems gewinnen. Das Szenario BAU eignet sich zudem als Betrachtungsbezug für Optimierungs- oder Verschlechterungsszenarien (Szenarien SB und SOE). Die Auswirkungen der in diesen Szenarien variierten Management-

parameter gewinnen erst durch den Vergleich zu einem Business-as-usual Szenario an Aussagekraft.

In Arbeitshypothese 3 aus der Zielstellung dieser Arbeit wird die Frage nach der Nachhaltigkeit der gegenwärtigen Energienutzung in Alichur gestellt. Diese Frage kann mit dem Szenario Business-as-usual beantwortet werden. Ebenfalls in Hypothese 3 aufgeworfen wurde die Frage nach der Wirksamkeit des *Tereskensyndroms* im Untersuchungsgebiet. Demnach führt die intensive thermische Zwergstrauchnutzung seit dem Zerfall der Sowjetunion zu einer starken Verschlechterung der Weidequalität im Pamir (BRECKLE UND WUCHERER 2006, S. 237). Während der Arbeit im Untersuchungsgebiet wurde festgestellt, dass nur ein geringer Teil der für den Viehbesatz in der Region entscheidenden Winterweiden von der Zwergstrauchernte betroffen ist. So steht gegenwärtig in Alichur nur die individuelle Zwergstrauchernte in direkter Konkurrenz zur Viehwirtschaft, nicht jedoch die Gruppenernte. Ob sich aus dieser eingeschränkten Konkurrenz bereits eine Beeinträchtigung für die lokale Viehwirtschaft ergibt und aufgrund eines verknappten Dungangebotes zum Zusammenbruch des Energiesystems führt, kann ebenfalls im Szenario Business-as-usual getestet werden.

Szenario Breckle (SB)

Im Szenario Breckle wird ein Ressourcenmanagement angenommen, welches der Beschreibung in BRECKLE UND WUCHERER (2006) entspricht. Die im Szenario Business-as-usual eingeschränkte Konkurrenz zwischen thermischer Zwergstrauchnutzung und Nutzung der Zwergsträucher als Winterfutter wird in diesem Szenario auf die Gruppenernte ausgeweitet. Wie in Hypothese 4 beschrieben, führt diese konkurrierende Nutzungsweise zwischen Beweidung und Zwergstrauchernte potenziell zu einer selbstverstärkenden Wirkungskette: Durch ein verringertes Winterfutterangebot kann weniger Nutzvieh gehalten werden und weniger Dung wird produziert, in der Folge erhöht sich der Zwergstrauchbedarf zusätzlich. Die Effizienz der Weidewirtschaft wird im Szenario Breckle als im Verhältnis zum Szenario BAU gleichbleibend angenommen. Im Gegensatz zum Szenario BAU stehen den Einwohnern von Alichur in diesem Szenario keine Kohleimporte aus Kirgistan zur Verfügung. Nachdem ab 1992 die Kohleimporte in den Ost-Pamir komplett ausgesetzt wurden, ergab sich erst in den letzten Jahren in Alichur wieder die Möglichkeit, aus Kirgistan importierte Kohle in begrenztem Umfang zu erwerben. Die Kohleimporte aus Kirgis-

tan können seither jedoch keinesfalls als gesichert gelten. Vielmehr sind sie stets durch eine Verschlechterung der politischen Beziehungen zwischen Tadschikistan und Kirgistan gefährdet. Das Szenario Breckle soll zeigen, wie stark sich das Ressourcenmanagement in der Untersuchungsregion auf die Stabilität des Energiesystems und auf den lokalen Viehbestand auswirkt. Weiterhin soll geklärt werden, ob die Zwergstrauchbestände in der Region Alichur tatsächlich durch das *Teresken-syndrom* gefährdet sind.

Szenario Optimierung und Energieautarkie (SOE)

Das Szenario Optimierung und Energieautarkie wird zur Bearbeitung der Hypothese 5 aus der Zielstellung dieser Arbeit verwendet. Diese befasst sich mit der Möglichkeit, die Nutzungsweise der lokalen Energieträger soweit zu optimieren, dass zukünftig keine Energieimporte in Alichur mehr benötigt werden. Gleichzeitig erfolgt die regionale Energienutzung nach Hypothese 5 nachhaltig und ist somit dauerhaft sichergestellt. In diesem Szenario werden die Winterweidegebiete sowohl bei der individuellen Zwergstrauchernte, als auch bei der Gruppenernte gemieden. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass sich mit einem besseren Weidemanagement die Verweildauer des Nutzviehs auf den Winterweiden von gegenwärtig durchschnittlich 9,8 Monaten auf 8 Monate verkürzen lässt. Um eine Vieheinheit ein Jahr lang auf der Winterweide zu ernähren wären dann anstatt 18,5 GJ nur noch 15,1 GJ nötig. Die Anzahl der Vieheinheiten im Untersuchungsgebiet ließe sich entsprechend von 1.700 Stück auf 2.084 Stück erhöhen. Mit einem Gruppenernteanteil von 90 % findet der überwiegende Teil der Zwergstrauchernte dezentral und wenig intensiv nahe am Zuwachsoptimum eines Großteils der Zwergstrauchbestände statt. Der jährliche Energiebedarf der Ortschaft Alichur lässt sich innerhalb der nächsten 20 Jahre durch eine effizientere Energieträgernutzung, etwa das Kochen mit Hilfe von Solarstrom, um jährlich 1 % verringern. Das Szenario Optimierung und Energieautarkie nimmt eine optimistische, jedoch nicht unrealistische Entwicklung des Energiesystems von Alichur an.

Die Parametrisierung der beschriebenen Szenarien ist in Tabelle 5-3 gegenübergestellt. Da es sich beim *Energiemodell Alichur* um ein Modell zur Abbildung langfristiger Trends handelt, wurde mit einer relativ groben Schrittgröße von einem Jahr simuliert. Die ersten zehn simulierten Jahre werden als Modell-Warm-Up-Phase betrachtet und nicht ausgewertet. Die der Parametrisierung des dem *Energiemodell*

Alichur zugrunde liegenden Vegetationsdaten aus ZANDLER ET AL. (2015), sowie der Großteil der für die räumliche Zwergstraucherntedynamik aufgenommenen GPS-Tracks beziehen sich auf das Jahr 2013. Aus diesem Grunde wurde als Simulationsbeginn das Jahr 2013 festgesetzt.

Tabelle 5-3: Parametrisierung der simulierten Szenarien.

	Szenario Business-as-usual (BAU)	Szenario Breckle (SB)	Szenario Optimierung und Energieautarkie (SOE)
Individuelle Ernte auf Winterweide	ja	ja	nein
Gruppenernte auf Winterweide	nein	ja	nein
Verweildauer des Viehs auf den Winterweiden	9,8 Monate	9,8 Monate	8 Monate
Anteil Gruppenernte	71 %	71 %	90 %
Energieverbrauch	34 TJ/a	34 TJ/a	2013: 34 TJ/a, von 2014 bis 2033 jährlich 1 % Einsparung
Kohleimporte	9,3 %	nein	nein

5.3.2 SIMULATIONSERGEBNISSE

Szenario Business-as-usual (BAU)

Abbildung 5-13 gibt einen Überblick über den Zwergstrauchernteverlauf in Szenariovariante BAU_a. Zum Simulationsbeginn, im Jahr 2013, werden im *Energiemodell Alichur* Zwergstrauchbestände beerntet, welche bei der individuellen Ernte in durchschnittlich 43 Minuten und bei der Gruppenernte in durchschnittlich 42 Minuten erreichbar sind. Bei gleichbleibender Nutzungsweise wird die Gruppenernte in den folgenden zehn Jahren (2014 bis 2023) im Szenario BAU schwerpunktmäßig in diesen Gebieten ausgeweitet. Gleichwohl werden zunehmend auch Bestände im Südwesten des Untersuchungsgebietes, sowie an den Talenden im Süden des betrachteten Gebietes besucht. Die durchschnittliche Reisezeit zu den Gruppenerntegebieten erhöht sich in Szenariovariante BAU_a auf 48 Minuten in der Periode 2014 bis 2023, die Reisezeit zu den individuellen Erntegebieten auf 52 Minuten. In der Periode 2024 bis 2033 erfolgt die Gruppenernte nur noch teilweise im Südosten des betrachteten Gebietes. Ein neuer Schwerpunkt der Gruppenernte liegt nun auf dem Gebiet *Khargush* im Südwesten. Auch findet die Gruppenernte nun zu einem gewissen Maße an den oberen Enden der nord-süd ausgerichteten Täler nördlich von *Alichur* statt. Die

durchschnittliche Reisezeit zu den Gruppenerntegebieten erhöht sich im Vergleich zur vorherigen Periode um 3 Minuten auf 51 Minuten (Szenariovariante BAU_a). Die individuelle Ernte erfolgt nahezu kreisförmig um die Siedlung Alichur. Im Durchschnitt müssen in den Jahren 2024 bis 2033 zu Fuß oder mit dem Esel 61 Minuten bewältigt werden, um individuell beerntbare Bestände zu erreichen. In den Jahren 2034 bis 2043 sind vereinzelt ortsnahe Bestände durch die individuelle Ernte wieder beerntbar. Dennoch vergrößert sich der durchschnittliche Zeitaufwand für das Erreichen von individuell beerntbaren Zwergstrauchbeständen auf 69 Minuten (Szenariovariante BAU_a). Insgesamt werden in Szenariovariante BAU_a bis zum Jahr 2043 68 km² mittels individueller Ernte beerntet. Die Gruppenernte findet von 2034 bis 2043 eher dezentral statt. Auch einige durch die Gruppenernte beerntbare Zwergstrauchbestände in näherer Entfernung zur Ortschaft Alichur sind zu diesem Zeitpunkt wieder ausreichend bestockt, z.B. im Erntegebiet Boz-Naimann. Der durchschnittliche Zeitaufwand für das Erreichen der Gruppenerntebestände beträgt nun 55 Minuten (Szenariovariante BAU_a). Bis zum Jahr 2043 werden mittels Gruppenernte in diesem Szenario 127 km² im Untersuchungsgebiet beerntet. In Szenariovariante BAU_b resultieren in den entsprechenden Zeiträumen niedrigere Kostenentfernungen. Hier werden in der Periode 2014-2023 durchschnittlich 51 Minuten für das Erreichen von individuell beerntbaren Beständen und 46 Minuten für die Anfahrt zu den mittels Gruppenernte beerntbaren Beständen benötigt. In der Periode 2024-2033 entsprechen die Kostenentfernungen 55 Minuten (individuelle Ernte) und 47 Minuten (Gruppenernte), von 2034-2043 werden 52 Minuten (individuelle Ernte) und 47 Minuten (Gruppenernte) benötigt. Es werden hier bis zum Jahr 2043 insgesamt 72 km² für die individuelle Ernte und 115 km² für die Gruppenernte in Anspruch genommen.

Abbildung 5-14 bildet die verbleibende beerntbare Zwergstrauchbiomasse im Zeitraum 2013 bis 2113 der Szenariovariante BAU_a ab. Abbildung 5-15 stellt die entsprechenden Größen der Szenariovariante BAU_b dar. Die sich in der räumlichen Ausdehnung der Zwergstrauchernte zwischen den Szenariovarianten BAU_a und BAU_b im Zeitraum 2013 bis 2043 zeigenden Unterschiede sind auch bei einer Betrachtung der verbleibenden beerntbaren Zwergstrauchbiomassen und der entsprechenden N-Werte deutlich erkennbar. So beträgt die beerntbare Zwergstrauchbiomasse im Jahr 2043 in Szenariovariante BAU_a mit 9.410 t (3.023 t durch individuelle Ernte beerntbar und 6.387 t durch Gruppenernte beerntbar) nur gut 65 % der in

Szenariovariante BAU_b vorhandenen beerntbaren Zwergstrauchbiomasse, welche 14.140 t (4.498 t durch individuelle Ernte beerntbar und 9.641 t durch Gruppenernte beerntbar) ausmacht. Auch der N-Wert, welcher zu diesem Zeitpunkt in Szenariovariante BAU_b 0,81 beträgt, lässt hier auf einen langsameren Vorratsabbau als in Szenariovariante BAU_a schließen, wo der N-Wert im Jahr 2043 bei 0,64 liegt. Für das Jahr 2066 errechnet sich in Szenariovariante BAU_a ein vollständiger Vorratsabbau der mittels Gruppenernte beerntbaren Zwergstrauchbestände. Im Jahr 2067 kann die Zwergstrauchnachfrage in dieser Szenariovariante noch durch einen erhöhten Anteil an individueller Ernte ausgeglichen werden, bevor das Energiesystem im Jahr 2068 zusammenbricht. Der N-Wert beträgt zu diesem Zeitpunkt 0,78. Anders verhält sich die Entwicklung der Zwergstrauchbestände in Szenariovariante BAU_b. In dieser Szenariovariante wird ein N-Wert von nahezu 1 erreicht, bevor die vorhandenen beerntbaren Zwergstrauchreserven abgebaut sind. Es ergibt sich zudem auch über den in Abbildung 5-15 betrachteten Zeitraum von 100 Jahren hinaus kein Zwergstrauchdefizit und somit kein Systemzusammenbruch. Unter den hier getroffenen Annahmen gilt die Zwergstrauchnutzungsweise nach der in Teilkapitel 5.2.1 vorgeschlagenen Definition als nachhaltig. Es verbleiben dauerhaft etwa 6.000 t beerntbare Zwergsträucher im Energiesystem.

Die Zwergstrauchbiomasseverteilung im Jahr 2068, welche sich aus den Simulationsergebnissen der Szenariovariante BAU_a ergibt, ist in Abbildung 5-16 dargestellt. Abbildung 5-16 ist im Vergleich zur Abbildung 4-19 in Kapitel 4.4.1. zu sehen. Im Jahr 2068 sind sämtliche erreichbare Flächen im Umkreis von 10 km um Alichur mit weniger als 1.000 kg Zwergstrauchbiomasse pro Hektar bestockt. Zwergstrauchbiomassen von über 3.000 kg/ha verbleiben nur auf den Winterweiden und in mit dem LKW nicht zu erreichenden Hanglagen. Die Ausbreitung der mit 2.000 kg/ha bis 3.000 kg/ha bestockten Flächen verringert sich außerhalb des ortsnahen Bereichs nicht. Es verbleiben in Szenariovariante BAU_a im Jahr 2068 im Durchschnitt 1.476 kg/ha Zwergstrauchbiomasse im Untersuchungsgebiet. Dies sind 107 kg/ha (6,8 %) weniger als zu Beginn der Simulation im Jahr 2013, wo die durchschnittliche Zwergstrauchbiomasse 1.583 kg/ha betrug.

Zum Zeitpunkt des Systemzusammenbruchs in Szenariovariante BAU_a (simuliertes Jahr 2068) können 1.677 Einheitsherden auf den Winterweiden der Region ernährt werden. In Szenariovariante BAU_b sind es im simulierten Jahr 2113 sogar 1.690 Einheitsherden. Im Vergleich zu den 1.687 Einheitsherden, welche sich in beiden

Szenariovarianten nach der Modell-Warm-Up-Phase im Jahr 2013 ergeben, resultiert hier praktisch keine Veränderung (Siehe Abbildung 5-17). Diese Entwicklung ist dadurch begründet, dass im Szenario BAU eine konkurrierende Zwergstrauchnutzung nur bei der individuellen Ernte im ortsnahen Bereich stattfindet. In diesem Bereich ist jedoch bereits zum Simulationsbeginn kaum noch relevante Zwergstrauchbiomasse vorhanden. Für den von den Haushalten in Alichur verwendeten Energiemix ergibt sich aufgrund der konstanten Viehzahl und der damit einhergehenden gleichbleibenden *kuik*- und *tezek*-Versorgung im Szenario BAU nahezu keine Veränderung (Siehe Abbildung 5-18). Die intensive, nicht nachhaltige Nutzung der Zwergstrauchbestände in Szenariovariante BAU_a wirkt sich nur mäßig auf die Zwergstrauchbestände der Region aus. Da sich ein Großteil der Zwergsträucher in schlecht erreichbaren Gegenden des Untersuchungsgebietes befinden und niedrige Zwergstrauchbiomassedichten oftmals keine wirtschaftliche Zwergstrauchernte ermöglichen, ist zu erwarten, dass selbst nach einem potenziellen Zusammenbruch des Energiesystems von Alichur noch mehr als 90 % der gegenwärtigen Zwergstrauchbiomasse erhalten bleiben.

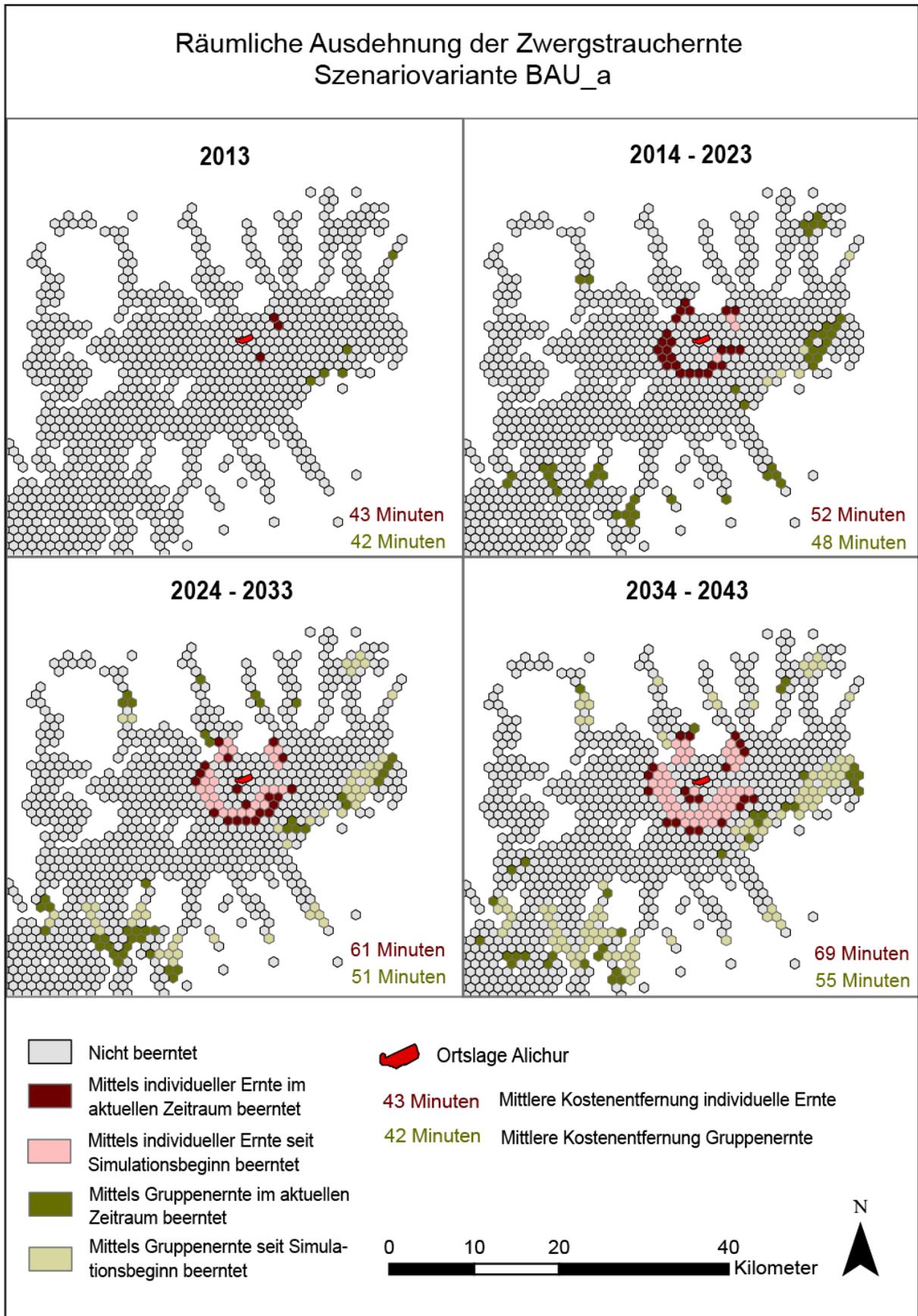


Abbildung 5-13: Räumliche Ausdehnung der individuellen Zwergstrauchernte und der Gruppenernte in Szenariovariante BAU_a. Eigene Darstellung.

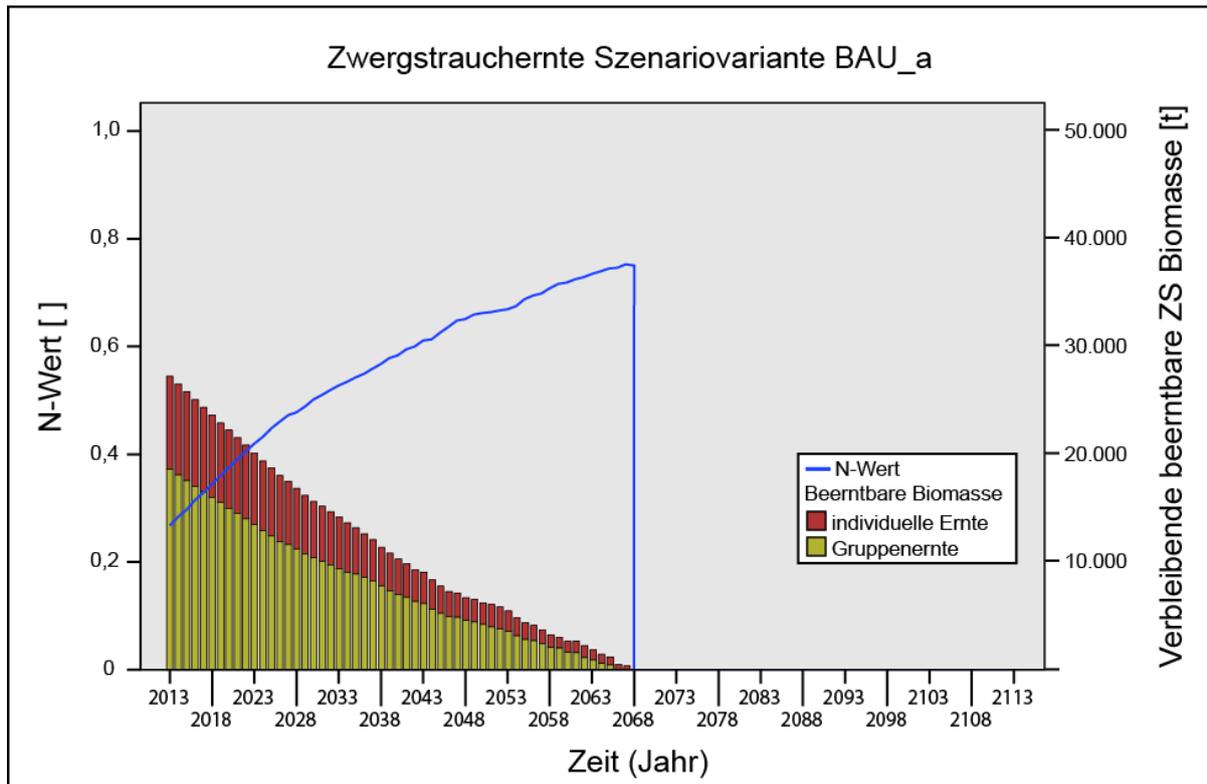


Abbildung 5-14: Verbleibende beerntbare Biomasse im Untersuchungsgebiet und Verlauf der N-Wert-Kurve in Szenariovariante BAU_a. Die senkrechte Linie am Ende der N-Wert-Kurve stellt den Zeitpunkt des Systemzusammenbruchs dar. Eigene Darstellung.

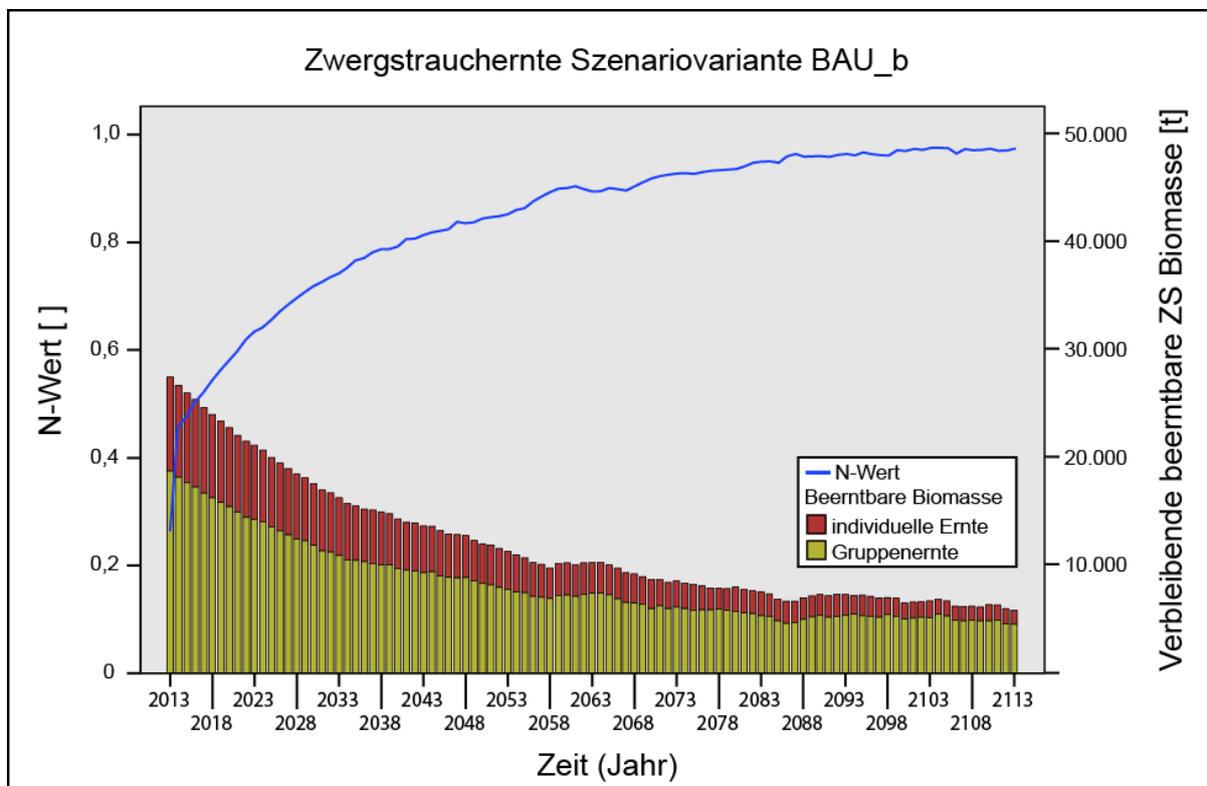


Abbildung 5-15: Verbleibende beerntbare Biomasse im Untersuchungsgebiet und Verlauf der N-Wert-Kurve in Szenariovariante BAU_b. Eigene Darstellung.

