

Quantitative, räumlich explizite Analyse der Wettbewerbsfähigkeit des Energiepflanzenanbaus

Inauguraldissertation zur Erlangung des Grades Dr. agr.
am Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökötrophologie und
Umweltmanagement
der Justus-Liebig-Universität Gießen

Institut für Betriebslehre der Agrar- und Ernährungswirtschaft
Prof. em. Dr. Dr. h. c. Friedrich Kuhlmann

Eingereicht von
Dipl. Geogr. Adam Plata
Hannover, 2012

Inhalt

Vorwort	1
1 Einleitung	2
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	3
1.2 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	5
2 Theoretische Grundlagen	6
2.1 Landwirtschaftliche Landnutzungstheorien	6
2.2 Landnutzungstheorien und -modellierung	14
2.3 Industrielle Standortbestimmung	16
2.4 Standortbestimmung von Biogasanlagen	19
3 Forschungsmethoden	22
3.1 Das Modell ProLand	23
3.1.1 Ertragspotentialschätzung	28
3.1.2 Berücksichtigung von Nachfragerestriktionen	29
3.1.3 Berechnung von Bodenrenten	30
3.2 Modifikationen des Modells ProLand	32
3.2.1 Anpassung der Ertragspotentialschätzung	32
3.2.2 Benutzerdefinierte Fruchtfolgen	34
3.2.3 Räumlich differenzierte Preise	39
3.3 Das Modell ProSite	41
3.3.1 Restriktive Faktoren	42
3.3.2 Selektive Faktoren	43
3.3.3 Standorteignungsebene	44
3.4 Modifikationen des Modells ProSite	46
3.5 Multikriterielle räumliche entscheidungsunterstützende Systeme	48
3.5.1 Einzugsgebietsberechnung	50
3.5.2 Transportkostenermittlung	52
3.5.3 Bestimmung der Vorzüglichkeit und Substratmengen	54
3.6 Untersuchungsregion	55
3.7 Datengrundlagen und -aufbereitung	64
3.7.1 Aufbau und Aktualisierung der ProLand-Datenbanken	64
3.7.2 Korrektur der nutzbaren Feldkapazität	66
3.7.3 Aufbau der ProSite-Geodatenbank	69
4 Ergebnisse	72
4.1 Landnutzungsprognosen mit dem Modell ProLand	72
4.1.1 Definition der Ausgangssituation	73
4.1.2 Szenario „punktuelle Nachfrage“	79
4.1.3 Referenzszenario	89
4.1.4 Szenario „flächenhafte Nachfrage“	91
4.2 Standortanalysen mit dem Modell ProSite	98
4.2.1 Bestimmung der optimalen Anlagenstandorte	98
4.2.2 Transportkostenanalyse und Substratpotentialermittlung	104
4.2.3 Bewertung bestehender Anlagenstandorte	106
5 Diskussion	121
6 Zusammenfassung	126
7 Literaturverzeichnis	129
7.1 Datengrundlagen	133
8 Anhang	135
8.1 Flächensummen und Anteile der Kulturarten bzw. Nutzungen in der Untersuchungsregion	135
8.2 Faktoren zur Standortbewertung aus ATKIS Basis-DLM Hessen	137

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Landnutzungszonen in von Thünens isoliertem Staat.....	8
Abbildung 2.2: Anordnung von Landnutzungszonen nach Thünen.....	10
Abbildung 2.3: Standortdreieck und Transportkostenminimalpunkt	17
Abbildung 2.4: Schema des Varignon'schen Apparats.....	18
Abbildung 3.1: Funktionsweise des Modells ProLand.....	27
Abbildung 3.2: Vorgehen bei der Zuweisung benutzerdefinierter Fruchtfolgen	39
Abbildung 3.3: Schema zur Berechnung der Standorteignung	45
Abbildung 3.4: Funktionsweise des Modells ProSite.....	46
Abbildung 3.5: Luftlinien- und Wegstreckenentfernungen um einen Anlagenstandort.....	51
Abbildung 3.6: Transportstreckenermittlung	53
Abbildung 3.7: Lage der Untersuchungsregion.....	55
Abbildung 3.8: Naturraumeinheiten in der Untersuchungsregion.....	56
Abbildung 3.9: Niederschlagshöhen und -verteilung im Untersuchungsgebiet.....	57
Abbildung 3.10: Temperaturverteilung im Untersuchungsgebiet	58
Abbildung 3.11: Nutzbare Feldkapazität im Untersuchungsgebiet.....	59
Abbildung 3.12: Steigungen im Untersuchungsgebiet.....	60
Abbildung 3.13: Landnutzung in der Untersuchungsregion	61
Abbildung 3.14: Anteile der Kulturen auf landwirtschaftlichen Flächen 2007.....	62
Abbildung 3.15: Lage und Bestanzahlen rinder- und schweinehaltender Betriebe.....	63
Abbildung 3.16: Lageungenauigkeit der Bodenflächendaten	67
Abbildung 3.17: Lageungenauigkeit der schlagspezifischen nFK-Werte	68
Abbildung 4.1: Ausschnitt aus dem Geodatenatz Schlaggeometrien	74
Abbildung 4.2: Nutzung der Landwirtschaftsfläche in der Ausgangssituation.....	78
Abbildung 4.3: Stückkosten der Silomaisproduktion (50 t FM/ha) in Abhängigkeit von der Feld- Biogasanlage-Entfernung.....	80
Abbildung 4.4: Einzugsgebiete und Nutzung der Landwirtschaftsfläche des Szenarios „Punktuelle Nachfrage“	83
Abbildung 4.5: Nutzung der Landwirtschaftsfläche im Einzugsgebiet der Biogasanlage Darmstadt- Wixhausen.....	84
Abbildung 4.6: Nutzung der Landwirtschaftsfläche im Einzugsgebiet der Biogasanlage Semd	86
Abbildung 4.7: Nutzung der Landwirtschaftsfläche im Einzugsgebiet der Biogasanlage Lorsch	88
Abbildung 4.8: Nutzung der Landwirtschaftsfläche – Referenzszenario.....	90
Abbildung 4.9: Nutzung der Landwirtschaftsfläche im Szenario „flächenhafte Nachfrage“ mit einem Silomaispreis von 27,5 €/t FM	93
Abbildung 4.10: Nutzung der Landwirtschaftsfläche im Szenario „flächenhafte Nachfrage“ mit einem Silomaispreis von 30 €/t FM	94
Abbildung 4.11: Nutzung der Landwirtschaftsfläche im Szenario „flächenhafte Nachfrage“ mit einem Silomaispreis von 32,5 €/t FM	95
Abbildung 4.12: Restriktive Endebene des Untersuchungsgebiets Südhessen	99
Abbildung 4.13: Optimale Standorte konventioneller Biogasanlagen	101
Abbildung 4.14: Optimale Standorte biomethanproduzierender Anlagen	103
Abbildung 4.15: Potentieller Standort einer Biomethananlage.....	104
Abbildung 4.16: Transportkosten- und Substratpotentialermittlung.....	105
Abbildung 4.17: Restriktive Endebene des Untersuchungsgebiets Südhessen	107
Abbildung 4.18: Standortbewertung der Biogasanlage Lorsch.....	109
Abbildung 4.19: Standortbewertung der Biogasanlage Darmstadt-Wixhausen.....	111
Abbildung 4.20: Standortbewertung der Biogasanlage Semd.....	112
Abbildung 4.21: Restriktiver Endlayer Lelbach.....	114
Abbildung 4.22: Ausgewählte selektive Faktoren der Standortbewertung Lelbach - Szenario 1	116

Abbildung 4.23: Standortbewertungskarte Lelbach - Szenario 1	117
Abbildung 4.24: Standortbewertungskarte BGA Lelbach ohne Wärmenutzung	119
Abbildung 5.1: Durchschnittliche Weichweizen- und Körnermaiserzeugerpreise im Vergleich	121
Abbildung 5.2: Entwicklung der Weizen- und Körnermaiserträge in der BRD.....	122

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Bedeutung der Diagrammsymbolik.....	25
Tabelle 3.2: Neukalibrierung der Ertragspotentialschätzung	33
Tabelle 3.3: Benutzerdefinierte Fruchtfolgen.....	36
Tabelle 3.4: Auszug Modellierungskennzahlen ProLand	37
Tabelle 3.5: Restriktive Faktoren und Mindestabstände	42
Tabelle 3.6: Selektive Faktoren.....	44
Tabelle 3.7: Attribute der Standortdatenbank	66
Tabelle 4.1: Flächensummen und Anteile der wichtigsten ackerbaulichen Kulturarten in der Untersuchungsregion.....	75
Tabelle 4.2: Fruchtfolgeglieder zur Ermittlung der Ausgangssituation	75
Tabelle 4.3: Regionalfruchtfolgen der Ausgangssituation	76
Tabelle 4.4: Anteile der Kulturen der Fruchtfolge 500	76
Tabelle 4.5: Kulturen und ihre Anteile im Vergleich.....	77
Tabelle 4.6: Kennzahlen der Ausgangssituation	79
Tabelle 4.7: Kennzahlen Ausgangssituation im Vergleich zum Szenario „punktuelle Nachfrage“	89
Tabelle 4.8: Kennzahlen Ausgangssituation im Vergleich zum Referenzszenario	91
Tabelle 4.9: Vorhersage der Entwicklung der Landwirtschaft ohne und mit flächendeckend gegebener Möglichkeit der Pflanzenverwertung zur Biogaserzeugung und variierenden Silomaispreisen	97
Tabelle 4.10: Restriktiven Faktoren zur Standortbestimmung.....	98
Tabelle 4.11 Selektive Faktoren, Klassengrenzen und Gewichtungen zur Standorteignung konventioneller Anlagen	100
Tabelle 4.12: Selektive Faktoren, Klassengrenzen und Gewichtungen zur Standorteignung von Biomethananlagen.....	102
Tabelle 4.13: Restriktive Faktoren zur Standortbewertung.....	106
Tabelle 4.14 Selektive Faktoren, Klassengrenzen und Gewichtungen zur Standortbewertung konventioneller Anlagen	108
Tabelle 4.15: Selektive Faktoren, Klassengrenzen und Gewichtungen zur Standortbewertung von Biomethananlagen.....	110
Tabelle 4.16: Übersicht der restriktiven Faktoren Lelbach	113
Tabelle 4.17: Übersicht der selektiven Faktoren Lelbach - Szenario 1.....	115
Tabelle 4.18: Übersicht der selektiven Faktoren BGA Lelbach Szenario 1.....	118

Abkürzungsverzeichnis

AKh	Arbeitskraftstunde
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BFD 50	Bodenflächendaten 1 : 50.000
BGA	Biogasanlage
BÜK 200	Bodenübersichtskarte 1 : 200.000
CORINE	Coordinated Information On The European Environment
DGM 25	Digitales Geländemodell 1 : 25.000
DTK 25	Digitale Topographische Karte 1 : 25.000
DSS	Decision Support System
EEG	Gesetz über den Vorrang Erneuerbarer Energien
EEWärmeG	Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich
Esri	Environmental Systems Research Institute
GVE	Großvieheinheit
GIS	Geographisches Informationssystem
HSE	HEAG Südhessische Energie AG
ITE ² M	Integrated Tools für Ecological and Economic Modelling
nFK 100	Nutzbare Feldkapazität in 100 cm Bodentiefe
MC-SDSS	Multicriteria Spatial Decision Support System
OSM	OpenStreetMap-Projekt
ProLand	Prognosis of Landuse
ProSite	Prognosis of Optimal Sites
SDSS	Spatial Decision Support System
SFB 299	Sonderforschungsbereich 299 “Landnutzungskonzepte für periphere Regionen”
TWh	Terrawattstunde

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen des Transferbereichs „Integrierte Evaluierung Energiepflanzenanbau“ des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Sonderforschungsbereichs 299 „Landnutzungskonzepte für periphere Regionen“ an der Justus-Liebig-Universität Gießen entstanden. Zentrales Element des Transferbereichs ist die Anwendung des Modellverbunds „Integrated Tools für Ecological and Economic Modelling“ (ITE²M) zur Unterstützung privatwirtschaftlicher Investitionsentscheidungen im Bereich erneuerbarer Energien unter Berücksichtigung ökonomischer Anforderungen sowie im Hinblick auf die Nachhaltigkeitsziele Biodiversität, Gewässer-, Boden- und Klimaschutz. Die Anwendung des Modellverbunds im Sinne eines Entscheidungsunterstützungssystems erfolgt durch den Projektpartner HEAG Süd Hessische Energie AG (HSE), welcher den Ausbau von erneuerbaren Energiequellen fördert und unter anderem den Bau von Biogasanlagen in der süd Hessischen Region Starkenburg vorantreibt. Die Methodik der integrierten Modellierung des Modellverbunds ITE²M wird dabei erstmalig unter Praxisbedingungen eingesetzt, wobei die Anwendbarkeit auf die spezifische Fragestellung bzgl. der Veränderung von Landschaftsfunktionen durch Ausweitung des Energiepflanzenausbaus exemplarisch erprobt wird. Außer des Wissenstransfers in die Anwendungspraxis werden hierbei auch die Leistungsfähigkeit sowie die Grenzen des Modellverbunds aufgezeigt.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Forschungsergebnisse begrenzen sich auf das Teilprojekt 1 „Entscheidungsunterstützungssystem ProLand“ des Transferbereichs. Die Analysen und Prognosen des Teilprojekts sind Ausgangspunkt für sämtliche nachgelagerten Modellierungen innerhalb des ITE²M-Verbunds.

1 Einleitung

Die Regierung der Bundesrepublik Deutschland verfolgt mit der zweiten Novellierung des Gesetzes über den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG) das Ziel „den Anteil Erneuerbarer Energien an der Stromversorgung bis zum Jahr 2020 auf mindestens 30 Prozent und danach kontinuierlich weiter zu erhöhen“ (EEG, 2009, § 1, Abs. 2). Zusätzlich zum EEG soll das Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (EEWÄRMEG) dazu beitragen bis zum Jahr 2020 den Anteil regenerativer Energiequellen am Endenergieverbrauch für Wärme auf 14 % zu steigern (EEWÄRMEG, 2008, § 1, Abs. 2). Das EEG regelt neben der vorrangigen Abnahme von Energie aus erneuerbaren Quellen durch die Netzbetreiber auch die Höhe der Vergütungssätze für die Einspeisung. Das EEWÄRMEG hingegen verpflichtet Eigentümer den Wärmeenergiebedarf von Neubauten durch die anteilige Nutzung von Erneuerbaren Energien zu decken (EEWÄRMEG, 2008, § 3, Abs.1). Zudem forciert der von der Bundesregierung beschlossene und stufenweise bis zum Jahr 2022 geplante Ausstieg aus der Kernenergie sowohl die Dringlichkeit einer verbesserten Energieeffizienz als auch die Erhöhung der Anteile regenerativer Quellen zur Energieversorgung. Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen gilt es zu beachten, dass in der BRD neben der Wind- und Wasserkraft die Biomasse eine der wichtigsten regenerativen Energiequellen ist. Die für Energiepflanzen genutzte landwirtschaftliche Anbaufläche betrug 2011 rund 2 Mio. ha. Dies entspricht etwa 16 % der deutschen Ackerfläche. Den größten Zuwachs verzeichnet die Produktion von Energiepflanzen zur Biogasgewinnung. 2009 wurde zu diesem Zweck auf ca. 530.000 ha hauptsächlich Energiemais angebaut. 2010 betrug die Anbaufläche rund 650.000 ha. 2011 waren es 800.000 ha (FNR, 2010 u. FNR, 2011). Diese Entwicklung belegt, dass die staatliche Bioenergieförderung eine zusätzliche Biomassenachfrage erzeugt. Da der Produktionsfaktor Boden jedoch nur begrenzt verfügbar ist, entsteht mit der Ausdehnung der Anbauflächen für Bioenergiepflanzen eine Wettbewerbssituation. An bestimmten Orten und in bestimmten Umfängen verdrängen Energiepflanzen aufgrund ihrer, durch das EEG gegebenen, Vorzüglichkeit die Nahrungsmittelpflanzen. Die damit verbundenen aktuellen und zukünftigen Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit und auf die Landnutzungsveränderungen sind bisher in einem regionalen Maßstab nicht näher untersucht worden.

Gleichzeitig stellt sich vor dem Hintergrund der Kostenprogression bei der Substratbeschaffung, der Transportunwürdigkeit der Substrate, der fehlenden Wärmeverwertung von dezentral gelegenen Biogasanlagen sowie der begrenzten Möglichkeit der Einspeisung von Biogas in das Gasnetz die Frage, an welchen Standorten die Biogasproduktion nachhaltig wirtschaftlich sein kann. Denn außer den legislativen

Rahmenbedingungen hat auch die Standortentscheidung bedeutenden und langfristigen Einfluss auf die Wertschöpfungspotentiale einer Biomassekonversionsanlage. Aus diesen Überlegungen resultiert die Problemstellung und Zielsetzung der vorliegenden Arbeit.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Ermittlung der Anbauumfänge von Energiepflanzen erfolgt häufig über die Berechnung von theoretischen Potenzialen und unter der Annahme, dass die Produktion von Nahrungsmitteln das Hauptziel landwirtschaftlicher Aktivitäten ist (ÖKOINSTITUT, 2004; IE, 2005; LEV, 2005). Die genannten Studien untersuchen welche Stilllegungs- und Brachflächen verfügbar sind und welche Flächen in Zukunft aufgrund biologischer und technischer Fortschritte nicht mehr zur Nahrungsmittelproduktion benötigt werden. Ferner wird unterstellt, dass Nahrungsmittelexporte reduziert und die dadurch freiwerdenden Anbauflächen ebenfalls zur Bioenergieerzeugung zur Verfügung stehen. Ähnliche Arbeiten leiten aus theoretischen Anbaupotenzialen technische Potenziale ab, indem sie die Anbaumöglichkeiten von Energiepflanzen aufgrund von topographischen und naturschutzrechtlichen Restriktionen reduzieren (SCHARDINGER, 2007; GADOCHA, 2011). Somit beschränken sich diese Arbeiten auf die Ermittlung von Potentialen, berücksichtigen dabei aber die tatsächlichen Konkurrenzverhältnissen um landwirtschaftliche Flächen nicht. Die Annahme, dass Energiepflanzen nur auf den Flächen angebaut werden, die nicht zur Nahrungsmittelproduktion erforderlich sind, ist nicht plausibel. Vielmehr ist zur Lösung der Frage nach den Anbauumfängen und -orten von Energiepflanzen eine Beurteilung der relativen Vorzüglichkeit im Vergleich zu anderen Nutzungsalternativen auf allen landwirtschaftlichen Nutzflächen erforderlich. Eine derartig vielseitige Bewertung muss unabhängig von betrieblichen Restriktionen und Preis-Angebotsfunktionen sein, da aufgrund der besonderen Marktsituation von Energiepflanzen keine Preis-Angebotselastizitäten für diese Produkte bekannt sind und somit regressionsanalytische Ansätze zur Wirkungsanalyse nicht in Frage kommen.

Die Standortbestimmung für Energiekonversionsanlagen erfolgt oftmals unter Zuhilfenahme von Statistiken, die aufgrund ihrer Erhebungsart stark aggregiert und räumlich nur grob verortet sind und somit undifferenzierte Ergebnisse liefern (trend:research, 2009). Bestehende Standortbestimmungsmodelle für Biogasanlagen ignorieren netzwerkabhängige Transportentfernungen und vernachlässigen daher einen Großteil der Substratbeschaffungskosten. Zudem berücksichtigen sie lediglich Wirtschaftsdünger und nicht Energiepflanzen als Substrate (MA et al., 2005; VOGNILD, 2009). Teilweise untersuchen die Studien zwar die Produktions- nicht aber die Nachfrageseite (VOGNILD, 2009) oder lassen

wichtige Verwertungsmöglichkeiten wie z.B. die Wärmenutzung aus (MA et al., 2005). Obwohl das Erdgasleitungsnetz aufgrund von technischen Restriktionen nur an ganz bestimmten Punkten für die Einleitung von Bioerdgas geeignet ist und zudem aufgrund hoher Betriebskosten für die Aufrechterhaltung der benötigten Druckverhältnisse die Länge der Zuleitungen stark beschränkt ist, geht eine Untersuchung des Instituts für Energetik und Umwelt (IE, 2007) von einer flächendeckenden Erschließung mit Erdgasleitungen und somit einem unrealistischen Potential für diesen Anlagentyp aus. Sämtliche genannten Arbeiten berücksichtigen keine alternativen Nutzungspfade und variierende Szenarien, so dass Vorteile der Standortbestimmungsmethodik nicht gänzlich ausgeschöpft werden.

Eine wissenschaftliche Untersuchung, die sowohl durch den Energiepflanzenanbau verursachte Landnutzungsänderungen und damit verbundene Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit prognostiziert sowie die ganzheitliche Standortbestimmung von Konversionsanlagen, als auch die Kombination dieser Ergebnisse berücksichtigt und dabei parzellenscharfe, räumlich explizite Ergebnisse liefert, ist bisher nicht vorhanden.

Folglich besteht das primäre Ziel der Arbeit zunächst darin, die „Auswirkungen einer steigenden Nachfrage nach Bioenergiepflanzen auf das Landnutzungsmuster und die Landnutzungsintensität sowie auf die landwirtschaftliche Beschäftigung und das Einkommen“ quantitativ, räumlich explizit und unter Berücksichtigung von alternativen Landnutzungsoptionen zu bestimmen (SFB 299, 2007, S. 31).

Aufgrund der Zusammenarbeit mit dem Projektpartner HSE erfolgt die Landnutzungsanalyse innerhalb der vorgegebenen Untersuchungsregion in Südhessen, ist aber grundsätzlich auf andere Räume übertragbar. Das Hauptziel ist in folgende drei Teilziele gegliedert.

„Erstes Teilziel ist die Bestimmung der relativen Vorzüglichkeit des Anbaus von Bioenergiepflanzen zur energetischen Nutzung über Biogas und die Quantifizierung der genannten Effekte bei punktueller Nachfrage, das heißt unter der Annahme, dass lediglich die vom Industriepartner projektierten Biogasanlagen als Nachfrager für Bioenergiepflanzen zur Verfügung stehen.

Zweites Teilziel ist die Bestimmung der relativen Vorzüglichkeit des Anbaus von Bioenergiepflanzen zur energetischen Nutzung und die Quantifizierung der genannten Effekte bei flächenhafter Nachfrage, das heißt unter der Annahme, dass in der gesamten Region Biomasseveredelungsanlagen als Nachfrager von Bioenergiepflanzen zur Verfügung stehen.

Drittes Teilziel ist die Bestimmung der optimalen Standorte von Biomasseveredelungsanlagen in Südhessen unter Berücksichtigung der zahlreichen, konkurrierenden Nutzungsoptionen“ (SFB 299, 2007, S. 31).

Eine derartig detaillierte und vielseitige Bewertung muss unabhängig von betrieblichen Restriktionen und Preis-Angebotsfunktionen sein, da aufgrund der besonderen Marktsituation von Energiepflanzen keine Preis-Angebotselastizitäten für diese Produkte bekannt sind und somit regressionsanalytische Ansätze zur Wirkungsanalyse nicht in Frage kommen. Daher wird zur Realisierung des Arbeitsziels das im Rahmen des SFB 299 entwickelte Landnutzungsmodell ProLand sowie das Standortbewertungsmodell ProSite verwendet.

1.2 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Zum Erreichen der Zielsetzung ist die Arbeit in vier Teile gegliedert. Das zweite Kapitel beleuchtet die theoretischen Grundüberlegungen hinsichtlich landwirtschaftlicher Landnutzungstheorien nach VON THÜNEN und BRINKMANN. Zudem stellt es die Theorien von WEBER zur industriellen Standortbestimmung vor. In diesem Zusammenhang wird die Relevanz dieser Theorien für die Fragestellung erläutert.

Der dritte Abschnitt beschreibt die zugrundeliegende Methodik der eingesetzten Modelle ProLand und ProSite, ihre Modifikationen sowie ihre Zusammenführung und damit verbundene zusätzliche Analysemöglichkeiten. Ferner wird hier die Untersuchungsregion mittels der zu Analysezwecken benötigten Geodaten näher vorgestellt.

Das vierte Kapitel stellt die Modellierungsergebnisse dar. Es ist entsprechend der Zielsetzung in mehrere Abschnitte aufgeteilt und beschreibt neben den räumlich expliziten Berechnungen und Prognosen der Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus auf die Wirtschaftlichkeit und die Landnutzung auch die Analyseergebnisse zur Evaluierung und Optimierung der Anlagenstandorte. Zudem werden an dieser Stelle auch die Ergebnisse weiterführender Analysemöglichkeiten vorgestellt, die aus der Kombination der beiden Modelle resultieren.

Das fünfte Kapitel bewertet die erzielten Ergebnisse und beleuchtet deren mögliche Ursachen. Zudem erläutert es den praktischen Nutzen der vorliegenden Erkenntnisse und gibt einen Ausblick auf alternative Datenquellen, die zu einem größeren Einsatzbereich der Modelle beitragen könnten.

2 Theoretische Grundlagen

In der Landwirtschaft ist der Standort eines Betriebes bedingt durch naturräumliche Gegebenheiten und historische Entwicklungen bestimmt. Es ist daher weniger die Frage nach dem Produktionsstandort zu einer vorgegebenen Nutzung, sondern eher die Frage nach der konkreten Landnutzung zu einem vorgegebenen Standort und der Organisation der Produktion an diesem Ort relevant. Trotz der vorgegebenen natürlichen Verhältnisse, wie Bodenbeschaffenheit und -qualität oder klimatischer Bedingungen, haben Landwirte einen gewissen Entscheidungsspielraum bzgl. ihrer Produktwahl. Diese Wahl ist allerdings von gesellschaftlichen Traditionen und von der Nachfrage beeinflusst (BATHELT & GLÜCKLER, 2003). Diese Zusammenhänge haben bereits JOHANN HEINRICH VON THÜNEN (1826) mit seiner Landnutzungstheorie sowie THEODOR BRINKMANN (1922) mit dem Konzept der Landnutzungsintensität erkannt. Beide Arbeiten bilden die theoretische Basis für die durchgeführte Landnutzungsmodellierung.

Der zweite Teil des Kapitels beschreibt die industrielle Standortwahl nach WEBER (1922). Hierbei ist, anders als in der Landwirtschaft, die Bestimmung des Produktionsstandorts zu einer vorgegebenen Nutzung von Interesse. Außer der Darstellung der Theorien erfolgt in diesem Kapitel ferner die Beschreibung der Relevanz der theoretischen Basis für das weitere Vorgehen insbesondere im Hinblick auf das methodische Konzept.

