

Hirsche unter Strom

Erfassung von Landschaftskonnektivität am Beispiel des Rotwildes

Energizing Stags - Detection of Landscape Connectivity for Red Deer

Bachelorarbeit an der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der
Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von

Levent S. Burggraef

Erstprüfender: Dr. Winfried Kurth

Zweitprüfender: Horst Reinecke

Wissenschaftliche Betreuung: Robert Nuske

12. November 2010

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Rotwildpopulationen, Landschaftszerschneidung und -konnektivität	3
1.2	Erfassung von Landschaftskonnektivität	4
1.3	Das Untersuchungsgebiet	7
2	Material und Methoden	8
2.1	Datengrundlage	8
2.2	Die Software Circuitscape	10
2.3	Datenkonvertierung und Erstellung von Eingabedaten	11
2.4	Berechnung und Auswertung	13
3	Ergebnisse	14
4	Diskussion	19
5	Fazit	22

Zusammenfassung

Das Rotwild (*Cervus elaphus*) ist das größte freilebende Säugetier Deutschlands. In den letzten Jahrzehnten sieht sich die Art zunehmend mit dem Problem der Landschaftszerschneidung und der Aufsplitterung in zahlreiche Unterpopulationen konfrontiert. In der Folge treten häufig ernstzunehmende Symptome von Inzuchtdepression auf. Im Rahmen eines Rotwildmanagement-Projektes in Schleswig-Holstein wurden eine Landschaftsklassifikation und eine Least-Cost Analyse durchgeführt, um Informationen über die Situation von Landschaftszerschneidung und -konnektivität in der Region zu gewinnen. Diese Arbeit versucht, auf Basis der Landschaftsklassifikation und mithilfe der Software Circuitscape, den Nutzen der Stromkreistheorie für die Erfassung von Landschaftskonnektivität zu bewerten. Für vier Szenarien, die verschiedene Änderungen der Landschaftsstruktur simulieren, werden Stromflußkarten und effektive Widerstände berechnet. Die Ergebnisse werden mithilfe von Telemetriedaten validiert und die berechneten Einheiten unter Einbeziehung wildbiologischer Literatur diskutiert.

Abstract

Red deer (*Cervus elaphus*) is the largest mammal in Germany. In recent decades, it has been confronted with landscape dissection and fragmentation into various subpopulations, eventually leading to severe symptoms of incest depression. As part of a deer management project in Schleswig-Holstein, a landscape classification and least-cost analysis have been applied to gain information on the situation of landscape dissection and connectivity in the region. This thesis attempts to evaluate the use of circuit theory to assess landscape connectivity based on the landscape classification and the software Circuitscape. Current maps and effective resistances are calculated for four scenarios, in which different changes in the landscape structure are simulated. Results are validated with telemetric data and the calculated metrics are discussed on the basis of wildlife biologic literature.

1 Einleitung

1.1 Rotwildpopulationen, Landschaftszerschneidung und -konnektivität

Das Rotwild (*Cervus elaphus*) ist das größte freilebende Säugetier im deutschen Raum. Ursprünglich ein tagaktives Steppentier, ist es durch den Einfluss des Menschen zum dämmerungs- und nachtaktiven Waldtier geworden, worin sich seine Anpassungsfähigkeit (Euryökie) zeigt. Dennoch ist die Art in Deutschland Problemen ausgesetzt, die auch durch evolutionäre Begünstigungen wie ein breites Nahrungsspektrum, oder variable Streifgebiete, nicht ausgeglichen werden können. Es kommt heute nur noch inselartig auf etwa 80 Verbreitungsarealen isoliert vor, zwischen denen der Genfluß völlig unterbrochen ist. Diese sind zum Teil durch unüberwindbare Hindernisse, wie Verkehrswege und Stadtgebiete aber auch Gatter oder Autobahnzäune voneinander getrennt (Bützler, 2001). Das Problem wird durch vielerorts überhöhte Wildbestände noch verschärft, da die sich dadurch bildenden Großrudel zu größeren Wanderungen gezwungen sind (Wagenknecht, 2000). Während eingeschränkte Wanderungsmöglichkeiten und zu große Bestände zu erheblichen Wildschäden führen, kann

sich der mangelnde genetische Austausch letztendlich in einer fortschreitenden Inzuchtdepression niederschlagen. So wurde zum Beispiel im Rahmen einer Studie einer schleswig-holsteinischen Rotwildpopulation eine dramatisch verringerte Heterozygotie im Vergleich zu anderen europäischen Populationen festgestellt (Zachos u. a., 2007).

Diese Verinselung des Rotwildvorkommens in Deutschland ist auf ein Phänomen zurückzuführen, das in der Landschaftsökologie „Landschaftszerschneidung“ genannt wird. Die wohl am häufigsten zitierte Definition dieses Begriffes ist die von Jaeger u. a. (2005). Ihm zufolge handelt es sich bei der Landschaftszerschneidung um ein Zertrennen von gewachsenen ökologischen Zusammenhängen zwischen räumlich verbundenen Landschaftsbereichen. Hauptursache sind vom Menschen geschaffene, vorwiegend linienhafte Strukturen, mit denen Barriere-, Emissions-, oder Kollisionswirkungen sowie ästhetische Beeinträchtigungen verbunden sind (Jaeger u. a., 2005). Typische zerschneidende Elemente sind z.B. Straßen, Autobahnen und Eisenbahnlinien, aber auch begradigte Flüsse oder stark frequentierte Wanderwege können sich entsprechend auswirken.

Soll das Phänomen der Landschaftszerschneidung im Hinblick auf die Landschaft als Netz miteinander verbundener Lebensraumabschnitte betrachtet werden, so wird der Begriff der Landschaftskonnektivität verwendet. Er stellt gewissermaßen den Kehrwert zur Landschaftszerschneidung dar: Je stärker die Landschaft zerschnitten ist, desto geringer ist ihre Konnektivität. Der Begriff wird 1993 von Philip Taylor als Grad definiert, in dem die Landschaft die Bewegung zwischen Ressourcenausschnitten behindert oder erleichtert (Taylor u. a., 1993). Er gilt seit dem als schwer erfassbar (Crooks u. Sanjayan, 2006; Taylor u. a., 2006). 2006 bemüht sich Taylor um eine genauere Begriffsdefinition. Er hebt unter anderem hervor, dass Landschaftskonnektivität die physische Struktur einer Landschaft, in Kombination mit der Reaktion eines Organismus auf diese Struktur, beschreibt. Er spricht auch von Konnektivität als einer emergenten Eigenschaft einer Landschafts-Spezies-Interaktion. Desweiteren unterscheidet er zwischen struktureller und funktioneller Landschaftskonnektivität und warnt vor der Verwechslung beider Termini (Taylor u. a., 2006):

- *Strukturelle Konnektivität* beschränkt sich auf die physischen Beziehungen zwischen Habitatausschnitten, wie z.B. die Beschreibung von Korridoren oder geografischen Distanzen. Sie erfasst nicht die Reaktion von Organismen auf die Landschaftsstruktur. D.h., dass z.B. ein vorhandener Korridor nicht zwingend auch von einem Organismus genutzt wird.
- *Funktionelle Konnektivität* hingegen beschreibt die tatsächliche Bewegung oder Wanderung von Organismen durch die Landschaft.

Wenn von Landschaftskonnektivität gesprochen wird, so ist nach Taylor von der funktionellen Konnektivität auszugehen. Jedoch kann gerade die computergestützte Erfassung lediglich eine Beschreibung der strukturellen Konnektivität liefern, was auch in der vorliegenden Arbeit deutlich wird. Diesem Sachverhalt ist bei der Interpretation der Ergebnisse und insbesondere bei der Verwendung zur praktischen Landschaftsplanung Rechnung zu tragen.

1.2 Erfassung von Landschaftskonnektivität

Graphenmodelle und Least-Cost Analyse Wird Konnektivität als schutzwürdiges Element des Natur- und Landschaftshaushaltes erkannt, so liegt es nahe, sie auch quantitativ

erfassen zu wollen. Im wissenschaftlichen Diskurs werden meist zwei Begriffe im Zusammenhang mit der Konnektivitätserfassung genannt, die Graphentheorie und die Least-Cost Analyse. Sie werden als Verfahren sowohl einzeln als auch in Kombination angewandt (Bunn u. a., 2000; Adriaensen u. a., 2003).

Beide Überlegungen gehen zunächst davon aus, dass sich ein Individuum, welches sich durch die Landschaft bewegt, immer mit gewissen Widerständen konfrontiert sieht. Einfach zu veranschaulichen ist dieses Konzept anhand einer Autobahn: für ein nicht flugfähiges Lebewesen stellt sie eine nahezu unüberwindbare Barriere dar, die nur im seltensten Fall erfolgreich überquert wird. Ihr kann also ein hoher, in vielen Fällen absoluter Widerstand zugeordnet werden. Demgegenüber wird ein Waldstück oder eine Hecke die Bewegung eines Lebewesens wesentlich weniger hemmen, oder sie sogar fördern. Hier würde in der Konsequenz ein wesentlich geringerer oder gar kein Widerstand zugeordnet. Es liegt auf der Hand, dass Art und Höhe der Widerstände stark abhängig von der betrachteten Spezies sind. Verständlicherweise hat eine wenig ausgebaute Bundesstraße auf das Wanderungsverhalten der Erdkröte (*Bufo bufo*) eine ganz andere Auswirkung als auf das des von uns betrachteten Rothirsches. Bei der Zuordnung von Widerständen müssen also möglichst genaue Informationen über die Biologie der Art zugrunde liegen. Werden für einen konkreten Landschaftsausschnitt und eine bestimmte Art solche Widerstandsklassen festgelegt, so lässt sich auf Grundlage geografischer Daten im Computer eine Landschaftsklassifizierung erstellen.