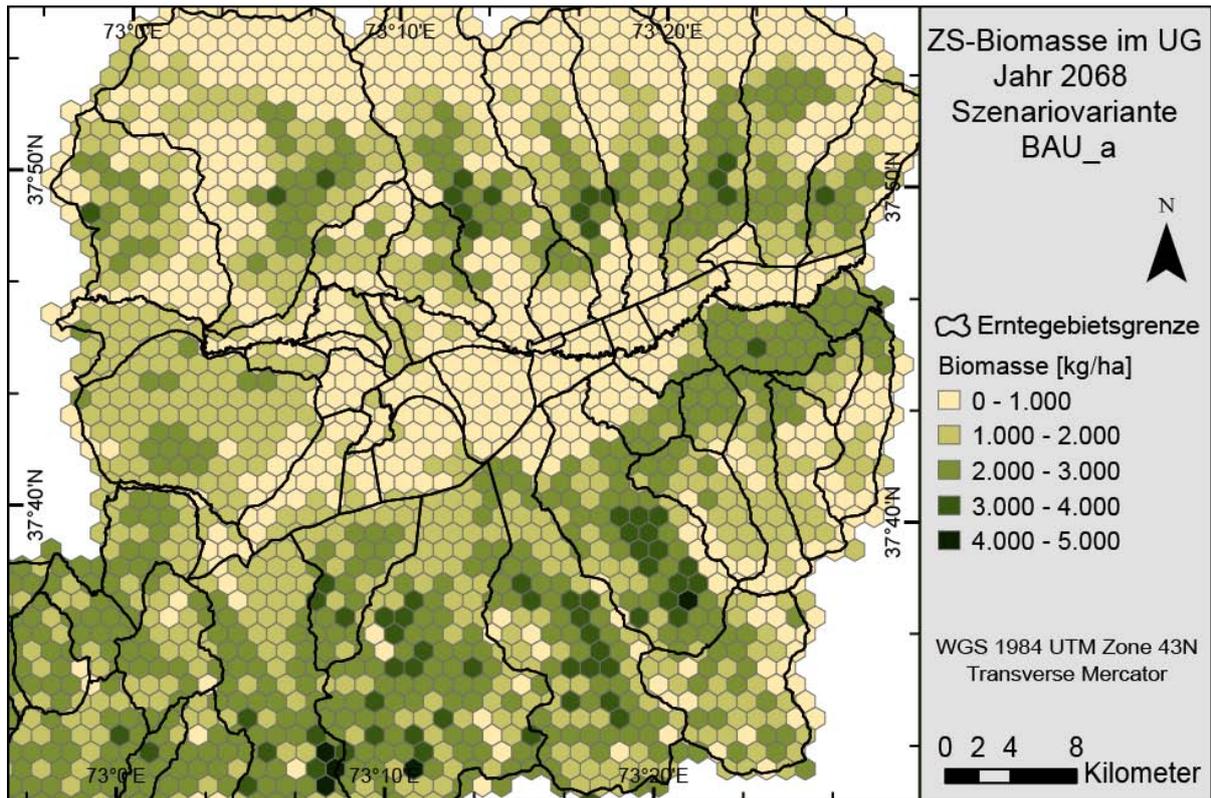


Abbildung 5-16: Zwergstrauchbiomasse im Untersuchungsgebiet im Jahr 2068, simuliert in Szenariovariante BAU_a. Eigene Darstellung.

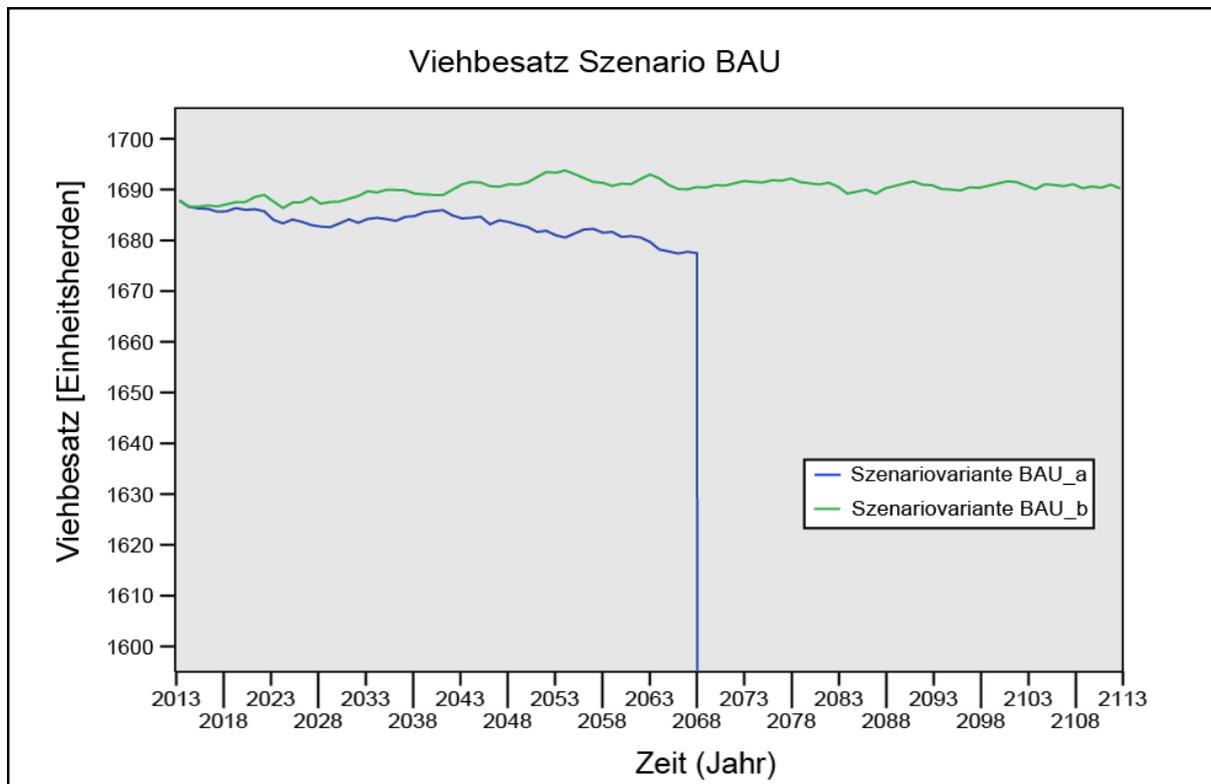


Abbildung 5-17: Entwicklung des Viehbesatzes im Szenario BAU. Senkrechte Linien markieren den Zeitpunkt eines Systemzusammenbruchs. Eigene Darstellung.

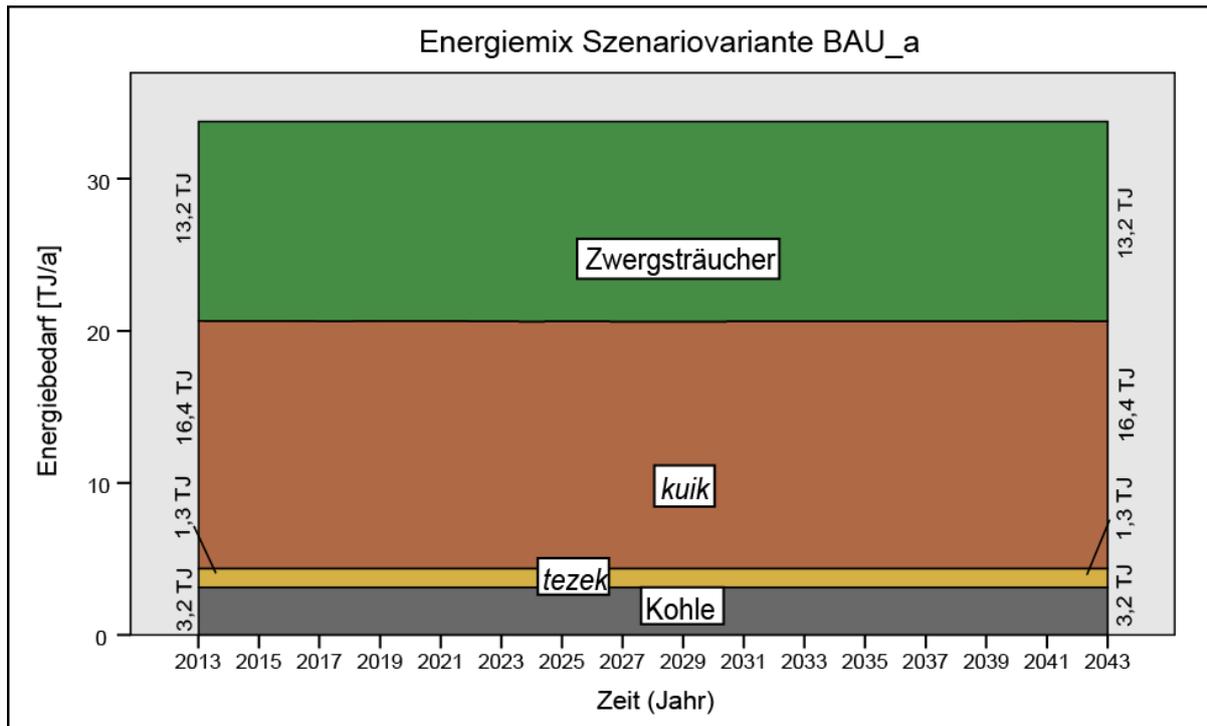


Abbildung 5-18: Aus Szenariovariante BAU_a resultierender Energiemix. Eigene Darstellung.

Szenario Breckle (SB)

Die räumliche Ausdehnung der Zwergstrauchernte im Zeitraum 2013 bis 2043 der Szenariovariante SB_a ist in Abbildung 5-19 zusammengefasst. In den Szenarien SB_a und SB_b ergeben sich in den zehn ersten simulierten Jahren mit 31 Minuten (SB_a) und 30 Minuten (SB_b) deutlich niedrigere durchschnittliche Gruppenerntekostenentfernungen als im Ausgangsjahr 2013, während dessen durchschnittlich 42 Minuten zum Erreichen der Gruppenerntegebiete zurückgelegt werden mussten. Für den Rückgang der Wegzeiten ist die Ernte auf den nahegelegenen Winterweiden verantwortlich. Diese wurden zum Simulationsbeginn, im Jahr 2013, nicht angegangen. In beiden SB Varianten konzentriert sich in der Periode 2014 bis 2023 die Gruppenernte auf die ortsnahen Winterweidegebiete nördlich, östlich und südlich der Ortschaft Alichur. Bei der individuellen Ernte ist in diesem Zeitraum, anders als bei der Gruppenernte, ein deutlicher Anstieg der durchschnittlichen Kostenentfernung zu verzeichnen. Hier ergibt sich mit 53 Minuten (beide SB Varianten) in der Periode 2014 bis 2023 eine nahezu mit den BAU Szenariovarianten identische Kostenentfernung. In der simulierten Zeitspanne von 2024 bis 2033 stehen kaum noch ortsnah Winterweidegebiete für die Gruppenernte zur Verfügung, weil diese bereits in der vorherigen Simulationsperiode beerntet wurden. Alternativ werden nun jene Gebiete beerntet, welche in den Szenariovarianten BAU_a und BAU_b bereits in der

Periode 2014 bis 2023 aufgesucht wurden. Die mittlere Kostenentfernung der Gruppenernte beträgt im Zeitraum 2024 bis 2033 46 Minuten in Szenariovariante SB_a und 41 Minuten in Szenariovariante SB_b. Wegen der im Vergleich zu den BAU Szenariovarianten höheren Zwergstrauchbiomassen, welche aufgrund der fehlenden Kohleimporte in den SB Szenariovarianten geerntet werden, müssen in der Zeitspanne 2024 bis 2033 weiter entfernte Gebiete als in den BAU Szenariovarianten angegangen werden. Die mittleren Kostenentfernungen betragen hier 66 Minuten (Szenariovariante SB_a) und 60 Minuten (Szenariovariante SB_b). In den Jahren 2034-2043 erhöht sich die durchschnittlich für die individuelle Zwergstrauchernte benötigte Reisezeit zusätzlich auf 72 Minuten in Szenariovariante SB_a, in Szenariovariante SB_b verringert sie sich leicht auf 57 Minuten, weil nachgewachsene Zwergstrauchbestände aufgesucht werden können. Bis zum Jahr 2043 werden in den Szenariovarianten SB_a und SB_b 81 km² und 84 km² für die individuelle Zwergstrauchernte benötigt. Dies bedeutet eine Steigerung um 13 km² bzw. 12 km² im Vergleich zu den Szenariovarianten BAU_a und BAU_b. Die Gruppenernte findet von 2034 bis 2043 in etwa auf der Fläche statt, welche in den BAU Szenariovarianten während der Jahre 2024-2033 aufgesucht wurden. Es werden mittlere Wegzeiten von 49 Minuten (Szenariovariante SB_a) und 41 Minuten (Szenariovariante SB_b) zu den Gruppenerntegebieten zurückgelegt. Diese liegen deutlich unter den Wegzeiten, welche sich aus der Simulation der BAU Szenariovarianten in diesem Zeitraum ergeben. Die bis zum Jahr 2043 für die Gruppenernte beanspruchte Fläche hingegen liegt in Szenariovariante SB_a mit 166 km² um 39 km² höher als jene in Szenariovariante BAU_a, die der Szenariovariante SB_b liegt mit 152 km² um 37 km² über jener aus Szenariovariante BAU_b.

Abbildung 5-20 und Abbildung 5-21 bilden den Verlauf der N-Wert-Kurven und der verbleibenden individuell beerntbaren, sowie der mittels Gruppenernte beerntbaren Zwergstrauchbestände im Szenario SB ab. Auf den in den SB Szenariovarianten beernteten Winterweiden befinden sich signifikante Zwergstrauchbestände in relativer Nähe zur Ortschaft Alichur. So sind mit gut 25.000 t mittels Gruppenernte beerntbarer Zwergstrauchbiomasse zu Beginn der Simulation in den Szenariovarianten SB_a und SB_b knapp 6.000 t Zwergstrauchbiomasse mehr für die Gruppenernte verfügbar als in den Szenariovarianten BAU_a und BAU_b. Auf die mittels individueller Ernte beerntbaren Bestände ergibt sich im Vergleich zu den BAU Szenariovarianten jedoch kein positiver Effekt, weil die individuelle Ernte auch in den BAU

Szenariovarianten auf den ortsnahen Winterweiden stattfindet. Da im SB Szenario keine Kohle importiert wird und die fehlende Energie durch Zwergsträucher ersetzt werden muss, ist die Masse der jährlich mittels individueller Ernte geernteten Zwergsträucher im Szenario SB im Vergleich zum Szenario BAU erhöht. Es ergibt sich ein zusätzlicher Energiebedarf von 3,2 TJ/a, welcher 178 t zusätzlicher Zwergstrauchernthe pro Jahr entspricht. Die Winterweidekapazität verringert sich durch die Ernte auf den Winterweiden im Zeitraum von 2013 bis 2043 um 55 Einheitsherden in Szenariovariante SB_a und um 52 Einheitsherden in Szenariovariante SB_b. Auch die durch die Verringerung des Viehbesatzes fehlende Energie aus dem Energieträger *kuik*, welche in beiden Szenariovarianten etwa 0,5 TJ/a ausmacht, muss durch eine gesteigerte Zwergstrauchernte ersetzt werden. Dies entspricht einer Zwergstrauchmasse von 28 t/a. Der solchermaßen um gut 200 t erhöhte Bedarf nach Zwergsträuchern führt zu einem Absinken der N-Wert-Kurven bei den SB Szenariovarianten im Vergleich zu den BAU Szenariovarianten. In Szenariovariante SB_a kommt es im Jahr 2049 und in Szenariovariante SB_b im Jahr 2072 zu einem Zusammenbruch des Energiesystems von Alichur. Grund für den Zusammenbruch des Energiesystems ist das Aufbrauchen des Vorrates an individuell beerntbarer Zwergstrauchbiomasse bei zu niedrigem Zuwachs.

Die Auswirkungen der intensiven Zwergstrauchernte der Szenariovariante SB_a auf die Zwergstrauchbestände in der Region Alichur sind in Abbildung 5-22 abgebildet. Die hier dargestellte Karte zeigt den Zwergstrauchbestand der Untersuchungsregion im Jahr 2049, welches den Zeitpunkt des Systemzusammenbruchs in Szenariovariante SB_a darstellt. Der Vergleich zwischen Abbildung 4-19 und Abbildung 5-22 zeigt eine deutliche Abnahme der Zwergstrauchbestände mit Biomassedichten über 3.000 kg/ha im Jahr 2049. Die Verteilung der Bestände mit Dichten von 2.000 bis 3.000 kg/ha bleibt in diesem Zeitraum jedoch nahezu konstant, hier kommen lediglich die vormals dichter bestandenen Bestände hinzu. Die Biomassedichte ortsnaher Zwergstrauchbestände mit Biomassedichten von 1.000 bis 2.000 kg/ha, welche gegenwärtig insbesondere westlich der Ortschaft Alichur anzutreffen sind, wird sich zukünftig nach Szenariovariante SB_a auf unter 1.000 kg/ha verringern. In Teilkapitel 4.4.1 wurde eine gegenwärtige durchschnittliche Biomassedichte von 1.583 kg/ha im untersuchten Gebiet ermittelt. Diese verringert sich in Szenariovariante SB_a bis zum Jahr 2049 auf 1.427 kg/ha, also um 9,9 %.

Der Einfluss der Zwergstrauchernte in den Gebieten der Winterweiden auf den Viehbesatz und damit indirekt auch auf den Zwergstrauchbedarf im Energiesystem von Alichur stellt sich im Szenario SB als eher begrenzt dar. Zwar kommt es in Folge der Zwergstrauchernte auf den Winterweiden zunächst tatsächlich zu einem Einbruch des Viehbesatzes. Dieser Trend hält allerdings nur für gut 13 Jahre an. Bis etwa zu diesem Zeitpunkt wird der Großteil der ortsnahen Zwergstrauchbestände auf Winterweiden beerntet. Schließlich kommt es durch den Zwergstrauchzuwachs sogar wieder zu einer leichten Erholung der Viehbestandentwicklung, so dass am Simulationseende in Szenariovariante SB_a mehr als 96,7 % und in Szenariovariante SB_b mehr als 96,9 % des ursprünglichen Viehbestandes verbleiben (Siehe Abbildung 5-29). Analog zum Viehbestand verringert sich die durch *kuik* bereitgestellte Energie bereits in den ersten zehn simulierten Jahren um fast 0,5 TJ/a, was einer Zwergstrauchmenge von 28 t/a entspricht. Ein weiteres Absinken der *kuik*-Verfügbarkeit konnte jedoch nicht festgestellt werden (Siehe Abbildung 5-24). Bei einem Zwergstrauchbedarf von 16,9 TJ/a im Jahr 2043 in Szenariovariante SB_a entspricht der durch die simulierte Winterweideübernutzung hervorgerufene zusätzliche Zwergstrauchbedarf gerade einmal 3 % des Gesamtzwergstrauchbedarfs dieses Jahres. Die zusätzlich auf den Winterweiden verfügbaren Zwergstrauchbiomassen wirken sich im betrachteten Simulationszeitraum positiv auf die mittels Gruppenernte erreichbare Zwergstrauchbiomasse aus. So sind in Szenariovariante SB_a im Jahr 2043 im Vergleich zu Szenariovariante BAU_a noch etwa 2.700 t Zwergstrauchbiomasse mehr für die Gruppenernte verfügbar, im Szenariovariante SB_b sind es etwa 2.530 t mehr als im Szenariovariante BAU_b. Dieser positive Effekt beschränkt sich jedoch lediglich auf die Gruppenernte. Die in Abbildung 5-20 und Abbildung 5-21 dargestellten Systemzusammenbrüche erfolgen wegen des kompletten Abbaus der individuell beerntbaren Zwergstrauchbestände nahe der Ortschaft Alichur. Dieser Vorratsabbau wird größtenteils durch den Verzicht auf Kohleimporte in das Energiesystem von Alichur und nur zu einem geringen Anteil durch eine verminderte *kuik*-Versorgung hervorgerufen. Das Szenario SB stellt ein Verschlechterungsszenario dar. Es konnte jedoch auch in diesem Szenario festgestellt werden, dass am Ende der Simulation noch etwa 90 % der Zwergstrauchbiomasse in der Region erhalten bleiben.

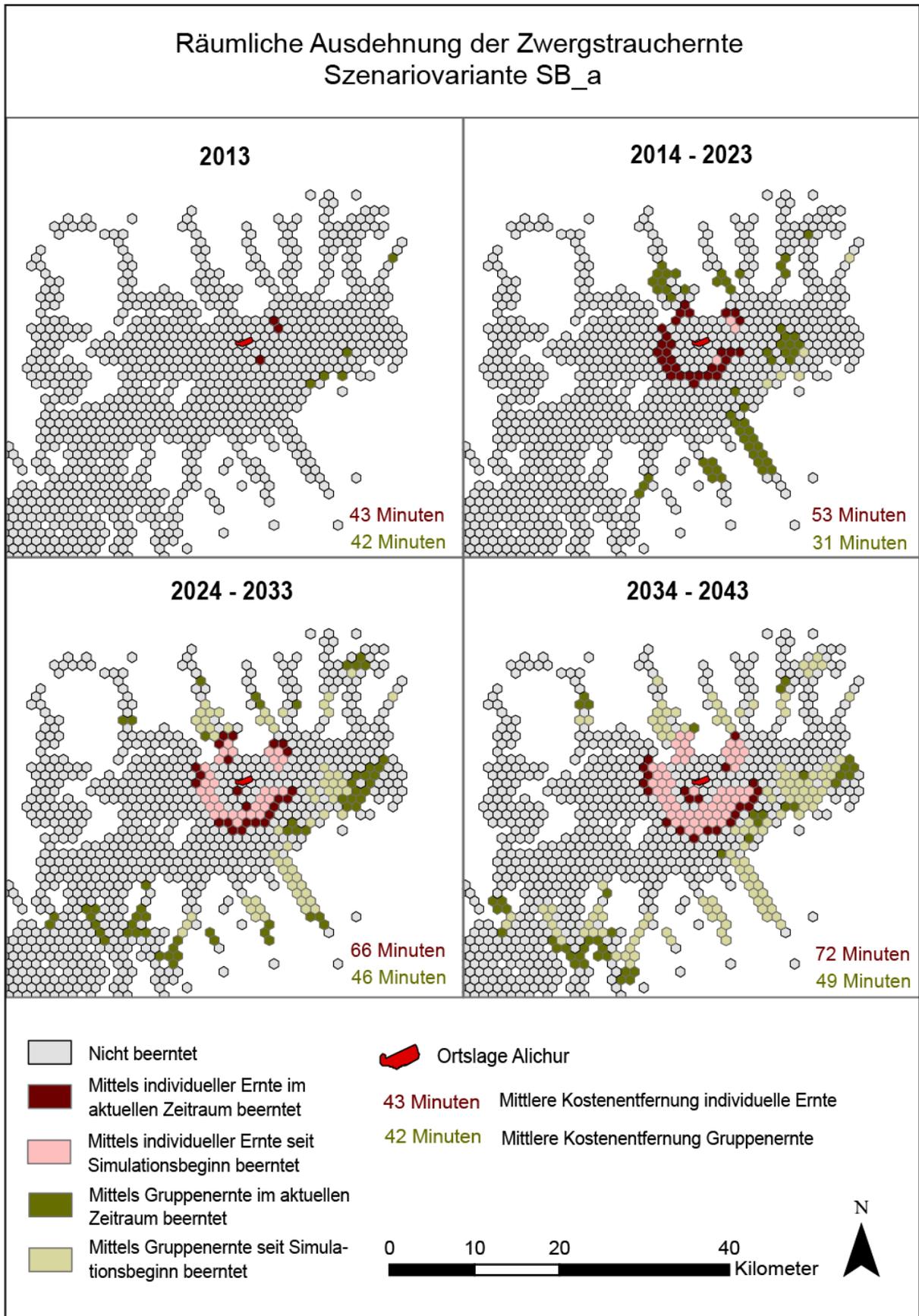


Abbildung 5-19: Räumliche Ausdehnung der individuellen Zwergstrauchernte und der Gruppenernte in Szenariovariante SB_a. Eigene Darstellung.