2.1 Landwirtschaftliche Landnutzungstheorien

Das Modell des isolierten Staats von JOHANN HEINRICH VON THÜNEN (1826) analysiert wie Art und Intensität der landwirtschaftlichen Produktion in Abhängigkeit von den Transportkosten zum Absatzmarkt räumlich variieren und inwiefern ökonomische Gesetzmäßigkeiten zur Bildung von Landnutzungszonen beitragen. THÜNENS Modell gilt als erste Standorttheorie überhaupt. THÜNEN beleuchtet die Organisation des peripheren Raums, der in Beziehung steht zu einem urbanen Zentrum. Dieses Zentrum ist der einzige Markttort eines isolierten und nach allen Richtungen homogen ausgestatteten, kreisrunden Staates. In diesem Gebiet herrscht vollständige Konkurrenz. Bewirtschaftungs- und Verkehrstechnologien sind gleichartig, sämtliche Güter sind zu konstanten Preisen und in beliebigen Mengen verfügbar und absetzbar. Neben diesen Annahmen unterstellt von Thünen ferner, dass jeder Landnutzer das Produktionsverfahren wählt, dessen Bodenrentenerwartungswert am Höchsten ist, d.h. dass die Landwirte bei der Erzeugung ihrer Produkte Gewinnmaximierung anstreben. Der maximale Gewinn pro Flächeneinheit ergibt sich aus der Berechnung und Gegenüberstellung der Bodenrenten der Landnutzungssysteme. Es gilt Formel 2.1.

Formel 2.1: Bodenrentengleichung

$$R = E \times (P - a)$$

mit

R = Bodenrente in Geldeinheit je Flächeneinheit

E = Naturalertrag des Landnutzungssystems in Masseinheit je Flächeneinheit

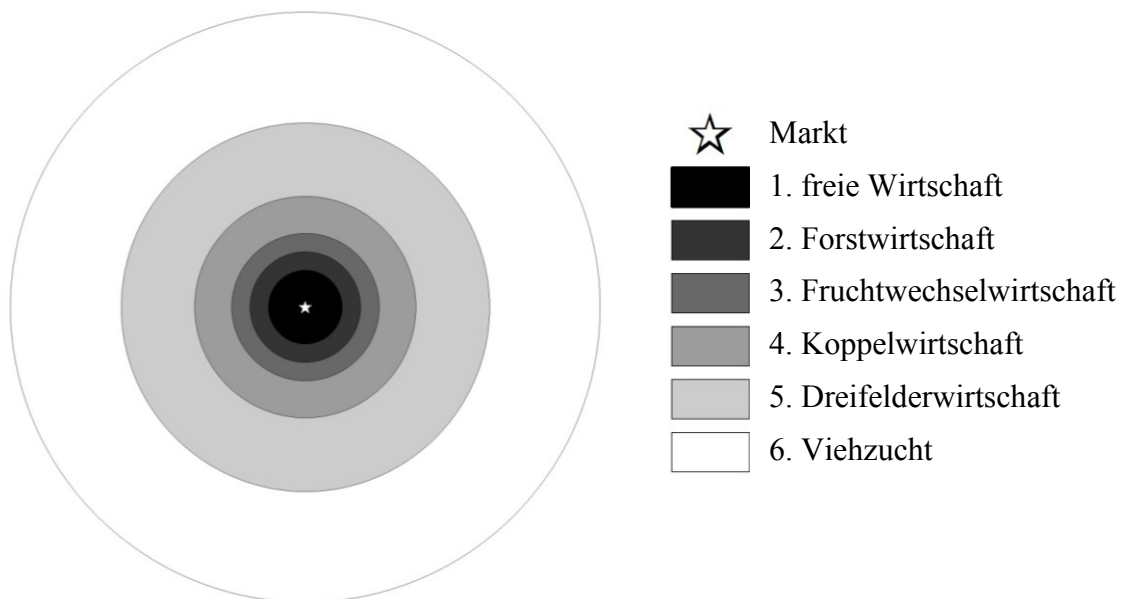
P = Produktpreis in Geldeinheit je Masseinheit

a = Produktionskosten in Geldeinheit je Masseinheit

Einzig variierendes Element im Modell des isolierten Staats sind die Transportkosten. Mit zunehmendem Gewicht und Volumen sowie steigender Verderblichkeit eines Produktes verteuern die Transportkosten die im Umland erzeugten Produkte proportional und mit zunehmender Entfernung zum Markttort.

Unter diesen Voraussetzungen untersucht VON THÜNEN wie sich die Entfernung zur Stadt auf die Landnutzung des Umlands auswirkt. Nach THÜNENS Theorie ordnet sich das Produktionsverfahren mit den höchsten relativen Transportkosten je Mengeneinheit in unmittelbarer Nähe zum Markttort an, während das Verfahren mit den niedrigsten relativen Transportkosten in marktfernen Gebieten situiert ist. Aufgrund der Homogenität des Raums sind Raumüberwindungskosten in alle Richtungen gleichartig ausgeprägt, so dass die Anordnung der Landnutzung in unterschiedlichen Nutzungsarten und -intensitäten in konzentrischen Kreisen um den Markttort erfolgt, wobei mit zunehmender Entfernung vom Markttort länger haltbare und somit transportwürdigere Produkte erzeugt werden.

Unter den Produktions- und Transportbedingungen des 19. Jahrhunderts hat VON THÜNEN, die in Abbildung 2.1 dargestellten sechs Landnutzungszonen und ihre Anordnung um den Markttort identifiziert.

Abbildung 2.1: Landnutzungszonen in von Thürens isoliertem Staat

Quelle: Eigene Darstellung nach WAIBEL (1933).

In der ersten Zone ist der Gartenbau aufgrund der hohen Verderblichkeit der Produkte und der damit erzielbaren hohen Erlöse die dominante Landnutzung. Wegen der Marktnähe sind die Bodenpreise hoch, so dass die Intensität der Landnutzung ebenfalls hoch ist. Diese Zone wird VON THÜNEN „freie Wirtschaft“ genannt. Als zweiter Landnutzungsring folgt die Forstwirtschaftszone. Die relative große Nähe zum Markt ist wegen der im 19. Jahrhundert hohen Transportkosten für Holzprodukte begründet. Die nächsten drei Landnutzungszonen sind Fruchtwechselwirtschaft, Koppelwirtschaft und Dreifelderwirtschaft. In diesen Zonen wird hauptsächlich Getreide produziert. Mit zunehmender Entfernung vom Markttort nimmt jedoch die Anbauintensität ab. In der sechsten Zone wird extensive Viehzucht betrieben.

Die Grenzen der Landnutzungszonen ergeben sich aus dem Kernelement der THÜNSCHEN Landnutzungstheorie, der Lagerente. Sie bezeichnet den Nettoerlös pro Flächeneinheit, der aufgrund wachsender Transportkosten mit zunehmender Entfernung zum Markt sinkt (BATHELT & GLÜCKLER, 2003). Die Lagerentenformel basiert auf der Bodenrentengleichung, ist jedoch um Transportkosten erweitert. Es gilt Formel 2.2.

Formel 2.2: Lagerentengleichung

$$R = E \times (P - a) - E \times f \times k$$

mit

R = Lagerente in Geldeinheit je Flächeneinheit

E = Naturalertrag des Landnutzungssystems in Masseinheit je Flächeneinheit

P = Produktpreis in Geldeinheit je Masseinheit

a = Produktionskosten in Geldeinheit je Masseinheit

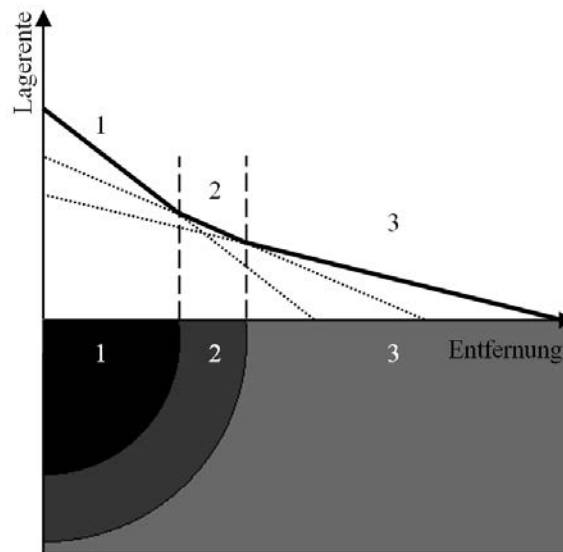
f = Transportkosten je Produkt- und Entfernungseinheit in Geldeinheit

k = Entfernung zwischen Produktionsstandort und Markt in Entfernungseinheit

Würde unter den Bedingungen des isolierten Staats nur ein Produkt erzeugt, so ergäbe sich auch nur ein Anbauggebiet, dessen Begrenzung an der Stelle zu finden ist, an der die Transportkosten dem Nettoerlös gleichen. An dieser Grenze ist die Lagerente also gleich null (DICKEN & LLOYD, 1999).

Werden mehrere Produkte erzeugt, entstehen um den zentralen Markt nach dem Differentialprinzip konzentrische Anbaugebiete verschiedener Nutzungsarten. Aufgrund der Annahme der gewinnmaximierenden Landnutzer ist diejenige Nutzung vorzüglich, deren Lagerente den höchsten Erwartungswert aufweist. Da die Lagerentengeraden allerdings unterschiedliche Steigungen haben, erfolgt mit zunehmender Entfernung zum Marktort ein Nutzungswechsel. Dabei sind die Grenzen der einzelnen Landnutzungszonen an den Schnittstellen der Lagerentengeraden zu finden. In Abbildung 2.2 wird dieser Zusammenhang in vereinfachter Form anhand von drei Landnutzungsalternativen verdeutlicht.

Abbildung 2.2: Anordnung von Landnutzungszonen nach Thünen



Quelle: Eigene Darstellung nach SHERIDAN (2010).

Obwohl Landnutzung Nr. 1 mit einer hohen Steigung der Lagerente in Marktnähe die vorzüglichste Landnutzungsalternative ist, wird sie mit zunehmender Entfernung vom Marktort durch Landnutzung Nr. 2 in der absoluten Höhe der Lagerente übertroffen. An der Schnittstelle der Lagerenten der Landnutzungen Nr. 1 und Nr. 2 findet daher der erste Landnutzungswechsel statt. Landnutzung Nr. 2 ist so lange die vorzüglichste Wahl, bis ihre absolute Höhe Landnutzung Nr. 3 unterliegt. Bei einer hohen Marktentfernung ist in diesem Beispiel daher die dritte Landnutzung die Rentabelste.

VON THÜNEN stellt zudem fest, dass die innerhalb der Nutzungszonen prognostizierten Produktionssysteme unterschiedliche Anbauintensitäten aufweisen. Dieses Intensitätsprinzip ist dadurch begründet, dass aufgrund der Marktnähe die Lagerente und mit ihr die Bodenpreise hoch sind. Die Landnutzer erhöhen folglich die Arbeitsintensität auf marktnahen, Flächen, um die hohen Bodenpreise zu kompensieren. So wird z.B. in Marktnähe die Fruchtwechselwirtschaft betrieben, während die Bewirtschaftungsform in Marktferne die Koppelwirtschaft ist, bei der außer Ackerbau und Weidewirtschaft auch eine Bracheperiode üblich ist.

Aufgrund der vereinfachenden Annahmen ist das Modell des isolierten Staats zwar ungeeignet den Einfluss von heterogen verteilten, standortbestimmenden Faktoren basierend auf den naturräumlichen, wirtschaftlichen und sozio-kulturellen Rahmenbindungen zu untersuchen. Dennoch bildet THÜNENS Landnutzungstheorie eine für die vorliegende Arbeit relevante Grundlage, verdeutlicht es doch die prinzipielle Anordnung verschiedener Landnutzungen und die Ursachen für den Wechsel dieser Nutzungen. Zudem kann zwar davon ausgegangen werden, dass im Zeitalter der Globalisierung für eine Vielzahl von Gütern

kein derart starker Einfluss von Transportkosten gegeben ist, wie es zu Zeiten von THÜNEN der Fall war. Dies gilt allerdings nicht für die Bereitstellung von den zur Biogaserzeugung benötigten Substraten wie Silomais und Gülle, die aufgrund ihrer hohen Wassergehalte in der Frischmasse stark transportunwürdige Güter sind. Somit sind THÜNENS Überlegungen sowohl für die folgenden Landnutzungsmodellierungen als auch für die Bewertung und Bestimmung von Anlagestandorten von Bedeutung. Darüber hinaus bildet THÜNENS Annahme bodenrentenmaximierender Landnutzer die Grundlage für die folgenden Modellierungen, zumal das „Oberziel menschlichen Handelns in einer Welt der knappen Güter [...] die Nutzenmaximierung“ ist (KUHLMANN, 2007, S.17).

Die zweite, für die Landnutzungsmodellierungen relevante, theoretische Grundlage ist die Intensitätslehre nach BRINKMANN (1922). Die Intensitätslehre beseitigt einige Schwachpunkte der thünschen Standortlehre, indem zusätzlich zu den Transportkosten auch variierende Produkt- und Faktorpreise einfließen. BRINKMANN (1922, S. 79 f.) unterstreicht dabei die Bedeutung der Bodenrente und betont, dass das Streben des Landnutzes „[...] nicht auf den höchsten Profit an der Frachteinheit, sondern auf den höchsten Gewinn pro Einheit bewirtschafteten Fläche gerichtet ist, auf die höchste Grundrente [...]. Und somit ist es nicht der auf die Fracht-, sondern der auf die Flächeneinheit berechnete, bei der Annäherung eines Standortes an den Markt sich ergebende Ersparnisüberschuß [...], welcher endgültig die Anordnung der Produktionen bzw. Betriebssysteme determiniert [...]“. Neben diesen wirtschaftlichen Parametern berücksichtigt BRINKMANN die Verkehrslage, heterogene natürliche Standorteigenschaften und unterschiedliche Kompetenzen der Landnutzer als differenzierende Standortfaktoren. BRINKMANN definiert die Wirtschaftsweise eines landwirtschaftlichen Betriebes als messbare Größe, indem er den Lohn-, Kapital- und Zinsaufwand der bewirtschafteten Fläche gegenüberstellt, d.h. die Produktionskosten in Relation setzt zur Nutzfläche. Diese Größe bezeichnet BRINKMANN als Betriebsintensität. Es gilt Formel 2.3.

Formel 2.3: Intensitätsgleichung

$$I = \frac{A + K + Z}{F}$$

mit

I = Grad der Betriebsintensität

A = Lohnaufwand

K = Kapitalaufwand

Z = Zinsaufwand

F = Bewirtschaftete Fläche

Der Grad der Betriebsintensität ist über die mittleren Produktionskosten je Hektar messbar. Eine intensive Wirtschaftsweise ist durch hohe Produktionskosten je Hektar gekennzeichnet, während für eine extensive Wirtschaftsweise niedrige Produktionskosten je Hektar typisch sind. Auch Brinkmann unterstellt, dass der Landnutzer als homo oeconomicus agiert und Gewinnmaximierung anstrebt: „Zweck eines landwirtschaftlichen Betriebs ist die Erzielung eines möglichst hohen und nachhaltigen privatwirtschaftlichen Nutzens“ (BRINKMANN, 1922, S. 32). Dies bedeutet allerdings nicht, dass die intensivste Landnutzung auf allen Standorten diejenige mit dem höchsten Gewinn ist. Deshalb [...] „fügt der landwirtschaftliche Unternehmer seinem Betriebsareal Kapital und Arbeit hinzu, [...] so lange die Geldwerte der Einwendungen und deren landläufige Zinsansprüche [...] durch die gewonnenen Roherträge noch eben zurückerstattet werden“ (ebd.). Gemäß dem Gesetz des abnehmenden Ertragszuwachses liegt die Aufwandshöchstgrenze an der Schnittstelle von Grenzertrag und Grenzaufwand. An diesem Optimum werden die Kosten der zuletzt aufgewendeten Produktionsmittelmengen durch den Wert des dadurch zusätzlich erzielten Ertrags abgedeckt. Wird diese Stelle unterschritten, entstehen Opportunitätskosten. Wird sie überschritten, deckt der zusätzliche Ertrag die dafür erforderlichen hohen Aufwände nicht vollständig ab. Zur Bestimmung der Schnittstelle von Grenzertrag und Grenzaufwand, d.h. der optimalen Betriebsintensität ist zunächst von Interesse, welche Faktoren hierfür ausschlaggebend sind. Brinkmann definiert vier Standortfaktoren, die für den Grad der Betriebsintensität relevant sind. Dies sind neben der Verkehrslage des landwirtschaftlichen Betriebs, die natürlichen Standortfaktoren der Produktionsflächen, die Entwicklungsstufe der Volkswirtschaft sowie die Persönlichkeit des Betriebsleiters (ebd., S.34).

Die Verkehrslage eines landwirtschaftlichen Betriebs fasst nach BRINKMANN (1922, S.34 f.) „alle [...] Beziehungen zur wirtschaftlichen Außenwelt“ ein und ist bestimmt durch die Erreichbarkeit und die Nähe zu Märkten bzw. Produktionsstandorten und zwar sowohl zu

Absatz- als auch zu Bezugszwecken. Die Verkehrslage wirkt sich außer auf die Transportkosten auch auf die Marktpreise und die Arbeitskosten aus. Eine hohe Betriebsintensität stellt sich in marktnahen Gebieten sowie verkehrsgünstig gelegenen Regionen ein. Periphere Standorte weisen hingegen eine geringe Betriebsintensität auf. Dieser Zusammenhang gilt ebenfalls hinsichtlich der angebauten Kulturpflanzen, so dass außer einer Aufwandserhöhung bei derselben Kulturpflanze auch ein Übergang zu spezifisch intensiven Kulturen stattfinden kann.

Die natürliche Lage eines landwirtschaftlichen Betriebs ist „die Beschaffenheit von Boden und Klima [...], die für die Kultur und das Gedeihen der landwirtschaftlich genutzten Pflanzen von Bedeutung sind“ (BRINKMANN, 1922, S. 44). Außer der Menge und Verteilung von Niederschlag und Wärme, fließt das Relief, der Nährstoffgehalt, die Grundwasserverhältnisse sowie die Bodensubstanz des Standorts in diesen Intensitätsfaktor ein. Zwar besteht zwischen der natürlichen Lage und der Betriebsintensität keine Gesetzmäßigkeit, wie z.B. bei der Verkehrslage, jedoch können die naturräumlichen Gegebenheiten ablenkend auf den Intensitätsgrad wirken. Dies führt an bestimmten Orten dazu, dass extensive Landnutzungen ökonomisch vorteilhafter sein können als intensive, obwohl aufgrund der günstigen Verkehrslage eine Intensivierung zu erwarten wäre. Es gilt ferner, dass mit zunehmender natürlicher Standortungunst auch die Differenzierung der Kulturarten sinkt und die Landwirtschaft uniformer wird. Allerdings kann auch in naturräumlich benachteiligten Regionen Marktnähe zu einer höheren Differenzierung in der Intensitätsabstufung führen. BRINKMANN (1922, S. 46 f.) schlussfolgert, dass der Einfluss von natürlichen Standortfaktoren in der Landwirtschaft bedeutender ist als der Einfluss der Verkehrslage.

Die Entwicklungsstufe der Volkswirtschaft wirkt sich sowohl auf die Nahrungsmittelnachfrage als auch auf die Produktionstechnik aus. Eine weitentwickelte Volkswirtschaft hat einen erhöhten Bedarf nach landwirtschaftlichen Erzeugnissen. Dieser wirkt über die Preiserhöhung steigernd auf die Intensität der Landwirtschaft, insbesondere auf die Kapitalintensität. Technischer Fortschritt in der Landwirtschaft hat stets ertragssteigernde und somit insgesamt produktionskostenmindernde Wirkung. Ertragssteigernder Fortschritt verstärkt aufgrund der steigenden Transportaufwände die Konkurrenzfähigkeit marktnaher Gebiete. Arbeitsrationalisierungen hingegen erhöhen die Konkurrenzfähigkeit marktferner Gebiete. Technischer Fortschritt im Transportwesen wirkt ausgleichend auf lokale Preise, so dass sich die Intensitätsdifferenzen zwischen marktnahen und marktfernen Standorten angleichen. Folglich erfahren unter diesen Bedingungen die natürlichen Standortbedingungen

eine höhere Bedeutung als Intensitätsfaktor. Der organisch-technische Fortschritt jedoch kann die, aus der natürlichen Lage resultierenden Differenzen wieder relativieren. Der volkswirtschaftliche Entwicklungsstand hat somit eine vielfältige Wirkung auf den Intensitätsgrad der Landwirtschaft. In diesem Zusammenhang deutet BRINKMANN (1922, S. 57) auch politische Rahmenbedingungen als „Staatsfürsorge [...] zur Ueberwindung der Agrarkrisen“ an.

Als letzten Intensitätsfaktor nennt BRINKMANN (1922, S. 58 f.) die Persönlichkeit des Unternehmers. So unterscheiden sich Betriebsleiter in der Adaptionsgeschwindigkeit hinsichtlich technischer Fortschritte, in ihrer ökonomischen Grundauffassung und der „beruflichen Tüchtigkeit“. Ursachen für die Unterschiede sind neben persönlichen Befähigungen auch das Fehlen individueller Konkurrenz im landwirtschaftlichen Betrieb, so dass das Streben nach höchstem Gewinn nicht bei allen Landwirten gleichartig ausgeprägt ist. Brinkmann stellt fest, dass der Einfluss der Unternehmerpersönlichkeit den Einfluss natürlicher Standortfaktoren und der Verkehrslage überschreiten kann.

2.2 Landnutzungstheorien und -modellierung

Die vorgestellten Theorien von BRINKMANN und THÜNEN sind Ausgangspunkt für die Bestimmung der vorzüglichen landwirtschaftlichen Aktivität auf einem Standort und somit Basis der Landnutzungsmodellierung anhand der idealen Faktorallokation (BECKMANN, 1999). Die Modellierung hängt von zahlreichen Standortfaktoren ab, welche als exogene Variablen Einfluss auf die Art und Intensität der Landnutzung haben (KUHLMANN et al., 2002). In Anlehnung an Brinkmanns Standortfaktoren sind die Verkehrslage, die natürlichen Gegebenheiten der Produktionsflächen, die Entwicklungsstufe der Volkswirtschaft sowie die Persönlichkeit des Betriebsleiters für die Berechnung und Gegenüberstellung der Bodenrenten sowie anschließende Modellierungsschritte von Bedeutung.

Sowohl die Produkt- als auch die Faktorpreise sind je nach **Verkehrslage** des landwirtschaftlichen Standorts zu den Märkten variabel. Für die Modellierung der Landnutzung bedeutet dies, dass sowohl die Lage der Märkte als auch die Entfernung aller landwirtschaftlichen Produktionsflächen zu den Bezugs- und Absatzmärkten bekannt sein müssen. Diese Informationen ermöglichen eine Berechnung der Lagerrenten, die Auswirkungen auf die absoluten Höhen und Relationen der Bodenrenten haben. Aufgrund der Datenverfügbarkeit ist jedoch eine Verortung sämtlicher Märkte nicht möglich. Gleichzeitig ist für zahlreiche landwirtschaftliche Produkte eine Abnahme der Bedeutung der Verkehrslage zu beobachten, da Fortschritte in der Transporttechnologie die Transportkosten senken. Der geringe Einfluss der Verkehrslage erhöht die Gewichtung der nicht kontrollierbaren Variablen

wie beispielsweise der natürlichen Standortgegebenheiten. Deutlich wird dieser Zusammenhang an zahlreichen Beispielen aus dem Bereich der Gemüse- und Obstproduktion. Trotz hoher Verderblichkeit der Produkte und einer hohen Betriebsintensität stehen in Zeiten der Globalisierung primär die klimatischen Bedingungen der oftmals peripher gelegenen Produktionsstandorte und die Arbeitskosteneinsparungen an diesen Orten im Vordergrund. Der von Brinkmann erkannte Zusammenhang der Erhöhung der Betriebsintensität mit zunehmender Nähe zu den Märkten verliert heutzutage an Bedeutung. Die Annahme durchschnittlicher Produkt- und Faktorpreise ist folglich auf regionaler Ebene zulässig. Trotz der Unterstellung regional durchschnittlicher Transportkosten berücksichtigt die folgende Modellierung differenzierte Produkt- und Faktormengen je Produktionseinheit für jede Landnutzungsalternative, um so unabhängig von der Datenlage hinsichtlich der Marktstandorte zu belastbaren Ergebnissen zu gelangen.

Die raumvarianten **natürlichen Gegebenheiten** wirken sich unmittelbar auf die Landnutzungsaktivitäten aus und sind weitestgehend nicht kontrollierbare Variablen. Dazu zählen neben den zusätzlich auch von Vegetationsperiode zu Vegetationsperiode zeitlich variierenden Parametern Solarenergiezufuhr sowie Niederschlagshöhe und -verteilung ferner die Bodeneigenschaften wie Wasserhaltevermögen und Bodenart sowie das Relief des Geländes (KUHLMANN, 2004). Diese differenzierend wirkenden Standortfaktoren finden in Form von Geodaten zu Boden, Temperatur, Niederschlag und Relief in den folgenden Modellierungen ausreichend Berücksichtigung und bilden die Datenbasis für weitere Berechnungen (vgl. Kapitel 3.6 und 3.7).

Brinkmanns Standortfaktor **Entwicklungsstufe der Volkswirtschaft** wird im Modell anhand von diversen Produktionsverfahren der Außenwirtschaft sowie durch die Berücksichtigung von Transferzahlungen und variablen, szenarioabhängigen Faktor- und Produktpreisen abgebildet. Auch die Einbeziehung von benutzerdefinierten Fruchtfolgen (siehe Kapitel 3.2.2) und die Ermittlung von Einzugsgebieten und Transportkosten (vgl. Kapitel 3.5.1.) ist abhängig von der Entwicklungsstufe der Wirtschaft.

Der Standortfaktor **Betriebsleiterbefähigung** ist sowohl räumlich als auch zeitlich variant und führt zu unterschiedlichen Landnutzungsintensitäten und Landnutzungsprogrammen bei sonst gleichartigen Standortfaktoren. Eine Berücksichtigung dieses variablen und nur schwer messbaren Faktors ist im Modell nicht möglich, da Verteilung und zeitliche Entwicklung der Betriebsleiterbefähigung aufgrund der Datenlage unbekannt sind. Analog zu BRINKMANN und THÜNEN gilt daher die Homogenität der Betriebsleiterbefähigungen und die Annahme bodenrentenmaximierender und risikoneutraler Landnutzer.

Die von BRINKMANN angedeuteten politischen Rahmenbedingungen gilt es zusätzlich zu den bereits genannten Faktoren zu berücksichtigen, schließlich beeinflussen Bewirtschaftungsauflagen und Agrarsubventionen heutzutage die räumliche Verteilung und Intensität der landwirtschaftlichen Produktion massiv. So sind neben grundsätzlichen Modellannahmen auch die Versuchsanstellung und die Beachtung von Transferzahlungen ein Ergebnis der agrarpolitischen und umweltrechtlichen Vorgaben.