Um nun zu erfassen, wie es um die Konnektivität im so klassifizierten Landschaftsausschnitt bestellt ist, ist es praktikabel, diese in bestimmten Größen zu quantifizieren. Aussagekräftige Größen lassen sich auf Grundlage der sog. Graphentheorie errechnen. Die Anwendung der Graphentheorie in der Analyse von Landschaftskonnektivität wird von Bunn u. a. (2000) behandelt. Graphen sind zunächst Netzwerke, die aus von Kanten verbundenen Knoten bestehen. Die Knoten repräsentieren, je nach Beobachtungsebene, ganze Habitate oder einzelne Zellen einer Rasterkarte. Den Kanten können in Übereinstimmung mit den landschaftlichen Widerständen bestimmte Gewichte zugeordnet werden. Für dieses Modell lassen sich dann Daten errechnen, die landschaftsökologisch interpretiert werden können, z.B.:

- Der Graphendurchmesser $d(G)$, welcher die allgemeine Durchquerbarkeit des Habitatomosaiks beschreibt
- Die Matrix der Verteilungswahrscheinlichkeit P ; die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Individuum von einem Habitatausschnitt zum anderen wandert
- Die Adjazenzmatrix, die die Nähe von zwei Knoten zueinander ausdrückt

Solche Maße entfalten ihre Aussagekraft jedoch nur in Relation zueinander. Daher besteht das eigentliche Potenzial dieses Modells in der Erstellung von Alternativszenarien. Diese werden zum Beispiel durch das Entfernen von Knoten und/oder Kanten gewonnen, wodurch der Verlust von Habitat, z.B. durch menschliche Bauaktivitäten, simuliert wird. So können letztendlich Knoten identifiziert werden, die sehr sensibel auf Habitatverlust reagieren und leicht isoliert werden können. Ausserdem zeigen sich Kanten, die eine entscheidende Rolle für die Bewegung zwischen den Knoten spielen, also als sog. Korridore fungieren (Bunn u. a., 2000).

Bei der Berechnung von Wegen zwischen bestimmten Knoten ergibt es wenig Sinn, einfach die euklidische Distanz, d.h. den räumlichen Abstand zwischen den Knoten, zu messen.

Aufgrund der landschaftlichen Widerstände wird ein Lebewesen nicht immer den kürzesten Weg zwischen zwei Punkten wählen, sondern den, der den geringsten Gesamtwiderstand birgt. So wird ein Rothirsch kaum eine Autobahn überqueren, um eine Äsungsfläche auf der anderen Seite zu erreichen, sondern die Straße so lange entlang laufen, bis sich eine Überquerungsmöglichkeit findet. Zur Berechnung von Pfaden zwischen den Knoten bedienen sich Bunn, Urban, u. Keitt (2000) daher der sog. Least-Cost Analyse. Sie kombiniert Habitatqualität und euklidische Distanz und berechnet daraus den Weg mit den geringsten Bewegungskosten.

Least-Cost Analysen werden auch unabhängig von sonstigen graphentheoretischen Überlegungen zur Gewinnung von Informationen zur Landschaftskonnektivität angewandt. So simulieren Adriaensen u. a. (2003) für ein Erschließungsprojekt in Belgien mehrere Szenarien für die Verteilung von Wald- und Heckenabschnitten in der Landschaft. Ausgehend von einem Waldstück als Ursprungshabitat wird die effektive Distanz für jeden Pixel der Fläche berechnet.

Die Stromkreistheorie Die Stromkreistheorie (engl. „Circuit Theory“) ist ein aus der Graphentheorie heraus entwickeltes Modell, das ebenfalls in verschiedensten naturwissenschaftlichen Feldern Verwendung findet. Als Konnektivitätsmodell wurde es erstmals von McRae u. a. (2008) vorgestellt. Grundsätzlich erfolgt dabei nur eine kleine Veränderung eines Graphenmodells: Die Kanten werden durch elektrische Widerstände ersetzt, die Landschaft fungiert so als leitende Oberfläche. Aus diesen Annahmen ergeben sich dann Größen, die sich nach dem ohmschen Gesetz $I = \frac{U}{R}$ berechnen lassen. Die elektrischen Einheiten können schließlich ökologisch interpretiert werden. Die Interpretationen nach McRae u. a. (2008) finden sich in Tabelle 1.

Aus dieser Tabelle ergeben sich bereits die beiden wichtigsten Unterschiede zwischen Least-Cost- und Stromkreismodellen. Zum einen unterstellt die Stromkreistheorie das Sinken des effektiven Widerstandes, wenn mehrere Pfade verfügbar sind. Zum anderen basiert die Stromkreistheorie ihrerseits auf der Theorie von *zufälligen Wanderungen* (Codling u. a., 2008). Diese besagt, dass die Wahrscheinlichkeit dass ein Lebewesen, ausgehend von einem bestimmten Punkt in der Landschaft, eine bestimmte Richtung einschlägt, zunächst gleich ist. Eine Verzerrung der Wahrscheinlichkeiten kommt hier erst durch die Zuordnung landschaftlicher Widerstände zustande. Die gerichtete Bewegung auf ein bestimmtes Ziel, die bei der Berechnung von Least-Cost Pfaden angenommen wird, wird von der Stromkreistheorie nicht unterstellt.

Es stellt sich die Frage, ob die Stromkreistheorie einen sinnvollen Beitrag zur Vorhersage von Wanderungsprozessen und zur Analyse der Konnektivitätssituation beim Rotwild in Schleswig Holstein bieten kann. Dies soll in der vorliegenden Arbeit anhand der stromkreistheoretischen Analyse des Streifgebietes eines telemetrierten Hirsches erörtert werden. Dazu wird die von McRae und Shah entwickelte Software Circuitscape genutzt. Eine vom Institut für Wildbiologie Göttingen und Dresden e.V. bereitgestellte Landschaftsklassifizierungskarte soll dabei als Grundlage zur sinnvollen Zuweisung von Landschaftswiderständen dienen. Zuletzt sollen die Ergebnisse mithilfe von Telemetriedaten validiert werden.

Elektrische Größe (Symbol und Einheit)	Ökologische Interpretation
Widerstand (R , Ohm), der Widerstand, den ein elektrischer Leiter dem Durchfluss von elektrischem Strom entgegensetzt.	Widerstand eines Habitattypen gegen die Bewegung von Lebewesen. Entspricht dem ökologischen Konzept des Landschaftswiderstandes.
Leitfähigkeit (G , Siemens), Kehrwert des Widerstandes und ein Maß für die Fähigkeit des Leiters, Strom zu leiten.	Analog zur sog. Habitaddurchlässigkeit. Steht in direktem Bezug zu der Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Zufallswanderer über die betreffende Zelle oder Kante bewegt.
Effektiver Widerstand (\hat{R} , Ohm), der Widerstand gegen den Stromfluss zwischen zwei Knoten, die durch ein Netzwerk aus Widerständen verbunden sind	Auch bezeichnet als <i>Widerstandsdistanz</i> , ein Maß für die Isolation zweier Knoten eines Graphen, oder Zellen eines Rasternetzes. Vergleichbar mit der <i>effektiven Distanz</i> aus der Least-Cost Theorie, sinkt aber bei der steigenden Verfügbarkeit zusätzlicher Pfade.
Effektive Leitfähigkeit (\hat{G} , Siemens), Kehrwert des effektiven Widerstandes, Maß für die Fähigkeit eines Netzwerkes aus Widerständen, Strom zwischen zwei Knoten zu leiten.	Ein Maß für die Konnektivität zwischen Knotenpaaren eines Graphen oder Zellen eines Rasternetzes. Sie steigt mit der Verfügbarkeit zusätzlicher Pfade.
Stromfluß (I , Ampere), Fluß von Ladungen durch einen Knoten oder Widerstand eines Stromkreises	Der Stromfluß repräsentiert die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Zufallswanderer über die betrachtete Kante eines Graphen, oder über eine bestimmte Zelle eines Rasternetzes bewegt.
Spannung (U , Volt), der Ladungsunterschied zwischen zwei Knoten in einem Stromkreis.	Repräsentiert die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zufallswanderer, der den betrachteten Knoten eines Graphen/ die betrachtete Zelle eines Rasternetzes verlässt, einen bestimmten Punkt (die Spannungsquelle) erreicht

Tabelle 1: Elektrische Größen und ihre landschaftsökologische Interpretation

1.3 Das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt in Schleswig Holstein, das acht unterschiedlich große Rotwildvorkommen in den stärker bewaldeten Regionen beherbergt. Das Land bietet sehr gute bis nahezu optimale Lebensräume, die jedoch nur teilweise genutzt werden. Dem Angebot an vom Rotwild bevorzugten, halboffenen, strukturreichen Landschaften steht ein hoher Zersiedelungsgrad und die Landschaftsfragmentierung durch Infrastrukturlinien gegenüber. Jedoch ist hier ein Austausch zwischen den einzelnen Populationen im Gegensatz zu anderen Bundesländern, in denen die Verinselung weitgehend unüberbrückbar erscheint, theoretisch möglich (Meißner u. a., 2009). Das Institut für Wildbiologie Göttingen und Dresden e.V. hat für Schleswig-Holstein im Rahmen eines Rotwildmanagementprojektes bereits eine Landschaftsklassifikation in Form einer Lebensraumverbundkarte erstellt. Ritter (2008) führte in seiner Masterarbeit unter anderem eine Least-Cost Analyse für vier Verbreitungsgebiete durch. Desweiteren wurden im Rahmen des Projektes bisher 21 Tiere telemetriert (Schomaker, 2010). Anhand der Telemetriedaten lassen sich für landschaftsökologische Untersuchungen interessante Wandermuster erkennen. Sie werden vier mal täglich mit einem Abstand von sechs Stunden übermittelt. Für diese Arbeit wird der mit Halsbandnummer c5503 telemetrierte Hirsch (Spitzname „Helmuth“) beobachtet, der sich in der Zeit vom