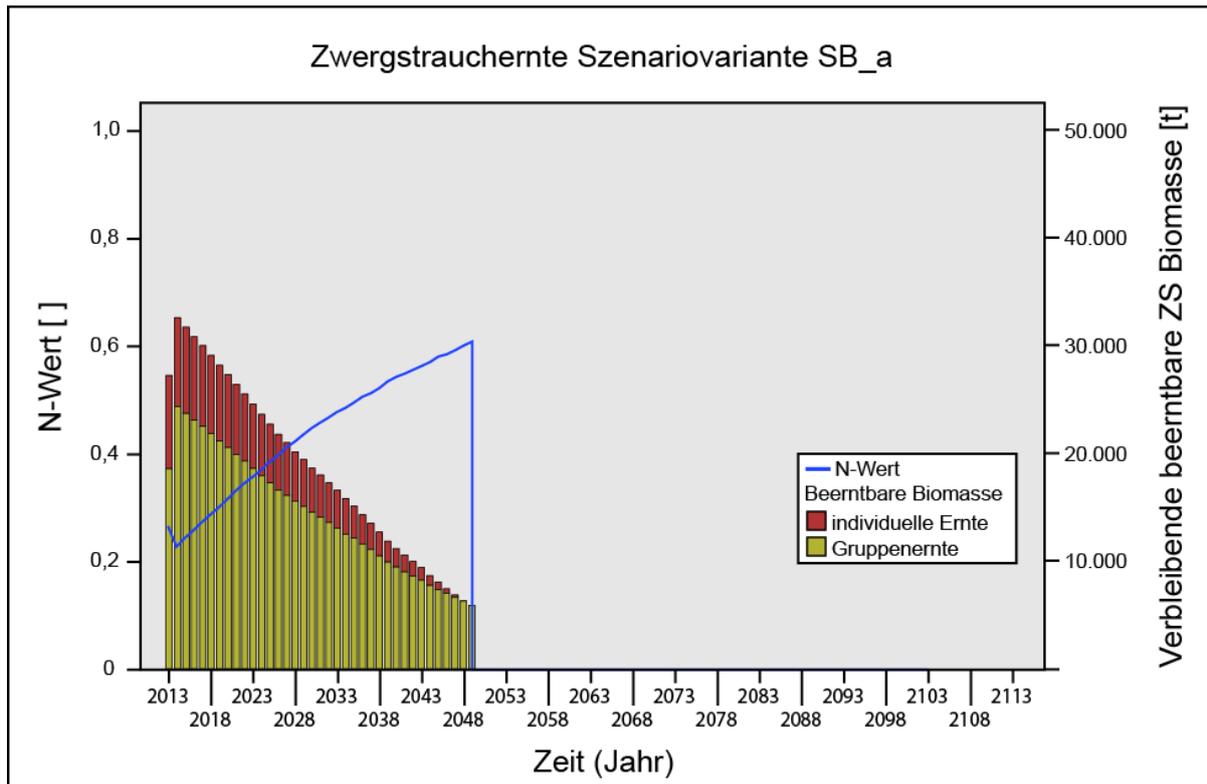


Abbildung 5-20: Verbleibende beerntbare Biomasse im Untersuchungsgebiet und Verlauf der N-Wert-Kurve in Szenariovariante SB_a. Die senkrechte Linie am Ende der N-Wert-Kurve stellt den Zeitpunkt des Systemzusammenbruchs dar. Eigene Darstellung.

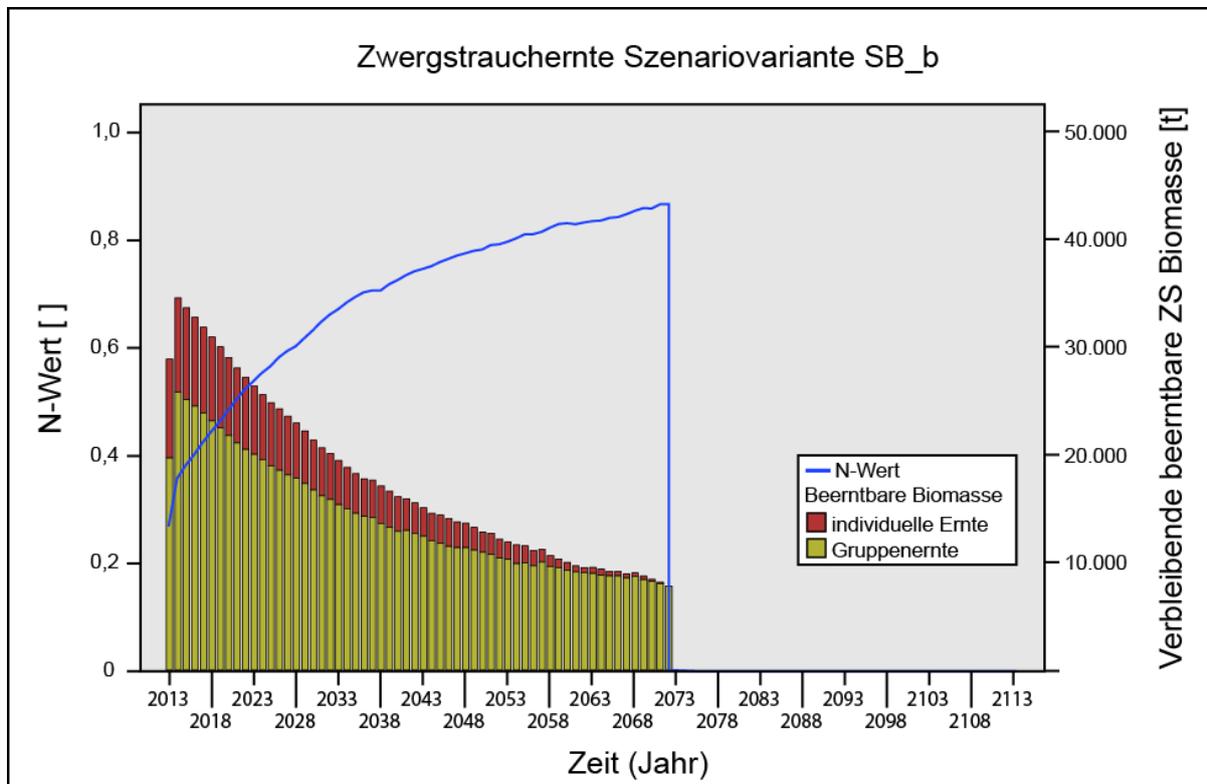


Abbildung 5-21: Verbleibende beerntbare Biomasse im Untersuchungsgebiet und Verlauf der N-Wert-Kurve in Szenariovariante SB_b. Die senkrechte Linie am Ende der N-Wert-Kurve stellt den Zeitpunkt des Systemzusammenbruchs dar. Eigene Darstellung.

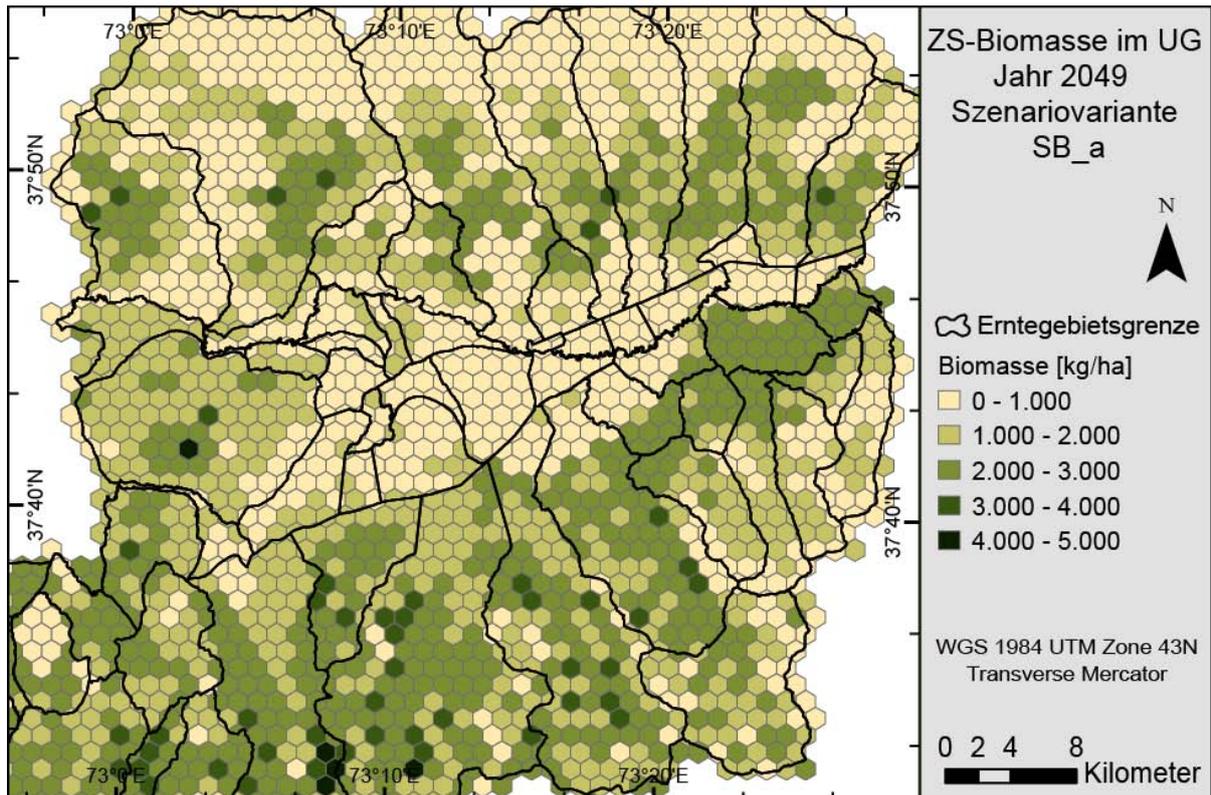


Abbildung 5-22: Zwergstrauchbiomasse im Untersuchungsgebiet im Jahr 2049, simuliert in Szenariovariante SB_a. Eigene Darstellung.

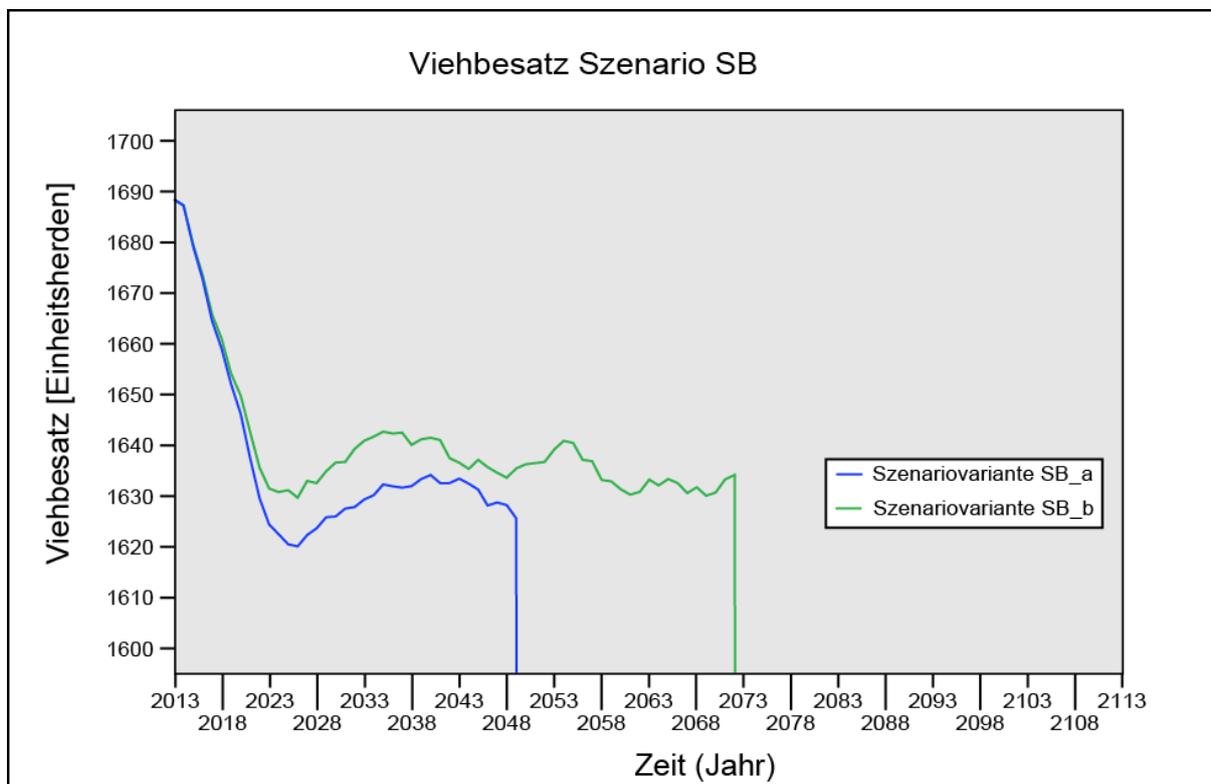


Abbildung 5-23: Entwicklung des Viehbesatzes im Szenario SB. Senkrechte Linien markieren den Zeitpunkt eines Systemzusammenbruchs. Eigene Darstellung.

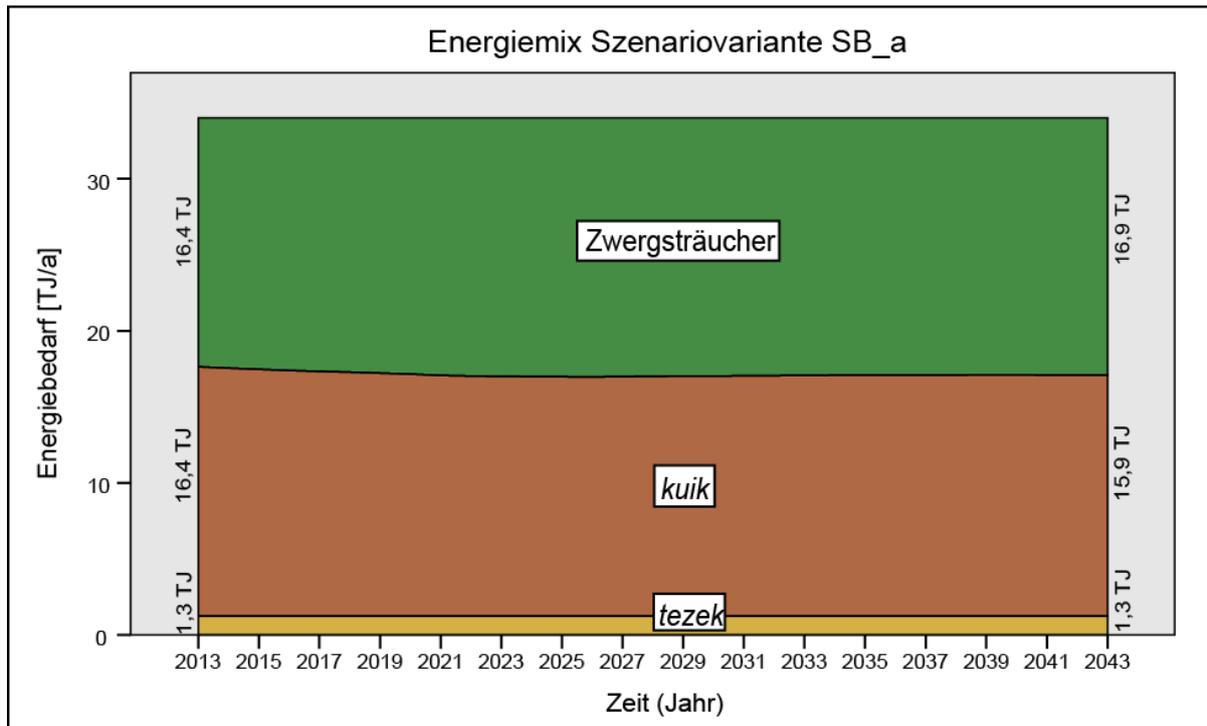


Abbildung 5-24: Aus Szenariovariante SB_a resultierender Energiemix. Eigene Darstellung.

Szenario Optimierung und Energieautarkie (SOE)

Der räumlich und zeitlich aufgelöste Verlauf der Zwergstrauchernte in Szenariovariante SOE_a ist für den Zeitraum von 2013 bis 2043 in Abbildung 5-25 dargestellt. Obwohl die individuelle Ernte im Szenario SOE nicht wie im Szenario BAU auf den Winterweiden stattfindet, werden in allen betrachteten Perioden im Szenario SOE im Vergleich zum Szenario BAU kürzere Strecken für die individuelle Ernte zurückgelegt. Dies ist einerseits durch den im Vergleich zum Szenario BAU geringeren Anteil der individuellen Ernte an der Gesamtzwergstrauchernte und andererseits durch den mit zunehmender Simulationsdauer rückläufigen Zwergstrauchbedarf bedingt. In der Periode 2014 bis 2023 findet die individuelle Ernte in 49 Minuten Entfernung von der Ortschaft Alichur (Szenariovariante SOE_a) bzw. in 48 Minuten Entfernung (Szenariovariante SOE_b) statt. Von 2024 bis 2033 müssen durchschnittlich 52 Minuten in Szenariovariante SOE_a und 49 Minuten in Szenariovariante SOE_b zu den individuell beerntbaren Erntegebieten zurückgelegt werden. Im Zeitraum 2034 bis 2043 sind es 54 Minuten bzw. 46 Minuten. Bis zum Jahr 2043 werden für die individuelle Ernte in den Szenariovarianten SOE_a und SOE_b nur 18 km² beansprucht. Dieser Wert liegt deutlich unter den entsprechenden Werten der Szenariovarianten BAU_a und BAU_b, welche mit 68 km² bzw. 72 km² ein Vielfaches dieser Werte betragen. Da sowohl im Szenario BAU als auch im Szenario SOE Winterweidegebiete bei der Gruppenernte gemieden werden, findet die Gruppenernte in

beiden Szenarien zunächst in sehr ähnlichen Gebieten statt. Bei einem zum Simulationsbeginn etwa gleichen Bedarf nach mittels Gruppenernte geernteter Zwergstrauchbiomasse ergeben sich in den Szenariovarianten SOE_a und SOE_b mit 49 Minuten und 47 Minuten annähernd die gleichen mittleren Kostenentfernungen für die Periode 2014 bis 2023 wie in den Szenariovarianten BAU_a und BAU_b. Durch Energieeinsparungen und einen steigenden Anteil von *kuik* am Energiemix nimmt der Bedarf nach Zwergstrauchbiomasse im Szenario SOE im Zeitraum 2024 bis 2033 deutlich ab. So bleibt die mittlere Entfernung der mittels Gruppenernte beernteten Zwergstrauchbestände in Szenariovariante SOE_a bis zum Jahr 2043 konstant bei 49 Minuten, im Szenariovariante SOE_b verringert sie sich sogar auf 45 Minuten im Zeitraum 2024 bis 2033 und auf 41 Minuten in der Periode 2034 bis 2043. Diese Werte liegen deutlich unter den sich im Szenario BAU in den entsprechenden Zeiträumen ergebenden Kostenentfernungen. Am Ende des simulierten Zeitraumes werden durch die Gruppenernte 106 km² in Szenariovariante SOE_a und 99 km² in Szenariovariante SOE_b in Anspruch genommen.

In Abbildung 5-26 und Abbildung 5-27 sind die für die simulierten Ernteformen verfügbaren Zwergstrauchbiomassen und die N-Werte im Simulationsverlauf dargestellt. Die individuell beerntbare Zwergstrauchbiomasse ist im Szenario SOE zum Simulationsbeginn um etwa 3.300 t niedriger als in den Szenarien BAU und SB. Sie beträgt damit nur etwa zwei Drittel der entsprechenden Werte aus diesen Szenarien. Der Grund für die Verringerung der individuell beerntbaren Zwergstrauchbiomasse im Szenario SOE liegt im Auslassen der Winterweiden bei der individuellen Ernte. Trotz der geringeren verfügbaren Zwergstrauchbiomasse gefährdet der Zustand der individuell beerntbaren Zwergstrauchbestände im Szenario SOE zu keinem Zeitpunkt das Energiesystem von Alichur. Über den simulierten Zeitraum von 100 Jahren findet in Szenariovariante SOE_a ein leichter Abbau der individuell beerntbaren Zwergstrauchbiomasse von 5.700 t auf 4.000 t statt. In Szenariovariante SOE_b können im Jahr 2113 ortsnah noch knapp 4.900 t Zwergsträucher beerntet werden. Der verfügbare Bestand an mittels Gruppenernte beerntbarer Zwergstrauchbiomasse ist zum Simulationsbeginn im Szenario SOE identisch mit jenem im Szenario BAU. Im Simulationsverlauf der Szenariovariante SOE_a sinkt die mittels Gruppenernte beerntbare Zwergstrauchbiomasse auf einen Wert von 6.850 t im Jahr 2113 ausgehend von 19.300 t zum Simulationsbeginn. Ab dem Jahr 2033 entschleunigt sich der Vorratsabbau hier jedoch zunehmend, so dass auch über die simulierte Periode hinaus in

dieser Szenariovariante nicht mit einem vollständigen Abbau der Gruppenerntebestände gerechnet werden muss. Im Szenariovariante SOE_b nimmt nach einem anfänglichen Vorratsabbau die für die Gruppenernte verfügbare Zwergstrauchbiomasse ab dem Jahr 2033 wieder zu. Im Jahr 2113 sind hier 13.350 t Zwergstrauchbiomasse mittels Gruppenernte beerntbar. In beiden SOE Szenariovarianten steigt der N-Wert während der Phase der Energieeinsparung in der Periode von 2013 bis 2033 steil an. Ab dem Jahr 2033 wird ein N-Wert von 1 angenähert. Im Szenariovariante SOE_b wird zwischenzeitlich ein maximaler N-Wert von fast 1,4 erreicht. Die in beiden SOE Szenariovarianten abgebildeten Energiesysteme sind nachhaltig.

Abbildung 5-28 zeigt die räumliche Zwergstrauchbiomasseverteilung im Jahr 2113, wie sie sich aus der Simulation in Szenariovariante SOE_a ergibt. Der Vergleich von Abbildung 5-28 mit der aktuellen Zwergstrauchbiomasse in Abbildung 4-19 zeigt nur geringfügige Unterschiede. Verändert haben sich hier vordergründig die am dichtesten bestandenen Gebiete in Ortsnähe. So wurde die Zwergstrauchdichte der mit über 3.000 kg/ha bestandenen Flächen östlich und südwestlich von Alichur in Szenariovariante SOE_a größtenteils auf unter 3.000 kg/ha verringert. Die mit einem Anteil von 10 % an der Gesamtzwergstrauchernte im Szenario SOE sehr extensiv betriebene individuelle Ernte wirkt sich kaum auf den Zwergstrauchbestand im Jahr 2113 aus. Es zeigen sich im ortsnahen Bereich kaum Unterschiede zwischen den beiden Karten. Auch die durchschnittliche Zwergstrauchdichte im Untersuchungsgebiet liegt mit 1.536 kg/ha im Jahr 2113 nur etwa 3 % unter der gegenwärtigen Zwergstrauchdichte im Gebiet Alichur.

Zu Simulationsbeginn ist der Energiemix im Szenario SOE geprägt durch einen mit 20,1 TJ/a um 3,7 TJ/a höheren Anteil an *kuik* als im Szenario BAU. Der hohe *kuik*-Anteil kompensiert die in diesem Szenario fehlenden Kohleimporte in das Energiesystem komplett. Bei gleichbleibendem *tezek*-Anteil kann auch ein geringer Teil des Zwergstrauchbedarfs im Szenario SOE durch den Energieträger *kuik* ersetzt werden. So ist der Ausgangsbedarf nach Zwergsträuchern mit 12,7 TJ/a im Szenario SOE um 0,5 TJ/a geringer als im Szenario BAU. Die in den ersten 20 Jahren des Szenarios SOE simulierte jährliche Energieeinsparung von 1 % führt zu einem starken Rückgang des Zwergstrauchbedarfs in dieser Zeit. Im Jahr 2033 ist der Zwergstrauchbedarf mit 6,4 TJ/a schließlich nur noch halb so groß wie zu Simulationsbeginn. Während des Simulationszeitraumes nimmt der *kuik*-Anteil leicht um 0,2 TJ/a auf 20,3 TJ/a im Jahr 2043 zu. Diese Zunahme ist durch die Verbesserung der Winter-

weidequalität aufgrund des verbesserten Ressourcenmanagements in diesem Szenario zu erklären. Der Viehbestand vergrößert sich während der ersten 30 simulierten Jahre in Szenariovariante SOE_a kontinuierlich von 2.066 Einheitsherden im Jahr 2013 auf 2.086 im Jahr 2043 und in Szenariovariante SOE_b auf 2.095 Einheitsherden im Jahr 2043. Über die simulierte Periode hinaus wird in beiden Szenariovarianten ein Viehbesatz von etwa 2.110 Einheitsherden angenähert (Siehe Abbildung 5-29). Abbildung 5-30 bildet den Verlauf des Energiemixes aus der Szenariovariante SOE_a ab. Der Verlauf des Energiemixes aus Szenariovariante SOE_b ist im Zeitraum 2013 bis 2043 identisch.