Die genannten Standortfaktoren sind raum- und zeitvariant. Daher ist sowohl die optimale Nutzungsintensität und damit eng verwoben auch die optimale Landnutzung ungleich im Raum und über die Zeit verteilt. Offensichtlich üben die Standortfaktoren eine unterschiedlich starke Wirkung auf die optimale Betriebsintensität aus. Während auf einem Standort ein Intensitätsfaktor deutlich erkennbaren Einfluss auf die optimale Betriebsintensität ausübt und zu Änderungen der Landnutzung führt, hat dieser Faktor auf einem anderen Standort anscheinend vernachlässigbare Bedeutung. Tatsächlich ist jedoch der Einfluss der Intensitätsfaktoren auf allen Standorten identisch. Vielmehr ist der Abstand von Bodenrenten der Landnutzungssysteme eines Standorts ausschlaggebend, insbesondere da für die folgenden Landnutzungsmodellierungen die Annahme bodenrentenmaximierender Landnutzer gilt (SHERIDAN, 2010). Wie BRINKMANN (1922, S. 75 f.) erkennt, versuchen alle Landnutzungsalternativen „[...] einen möglichst marktnahen Standort zu erobern, führen also miteinander einen Wettbewerb um den absolut günstigsten Standort“. Daher sind neben den genannten Standortfaktoren auch die Abstände der Bodenrenten als Maß für die Vorzüglichkeit der einzelnen Landnutzungsalternativen zu ermitteln. Folglich gilt es ein Werkzeug einzusetzen, welches die genannten Faktoren so weit wie möglich berücksichtigt und so räumlich differenzierte Analysen aufgrund von veränderten sozio-ökonomischen, politischen, technologischen und naturräumlichen Rahmenbedingungen sowie Prognosen über die zukünftige Landnutzung ermöglicht.

2.3 Industrielle Standortbestimmung

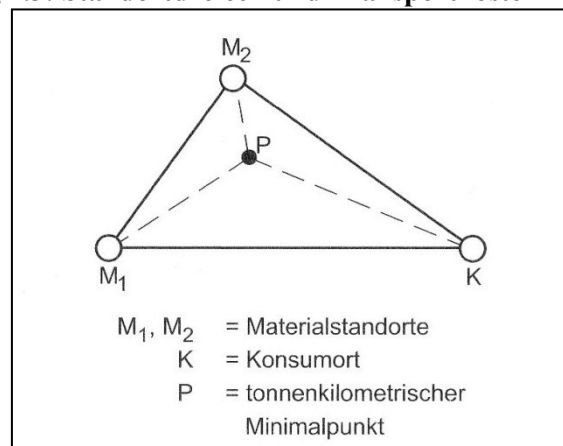
Nachdem in den beiden vorangegangenen Abschnitten Aspekte landwirtschaftlicher Landnutzungsentscheidungen und die Bedeutung von Landnutzungstheorien für die Landnutzungsmodellierung thematisiert wurden, beschreiben die nächsten Abschnitte die Wahl eines industriellen Standorts vor dem Hintergrund heterogener räumlicher Standortbedingungen und die Übertragbarkeit dieser Theorien auf den Spezialfall der Standortsuche von Biogasanlagen.

Die kostenminimale Standortwahl nach WEBER (1922) bildet den dritten theoretischen Schwerpunkt dieser Arbeit und ist für die Evaluation und Bestimmung optimaler

Anlagenstandorte relevant. WEBERS Standortfaktorenmodell ist ein Basismodell der Wirtschaftsgeographie, welches die räumliche Verteilung von Industriebetriebsstandorten beschreibt (WEBER, 1922; DICKEN & LLOYD, 1999; BATHELT & GLÜCKLER, 2003). Nach WEBERS Definition handelt es sich bei einem „Standortsfaktor“ um einen „[...]Vorteil, der für eine wirtschaftliche Tätigkeit dann eintritt, wenn sie sich an einem bestimmten Ort [...] vollzieht“ (WEBER, 1922, S. 16). In seinem Modell identifiziert WEBER drei Standortfaktoren. Dies sind Transportkosten, Arbeitskosten und Agglomerationswirkungen.

Die Transportkosten hängen zum Einen vom Gewicht der Güter und zum Anderen von der zu überwindenden Entfernung ab. Das Produkt aus Gewicht und Entfernung ist als Tonnenkilometer definiert. Gesucht wird der Standort an dem im gesamten Produktions- und Vertriebsprozess die geringsten verfahrenen Tonnenkilometer entstehen. Dieser tonnenkilometrische Minimalpunkt befindet sich sowohl in optimaler Entfernung zu den Materialstandorten als auch zu den Konsumorten. Werden in einem Produktionsprozess zwei verschiedene Materialien „M₁“ und „M₂“ benötigt und existiert nur ein Konsumort „K“, dann liegt der optimale Produktionsstandort „P“ zentral am Schnittpunkt der Winkelhalbierenden des Standortdreiecks, wie Abbildung 2.3 verdeutlicht.

Abbildung 2.3: Standortdreieck und Transportkostenminimalpunkt



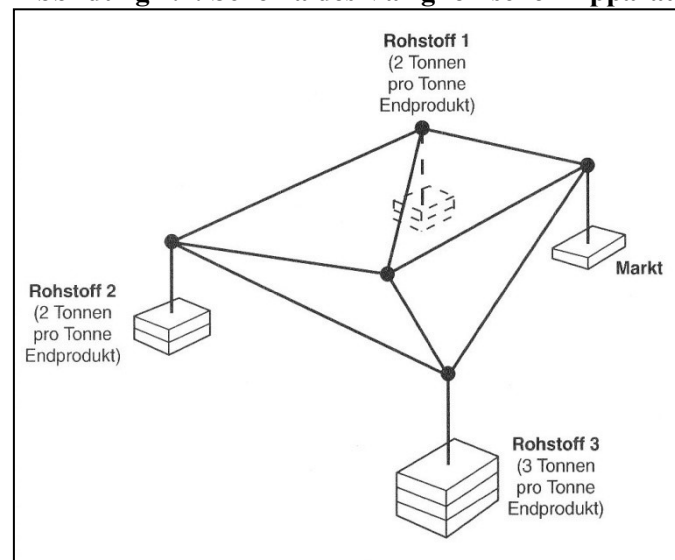
Quelle: BATHELT & GLÜCKLER, 2003.

Die Lage des Produktionsstandorts ist jedoch nicht nur von der Anzahl der Materialstandorte und der Konsumorte sowie deren Verteilung im Raum abhängig, sondern auch von der Art der eingesetzten Rohstoffe und der erzeugten Produkte.

WEBER unterscheidet zwischen ubiquitären und lokalisierten Materialien. Ubiquitäre Güter kommen überall vor, wie z.B. Luft oder Wasser. Lokalisierte Güter hingegen sind „nur an geographisch scharf umrissenen ganz bestimmten Stellen“ zu finden oder werden „aus wirtschaftlichen Gründen nur an ganz bestimmten Stellen bergmännisch gehoben oder landwirtschaftlich produziert“ (WEBER, 1922, S. 52). Diese standortspezifischen Rohstoffe

unterteilt WEBER in „Reinmaterialien“ und „Grobmaterialien“. Während Reinmaterialien mit ihrem Gesamtgewicht in das Endprodukt eingehen, ist dies bei Grobmaterialien nur teilweise oder gar nicht der Fall. Laut dieser Definition sind Edelmetalle wie z.B. Gold Reinmaterialien, wohingegen Brennstoffe wie z.B. Kohle Gewichtsverlustmaterialien sind. Je nach Menge und Art der benötigten Rohstoffe sowie Beschaffenheit der Produkte verschiebt sich der tonnenkilometrische Minimalpunkt. Diese Verschiebung hat WEBER mit Hilfe eines mechanischen Modells, dem Varignon'schen Apparat, analysiert. Die Rohstoff- und Konsumstandorte im Varignon'schen Apparat sind durch Knotenpunkte von Fäden abgebildet. Diese Knoten sind miteinander verbunden und entsprechend der Klassifizierung der Güter unterschiedlich gewichtet. Das Schema des Varignon'schen Apparats ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

Abbildung 2.4: Schema des Varignon'schen Apparats



Quelle: DICKEN & LLOYD, 1999.

Je nach Position und Gewichtung der Rohstoffe sowie der Produkte verlagert sich der tonnenkilometrische Minimalpunkt in Richtung der Eckpunkte der Standortsfigur, d.h. in Richtung der Rohstofffundorte oder der Konsumorte. Anhand dieser Modellierung kommt Weber zu dem Ergebnis, dass Gewichtsverlustmaterialien den Produktionspunkt an sich binden können, wenn ihr Gewicht in der Summe gleich oder größer als die Summe des Produktgewichts und des Gewichts der übrigen lokalisierten Reinmaterialien ist. Reinmaterialien können den Produktionsstandort nicht an ihre Fundorte binden. WEBER untersucht schließlich wie sich unterschiedliche, im Produktionsprozess eingesetzte, Materialkombinationen auf die Lage des tonnenkilometrischen Minimalpunkts auswirken. Diese Untersuchung belegt, dass der optimale Standort von Betrieben, die Gewichtsverlustmaterialien einsetzen eher in Richtung der Rohstofffundorte tendiert. Standorte von Betrieben, die Produkte hauptsächlich aus Reinmaterialien erzeugen, erfahren

eine Anziehung in Richtung des Markts. Je nach Zusammensetzung der benötigten Rohstoffe und der Produkte können allerdings auch intermediäre Standorte mit Tendenz zum Markt oder zu den Rohstofffundorten tonnenkilometrische Minimalpunkte sein (PLATA, 2008).

Neben den Transportkosten sind nach WEBERS Theorie auch Arbeitskosten und Agglomerationswirkungen Standortfaktoren, die unter bestimmten Bedingungen den transportkostenminimalen Standort beeinflussen können. So vermögen Arbeitskosten die Vorteile eines optimalen Transportkostenpunktes aufzuheben, wenn sich das Lohnniveau innerhalb einer Region stark unterscheidet und niedrige Lohnkosten weitere Transportentfernungen ermöglichen. Wird ein Unternehmen durch andere, in seiner Umgebung liegende Unternehmen beeinflusst, dann wirken Agglomerationsfaktoren als Standortfaktoren. Agglomerationsfaktoren können sowohl zur Konzentration als auch zur Streuung von Produktionsstandorten führen. Agglomerationsvorteile sieht WEBER (1922) in Kosteneinsparungen aufgrund von gemeinsamen Transporten. Agglomerationsnachteile ergeben sich z.B. durch die Konkurrenz um Rohstoffe oder Verbraucher.

Die Theorie WEBERS hat im Zeitalter der Globalisierung an Bedeutung verloren, da Transportkosten aufgrund des deutlichen Kostenrückgangs pro transportierter Einheit eine wesentlich geringere Bedeutung als noch im frühen 20. Jahrhundert haben. Bezüglich der Evaluation und Bestimmung optimaler Biogasanlagenstandorte sind die Ergebnisse Webers jedoch aufgrund der geringen Transportwürdigkeit der eingesetzten Substrate relevant, wie der folgende Abschnitt belegt.

2.4 Standortbestimmung von Biogasanlagen

Die klassische Theorie der industriellen Standortbestimmung nach WEBER ist auf die Standortsuche für Biogasanlagen übertragbar. Die Kritik an der traditionellen Standorttheorie WEBERS, die auf vereinfachenden Annahmen bzgl. der Gewinnmaximierung, des Unternehmenskonzepts und der ausschließlich kostenorientierten Betrachtungsweise basiert, trifft für den Spezialfall der Standortbestimmung von Biogasanlagen nur teilweise zu. Insbesondere die Transportkostenbetonung ist für die Bestimmung optimaler Biogasanlagenstandorte zulässig, da zunehmende Feld-Anlage-Entfernungen einen überproportionalen Anstieg der Transport- und somit der Gesamtsubstratkosten bewirken (TOEWS, 2007). Bereits Ende des 19. Jahrhunderts hat H. SETTEGAST (1885) die maximale Transportentfernung von Stallmist und Grünfutter auf ca. sechs bis acht Kilometer und somit als transportunwürdigste landwirtschaftliche Produkte identifiziert.

Auch das von WEBER aufgestellte und oft kritisierte Konzept der Standortentscheidungen eines Ein-Betriebsunternehmens ist für Biogasanlagen zulässig, wenn zwischen den einzelnen Anlagen keine direkte Konkurrenz um Flächen entsteht, d.h. wenn eine sinnvolle Standortverteilung gewährleistet ist.

Der traditionellen Standorttheorie folgend liegt der optimale Standort einer Produktionsstätte, die aus Gülle und nachwachsenden Rohstoffen Strom und Wärme bzw. Bioerdgas produziert, zwischen dem Konsumort und den Rohstofffundorten mit einer Tendenz in Richtung der Rohstoffe. Die Rohstofforientierung der Anlagenstandorte wird auch dadurch deutlich, dass nachwachsende Rohstoffe im Vergleich zu fossilen Energieträgern relativ geringe Energiegehalte in Bezug auf ihr Gewicht haben und somit transportunwürdige Güter sind. Daher ist eine Nutzung der Biomasse in der Nähe der Anbauflächen der Energiepflanzen notwendig. Jedoch gilt bei der Anwendung der Theorie WEBERS auf den Fall von Biogasanlagen folgende Besonderheit. Der Konsumort der Substrate ist nicht der Ort an dem die Endprodukte Strom, Wärme oder Biomethan tatsächlich verbraucht werden, deren Konsum via Hochspannungsleitungen, Fernwärme- oder Erdgasnetzen in großer Entfernung zum Produktionsstandort erfolgen kann. Vielmehr sind in diesem vorgelagerten Energieproduktionsschritt die Einspeisepunkte in die entsprechenden Netze als Konsumorte zu betrachten. Daher liegt für Energiekonversionsanlagen neben einer Transportkosten- bzw. Rohstofforientierung zusätzlich eine Verkehrslageorientierung vor. Diese Besonderheit gilt es bei den weiteren konzeptionellen Überlegungen zu berücksichtigen. Grundsätzlich ist das Schema des Varignon'schen Apparts auf die Bestimmung des Standorts einer Biogasanlage übertragbar. Zur Lokalisierung des tonnenkilometrischen Minimalpunkts müssen jedoch zwingend folgende Informationen vorliegen.

Erstens sind Informationen über das Substratvorkommen von Interesse. Neben Gülle ist insbesondere die Verfügbarkeit von Energiepflanzen relevant. Die unter Berücksichtigung der ökonomischen Vorzüglichkeit von Landnutzungsalternativen verorteten und quantifizierten Informationen müssen daher aus den Ergebnissen der Landnutzungsmodellierung hervorgehen. Neben der Lage der Anbauflächen sind auch die Erntemengen zu ermitteln.

Zweitens muss neben der Lage auch die Gewichtung der Rohstoffe für den Gesamtproduktionsprozess bekannt sein. Ebenso sind Informationen über die Verkehrsnetze sowie die Verortung und Quantifizierung der Konsummöglichkeiten notwendig. Momentan ist auch ohne detaillierte Definition der einzelnen Parameter offensichtlich, dass der tonnenkilometrische Minimalpunkt von konventionellen Biogasanlagen ein intermediärer Standort ist, der zwischen Materialfundorten und Elektrizitäts- und Wärmeleitungen bzw.

Wärmeabnehmern liegt. Für biomethanproduzierende Anlagen ist neben der Nähe zu den Materialfundorten auch die Nähe zu geeigneten Erdgasleitungen relevant.

Der von WEBER (1922) ebenfalls identifizierte Standortfaktor Arbeitskostendifferenzen ist für den Fall von Biogasanlagen von vernachlässigbarer Relevanz. Da der Betrieb von Biogasanlagen stark mechanisiert ist, entsteht ein Arbeitsaufwand nur bei Beschickungs-, Wartungs- und Kontrollvorgängen. Für eine Anlage mit 300 kW Leistung liegt der Arbeitsaufwand bei drei Arbeitsstunden pro Tag. Der Anteil der Arbeitskosten an den Gesamtkosten beträgt in diesem Beispiel rund 4,5 % (KEYMER & REINHOLD, 2006, S. 208). Selbst im Falle von stark differierenden regionalen Arbeitserledigungskosten spricht die geringe Bedeutung dieses Kostenpunkts gegen eine arbeitskostenorientierte Standortverlagerung und somit gegen eine Berücksichtigung als Standortfaktor.

Die Einbeziehung von Agglomerationswirkungen als Standortfaktor nach WEBER (1922) ist für die Standortwahl von Biogasanlagen bedeutsam. Durch eine Konzentration entstehen aufgrund von Rohstoffkonkurrenz Agglomerationsnachteile. Diese localization diseconomies äußern sich in der Produktionsflächenknappheit und münden letztlich in einen Bieterkampf um die Substrate, da ein Bezug außerhalb der Einzugsgebiete wegen der Transportunwürdigkeit der Rohstoffe und aus energetischen Gründen nicht sinnvoll ist. Die Konkurrenz um Anbauflächen kann insofern berücksichtigt werden, als dass lediglich die vorzüglichen Anbauflächen zur Bestimmung der Substratmengen dienen und Flächen, auf denen bereits der Anbau von Energiepflanzen stattfindet, nicht zur Modellierung freistehen.

Sowohl für die Landnutzungsprognosen als auch die Bestimmung der optimalen Anlagenstandorte gilt, dass die beteiligten Akteure über unvollkommene Informationen verfügen und somit ein begrenztes Wissen haben. Daher gilt es zunächst zahlreiche Informationsebenen, repräsentiert durch Daten aus unterschiedlichen Quellen, zu bündeln und mittels geeigneter methodischer Werkzeuge neue Informationen aus der Kombination aller Datenebenen zu generieren. Die detaillierte Beschreibung der Datenquellen, der verwendeten Hilfsmittel und Methoden zur Bestimmung der ökonomischen Kennzahlen, der vorzüglichen Fruchtfolgen, der Standortfaktoren und ihrer Gewichtungen sowie zahlreicher weiterer Parameter wie z.B. der Transportentfernungen erfolgt im nächsten Abschnitt, dem methodischen Teil dieser Arbeit.

3 Forschungsmethoden

Landnutzungsmodellierungen und -prognosen sind seit über 40 Jahren Gegenstand der modernen Standortforschung (WEINSCHENK & HENRICHSMEYER, 1966). Diese langjährige Forschungserfahrung zeigt, dass sich die von zahlreichen variablen Rahmenbedingungen abhängige Landnutzung aufgrund vielfältiger ökonomischer Wirkungszusammenhänge nicht ohne detaillierte Modellierung abbilden lässt (ODENING & BALMANN, 1997). Komplexe Optimierungsmodelle sind in der Lage, zahlreiche Standortfaktoren für die Ermittlung von räumlichen Gleichgewichten der landwirtschaftlichen Produktion zu berücksichtigen. Außer erwerbswirtschaftlichen Zielen sind auch umweltpolitische Ziele Gegenstand der modernen Standortforschung (KUHLMANN et al., 2002). Modelle, die ressourcenökonomische und umweltpolitische Aspekte behandeln und einen direkten Raumbezug haben, werden im Gegensatz zu Agrarsektormodellen, die agrarmarktpolitische Fragestellungen analysieren, Landnutzungsmodelle genannt. Ein solches Landnutzungsmodell ist das Modell „Prognosis of Landuse“ (ProLand). ProLand dient zur Berechnung von ökonomischen Kennzahlen landwirtschaftlicher Produktionsaktivitäten und prognostiziert auf Grundlage dieser Parameter räumlich explizit die zukünftige Landnutzung.

Um dezentral gelegene und nachhaltige Standorte der Produktion regenerativer Energie zu identifizieren, ist der Einsatz von Werkzeugen notwendig, die in der Lage sind Energiepotenziale zu ermitteln sowie konkurrierende Flächenansprüche aufzuzeigen und zu lösen (BOSCH, 2011). Zur Lokalisierung von optimalen Standorten ist der Einsatz leistungsfähiger Informationssysteme nötig, welche die Erfassung, Verwaltung und Analyse großer Mengen räumlicher Daten ermöglichen und dabei transparent, möglichst objektiv und flexibel sind (LANG & LANGANKE, 2006). LADSTÄTTER (2011, S.13) betont: „Die Standortsuche ist eine herausfordernde Aufgabe und eine Königsdisziplin geographischer Informationssysteme. Um den richtigen Standort zu finden, sind vielfältigste Faktoren und Szenarien zu berücksichtigen. Die Wahl des Standorts entscheidet oft über Erfolg oder Misserfolg“. Daher basiert das Modell „Prognosis of Optimal Sites“ (ProSite) auf einem geographischen Informationssystem. Es weist unter Berücksichtigung von ökonomischen, ökologischen und sozialen Faktoren optimale Standorte von Energiekonversionsanlagen aus. Alternativ kann es zur Bewertung von bestehenden Standorten eingesetzt werden.

ProSite ist für die Anforderungen des dritten Teilziels der vorliegenden Arbeit, der Bestimmung der optimalen Biogasanlagenstandorte ausgelegt. Das Modell nutzt u.a. die Ergebnisse der Landnutzungsprognosen von ProLand und damit einhergehende Größen wie z.B. Erntemengen. Die Kopplung beider Modelle eröffnet weitere Analysemöglichkeiten,

beispielsweise die Bestimmung von Substrateinzugsgebieten, die Kalkulation von Transportkosten und daraus resultierend die Selektion der vorzüglichsten Anbaustandorte für Energiepflanzen.

Dieses Kapitel beschreibt außer den methodischen Grundlagen auch die Modifikationen beider Modelle sowie die Interaktion der Modellergebnisse. In diesem Kontext wird zusätzlich auf die Untersuchungsregion und die verwendeten Daten eingegangen. Da ein Großteil der eingesetzten Daten einen räumlichen Bezug hat, erfolgt die Vorbereitung zur Landnutzungsmodellierung, die Bestimmung der optimalen Anlagenstandorte sowie die Visualisierung der Ergebnisse unter Zuhilfenahme von geographischen Informationssystemen (GIS). Ein GIS ist ein „rechnergestütztes System, das aus Hardware, Software, Daten und den Anwendungen besteht. Mit ihm können raumbezogene Daten digital erfasst, gespeichert, verwaltet, aktualisiert, analysiert und modelliert sowie alphanummerisch und graphisch präsentiert werden“ (DE LANGE, 2002, S. 310).

Der Modellierungsprozess von ProLand basiert hauptsächlich auf arithmetischen Operationen in einer relationalen Datenbank. Der folgende Abschnitt beschreibt die grundlegenden Komponenten von ProLand, die ebenfalls im Rahmen der später beschriebenen Modellmodifikationen von Bedeutung sind. Die vollständige Konzeption des Landnutzungsmodells ProLand erläutert SHERIDAN (2010) ausführlich.

3.1 Das Modell ProLand

Das im Sonderforschungsbereich 299 „Landnutzungskonzepte für periphere Regionen“ von WEINMANN (2002) konzipierte, von SCHROERS (2006) und zuletzt von SHERIDAN (2010) zur Version 2.0 weiterentwickelte Landnutzungsmodell „Prognosis of Landuse“ (ProLand) bildet die methodische Grundlage der vorliegenden Arbeit. ProLand ist ein deterministisches, komparativ-statisches und räumlich explizites Modell, das die Simulation der räumlichen Verteilung von Landnutzungssystemen ermöglicht. Verfolgt wird ein abstrahierend-modellierender Simulationsansatz. Die Vorgehensweise des Modells ProLand stellt sich vereinfacht wie folgt dar. Zunächst berechnet das Modell die Bodenrenten aller zur Wahl stehenden Landnutzungssysteme auf allen Standorten des Untersuchungsgebiets. Dieser Schritt ist insofern notwendig, als dass, wie in den Standorttheorien von THÜNEN und BRINKMANN beschrieben, der Landnutzungswechsel an den Schnittpunkten der Bodenrentengeraden erfolgt. Nach der Quantifizierung der Bodenrenten selektiert ProLand im zweiten Schritt die bodenrentenmaximale Anbaualternative. Das Modell generiert Kennzahlen der Produktionsverfahren wie z.B. Arbeitszeitbedarf, Maschinenkosten und Produktmengen bezogen auf eine räumliche Einheit wie z.B. den landwirtschaftlichen Schlag

(KUHLMANN et al., 2002; WEINMANN, 2002; WEINMANN & SCHROERS, 2006; SHERIDAN, 2010).

Wie in Abschnitt 2.1 thematisiert, stehen unterschiedliche Landnutzungsalternativen im Wettbewerb um begrenzte Produktionsfaktoren. Dieser Wettbewerb führt zu einer optimalen Verwertungsalternative der Faktoren Boden, Arbeit und Kapital, so dass für den Fall der agrarischen Landnutzung eine bodenrentenmaximale Landnutzungsverteilung eintritt. Die in Kapitel 2 genannten Theorien unterstellen risikoneutrales Entscheidungsverhalten und konzentrieren sich deshalb auf den Erwartungswert der Bodenrente bzw. der Lagerrente. Diese und weitere Grundannahmen gilt es zu fixieren, um mit einem Optimierungsmodell, welches zahlreiche Standortfaktoren zur Ermittlung von räumlichen Gleichgewichten der landwirtschaftlichen Produktion berücksichtigt, die bodenrentenmaximale Landnutzung bestimmen zu können.








Die grundsätzliche Annahme des Modells sieht den Bewirtschafter als rationalen Nutzenmaximierer und somit risikoneutralen Bodenrentenmaximierer. Die Landnutzer wählen diejenige Produktionsalternative, die unter den gegebenen politischen, technologischen und natürlichen Standortbedingungen den höchsten Bodenrentenerwartungswert hat. Ferner wird unterstellt, dass Produktionsfaktoren beliebig teilbar und zu gegebenen Preisen auch vollständig verfügbar sind. Es wird zudem angenommen, dass die Produkte vollständig absetzbar sind. Darüber hinaus sind die Opportunitätskosten der Produktionsfaktoren sowie die ab Hof Preise in der gesamten Untersuchungsregion konstant. Folglich werden die Preise nicht durch Transportkosten räumlich differenziert. Da die Landnutzungsmodellierung unter sozio-ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen stattfindet, welche in der Realität bestimmte Landnutzungen vorschreiben, gilt z.B. das Verbot der Waldrodung und des Grünlandumbruchs (SHERIDAN, 2010).

Das Modell ProLand besteht aus drei Modulen, die in zwei Microsoft Access-Datenbanken verwaltet werden. Neben einer Standortdatenbank ist eine weitere Datenbank mit Landnutzungssystemen und einem Codemodul Bestandteil des Modells. Die Standortdatenbank enthält außer Boden-, Klima- und Reliefdaten auch Geodaten der landwirtschaftlichen Flächen (siehe auch Kapitel 3.6 und 3.7). Diese Datenbasis hat direkten Einfluss sowohl auf die Ertragspotentiale als auch auf die Kosten und Leistungen der Produktionsverfahren (NUSSER et al., 2007).