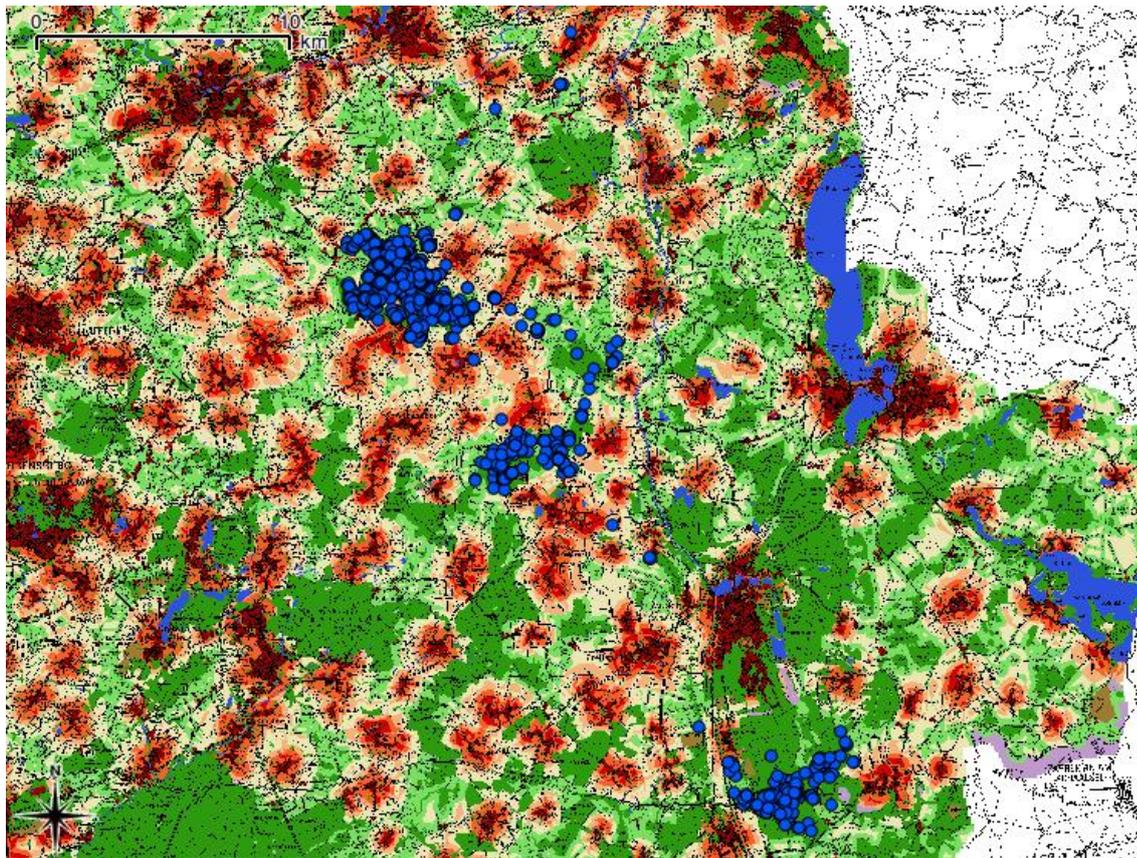


Abbildung 1: Lebensraumverbundkarte mit topographischer Karte und Ortungsdaten des Hirsches c5503

19.03.2010 bis zum 01.09.2010 zwischen zwei Einständen bewegt (siehe Abbildung 1). Der Frühjahrseinstand befindet sich südlich der Stadt Mölln zwischen Grambeck und Gudow, wobei er südlich durch die A24 begrenzt wird. Im Herbst hält sich das Tier nördlich von Mölln zwischen Steinhorst und Siebenbäumen auf, wo es aber auch im Mai schon geortet werden kann. In Einzelfällen wandert es bis in den Bereich um Niendorf südlich von Lübeck. Dies ist eine Strecke von ca. 33 km Luftlinie.

2 Material und Methoden

2.1 Datengrundlage

Die Lebensraumverbundkarte Die als Lebensraumverbundkarte bezeichnete Landschaftsklassifizierung des Institutes für Wildbiologie (Meißner u. a., 2009) unterteilt die Landschaft in drei Typen von Flächen, und zwar Restriktions- und Positiv- sowie neutrale Flächen. Restriktionsflächen werden in Abhängigkeit von ihrer Größe von einer Pufferzone umgeben, welche den über die räumliche Fläche hinausgehenden Störungseffekt durch die Siedlungen umgebende menschliche Aktivität (Verkehrsaufkommen, Freizeitdruck, Lärm u.ä.) repräsentiert. Die dazu notwendige Bufferfunktion ist in allen gängigen GI-Systemen enthalten. Die Zuordnung der Bufferzonen wird entsprechend Tabelle 2 vorgenommen.

Siedlungsgröße	Buffer Zone 1	Buffer Zone 2	Buffer Zone 3
Siedlung $\leq 10ha$	ohne	ohne	ohne
Siedlung $> 10ha \wedge < 20ha$	100 m	300 m	500 m
Siedlung $\geq 20ha$	300 m	500 m	1000 m

Tabelle 2: Bufferung der Restriktionsflächen

Kleine Flächen werden nicht gebuffert, da ihr Effekt auf die sie umgebende Fläche als gering eingestuft wird. Ein Zerschneidungseffekt ergibt sich jedoch häufig dadurch, dass die Siedlungen oft in geringem Abstand in großer Zahl vorkommen und die Zwischenräume faktisch nicht mehr durchquert werden. Daher werden solche Bereiche mit einem Abstand von unter 200 m identifiziert und die Zwischenräume den Restriktionsflächen zugeschlagen (siehe hierzu Meißner u. a., 2009).

Positivflächen wie Wälder, Sukzessionsflächen, Moore etc. werden mit einem Buffer von 200 m versehen, um die positive Wirkung auf das Sicherheitsempfinden über die Fläche hinaus darzustellen. Die in Schleswig-Holstein das Landschaftsbild prägenden und für die Bewegung des Rotwildes bedeutenden Knicks (Heckenstrukturen mit Abgrenzungs- und Schutzfunktion) werden mit einem Buffer von 75 m versehen.

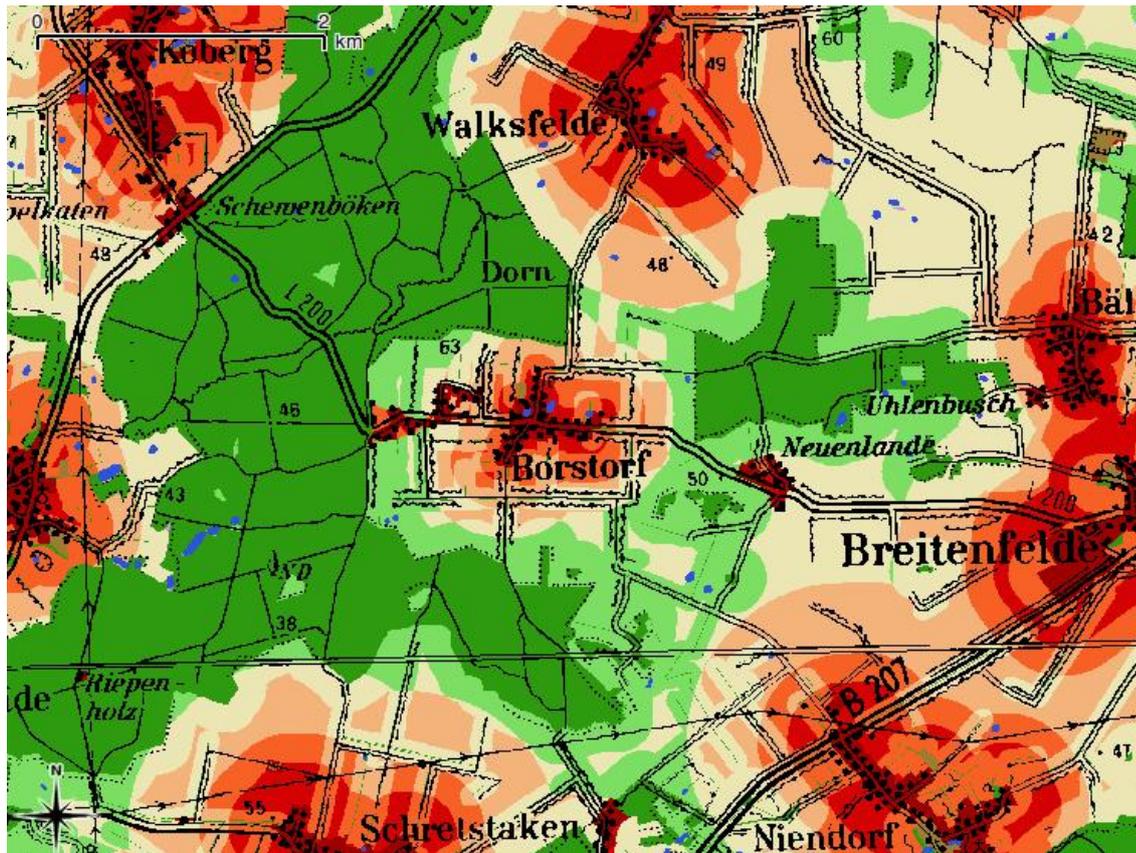


Abbildung 2: Ausschnitt aus der Lebensraumverbundkarte mit topographischer Karte

Gewässer, Straßen, landwirtschaftliche Flächen und Sonderkulturen werden als neutral klassifiziert, da ihre Auswirkungen auf die Bewegung im Einzelfall stark variieren können. So werden Bundesstraßen in Abhängigkeit vom Verkehrsaufkommen häufiger oder weniger häufig gequert, die Wirkung von Agrarflächen unterliegt starken saisonalen Schwankungen und bei Sonderkulturen liegen keine Informationen über die Art und eine mögliche Einzäunung vor.