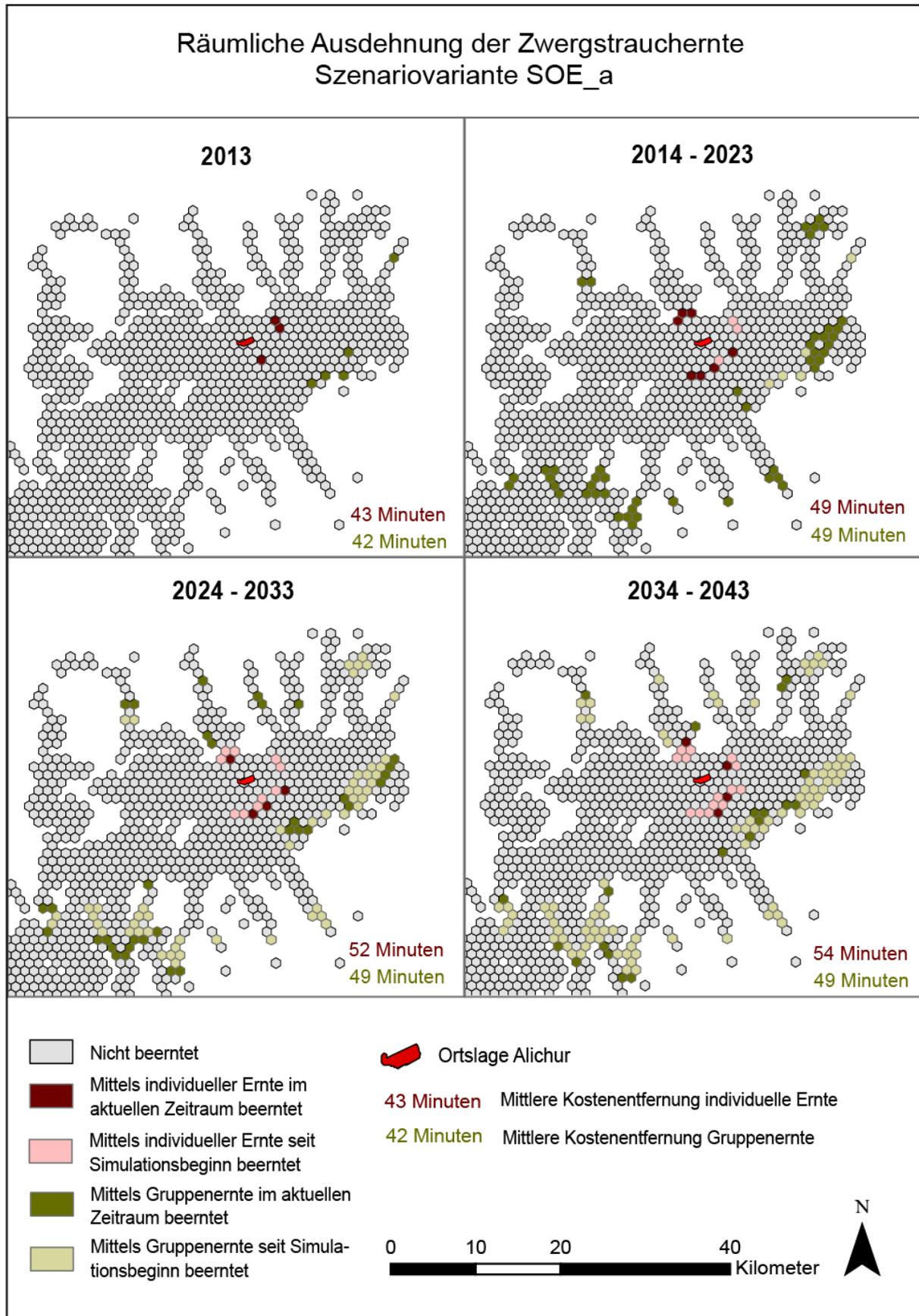


Abbildung 5-25: Räumliche Ausdehnung der individuellen Zwergstrauchernte und der Gruppenernte in Szenariovariante SOE_a. Eigene Darstellung.

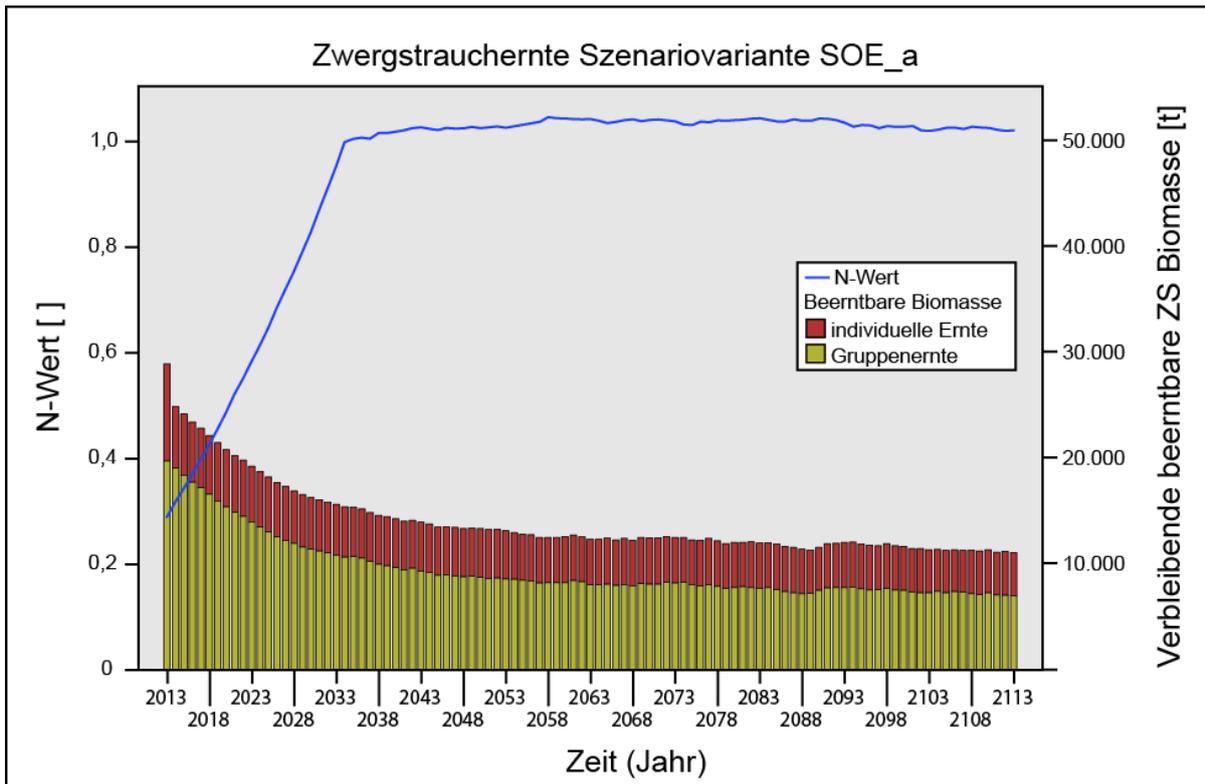


Abbildung 5-26: Verbleibende beerntbare Biomasse im Untersuchungsgebiet und Verlauf der N-Wert-Kurve in Szenariovariante SOE_a. Eigene Darstellung.

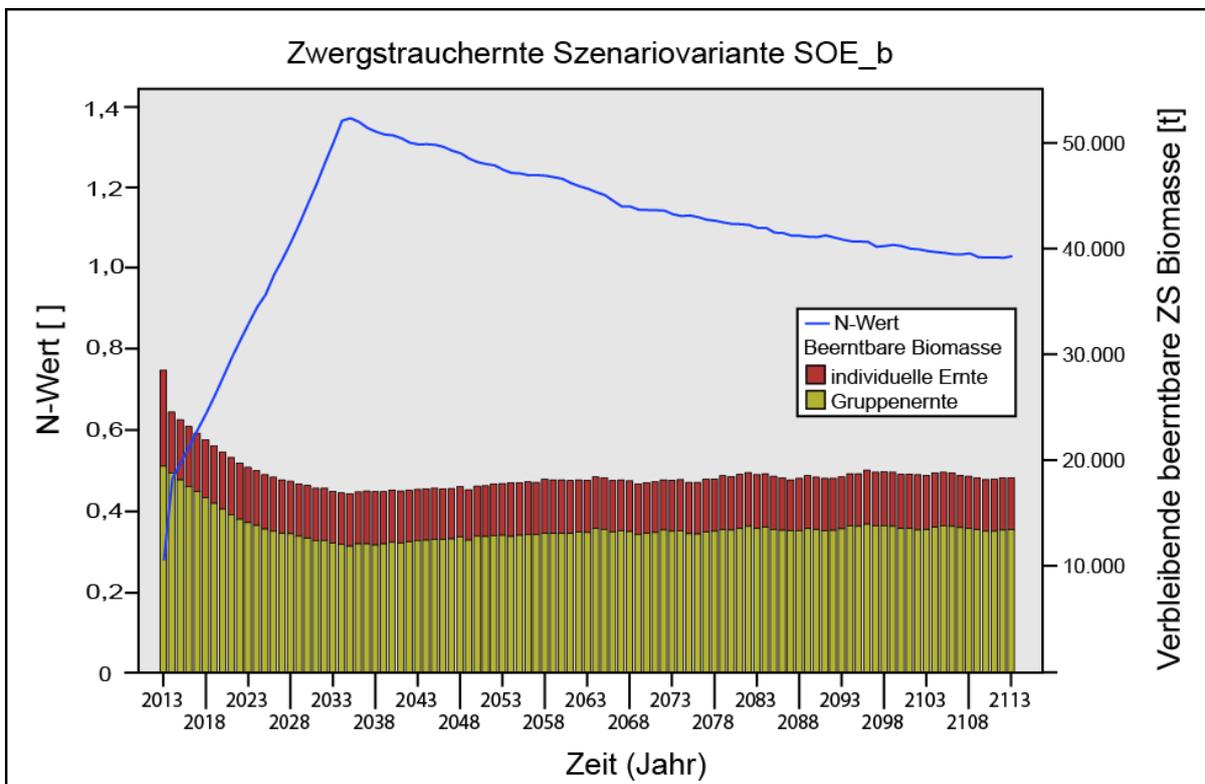


Abbildung 5-27: Verbleibende beerntbare Biomasse im Untersuchungsgebiet und Verlauf der N-Wert-Kurve in Szenariovariante SOE_b. Eigene Darstellung.

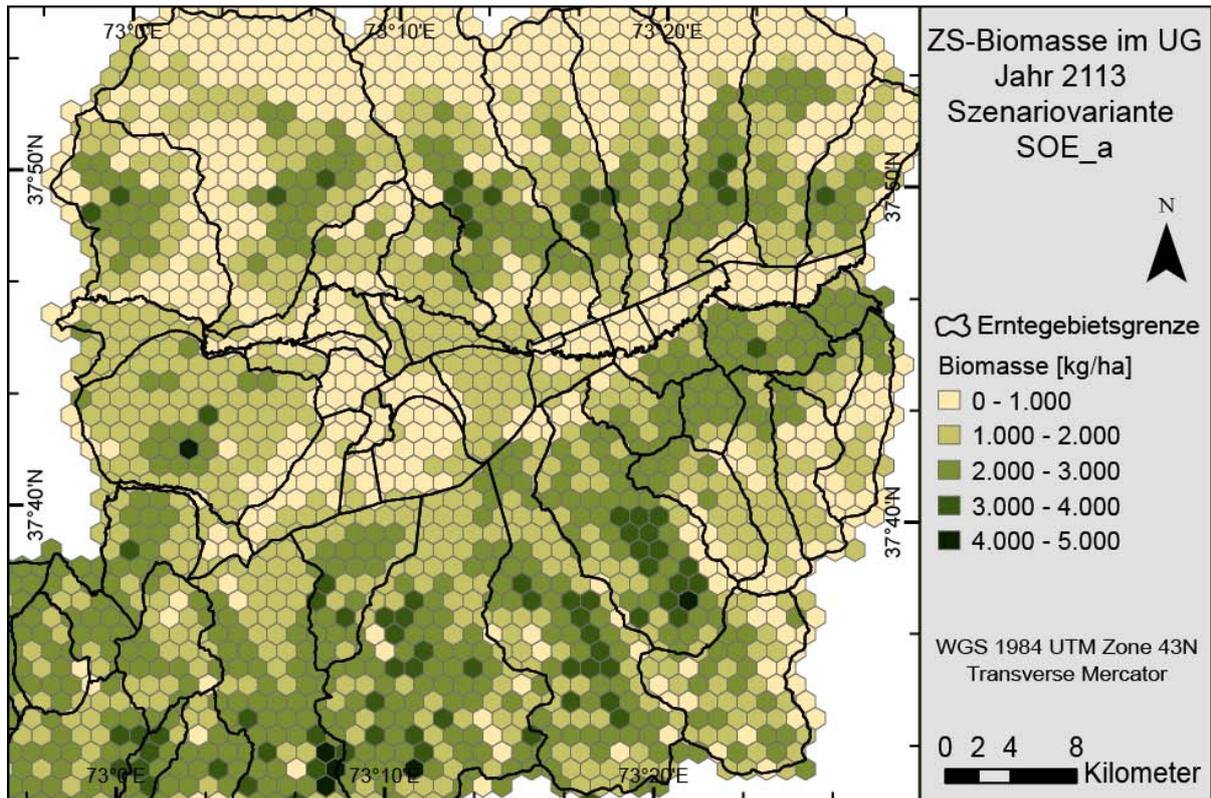


Abbildung 5-28: Zwergstrauchbiomasse im Untersuchungsgebiet im Jahr 2115, simuliert in Szenariovariante SOE_a. Eigene Darstellung.

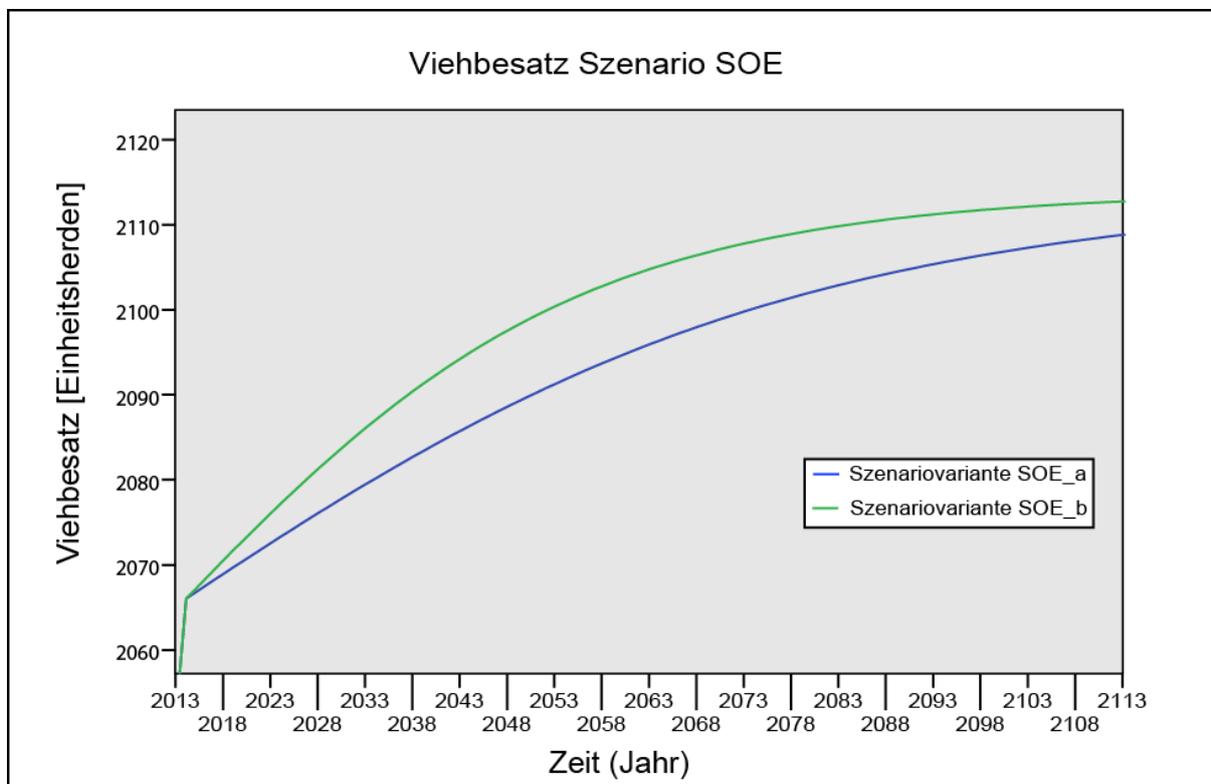


Abbildung 5-29: Entwicklung des Viehbesatzes im Szenario SOE. Eigene Darstellung.

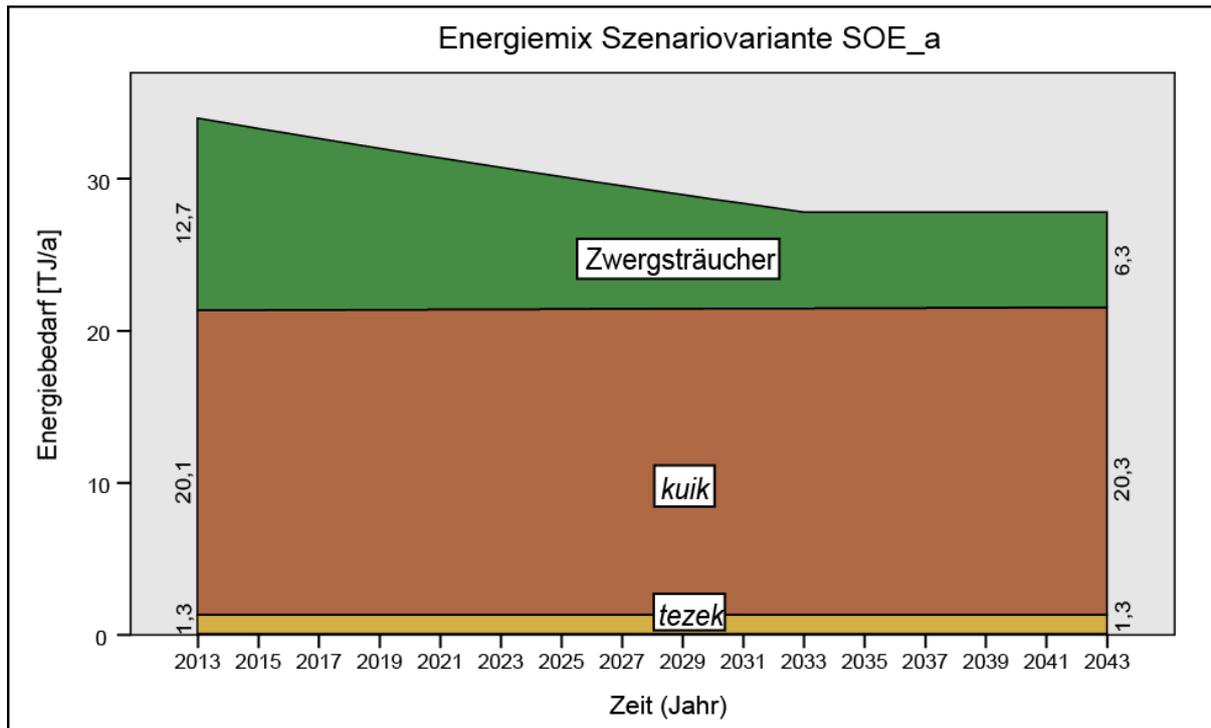


Abbildung 5-30: Aus der Szenariovariante SOE_a resultierender Energiemix. Eigene Darstellung.

6 SCHLUSS

In diesem Kapitel werden zunächst die in der Zielstellung dieser Arbeit aufgestellten Hypothesen diskutiert (Teilkapitel 6.1). Eine kritische Auseinandersetzung mit den Simulationsergebnissen des *Energiemodell Alichur* erfolgt in Teilkapitel 6.2, bevor in Teilkapitel 6.3 abschließend die Repräsentativität der Modellergebnisse für die gesamte Region Ost-Pamir besprochen wird.

6.1 SYNTHESE

Ziel dieser Arbeit war es, eine Methode für die Simulation von Energiesystemen, welche durch einen hohen Anteil biogener Energieträger dominiert sind, zu entwickeln. Der entwickelte Modellierungsansatz sollte durch die Betrachtung des Energiesystems von Alichur Anwendung finden. In der Zielstellung dieser Arbeit wurden sowohl Hypothesen, welche die Methodenentwicklung betreffen (Hypothese 1 und 2), als auch solche, die sich auf das Fallbeispiel von Alichur beziehen (Hypothese 3 bis 5), aufgestellt. Diese Hypothesen sollen nachfolgend diskutiert werden.

Hypothese 1) Von biogenen Energieträgern geprägte Energiesysteme lassen sich mit optimierenden Energiesystemmodellen, einem Standardtool der Energiewirtschaft, nicht adäquat abbilden.

Die Eigenschaften *Raumbezug*, *Flächenkonkurrenz*, *Systemrückkopplungen*, *Saisonalität* und *Versorgungsunsicherheit* wurden als für biomassedominierte Energiesysteme bedeutend identifiziert. Diese Eigenschaften spielen in konventionellen Energiesystemen keine oder eine untergeordnete Rolle. Es wurden folgende Modellanforderungen für ein Modell zur Abbildung dieser Funktionen formuliert: Dynamisch kontinuierliche Simulation, Raumbezug, numerische Lösung von Modellgleichungen zur Abbildung von Rückkopplungen im System, stark prozessorientierte Modellstruktur und Top-down Betrachtungsweise. Stellvertretend für die Klasse der optimierenden Energiesystemmodelle wurde die Software PlaNet untersucht. PlaNet erfüllt einen Großteil der aufgestellten Modellanforderungen nicht. So kann PlaNet keine Rückkopplungen in Energiesystemen abbilden, weil Modellgleichungen analytisch gelöst werden, bietet keine räumliche Auflösung und ist nur teilweise prozessorientiert. Hypothese 1 konnte somit verifiziert werden.

Hypothese 2) Das Energiesystem von Alichur (Tadschikistan) ist geeignet, um die besonderen Anforderungen biomassedominierter Energiesysteme an Energiesystemmodelle zu verdeutlichen.

Die Analyse des Energiesystems von Alichur hat ergeben, dass 90,3 % des Energiebedarfs (ohne Transport) in Alichur im Jahr 2012 durch regional erzeugte biogene Energieträger befriedigt wurden. Damit kann das Energiesystem von Alichur als biomassedominiert bezeichnet werden. Mit einem Anteil von knapp 40 % am Energiemix spielen Zwergsträucher in Alichur eine wichtige Rolle. Dieser Energieträger ist durch einen starken Raumbezug charakterisiert. Zudem steht die thermische Nutzung von Zwergstrauchbiomasse in direkter Konkurrenz zur Weidenutzung. Da auch Viehdung als Energieträger Verwendung findet, ergibt sich aus dieser Konkurrenz eine wichtige Rückkopplung im Energiesystem von Alichur. Die Energieträgerverfügbarkeit in Alichur unterliegt einer Saisonalität, welche beispielsweise bei ungünstigen Witterungsverhältnissen zu Versorgungsengpässen führen kann. Im Energiesystem von Alichur zeigen sich somit sämtliche bei der Bearbeitung von Hypothese 1 identifizierte charakteristische Eigenschaften. Es eignet sich daher als Fallbeispiel, um die besonderen Anforderungen biomassedominierter Energiesysteme an Energiesystemmodelle zu verdeutlichen.

Hypothese 3) Die Energienutzung in Alichur erfolgt nicht nachhaltig und ist Teil des *Tereskensyndroms*. Der Energiebedarf der Bevölkerung von Alichur wird daher zukünftig ohne Optimierung oder externe Subventionen nicht mehr befriedigt werden können.

Für die Analyse des Energiesystems von Alichur wurde das System Dynamics-GIS-Hybridmodell *Energiemodell Alichur* erstellt. Innerhalb des Szenarios Business-as-usual (BAU) wurden die Entwicklung der lokalen Zwergstrauchbestände und die Zwergstrauchverfügbarkeit zur energetischen Nutzung in zwei Szenariovarianten betrachtet. Im Szenario BAU_a, welches eine eher niedrige Zwergstrauchzuwachsrate annimmt, werden innerhalb der nächsten 55 Jahre sämtliche erreichbaren Zwergstrauchbestände aufgebraucht. Wird also die gegenwärtige Energienutzungsweise beibehalten, ist nach diesem Szenario spätestens im Jahr 2068 mit einer Verknappung des Energieträgers Zwergstrauch zu rechnen. Im Jahr 2068 verbleiben im Untersuchungsgebiet in Szenario BAU_a durchschnittlich 1.476 kg/ha Zwergstrauchbiomasse, 107 kg/ha weniger als im Jahr 2013. Das Szenario BAU_b, welches eine

im Vergleich zum Szenario BAU_a etwas höhere Zuwachsrate der Zwergsträucher annimmt, führt zu einem anderen Ergebnis. Zwar erfolgt auch in diesem Szenario innerhalb der nächsten 100 Jahre in der Umgebung Alichurs ein Abbau der Zwergstrauchvorräte, jedoch kommt es dabei zu keiner Verknappung des Rohstoffes. Am Ende der simulierten Periode gleicht hier der Zwergstrauchzuwachs die Menge der jährlich thermisch verwerteten Biomasse aus. Es kann also von einer nach CARLOWITZ (1732, S. 105–106) nachhaltigen Nutzung gesprochen werden. Aufgrund der unterschiedlichen Ergebnisse aus Szenario BAU_a und BAU_b konnte Hypothese 3 nicht abschließend bestätigt oder falsifiziert werden. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass die Zwergstrauchbestände in der Region ausreichen, um die gegenwärtige Energienutzung in Alichur in naher bis mittlerer Zukunft sicherzustellen. Auch die Viehwirtschaft der Region wird bei einem Beibehalten der gegenwärtigen Ernteweise nicht nennenswert durch die thermische Zwergstrauchnutzung beeinträchtigt. Szenario BAU_a zeigte zudem, dass sich die gegenwärtige mittlere Zwergstrauchbiomassendichte nur um 6,8 % verringert, selbst wenn sämtliche für die thermische Nutzung geeigneten Zwergstrauchbestände abgeerntet würden. Die Ergebnisse des Szenarios BAU legen nahe, dass eine Degradation der Zwergstrauchbestände in der Region Alichur trotz der intensiven Zwergstrauchernte entgegen dem Konzept des *Tereskensyndroms* keinen flächendeckenden Charakter annimmt.