Die zweite Datenbank enthält sämtliche Kennzahlen der Landnutzungssysteme, die durch Kulturpflanzen, Fruchtfolgen, Veredelungs- und Außenwirtschaftsverfahren anhand

biologisch technischer Parameter definiert sind. Die Produktionsverfahren sowie ihre Mengengerüste basieren auf Leistungs-Kostenrechnungen des KURATORIUMS FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (KTBL, 2008). Auch die Produkt- und Faktorpreise sind hier abgelegt. Darüber hinaus enthält die Datenbank ein Codemodule, welches die bodenrentenmaximale aller Landnutzungsalternativen berechnet. Zur Ermittlung der Bodenrenten muss u.a. die Höhe der realisierbaren Naturalerträge der Kulturpflanzen bekannt sein. Die Ertragswerte werden anhand von linear-limitationalen Funktionen ermittelt und sind sowohl durch das genetische Potential als auch durch die vom Landnutzer nicht kontrollierbaren und im Minimum befindlichen Mengen an verfügbarer Solarenergie oder Wasser limitiert. Anhand von Anbauanteilen oder benutzerdefinierten Fruchtfolgen berechnet das Modell Leistungen und Kosten für jede Kulturpflanze und kombiniert zulässige Kulturpflanzen mit den Produktionsverfahren, wobei als Resultat die bodenrentenmaximale Landnutzung ausgegeben wird. Zudem berücksichtigt das Modell technologische und agrarpolitische Rahmenbedingungen, wie z.B. entkoppelte Transferzahlungen. Die Kombination beider Datenbanken ermöglicht unter Zuhilfenahme von GIS die räumlich explizite Simulation, Prognose und Visualisierung von Endzuständen der Landnutzungsintensitäten und -systeme (NUSSER et al., 2007). Zur Verdeutlichung der Bestandteile sowie der Funktionsweise des Modells dient Abbildung 3.1. Die dabei verwendete Symbolik ist in Tabelle 3.1 beschrieben.

Tabelle 3.1: Bedeutung der Diagrammsymbolik

Symbol	Bedeutung
	Prozess, Durchführung von Berechnungen oder Verarbeitung von Daten
	Manuelle Eingabe oder Auswahl; Schnittstelle zum Benutzer
	Auf Datenträger gespeicherte Daten mit direktem Zugriff
	Vordefinierter Prozess
	Interne Datenspeicherung
	Auswahlmöglichkeit
	Verbindungsline, die Verknüpfung zwischen den Symbolen und dabei übergebene Informationen anzeigt

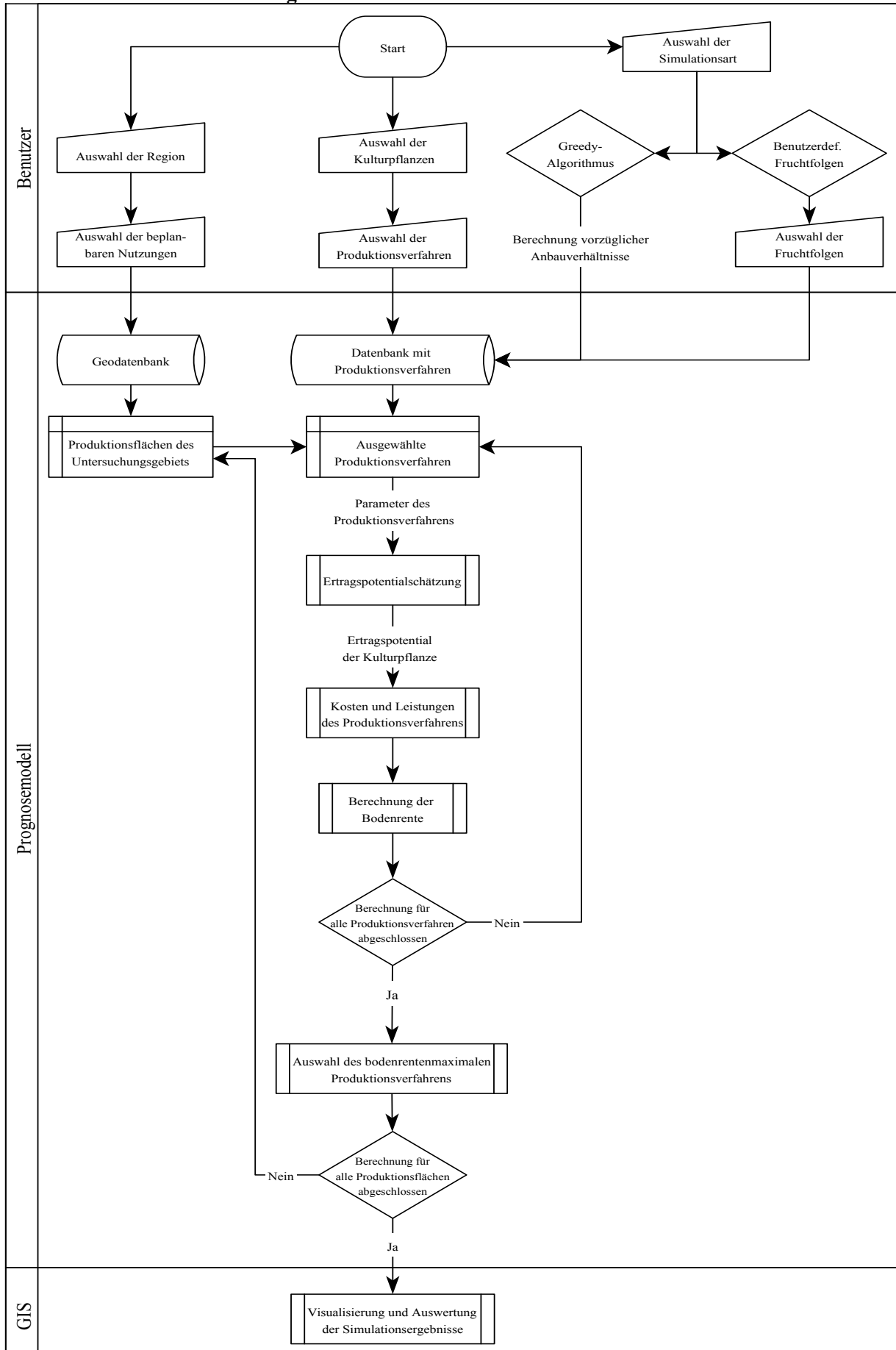
Quelle: eigene Darstellung nach DIN 66001.

Das Modell ist in drei Bereiche aufgeteilt. Den Modellberechnungen ist zunächst der Nutzer vorgeschaltet, der neben der Auswahl der Untersuchungsregion auch bestimmt, welche momentan vorhandenen Landnutzungen zur Modellierung freistehen. Diese Auswahlmöglichkeit ist insofern von Vorteil, als dass vorhandene Nutzungen als „nicht

überplanbar“ definiert werden können und somit die von ihnen besetzten Produktionsflächen zur Modellierung nicht zur Verfügung stehen. Darüber hinaus obliegt es dem Benutzer die zu modellierenden Kulturpflanzen und damit zusammenhängend die Produktionsverfahren in denen diese Pflanzen zur Geltung kommen, zu bestimmen. Zudem kann der Nutzer die Art der Simulation wählen. So steht neben einem Greedy-Algorithmus, der die vorzüglichen Anbauverhältnisse berechnet auch eine benutzerdefinierte Fruchtfolgengenerierung zur Auswahl (vgl. Abschnitt 3.2.2.).

Die durch den Nutzer getroffenen Kriterien greifen mittels räumlicher und attributiver Abfragen auf die Kernelemente des Modells, die Geodatenbank sowie die Datenbank mit den Produktionsverfahren zu. Das Modell berechnet zunächst für alle ausgewählten Standorte und Pflanzen unter Berücksichtigung der Produktionsverfahren die Naturalerträge der Kulturen. Dieses Zwischenergebnis dient zur Berechnung der Bodenrente aus der Differenz zwischen Leistungen und Kosten der Produktionsverfahren. Diese Schritte wiederholt das Modell, bis die Bodenrente für alle in den Produktionsverfahren enthaltenen Kulturpflanzen auf allen Standorten bekannt ist. Anschließend selektiert ProLand die bodenrentenmaximale Landnutzung auf allen modellierten Standorten. Das Simulationsergebnis besteht aus zahlreichen Tabellen mit ökonomischen Kennzahlen der Produktionsverfahren für jeden Schlag (siehe z.B. Tabelle 3.4, S. 37). Die Ergebnisse gilt es abschließend auszuwerten und mit GIS in Form von Karten zu visualisieren.

Abbildung 3.1: Funktionsweise des Modells ProLand



Quelle: Eigene Darstellung, verändert nach WEINMANN (2002, S. 65).

Die folgenden Abschnitte erläutern die grundlegenden Bestandteile des Modells, die sowohl für das Verständnis der Modellierungsvorgänge als auch für die später beschriebenen Anpassungen des Modells von Bedeutung sind (siehe Kapitel 3.2).

3.1.1 Ertragspotentialschätzung

Ein Hauptcharakteristikum des Modells ProLand ist die Berechnung standortspezifischer Biomasseerträge, wobei für die vorliegenden Landnutzungsprognosen die real existierenden landwirtschaftlichen Schläge der Untersuchungsregion als Bezugsstandorte gelten. Aufgrund des statisch-komparativen Modellierungsansatzes ermittelt das Modell sich langfristig einstellende Erwartungswerte der Biomasseerträge der untersuchten Kulturpflanzen.

Zur Ertragspotentialermittlung werden in der aktuellen Version des Modells ProLand unter Zuhilfenahme von durchschnittlichen Nutzpflanzenertragsdaten der Versuchsreihen des Bundessortenamtes pflanzenspezifische Wachstumskoeffizienten abgeleitet (BSA, 2007).

Von zentraler Bedeutung ist die linear-limitationale Ertragsfunktion (KUHLMANN, 2010 b) welche anhand von Formel 2 verdeutlicht ist.

Formel 2: Linear-limitationale Ertragsfunktion im Modell ProLand

$$E = \min \left\{ c_{nFk} \times \min \left\{ \sum_{i=1}^{12} a_i \times N_i ; nFk \right\} + c_{NS} \times \sum_{i=1}^{12} b_i \times N_i ; c_T \times \sum_{i=1}^{12} c_i \times T_i \right\}$$

mit

E = Ertragserwartungswert

c_{nFk} = Ertragskoeffizient nutzbare Feldkapazität in dt/mm

a_i = Gewichtungvariable der i Monate in der Berechnung des Füllstands der nFk

N_i = Niederschlagssumme des Monats i

nFk = nutzbare Feldkapazität in mm bis 100 cm Tiefe

c_{NS} = Ertragskoeffizient der Niederschlagssumme in dt/mm

b_i = Gewichtungvariable der i Monate in der Berechnung der Niederschlagssumme

c_T = Ertragskoeffizient der Temperatursumme in dt/°C

c_i = Gewichtungvariable der i Monate in der Berechnung der Temperatursumme

T_i = Temperatursumme des Monats i

Als Variablen stehen die Ertragskoeffizienten c_{nFk} , c_{NS} und c_T zur Schätzung frei. Alle anderen Werte (N_i , nFk , T_i) sind entweder in der Standortdatenbank, in den Ertragsdaten aus den Versuchsreihen des Bundessortenamts (E) oder durch pflanzenbauliche Restriktionen (a_i , b_i , c_i) vorgegeben.

Die Schätzung der Koeffizienten erfolgt mittels der Software „Premium Solver Platform“, verwendet wird der Algorithmus „Standard Interval Global“. Dieser Algorithmus identifiziert das globale Optimum unter Berücksichtigung aller Kombinationsmöglichkeiten der drei Koeffizienten. Dabei ist das Ziel der Schätzung die Minimierung der Abweichung des Schätzertrags zum Realertrag. Die Zielfunktion ist in Gleichung 3 definiert.

Formel 3: Zielfunktion der quadratischen Programmierung

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n (\hat{E}_i - E_i)^2 \right\}$$

mit

\hat{E}_i = geschätzter Ertragserwartungswert der Kulturpflanze auf Standort i in Masseeinheit je Flächeneinheit

E_i = realer Ertragserwartungswert der Kulturpflanze auf Standort i in Masseeinheit je Flächeneinheit

n = Anzahl Standorte

Zur Beurteilung der Schätzgüte eignet sich die Summe der quadrierten Abweichungen von Ist-Ertrag und geschätztem Ertrag (siehe Tabelle 3.2, S.33).

3.1.2 Berücksichtigung von Nachfragerestriktionen

Eine grundlegende Annahme des Modells ProLand lautet, dass Produkte zu gegebenen Preisen in beliebiger Menge absetzbar sind. Diese Annahme ist für Produkte ohne Quotenregelungen grundsätzlich zulässig. Jedoch bestimmt die Größe des Markts bzw. die Preiselastizität ab welchen Produktionsmengen die Annahme unzulässig wird (SHERIDAN, 2010). Dies bedeutet, dass der Nutzer sowohl bei der Modellierung von quotierten als auch von nicht quotierten Produkten überprüfen muss, ob bestimmte Landnutzungsprogramme in ProLand zur Auswahl stehen dürfen und ob ihre Anbauumfänge beliebig ausdehnbar sind. Sind bestimmte Produkte aufgrund politischer oder marktwirtschaftlicher Rahmenbedingungen nachfragebeschränkt, so ist die Lage der Produktionsflächen sowie die Anbauumfänge zu ermitteln und im Modell quantitativ sowie räumlich zu fixieren. Die Produktionsflächen der von den Nachfragerestriktionen betroffenen Kulturen stehen in diesem Fall nicht für die Modellierung frei. Prinzipiell kann ProLand Produkte mit Nachfragerestriktionen zwar berücksichtigen, jedoch kann das Modell für die betroffenen Produktionssysteme keine differenzierten Landnutzungsprognosen ausweisen, da keine Algorithmen implementiert sind, die eine beschränkte Absetzbarkeit oder Preiselastizitäten automatisiert berechnen. Problematisch ist hierbei, dass die Verarbeitungsindustrie einen hohen Einfluss auf die Faktorallokationsentscheidung in der Landwirtschaft hat. So werden z.B. Zuckerrüben nur in einer gewisser Entfernung von verarbeitenden Einrichtungen wie

Zuckerfabriken angebaut. Sind an marktfernen Standorten jedoch die natürlichen Anbaubedingungen für Zuckerrüben vorteilhafter als an marktnahen Flächen, weist ProLand an diesen Standorten "Zuckerrübe" als vorzügliche Landnutzung aus und zwar unabhängig von der Lage zur Verarbeitungsstätte (SHERIDAN, 2010). In Realität würde allerdings aufgrund der fehlenden Abnahmemöglichkeit die Landnutzungsoption „Zuckerrübe“ auf diesen Standorten nicht zur Auswahl stehen. Die Standorte und Abnahmemengen der weiterverarbeitenden Industrien bzw. der Veredelungsbetriebe sind jedoch unbekannt. Diese Problematik betrifft außer Zuckerrüben, auch Sonderkulturen, Braugerste, Hafer sowie den ökologischen Landbau. Zur Umgehung dieses Problems definiert der Nutzer ein Basisszenario, welches die aktuelle Landnutzungsverteilung abbildet und nicht modellierbare Kulturen festsetzt. Dieses Szenario dient als Referenz für weitere Modellierungen, da ProLand auch für vorgegebene Landnutzungen sämtliche Kennzahlen berechnet. Im weiteren Modellierungsverlauf hat der Anwender mehrere Möglichkeiten anhand von Standorteigenschaften Szenarien zu definieren und somit festzulegen, welche Standorte und Landnutzungssysteme zur Modellierung freistehen.

Grundsätzlich ist die Menge der im Modell zur Verfügung stehenden Nutzungsalternativen für die prognostische Vorhersage der Landnutzung kleiner als für die Berechnung von Bodenrentendifferenzen oder Opportunitätskosten, die eine Berücksichtigung von Kulturpflanzen mit Nachfragerrestriktionen explizit ermöglichen (ebd.).

3.1.3 Berechnung von Bodenrenten

Aufbauend auf den Ergebnissen der Ertragspotentialschätzung und der Datenbank mit Kosten und Leistungen der Produktionsverfahren ist die Berechnung der Bodenrente ein weiterer grundlegender Bestandteil des Modells ProLand. Nach KUHLMANN (2007) ist die Bodenrente als arbeits- und kapitalkostenfreie Leistung definiert und besteht, vereinfacht betrachtet, aus der Differenz von Leistungen und Kosten.

Formel 3.1: Definitionsgleichung der Bodenrente

$$\text{Bodenrente} = \text{Naturalertrag} \times \text{Preis} + \text{Transferleistungen} - \text{Faktorkosten}_{(\text{Arbeit, Kapital})}$$

Die Bodenrente bildet somit das Faktoreinkommen des Bodens ab. Die Definition der Bodenrente berücksichtigt Fixkosten, wie z.B. Gemeinkosten nicht, da sie keinem Produktionsverfahren direkt zugeordnet sind. Folglich ist die im Modell ProLand verwendete Bodenrente eine Brutto-Bodenrente. In der vorliegenden Arbeit wird Brutto-Bodenrente begrifflich mit Bodenrente gleichgesetzt. Im Rahmen der folgenden Landnutzungs-

modellierungen gilt es die absoluten Höhen der Bodenrenten möglichst genau zu bestimmen und dabei insbesondere auf die korrekten Relationen der Bodenrenten untereinander zu achten. Im Modell ProLand erfolgt die Bodenrentenberechnung nach Formel 3.2.

Formel 3.2: Bodenrentengleichung im Modell ProLand

$$B_i = (E_i \times p_i) + T_i - (E_i \times K_{E_i}) - K_{F_i} - K_{B_i} - K_{H_i}$$

mit

B_i = Bodenrente des Landnutzungssystems i in Geldeinheit je Flächeneinheit

E_i = Naturalertrag des Landnutzungssystems i in Masseinheit je Flächeneinheit

p_i = Produktpreis des Landnutzungssystems i in Geldeinheit je Masseinheit

T_i = Transferzahlung des Landnutzungssystems i in Geldeinheit je Flächeneinheit

K_{E_i} = Ertragsabhängige Produktionskosten des Landnutzungssystems i in Geldeinheit je Masseinheit

K_{F_i} = Flächenabhängige Produktionskosten des Landnutzungssystems i in Geldeinheit je Flächeneinheit

K_{B_i} = Bodenartenabhängige Produktionskosten des Landnutzungssystems i in Geldeinheit je Flächeneinheit

K_{H_i} = Hangneigungsabhängige Produktionskosten des Landnutzungssystems i in Geldeinheit je Grad Hangneigung

Das Modell unterscheidet die Entlohnung der drei Produktionsfaktoren Arbeit, Kapital und Boden. Das Einkommen des Landnutzers pro Flächeneinheit besteht zum Teil aus Einkommen aus dem Produktionsfaktor Boden. Entlohnt wird dieser Faktor aus der Differenz zwischen Bodenrente und Pachtzahlung. Die Bodenrente ist also der Betrag, den ein Landnutzungssystem für den Faktor Boden maximal aufbringen kann. Weist ein Landnutzungsprogramm eine negative Bodenrente auf, so ist die Realisierung dieser Nutzung unter ökonomischen Aspekten nicht sinnvoll. Anders ausgedrückt handelt es sich bei der Bodenrente um die höchstmögliche Pacht, die ein Produktionssystem aufwenden kann. Ist der Landnutzer gleichzeitig auch Eigentümer der Produktionsfläche, so erhöht sich das Einkommen um die Bodenrente (SHERIDAN, 2010).

Das Einkommen des Landnutzers pro Flächeneinheit stammt zudem aus der Entlohnung des Produktionsfaktors Arbeit. Es wird über Opportunitätskosten, d.h. dem entgangenen Nutzen in Form von Lohn je Arbeitskraftstunde (AKh) eines alternativen Landnutzungsverfahrens ermittelt. Auch die Entlohnung des Produktionsfaktors Kapital wird über den Opportunitätskostenansatz bestimmt.

Je nach Landnutzung variieren die benötigten Mengen der drei genannten Produktionsfaktoren. Zahlreiche Rahmenbedingungen, wie die natürlichen Klima-Boden-Verhältnisse, das Relief sowie die Naturalerträge üben Einfluss auf die Arbeits-, Kapital- und Flächenintensität. So senken z.B. leichte Bodenverhältnisse, geringe Hangneigungen und geringe Ertragsmengen den Arbeitskraftaufwand. Auch zunehmende Schlaggrößen, abnehmende Hof-Feld-Entfernungen und die fortschreitende Mechanisierung wirken in unterschiedlicher Weise auf die Produktionsfaktoren. Das Modell ProLand berücksichtigt beispielsweise ertragsabhängige Parameter, wie Pflanzenschutz-, Düngemittel- und Maschinenkosten. Transferzahlungen, Ertragsfunktionen und Nutzungsrestriktionen sind als standortabhängige Variablen implementiert (SHERIDAN, 2010).

3.2 Modifikationen des Modells ProLand

Die inhaltliche und technische Weiterentwicklung von ProLand ist sowohl vor dem Hintergrund der im Transferbereich neu aufgetretenen Fragestellungen sowie aufgrund der Zugehörigkeit zum Modellverbund „Integrated Tools for Economic and Ecological Modelling“ (ITE²M) und der damit verbundenen Anforderungen erforderlich. Die folgenden Abschnitte beschreiben grundlegende Modifikationen des Modells ProLand, die neben zahlreichen kleineren Anpassungen der Modellstruktur und der Kalkulationsverfahren von Bedeutung für die durchgeführten Landnutzungsprognosen sind. Die hier näher vorgestellten Modifikationen betreffen die Schätzung von Ertragspotentialen, die Zusammenstellung von benutzerdefinierten Fruchtfolgen, die Methodik zur Kalkulation räumlich differenzierter Preise sowie den in Abschnitt 3.7.1 beschriebenen Aufbau der Standortdatenbank sowie die Aktualisierung der Verfahrensdatenbank.

3.2.1 Anpassung der Ertragspotentialsschätzung

Die Methodik zur Ermittlung der Biomasseertragsfunktionen hat sich im Vergleich zu ProLand V. 2.0 nicht geändert (siehe Abschnitt 3.1.1.) Die innerhalb des Modells zuletzt verwendete Ertragspotentialsschätzung wurde jedoch auf die standortspezifischen Gegebenheiten des Einzugsgebiets des mittelhessischen Gewässers Nidda angepasst. Eine Übernahme der regionalspezifischen Wirkungskoeffizienten führt bei Anwendung auf die Untersuchungsregion Südhessen aufgrund naturräumlicher und klimatischer Unterschiede beider Gebiete zu nicht plausiblen Ertragshöhen und Ertragsrelationen sowie räumlicher Verteilung. SHERIDAN (2010, S. 23) betont: „Die Wirkungskoeffizienten bilden [...] die ertragsrelevanten, naturräumlichen Verhältnisse und deren Ertragswirkungen eines Raumes ab und sind nicht ohne weiteres auf Räume übertragbar, in denen abweichende Verteilungen und Intensitäten der Faktorinteraktionen wirken.“ Die Wachstumskoeffizienten der zu

untersuchenden Kulturpflanzen Kartoffel, Körnermais, Silomais, Sommergerste, Wintergerste, Winterraps, Winterroggen, Winterweizen und Zuckerrübe bedürfen daher einer Neukalibrierung. Erst nach der Anpassung bildet das Modell die regional spezifischen Ertragshöhen dieser Kulturen korrekt ab. Zur Anpassung der Ertragspotentialschätzung werden unter Zuhilfenahme von durchschnittlichen Nutzpflanzenertragsdaten der Versuchsreihen des Bundessortenamtes pflanzenspezifische Wachstumskoeffizienten abgeleitet (BSA, 2007). Stehen die Koeffizienten fest, so erfolgt ein Übertrag in die Kulturpflanzentabelle des Modells ProLand, womit die Kalibrierung der Ertragspotentialschätzung auf die Gegebenheiten der Untersuchungsregion abgeschlossen ist. Das Ergebnis der Neukalibrierung der Ertragspotentialschätzung ist in Tabelle 3.2 dargestellt.

Tabelle 3.2: Neukalibrierung der Ertragspotentialschätzung

Pflanze	$cnFk$	cNs	cT	n	r	r_{Korr}	Δ	Δ_{Korr}
Körnermais	0,1403	0,2625	0,0405	21	0,6905	0,7806	9,9%	5,1%
Silomais	0,6262	1,5433	0,2587	29	0,6759	0,8321	5,3%	4,2%
Sommergerste	0	0,2421	0,0388	39	0,4581	0,6564	9,1%	5,9%
Wintergerste	0,5156	0,0559	0,0451	34	0,3472	0,4841	11,2%	6,5%
Winterraps	0,0704	0,0745	0,0406	15	0,8564	0,9174	5,7%	4,6%
Winterroggen	0,2083	0,2030	0,0461	32	0,2648	0,4471	7,8%	6,8%
Winterweizen	0,5156	0,0626	0,0515	32	0,4934	0,6774	10,7%	5,7%
Zuckerrübe	0,6610	1,62172	0,2786	12	0,7456	0,8894	8,9%	5,2%

Quelle: Eigene Darstellung, verändert nach SHERIDAN, 2010.

Für Körnermais, Silomais, Sommergerste, Winterraps, Winterweizen sowie für Zuckerrüben kann eine korrigierte Korrelation zwischen Schätzertrag und Realertrag von $r > 0,5$ bei einer durchschnittlichen korrigierten Abweichung von unter 6 % erreicht werden. Jedoch ist der Stichprobenumfang aufgrund der Datenlage für Winterraps und Zuckerrüben vergleichsweise klein. Für Wintergerste und Winterroggen können zwar korrigierte Abweichungen unter 7 % erzielt werden, allerdings ist die Korrelation mit $r < 0,5$ nicht zufriedenstellend. Das verwendete Ertragsmodell kann für sechs von acht Pflanzen Schätzungen mit einer Korrelation von $r > 0,5$ abgeben. Für zwei weitere kann eine Anpassung mit vergleichsweise geringer durchschnittlicher Abweichung erreicht werden. Die räumlich den einzelnen landwirtschaftlichen Schlägen zugewiesenen Ergebnisse wurden anhand von Ertragskarten und Expertenwissen zusätzlich validiert, so dass plausible räumliche Verteilungen der Erträge zu Stande kommen.

3.2.2 Benutzerdefinierte Fruchtfolgen

Ackerbauliche Landnutzung findet in der Regel mit ausgewählten Pflanzen in Form von Fruchtfolgen statt. Der Begriff Fruchtfolge beschreibt im Wesentlichen die Reihenfolge der angebauten Nutzpflanzenarten auf einer landwirtschaftlichen Fläche im Ablauf der Vegetationsperiode (vgl. BAEUMER, 1997; GEISLER, 1988; POMMER, 1998). Die Abbildung von Fruchtfolgen erfolgt im Modell ProLand aus den Anteilen und den zeitlichen Abfolgen der Ackerpflanzen je Flächeneinheit. Seit der von SHERIDAN (2010) entwickelten Modellversion stehen dem Anwender zwei verschiedene Arten der Generierung von Fruchtfolgen zur Verfügung. Erstens, können Kulturpflanzen ausgewählt werden, aus denen ein Greedy-Algorithmus modellendogen Anbauanteile zusammenstellt. Zweitens, kann der Benutzer Fruchtfolgen definieren.

Ziel des Greedy-Algorithmus ist es, aus lokal optimalen Entscheidungen das globale Optimum zu ermitteln (PAPADIMITRIOU & STEIGLITZ, 1982; CORMEN & MOLITOR, 2010). Stellt das Modell Anbauanteile mittels „Greedy-Algorithmus“ zusammen, so ist das Ergebnis der Modellierung das globale Optimum aus der lokalen Entscheidung und somit für jeden landwirtschaftlichen Schlag das bodenrentenmaximale Anbauverhältnis.