In den Überschneidungsgebieten von Buffer-Zonen behalten neutrale Flächen ihre Eigenschaften, während die Wirkung von Restriktionsflächen durch die Überschneidung mit Positivflächen um eine Stufe gemildert wird.

So ergibt sich durch entsprechende Farbgebung eine Karte, anhand der mögliche für das Rotwild nutzbare Pfade und Korridore bereits intuitiv erkannt werden können (siehe Abbildung 2).

2.2 Die Software Circuitscape

Circuitscape ist ein freies, quelloffenes Programm, das es ermöglicht auf Basis von Widerstandskarten im Rasterformat elektrische Einheiten zu errechnen, die sich zur landschaftsökologischen Interpretation eignen. Es bedient sich dazu Algorithmen aus der eingangs beschriebenen Stromkreistheorie. Die Software wurde von Brad McRae und Viral Shah entwickelt und kann unter www.circuitscape.org kostenlos heruntergeladen werden. Sie ist unter der GNU Lesser General Public License (LGPL) lizenziert, was zu einer Änderung, Verbesserung und Anpassung der Software auf eigene Bedürfnisse berechtigt.

Circuitscape ist in der Lage, für eine Habitatkarte mit Landschaftswiderständen effektive Widerstände zu berechnen sowie Karten zu erzeugen, auf denen Stromfluss oder Spannung als Rasterwert für jede Zelle angegeben werden. Als Eingabedaten sind dazu außer der Habitatkarte noch Karten nötig, die Start- und Endpunkt der Berechnung angeben. Diese sogenannten *Fokusknotten* können in Form von nur eine Zelle großen *Fokuspunkten* angegeben werden sowie als *Fokusregionen*, die mehrere Zellen umfassen. Sämtliche geografische Daten müssen im Arc/Info ASCII Grid Format vorliegen, Stromfluss- und Spannungskarten werden ebenfalls in diesem Format ausgegeben. Es handelt sich dabei um ein einfacheres Format, das auch mit einfachen Texteditoren manipuliert werden kann. Im Kopf des Dokumentes werden dabei in den ersten beiden Zeilen die Koordinaten der südwestlichsten Ecke der Karte angegeben (X- und Y-Koordinaten). In der dritten und vierten Zeile sind Zeilen- und Spaltenzahl festgelegt und in der fünften die Zellgröße als Länge einer Seite in Pixeln. Rasterzellen sind folglich quadratisch. Im Rest des Dokumentes wird jeder Zelle ein Rasterwert in Form einer natürlichen Zahl zugeordnet. Bereiche, für die keine Informationen vorhanden sind, werden durch NODATA-Zellen mit dem Wert -9999 repräsentiert.

Circuitscape läuft in verschiedenen Modi, mit denen die Form der Eingabedaten und Berechnungsalgorithmen beeinflusst werden kann. Von der Wahl der Voreinstellungen hängt wesentlich die Anforderung an die Rechenleistung ab. Für die Berechnungen im Rahmen dieser Arbeit wird der *advanced Mode* genutzt. Hier werden Stromquellen- und Erdungen in separaten Dateien definiert und alle Knoten gleichzeitig aktiviert. Außerdem kann die Stärke der Stromquellen angegeben und den Erdungen ein Widerstand zugeordnet werden. Für die Berechnung von effektiven Widerständen wird auch der *pairwise Mode* genutzt, bei dem sämtliche Fokusknotten in einer Datei gespeichert sind und eine Berechnung für jedes Knotenpaar durchgeführt wird, wobei jeweils ein Knoten als Stromquelle von 1 *Ampere*

und der verbleibende Knoten als Erdung fungiert. Eine weitere wichtige Entscheidung betrifft das Verbindungsschema der Rasterzellen bei der Berechnung. Es kann zwischen Vier-Nachbar und Acht-Nachbar Verbindungen gewählt werden. Die Acht-Nachbar Verbindung erhöht zwar die Rechenzeit, aber auch die Genauigkeit, da hier auch diagonal angrenzende Zellen in die Kalkulation einfließen. Um häufig nur einen Pixel breite und diagonal verlaufene Heckenstrukturen (Knicks), die bei der Wanderung des Rotwildes eine wichtige Rolle spielen, nicht von der Berechnung auszuschließen, wird im vorliegenden Fall mit der Acht-Nachbar Verbindung gerechnet. Weitere Informationen über mögliche Optionen und detailliertere Beschreibungen der Berechnungsweise finden sich in McRae u. Shah (2008).

2.3 Datenkonvertierung und Erstellung von Eingabedaten

Um auf Grundlage der vom Institut für Wildbiologie bereitgestellten Landschaftsklassifizierung einen Datensatz für Circuitscape zu gewinnen, muss diese mit möglichst geringem Aufwand und unter Erhaltung aller landschaftsökologisch wichtigen Informationen konvertiert werden können. Dazu kommt in der vorliegenden Arbeit die GI-Software GRASS (Geographic Resources Analysis Support System, siehe hierzu Neteler u. a. (2010)) zum Einsatz. Diese enthält zahlreiche Module zur Bearbeitung von Rasterdaten sowie Konvertierung und Ausgabe in Form von Arc/Info ASCII Grid Dateien. Die Datenauswahl und -konvertierung verläuft im Einzelnen wie folgt:

Zunächst ist zu entscheiden, welche Auflösung den notwendigen Kompromiss zwischen Informationsgehalt und Datenmenge darstellt. Hier bewährt sich eine Gitterweite von $6m$, bei der die feinen Knickstrukturen noch erhalten bleiben.

Die Erstellung einer Eingabedatei mit Habitatinformationen erfordert zunächst die Zuordnung von Widerständen, da die einzelnen Klassen in der Bufferkarte lediglich in der farblichen Darstellung, nicht aber in ihren Rasterwerten skaliert sind. Die Zuordnung erfolgt

Landschaftselement	Widerstand (Ω)
Wald	1
Waldrandbereiche und Hecken (Knicks)	2
Neutrale Flächen (z.B. Ackerland)	3
Buffer Zone 3	70
Buffer Zone 2	80
Buffer Zone 1	90
Sonderflächen	96
Baulich geprägte Sonderflächen	97
Gewässer	98
Sonderkulturen	99
Absolute Barrieren	NODATA

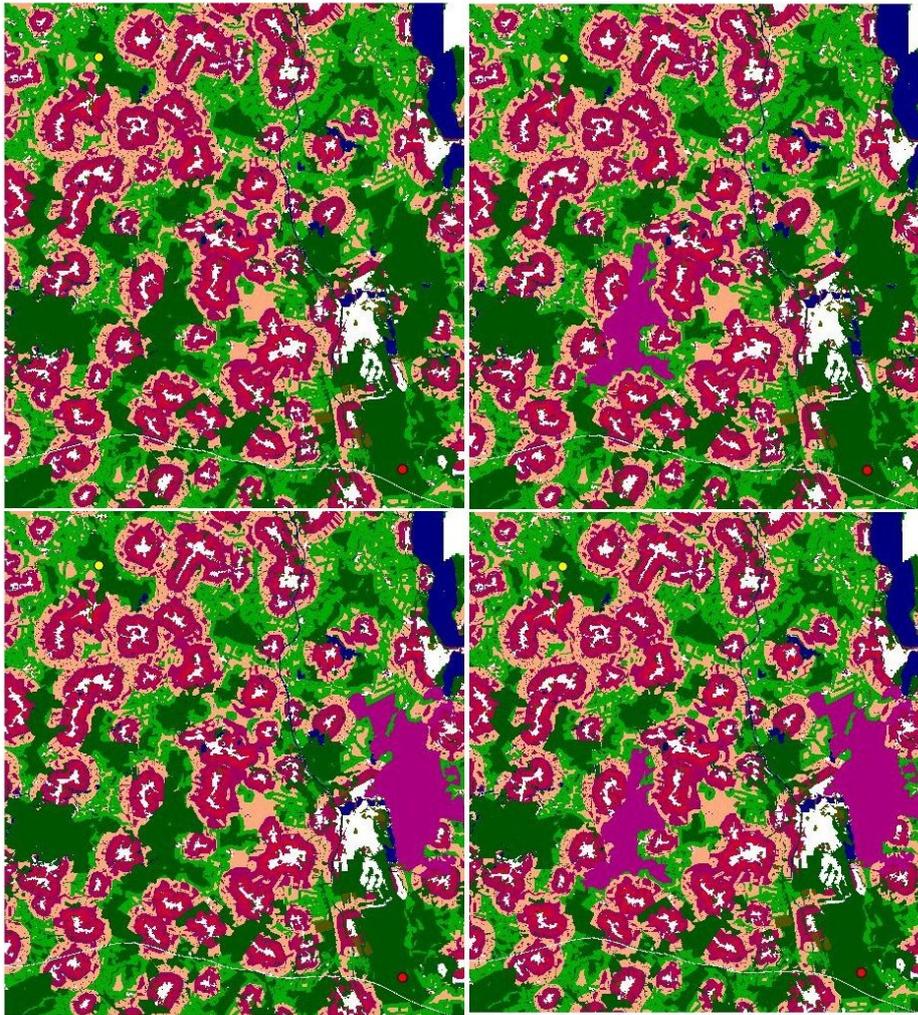
Tabelle 3: Zuordnung von Landschaftswiderständen zu den Landschaftsklassen der Lebensraumverbundkarte