Hypothese 4) Das Energiesystem von Alichur ist durch eine selbstverstärkende Wirkungskette bedroht: Durch eine Übernutzung der Zwergsträucher wird dem Weidevieh eine wichtige Futterquelle entzogen, wodurch sich der Anteil des Energieträgers Dung am Energiemix verringert. Es werden zunehmend mehr Zwergsträucher benötigt, um diesen Ausfall zu kompensieren.

Limitierender Faktor für die Viehhaltung im Ost-Pamir ist die Weidekapazität der Winterweiden. Eine konkurrierende Nutzung zwischen Beweidung und Zwergstrauchernnte findet daher nur auf den Winterweiden statt. Während gegenwärtig die Zwergstrauchernte nur auf den ortsnahen Winterweiden praktiziert wird, wurde der Konflikt zwischen Beweidung und thermischer Zwergstrauchnutzung im Szenario Breckle (SB) auf sämtliche Winterweidegebiete ausgeweitet, um Hypothese 4 zu erforschen. Im Szenario SB wurde innerhalb der ersten dreizehn simulierten Jahre tatsächlich eine durch die Zwergstrauchernte auf den Winterweiden hervorgerufene Verringerung der Weidekapazität und damit des Viehbestandes um bis zu 5 % festgestellt.

Dieser Rückgang führte zu einer Verringerung des verfügbaren *kuik* von ca. 40 t/a (0,5 TJ/a) und einem Mehrbedarf an Zwergsträuchern von ca. 28 t/a. Nach dieser Periode jedoch verringerte sich die Weidekapazität in der Region nicht weiter. Grund hierfür ist, dass die Weidekapazität der für den Viehbesatz wichtigen Winterweiden zu großen Teilen durch Gräser und Kräuter, sowie durch Polsterpflanzen bereitgestellt wird. Zudem verbleiben auch nach der Zwergstrauchernte, besonders nach der Gruppenernte, noch relevante Zwergstrauchbiomassen auf den Weideflächen, die nicht erreichbar sind oder aufgrund ihrer geringen Dichte nicht wirtschaftlich geerntet werden können. Bei einem Gesamtbedarf nach Zwergsträuchern von ca. 910 t/a zu Simulationsbeginn beträgt der durch die Entnahme der Zwergsträucher auf den Winterweiden verursachte Anstieg des Zwergstrauchbedarfs nur etwa 3 %. Deutlich stärker als die Zwergstrauchernte auf den Weideflächen würde sich beispielsweise eine Einstellung der Kohleimporte auf den Zwergstrauchbedarf in der Region auswirken. Würden die Kohleimporte von gegenwärtig 9,3 t/a komplett eingestellt, ergäbe sich ein jährlicher Mehrbedarf an Zwergsträuchern von etwa 180 t/a, also knapp 20 %. Die Hypothese 4, wonach sich durch die Zwergstrauchernte auf den Weideflächen eine für das Gesamtenergiesystem von Alichur relevante selbstverstärkende Wirkungskette ergibt, konnte im Szenario SB nicht bestätigt werden.

Hypothese 5) Es ist möglich, durch Optimierung der gegenwärtigen Nutzungsmuster den aktuellen Energiebedarf der Bevölkerung von Alichur nachhaltig auf der zur Verfügung stehenden Fläche nur aus Biomasse (Dung und Zwergsträucher) zu befriedigen.

Die Untersuchung des Energiesystems von Alichur hat gezeigt, dass die Menge der jährlich nutzbaren Biomasse in der Region Alichur nicht allein von äußeren Faktoren wie Klima oder Bodengüte bestimmt wird. Vielmehr ist sie zusätzlich von der Nutzungsweise durch die lokale Bevölkerung abhängig. Dabei ist es genauso möglich, Zwergstrauchbestände zu übernutzen und damit ihre zukünftige Produktivität zu verringern, wie auch durch eine ausbleibende oder zu extensive Beerntung mögliche Zuwächse nicht auszuschöpfen. Szenario BAU_b hat gezeigt, dass die gegenwärtige Nutzung der lokalen Biomasse möglicherweise bereits nachhaltig im Sinne von CARLOWITZ (1732 S: 105–106) erfolgt. Weiterhin zu klären war, ob auch die Kohleimporte, welche gegenwärtig etwa 9,3 % des Energiebedarfs von Alichur befriedigen, durch ein optimiertes Management nachhaltig durch lokal erzeugte Biomasse ersetzt werden können. Hierzu wurde das Szenario Optimierung und Energieautarkie (SOE)

definiert. Neben einer verbesserten räumlichen Nutzung der Ressource Zwergsträucher wurde in diesem Szenario eine Energieersparnis von 1 % pro Jahr über die nächsten 20 Jahre angenommen. Im Ergebnis hat das Szenario SOE gezeigt, dass bei beiden angenommenen Zwergstrauchzuwachsraten ein nachhaltiges Management nur mit lokalen Energieträgern möglich ist. Die Ausweitung des Gruppenernteanteils von gegenwärtig 71 % auf 90 % führt in Szenario SOE langfristig zu höheren Zuwachsraten. Energieeinsparungen wirken sich direkt mindernd auf die Zwergstrauchernte aus. Die gegenwärtige durchschnittliche Zwergstrauchbiomassendichte in der Region Alichur verringert sich bei rechtzeitiger Umstellung auf ein verbessertes Management mittelfristig um nicht einmal 3 %. Hypothese 5 konnte somit bestätigt werden.

6.2 KRITISCHE BETRACHTUNGEN

Eine wichtige Eigenschaft von Modellen ist die Verkürzung, d.h. die vereinfachte Abbildung der Realität. Da somit immer Aspekte eines betrachteten Systems außer Acht gelassen werden müssen, sind alle Modelle falsch (VOINOV 2008, S. 5). Trotzdem können Modelle und der Prozess des Modellierens nützlich sein. Ziel des Modellierens ist es, das große Ganze abzubilden. Hierzu ist es wichtig, nur die für eine bearbeitete Fragestellung relevanten Teile eines Systems im Modell zu berücksichtigen. Die Validität der mit einem Modell gewonnenen Erkenntnisse hängt schließlich ganz entscheidend davon ab, wie gut dieses gelingt.

Auch das *Energiemodell Alichur* stellt eine starke Vereinfachung des realen Systems Alichur dar. Wichtige Vereinfachungen wurden bei der Abbildung des Erteverhaltens, speziell bei der Abbildung dessen räumlicher Dynamik getroffen. So bildet das *Energiemodell Alichur* nur die zwei Ernteformen individuelle Ernte und Gruppenernte ab. Tatsächlich wurden jedoch zusätzlich die Motorradernernte und die kombinierte Ernte in der Region beschrieben. Über diese Klassifizierung hinaus besteht die Ortschaft Alichur in der Realität aus Individuen, die Anhand von verschiedenen Kriterien individuell und subjektiv entscheiden, ob sie Zwergsträucher ernten, wo in der Region sie diese Ernten und wie intensiv sie ernten. Ganz ähnlich verhält es sich mit der Zusammensetzung des Energiemixes. Auch hier spielen individuelle Entscheidungen eine Rolle. Denkbar ist beispielsweise, dass sich die Individuen in ihrem Verhalten gegenseitig beeinflussen. Als Top-down-Modell wird den einzelnen Akteuren im *Energiemodell Alichur* keine Beachtung geschenkt. Der Bedarf nach Energie-

dienstleistungen ist im *Energiebedarf Alichur* nicht funktional mit der Verfügbarkeit bzw. den Kosten der betrachteten Energieträger verbunden. Bei der Energiesystemanalyse wurde jedoch festgestellt, dass beispielsweise der gegenwärtige Wärmekonsum in Alichur nicht dem tatsächlichen Bedarf entspricht. An dieser Stelle besteht Erweiterungspotenzial beim *Energiemodell Alichur*.

Die Bestandes- und Wachstumsparameter der betrachteten Region wirken sich in besonderer Weise auf die Simulationsergebnisse des *Energiemodell Alichur* aus. Dennoch sind die ermittelten Werte mit teilweise erheblichen Unsicherheiten behaftet. Das räumliche Zwergstrauchbiomassepotenzial der bereits in der Vergangenheit beernteten Bestände in der Region Alichur ist weitestgehend unbekannt. Im *Energiemodell Alichur* wurde das Potenzial bereits beernteter Gebietsabschnitte anhand der maximalen gegenwärtigen Zwergstrauchbiomasse in den entsprechenden Erntegebieten grob abgeschätzt. Hier wurden allgemein sehr niedrige Werte angenommen. Auch der Zuwachs unter Optimalbedingungen konnte nur grob abgeschätzt werden. Um den damit verbundenen Unsicherheiten zu begegnen, wurde mit Szenariovarianten gerechnet.

Im Bereich der Weidekapazität liegt der Fokus im *Energiemodell Alichur* allein auf den Winterweiden. Deren genaue Biomasseverfügbarkeit während der entscheidenden Wintermonate war jedoch schwer zu quantifizieren. So mussten die je nach Tierart unterschiedlichen Ansprüche an die Futterpflanzen und die Beweidungsradien rund um die Weidelager mit Hilfe der Rechengröße *Einheitsherde* zur Abbildung im *Energiemodell Alichur* vereinfacht werden. Auch für die Einschränkung der Biomasseerreichbarkeit bei Schneebedeckung musste auf Schätzwerte zurückgegriffen werden. Bei der räumlichen Abbildung im vergleichsweise groben 1 km² Raster des *Energiemodell Alichur* ergaben sich zusätzliche Unsicherheiten. Bei den Felduntersuchungen konnte keine herausragende Bedeutung der Zwergsträucher als Winterfutter festgestellt werden. Auf einem Großteil der Winterweiden, welche sich bevorzugt in den Niederungen befinden, kommen nur wenige Zwergsträucher vor. Sollten Zwergsträucher dennoch, z.B. bei außergewöhnlich starker Schneebedeckung, eine Schlüsselfunktion für das Überleben der Viehbestände besitzen, so müsste das *Energiemodell Alichur* entsprechend angepasst werden, um diesen Mechanismus adäquat abzubilden.

Neben allen Unsicherheiten mit denen Modellergebnisse behaftet sind, können auch ungenaue Modelle für gültige Vorhersagen von Trends in Systemen verwendet werden. Zudem bietet bereits der Prozess des Modellierens an sich einen Mehrwert für das Systemverständnis (BEVEN 2009, S. 3). Durch das Analysieren und mathematische Formulieren von Systemzusammenhängen erfolgt eine intensive Beschäftigung mit einem betrachteten System, die zu neuen Erkenntnissen führt. Selbst in dem Fall, dass sich die Vorhersagen eines Modells als falsch herausstellen, kann ein solches Modell als Vorstufe für ein durch erneutes Überprüfen der Modellannahmen verbessertes Modell dienen. Auch unpräzise Modelle stellen somit wichtige Schritte auf dem Weg zum besseren Systemverständnis dar. In diesem Sinne darf das *Energiemodell Alichur* als wichtiger Teil zu einem umfassenden Verständnis des Energiesystems von Alichur betrachtet werden, auch wenn bei der Interpretation der Modellergebnisse die zugrundeliegenden Unsicherheiten beachtet werden müssen.

6.3 AUSBLICK

In dieser Arbeit wurde dargelegt, welche Besonderheiten bei der Modellierung biomassedominierten Energiesysteme beachtet werden müssen und welche Modellierungsansätze für die Analyse dieser geeignet sind. Für die Fallstudie Alichur wurde ein System-Dynamics-GIS-Hybridmodell auf Basis der Software Simile und Arc Info zur Abbildung eines biomassedominierten Energiesystems erstellt. Die Formulierung dieses Energiemodells war mit einem hohen Grad an Arbeitsaufwand verbunden. Grund für diesen hohen Arbeitsaufwand war der Umstand, dass auf dem Gebiet der biomassedominierten Energiesysteme bisher keine vorgefertigten Softwarelösungen, welche vergleichbar mit optimierenden Simulationsmodellen wie MESAP sind, existieren. Rücken zukünftig verstärkt auch biomassedominierte Energiesysteme in den Fokus der Energiesystemanalyse, ist es arbeitssparend, die Struktur des *Energiemodell Alichur* für andere Fallstudien weiterzuentwickeln.

Im *Energiemodell Alichur* erfolgt erstmals eine fundierte datenbasierte Analyse des menschlichen Einflusses auf die Zwergstrauchbestände einer Teilregion des Ost-Pamir. Die Untersuchung der relevanten Wirkmechanismen erfolgte im *Energiemodell Alichur* mittels quantitativer, räumlich und zeitlich dynamischer Untersuchung von Zwergstrauchernte und Zwergstrauchzuwachs, sowie Untersuchungen zu den Wechselbeziehungen zwischen thermischer Zwergstrauchnutzung und Weide-

qualität. Die im Untersuchungsgebiet erhobenen Felddaten und die Ergebnisse der Modellierung zeichnen ein Bild, welches das von BRECKLE UND WUCHERER (2006, S. 233) beschriebene *Tereskensyndrom* in der Ortschaft Alichur in Frage stellt. Zwar zeigen auch die Simulationsergebnisse des *Energiemodell Alichur* eine intensive Nutzung der Zwergstrauchbestände in fußläufiger Entfernung zur Ortschaft Alichur. Bezogen auf das gesamte Untersuchungsgebiet konnte über alle Szenarien hinweg jedoch ein maximaler Rückgang der Zwergstrauchbiomasse von 10 % ermittelt werden. Der in BRECKLE UND WUCHERER (2006, S. 233) beschriebene intensive menschliche Einfluss auf die Zwergstrauchbestände der Region ist somit stark regional begrenzt. Kurz bis mittelfristig darf für die Bewohner der Ortschaft Alichur bei gleichbleibender Nutzungsweise die Zwergstrauchversorgung als gesichert gelten. Energieeinsparungen und Kohleimporte führen direkt zu einer verringerten Höhe des Zwergstrauchanteils am Energiemix in der Region Alichur. Sie stellen ein mögliches Mittel zur langfristigen Sicherung der Existenzgrundlage der lokalen Bevölkerung dar. Noch zu klären ist, inwieweit die Ergebnisse der Fallstudie Alichur Gültigkeit für andere Siedlungen im Ost-Pamir besitzen. Als entscheidend für die Versorgungssicherheit der Siedlungen im Ost-Pamir haben sich in der Fallstudie Alichur die Verfügbarkeit und Güte von Weideland, sowie die Größe und Qualität potenziell beerntbarer Zwergstrauchbestände herausgestellt. Bei kleineren Siedlungen wie Bash-Gombez, Bulun-Kul, Kara-Kul oder Shaymak kann von ähnlichen oder sogar besseren Einwohner-Erntegebiet- und Einwohner-Nutzvieh-Verhältnissen wie in Alichur ausgegangen werden. Anders könnte die Situation in der *rajon*-Hauptstadt Murghab, welche etwa viermal so viele Einwohner wie Alichur zählt, aussehen. Zwar stehen den Bewohnern Murghabs entsprechend größere Flächen für die Zwergstrauchernte zur Verfügung. Jedoch scheint der Energieträger *kuik* im Energiemix Murghabs eine deutlich geringere Bedeutung zu besitzen als in Alichur, was auf ein im Vergleich zu Alichur niedrigeres Einwohner-Nutzvieh-Verhältnis hindeutet. Entsprechend ist der Energiemix in Murghab durch einen relativ hohen Anteil an Kohle charakterisiert. Hier sollten die Daten aus der dieser Arbeit zugrunde liegenden Energiesystemanalyse von Alichur nicht ohne weitere Untersuchungen übertragen werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- ARC INFO (2013). Version 10.0: ESRI (Environmental Systems Research Institute). Online verfügbar unter esri.com, zuletzt geprüft am 16.05.2014.
- AGAKHANJANZ, O. E.; BRECKLE, S.-W. (2004): Pamir. In: C. A. Burga, F. Klötzli und G. Grabherr (Hg.): Gebirge der Erde. Landschaft, Klima, Pflanzenwelt. Stuttgart: Ulmer, S. 151–157.
- AKNASAROV, K. (2012): Pastbishcha vostochnogo pamira i priyemy ikh uluchsheniya. Pamirskiy biologicheskiy institut im. KH.YU. Yusufbekova. Khorog, TJ.
- BAIPOLOT, U. (2013): Experteninterview zur Dungproduktionsrate von Weidevieh. Alichur, 02.11.2013 an Georg Hohberg.
- BALCKBRIDGE AG (2014): RapidEye. Online verfügbar unter <http://blackbridge.com/rapideye/>, zuletzt geprüft am 07.08.2014.
- BENDOR, T. (2014): Introduction to Agent-Based Modeling. Präsentation. Department of City and Regional Planning. Chapel Hill, 30.04.2014. Online verfügbar unter http://todd.bendor.org/upload/BenDor_OdumLecture_4-27-14.pdf, zuletzt geprüft am 12.05.2014.
- BENDOR, T.; KAZA, N. (2012): A theory of spatial system archetypes. In: *System Dynamics Review* 28 (2), S. 109–130. DOI: 10.1002/sdr.1470.
- BEVEN, K. J. (2009): Environmental modelling. An uncertain future? An introduction to techniques for uncertainty estimation in environmental prediction. London: Routledge.
- BIER, A.; FORD, A. (2007): A Classroom Simulation of a Tradable Green Certificate Market and Implications for Model Development. 25th International Conference of the System Dynamics Society and 50th Anniversary Celebration. Boston, 2007.
- BILL, R. (2010a): Grundlagen der Geoinformationssysteme. 5. Aufl. Berlin: Wichmann.
- BILL, S. (2010b): Tadschikistan. Zwischen Dušanbe und dem Dach der Welt. 1. Aufl. Berlin: Trescher.
- BIMÜLLER, C. (2009): Die Böden im Ostpamir Tadschikistans. Charakteristik und Einfluss unterschiedlicher Beweidungsintensitäten. Diplomarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
- BIRCH, C. P.D; OOM, S. P.; BEECHAM, J. A. (2007): Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment and simulation in ecology. In: *Ecological Modelling* 206 (3-4), S. 347–359. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2007.03.041.
- BRECKLE, S.-W.; WUCHERER, W. (2006): Vegetation of the Pamir (Tajikistan): Land Use and Desertification Problems. In: E. M. Spehn, M. Liberman und C. Körner (Hg.): Land use change and mountain biodiversity. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis, S. 227–239.
- BREU, T. (2006): Sustainable Development in the Tajik Pamirs: The Role of Knowledge for Sustainable Land Management. Dissertation. Universität Bern.
- BREU, T.; HURNI, H. (2003): The Tajik Pamirs. Challenges of sustainable development in an isolated mountain region. Bern: Geographica Bernensia.

- BREU, T.; MASELLI, D.; HURNI, H. (2005): Knowledge for Sustainable Development in the Tajik Pamir Mountains. In: *Mountain Research and Development* 25 (2), S. 139–146. DOI: 10.1659/0276-4741(2005)025[0139:KFSDIT]2.0.CO;2.
- BMU; BMELV (2010): Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland. Beitrag der Biomasse für eine nachhaltige Energieversorgung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit & Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Online verfügbar unter http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/BiomasseaktionsplanNational.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 24.04.2015.
- CARLOWITZ, H. C. VON (1732): *Sylvicultura Oeconomica, oder hauswirthliche Nachricht und naturmässige Anweisung zur wilden Baumzucht, etc. Zweyte und mit einem dritten Theil von Julio Bernhard von Rohr vermehrte Auflage.* Leipzig.
- CARNOHAN, S. (2014): Simulating Pelletization Strategies to Reduce the Biomass Supply Risk at America's Biorefineries. 32nd Conference of the System Dynamics Society. Delft. Online verfügbar unter <http://www.systemdynamics.org/web.portal?COS+0+P+4+-1+369+1219>, zuletzt geprüft am 23.03.2015.
- CHANG, K.-T. (2014): *Introduction to geographic information systems.* Seventh edition. New York: McGraw-Hill.
- CLEMENS, J. (2001): *Ländliche Energieversorgung in Astor. Aspekte des nachhaltigen Ressourcenmanagements im nordpakistanischen Hochgebirge: Mit 26 Tabellen.* Sankt Augustin: Asgard-Verlag.
- COSTANZA, R.; VOINOV, A. (Hg.) (2004): *Landscape simulation modeling. A spatially explicit, dynamic approach.* New York [etc.]: Springer.
- COYLE, G. (2000): Qualitative and quantitative modelling in system dynamics: Some research questions. In: *System Dynamics Review* 16 (3), S. 225–244. DOI: 10.1002/1099-1727(200023)16:3<225::AID-SDR195>3.0.CO;2-D
- DEUTSCHE FORSCHUNG (1929): *Aus der Arbeit der Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft.* Heft 10. Berlin: Karl Siegmund.
- DOMEISEN (2002): *Marginalized by the Impacts of transformation. A study of post-soviet livestock breeding in the high mountains of the Eastern Pamirs.* Diplomarbeit. Universität Bern.
- DROUX, R.; HOECK, T. (2004): *Energy for Gorno Badakhshan: Hydropower and the Cultivation of Firewood. Analysis of the Energy Situation in the Tajik Pamirs and its Consequences for Land Use and Natural Resource Management.* Diplomarbeit. Universität Bern.
- DUNG, N. V. (2011): *Multi-objective automatic calibration of hydrodynamic models - Development of the concept and an application in the Mekong Delta.* Stuttgart: Institut für Wasserbau (Mitteilungen / Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 207).
- EGEMETULOV, T. (2013): Experteninterview zum Viehbestand in Alichur. Alichur, 03.11.2013 an Georg Hohberg.
- EISENBEIß, G.; MILOW, B.; PITZ-PAAL, R.; WITTEW, V. (2000): Solarthermie – Wärme und Kraft von der Sonne. In: G. Staderman (Hg.): *Themen 2000. Sonne - Die Energie des 21. Jahrhunderts.* Berlin, S. 21–33.

- ESRI (2014): Environmental Systems Research Institute Inc. (ESRI). History Up Close. Online verfügbar unter <http://www.esri.com/about-esri/history/history-more>, zuletzt geprüft am 03.06.2014.
- FORD, A. (2009): *Modeling the Environment*. Second Edition: Island Press.
- FORREST, J. (2006): Revisiting Classic Energy Models for Evolutionary System Insights. 24th International Conference of the System Dynamics Society. Nijmegen. Online verfügbar unter <http://www.systemdynamics.org/conferences/2006/proceed/papers/FORRE134.pdf>, zuletzt geprüft am 27.04.2015.
- FORRESTER, J. W. (1961): *Industrial dynamics*. Cambridge, Mass: Productivity Press.
- FORRESTER, J. W. (1969): *Urban dynamics*. Cambridge, Mass: M.I.T. Press.
- FÖRSTER, H.; PACHOVA, N. I.; RENAUD, F. G. (2011): Energy and Land Use in the Pamir-Alai Mountains. In: *Mountain Research and Development* 31 (4), S. 305-314. DOI: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-11-00041.1.
- FREY, B. (2006): Modellierung systemübergreifender Energie- und Kohlenstoffbilanzen in Entwicklungsländern. Dissertation. Universität Stuttgart (Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 97).
- GARGIULO, M. (2009): Getting Started with TIMES-VEDA. Version 2.7. International Energy Agency. Online verfügbar unter https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779577286611/Getting_Started_TIMES-VEDA_V2p7.pdf, zuletzt geprüft am 01.04.2014.
- GARMIN LTD. (2010): Dakota 10 und 20 Benutzerhandbuch. Olathe, Kansas. Online verfügbar unter http://static.garmincdn.com/pumac/Dakota_OM_DE.pdf, zuletzt geprüft am 29.04.2015.
- GENERAL'NYI SHTAB SSSR (1985-1991): Topograficheskaya karta Tajikistana. 1:100000.
- GENOESE, M.; MÖST, D.; FICHTNER, W. (2009): Agentenbasierte Simulation zur Messung von Marktmacht. Eine Analyse für den deutschen Strommarkt. In: D. Möst (Hg.): *Energiesystemanalyse*. Tagungsband des Workshops Energiesystemanalyse vom 27. November 2008 am KIT-Zentrum Energie. Karlsruhe: Universitäts-Verlag, S. 139–168.
- GILBERT, G. N. (2008): *Agent-based models*. Los Angeles: Sage Publications (Quantitative applications in the social sciences, no. 07-153).
- GIZ (2008): Sustainable management of natural resources in Gorno-Badakhshan, Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. Online verfügbar unter <http://www.giz.de/en/worldwide/15398.html>, zuletzt geprüft: 27.04.2015.
- GONZALEZ DE DURANA, J. M.; BARAMBONES, O.; KREMERS, E.; VARGA, L. (2014): Agent based modeling of energy networks. In: *Energy Conversion and Management* 82, S. 308–319. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.03.018.
- GOOGLE MAPS (2013): Alichur, Tajikistan. Mountainview, CA.
- GREENBERGER, M.; CRENSON, M. A.; CRISSEY, B. L. (1976): *Models in the policy process*. Public decision making in the computer era. New York: Russell Sage Foundation; [Distributed by Basic Books].