Unabhängig von der Art der Bestimmung der Fruchtfolgen ergibt sich in der Untersuchungsregion folgende Situation. Zuckerrübe und Kartoffel sind ökonomisch derart vorzüglich, dass ihre Anbauumfänge vom Modell bis auf ein Maximum ausgedehnt werden, falls der Anwender diese Marktfrüchte in die Auswahl der modellierbaren Pflanzen aufnimmt. Dies beruht auf der Grundannahme des Modells, dass landwirtschaftliche Produkte zu gegebenen Preisen vollständig absetzbar sind (siehe Abschnitt 3.1.2). Schließlich unterstellt ProLand beliebige Größen von Produkt- und Faktormärkten. Allerdings bestehen auf den Märkten politisch und marktwirtschaftlich induzierte Nachfragerestriktionen. So sind für die Zuckerrübenproduktion garantierte Abnahmepreise für bestimmte Produktionsmengen festgelegt. Auch die Absatzmöglichkeiten von Silomais, Kartoffeln und Braugerste sind limitiert. Daraus folgt, dass die genannten Kulturen nicht uneingeschränkt zur Modellierung freistehen. Es gilt daher eine Methode zu entwickeln, die eine Abbildung von Nachfragerestriktionen im Modell ProLand ermöglicht.

Zudem haben Modellierungsversuche gezeigt, dass sämtliche Kombinationen der Kulturpflanzen, die der Greedy-Algorithmus unter Berücksichtigung des globalen Optimums zu bodenrentenmaximalen Anbauverhältnissen zusammenstellt, letztendlich zu Fruchtfolgen mit einer Dauer von 20 Jahren führt. Da jedoch die dynamischen Modelle der ITE²M-Verbundgruppe keine Anbauverhältnisse berücksichtigen können, sondern kurze

Fruchtfolgen als Eingangsparameter erfordern, war eine benutzerdefinierte Vorgabe von Fruchtfolgen notwendig. Benutzerdefinierte Fruchtfolgen sind im Modell ProLand ebenfalls als Flächenanteile von Kulturpflanzen definiert, die sich nach einer vollständigen Rotation auf einer Fläche einstellen. SHERIDAN (2010, 51 f.) sieht in der benutzergesteuerten Auswahl der Fruchtfolgen allerdings das Problem, dass in diesem Fall ausgewählte Kulturpflanzen nur in bestimmten, vorgegebenen Kombinationen auftreten können und dass dadurch die bodenrentenmaximale Kombination unter Umständen in den vorgegebenen Möglichkeiten nicht enthalten sein könnte. Um diese Problematik zu umgehen, wurden unter Zuhilfenahme von Expertenwissen zunächst 29 pflanzenbaulich kompatible und phytosanitär verträgliche Fruchtfolgen definiert und zur Modellierung freigegeben. Diese benutzerdefinierten Fruchtfolgen sind in Tabelle 3.3. aufgeführt.

Tabelle 3.3: Benutzerdefinierte Fruchtfolgen

ID_FF	FFGlie	Pflanze	Anteil	ID_FF	FFGlie	Pflanze	Anteil	ID_FF	FFGlie	Pflanze	Anteil	ID_FF	FFGlie	Pflanze	Anteil
601	1	Ka	0,33	611	1	KM	0,33	619	1	KM	0,33	627	1	ZR	0,25
	2	WW	0,33		2	WW	0,33		2	KM	0,33		2	WW	0,25
	3	WG	0,33		3	SG	0,33		3	WW	0,33		3	SM	0,25
602	1	Ka	0,33	612	1	KM	0,33	620	1	KM	0,33	701	4	WW	0,25
	2	WW	0,33		2	WW	0,33		2	SM	0,33		1	SM	0,25
	3	SG	0,33		3	Ro	0,33		3	WW	0,33		2	SM	0,25
603	1	Ka	0,33	613	1	Ka	0,25	621	1	KM	0,25	702	3	SM	0,25
	2	WW	0,33		2	ZR	0,25		2	KM	0,25		4	WW	0,25
	3	Ro	0,33		3	WW	0,25		3	KM	0,25		1	SM	0,33
604	1	Ra	0,33	614	4	WG	0,25	622	4	WW	0,25		2	SM	0,33
	2	WW	0,33		1	Ka	0,25		1	KM	0,25		3	WW	0,33
	3	WG	0,33		2	ZR	0,25		2	KM	0,25				
605	1	Ra	0,33	615	3	WW	0,25	623	3	SM	0,25				
	2	WW	0,33		4	SG	0,25		4	WW	0,25				
	3	SG	0,33		1	Ka	0,25		1	KM	0,25				
606	1	Ra	0,33	616	2	ZR	0,25	624	2	WW	0,25				
	2	WW	0,33		3	WW	0,25		3	KM	0,25				
	3	Ro	0,33		4	Ro	0,25		4	WW	0,25				
607	1	SM	0,33	617	1	Ka	0,25	625	1	SM	0,25				
	2	WW	0,33		2	WW	0,25		2	WW	0,25				
	3	WG	0,33		3	Ra	0,25		3	SM	0,25				
608	1	SM	0,33	618	4	WW	0,25	626	4	WW	0,25				
	2	WW	0,33		1	ZR	0,25		1	Ka	0,25				
	3	SG	0,33		2	KM	0,25		2	WW	0,25				
609	1	SM	0,33		3	WW	0,25		3	ZR	0,25				
	2	WW	0,33		4	WG	0,25		4	WW	0,25				
	3	Ro	0,33		1	Ka	0,33		1	ZR	0,25				
610	1	KM	0,33		2	WW	0,33		2	WW	0,50				
	2	WW	0,33		3	KM	0,33		3	KM	0,25				
	3	WG	0,33												

FF = Fruchtfolge, Ka = Kartoffel, KM = Körnermais, Ra = Raps, Ro = Roggen, SG = Sommergerste, SM = Silomais, WG = Wintergerste, WW = Winterweizen, ZR= Zuckerrübe

Quelle: Eigene Darstellung.

Die Zusammenstellung dieser regionaltypischen Fruchtfolgen basiert auf Grundlage der Anbausituation des Jahres 2007, welche aus dem Datensatz „Schlaggeometrien“ abgeleitet ist. Für jeden Schlag der Untersuchungsregion sind naturräumliche Bedingungen wie Temperatur- und Niederschlagssumme, die nutzbare Feldkapazität, der Bearbeitungswiderstand, sowie die topographische Lage, Größe und Form bekannt. Diese Basisdaten führen gemeinsam mit den Daten der Anbauverfahren, d.h. den Preisen, Kosten und Mengen eines Produktionsverfahrens sowie den Ertragspotentialen der einzelnen Kulturen zur Berechnung der raumvarianten Bodenrenten aller genannten Fruchtfolgen auf allen ackerbaulichen Schlägen. Tabelle 3.4 zeigt auszugsweise das Ergebnis dieser Berechnung exemplarisch an einem 1 ha großen Schlag.

Tabelle 3.4: Auszug Modellierungskennzahlen ProLand

Schlag	Kulturpflanze	Ertragspotential in dt	Bodenrente in €	Leistungen in €	Kosten in €	Arbeit in h
17	Winterweizen	106,82	315,20	1.625,55	1.310,36	14,34
17	Wintergerste	100,96	188,69	1.457,03	1.268,34	14,34
17	Roggen	103,25	208,32	1.493,01	1.284,70	14,34
17	Sommergerste	74,58	373,16	1.323,34	950,18	11,87
17	Silomais	606,81	525,29	2.361,19	1.835,91	29,18
17	Körnermais	119,34	485,67	1.851,01	1.365,34	10,89
17	Winterraps	37,20	238,32	1.172,94	934,61	12,46
17	Zuckerrübe	527,62	690,65	1.841,44	1.150,79	9,36
17	Speisekartoffel	443,81	5.047,46	7.269,80	2.222,34	45,77

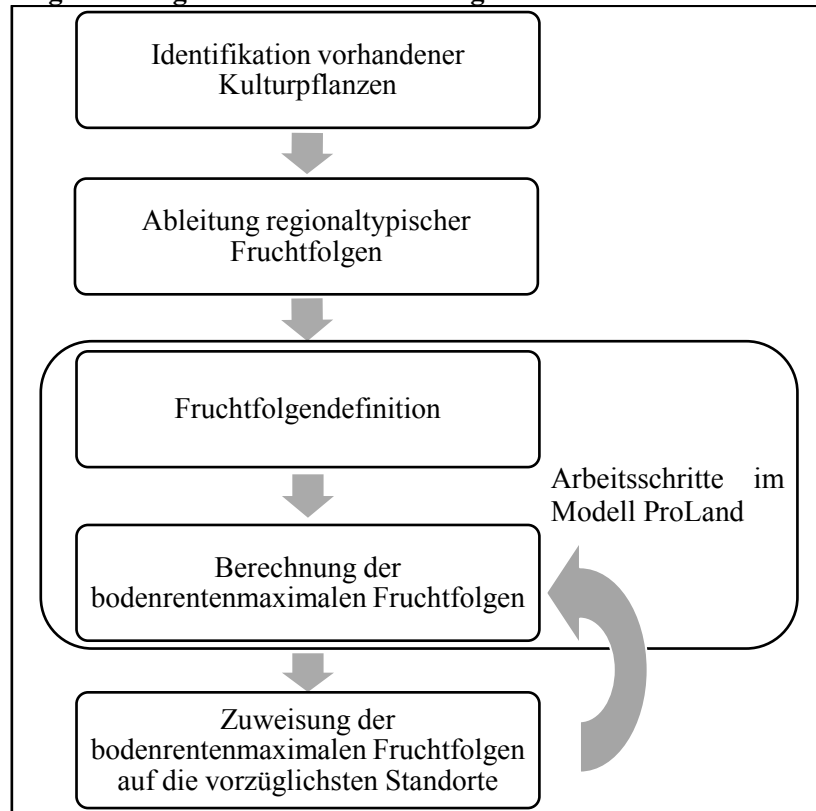
Quelle: Eigene Darstellung.

Obwohl auf dem Schlag mit der Identifikationsnr. 17 die Getreidesorten überdurchschnittliche Erträge erzielen (vgl. BMELV 2010), ist die Vorzüglichkeit der Speisekartoffel gegeben, die eine Bodenrente von über 5.000 € erzielt. Die grundlegende Annahme eines bodenrentenmaximierenden Landnutzers führt folglich dazu, dass das Modell als vorzüglichste Fruchtfolge diejenige ausweist, die Speisekartoffel enthält. Da die Dominanz der Kartoffel auf allen ackerbaulichen Schlägen der Untersuchungsregion gegeben ist, bedeutet dies für das Simulationsergebnis, dass auf allen Schlägen der Untersuchungsregion Fruchtfolgen mit Kartoffeln ausgewiesen werden, wenn Nachfragerestriktionen unberücksichtigt bleiben. Ähnlich undifferenzierte Ergebnisse liefert das Modell, wenn Fruchtfolgen mit Zuckerrüben, Sommergerste und Silomais keinen Nachfragerestriktionen unterliegen. Es gilt daher Nachfragerestriktionen bei der Fruchtfolgenzuweisung zu berücksichtigen. Von dieser Einschränkung sind nicht nur Fruchtfolgen, die Zuckerrüben, Kartoffeln, Silomais als Viehfutter und Sommergerste als Braugerste enthalten, sondern auch Sonderkulturen betroffen. Für diese Fruchtarten gilt eine Limitierung der Anbauumfänge, die dem bisherigen Umfang in der Untersuchungsregion entspricht. Einer unbegrenzten Ausdehnung widersprechen für Zuckerrüben die Mengenkontingente, für Silomais der Bedarf der

bestehenden Viehhaltung und für Kartoffeln und Braugerste die limitierten Absatzmöglichkeiten. Auch der Anbauumfang von Sonderkulturen ist festgesetzt.

Im Modell ProLand werden Lage und Umfang der Anbauflächen der betroffenen Produkte aus statistischen Angaben abgeleitet und fixiert, so dass weder die Ausdehnung dieser Produkte, noch die räumliche Veränderung möglich ist. Das bedeutet, dass die zulässige Auswahl der Landnutzungsalternativen im Modell ProLand für Landnutzungsprognosen kleiner ist als für die Bestimmung von Bodenrentendifferenzen oder die Ermittlung von Opportunitätskosten einer Maßnahme (SHERIDAN, 2010). Somit sind obige Kulturen nicht nur von der Landnutzungsprognose ausgeschlossen, sondern es stehen auch die von ihnen beanspruchten Flächen für die Modellierung nicht zur Verfügung. Würde dieses Vorgehen zur Landnutzungsmodellierung der Untersuchungsregion Südhessen angewendet, so ergäbe sich einer Reduzierung der Modellierungsfläche von 40.005 auf 26.498 ha, d.h. eine Abnahme von rund 34 %. In den vorliegenden Landnutzungsprognosen wird deshalb nur der Umfang der nachfragebegrenzten Kulturen festgesetzt, wohingegen die Flächen variabel sind. Entsprechend der Grundannahme der vollständigen Absatzbarkeit der Produkte liegen somit die Verwertungsoptionen für alle Kulturen im Optimum. Folglich treten diese Kulturen an den für sie jeweils vorzüglichsten Standorten auf. Diese Annahme gilt nicht für Sonderkulturen, die sowohl im Umfang festgesetzt als auch auf den bestehenden Flächen fixiert sind.

Nachdem die benutzerdefinierten Fruchtfolgen feststehen, ermittelt ProLand für jeden Schlag die ökonomischen Kennzahlen dieser Fruchtfolgen. Im nächsten Schritt gilt es die bodenrentenmaximalen Fruchtfolgen auf die vorzüglichsten Standorte zu verteilen. Aufgrund der Besonderheit der nachfragebeschränkten Kulturen erfolgt die Berechnung der bodenrentenmaximalen Fruchtfolgen mehrfach, wobei bei jedem Durchlauf die zur Verfügung stehenden Fruchtfolgen und die von ihnen beanspruchten Flächen reduziert werden. Ist im ersten Simulationslauf der durch die aktuelle Landnutzung vorgegebene Anteil der Kartoffel in Höhe von rund 1.930 ha erreicht (vgl. Anhang 8.1), steht für die nächsten Simulationsdurchgänge keine Fruchtfolge mehr zur Verfügung, die Kartoffeln enthält. Die von dieser vorzüglichen Fruchtfolge besetzten Flächen sind für den nächsten Berechnungsschritt ebenfalls nicht verfügbar. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt, bis alle nachfragebeschränkten Fruchtfolgen auf die Flächen verteilt sind. Anhand von Abbildung 3.2 lässt sich die die Zuweisung der benutzerdefinierten Fruchtfolgen zur Berücksichtigung von Nachfragerestriktionen zusammenfassen.

Abbildung 3.2: Vorgehen bei der Zuweisung benutzerdefinierter Fruchtfolgen

Quelle: Eigene Darstellung.

Nach der Identifikation regionaltypischer Kulturpflanzen aus der aktuellen Landnutzungsverteilung erfolgt die Ableitung möglicher Fruchtfolgen. Diese Fruchtfolgen werden in ProLand vom Benutzer definiert. Das Modell berechnet die Bodenrenten der angebotenen Fruchtfolgen für alle Standorte. Schließlich erfolgt die Zuweisung der bodenrentenmaximalen Fruchtfolgen auf die vorzüglichsten Standorte unter Berücksichtigung von Nachfragerrestriktionen solange, bis keine nachfragebeschränkten Fruchtfolgen mehr auftreten. Dieses Vorgehen dient zur Berücksichtigung von Nachfragerrestriktionen. Gleichzeitig bilden die benutzerdefinierten Fruchtfolgen die aktuelle Landnutzung in der Untersuchungsregion realitätsnah ab, wie in Abschnitt 4.1.1 erläutert.

3.2.3 Räumlich differenzierte Preise

Aus den theoretischen Grundlagen resultiert, dass die Berücksichtigung von räumlich differenzierten Preisen für bestimmte landwirtschaftliche Produkte im Modell ProLand von Vorteil wäre. Schließlich bestehen für einige Kulturen sowohl Nachfragerrestriktionen als auch hohe Transportkosten. So verfügt u.a. die Energiepflanze Silomais aufgrund ihrer hohen Wassergehalte im Ernteprodukt, über eine geringe Transportwürdigkeit. Einer Studie des WUPPERTAL INSTITUTS (2006) zufolge kann Silomais höchstens 15 bis 20 km weit transportiert werden. Da die vorzüglichen Produktionsflächen für Energiemais sowie die Standorte der Biogasanlagen bekannt sind, eröffnet sich die Möglichkeit von GIS-gestützten

Netzwerk- und Transportanalysen. Für jeden landwirtschaftlichen Schlag auf dem das Produktionssystem „Energiermais“ vorzüglich ist, können die Tonnenkilometer und mit ihnen die Transportkosten berechnet werden.

Das in diesem Zusammenhang erweiterte methodische Vorgehen eröffnet folglich eine Berücksichtigung von Nachfragerrestriktionen für Energiermais, da sowohl die Lage der Abnehmer als auch die Absatzmengen bekannt sind. Gleichzeitig wirkt sich die Berücksichtigung von Transportkosten auf die Vorzüglichkeit des Produktionsverfahrens „Energiermais“ aus. Für das Landnutzungssystem Energiermais gilt die erweiterte Gleichung zur Berechnung der Bodenrenten, wie in Formel 3.3 dargestellt.

Formel 3.3: Bodenrentenberechnung für das Landnutzungssystem Energiermais

$$B_E = (E_E \times p_E) + T_E - (E_E \times K_{E_E}) - K_{F_E} - K_{B_E} - K_{H_E} - K_{T_E}$$

mit

B_E = Bodenrente des Landnutzungssystems Energiermais in Geldeinheit je Flächeneinheit

E_E = Naturalertrag des Landnutzungssystems Energiermais in Masseinheit je Flächeneinheit

p_E = Produktpreis des Landnutzungssystems Energiermais in Geldeinheit je Masseinheit

T_E = Transferzahlung des Landnutzungssystems Energiermais in Geldeinheit je Flächeneinheit

K_{E_E} = Ertragsabhängige Produktionskosten des Landnutzungssystems Energiermais in Geldeinheit je Masseinheit

K_{F_E} = Flächenabhängige Produktionskosten des Landnutzungssystems Energiermais in Geldeinheit je Flächeneinheit

K_{B_E} = Bodenartenabhängige Produktionskosten des Landnutzungssystems Energiermais in Geldeinheit je Flächeneinheit

K_{H_E} = Hangneigungsabhängige Produktionskosten des Landnutzungssystems Energiermais in Geldeinheit je Grad Hangneigung

K_{T_E} = Transportabhängige Produktionskosten des Landnutzungssystems Energiermais in Geldeinheit je Tonnenkilometer

Die hier beschriebene Modifikation bezieht sich auf die damit einhergehenden Erweiterungen des Modells ProLand, welche lediglich zur Ermittlung der Vorzüglichkeit und der Kennzahlen der Produktionssystems Energiermais dient. Die Ermittlung Produktionskosten inkl. Transportkosten beruht auf der Interdependenz der Modelle ProLand und ProSite. Die Funktionsweise von ProSite erläutert der folgende Abschnitt. Durch die wechselseitigen Beziehungen der Modelle entstehen weitere Modellierungsoptionen, die Kapitel 3.5 näher beschreibt.

3.3 Das Modell ProSite

Das im Rahmen des Transferprojekts des SFB 299 entwickelte Modell „Prognosis of Optimal Sites“ (ProSite) ist ein auf die Anforderungen von Biomassekonvertierungsanlagen angepasstes Standortbestimmungsmodell (PLATA, 2008). ProSite identifiziert optimale Standorte zur Erzeugung erneuerbarer Energie aus Biomasse unter Berücksichtigung zahlreicher, unterschiedlich gewichteter und nach euklidischen Distanzen klassifizierter Faktoren in Anlehnung an die industrielle Standortbestimmungstheorie von WEBER (1922). Analog zu den vorgestellten theoretischen Grundüberlegungen liegt dem Modell ebenfalls die Annahme nutzenmaximierender Akteure zugrunde. Entsprechend der Fragestellung fungiert ProSite in dem vorliegenden Anwendungsfall zur Standortbestimmung für neue Biogasanlagen sowie zur Bewertung bestehender Anlagenstandorte. Das Modell ist softwaregestützt, es wurde mit der grafischen und interaktiven Modellierungsumgebung für Prozessketten der Geoverarbeitung „Model Builder“ innerhalb der GIS-Software „ArcGIS Desktop - ArcMap 9.2“ und der Softwareerweiterung „Spatial Analyst“ entwickelt (PLATA, 2008). Der Einsatz eines GIS ermöglicht die Erfassung, Verwaltung und Analyse von räumlichen Daten, den sog. Geodaten. Hauptcharakteristikum eines GIS sind die Analysefunktionalitäten. So können Nachbarschaftsbeziehungen von Geoobjekten untersucht, Entfernungen berechnet oder Flächen, die eine bestimmte Kombination von Attributwerten aufweisen, abgeleitet werden. Grundsätzlich basieren GIS-Analysen auf der Generierung neuer Informationsebenen aus den im Datenbestand nur implizit vorhandenen Informationen. Hierfür stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Zur Standortbestimmung sind insbesondere Überlagerungstechniken geeignet. Bei diesem Overlay-Verfahren entstehen aus bereits vorliegenden Informationsebenen neue räumliche Objekte, die mehrere Bedingungen gleichzeitig erfüllen. Die Auswahl und Kombination der Bedingungen bestimmt, ob und inwiefern ein Gebiet für eine bestimmte Nutzung geeignet ist. Für die synchrone Betrachtung zahlreicher Datenebenen ist im Bereich der Geoverarbeitung der Begriff Multikriterienanalyse geläufig (SAURER & BEHR, 1997). Multikriterienanalysen erleichtern Planern und Unternehmern die Standortsuche. Zudem erhöht der Einsatz dieser Analysemethode die Transparenz und Plausibilität der getroffenen Standortentscheidung. Aufgrund der vorliegenden Fragestellung und der Homogenität der Untersuchungsregion (vgl. Kapitel 3.6) schränken zahlreiche bereits bestehende Landnutzungen die verfügbare Modellierungsfläche ein. Diese Bereiche werden in einem der letzten Analyseschritte von den weiteren Berechnungen ausgeschlossen. Es handelt sich daher um eine maskierte Multikriterienanalyse.

Das methodische Vorgehen von ProSite erfolgt in Anlehnung an eine Studie von MA et al. (2005), wobei zusätzliche Faktoren wie z.B. die Wärmenutzung sowie Nachfragekonkurrenz durch bereits vorhandene Biogasanlagen Berücksichtigung finden. Die Funktionsweise von ProSite stellt sich wie folgt dar. Zunächst identifiziert der Nutzer Kriterien, die Auswirkungen auf die zu modellierenden Standorte haben. Aus der Kriterienfestlegung ergibt sich die Notwendigkeit der Beschaffung, Aufbereitung und Speicherung der entsprechenden Daten im Rasterformat in einer Geodatenbank. Die rasterbasierte Datenhaltung vereinheitlicht das Datenniveau und ermöglicht darüber hinaus mathematische Operationen zwischen den Informationsebenen. Das Modell unterscheidet zwischen harten Faktoren mit restriktiver Wirkung und weichen Faktoren mit selektiver Wirkung.

3.3.1 Restriktive Faktoren

Restriktive Faktoren haben Ausschlussfunktion hinsichtlich eines Anlagenstandorts und weisen Flächen im Sinne boolescher Werte entweder als geeignet oder als ungeeignet aus. So ist es z.B. nicht möglich eine Anlage auf bereits bestehenden Infrastrukturen zu errichten. Zudem existieren um einige Objekte mit restriktiver Wirkung Bereiche, die ebenfalls nicht zur Bebauung freigegeben sind. Die bisher im Modell ProSite verwendeten restriktiven Faktoren sowie die Mindestabstände zu diesen Objekten sind in Tabelle 3.5 aufgeführt.

Tabelle 3.5: Restriktive Faktoren und Mindestabstände

Restriktiver Faktor	Mindestabstand
Hangsteigung > 15 %	-
Wald	-
Gewässer	100 m
Überbaute Gebiete	-
Wohnbauflächen	300 m
Verkehrswege	20 m
Naturschutzgebiete	-
Wasserschutzgebiete Zonen I und II	-
Gasleitungen	100 m

Quelle: Eigene Zusammenstellung, teilweise nach MA et al. (2005), FSTRG (2007) und TA LUFT (2002).

Die Zusammenstellung der restriktiven Faktoren sowie die Werte der Mindestabstände stammen von MA et al. (2005), aus der Technischen Anleitung Luft (TA LUFT, 2002) und dem Bundesfernstraßengesetz (FSTRG, 2007). Die TA LUFT (2002) schreibt unter Nr. 5.4.8.6.1. als Mindestabstand von Vergärungsanlagen zu Wohnbebauung eine Entfernung von 300 Meter vor. § 9 des FSTRG (2007) untersagt die Errichtung von Hochbauten in einem 20 Meter Abstand zu Bundesstraßen. Dieser Richtwert gilt im Modell für alle Verkehrswege.

ProSite führt als ersten Berechnungsschritt eine Reklassifizierung der Wertebereiche für jede Datenebene durch, so dass als Ergebnis nur boolesche Nominaldaten vorliegen, deren

Merkmalsausprägungen auf die zwei Zustandsstufen „ungeeignet“ (0) und „geeignet“ (1) beschränkt sind. Im zweiten Schritt der Restriktionsflächenermittlung multipliziert das Modell sämtliche Datenebenen miteinander. Ist in einer Eingangsebene eine Rasterzelle mit dem Wert „0“ enthalten, so ist an dieser Stelle in der neugenerierten Datenebene ebenfalls der Wert „0“ zu finden, da Null ein absorbierendes Element bei der Multiplikation ist. Es gilt Formel 3.4.

Formel 3.4: Berechnung der restriktiven Ebene

$$R_i = \prod_{k=1}^m R_{i,k}$$

mit

R_i = der Rasterzelle i zugewiesener boolescher Wert (0, 1) in der restriktiven Endebene

$R_{i,k}$ = der Rasterzelle i zugewiesener boolescher Wert (0, 1) des restriktiven Faktors k

m = Anzahl restriktiver Faktoren

3.3.2 Selektive Faktoren

Außer den restriktiven Faktoren berücksichtigt ProSite selektive Faktoren als Eingangsparameter. Die für alle Anlagentypen gültigen Faktoren sind befestigte Straßen, Transformatorenstationen, Ackerland sowie tierhaltende Landwirtschaftsbetriebe. Für konventionelle Anlagen, die über ein Blockheizkraftwerk Elektrizität und Wärme erzeugen, ist die Nähe zu Wärmeabnehmer zu berücksichtigen. Für biomethanproduzierende Anlagen, die das aufbereitete Biogas in die Erdgasnetze einspeisen, sollten im näheren Umfeld geeignete Gasleitungen vorhanden sein.