unter Rücksprache mit der Abteilung für Wildbiologie, um die Berücksichtigung wildbiologischer Sachverhalte zu gewährleisten. Eine Liste der Landschaftselemente und der ihnen zugeordneten Widerstände befindet sich in Tabelle 3. Die Widerstände im Bereich 96 bis 99 werden in Abständen von nur 1Ω gewählt, um die Trennung der Klassen aus der Lebensraumverbundkarte zu wahren, ihnen aber einen nahezu einheitlichen Effekt zuzuweisen. Eine starke Differenzierung wäre aufgrund der mangelnden Information zu den Einzelflächen nicht sinnvoll. Absolute Barrieren werden als NODATA klassiert, um den Rechenaufwand gering zu halten. Dazu zählen die Siedlungsbereiche und die Autobahn A 24, die noch nicht Teil der Lebensraumverbundkarte ist und daher in GRASS digitalisiert und zur Habitatkarte hinzugefügt wird. Zwar kann es vorkommen, dass ein Tier in den tieferen Siedlungsbereich vordringt, was insbesondere durch das Knicknetz ermöglicht wird, oder dass eine Autobahntrasse überquert wird; durch ihre ausgesprochene Seltenheit werden diese Ereignisse jedoch in den Berechnungen vernachlässigt. Start- und Endpunkte werden unter Verwendung mehrerer GRASS Module generiert, wobei die Habitatkarte als Grundlage dient. Die manuelle Editierung wird im GRASS Vektorformat vorgenommen, anschließend werden die Dateien wieder ins Rasterformat und zuletzt ins Arc/Info ASCII Grid Format konvertiert. Dabei wird der Stromquelle, die intuitiv im Bereich des Frühjahrseinstandes des betrachteten Tieres digitalisiert wird, eine Stärke von 1 Ampere zugewiesen. Der Endpunkt im Herbstestand des Hirsches wird direkt mit der Erde verbunden, d.h. mit einem Widerstand von 0Ω .

Da landschaftsökologische Maßeinheiten wie Wanderungswahrscheinlichkeiten nur in Relation zu Vergleichswerten ihre Aussagekraft gewinnen, werden auf Basis des Ausgangsszenarios Alternativszenarien entwickelt. Dazu werden drei alternative Habitatkarten digitalisiert, in denen einzelne Waldflächen höhere Widerstände erhalten (Abbildung 3). Dies soll eine sinkende Attraktivität dieser Flächen, z.B. durch erhöhten Jagd- oder Freizeitdruck, simulieren.

Szenario 1

Szenario 2



Szenario 3

Szenario 4

Abbildung 3: Habitatkarte und Alternativszenarien mit Startpunkt (rot) und Endpunkt (gelb). Bei den violetten Flächen ist der Widerstand von 1 auf 85Ω erhöht.

2.4 Berechnung und Auswertung

Nach erfolgreicher Datenvorbereitung und -konvertierung werden die Eingabekarten in Circuitscape gerechnet. Ausgabekarten werden mittels des GI-Systems Quantum GIS (kurz QGIS) visualisiert. Da die Software über ein Plugin zur GRASS Integration verfügt, können darin gleichzeitig Karten im Arc/Info ASCII Grid Format und in GRASS Formaten betrachtet werden. Um die rein optische Auswertung in QGIS zu unterstützen, werden die Stromflußwerte der einzelnen Szenarien an sechs festgelegten Punkten verglichen. Dazu wird ein Punkt-Shapefile digitalisiert, wobei dessen Attributtabelle die Werte der Stromflußkarten als Attributwerte hinzugefügt werden. Die Verortung der Meßpunkte ist in Abbildung 4 dargestellt. Um einen optischen Eindruck von der Veränderung des Stromflusses über die einzelnen Szenarien zu erhalten, werden Differenzkarten berechnet. Dazu wird in GRASS von der Stromflußkarte jedes Szenarios die des Szenarios Nr. 1 subtrahiert. Die Ausgabekar-

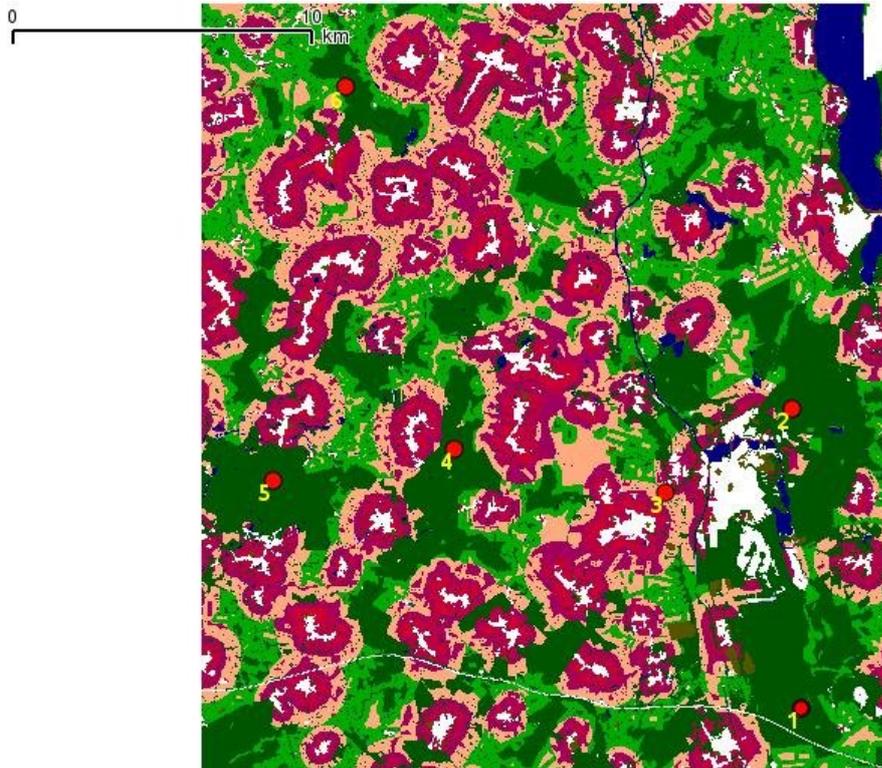


Abbildung 4: Habitatkarte mit sechs Messpunkten

te enthält dann für jeden Pixel die Änderung des Stromflusses vom ersten zum betrachteten Szenario.

Desweiteren werden auf Basis der von Circuitscape erzeugten Stromflusskarten Least-Cost Pfade berechnet, um die Veränderung des bedeutsamsten Korridors für jedes Szenario zu visualisieren. Dazu wird der Kehrwert zur Stromflußkarte nach der Formel $Kostenkarte = \frac{1}{Stromflusskarte}$ berechnet. Anschließend wird eine Least-Cost Analyse mit den selben Start- und Endpunkten wie die Stromflußberechnung durchgeführt und der kostenminimale Pfad berechnet.

Zuletzt werden die berechneten Stromflußkarten mit den Ortungsdaten verglichen, die auch zur Auswahl des Landschaftsausschnittes zu Rate gezogen werden. Der Vergleich erfolgt rein optisch durch die Überlagerung der Ortungsdaten mit den Stromflußkarten und Least-Cost Pfaden in QGIS.

3 Ergebnisse

In Abbildung 5 sind die ausgegebenen Stromflußkarten zu sehen. Schon bei der ersten Berechnung auf Grundlage der unveränderten Habitatkarte ergibt sich ein erkennbares Netz aus Korridoren, das zwischen den Restriktionsflächen verläuft. Der zugehörige Least-Cost Pfad identifiziert den Korridor, der mit der höchsten Wanderungswahrscheinlichkeit verbunden ist. Es ist leicht erkennbar, wie sich die Änderung der Landschaftswiderstände in den berechneten Stromflußwerten niederschlägt. Erhöht sich der Widerstand im westlichen Waldstück wie in Szenario 2, so verschiebt sich der Stromfluß auf das Waldstück im Osten. Der durch

die Least-Cost Analyse ausgegebene Pfad verläuft nun durch diesen Landschaftsabschnitt. In Szenario 3 zeigt sich ein gegenteiliger Effekt: Die Korridore im Osten des Landschaftsabschnittes sind fast gänzlich verschwunden, dafür erhalten jene im Westen ein höheres Gewicht. Der Kostenminimale Pfad ist der selbe wie in Szenario 1. In Szenario 4, in dem beide Waldstücke einen erhöhten Widerstand zugewiesen bekommen, gewinnen die Korridore, die durch die Mitte der Landschaft zwischen den Hauptsiedlungsgebieten verlaufen, an Bedeutung. Dies wird durch den angezeigten Least-Cost Pfad unterstrichen.

Um ein genaueres Bild von der Änderung des Stromflusses zwischen den einzelnen Szenarien zu erhalten, können die in den Tabellen 4 und 5 aufgeführten Ergebnisse der sechs Meßpunkte angesehen werden. Zunächst wird deutlich, dass der gesamte Strom am Startpunkt mit der Nummer 1 in das System eingespeist wird und es am Endpunkt 6 wieder verlässt. Dazwischen variiert die Stromstärke jedoch von Szenario zu Szenario deutlich. In Szenario 1 und 2 ist der stärkste Strom mit rund $1,2\text{ mA}$ bei Punkt drei zu beobachten, obwohl der Kostenminimale Pfad im ersten Szenario durch Punkt vier, im zweiten durch Punkt zwei verläuft. Gleichzeitig ist aber ein Einbruch des Stromflusses an Meßpunkt Nr. 4 ($0,67\text{ mA}$) zu beobachten, während er an Punkt 2 um nur $0,09\text{ mA}$ ansteigt. In Szenario 3 fällt der Stromfluß an Meßpunkt Nr. 2 erwartungsgemäß ab ($0,88\text{ mA}$), während er an Punkt Nr. 3 um ca. $1,41\text{ mA}$, an Punkt 4,

Szenario 1



Szenario 2



Szenario 3



Szenario 4



Abbildung 5: Stromflußkarten der vier Berechnungsszenarien mit Startpunkt (rot) und Endpunkt (gelb) der Berechnung. Blaue Flächen repräsentieren hohen, weiße geringen Stromfluß. Die rote Linie kennzeichnet den jeweiligen Least-Cost Pfad.

durch welchen der Least-Cost Pfad nun verläuft, um nur rund $0,35 \text{ mA}$ ansteigt. In Szenario 4 fällt der Stromfluß an Punkt 4 ähnlich stark wie in Szenario 2 (rund $0,65 \text{ mA}$), an Punkt 2 um etwa ($0,86 \text{ mA}$). An Punkt 3 steigt er um rund $1,66 \text{ mA}$. Am westlichsten Meßpunkt mit der Nummer 5 schwankt der Strom über alle Szenarien nur recht schwach um maximal $0,06 \text{ mA}$. Veranschaulicht wird dies in Abbildung 6.