- GRIMM, V. (1999): Ten years of individual-based modelling in ecology: What have we learned and what could we learn in the future? In: *Ecological Modelling* 115 (2-3), S. 129–148. DOI: 10.1016/S0304-3800(98)00188-4.
- GRIMM, V.; RAILSBACK, S. F. (2005): Individual-based modeling and ecology. Princeton: Princeton University Press (Princeton series in theoretical and computational biology).
- GTZ (2008): Bio-Mass Use in GBAO, Tajikistan. Final Consultancy Report Submitted by (SEEDS) Social Enterprise & Environmental Development Systems. Unter Mitarbeit von G. Hathaway. Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. Khorog, TJ.
- HAUSL, S.; BIBERACHER, M. (2012): Räumliche Aspekte in der regionalen Energiesystemoptimierung. In: J. Strobl, T. Blaschke und G. Griesebner (Hg.): *Angeordnete Geoinformatik 2012. Beiträge zum 24. AGIT-Symposium Salzburg*. Berlin, Offenbach: Wichmann, S. 492–501.
- HEAPS, C. G. (2012): Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) system. Version 2014.0.1.14. Somerville, MA: Stockholm Environment Institute. Online verfügbar unter www.energycommunity.org, zuletzt geprüft am 27.04.2015.
- HELD, F. P.; WILKINSON, I. F.; MARKS, R. E.; YOUNG, L. (2014): Agent-based Modelling, a new kind of research. In: *Australasian Marketing Journal (AMJ)* 22 (1), S. 4–14. DOI: 10.1016/j.ausmj.2013.12.003.
- HODGE, B.-M.; AYDOGAN-CREMASCHI, S.; BLAU, G.; PEKNY, J.; REKLAITIS, G. (2008): A prototype agent-based modeling approach for energy system analysis. In: 18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, Bd. 25: Elsevier (Computer Aided Chemical Engineering), S. 1071–1076.
- 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), S. 48–57.
- HORGAN, J. (1995): From Complexity to Perplexity. In: *Scientific American*, 6/1995, S. 74–79.
- HURNI, H.; BREU, T.; LUDI, E.; PORTNER, B. (2004). Der Tadschikische Pamir. Entwicklungsprobleme und Perspektiven einer Hochgebirgsregion in Zentralasien In: *Geographische Rundschau* 56 (10), S. 60–65.
- IAEA (Hg.) (2000): Enhanced Electricity System Analysis for Decision Making - A Reference Book. International Atomic Energy Agency. Wien. Online verfügbar unter <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/decades-4.pdf>, zuletzt geprüft am 16.05.2014.
- IFK (2013): Analysenbefund Nr. 2013 / 173 / 1631. Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik. Universität Stuttgart.
- IHTSSR (1984): Compilation of a list of small and large-scale hydropower projects in Gorno Badakhshan. Institute of Hydropower of the Tajik SSR, Dushanbe.
- IMBODEN, D. M.; KOCH, S.; STÜRCHLER, N. (2003): Systemanalyse. Einführung in die mathematische Modellierung natürlicher Systeme. Berlin [etc.]: Springer.

- ISMANOV, A. (2013): Experteninterview zu Viehbestand und Dungproduktion in Alichur. Alichur, 04.11.2013 an Georg Hohberg.
- JOLAKEEV, T. (2014): Experteninterview zum Energiekonsum der Bewohner Alichurs vor 1992. Alichur, 24.10.2014 an Georg Hohberg.
- KADIAN, P.; KAUSHIK, S. (2003): Rural energy for sustainable development. Participatory assessment of energy resources. New Delhi: Deep & Deep.
- KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (2009): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.
- KAPPLER, G.; KÄLBER, S.; LEIBLE, L. (2009): Stroh und Waldrestholz - Ergebnisse einer Standortanalyse für das bioliq-Konzept. In: D. Möst (Hg.): Energiesystemanalyse. Tagungsband des Workshops Energiesystemanalyse vom 27. November 2008 am KIT-Zentrum Energie. Karlsruhe: Universitäts-Verlag, S. 211–222.
- KERZUM, P. A. (1968): Počvy. In: I. K. Narzikulov und K. V. Staniukovich (Hg.): Atlas Tadžikskoï Sovetskoï Sotsialisticheskoi Respubliki. Dushanbe-Moskva: GUGK, S. 94–95.
- KHAIN, V. E. (1994): Geology of Northern Eurasia (Ex-USSR). Berlin: Gebrüder Borntraeger (Beiträge zur regionalen Geologie der Erde, 24).
- KHUDONAZAR, K. (2013): Experteninterview zur Geschichte Alichurs. Alichur, 20.03.2013 an Georg Hohberg.
- KLEANDROV, I. M. (1974): Ėkonomika sovetskogo Gornogo Badakhshana. Sovremennoe sostoianie i problemy razvitiia. Dushanbe: Donish.
- KRAMER, H. (1995): Leitfaden zur Waldmesslehre. 3., erw. Aufl. Frankfurt: Sauerländer.
- KRAUDZUN, T. (2009): Mobile Viehwirtschaft im tadschikischen Pamir. In: B. Toktoraliyev (Hg.): Herausforderungen für die Mensch-Umwelt-Beziehungen. Osch, S. 141–152.
- KRAUDZUN, T. (2012): Livelihoods of the 'New Livestock Breeders' in the Eastern Pamirs of Tajikistan. In: H. Kreuzmann (Hg.): Pastoral Practices in High Asia.: Springer, S. 89–107.
- KRAUDZUN, T. (2014): Bottom-up and top-down dynamics of the energy transformation in the Eastern Pamirs of Tajikistan's Gorno Badakhshan region. In: *Central Asian Survey* 33 (4), S. 550–565. DOI: 10.1080/02634937.2014.987516.
- KRAUDZUN, T.; VANSELOW, K. A.; SAMIMI, C. (2014): Realities and myths of the Teresken Syndrome – An evaluation of the exploitation of dwarf shrub resources in the Eastern Pamirs of Tajikistan. In: *Journal of Environmental Management* 132, S. 49–59. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.10.019.
- KRECZI, F. (2011): Vulnerabilities in the Eastern Pamirs. Diplomarbeit. FU-Berlin (Geographical Papers, 39).
- KREMERS, E.; VIEJO, P. (2009): Untersuchung des Einsatzes von agentenbasierten Modellen zur Simulation dezentraler Energiesysteme am Beispiel von Guadeloupe. In: D. Möst (Hg.): Energiesystemanalyse. Tagungsband des Workshops Energiesystemanalyse vom 27. November 2008 am KIT-Zentrum Energie. Karlsruhe: Universitäts-Verlag, S. 169–182.

- KREUTZMANN, H. (2002): Gorno-Badakhshan: Experimente mit der Autonomie. Sowjetisches Erbe und Transformation im Pamir. In: *Internationales Asienforum* 33 (1-2), S. 31–46.
- KREUTZMANN, H. (2003): Yak-keeping in Western High Asia: Tajikistan, Afghanistan, Southern Xinjiang, Pakistan. In: G. Wiener, J. Han und R. Long (Hg.): *The yak*. 2nd ed. Bangkok, Thailand, S. 323–336.
- KREUTZMANN, H. (2008): Boundary-Making and Geopolitical Diversity in the Pamirian Knot. In: *Colloquium geographicum. Diversity in Mountain Systems*. Unter Mitarbeit von J. Löffler und J. Stadelbauer. Sankt Augustin: Asgard-Verlag. (31), S. 155-175.
- KREUTZMANN, H. (2009): Transformation Processes in the Eastern Pamirs of Tajikistan. The presence and future of energy resources in the framework of sustainable development. Proposal submitted to the Volkswagen Foundation. Unter Mitarbeit von C. Samimi, G. Kaule und L. Eltrop.
- KÜLL, R.; STÄHLY, P. (1999): Zur Planung und effizienten Abwicklung von Simulationsexperimenten. In: J. Biethahn (Hg.): *Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe. State of the art und neuere Entwicklungen: Mit 20 Tabellen*. Heidelberg: Physica-Verlag, S. 1–21.
- KUNZ, S. (1999): Planung von Windenergieanlagen. Leitfaden für die Schweiz - Bausteine einer Windenergie-Strategie: Schlussbericht. Bern: Bundesamt für Energie. Online verfügbar unter http://www.bfe.admin.ch/forschungwindenergie/02512/02746/index.html?dossier_id=02826&lang=de, zuletzt geprüft am 28.04.2015.
- KURBONBEKOV, S. (2013): Experteninterview zur Geschichte Alichurs. Alichur, 22.03.2013 an Georg Hohberg.
- LEYER, I.; WESCHE, K. (2007): *Multivariate Statistik in der Ökologie. Eine Einführung*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- LUSTICK, I. S. (2012): Agent-based modelling of collective identity: testing constructivist theory. In: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 3 (1). Online verfügbar unter: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/3/1/1.html>, zuletzt geprüft am 13.05.2015.
- MAINZER, K.; CHUA, L. O. (2012): *The universe as automaton. From simplicity and symmetry to complexity*. Heidelberg, New York: Springer.
- MAXWELL, T.; COSTANZA, R. (1997): A language for modular spatio-temporal simulation. In: *Ecological Modelling* 103 (2-3), S. 105–113. DOI: 10.1016/S0304-3800(97)00103-8.
- METI & NASA (2009): Aster Global Digital Elevation Model V002. Ministry of Economy, Trade and Industry und North American Space Association. Sioux Falls.
- MÖST, D.; FICHTNER, W. (2009): Einführung zur Energiesystemanalyse. In: D. Möst (Hg.): *Energiesystemanalyse. Tagungsband des Workshops Energiesystemanalyse vom 27. November 2008 am KIT-Zentrum Energie*. Karlsruhe: Universitäts-Verlag, S. 11–30.
- MUETZELFELDT, R.; MASSHEDER, J. (2003): The Simile visual modelling environment. In: *European Journal of Agronomy* 18 (3-4), S. 345–358. DOI: 10.1016/S1161-0301(02)00112-0.

- MUNSHI, T.; ZUIDGEEST, M.; BRUSSEL, M.; VAN MAARSEVEEN, M. (2014): Logistic regression and cellular automata-based modelling of retail, commercial and residential development in the city of Ahmedabad, India. In: *Cities* 39, S. 68–86. DOI: 10.1016/j.cities.2014.02.007.
- NEDZVEDSKY, A. P. (1968): Tektonia. In: I. K. Narzikulov und K. V. Staniukovich (Hg.): Atlas Tadzhijskoj Sovetskoj Sotsialisticheskoi Respubliki. Dushanbe-Moskva: GUGK, S. 18–19.
- NTIS (Hg.) (1973): The GAZ-66 Truck, its design and technical servicing. Technical translation. National Technical Information Service. Springfield, VA. Online verfügbar unter http://www.russianmilitarytrucks.com/docs/Gaz66_Tech_Man%28en%29.pdf, zuletzt geprüft am 29.04.2015.
- ORESQUES, N.; SHRADER-FRECHETTE, K.; BELITZ, K. (1994): Verification, validation, and confirmation of numerical models in the Earth sciences. In: *Science (New York, N.Y.)* 263 (5147), S. 641–646. DOI: 10.1126/science.263.5147.641.
- OTOMBAEV, D. (2013a): Experteninterview zur Geschichte der Ressourcennutzung in Alichur. Alichur, 29.10.2013 an Georg Hohberg.
- OTOMBAEV, D. (2013b): Experteninterview zur Bewertung des Wegenetzes im *jamoat* Alichur. Alichur, 03.11.2013 an Georg Hohberg.
- PAPACHRISTOS, G.; ADAMIDES, E. (2012): System dynamics modelling for assessing promotion strategies of biofuels used in land transportation. 30th International Conference of the System Dynamics Society. St. Gallen, 2012. Online verfügbar unter <http://www.systemdynamics.org/conferences/2012/proceed/papers/P1126.pdf>, zuletzt geprüft am 24.04.2015.
- PEREZ, L.; DRAGICEVIC, S. (2012): Landscape-level simulation of forest insect disturbance: Coupling swarm intelligent agents with GIS-based cellular automata model. In: *Ecological Modelling* 231, S. 53–64. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2012.01.020.
- QGIS (2014): Geographic information system. Open Source Geospatial Foundation Project Version 2.2.: QGIS Development Team. Online verfügbar unter qgis.org, zuletzt geprüft am 16.05.2014.
- RADGEN, P. (1996): Energiesystemanalyse eines Düngemittelkomplexes. Düsseldorf: VDI-Verlag (Fortschrittberichte VDI : Reihe 6, Energietechnik, Nr. 342).
- RAHMANDAD, H.; STERMAN, J. (2008): Heterogeneity and Network Structure in the Dynamics of Diffusion: Comparing Agent-Based and Differential Equation Models. In: *Management Science* 54 (5), S. 998–1014. DOI: 10.1287/mnsc.1070.0787.
- RAILSBACK, S. F.; GRIMM, V. (2012): Agent-based and individual-based modeling. A practical introduction. Princeton: Princeton University Press.
- RAJKOVA, I. A. (1930): Rastitel'nye landšafy Pamira. The vegetative landscapes of the Pamir. Taškent (Trudy Sredne-Aziatskogo Gosudarstvennogo Universiteta Serija 8b, Botanika, 12).
- RANOV, V. A.; SIDOROV, L. F. (1965): Rasvitie prirody Pamira kak sredy sushhestvovaniya cheloveka. In: *Strany i narody Vostoka* 4.
- RAPIDEYE AG (2009): RapidEye Standard Image Product Specifications. Brandenburg an der Havel.

- REA, S. (2013): Premium Coal Supply for China and Central Asia. Präsentation. Celsius Coal Limited.
- REIDL, K.; SUCK, R.; BUSHART, M.; HERTER, W.; KOLTZENBURG, M.; MICHIELS, H.-G.; WOLF, T. (2013): Potenzielle natürliche Vegetation von Baden-Württemberg. Unter Mitarbeit von E. Aminde und W. Borrt. Heidelberg [u.a.]: Verlag Regionalkultur.
- REMME, U. (2002): MESAP/TIMES - Advanced Decision Support for Energy and Environmental Planning. Unter Mitarbeit von G. A. Goldstein, U. Schellmann und C. Schlenzig. In: P. Chamoni (Hg.): Operations research proceedings 2001. Selected papers of the International Conference on Operations Research (OR 2001). Berlin: Springer, S. 59–66.
- RICHARDSON, K. A. (2003): On the Limits of Bottom-Up Computer Simulation: Towards a Nonlinear Modeling Culture. In: R. H. Sprague (Hg.): Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Los Alamitos, Calif: IEEE Computer Society Press.
- RICKLEFS, R. E. (1990): Ecology. 3. Aufl. New York: W.H. Freeman.
- ROBINSON, S. (2007): A statistical process control approach to selecting a warm-up period for a discrete-event simulation. In: *European Journal of Operational Research* 176 (1), S. 332–346. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.07.014.
- ROSILLO CALLÉ, F. (2009): The biomass assessment handbook. Bioenergy for a sustainable environment. London [u.a.]: Earthscan.
- ROZENBERG, G.; BÄCK, T.; KOK, J. N. (2012): Handbook of Natural Computing. Berlin, Heidelberg: Springer.
- SAMIMI, C.; VANSELOW, K. A.; KRAUDZUN, T.; AKNASAROV, K.; KREUTZMANN, H. (2011): Der Ostpamir nach der Unabhängigkeit Tadschikistans – Landnutzungsverhältnisse und Ökologie. In: D. Anhuf (Hg.): Ökozonen im Wandel. Passau: Selbstverlag Fach Geographie der Univ. Passau (Passauer Kontaktstudium Geographie, 11), S. 1–10.
- SANTÉ, I.; GARCÍA, A. M.; MIRANDA, D.; CRECENTE, R. (2010): Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. In: *Land-use and Urban Planning* 96 (2), S. 108–122. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2010.03.001.
- SCHEFFRAN, J.; BENDOR, T. (2009): Bioenergy and land use: a spatial-agent dynamic model of energy crop production in Illinois. In: *International Journal of Environment and Pollution* 39 (1/2), S. 4–27. DOI: 10.1504/IJEP.2009.027140.
- SCHILLHORN VAN VEEN, TJAART W. (1995): The Kyrgyz Sheep herders at the Crossroads. Overseas Development Institute. Rural Policy and Environment Group. Online verfügbar unter <http://www.odi.org/sites/odi.org.uk/files/odi-assets/publications-opinion-files/5415.pdf>, zuletzt geprüft am 15.12.2014.
- SCHLENZIG, C. (1998): PlaNet: Ein entscheidungsunterstützendes System für die Energie- und Umweltplanung. Dissertation. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER). Stuttgart. Online verfügbar unter http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2001/742/pdf/diss_cs.pdf, zuletzt geprüft am 01.04.2014.
- SCHMIDT, J.; SCHÖNHART, M.; BIBERACHER, M.; GUGGENBERGER, T.; HAUSL, S.; KALT, G. (2012): Regional energy autarky: Potentials, costs and consequences for an Austrian region. In: *Energy Policy* 47, S. 211–221. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.04.059.

- SCHOLL, H. J.; PHELAN, S. E. (2004): Using Integrated Top-down and Bottom-up Dynamic Modeling for Triangulation and Interdisciplinary Theory Integration. Beitrag zur 22. Internationalen Konferenz der System Dynamics Society. Oxford. Online verfügbar unter http://www.systemdynamics.org/conferences/2004/SDS_2004/PAPERS/328SCHOL.pdf, zuletzt geprüft am 27.05.2014.
- SCHRADINGER, I. (2010): Ansätze einer räumlichen Optimierung regionaler Energiesysteme. Unter Mitarbeit von F. Botzenhart, T. Hamacher und M. Biberacher. In: J. Strobl (Hg.): Angewandte Geoinformatik 2010. Beiträge zum 22. AGIT-Symposium Salzburg. Unter Mitarbeit von T. Blaschke und G. Griesebner. Berlin, Offenbach: Wichmann, S. 948–953.
- SCHWEDES, O. (2013): Räumliche Mobilität in der zweiten Moderne. Freiheit und Zwang bei Standortwahl und Verkehrsverhalten. Münster: Lit (Mobilität und Gesellschaft, 3).
- SEVENZONE (2014): SevenZone Informationssysteme GmbH. Homepage: <http://www.sevenzone.de>, zuletzt geprüft am 24.04.2015.
- SHVOL'MAN, V. A. (1977): Tektonicheskoe razvitiĕ Pamira v melovom i paleogenovom periodakh. Moskva: Nauka (Trudy / Akademiia nauk SSSR, Geologicheskiiĭ institut, vyp. 302).
- SIEGMUNDT, S. (2012): Mesap PlaNet Schulung. Stuttgart, 11.07.2012.
- SMITH, W. A.; BONNER, I. J.; KENNEY, K. L.; WENDT, L. M. (2013): Practical considerations of moisture in baled biomass feedstocks. In: *Biofuels* 4 (1), S. 95–110. DOI: 10.4155/bfs.12.74.
- STACHOWIAK, H. (1973): Allgemeine Modelltheorie. Wien, New York: Springer-Verlag.
- STANYUKOVICH, K.V (1973): Rastitelnost gor SSSR. Dushanbe: Donish.
- STERMAN, J. (2000): Business dynamics. Systems thinking and modeling for a complex world. Boston: Irwin/McGraw-Hill.
- STESHENKO, A. P. (1956): Formirovanie struktury polukustarnichkov v usloviakh vysokogor'ii Pamira. Stalinabad: Izd-vo Akademii nauk Tadzhikskoi SSR (Trudy Akademija nauk Tadzhikskoi SSR, Botanicheskiiĭ institut, Pamirskaja biologicheskaja stantsiia Asarho / Akademiiai fanhoi RSS Tojikiston, Instituti botanika, Stantsiiai biologii Pomir, 50).
- STMUG (2011): Leitfaden Energienutzungsplan. Bayrisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit. Online verfügbar unter <http://www.coaching-kommunaler-klimaschutz.net/fileadmin/inhalte/Dokumente/StarterSet/LeitfadenEnergienutzungsplan-Teil1.pdf>, zuletzt geprüft am 24.04.2015.
- TANG, Y.; REED, P.; WAGENER, T.; WERKHOVEN, K. VAN (2007): Comparing sensitivity analysis methods to advance lumped watershed model identification and evaluation. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11 (2), S. 793–817. DOI: 10.5194/hess-11-793-2007.
- THULKE, H.-H.; GRIMM, V.; MÜLLER, M. S.; STAUBACH, C.; TISCHENDORF, L.; WISSEL, C.; JELTSCH, F. (1999): From pattern to practice: a scaling-down strategy for spatially explicit modelling illustrated by the spread and control of rabies. In: *Ecological Modelling* 117 (2-3), S. 179–202. DOI: 10.1016/S0304-3800(98)00198-7.

- TRAUTMANN, W. (1966): Erläuterungen zur Karte der potenziellen natürlichen Vegetation der Bundesrepublik Deutschland 1:200.000. Blatt 85. Bad Godesberg (Schriftenreihe für Vegetationkunde, 1).
- TSATSENKIN, I. A.; KASACH, A. E. (1970): *Ékologicheskaja otsenka pastbishch i senokosov Pamira po rastitelnomu pokrovu*. Dushanbe: Donish.
- TURAN, Ö.; YÜCEL, G. (2014): Analyzing Electric Vehicle Diffusion Scenarios for Istanbul. 32nd Conference of the System Dynamics Society. Delft, 2014. Online verfügbar unter: <http://www.systemdynamics.org/conferences/2014/proceed/papers/P1035.pdf>, zuletzt geprüft am 13.05.2015.
- UN (2010): List of Jamoats. United Nations Tajikistan. Online verfügbar unter http://ru.wikipedia.org/Мургабский_район, zuletzt geprüft am 28.04.2014.
- USGS (2013): Landsat 8. Fact Sheet 2013–3060. U.S. Geological Survey. Online verfügbar unter <http://pubs.usgs.gov/fs/2013/3060/pdf/fs2013-3060.pdf>, zuletzt geprüft am 29.04.2015.
- VANSELOW, K. A. (2011): The high-mountain pastures of the Eastern Pamirs (Tajikistan). An evaluation of the ecological basis and the pasture potential. Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Online verfügbar unter <http://www.opus.ub.uni-erlangen.de/opus/volltexte/2011/2354/pdf/KimVanselowDissertation.pdf>, zuletzt geprüft am 18.10.2012.
- VARJÚ, D. (1977): Systemtheorie für Biologen und Mediziner. Berlin, New York: Springer-Verlag (Heidelberger Taschenbücher, Bd. 182).
- VENTOSA, M.; BALLE, Á.; RAMOS, A.; RIVIER, M. (2005): Electricity market modeling trends. In: *Energy Policy* 33 (7), S. 897–913. DOI: 10.1016/j.enpol.2003.10.013.
- VOINOV, A. (2008): Systems science and modeling for ecological economics. 1. Aufl. Amsterdam, Boston: Elsevier Academic Press.
- VOORT, E. VAN DER (1985): Energy supply modelling package EFOM-12C, MARK 1. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities (Energy).
- WALTER, H.; BRECKLE, S.-W. (1986): Spezielle Ökologie der Gemäßigten und Arktischen Zonen Euro-Nordasiens. Stuttgart: Gustav Fisher Verlag (Ökologie der Erde, 3).
- WATSON, R. T.; ZINYOWERA, M. C.; MOSS, R. H.; DOKKEN, D. J. (1996): Climate change 1995. Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific-technical analyses. Cambridge, Great Britain: Cambridge University Press.
- WÖRNER, C.; DOLL, G. (1996): Einordnung, Aufbau und Grenzen von Ökobilanzen. In: H. Krcmar (Hg.): Aspekte der Ökobilanzierung. Ansprüche, Ziele und Computerunterstützung. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag; Gabler, S. 1–23.
- WUNSCH, G. (1986): Handbuch der Systemtheorie. München u.a: Akademie-Vlg.
- XU, Z.; COORS, V. (2012): Combining system dynamics model, GIS and 3D visualization in sustainability assessment of urban residential development. In: *Building and Environment* 47, S. 272–287. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.07.012.
- YUSUFBEKOV, KH. YU.; KASACH, A. E. (1972): Teresken na Pamire. Dushanbe: Donish.

- ZANDLER, H.; BRENNING, A.; SAMIMI, C. (2015): Quantifying dwarf shrub biomass in an arid environment: Comparing empirical methods in a high dimensional setting. In: *Remote Sensing of Environment*, S. 140-155. DOI: 10.1016/j.rse.2014.11.007.
- ZECH, W.; HINTERMAIER-ERHARD, G.; SCHAD, P. (2014): Böden der Welt. Ein Bildatlas. 2. Aufl. Berlin [u.a.]: Spektrum, Akademischer Verlag.
- ZHAITSCHIBEKOV, M. (2013): Experteninterview zur Bewertung des Wegenetzes im *jamoat* Alichur. Alichur, 03.11.2013 an Georg Hohberg.
- ZHANG, Z. X.; FOLMER, H. (1998): Economic modelling approaches to cost estimates for the control of carbon dioxide emissions. In: *Energy Economics* 20 (1), S. 101-120. DOI: 10.1016/S0140-9883(97)00019-4.
- ZIBUNG, D. (2002): Eine integrale Analyse der Infrastrukturausstattung und Energieversorgung in der Grossregion Gorno-Badakhshan, Tajikistan. Diplomarbeit. Universität Bern.
- ZUSE, K. (1975): Ansätze einer Theorie des Netzautomaten. Leipzig: Barth (Nova acta Leopoldina, n.F., Nr. 220, Bd. 43).