Die räumliche Nähe zu diesen weichen Faktoren ist für die Standorte von Biomassekonvertierungsanlagen von Vorteil. Nähe im Sinne von euklidischer Distanz beinhaltet im Gegensatz zu den booleschen Werten der Restriktionsflächen vollständig quantifizierbare Intervalldaten, z.B. als Angabe in Metern. Zur weiteren Analyse ist jedoch eine Vereinheitlichung der Datenniveaus notwendig, um arithmetische Operationen zu ermöglichen. Das Modell klassifiziert daher alle Entfernungsangaben in fünf Klassen, die nach dem Schulnotensystem von „1 - sehr gut“ bis „5 - ungenügend“ reichen.

Außer der Klassifizierung erfolgt die Gewichtung der einzelnen Faktoren. In Anlehnung an die theoretischen Überlegungen von WEBER (1922) ist zu berücksichtigen, dass einige Faktoren bedeutsamer sein können als andere und dementsprechend unterschiedlich zu gewichten sind. Zur Bestimmung der Klassengrenzen und zur Definition der Gewichtungen

kann Expertenwissen notwendig sein. Nur so ist die Ableitung fachlich haltbarer Ergebnisse gewährleistet. ProSite verwendet die in Tabelle 3.6 beispielhaft dargestellten Klassengrenzen und Gewichtungen der selektiven Faktoren.

Tabelle 3.6: Selektive Faktoren

Selektiver Faktor	Klassengrenzen in m	Gewichtung
Ackerland	I < 1500 > II < 3000 > III < 4500 > IV < 6000 > V < 7500	3 (sehr wichtig)
Befestigte Straßen	I < 100 > II < 200 > III < 300 > IV < 400 > V < 500	2 (wichtig)
Gasleitungen	I < 160 > II < 320 > III < 480 > IV < 640 > V < 800	3 (sehr wichtig)
Tierhaltende Betriebe	I < 200 > II < 400 > III < 600 > IV < 800 > V < 1000	3 (sehr wichtig)
Trafostationen	I < 200 > II < 400 > III < 600 > IV < 800 > V < 1000	1 (weniger wichtig)
Wärmeabnehmer	I < 400 > II < 800 > III < 1200 > IV < 1600 > V < 2000	2 (wichtig)

Quelle: eigene Darstellung. Maximalentfernungen und Gewichtungen teilweise nach MA et al., 2005 u. Böss, 2008.

Die Klassengrenzen und Gewichtungen variieren je nach Fragestellung und Anlagentyp. Zudem können die örtlichen Verhältnisse der Untersuchungsgebiete einen Einfluss auf die Ausprägungen der Klassengrenzen und Gewichtungen ausüben. Darüber hinaus ist im ursprünglichen Modell ein Umwegfaktor vorhanden, der unter vereinfachenden Annahmen eine näherungsweise Umrechnung der Luftliniendistanz von Ackerflächen und tierhaltenden Betrieben in Wegstreckenentfernungen vornimmt. Ist die Festlegung der Gewichtungswerte erfolgt, multipliziert das Modell diese mit den klassifizierten Entfernungswerten. Anschließend aggregiert ProSite die Datenebenen, so dass eine selektive Endebene entsteht. Es gilt Formel 3.5.

Formel 3.5: Berechnung der selektiven Endebene

$$F_i = \sum_{j=1}^n G_j F_{i,j}$$

mit

F_i = der Rasterzelle i zugewiesener Wert in der selektiven Endebene

$F_{i,j}$ = der Rasterzelle i zugewiesener Wert des selektiven Faktors j

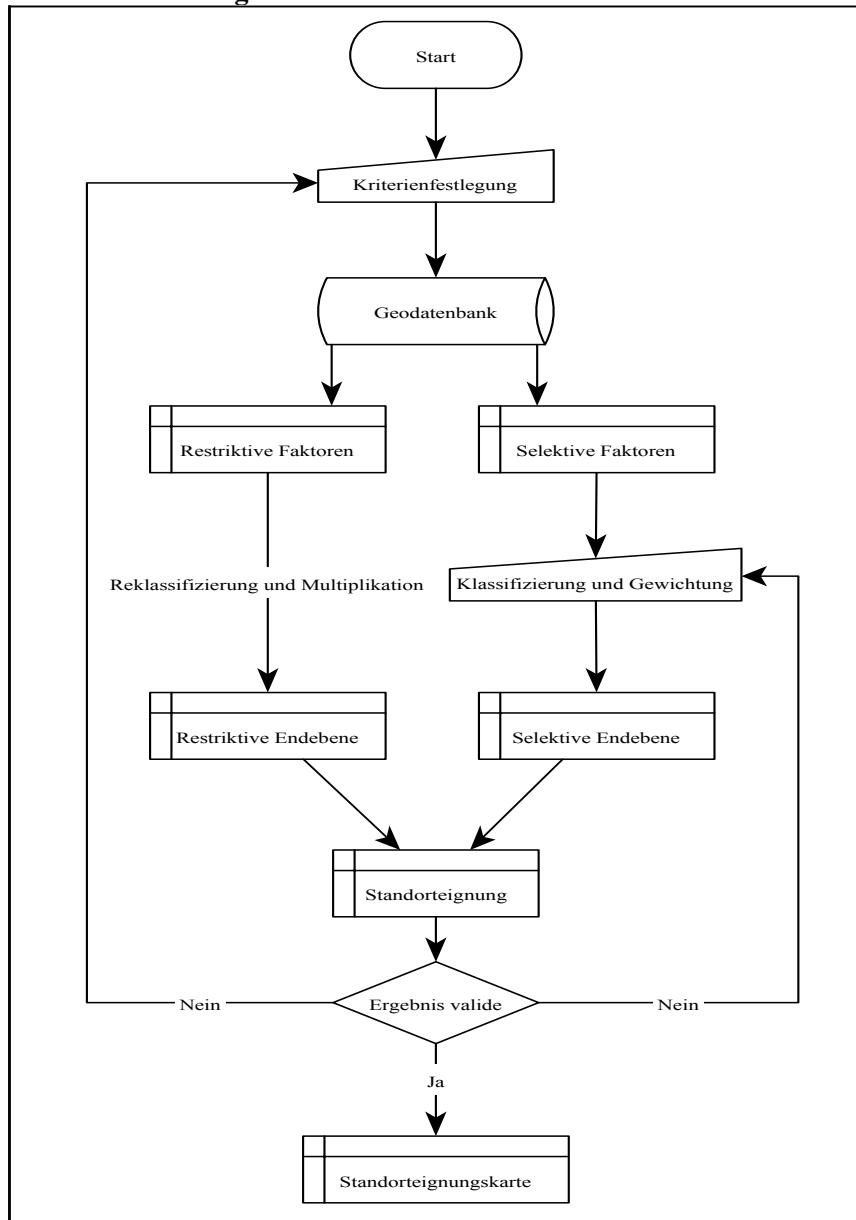
G_j = dem selektiven Faktor j zugewiesene Gewichtung

n = Anzahl selektiver Faktoren

3.3.3 Standorteignungsebene

Letztlich resultiert aus der Multiplikation der restriktiven und der selektiven Endebene mit anschließender Normierung auf eine fünfstufige Skala eine Datenebene, die alle potentiellen Flächen des Untersuchungsraums nach Eignung abgestuft ausweist. Das Schema zur Berechnung dieser Standorteignungsebene ist in Abbildung 3.3 illustriert.

Abbildung 3.4: Funktionsweise des Modells ProSite



Quelle: Eigene Darstellung.

3.4 Modifikationen des Modells ProSite

Das Modell ProSite verwendet in den bisherigen Anwendungsfällen teilweise nicht standortgetreue Daten, sondern bezieht die notwendigen Informationen aufgrund der beschränkten Datenverfügbarkeit aus manuell verorteten statistischen Kennzahlen. Auch zur Bestimmung der Substrateinzugsgebiete bedient sich das Modell vereinfachender Luftliniendistanzen und nicht der tatsächlichen Wegstreckenentfernungen (PLATA, 2008). Aufgrund dieser ungenauen Datenlage liefert ProSite in seiner ursprünglichen Version mit Unsicherheiten behaftete Ergebnisse. Die im folgenden Abschnitt beschriebenen Modifikationen dienen sowohl zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der Modellierungsergebnisse als auch zur Verringerung des Datenimplementierungsaufwands.

Die Methodik zur Ermittlung der Restriktionsflächen ist prinzipiell identisch zu dem ursprünglichen Vorgehen des Modells ProSite, jedoch existieren in der Untersuchungsregion zahlreiche, bisher nicht berücksichtigte Geoobjekte, die eine restriktive Wirkung ausüben. So weist das Modell in der aktuellen Version schützenswerte und sensible Gebiete wie z.B. Nationalparks oder archäologische Fundstätten als Flächen aus, die für Biogasanlagen nicht geeignet sind. Zudem sollen neue Biogasanlagen nicht innerhalb der Einzugsgebiete von bestehenden Anlagen des Projektpartners liegen. Die für die Ermittlung von Einzugsgebieten notwendigen Modelländerungen sind in Abschnitt 3.5.1 beschrieben. Eine Zusammenstellung der verwendeten Datenquellen, restriktiven und selektiven Faktoren ist in Abschnitt 4.2.1 und in Anhang 8.2 zu finden.

Die Identifikation der für Biogasanlagen relevanten weichen Kriterien erfolgt nach MA et al. (2005) und in Abstimmung mit dem Kooperationspartner HSE (RUNTE, 2006 u. BÖSS, 2008). So stehen für konventionelle Biogasanlagen befestigte Verkehrswege, Freileitungen, viehhaltende Landwirtschaftsbetriebe und Wärmeabnehmer als Faktoren zur Auswahl. Für biomethanproduzierende Anlagen tritt anstelle der Wärmeabnehmer das Erdgasnetz des Projektpartners als virtueller Konsumort des auf Erdgasqualität aufbereiteten Biomethans.

Die Substratverfügbarkeit ist für die Bestimmung der optimalen Standorte von Biogasanlagen von großer Bedeutung. Biogasanlagen beziehen ihre Basissubstrate aus Energiepflanzen, hauptsächlich aus Mais. Daher ist die Nähe eines möglichen Anlagenstandorts zu Maisanbaugebieten von Vorteil. Die in ProSite bisher geltende Annahme, dass sämtliche Ackerstandorte der Untersuchungsregion als potentielle Produktionsflächen von Energiemais zur Verfügung stehen, ist nicht plausibel. Vielmehr ist Energiemais nur auf bestimmten Flächen wettbewerbsfähig, wie die später vorgestellten Landnutzungsprognosen zeigen (siehe Kapitel 4.1.4). Daher tritt anstelle des bisher verwendeten Faktors „Ackerfläche“ der Faktor „vorzügliche Produktionsflächen für Energiemais“. Auch die Verfügbarkeit von Gülle hat wesentlichen Einfluss auf die Standortentscheidung. Schließlich dient dieses Co-Substrat in Biogasanlagen zur Prozessstabilisierung, ist jedoch gleichzeitig ein transportunwürdiges Gut. Folglich ist die Nähe einer Biogasanlage zu rinder- sowie schweinehaltenden Landwirtschaftsbetrieben Voraussetzung für einen rentablen Betrieb der Biogasanlage. Die in früheren Standortbewertungsvorhaben entwickelte und auf manueller Zuweisung statistischer Kennzahlen basierende Verortungsmethode bildet die Realität allerdings nicht zufriedenstellend ab. Zur Verortung der Verfügbarkeit von Gülle dient daher der, von der hessischen Tierseuchenkasse (HTSK, 2008) zur Verfügung gestellte, adressgenaue Datensatz der Rinder- und Schweinebestände Südhessens (siehe Abschnitt 3.7.3).

Als weitere Neuerung berücksichtigt das Modell bereits bestehende Anlagenstandorte sowie die Einzugsgebiete dieser Standorte und zwar als restriktives und als selektives Kriterium. Für den selektiven Faktor "Einzugsgebiete" gilt dabei, konträr zu den bisherigen Fällen, die Prämisse, dass mit zunehmender Entfernung zu den Einzugsgebieten der bereits installierten Anlagen die Güte des neuen Standorts zunimmt.

Abgesehen von der Verortung der einzelnen selektiven Faktoren, gilt es gemäß den theoretischen Vorgaben Gewichtungen vorzunehmen sowie Maximalentfernungen zu den Objekten und daraus folgend Klassengrenzen festzulegen. Die Werte der einzelnen Parameter sind aufgrund der gewählten Methodik je nach Anlagentyp und Fragestellung variabel. Die je nach Szenario variierenden Maximalentfernungen, Klassengrenzen und Gewichtungen sind in den Abschnitten 4.2.1 und 4.2.3 aufgeführt.

Zudem basiert die Berechnung der Einzugsgebiete der Biogasanlagen in der aktuellen Version des Modells ProSite nicht wie bisher auf Luftlinienentfernungen sondern auf Wegstreckenentfernungen. Dabei gilt die Annahme, dass der Transport der Substrate Energiemais und Gülle entlang der bestehenden Verkehrsinfrastruktur, d.h. auf befestigten Straßen ausgenommen Bundesautobahnen und Wirtschaftswegen innerhalb von Waldflächen stattfindet. Die realitätsnahe Bestimmung der Einzugsgebiete ermöglicht eine parzellenscharfe Zuordnung der vorzüglichen Produktionsflächen zu den Anlagenstandorten. Das Modell ProLand liefert in diesem Zusammenhang Kennzahlen wie z.B. Bodenrenten und Naturalerträge, auf deren Grundlage die Durchführung weiterer Analysen erfolgt. Das folgende Kapitel beschreibt einige Modellierungsoptionen, die aus der Koppelung von ProLand und ProSite resultieren.

3.5 Multikriterielle räumliche entscheidungsunterstützende Systeme

Die Zielsetzung stellt teilweise neue Anforderungen an das Modell ProLand. Soll neben der pflanzenbaulichen Flächennutzung auch die Weiterveredelung modelliert werden, müssen die Ergebnisse von ProLand mit anderen Modellen verarbeitet werden. Da alle generierten Kennzahlen von ProLand räumlich explizit gespeichert werden, eröffnet sich die Möglichkeit detaillierter, raumbezogener Analysen (SHERIDAN, 2010). ProSite ist ein GIS-basiertes Analysemodell, welches die Weiterverarbeitung der Ergebnisse des Modells ProLand ermöglicht und somit zusätzliche Modellierungsoptionen bietet. GIS können zusammen mit entscheidungsunterstützenden Systemen (engl. decision support systems, DSS) für transparente und nachvollziehbare Planungsentscheidungen mit Raumrelevanz eingesetzt werden. Aus der Verbindung von GIS- und DSS-Komponenten entstanden räumliche

Entscheidungsunterstützungssysteme (engl. spatial decision support systems, SDSS). Ein SDSS ist "eine Sequenz von Modellen [...], welche für unterschiedliche Varianten in den Aufgabenstellungen auswählbar sind und verschiedene kognitive Herangehensweisen ermöglichen" (CZERANKA, 1997, S. 23). SDSS unterstützen die Einbindung von Expertenwissen und ermöglichen unterschiedliche Gewichtungen der Entscheidungskriterien. Üblicherweise sind Entscheidungsumgebungen un- bzw. semistrukturiert, dies bedeutet, dass nicht nur Daten und feststehende Regeln in die Entscheidung einfließen, sondern auch Expertenmeinungen. SDSS transformieren semistrukturierte Probleme in strukturierte, routinemäßige Entscheidungsabläufe. Ein automatisch erstellter Report sorgt für transparente und nachvollziehbare Entscheidungsprozesse (ebd.). Da Entscheidungsfragestellungen meist die Berücksichtigung mehrerer Kriterien erfordern, handelt es sich um multikriterielle Entscheidungen (BLASCHKE & LANG, 2007). Multikriterielle räumliche entscheidungsunterstützende Systeme (engl. multicriteria spatial decision support systems, MC-SDSS) werden zur Lösung komplexer, unstrukturierter, räumlicher Fragestellungen verwendet. Ursache für eine suboptimale Standortentscheidung ist sowohl die begrenzte Menge der verfügbaren Informationen als auch die eingeschränkte Fähigkeit der Entscheider diese Informationen zu nutzen. Je weniger Entscheidungsträger an einer Standortwahl beteiligt sind, desto größer ist die Gefahr einer Fehlentscheidung infolge selektiver Wahrnehmung und unvollständiger Information (BATHELT & GLÜCKLER, 2003). Multikriterielle räumliche entscheidungsunterstützende Systeme können das Fehlentscheidungsrisiko minimieren, da sie objektive Beurteilungsverfahren mit partizipativen Ansätzen ermöglichen und so zu kollektiv getroffenen Entscheidungen beitragen (BLASCHKE & LANG, 2007). Die Modellierungsmethodik erlaubt nicht nur die Gewichtung der verwendeten Kriterien, sondern ermöglicht neben der flexiblen Integration von Daten auch die Implementierung der Präferenzen des Entscheidungsträgers sowie die Verwertung von Expertenwissen. Dadurch erhöht sich die Realitätsnähe und somit die Akzeptanz der Modellierungsergebnisse (ASCOUGH et al., 2002). Die Kriterien eines MC-SDSS werden einerseits unterteilt in Einschränkungen mit restriktivem Charakter und andererseits in Faktoren, welche eine wertmäßige Beurteilung ermöglichen (BLASCHKE & LANG, 2007). Aus den zu Beginn definierten räumlichen Einschränkungen resultieren Ausschlusskarten. Anschließend wird jeder einfließende Faktor standardisiert und gewichtet. Letztlich werden die faktorbezogenen Eignungskarten und die Ausschlusskarten miteinander kombiniert, so dass das Ergebnis des MC-SDSS eine Gesamteignungskarte ist (ebd.). Entscheidungsunterstützende Systeme sind folglich eine Hilfestellung zur Lösung von mehrschichtigen, räumlichen Fragestellungen. Sie

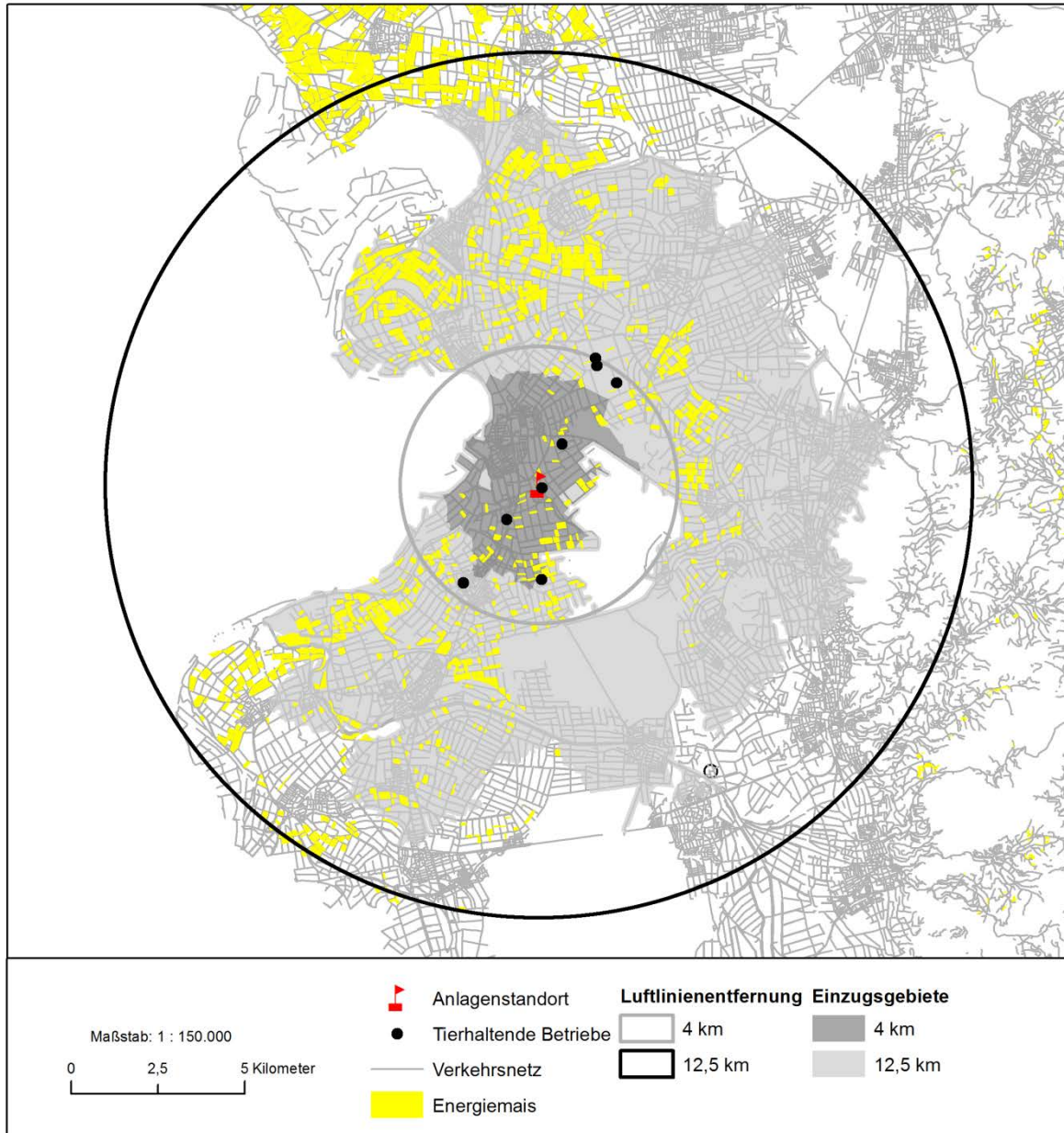
dienen nicht zu einem selbständig-automatisierten Treffen von Entscheidungen. Bei adäquater Verwendung erhöhen die beschriebenen Modelle die Transparenz und Nachvollziehbarkeit von Entscheidungsvorgängen. Bei unsachgemäßer Anwendung wird jedoch die „Verantwortung an den Computer abgegeben“, wobei die Entscheidungsvorgänge im Verborgenen bleiben und die Ergebnisse des Systems den Betroffenen als unumstößlich und unfehlbar präsentiert werden (SCHWAP, 1995, S. 255). Die Interaktion der Modelle ProLand und ProSite eröffnet die Nutzung der Vorteile eines MC-SDSS. Die folgenden Abschnitte erläutern Anwendungsbeispiele der erweiterten Modellierungsmethodik. Die auf der Kopplung von ProLand und ProSite beruhenden Analyseergebnisse beschreiben die Kapitel 4.1.2 und 4.2.

3.5.1 Einzugsgebietsberechnung

Bevor die Berechnung von Transportkosten und die Ermittlung der Bodenrenten des Produktionsverfahrens Energiemais erfolgt, gilt es die Einzugsgebiete der Anlagen möglichst präzise zu bestimmen. Aufgrund ihrer Transportunwürdigkeit können nachwachsende Rohstoffe nur 15 bis 20 und Gülle maximal fünf bis zehn Kilometer weit transportiert werden (WUPPERTAL INTSTITUT, 2006). Dies sind lediglich grobe Richtwerte, hängt doch die Ermittlung der maximal möglichen Transportentfernung von zahlreichen Faktoren, wie z.B. der Höhe der Substratpreise und somit indirekt auch von der Einspeisevergütung ab. Es ist anzumerken, dass die gegebene maximale Transportentfernung aus Berechnungen erfolgt, die aufzeigen, bis zu welcher Entfernung gerade noch Kostendeckung erreicht wird. Diese Annahme ist allerdings unter Berücksichtigung der Wettbewerbssituation nicht zielführend. Vielmehr entscheidet die Differenz der Bodenrenten der nächst vorzüglichen Kulturart, ob ein Anbau stattfindet oder nicht. Die vom Kooperationspartner vorgegebene maximale Transportentfernung beträgt für Energiemais 12,5 km und für Gülle max. vier km.

Aufgrund der in Abbildung 3.5 dargestellten deutlichen Differenzen, die zwischen Luftlinienentfernungen und Wegstreckenentfernungen bestehen, erfolgt die Einzugsgebietsbestimmung entlang der vorhandenen Verkehrsinfrastruktur, wobei Autobahnen und Wirtschaftswege innerhalb von Waldflächen nicht als Transportwege zur Verfügung stehen. Für die Bestimmung der Einzugsgebiete ist es notwendig aus den vorliegenden Verkehrswegedaten unter Zuhilfenahme der "ArcGIS Desktop"-Softwareerweiterung "Network Analyst" einen Netzwerkdatsatz zu berechnen.

Abbildung 3.5: Luftlinien- und Wegstreckenentfernungen um einen Anlagenstandort



Quelle: Eigene Darstellung. Kartengrundlage: ATKIS Basis DLM Hessen, 2009; Schlaggeometrien Hessen, 2007; Amtliche Hauskoordinaten auf Basis des Liegenschaftskatasters des Landes Hessen, 2008 und Rinder- und Schweinebestände, 2008. Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Wiesbaden. Vereinbarung Nr. 22 2008 0100.