Weiterhin ergibt die Berechnung des effektiven Widerstandes \hat{R} (Tabelle 6) einen Anstieg von $7,93 \%$ bei Szenario 2; $24,08 \%$ bei Szenario 3 und $38,56 \%$ bei Szenario 4.

Bei der Überlagerung der Stromflußkarten mit den Ortungsdaten von c5503 (Abbildung 7) ergibt sich eine Übereinstimmung mit den in Szenario 4 ausgegebenen Korridoren, wobei aber scheinbar eine Fläche nahe der Kartenmitte als Trittstein genutzt wird, was weder Stromflußkarte noch Least-Cost Pfad wiedergeben.

Nr.	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
1	1000	1000	1000	1000
2	0.99	1.085	0.112	0.127
3	1.231	1.243	2.643	2.889
4	0.733	0.063	1.084	0.081
5	0.514	0.459	0.572	0.521
6	1000	1000	1000	1000

Tabelle 4: Stromflußwerte in mA an sechs Messpunkten für die vier Berechnungsszenarien

Nr.	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
1	0	0	0
2	0,09	-0,88	-0,86
3	0,01	1,41	1,66
4	-0,67	0,35	-0,65
5	-0,06	0,06	0,01
6	0	0	0

Tabelle 5: Differenz zwischen den Stromstärken der Szenarien 2-4 und Szenario 1 in mA

Szenario	\hat{R} in Ω	Anstieg in %
1	6,12	0,00
2	6,60	7,93
3	7,59	24,08
4	8,48	38,56

Tabelle 6: Anstieg des effektiven Widerstandes \hat{R} über die Szenarien 1-4, jeweils im Verhältnis zu Szenario 1

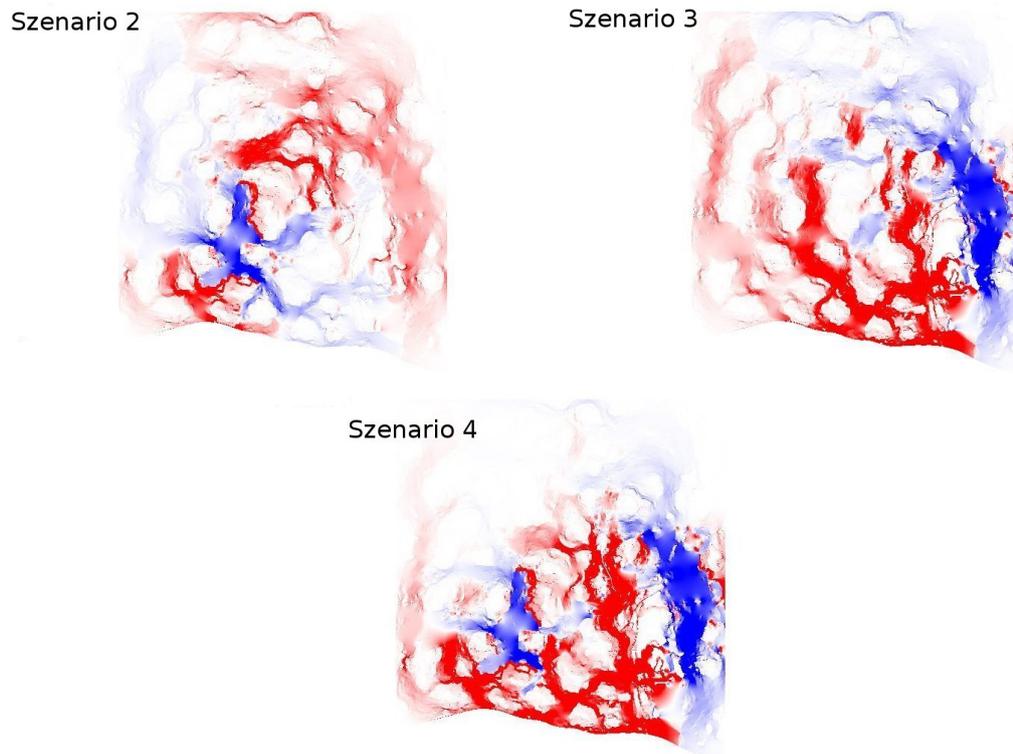


Abbildung 6: Differenz der Stromstärken im Vergleich zu Szenario 1. Blau repräsentiert schwächeren, rot stärkeren Stromfluß.

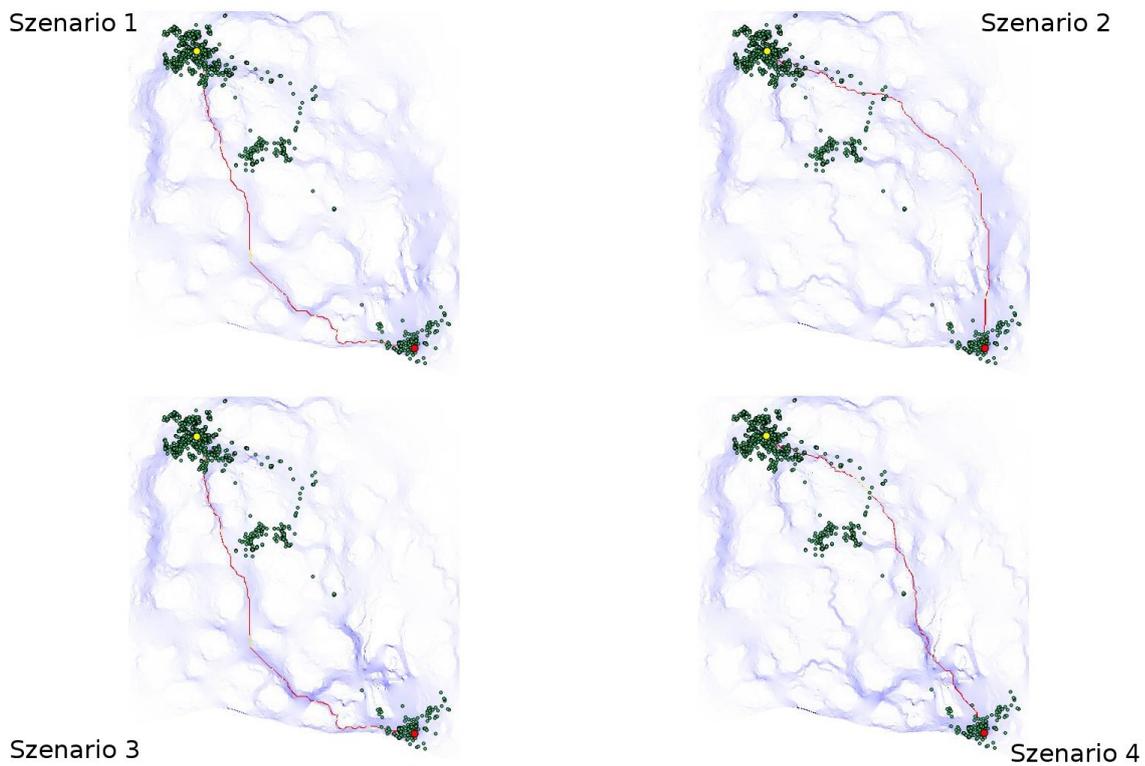


Abbildung 7: Stromflußkarten mit Least-Cost Pfaden und Ortungsdaten des Hirsches c5503

4 Diskussion

Zunächst ermöglichen die ausgegebenen Stromflußkarten einen eingängigen Überblick über das Korridornetz der betrachteten Landschaft. Während bei der Least-Cost Analyse der Fokus auf *einem* optimalen, kostenminimalen Pfad liegt, ergibt die Berechnung von Stromstärken ein Netzwerk aus *mehreren* alternativen Pfaden. Dennoch bewährt sich die Kombination mit einer Least-Cost Analyse, da der Pfad der höchsten Wanderungswahrscheinlichkeit nicht direkt erkennbar ist. Besonders vorteilhaft ist die einfache Erfassung von Bereichen mit hohem Stromfluß, die sich als Ausgangspunkte für die Erstellung von Alternativszenarien anbieten.

Die Erfassung der Veränderung der Stromstärken zwischen den vier Szenarien ermöglicht einen interessanten Blick auf die Landschaft als redundantes System. Besonders bei der Betrachtung von Abbildung 6 zeigt sich deutlich die Fähigkeit des Systems, Habitatverlust auszugleichen. Die steigende Bedeutung alternativer Wege ist sofort nachvollziehbar, außerdem ist leicht zu erkennen, welcher simulierte Eingriff sich dramatischer auswirkt. Der Verlust der kleineren Fläche im Westen kann offensichtlich leichter ausgeglichen werden, als der des Waldes im Osten.

Gleichzeitig liefert die Berechnung des effektiven Widerstandes aber wichtige Informationen hinsichtlich der Auswirkung auf die Gesamtkonnektivität. Auch hier zeigt sich eine stärkere Auswirkung des Habitatverlustes in Szenario 3, in Szenario 4 sind die beiden Fokuspunkte zwar immernoch nicht komplett isoliert, die Gesamtkonnektivität ist aber dramatisch gesunken.