ANHANG

I. FRAGEBOGEN HAUSHALTSBEFRAGUNG ALICHUR 2013

Household Questionnaire 2013

HH-ID: _____

Survey for scientific study on energy supply, energy consumption, and migration of households in the Eastern Pamir; carried out by universities of Berlin, Vienna and Stuttgart

1. About the house

1.1 House type Clay brick house Stone house Pamiri house Finn house
 Veranda

1.2 Type of ovens installed Alai Petschka Peletu Iron oven Other

1.2.1 Type of oven in the winter-room _____

1.3 Recent energy efficiency improvements: _____ Time

double glazed wooden window double glazed plastic window insulation foil

zick-zack abarod Vulkan oven

1.4 Investment: _____ Somoni

1.5 Idea: Own idea Zindagi Other _____

1.6 Where do you get your electric energy from?

Generator Small < 1 kWh Medium 1 – 2 kWh Big > 2 kWh

Solar panel Small Medium Big

Landline (GEZ) electricity from _____ to _____

2. Teresken/Shyvak harvest

Teresken harvest for sale? Yes No

Combinded harvesting? Yes No (Some days just harvesting, another day just bringing)

	Independent harvest		Harvest in brigades	
	Summer (May to August)	Winter (September to April)	Summer (May to August)	Winter (September to April)
2.1 Amount of people harvesting	1.	1.	1.	1.
2.2 Frequency of harvests for yourself				
2.3 Frequency of harvests for others				
2.4 Preferred areas (name + map) What is harvested (Teresken = T, Shyvak = S)?	1. a) b) c)	1. a) b) c)	1. a) b) c)	1. a) b) c)

HH-ID:

Page 1

Date:

2.4.1 Why are the areas preferred?	1. a) b) c)	1. a) b) c)	1. a) b) c)	1. a) b) c)
2.5 Slope of the harvesting area (a) gentle (0-20 °) (b) medium (20-45°) (c) steep (> 45 °)	1. a) b) c)	1. a) b) c)	1. a) b) c)	1. a) b) c)
2.6 Means of transport	1. a) b) c)	1. a) b) c)	1. a) b) c)	1. a) b) c)
2.7 Total duration of absence per trip [hours]	1. a) b) c)	1. a) b) c)	1. a) b) c)	1. a) b) c)
2.8 Amount of harvested plants per trip at each harvesting area	1. a) b) c)	1. a) b) c)	1. a) b) c)	1. a) b) c)
Areas in which harvesting took place in the past (name + map). What was harvested (Teresken = T, Shyvak = S)?				
Were there any conflicts between Teresken/ Shyvak harvest and pastoralists in the past?				

HH-ID:

Page 2

Date:

3. Please describe the daily use of your oven(s)/stove(s)

Summer

Time	6.00-8.00	8.00-10.00	12.00-14.00	14.00-16.00	16.00-18.00	18.00-20.00	20.00-22.00	22.00-24.00	24.00-6.00
	<----->								
	Type	Type	Type	Type	Type	Type	Type	Type	Type
Resource	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.

Total quantity per day

Teresken _____ Shyvak _____ Kuick _____ Tersek _____ Coal _____ Diesel/Petrol _____

Winter

Time	6.00-8.00	8.00-10.00	12.00-14.00	14.00-16.00	16.00-18.00	18.00-20.00	20.00-22.00	22.00-24.00	24.00-6.00
	<----->								
	Type	Type	Type	Type	Type	Type	Type	Type	Type
Resource	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.

Total quantity per day

Teresken _____ Shyvak _____ Kuick _____ Tersek _____ Coal _____ Diesel/Petrol _____

HH-ID: _____ Page 3 _____ Date: _____

4. Consumption and purchase of energy resources

Energy source	Quantities		Origin and Price										Utilization		
	Summer	Winter	Selfsupply			Bought		Other			Working-time	Summer	Winter		
			Sup- ply	Amount	Money	Working-time	Amount	Money	Kind	Amount				Money	
Teresken			is										1.	1.	
			bs										2.	2.	
													3.	3.	
Shyvak			is										1.	1.	
			bs										2.	2.	
													3.	3.	
Kuik			is										1.	1.	
			bs										2.	2.	
													3.	3.	
Tersek			is										1.	1.	
			bs										2.	2.	
													3.	3.	
Coal			is										1.	1.	
			bs										2.	2.	
													3.	3.	
Diesel/ Petrol			is										1.	1.	
			bs										2.	2.	
													3.	3.	

HH-ID:

Page 4

Date:

5. About mobility

5.1 Brief biography of the family (from where did the forefathers come from, where was the family living and how long, if change of place, why was the family moving, start with mother's and father's father)? _____

5.2 Please note which persons of the household (as an economic entity) are living (part time or permanent) at another place?

Who? (1)	Where to? (2)	Why? (3)	What? (4)	Time/Frequency? (5)	Money? (6)

1 Who left or is frequently away?

2 Where to? (Note the location where the person is part time or permanently going to.

3 Why did the person leave the Rayon Murghab? (work/education/health/other)

4 What is the person exactly doing? (which work/which education/which health problem/other)

5 For how long is the person away and how often does the person leave?

6 Is the person generating income or having expenses?

S= Somoni; C=Som; US\$=Dollar

5.3 Which consequences does migration have for the migrants and the household members left behind?

1 positive: _____

2 negative: _____

5.4 How is the transport of the household members organised? (Maschrutka/Tangent; Own Car1; Own Car2; relatives' Car/Truck)

6. Basic data of the household

6.1 Ethno-lingual group: _____ 6.2 Place/address: _____

6.3 HH members (relation, gender, year of birth, place of living): 1 _____ 2 _____

3 _____ 4 _____ 5 _____ 6 _____

7 _____ 8 _____ 9 _____ 10 _____

6.4 Head of the household: _____ 6.5 Household members total: ____ here, other place: ____

6.6 Total household income : _____

6.7 Salary, pensions, payments/ period of time: 1 _____ 2 _____

3 _____ 4 _____ 5 _____ 6 _____

7 _____ 8 _____ 9 _____ 10 _____

6.8. Animals:

Small livestock: ____, of which goats: ____; **Big livestock:** ____, of which yaks: ____; of which cows/cattle: ____; donkey: ____

HH-ID:

Page 5

Date:

II. KORREKTURSCHLÜSSEL UND KODIERUNG

Korrektur 1

- 1) Die Gesamtmengen der jeweils verwendeten Zwergsträucher in Teil 2 und 4 unterscheiden sich **weniger oder gleich** dem 1. Quantil der Differenzen (20 %) 5)

Die Gesamtmengen der jeweils verwendeten Zwergsträucher in Teil 2 und 4 unterscheiden sich **mehr als** das 1. Quantil der Differenzen (20 %) 2)
- 2) Die Gesamtmengen der jeweils verwendeten Zwergsträucher unterscheiden sich **weniger als oder genau um 100%**, der Wert aus Teil 2 ist in kleinen Einheiten (Sack oder *teng*) angegeben und der Wert aus Teil 4 in großen Einheiten, oder der Wert aus Teil 2 ist größer als der Wert aus Teil 4 5)

Die Gesamtmengen der jeweils verwendeten Zwergsträucher unterscheiden sich **mehr als 100%**, oder der Wert aus Teil 2 ist nicht in kleinen Einheiten (Sack oder *teng*) angegeben bzw. der Wert aus Teil 4 nicht in großen Einheiten, oder der Wert aus Teil 2 ist kleiner als der Wert aus Teil 4 3)
- 3) Der Wert aus Teil 2 ist mehr als 100% höher als der Wert aus Teil 4, Person ist im Umfragebogen als **Zwergstrauchverkäufer** vermerkt 7)

Die Gesamtmengen *teresken* und *shyvak* in Teil 2 u Teil 4 unterscheiden sich nicht mehr als 1 Quantil (20 %) 6)

Alle anderen Fälle 8)
- 4) Verwendung des Wertes aus Teil 2
- 5) Verwendung des Wertes aus Teil 4
- 6) Verwendung der Werte für *teresken*- und *shyvak*-Verbrauch aus Teil 2
- 7) Verwendung des Wertes aus Teil 4 für den Energieverbrauch, die Differenz zwischen den Werten aus Teil 4 und Teil 2 wird als Verkauf vermerkt
- 8) Nacherhebung

Kodierung Korrektur 1

A	Geringfügige Abweichung zwischen Teil 2 und 4 (\leq 1. Quantil der Differenzen) → Verwendung des Wertes aus Teil 4
B	Wert in Teil 2 ist nicht mehr als 100 % höher als Wert in Teil 4, Wert in Teil 2 ist in kleinen Einheiten, Wert Teil 4 ist in großen Einheiten → Verwendung des Wertes aus Teil 4
C	Wert in Teil 2 ist mehr als 100 % höher als Wert in Teil 4, Person ist als Zwergstrauchverkäufer vermerkt → Verwendung des Wertes aus Teil 4 für Verbrauch, Verwendung des Wertes aus Teil 2 für Ernte, die Differenz der beiden Werte ist Verkauf
D	Nicht A, B oder C, Summe Gesamtverbrauch <i>teresken</i> und <i>shyvak</i> in Teil 2 und 4 unterscheidet sich nicht mehr als das 1. Quantil der Differenzen (20 %) → Verwendung der Werte für <i>teresken</i> - und <i>shyvak</i> -Verbrauch aus Teil 2
E	Alle anderen Fälle → Nacherhebung
Z	Nacherhebung aus einem anderen Grund

Begründung Korrektur 1

A	Die Angaben aus Teil 2 gelten aus den im allgemeinen Teil genannten Gründen grundsätzlich als weniger genau als die Angaben aus Teil 4. Geringe Abweichungen werden als Ungenauigkeiten der Angaben aus Teil 2 interpretiert.
B	Die Werte aus Teil 2 überschätzen den tatsächlichen Zwergstrauchverbrauch insbesondere dann, wenn im Originalfragebogen ein Erntemuster von kleinen Erntemengen angegeben war (insbesondere bei der individuellen Ernte). Im Interview gaben die befragten Personen oftmals eine Regelmäßigkeit bei der Zwergstrauchernte an, die sie in der Realität nicht einhalten.
C	Der Verkauf von Zwergsträuchern wurde im Haushaltsinterview nicht explizit abgefragt. Im Nachgang konnten jedoch die relevanten Zwergstrauchverkäufer in Alichur identifiziert werden. Die Differenz zwischen der Zwergstrauchernte in Teil 2 und dem angegebenen Zwergstrauchverbrauch in Teil 4 wird bei diesen Haushalten als Verkauf interpretiert.
D	Unterscheiden sich die Gesamtsummen <i>teresken</i> und <i>shyvak</i> in Teil 2 und Teil 4 nicht signifikant (mehr als das 1. Quantil der Differenzen), jedoch die Werte für die einzelnen Energieträger signifikant, so wird davon ausgegangen, dass der Gesamtzwergstrauchverbrauch korrekt ist. Oft variiert der verwendete Zwergstrauch zwischen den Jahren, so dass sich die Angabe in Teil 2 beispielsweise auf ein anderes Jahr beziehen kann als die Angabe in Teil 4. Es wird in diesem Fall die Angabe aus Teil 2 verwendet, da deren Gesamtsumme (<i>teresken</i> + <i>shyvak</i>) im Vergleich mit Teil 4 korrekt ist und in Teil 2 zusätzlich die Zuordnung zu den Erntegebieten gegeben ist.
E	In Fällen mit nicht erklärbaren Inkonsistenzen zwischen Teil 2 und Teil 4 muss davon ausgegangen werden, dass die erhobenen Daten fehlerhaft sind. Es wird in diesen Fällen eine Nacherhebung angestrebt.
Z	Die Daten des befragten Haushalts ließen sich nach dem gegebenen Korrekturschema korrigieren, der Haushalt wurde jedoch aus einem anderen Grund erneut befragt.

Korrektur 2 nach Nacherhebung

a	<p>Geringfügige Abweichung (\leq 1. Quantil der Differenzen) zwischen der Zwergstrauchsumme in Teil 2 der Nacherhebung und der Zwergstrauchsumme aus Teil 2 des Originalfragebogens</p> <p>→ Verwendung der Zwergstrauchmengen aus Teil 2 des Originalfragebogens</p>
b	<p>Geringfügige Abweichung (\leq 1. Quantil der Differenzen) zwischen der Zwergstrauchsumme in Teil 4 der Nacherhebung und der Zwergstrauchsumme aus Teil 4 des Originalfragebogens</p> <p>→ Verwendung der Werte aus der Nacherhebung unter Zuhilfenahme der Werte aus der Originalerhebung</p>
c	<p>Erhebliche Abweichung ($>$ 1. Quantil der Differenzen) zwischen der Zwergstrauchsumme in Teil 2 der Nacherhebung und der Zwergstrauchsumme aus Teil 2 des Originalfragebogens, sowie zwischen der Zwergstrauchsumme in Teil 4 der Nacherhebung und der Zwergstrauchsumme aus Teil 4 des Originalfragebogens</p> <p>→ Verwendung der Werte aus der Nacherhebung unter Zuhilfenahme der Werte aus der Originalerhebung</p>
d	<p>Durch Kommentar in der Nacherhebung fehlerhafte Eingabe in der Originalerhebung ersichtlich (auch bei geringfügiger Abweichung = a oder b)</p> <p>→ Verwendung der Werte aus der Nacherhebung unter Zuhilfenahme der Werte aus der Originalerhebung</p>
e	<p>Haushalt für Nacherhebung nicht erreichbar</p> <p>→ Werte werden nicht beachtet</p>

Anhang III

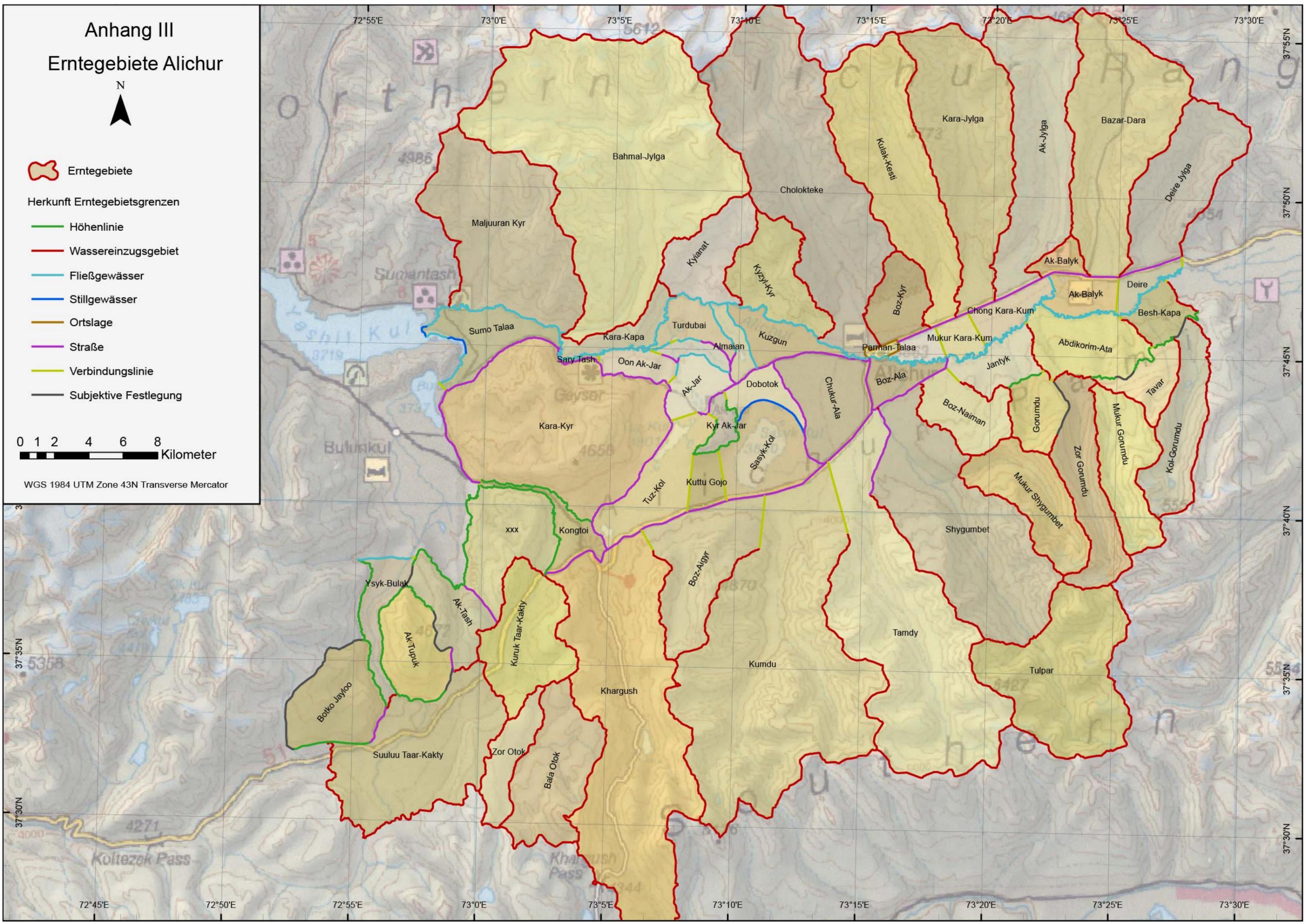
Erntegebiete Alichur



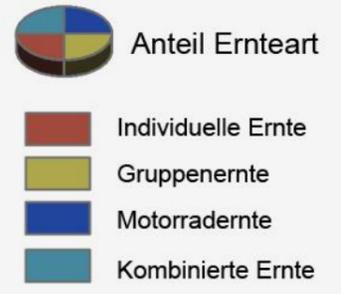
-  Erntegebiete
- Herkunft Erntegebietsgrenzen
-  Höhenlinie
-  Wassereinzugsgebiet
-  Fließgewässer
-  Stillgewässer
-  Ortslage
-  Straße
-  Verbindungslinie
-  Subjektive Festlegung



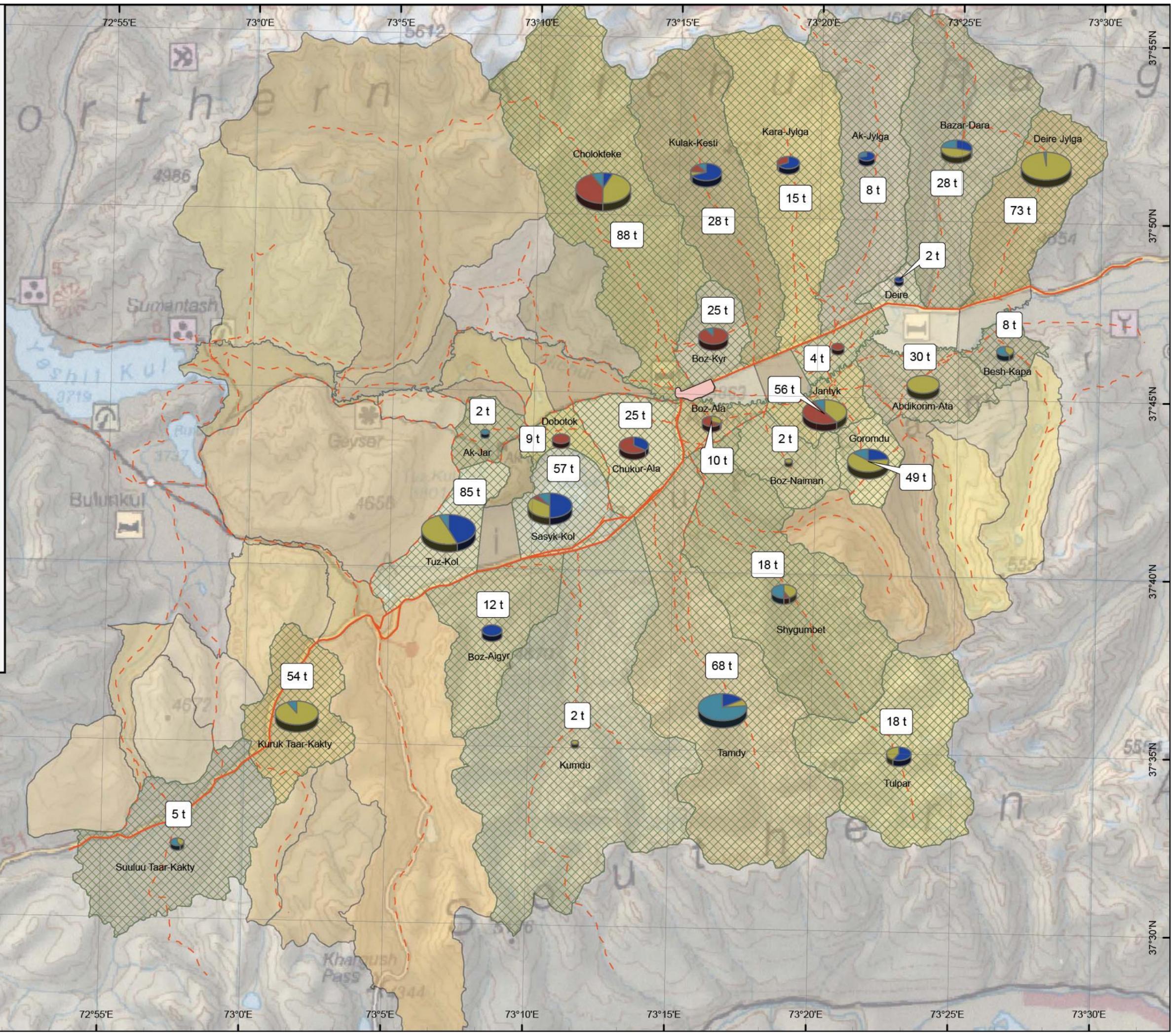
WGS 1984 UTM Zone 43N Transverse Mercator



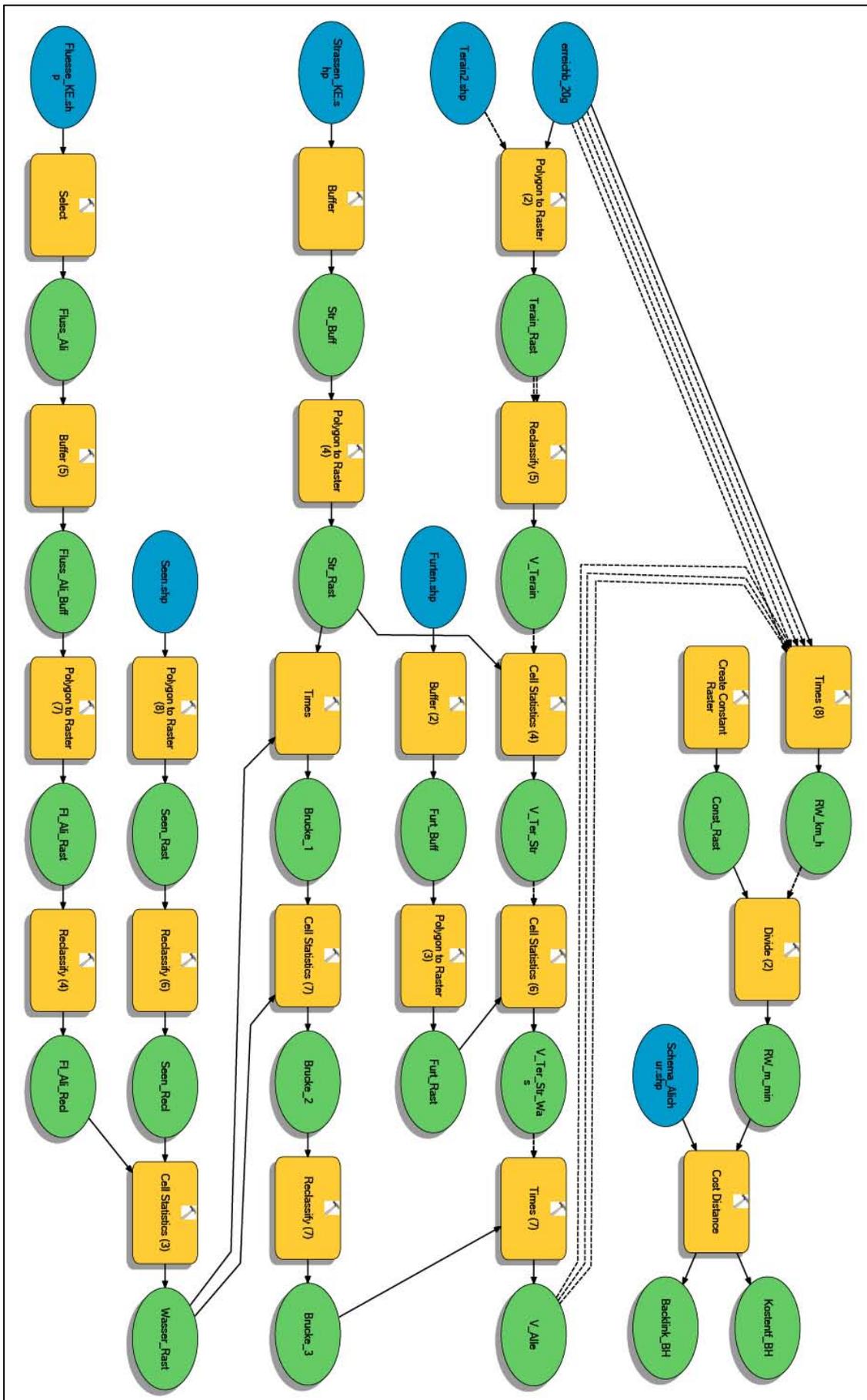
Anhang IV
Räumliche Ausdehnung der
Zwergstrauchernte von Alichur