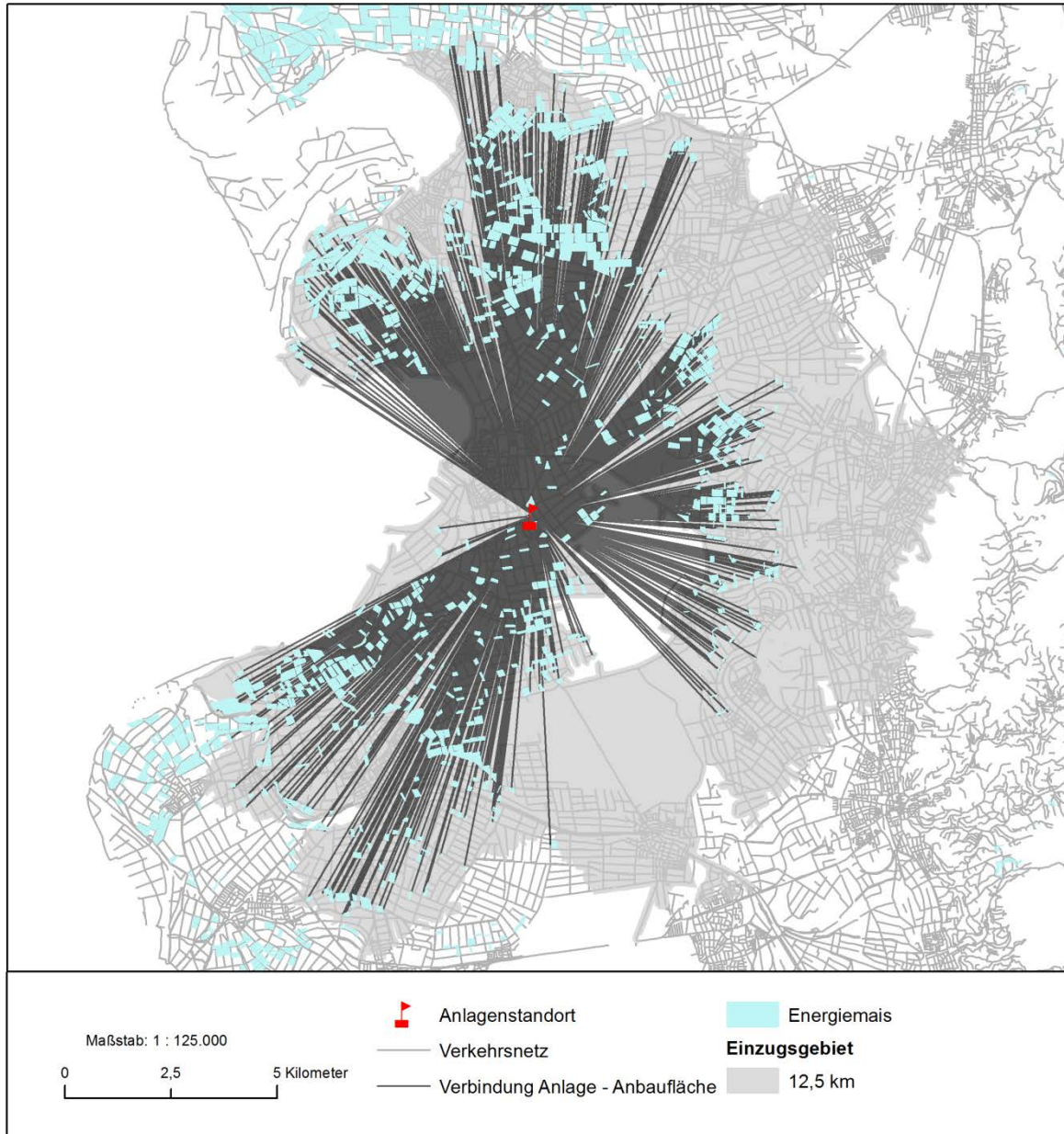
Die Berechnung von Einzugsgebieten hat für die Standortmodellierung mehrere Vorteile. Erstens ist die Potentialermittlung anhand der Wegstreckenentfernungen wesentlich genauer. So liegen im oben genannten Fall 2.143 Schweine in einer Luftlinienentfernung von 4 km vom geplanten Anlagenstandort, während es im entsprechenden Einzugsgebiet von 4 km Wegstrecke tatsächlich jedoch nur 310 Schweine sind. Abweichungen in ähnlichen Dimensionen kommen bei den von ProLand ausgewiesenen vorzüglichen Energiemaisflächen zustande. In einem Radius von 12,5 km um den Anlagenstandort beträgt die Flächensumme der Energiemaisanbaufläche rund 2.675 ha, wohingegen es im Einzugsgebiet nur 1.943 ha sind. Zweitens dienen die Einzugsgebiete als zusätzlicher restriktiver Faktor bei der

Bestimmung neuer Anlagenstandorte. Innerhalb der Einzugsgebiete der bereits installierten Anlagen sollen keine neuen Anlagen errichtet werden, um eine zusätzliche Substratkonkurrenz zu vermeiden. Drittens bilden die Einzugsgebiete bei Überschneidungen der Gebiete untereinander die Konkurrenzsituation exakt ab und gestatten eine detaillierte Zuordnung der Anbauflächen zu den Verbrauchsstandorten, wie in Abschnitt 3.5.3 erläutert. Zunächst tragen die Einzugsgebiete jedoch zur Berechnung der Transportkosten bei, wie im nächsten Abschnitt beschrieben.

3.5.2 Transportkostenermittlung

Zur Ermittlung der Transportkosten von Energiemais führt das Modell ProSite eine Netzwerkeanalyse durch, die die Wegstreckenentfernung vom jeweiligen landwirtschaftlichen Schlag zu der Biogasanlage in deren Einzugsgebiet ausmisst. Die potentiellen Energiemaisanbauflächen ergeben sich aus vorgelagerten Landnutzungsmodellierungen mit ProLand. Zunächst kalkuliert ProLand die Bodenrenten aller Landnutzungsoptionen und bewertet die Vorzüglichkeit der Energiemaisfruchtfolgen anhand der vom Nutzer vorgegebenen Substratpreise. Dies bedeutet, dass alle Produktionsflächen im Einzugsgebiet der Anlage für den Anbau mit Energiemais zur Verfügung stehen, auf denen Energiemais vorzüglich ist, unabhängig von der Lage der Veredelungsbetriebe. Diese Annahme ist jedoch aufgrund der Ungleichverteilung der Energiemaisnachfrage und der geringen Transportwürdigkeit des Produkts nicht plausibel, so dass im zweiten Schritt der Modellierung die parzellenscharfe Zuordnung der Produktionsflächen zum bekannten Standort der Biogasanlage erforderlich ist. Das Modell ProLand ist aufgrund seiner Modellstruktur nicht für eine derartige Fragestellung ausgelegt. Das weiterentwickelte Modell ProSite übernimmt daher diese Anforderung und kalkuliert die Wegstreckenentfernungen zwischen den vorzüglichen Schlägen und dem Anlagenstandort. Dabei ist zu beachten, dass der Transport des Substrats Energiemais auf allen befestigten Verkehrswegen stattfindet, außer auf Bundesautobahnen und Wirtschaftswegen innerhalb von Waldgebieten, da diese für den Transport der Substrate ungeeignet sind. Die Berechnung der Entfernungen wird ebenfalls mit der Softwareerweiterung "Network Analyst" unter Zuhilfenahme der Methode "Location-Allocation" gelöst. Jede Anbaufläche wird mit dem Anlagenstandort verbunden, wie Abbildung 3.6 illustriert.

Abbildung 3.6: Transportstreckenermittlung



Quelle: Eigene Darstellung. Kartengrundlage: ATKIS Basis DLM Hessen, 2009 und Schlaggeometrien Hessen, 2007. Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Wiesbaden. Vereinbarung Nr. 22 2008 0100.

Die Software berechnet für jede Verbindungslinie die Wegstreckenentfernung zur Anlage und fügt den Wert attributiv hinzu. Zwar werden die Verbindungen anhand gerader Linien angezeigt, die Entfernungen werden jedoch entlang des Netzwerks gemessen (ESRI RESSOURCE CENTER, 2011). Die Entfernungsangaben fließen in die Standortdatenbank von ProLand ein auf deren Grundlage das Modell zusammen mit den Naturerträgen die zur Ernte verfahrenen Tonnenkilometer berechnet. Aus diesen Werten kalkuliert ProLand die Transportkosten und subtrahiert diese abschließend von der Bodenrente der Produktionsverfahrens "Energiemais".

3.5.3 Bestimmung der Vorzüglichkeit und Substratmengen

Nach der Berechnung der optimalen Standorte selektiert der Nutzer auf Grundlage der Standorteignungskarte einen möglichst gut bewerteten Standort zur weiteren Analyse. Gleichzeitig gibt er die gewünschte Ausdehnung des Einzugsgebiets ein. Das Modell ProSite ermittelt das Einzugsgebiet, sämtliche darin liegenden vorzüglichen Energiemaisflächen sowie die Transportentfernungen. Aus der anschließenden modellübergreifenden Kalkulation der Transportkosten resultieren, unter Zuhilfenahme des Modells ProLand, die transportkostenabhängigen Kennzahlen des Produktionsverfahrens Energiemais. Diese vergleicht ProLand mit den alternativen Landnutzungsoptionen und sortiert gemäß der Annahme nutzenmaximierender Akteure absteigend nach Bodenrente. Folglich wird durch die Berücksichtigung der Transportkosten die Auswahl der vorzüglichen Energiemaisflächen zugunsten anderer Kulturpflanzen vermindert.

Die ProSite durchgeführten Standortanalysen erlauben keine quantitativen Aussagen zur Substratverfügbarkeit. Jedoch sind bei der Bewertung der Standorteignung für neue Biogasanlagen auch die Substratpotentiale zur Bestimmung der maximalen Anlagenleistung von Interesse, so dass ProSite in Kopplung mit ProLand auch die verfügbaren Substratmengen nachwachsender Rohstoffe berechnet. Da die Ergebnistabellen von ProLand ohnehin die Ertragspotentiale der vorzüglichen Fruchtfolgen enthalten, gilt es diese lediglich zu summieren, um aus den im Einzugsgebiet vorhandenen Substratpotentialen Rückschlüsse auf die Anlagendimensionierung zu ziehen.

3.6 Untersuchungsregion

Die Untersuchungsregion liegt in Südhessen, d.h. im Landesteil südlich des Mains und umfasst die Landkreise Frankfurt, Offenbach, Groß-Gerau, Darmstadt-Dieburg, Darmstadt, Bergstraße und Odenwaldkreis. Die Fläche des Untersuchungsgebiets beträgt 1.962 km², das entspricht 10 % der Landesfläche Hessens. Die Abgrenzung der Untersuchungsregion ergibt sich aus den Einzugsgebieten der Gewässersysteme und wurde vom Arbeitsbereich T 2 „SWAT – Ökohydrologische Modellierung“ des Sonderforschungsbereichs 299 ermittelt. Sie ist in Abbildung 3.7 dargestellt.

Abbildung 3.7: Lage der Untersuchungsregion

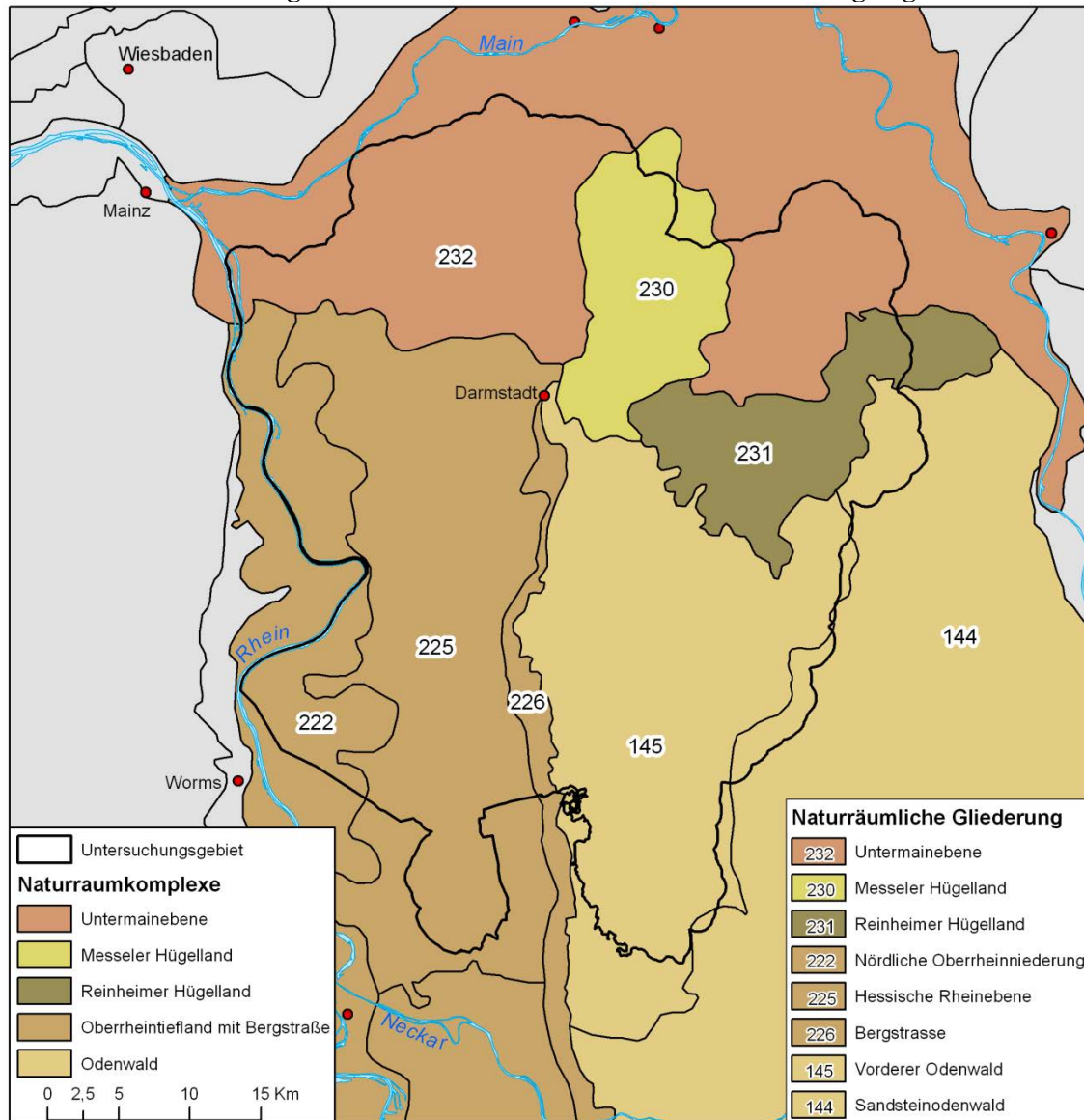


Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage: Esri Data & Maps Europe 2008 und Berechnungen Arbeitsbereich T 2 „SWAT – Ökohydrologische Modellierung“.

Die Untersuchungsregion weist eine landschaftliche Vielfalt auf. Einerseits ist sie mit besonderen Landschaftsqualitäten ausgestattet, andererseits durch urbane Ballungsräume, wie das Rhein-Main-Gebiet und die kreisfreie Stadt Darmstadt, geprägt. Die landschaftliche

Vielfalt wird insbesondere bei der Betrachtung der Naturräume deutlich. So befinden sich innerhalb des Untersuchungsraums fünf unterschiedliche Naturraumkomplexe. Dies sind Untermainebene, Messeler Hügelland, Reinheimer Hügelland, Oberrheintiefland und Odenwald. Die Lage und Gliederung der Naturräume ist in Abbildung 3.8 dargestellt.

Abbildung 3.8: Naturraumeinheiten in der Untersuchungsregion



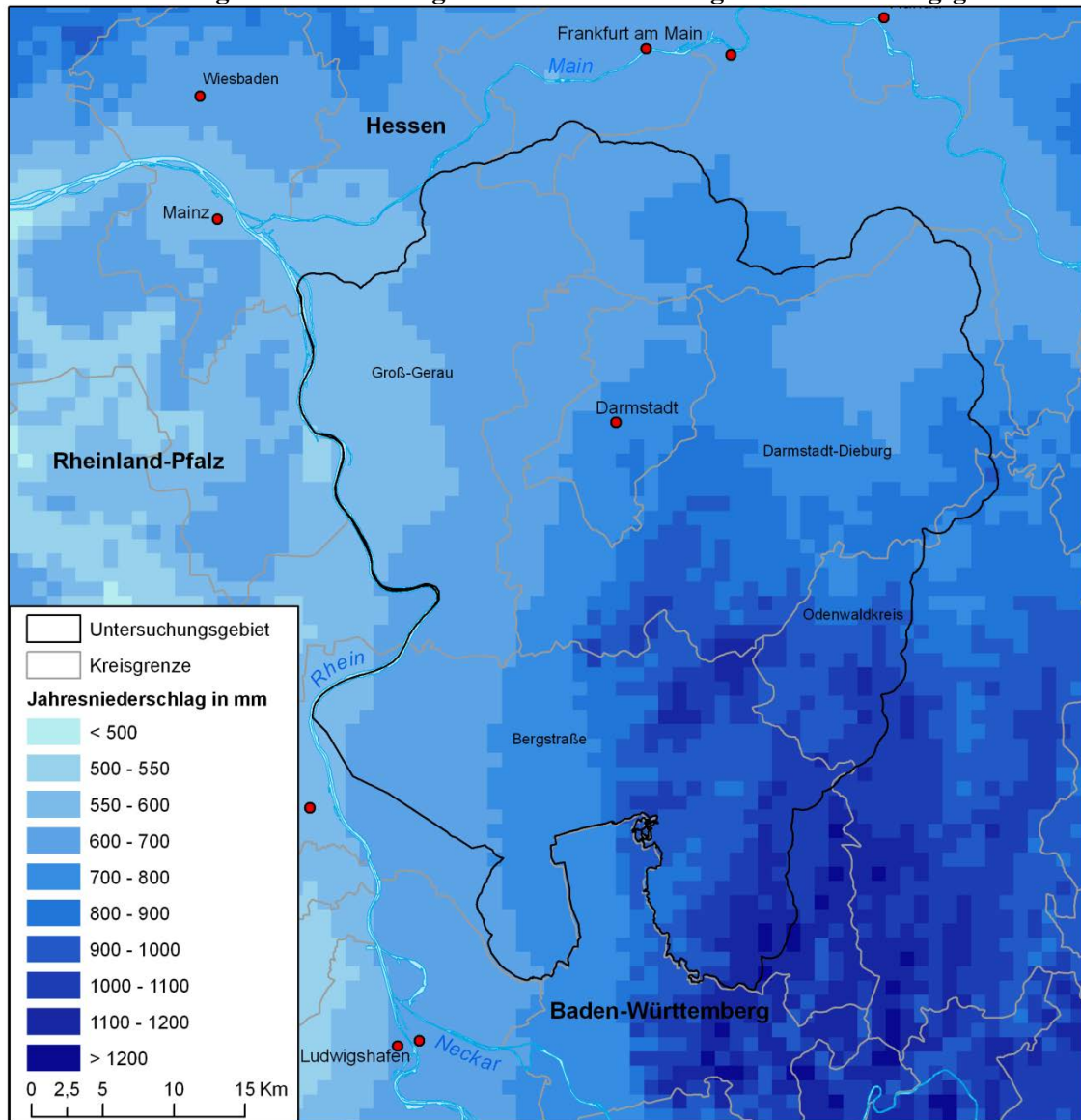
Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage: BfN (2003), Naturräume Deutschlands.

Aufgrund der Vielzahl der Naturräume muss von einer ausgeprägten Heterogenität der natürlichen Standortbedingungen im Untersuchungsgebiet ausgegangen werden. Diese Heterogenität wird bei der folgenden Betrachtung der Standortfaktoren Niederschlag, Temperatur, Boden und Relief, die zugleich fundamentale Inputparameter der Standortdatenbank des Modells ProLand sind, deutlich.

Die Summe der mittleren Jahresniederschläge nimmt innerhalb des Untersuchungsraums von Nordwest nach Südost zu. Während im westlich gelegenen Oberrheintiefland die

Niederschlagssumme bei rund 550 mm pro Jahr liegt, werden im Reinheimer und Messeler Hügelland sowie entlang der Bergstraße Niederschläge bis zu ca. 750 mm Jahresniederschlag erreicht. Im Vorderen Odenwald überschreitet die Jahresniederschlagssumme sogar 1.200 mm. Die Verteilung und Höhe der Niederschläge ist in Abbildung 3.8 dargestellt.

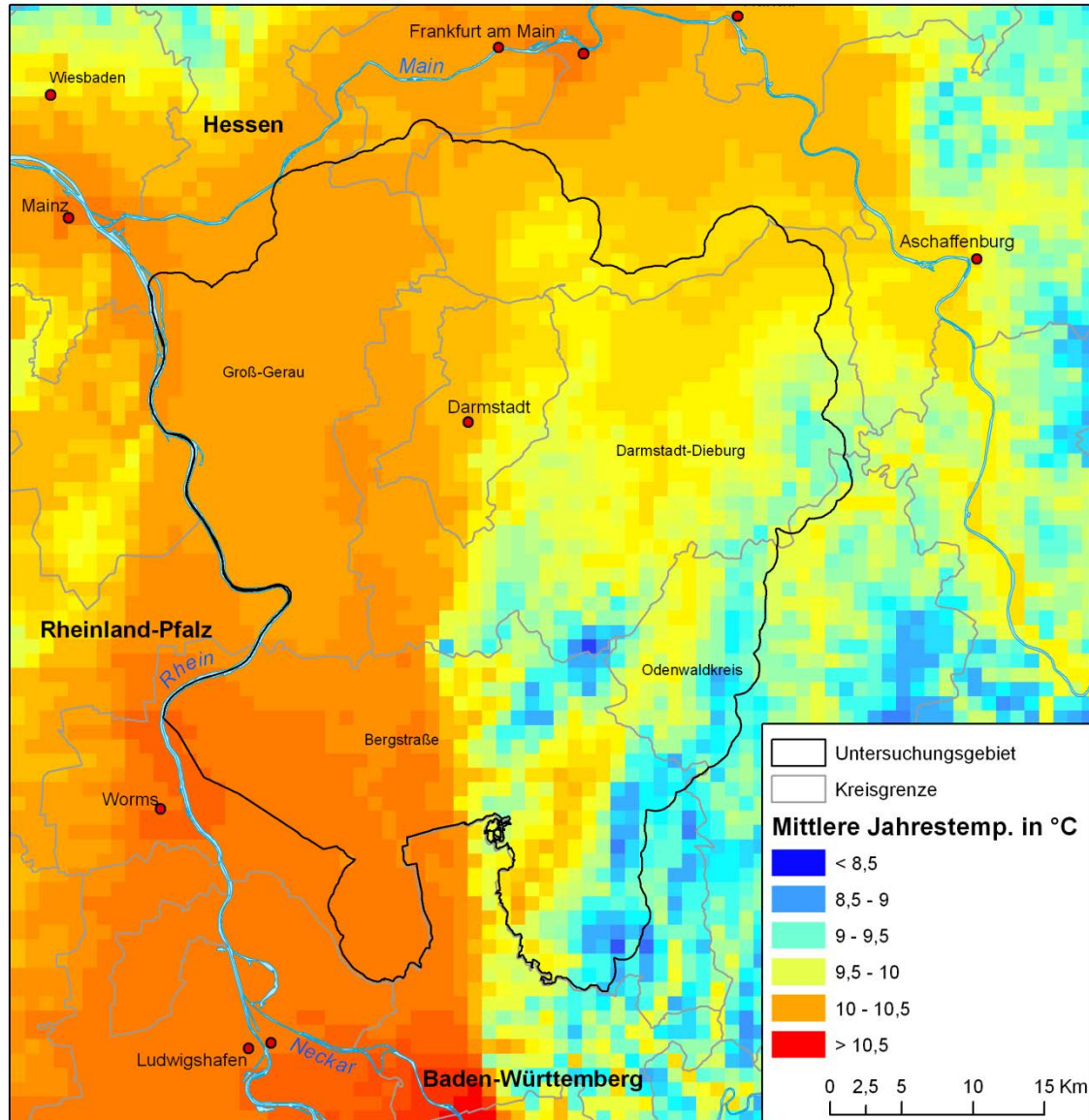
Abbildung 3.9: Niederschlagshöhen und -verteilung im Untersuchungsgebiet



Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage: DWD, Klimadaten BRD 1979 – 2006, AZ: 356_06.

Eine entgegengesetzte Verteilung ist bei den durchschnittlichen Monatsmittelwerten der Temperatur zu beobachten. Sie erreichen im westlichen Teil des Untersuchungsgebiets mit rund 10,5 °C ihr Maximum, während sie in den Höhenlagen des Odenwalds unter 8 °C liegen. In den Naturräumen Messeler Hügelland und Reinheimer Hügelland beträgt das Monatsmittel der Temperatur ca. 9,5 °C. Die Verteilung und Höhe der mittleren Jahrestemperatur ist in Abbildung 3.10 dargestellt.

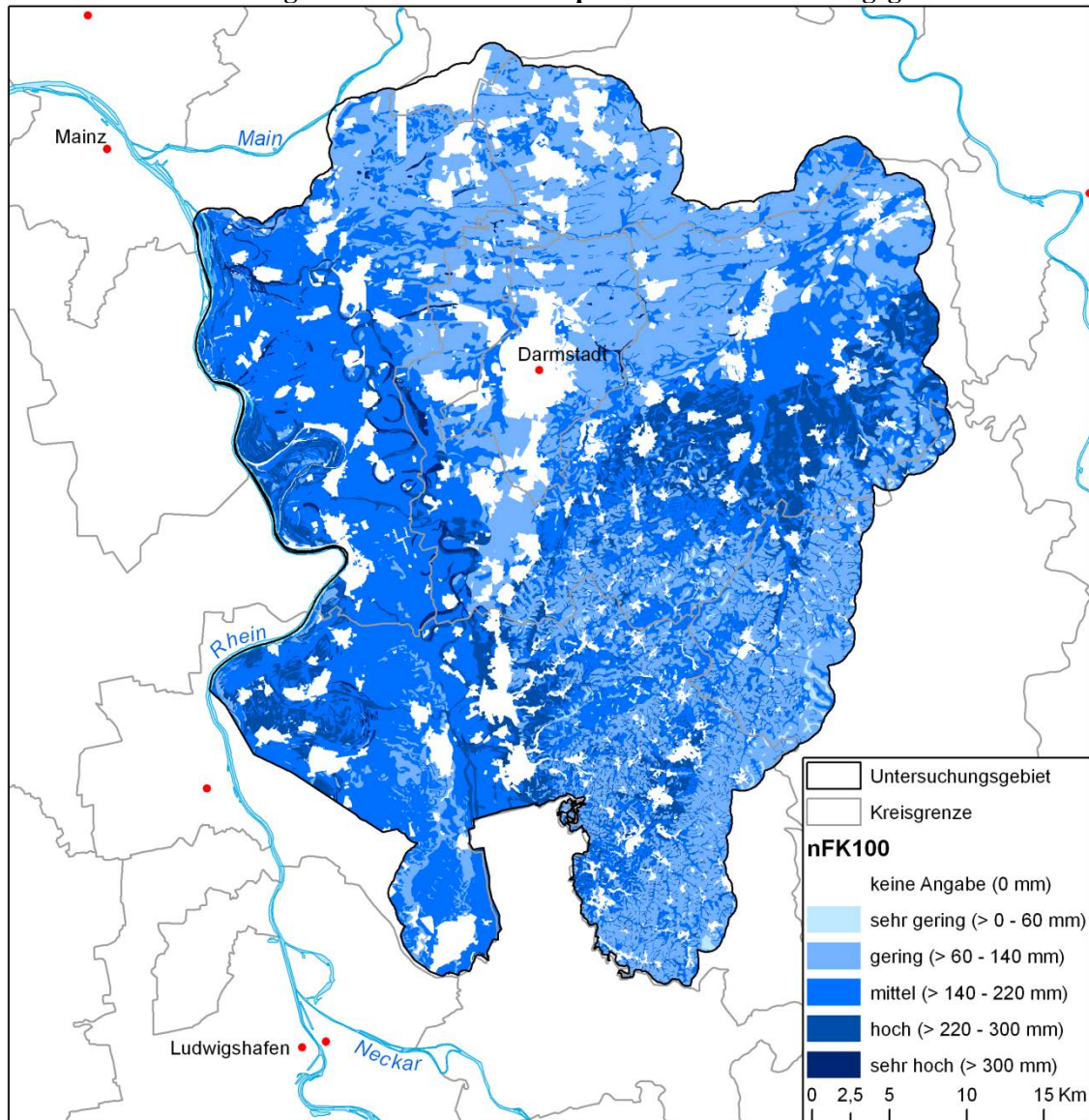
Abbildung 3.10: Temperaturverteilung im Untersuchungsgebiet



Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage: DWD, Klimadaten BRD 1979 – 2006, AZ.:356_06.

Als weiterer wichtiger Inputparameter ist die Wasserverfügbarkeit anzusehen. Die nutzbare Feldkapazität bis 100 cm Profiltiefe (nFK 100) ermöglicht zusammen mit dem Niederschlag die Bestimmung des pflanzenverfügbaren Wassers. In weiten Teilen der Oberrheinniederung reicht die nFK 100 von mittleren bis hohen Werten im Bereich von 140 bis 300 mm. In ehemaligen Altarmen des Rheins und entlang der Bergstraße finden sich teilweise sehr hohe nFK-Werte von über 300 mm. Auch im Reinheimer Hügelland sowie in Tallagen des Odenwalds weist der Boden hohe bis sehr hohe nFK-Werte auf. Die nFK in der Untermainebene, im Messeler Hügelland und im Odenwald ist mit 60 bis 140 mm gering, teilweise liegt sie sogar unter 60 mm wie in Abbildung 3.11 zu erkennen ist.