Im Rahmen der Validierung mithilfe der Ortungsdaten von c5503 zeigt sich, dass von dem Korridor aus Szenario 4 zumindest Teilstrecken durchzogen werden. Besonders interessant erscheint hier die Korrelation zwischen der hohen Stromstärke im schmalen Korridorabschnitt zu Beginn der Strecke und der Geschwindigkeit, mit der dieser Abschnitt durchwandert wird; so scheint die Stromstärke nicht nur mit der Wanderungswahrscheinlichkeit in Beziehung zu stehen, sie gibt auch Aufschluß über die Geschwindigkeit, mit der der betrachtete Bereich durchzogen wird. Die mit ca. 2,9 mA bezogen auf alle Szenarien höchste gemessene Stromstärke in Verbindung mit dem beobachteten schnellen Wechsel über diesen *Pinch Point*¹ legt nahe, dass das Tier an diesem Punkt seiner Wanderung einem erhöhten Stress ausgesetzt ist.

Bei allen Vorteilen einer so anschaulichen Abbildung eines Korridornetzes muss jedoch hervorgehoben werden, dass es sich dabei lediglich um eine Simulation handelt. Bei der Betrachtung eines Stromkreismodells muss zwangsläufig wieder der Konnektivitätsbegriff nach Taylor u. a. (2006) beachtet werden. Wie eingangs beschrieben stehen und fallen Modelle der Landschaftskonnektivität mit dem Anteil ökologischer Information der in ihre Ermittlung eingegangen ist. Unter diesem Gesichtspunkt sind die vorliegenden Berechnungen kritisch zu beurteilen.

So ist der von c5503 tatsächlich genutzte Korridor in der Simulation nur durch einen erhöhten Landschaftswiderstand in zwei Waldstücken in den Vordergrund gerückt. Nach dem ersten Szenario ist noch ein anderes Wanderungsverhalten zu erwarten. Es ist zu beachten, dass die erhöhten Widerstände in den äußeren Waldbereichen lediglich dem Vergleich mit

¹Abschnitt, durch den Organismen mit hoher Wahrscheinlichkeit wandern bzw. notwendigerweise wandern müssen. Siehe McRae u. a. (2008)

dem Ursprungsszenario dienen, ihre Zuordnung ist in keinster Weise durch ökologische Daten untermauert. Die tatsächliche Nutzung des Korridors aus Szenario 4 muss keinesfalls in einer geringeren Attraktivität der zwei behandelten Waldstücke liegen. Im Gegenteil, es gibt auch zahlreiche andere Gründe, warum die ökologische Realität hier vom mathematischen Modell abweichen kann.

Der erste Schwachpunkt in der Simulation liegt in der intuitiven Zuweisung von Widerständen. Dabei wird beispielsweise nur ein geringer Unterschied zwischen Waldinnenbereichen und Waldrändern sowie Knicks gemacht: diese fördern aber, wie den Beobachtungen von Meißner u. a. (2009) zu entnehmen ist, nicht unwesentlich die Mobilität des Rothirsches. Es wäre interessant zu wissen, welche Korridore sich ergäben, wenn Randbereichen und Heckenstrukturen ein geringerer Widerstand in Relation zu den Waldinnenbereichen zugewiesen würde. Denn bei der Betrachtung von Abbildung 7 sticht ins Auge, dass ein nicht unerheblicher Anteil der Ortungsdaten in Bereiche mit verschwindend geringer Stromstärke fällt- es liegt nahe, dass die Rolle des Knicknetzes für die Wanderung des Hirsches stark unterschätzt wird. Die Digitalisierung einer eigenen Klasse für das Knicknetz wäre im vorgegebenen Zeitrahmen jedoch nicht zu realisieren.

Einen weiteren wichtigen Kritikpunkt stellen die Annahmen der Random-Walk Theorie dar, die der Stromkreistheorie zugrunde liegen. Die vorliegenden durch den Stromfluß repräsentierten Wanderungswahrscheinlichkeiten gelten für ein Tier, das keine Kenntnis des Gebietes aufweist und ungerichtet dem Weg des geringsten Widerstandes folgt. Jedoch wird in der wildbiologischen Literatur die Standorttreue und die Bindung an feste Streifgebiete beim Rotwild betont (Bützler, 2001; Wagenknecht, 2000). Allerdings schreibt Wagenknecht (2000), dass der natürliche Wandertrieb auch einzelne Hirsche über die Populationsgrenzen hinaus treiben kann; solche Ereignisse werden durch ein ausgeglichenes Geschlechterverhältnis in der Brunftzeit begünstigt, welches Hirsche dazu zwingt, eine ausgedehntere Suche nach Kahlwild zu unternehmen. Ähnliche Wanderungsbewegungen sind beim Rotwild durch ökologische Faktoren wie Überpopulation, Insektenbefall sowie zahlreiche andere meteorologische, physiologische und biologische Faktoren möglich, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht erfasst werden können. Aber auch diesen Faktoren begegnet das Rotwild nach Wagenknecht (2000) mit einer festen traditionellen Bindung an alte Streifgebiete.

Im Zusammenhang mit der berechneten Stromstärke I als Maß für die Wanderungswahrscheinlichkeit muss also immer die Annahme der Zufallswanderung im Auge behalten werden, die im vorliegenden Fall vermutlich nicht erfüllt ist. Bei der optischen Interpretation von Stromflußkarten muss außerdem beachtet werden, dass die Stromstärke an schmalen Korridoren (*Pinch points*) größer ist als an breiten, wie z.B. an Meßpunkt Nr. 3 zu beobachten. Jedoch bedeutet eine höhere Stromstärke nicht eine höhere Habitatqualität, sie symbolisiert lediglich die Wichtigkeit eines Bereiches für die Gesamtkonnektivität. Ein breiter Korridor mit geringem Stromfluß, so wie das Waldstück im Osten des Landschaftsausschnittes, kann zwar einen Habitatverlust deutlich leichter wettmachen, ist aber in seiner Gesamtheit für die Konnektivität genauso bedeutend wie ein schmaler *Pinch point*. Außerdem ist bei einem schmalen Pfad mit erhöhtem Stromfluß auch eine erhöhte Beunruhigung beim wechselnden Wild zu erwarten; daher ist ein breiter Korridor, unabhängig vom reinen Konnektivitätsgesichtspunkt, in Bezug auf das Wohlbefinden des Wildes höher zu bewerten.

Nutzt man den effektiven Widerstand \hat{R} als Maß für die Gesamtkonnektivität, so ist zu beachten, dass auch hier nur die strukturelle Konnektivität als Eigenschaft der Landschaft erfasst wird. Jedoch hat auch die betrachtete Spezies selber die Möglichkeit, einen Verlust

an struktureller Konnektivität ggf. durch Anpassung an die gegebenen Umstände auszugleichen. Taylor u. a. (2006) weisen außerdem darauf hin, dass die strukturelle Trennung von Habitatausschnitten nicht zur Extinktion der Population führen muss, genausowenig wie ihre Verbundenheit das Überleben der Population garantiert. Ob sich die in den Alternativszenarien simulierten Eingriffe auf das Fortleben des beobachteten Individuums c5503 also tatsächlich so dramatisch auswirkten, wie die Erhöhung des effektiven Widerstandes suggeriert, kann nur vermutet werden. Gerade die Möglichkeit eines traditionell genutzten Streifgebietes nährt die Hypothese, dass sich Habitatverlust- oder Gewinn auf den simulierten Flächen in der Realität kaum oder garnicht bemerkbar machen würden.

Letztendlich ist auch die Validierung von Ortungsdaten kritisch zu bewerten. Die Messung der genutzten Wege ist nur bei einem relativ kleinen Maßstab sinnvoll, da die Daten lediglich Start- bzw. Endpunkte von Bewegungen repräsentieren, die nicht im Detail nachvollzogen werden können. Durch den Tagesrhythmus des Rotwildes werden die Ortungsdaten meist in den Ruhephasen des Tieres übermittelt und nicht während eines Wechsels. Desweiteren bleiben die wahren Gründe zur Wahl des von „Helmuth“ genutzten Weges trotz Ortungsdaten verborgen. In der Simulation wird eine mangelnde Attraktivität bestimmter Waldflächen unterstellt; die Entscheidungen, die in der wildbiologischen Realität zur Wanderung über den durch Telemetriedaten umrissenen Weg führen, sind aber durch diese allein nicht nachvollziehbar.

Eine sinnvolle Weiterführung der vorliegenden Arbeit bestünde zunächst in einer weitergehenden Validierung der Ergebnisse durch die Sammlung ökologischer Informationen. Interessant wären Daten über Bejagung, Freizeitdruck und andere Störeinflüsse im betrachteten Landschaftsteil sowie über Biologie und Verhalten des Tieres c5503. Hier könnten Informationen zu Alter, Verfassung und Wechselbeziehung zu anderen Tieren eine sinnvolle Grundlage liefern, um die realen Motivationen für die vollzogenen Wanderungsbewegungen zu erfassen.

Über die Klassierung der Landschaft in Widerständen müsste eingehend reflektiert werden. Der Bewertung des Knicknetzes sollte dabei eine besondere Aufmerksamkeit zukommen. Die erneute Berechnung mit alternativen Widerstandsklassen und die Beobachtung von Abweichungen von der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Klassierung könnte zeigen, ob die landschaftsökologische Wirklichkeit mit vertretbarem Aufwand noch besser darzustellen ist.