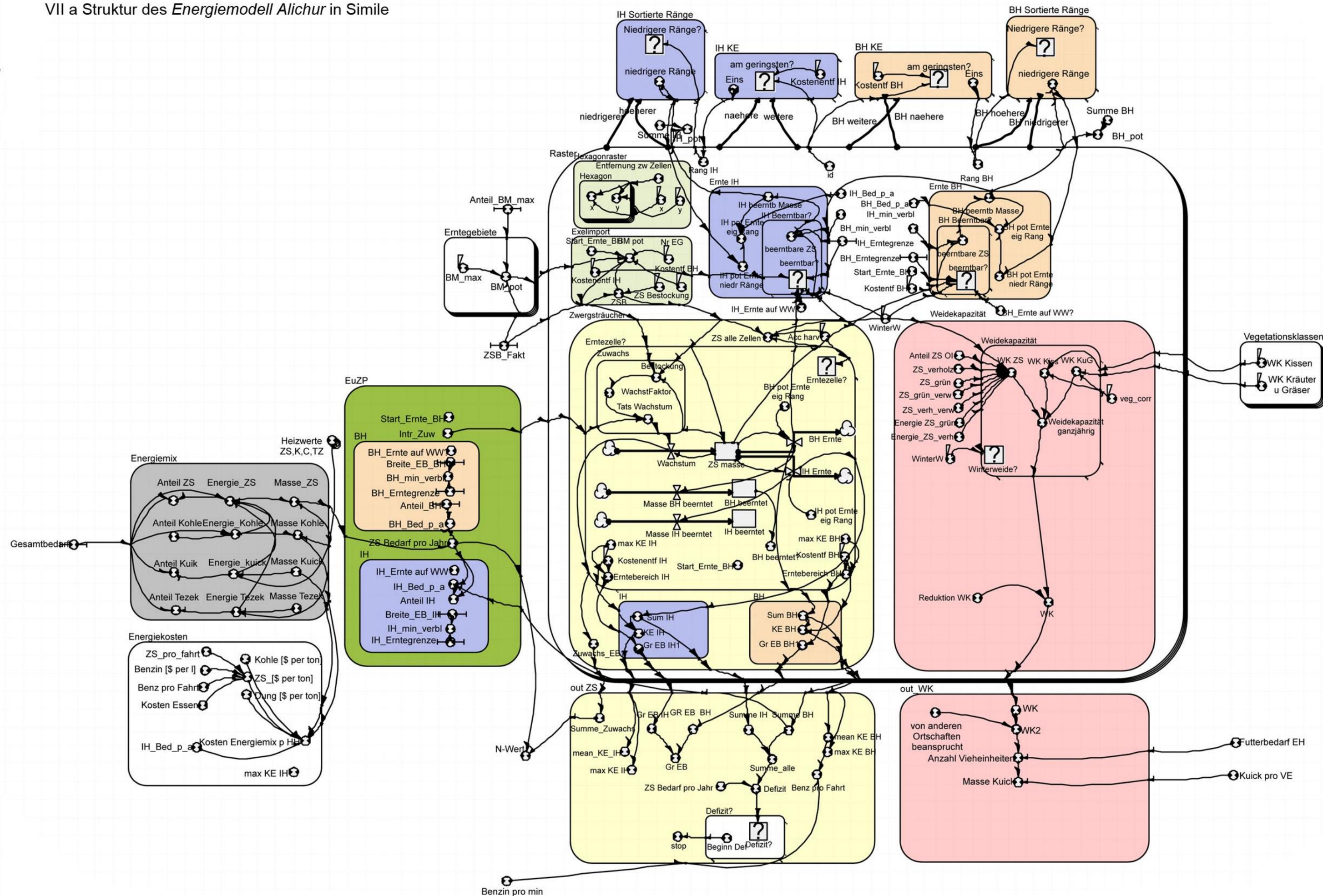
WGS 1984 UTM Zone 43N
 Transverse Mercator



VI. MODELL RAUMWIDERSTAND GRUPPENERNTE



VII a Struktur des *Energiemodell Alichur* in Simile



Variable Kosten Essen

$$\text{Kosten Essen} = 10 (\$)$$

Variable ZS_[\$ per ton]

$$\text{ZS_}[\$ \text{ per ton}] = (\text{Benz_pro_Fahrt} * \text{Benzin_per_l_} + \text{Kosten_Essen}) / \text{ZS_pro_fahrt} (\$/\text{ton})$$

Variable ZS_pro_fahrt

$$\text{ZS_pro_fahrt} = 1 (\text{ton})$$

Submodel Energiemix*Variable Anteil Kohle*

$$\text{Anteil Kohle} = 9.3 (\text{real})$$

Variable Anteil Kuik

$$\text{Anteil Kuik} = 100 * \text{Energie_kuick} / \text{Gesamtbedarf} (\text{real})$$

Variable Anteil Tezek

$$\text{Anteil Tezek} = 100 * \text{Energie_Tezek} / \text{Gesamtbedarf} (\text{real})$$

Variable Anteil ZS

$$\text{Anteil ZS} = 100 * \text{Energie_ZS} / \text{Gesamtbedarf} (\text{real})$$

Variable Energie Tezek

$$\text{Energie Tezek} = \text{Masse_Tezek} * \text{element}([\text{Heizwerte_ZS_K_C_TZ}], 4) (\text{GJ})$$

Variable Energie_Kohle

$$\text{Energie_Kohle} = \text{Gesamtbedarf} * \text{Anteil_Kohle} / 100 (\text{GJ})$$

Variable Energie_ZS

$$\text{Energie_ZS} = \text{Gesamtbedarf} - \text{Energie_Kohle} - \text{Energie_kuick} - \text{Energie_Tezek} (\text{GJ})$$

Variable Energie_kuick

$$\text{Energie_kuick} = \text{Masse_Kuick} * \text{element}([\text{Heizwerte_ZS_K_C_TZ}], 2) (\text{GJ})$$

Variable Masse Kohle

$$\text{Masse Kohle} = \text{Energie_Kohle} / \text{element}([\text{Heizwerte_ZS_K_C_TZ}], 2) (\text{ton})$$

Variable Masse Tezek

$$\text{Masse Tezek} = 83 (\text{ton})$$

Variable Masse_ZS

$$\text{Masse_ZS} = \text{Energie_ZS} / \text{element}([\text{Heizwerte_ZS_K_C_TZ}], 1) (\text{ton})$$

Submodel out WKVariable *Anzahl Vieheinheiten*

$$\text{Anzahl Vieheinheiten} = \text{WK2}/\text{Futterbedarf_EH} \text{ (real)}$$

Variable *Masse Kuick*

$$\text{Masse Kuick} = \text{Kuick_pro_VE} * \text{Anzahl_Vieheinheiten} \text{ (ton)}$$

Variable *WK*

$$\text{WK} = \text{sum}([\text{WK}]) \text{ (TJ)}$$

Variable *WK2* :

$$\text{WK2} = \text{WK} * (1 - \text{von_anderen_Ortschaften_beansprucht}/100) \text{ (TJ)}$$

Submodel out ZSVariable *Benz pro Fahrt*

$$\text{Benz pro Fahrt} = \text{mean_KE_BH} * \text{Benzin_pro_min} \text{ (l)}$$

Variable *Defizit*

$$\text{Defizit} = \text{Summe_alle-ZS_Bedarf_pro_Jahr} \text{ (ton/year)}$$

Variable *GR EB BH*

$$\text{GR EB BH} = \text{sum}([\text{Gr_EB_BH1}]) \text{ (km}^2\text{)}$$

Variable *Gr EB*

$$\text{Gr EB} = \text{Gr_EB_IH} + \text{GR_EB_BH} \text{ (km}^2\text{)}$$

Variable *Gr EB IH*

$$\text{Gr EB IH} = \text{sum}([\text{Gr_EB_IH1}]) \text{ (km}^2\text{)}$$

Variable *Summe BH*

$$\text{Summe BH} = \text{sum}([\text{Sum_BH}]) \text{ (ton/year)}$$

Variable *Summe IH*

$$\text{Summe IH} = \text{sum}([\text{Sum_IH}]) \text{ (ton/year)}$$

Variable *Summe_Zuwachs*

$$\text{Summe_Zuwachs} = \text{sum}([\text{Zuwachs_EB1}]) \text{ (ton/year)}$$

Variable *Summe_alle*

$$\text{Summe_alle} = \text{Summe_BH} + \text{Summe_IH} \text{ (ton/year)}$$

Variable *max KE BH*

$$\text{max KE BH} = \text{greatest}([\text{KE_BH}]) \text{ (min)}$$

Variable *max KE IH*

$$\text{max KE IH} = \text{greatest}([\text{KE_IH}]) \text{ (min)}$$

Variable *mean KE BH*

$$\text{mean KE BH} = \text{sum}([\text{KE_BH}]) / \text{howmanytrue}([\text{KE_BH}] > 0) \text{ (min)}$$

Variable *mean_KE_IH*

$mean_KE_IH = \text{sum}([KE_IH]) / \text{howmanytrue}([KE_IH] > 0)$ (min)

Variable *stop*

$stop = \text{if sum}(\{\text{Beginn_Def}\}) > 0 \text{ then stop}(1) \text{ else } 0$ (real)

Submodel out ZS/Defizit?

Submodel "out ZS/Defizit?" is a conditional fixed membership submodel of dimensions [1]

Condition *Defizit?*

$Defizit? = Defizit > 1 * "kg"/"year" \text{ or } Defizit < -1 * "kg"/"year"$ (cond_spec)

Variable *Beginn Def*

$Beginn\ Def = \text{init_time}(1)$ (year)

Submodel IH Sortierte Ränge

Submodel "IH Sortierte Ränge" is an association submodel between "Raster" and itself with roles "niedrigerer" and "hoeherer".

Condition *Niedrigere Ränge?*

$Niedrigere\ Ränge? = \text{niedrigerer_Rang_IH} > \text{hoeherer_Rang_IH}$ (cond_spec)

Variable *niedrigere Ränge*

$niedrigere\ Ränge = \text{max}(\text{hoeherer_IH_beerntb_Masse}, 0)$ (ton)

Submodel IH KE

Submodel "IH KE" is an association submodel between "Raster" and itself with roles "naehere" and "weitere".

Condition *am geringsten?*

$\text{am geringsten?} = \text{naehere_Kostenentf_IH} < \text{weitere_Kostenentf_IH} \text{ or } \text{naehere_Kostenentf_IH} == \text{weitere_Kostenentf_IH} \text{ and } \text{naehere_id_0} < \text{weitere_id}$ (cond_spec)

Variable *Eins*

$Eins = 1$ (int)

Submodel BH Sortierte Ränge

Submodel "BH Sortierte Ränge" is an association submodel between "Raster" and itself with roles "BH hoeherer" and "BH niedrigerer".

Condition *Niedrigere Ränge?*

$Niedrigere\ Ränge? = \text{BH_niedrigerer_Rang_BH} > \text{BH_hoeherer_Rang_BH}$ (cond_spec)

Variable *niedrigere Ränge*

niedrigere Ränge = $\max(\text{BH_hoeherer_BH_beerntb_Masse}, 0)$ (ton)

Submodel BH KE

Submodel "BH KE" is an association submodel between "Raster" and itself with roles "BH weitere" and "BH naehere".

Condition *am geringsten?*

am geringsten? = $\text{BH_naehere_Kostentf_BH} < \text{BH_weitere_Kostentf_BH}$ or
 $\text{BH_naehere_Kostentf_BH} == \text{BH_weitere_Kostentf_BH}$ and $\text{naehere_id} < \text{weitere_id}$
 (cond_spec)

Variable *Eins*

Eins = 1 (int)

Submodel Raster

Submodel "Raster" is a fixed_membership multi-instance submodel with dimensions [2121].

Variable *Rang BH*

Rang BH = $\text{sum}(\{\text{Eins_BH_weitere}\})$ (int)

Variable *Rang IH*

Rang IH = $\text{sum}(\{\text{Eins_weitere}\})$ (int)

Variable *id*

id = $\text{in_preceding}(\text{prev}(0)) + 1$ (int)

Submodel Raster/Zwergsträucher

Variable *Acc harv*

Acc harv = Fixed parameter (real)

Variable *ZS alle Zellen*

ZS alle Zellen = if $\text{Acc_harv} == 0$ then ZSB else $\text{sum}(\{\text{ZS_masse}\})$ (ton)

Variable *Zuwachs_EB1*

Zuwachs_EB1 = $\text{sum}(\{\text{Wachstum}\})$ (ton/year)

Where:

$\{\text{Wachstum}\}$ = Value(s) of Erntezelle?/Wachstum

Submodel Raster/Zwergsträucher/IH

Variable *Gr EB IH1*

Gr EB IH1 = $\text{sum}(\{\text{Erntebereich_IH}\}) * \text{km} * \text{km}$ (km²)

Variable *KE IH*

KE IH = if $\text{Sum_IH} > 0$ then Kostenentf_IH else 0 (min)

Variable *Sum IH*

Sum IH = sum({IH_Ernte}) (ton/year)

Submodel Raster/Zwergsträucher/BH

Variable *Gr EB BH1*

Gr EB BH1 = sum({Erntebereich_BH})*"km"*"km" (km²)

Variable *KE BH*

KE BH = if Sum_BH > 0 then Kostentf_BH else 0 (min)

Variable *Sum BH*

Sum BH = sum({BH_Ernte}) (ton/year)

Submodel Raster/Zwergsträucher/Erntezelle?

Submodel "Raster/Zwergsträucher/Erntezelle?" is a conditional fixed membership submodel of dimensions [1].

Compartment *BH beerntet*

Initial value = 1 (ton)

Compartment *IH beerntet*

Initial value = 0 (ton)

Compartment *ZS masse*

Initial value = ZSB (ton)

Condition *Erntezelle?*

Erntezelle? = Acc_harv==1 (cond_spec)

Flow *BH Ernte*

BH Ernte = min((ZS_masse)/dt(),BH_pot_Ernte__eig_Rang) (ton/year)

Flow *IH Ernte*

IH Ernte = min((ZS_masse)/dt(),IH_pot_Ernte__eig_Rang) (ton/year)

Flow *Masse BH beerntet*

Masse BH beerntet = BH_Ernte (ton/year)

Flow *Masse IH beerntet*

Masse IH beerntet = IH_Ernte (ton/year)

Flow *Wachstum*

Wachstum = Tatsächl_Wachstum*ZS_masse (ton/year)

Variable *BH beerntet?*

BH beerntet? = if BH_beerntet>0 then 1 else 0 (real)

Variable *Erntebereich BH*

Erntebereich BH = if Kostentf_BH<max_KE_BH then 1 else 0 (real)

Variable *Erntebereich IH*

Erntebereich IH = if Kostenentf_IH < max_KE_IH then 1 else 0 (real)

Submodel Raster/Zwergsträucher/Erntezelle?/Zuwachs

Variable *Bestockung*

Bestockung = Tereskenmasse/max(ZSB,BM_pot) (real)

Variable *Tats Wachstum*

Tats Wachstum = Intr_Zuw*WachstFaktor (1/year)

Variable *WachstFaktor*

WachstFaktor = 1-Bestockung (real)

Submodel Raster/Weidekapazität

Variable *Anteil ZS OI*

Anteil ZS OI = 0.15 (real)

Variable *Energie ZS grün*

Energie ZS grün = 6.60 (GJ/ton)

Comments:

Gewichtetes Mittel:

28 % grüne ZS (6,6 MJ/kg)

72 % verholzte ZS (5,59 MJ/kg)

Variable *Energie_ZS_verh*

Energie_ZS_verh = 5.59 (GJ/ton)

Variable *Reduktion WK*

Reduktion WK = 0.75 (real)

Comments:

z.B. Schneebedeckt oder für Heuernte

Variable *WK*

WK = sum({Weidekapazität_ganzjährig})*Reduktion_WK (GJ)

Variable *WinterW*

WinterW = Fixed parameter (real)

Variable *ZS grün*

ZS grün = 0.28 (real)

Variable *ZS grün verw*

ZS grün verw = 0.7 (real)

Comments:

Gewichtetes Mittel von 28 % grüne ZS Biomasse (37 % nutzbar) und 72 % verholzte ZS Biomasse (70 % nutzbar)

Variable *ZS_verh_verw*
 $ZS_verh_verw = 0.37$ (real)

Variable *ZS_verholzt*
 $ZS_verholzt = 0.72$ (real)

Variable *veg_corr*
 $veg_corr = \text{Fixed parameter}$ (real)

Submodel Raster/Weidekapazität/Weidekapazität

Submodel "Raster/Weidekapazität/Weidekapazität" is a conditional fixed membership submodel of dimensions [1].

Condition *Winterweide?*
 $Winterweide? = WinterW == 1$ (cond_spec)

Variable *WK Kiss*
 $WK\ Kiss = \text{element}([WK_Kissen], veg_corr) * 0.1 * "GJ"$ (GJ)

Variable *WK KuG*
 $WK\ KuG = \text{element}([WK_Kräuter_u_Gräser], veg_corr) * 0.1 * "GJ"$ (GJ)

Variable *WK ZS*
 $WK\ ZS = ZS_alle_Zellen * Anteil_ZS_OI * ZS_verholzt * ZS_verh_verw * Energie_ZS_verh + ZS_alle_Zellen * Anteil_ZS_OI * ZS_grün * ZS_grün_verw * Energie_ZS_grün$ (GJ)

Variable *Weidekapazität ganzjährig*
 $Weidekapazität\ ganzjährig = WK_Kiss + WK_KuG + WK_ZS$ (GJ)

Submodel Raster/Ernte IH

Variable *IH beerntb Masse*
 $IH\ beerntb\ Masse = \text{sum}(\{beerntbare_ZS\})$ (ton)

Variable *IH pot Ernte eig Rang*
 $IH\ pot\ Ernte\ eig\ Rang = \text{max}(\text{min}(IH_Bed_p_a - IH_pot_Ernte_niedr_Ränge/dt(), IH_beerntb_Masse/dt()), 0)$ (ton/year)

Variable *IH pot Ernte niedr Ränge*
 $IH\ pot\ Ernte\ niedr\ Ränge = \text{sum}(\{niedrigere_Ränge_niedrigerer\})$ (ton)

Submodel Raster/Ernte IH/IH Beerntbar?

Submodel "Raster/Ernte IH/IH Beerntbar?" is a conditional fixed membership submodel of dimensions [1].

Condition *beerntbar?*

$beerntbar? = \text{if } IH_Ernte_auf_WW_==1 \text{ and } Kostenentf_IH < 90 \cdot \text{min} \text{ then}$
 $\text{sum}(\{ZS_masse\} - \{BH_Ernte\} \cdot dt()) > IH_Erntegrenze_0 \text{ or}$
 $\text{sum}(\{ZS_masse\}) == IH_Erntegrenze_0 \text{ else and}(\text{and}(\text{sum}(\{ZS_masse\} -$
 $\{BH_Ernte\} \cdot dt()) > IH_Erntegrenze_0 \text{ or } \text{sum}(\{ZS_masse\} -$
 $\{BH_Ernte\} \cdot dt()) == IH_Erntegrenze_0, WinterW == 0), Kostenentf_IH < 90 \cdot \text{min})$
 (cond_spec)

Variable *beerntbare ZS*

$beerntbare\ ZS = \text{sum}(\{ZS_masse\}) - IH_min_verbl - BH_beerntb_Masse$ (ton)

Submodel Raster/Ernte BH

Variable *BH beerntb Masse*

$BH\ beerntb\ Masse = \text{sum}(\{beerntbare_ZS\})$ (ton)

Variable *BH pot Ernte eig Rang*

$BH\ pot\ Ernte\ eig\ Rang = \text{max}(\text{min}(BH_Bed_p_a -$
 $BH_pot_Ernte_niedr_Ränge/dt(), BH_beerntb_Masse/dt()), 0)$ (ton/year)

Variable *BH pot Ernte niedr Ränge*

$BH\ pot\ Ernte\ niedr\ Ränge = \text{sum}(\{niedrigere_Ränge_BH_niedrigerer\})$ (ton)

Submodel Raster/Ernte BH/BH Beerntbar?

Submodel "Raster/Ernte BH/BH Beerntbar?" is a conditional fixed membership submodel of dimensions [1].

Condition *beerntbar?*

$beerntbar? = \text{if } BH_Ernte_auf_WW_==1 \text{ then}$
 $\text{sum}(\{ZS_masse\}) > BH_Erntegrenze \text{ else}$
 $\text{and}(\text{sum}(\{ZS_masse\}) > BH_Erntegrenze, WinterW == 0)$ (cond_spec)

Variable *beerntbare ZS*

$beerntbare\ ZS = \text{sum}(\{ZS_masse\}) - BH_min_verbl$ (ton)

Submodel Raster/Exelimport

Variable *BM pot*

$BM\ pot = \text{if } Start_Ernte_BH > Kostentf_BH \text{ then}$
 $\text{max}(\text{element}([BM_pot], Nr_EG), ZSB) \text{ else } ZSB$ (ton)

Variable *Kostenentf IH*

Kostenentf IH = Fixed parameter (min)

Variable *Kostentf BH :*

Kostentf BH = Fixed parameter (min)

Variable *Nr EG*

Nr EG = Fixed parameter (real)

Variable *ZS Bestockung*

ZS Bestockung = Fixed parameter (ton)

Variable *ZSB*

ZSB = ZSB_Fakt*ZS_Bestockung (ton)

Submodel Raster/Hexagonraster

Variable *Entfernung zw Zellen*

Entfernung zw Zellen = $2 \cdot \sqrt{1/(2 \cdot \sqrt{3})}$ (km)

Variable *x*

x = Fixed parameter (m)

Variable *y*

y = Fixed parameter (m)

Submodel Raster/Hexagonraster/Hexagon

Submodel "Raster/Hexagonraster/Hexagon" is a fixed_membership multi-instance submodel with dimensions [6].

Variable *x*

$x = x + \text{element}([0, 0.5, 0.5, 0, -0.5, -0.5] \cdot \text{Entfernung_zw_Zellen}, \text{index}(1))$ (m)

Variable *y*

$y = y + \text{element}([1, 0.5, -0.5, -1, -0.5, 0.5] \cdot \text{Entfernung_zw_Zellen}, \text{index}(1)) \cdot 1/\sqrt{3}$ (km)

Submodel EuZP

Variable *Intr_Zuw*

Intr_Zuw = if time() < 11*"year" then 0.036 else 0.036 (1/year)
Minimum = 0, Maximum = 1

Variable *Start_Ernte_BH*

Start_Ernte_BH = 45 (min)

Variable *ZS Bedarf pro Jahr*

ZS Bedarf pro Jahr = Masse_ZS/"year" (ton/year)

Submodel EuZP/BH

Variable *Anteil_BH*

Anteil_BH = Variable parameter (int)
Minimum = 0, Maximum = 100

Variable *BH_Bed_p_a*

BH_Bed_p_a = ZS_Bedarf_pro_Jahr*(Anteil_BH_0/100) (ton/year)

Variable *BH_Ernte auf WW?*

BH_Ernte auf WW? = 0 (real)

Variable *BH_Erntegrenze*

BH_Erntegrenze = Variable parameter (ton)
Minimum = 0, Maximum = 500

Variable *BH_min_verbl*

BH_min_verbl = $\max(\text{BH_Erntegrenze}_0 - \text{Breite_EB_BH}, 0)$ (ton)

Variable *Breite_EB_BH*

Breite_EB_BH = Variable parameter (ton)
Minimum = 0, Maximum = 200

Submodel EuZP/IH

Variable *Anteil IH*

Anteil IH = $100 \cdot \text{IH_Bed_p_a} / \text{ZS_Bedarf_pro_Jahr}$ (real)
Minimum = 0, Maximum = 100

Variable *Breite_EB_IH*

Breite_EB_IH = Variable parameter (ton)
Minimum = 0, Maximum = 500

Variable *IH_Bed_p_a*

IH_Bed_p_a = $\text{ZS_Bedarf_pro_Jahr} - \text{Summe_BH}$ (ton/year)

Variable *IH_Ernte auf WW?*

IH_Ernte auf WW? = 1 (real)

Variable *IH_Erntegrenze*

IH_Erntegrenze = Variable parameter (ton)
Minimum = 0, Maximum = 500

Variable *IH_min_verbl*

IH_min_verbl = $\max(\text{IH_Erntegrenze}_0 - \text{Breite_EB_IH}, 0)$ (ton)

Submodel Vegetationsklassen

Submodel "Vegetationsklassen" is a fixed_membership multi-instance submodel with dimensions [10].

Variable *WK Kissen*

WK Kissen = Fixed parameter (real)

Variable *WK Kräuter u Gräser*

WK Kräuter u Gräser = Fixed parameter (real)

Submodel Erntegebiete

Submodel "Erntegebiete" is a fixed_membership multi-instance submodel with dimensions [68].

Variable *BM_max*

BM_max = Fixed parameter (ton)

Variable *BM_pot*

BM_pot = BM_max*Anteil_BM_max*ZSB_Fakt (ton)