Möglich wäre auch eine weitere Kombination mit Least-Cost Analysen. So könnte unter den zahlreichen von Circuitscape berechneten Pfaden eine Rangfolge festgestellt werden, die allein auf Grundlage der ausgegebenen Stromflußkarte kaum zu erfassen ist. Eine umgekehrte Kombination wäre ebenfalls hochinteressant: Durch Berechnung eines breiten Least-Cost Korridors wäre es möglich, eine grobe Wanderungsrichtung vorzugeben und innerhalb des Korridors feinere Pfade und Pinch Points mithilfe von Circuitscape zu ermitteln. Somit könnte sich dem realen Wanderungsverhalten mit der Simulation einer gerichteten Bewegung durch ein bekanntes Streifgebiet und ungerichteten Bewegungen innerhalb des Gebietes angenähert werden.

Letztendlich sollte auch der Austausch mit anderen Circuitscape-Anwendern als sinnvolle Ergänzung der eigenen Arbeit nicht fehlen. Bisher wurde das Programm sehr erfolgreich zur Erfassung von Landschaftskonnektivität auf genetischer Ebene eingesetzt (McRae, 2006; McRae u. Beier, 2007). Zur Arbeit mit individuellen Wanderungsbewegungen könnte die Diskussion über die bereitgestellten Internetplattformen (siehe Circuitscape, 2010) gute Informationen liefern.

5 Fazit

Schlussendlich lässt sich die Bewertung der stromkreistheoretischen Erfassung von Landschaftskonnektivität im Rahmen des schleswig-holsteinischen Rotwildmanagementprojektes auf zwei Punkte konzentrieren:

Zum einen bietet sie eine sinnvolle Ergänzung zur Lebensraumverbundkarte (1) durch die noch bessere intuitive Erfassbarkeit des Landschaftsnetzes und einfache Korridoridentifikation anhand von Stromflußkarten und (2) durch die Schaffung von Vergleichbarkeit zwischen Alternativszenarien durch Quantifizierung der Landschaftskonnektivität.

Zum anderen muss in der praktischen Anwendung klar sein, dass das stromkreistheoretische Modell auf Annahmen beruht, die mit der ökologischen und wildbiologischen Realität von Fall zu Fall mehr oder weniger in Konflikt steht. Die Qualität der Simulation steht und fällt nicht nur mit der verfügbaren geografischen, sondern auch mit der ökologischen und biologischen Datengrundlage. Das Ziel sollte stets auch eine größtmögliche Verschiebung der Erfassung von der rein strukturellen hin zur funktionellen Konnektivität im Sinne von Taylor u. a. (2006) sein.

Literaturverzeichnis

- [Adriaensen u. a. 2003] ADRIAENSEN, F. ; CHARDON, J. P. ; BLUST, G. D. ; SWINNEN, E. ; VILLALBA, S. ; GULINCK, H. ; MATTHYSEN, E.: The application of 'least-cost' modelling as a functional landscape model. In: *Landscape and Urban Planning* 64 (2003), Nr. 4, 233 - 247. [http://dx.doi.org/DOI:10.1016/S0169-2046\(02\)00242-6](http://dx.doi.org/DOI:10.1016/S0169-2046(02)00242-6). – DOI DOI: 10.1016/S0169-2046(02)00242-6. – ISSN 0169-2046
- [Bunn u. a. 2000] BUNN, A. G. ; URBAN, D. L. ; KEITT, T. H.: Landscape connectivity: A conservation application of graph theory. In: *Journal of Environmental Management* 59 (2000), Nr. 4, 265 - 278. <http://dx.doi.org/DOI:10.1006/jema.2000.0373>. – DOI DOI: 10.1006/jema.2000.0373. – ISSN 0301-4797
- [Bützler 2001] BÜTZLER, Wilfried ; SEILMEIER, Gerhard (Hrsg.): *Rotwild: Biologie, Verhalten, Umwelt, Hege*. 5. BLV Verlagsgesellschaft mbH, 2001
- [Circuitscape 2010] CIRCUITSCAPE: *Welcome to the Circuitscape Project!* <http://www.circuitscape.org/Circuitscape/Welcome.html>, 2010. – Zugriff am 25.04.2010
- [Codling u. a. 2008] CODLING, Edward A. ; PLANK, Michael J. ; BENHAMOU, Simon: Random walk models in biology. In: *Journal of the Royal Society Interface* 5 (2008), S. 813-834
- [Crooks u. Sanjayan 2006] CROOKS, Kevin R. ; SANJAYAN, M.: Connectivity Conservation: maintaining connections for nature. In: CROOKS, Kevin R. (Hrsg.) ; SANJAYAN, M. (Hrsg.): *Connectivity Conservation*. Cambridge University Press, 2006, Kapitel 1, S. 1-19
- [Jaeger u. a. 2005] JAEGER, Jochen ; GRAU, Stephanie ; HABER, Wolfgang: Einführung: Landschaftszerschneidung und die Folgen. In: *GAIA - Ökologische Perspektiven für Wissenschaft und Gesellschaft* 14/2 (2005), S. 98 - 100
- [McRae 2006] MCRAE, Brad: Isolation by resistance. In: *Evolution* 60 (2006), Nr. 8, S. 1551 - 1561
- [McRae u. Beier 2007] MCRAE, Brad ; BEIER, Paul: Circuit theory predicts gene flow in plant and animal populations. In: *PNAS* 104 (2007), S. 19885 - 19890
- [McRae u. a. 2008] MCRAE, Brad H. ; DICKSON, Brett G. ; KEITT, Timothy H. ; SHAH, Viral B.: Using Circuit Theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. In: *Ecology* 89 (10) (2008), S. 2712 - 2724
- [McRae u. Shah 2008] MCRAE, Brad H. ; SHAH, Viral B.: *Circuitscape user guide*. 3.5. : The University of California, Santa Barbara, 2008
- [Meißner u. a. 2009] MEISSNER, Marcus ; REINECKE, Horst ; ZACHOS, Frank ; CORSMANN, Michael ; RITTER, Tim ; WÖLFEL, Helmuth ; DRESDEN E.V., Institut für Wildbiologie Göttingen u. (Hrsg.): *Der Rothirsch in Schleswig Holstein - Lebensraumsituation, Lebensraumverbund und Management*. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, 2009

- [Neteler u. a. 2010] NETELER, Markus ; BOWMAN, M. H. ; CLEMENTS, Glynn ; LANDA, Martin: *GRASS GIS - The World Leading Free Software GIS*. <http://grass.fbk.eu/index.php>. Version: 2010
- [Ritter 2008] RITTER, Tim: *GIS gestützte Landschaftsstrukturanalyse zur Identifikation potentieller Habitate und Migrationsrouten von Großsäugern*, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August Universität Göttingen, Diplomarbeit, 2008
- [Schomaker 2010] SCHOMAKER, Philipp: *Der Rothirsch in Schleswig-Holstein - Projektteil Telemetrie*. http://www.rothirsch-sh.de/index.php?option=com_content&view=article&id=20&Itemid=24. Version: 2010. – Zugriff am 30.10.10
- [Taylor u. a. 2006] TAYLOR, Philip ; FAHRIG, Lenore ; WITH, Kimberly: Back to the basics in connectivity conservation. In: CROOKS, Kevin R. (Hrsg.) ; SANJAYAN, M. (Hrsg.): *Connectivity Conservation*. Cambridge University Press, 2006, Kapitel 2, S. 29–44
- [Taylor u. a. 1993] TAYLOR, Philip D. ; FAHRIG, Lenore ; HENEIN, Kringen ; MERRIAM, Gray: Connectivity is a vital element of landscape structure. In: *Oikos* 68 (1993), Dezember, Nr. 3, S. 571–573
- [Wagenknecht 2000] WAGENKNECHT, Egon ; RAKOW, Frank (Hrsg.) ; STÖCKER, Burkhard (Hrsg.): *Rotwild*. 5. Nimrod-Verlag, 2000
- [Zachos u. a. 2007] ZACHOS, F. E. ; ALTHOFF, C. ; STEYNITZ, Y. von ; ECKERT, I. ; HARTL, G. B.: Genetic analysis of an isolated red deer (*Cervus elaphus*) population showing signs of inbreeding depression. In: *EUROPEAN JOURNAL OF WILDLIFE RESEARCH* 53 (2007), MAR, Nr. 1, S. 61–67. <http://dx.doi.org/{10.1007/s10344-006-0065-z}>. – DOI 10.1007/s10344-006-0065-z. – ISSN 1612-4642

Abbildungsverzeichnis

1	Lebensraumverbundkarte mit topographischer Karte und Ortungsdaten des Hirsches c5503	8
2	Ausschnitt aus der Lebensraumverbundkarte mit topographischer Karte . . .	9
3	Habitatkarte und Alternativszenarien mit Startpunkt und Endpunkt	13
4	Habitatkarte mit sechs Messpunkten	14
5	Stromflußkarten der vier Berechnungsszenarien mit Startpunkt und Endpunkt	15
6	Differenz der Stromstärken im Vergleich zu Szenario 1	18
7	Stromflußkarten mit Least-Cost Pfaden und Ortungsdaten des Hirsches c5503	18

Tabellenverzeichnis

1	Elektrische Größen und ihre landschaftsökologische Interpretation	7
2	Bufferung der Restriktionsflächen	9
3	Zuordnung von Landschaftswiderständen zu den Landschaftsklassen der Lebensraumverbundkarte	11
4	Stromflußwerte in mA an sechs Messpunkten für die vier Berechnungsszenarien	17
5	Differenz zwischen den Stromstärken der Szenarien 2-4 und Szenario 1 in mA	17
6	Anstieg des effektiven Widerstandes \hat{R} über die Szenarien 1-4, jeweils im Verhältnis zu Szenario 1	17

Erklärung

Hiermit versichere ich gemäß § 6 Abs. 5 der Bachelor-Prüfungsordnung vom 13.09.2007, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ort, Datum

Levent Burggraef