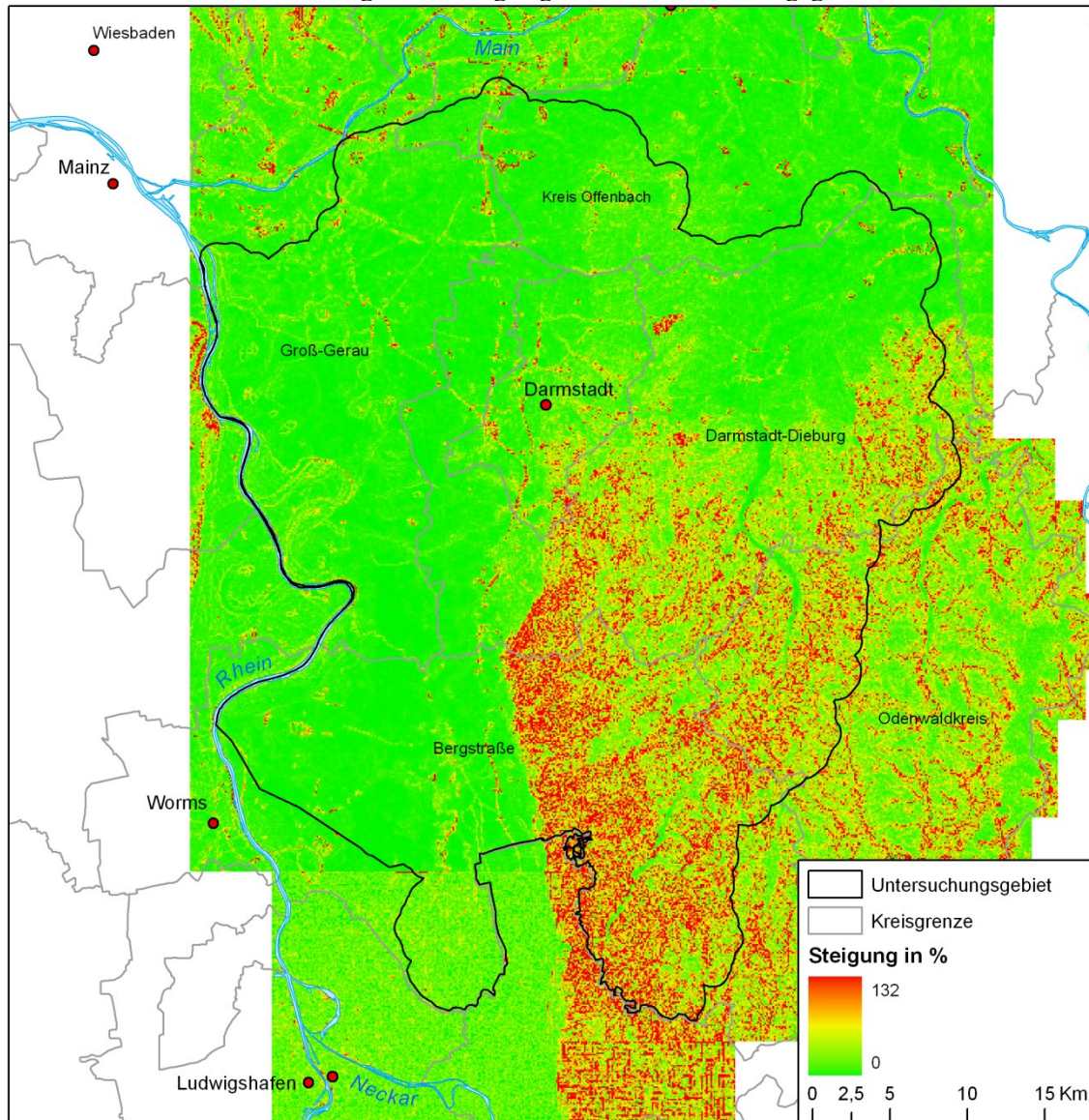
Abbildung 3.11: Nutzbare Feldkapazität im Untersuchungsgebiet



Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage: HLUG, BFD50 Hessen.

Auch hinsichtlich des Reliefs ist das Untersuchungsgebiet heterogen ausgestattet. Betrachtet man die Steigung als das Verhältnis von Höhenunterschied und waagerechter Strecke, wobei eine Steigung von 100 % einem Hangneigungswinkel von 45° entspricht, so fällt auf, dass der Großteil des Untersuchungsgebiets geringe Steigungen aufweist. Insbesondere die Untermainebene im Norden sowie die Oberrheinniederung im Westen sind flache Gebiete. Die Mittelgebirge des Odenwalds hingegen erreichen Steigungen von bis zu 132 %. Abbildung 3.12 stellt die Steigungen im Untersuchungsgebiet dar.

Abbildung 3.12: Steigungen im Untersuchungsgebiet

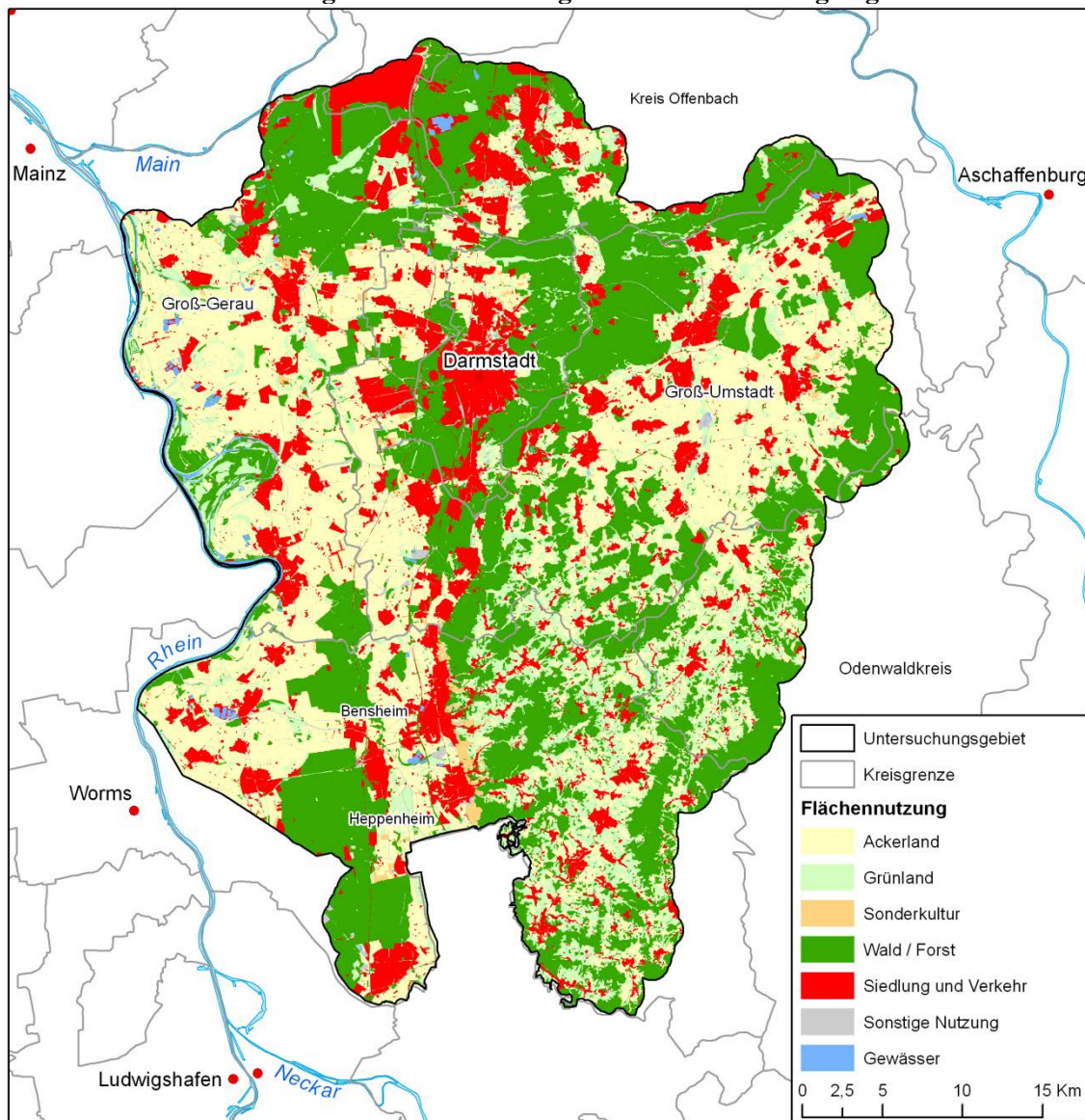


Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage: HLBG, DGM25.

Zur weiteren Vorstellung des Untersuchungsgebiets ist die Landnutzung von Bedeutung. Sie ist als solches kein alleinstehender Inputfaktor für das Modell ProLand, hilft jedoch bei der Vergleichbarkeit der späteren Modellierungsergebnisse. Die Flächennutzung im Untersuchungsgebiet verteilt sich zu 46 % auf landwirtschaftlich genutzte Flächen, zu 35,5 % auf Waldflächen, zu 16,2 % auf Siedlungs- und Verkehrsflächen, zu 1,2 % auf Wasserflächen sowie zu 1,1 % auf sonstige Nutzungen. Im Vergleich zur landesweiten Flächennutzung weichen insbesondere die landwirtschaftliche Fläche sowie die Waldfläche im Untersuchungsgebiet von den Landeswerten ab. So beanspruchen landwirtschaftliche Flächen 42,4 % und Wälder 40,1 % der Landesfläche Hessens. Siedlungs- und Verkehrsflächen hingegen machen im landesweiten Durchschnitt nur 15,3 % aus. Das Untersuchungsgebiet ist daher aus Sicht der Landnutzung weniger forstwirtschaftlich und stärker landwirtschaftlich geprägt als der Landesdurchschnitt. Gleichzeitig ist der Anteil der

Siedlungsflächen höher. Die räumliche Verteilung der Landnutzung im Untersuchungsgebiet ist in Abbildung 3.13 dargestellt. Weite Teile des Odenwalds werden als Grünland bzw. forstwirtschaftlich genutzt. Im Norden und Südwesten des Untersuchungsraums befinden sich ausgedehnte Waldbestände. Deutlich wird die hauptsächlich ackerbauliche Nutzung des Oberrheintieflands und des Reinheimer Hügellands. Der Anbau von Sonderkulturen konzentriert sich um die Städte Groß-Gerau, Darmstadt, Bensheim, Heppenheim sowie um Groß-Umstadt im Osten des Gebiets.

Abbildung 3.13: Landnutzung in der Untersuchungsregion



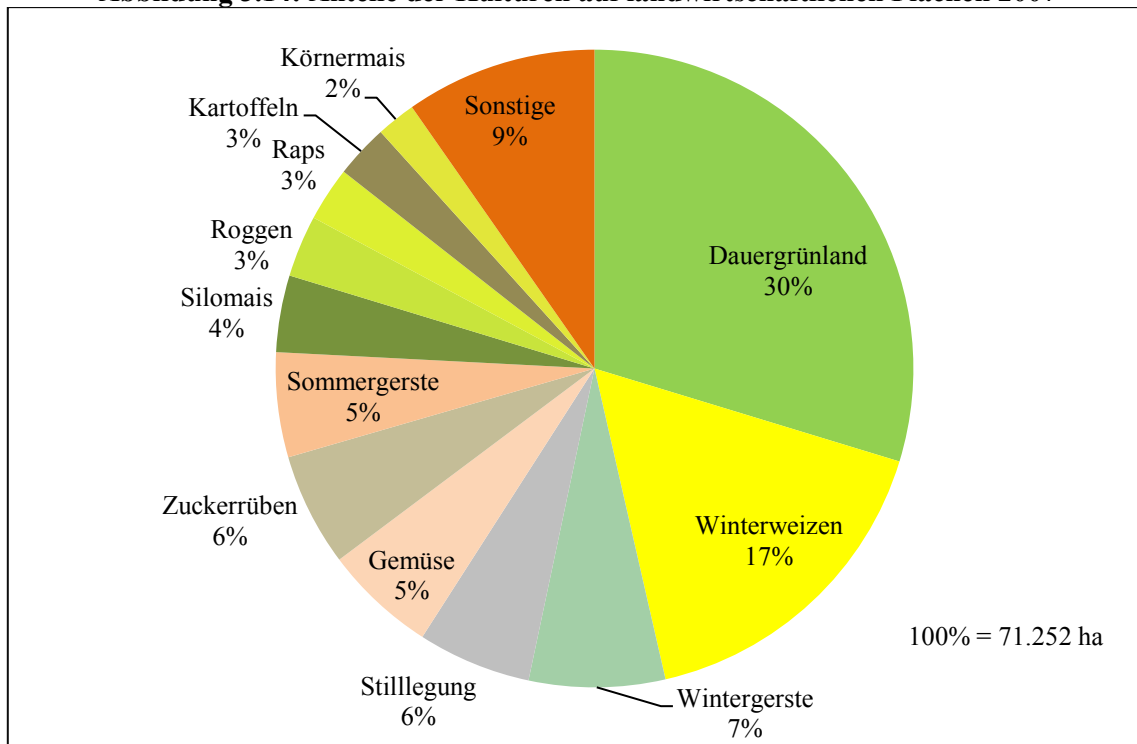
Quelle: Eigene Darstellung. Datengrundlage: ATKIS Basis-DLM Hessen, 2009.

Im Untersuchungsgebiet liegen 53.036 landwirtschaftliche Schläge mit einer Gesamtfläche von 71.252 ha. Die durchschnittliche Schlaggröße beträgt somit 1,34 ha. Die Kleinstrukturierung der Kulturlandschaft wird bei der Betrachtung der Schlaggrößenverteilung deutlich. So sind 6.100 landwirtschaftliche Schläge kleiner als 0,25 ha, 29.309 Schläge kleiner als 1 ha. Dies entspricht rund 55 % aller landwirtschaftlichen

Schläge in der Untersuchungsregion. 3.304 ha (606 Schläge) sind größer als 5 ha, davon wurden 824 ha (151 Schläge) als Grünland bewirtschaftet. Auf 730 ha (133 Schläge) wurde Winterweizen angebaut.

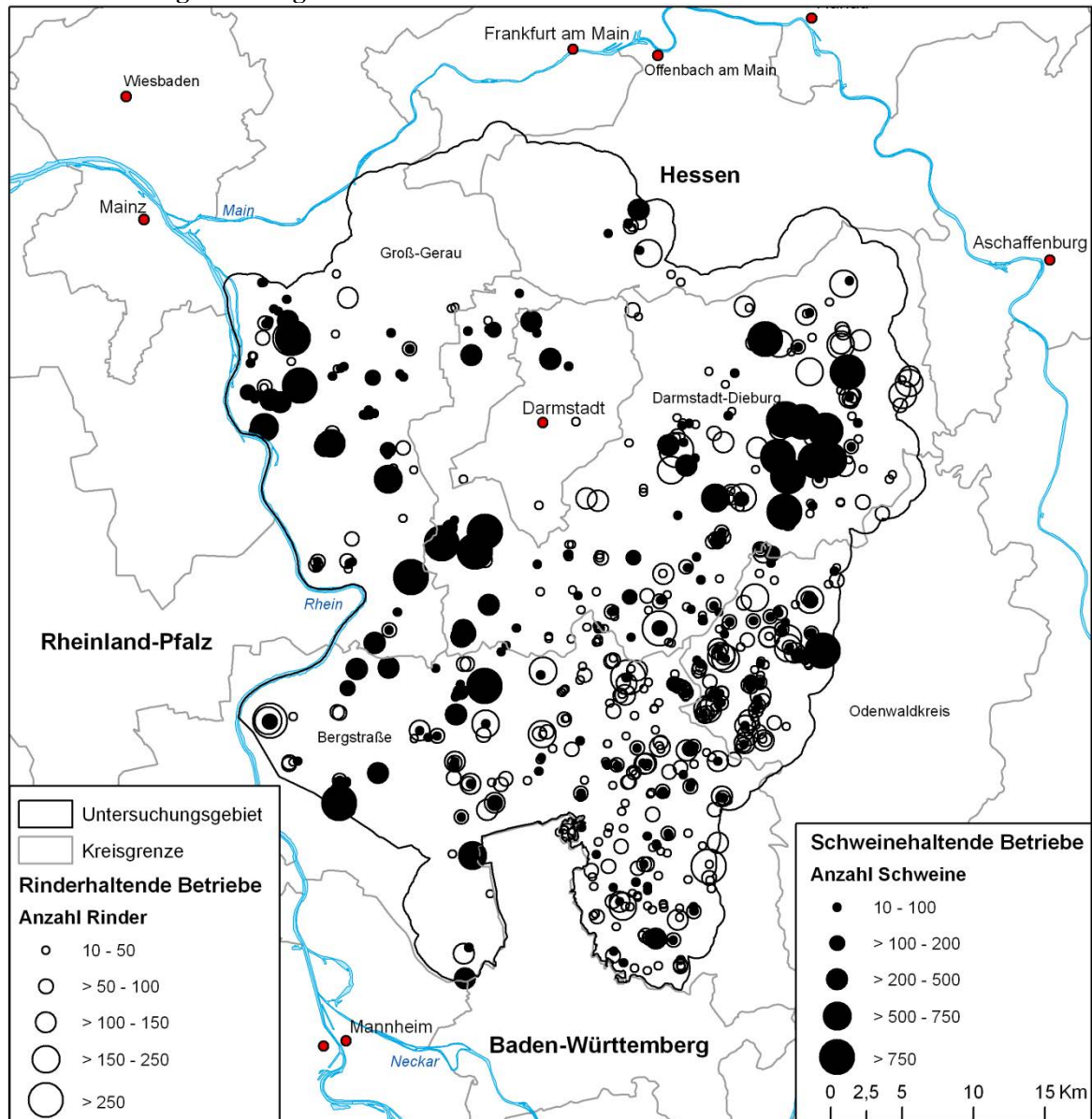
Die landwirtschaftliche Fläche im Untersuchungsgebiet wird zu 70 % als Ackerland und zu 30 % als Dauergrünland bewirtschaftet. Mit rund 38 % dominiert der Getreideanbau die landwirtschaftliche Fläche. Darunter ist Winterweizen mit 17 % die am häufigsten angebaute Kulturart, gefolgt von Wintergerste mit 7 %, Sommergerste mit 5 %, Silomais mit 4 %, Roggen mit 3 % sowie Körnermais mit 2 %. Die Nutzung der übrigen Ackerfläche ist stark diversifiziert und umfasst neben Zuckerrüben (6 %) und Raps (3 %) auch Kartoffeln (3 %), Gemüse (5 %) und sonstige Sonderkulturen (9%). Die Anteile der Kulturen auf der landwirtschaftlichen Fläche im Untersuchungsgebiet sind in Abbildung 3.14 dargestellt.

Abbildung 3.14: Anteile der Kulturen auf landwirtschaftlichen Flächen 2007



Quelle: Eigene Darstellung. Datengrundlage: Schlaggeometrien Hessen 2007. Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Wiesbaden. Vereinbarung Nr. 22 2008 0100.

Der Viehbesatz ist insgesamt niedrig und reicht von 0,3 GVE/ha landwirtschaftlicher Fläche im Kreis Groß-Gerau bis 1,1 GVE/ha landwirtschaftlicher Fläche im Odenwaldkreis. Wie Abbildung 3.15 verdeutlicht, dominieren im Westen und im Nordosten des Untersuchungsgebiets hauptsächlich größere schweinehaltende Betriebe, während im Osten und Südosten viele kleinere und mittelgroße rinderhaltende Betriebe ansässig sind.

Abbildung 3.15: Lage und Bestandszahlen rinder- und schweinehaltender Betriebe

Quelle: eigene Darstellung. Kartengrundlage: Amtliche Hauskoordinaten auf Basis des Liegenschaftskatasters des Landes Hessen, 2008 und Rinder- und Schweinebestände, 2008.

Eine besondere Situation der Bodenproduktion in der Region Starkenburg stellt die große Verbreitung der Feldberegnung dar, insbesondere im Hessischen Ried, einem der größten Gemüseanbauggebiete in Deutschland. Insgesamt wird die Fläche, die für eine Beregnung geeignet und technisch erschlossen ist, auf rund 49.000 ha geschätzt.

Es wird deutlich, dass das Untersuchungsgebiet hinsichtlich der naturräumlichen, klimatischen und wirtschaftlichen Gegebenheiten sehr heterogen ist. Damit entsteht ein Spannungsfeld, welches einerseits durch die guten Absatzmöglichkeiten für Energie aus nachwachsenden Rohstoffen geprägt ist und insbesondere zahlreiche Wärmenutzungsoptionen eröffnet. Andererseits führt der, durch die zahlreichen Landnutzungsalternativen ausgelöste, Konkurrenzdruck zu hohen Opportunitätskosten hinsichtlich der Substratbeschaffung. Folglich gilt es diese Rahmenbedingungen unter Zuhilfenahme von einer geeigneten

Datengrundlage ausreichend zu berücksichtigen. Das folgende Kapitel beschreibt die in den Modellen ProLand und ProSite verwendeten Daten sowie Maßnahmen der Datenaufbereitung.

3.7 Datengrundlagen und -aufbereitung

Primärdaten, d.h. nicht abgeleitete Daten, spielen bei der Landschaftsmodellierung eine zentrale Rolle. Schließlich basieren auf ihnen sämtliche neugenerierten Informationsebenen. Bis auf die Schlaggeometrien und nutzbaren Feldkapazitäten liegt der Großteil der in ProLand verwendeten Geodaten im Rasterformat vor. Das Rastermodell ist bei analytischen Anwendungen nicht nur durch die schneller arbeitenden Algorithmen von Vorteil, sondern ermöglicht aufgrund der einfachen Datenstruktur logische und algebraische Operationen. Aufgrund der Rasterung ist die logische Verknüpfung von zahlreichen Informationsebenen sowie die arithmetische Berechnung neuer Attributebenen möglich. ProSite nutzt neben Vektordaten zur Netzwerkanalyse und zur Berechnung von Einzugsgebieten auch die Vorteile der Rasterzellen, so dass die berechneten Puffergebiete, Korridore und Entfernungsoberflächen im Rasterformat vorliegen. Wichtig ist in diesem Zusammenhang die Rasterweite, denn mit der Abnahme der Auflösung ist auch eine Verringerung des Detailgrads und damit der Verlust feiner Strukturen verbunden (BLASCHKE & LANG, 2007). Bei der Standortsuche und -bewertung können Entfernungsdifferenzen von nur wenigen Metern, aufgrund der Gesetzeslage als auch der ökonomisch knapp bemessenen Handlungsspielräume, entscheidende Auswirkungen auf den Standort einer Anlage haben. Daher beträgt die im Modell ProSite gewählte Auflösung 20 m. Die Größe der Flächenelemente ist ebenfalls in Landnutzungsmodellen von entscheidender Bedeutung, denn eine zu grob gewählte Auflösung erzeugt hohe Aggregationsfehler und verzerrt somit die Ergebnisse der Landnutzungsmuster und Nutzungsintensitäten (KUHLMANN et al., 2002). Eine aktuelle Forschungsarbeit zu den Auswirkungen der Biogaserzeugung auf die Landnutzung in Deutschland bestätigt diesen Sachverhalt. Ist die Grundlage der Modellierung ein Satellitenbildraster mit einer Auflösung von 1 km², wie z.B. CORINE Landcover, so wird die Ackerfläche der gesamten Bundesrepublik um ca. 14 % überschätzt. Für die stark heterogene und kleinstrukturierte Untersuchungsregion Südhessen ergibt sich sogar eine Ackerflächensumme, die doppelt so groß ist wie die tatsächliche Flächensumme (KORNATZ, o.J.). Daher liegt den Datenbanken beider hier eingesetzter Modelle eine detaillierte Datenbasis zugrunde.

3.7.1 Aufbau und Aktualisierung der ProLand-Datenbanken

Zur Modellierung eines Untersuchungsgebiets, welches bisher mit ProLand nicht untersucht wurde, ist zunächst der Aufbau einer Standortdatenbank erforderlich. Die Standortdatenbank

ist das Ergebnis von zahlreichen räumlichen Verschneidungsoperationen, welche mittels des GIS „ArcGIS Desktop“ durchgeführt werden. Zum Aufbau der Standortdatenbank dienen außer Klima-, Boden-, und Geländedaten auch Daten der landwirtschaftlichen Nutzflächen.

Der Datensatz „Klimadaten BRD 1979 – 2006“ vom Deutschen Wetterdienst (DWD 2006) liefert Basisdaten zur Berechnung der mittleren monatlichen Niederschlagsmengen. Zudem dient dieser Datensatz als Quelle zur Bestimmung der durchschnittlichen Temperatursummen für die pflanzenspezifisch variierenden, ertragsbestimmenden Monate. Neben den Klimadaten kommen bedeckungsbezogene Bodengeometrien aus dem Datensatz „Digitale Bodenflächendaten 1:50.000“ (BFD50) vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG, 2003) zur Bestimmung der nutzbaren Feldkapazität und des Bearbeitungswiderstands zum Einsatz. Ein digitales Geländemodell vom Hessischen Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation dient als Grundlage zur Berechnung der Hangneigung im GIS mit der Erweiterung „Spatial Analyst“. Aus allen genannten Daten sind gewichtete Mittel gebildet worden, die sich auf die Schlaggeometrien aus dem Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem (InVeKoS) beziehen (HLUG, 2008). InVeKoS-Daten dienen der Abwicklung und Kontrolle von EU-Fördermaßnahmen in der Landwirtschaft und beinhalten u.a. neben der Lage und Geometrie von landwirtschaftlichen Parzellen auch Information zu der Nutzung bzw. der angebauten Kultur (siehe auch Kapitel 4.1.1). Die Struktur und Inhalte der Standortdatenbank sind in Tabelle 3.7 beschrieben.

Tabelle 3.7: Attribute der Standortdatenbank

Feldname	Beschreibung
FLIK	eindeutige Identifikationsnummer aus InVeKoS.
ID_OBJECT	eindeutige Identifikationsnummer des räumlichen Objekts, Verknüpfungsfeld für Ausgangsvektor des Modells.
LANDUSE	Identifikationsnummer exogener Landnutzungsklassifizierung; wird zur Auswahl der beplanbaren Standorte verwendet.
FIELD_SIZE	Durchschnittliche Feldstückgröße des Objekt; wenn räumliches Objekt identisch mit Schlag, dann ist Fieldsize gleich Objectsize.
OBJECT_SIZE	Größe des räumlichen Objekts (Schlags) in ha.
ID_REGION	Identifikationsnummer der Region, Verknüpfungsfeld zu Tabelle Pflanze. Bestimmt, welche Spezifikation der Kulturpflanze verwendet werden soll.
ID_TRANSFERREGION	Identifikationsnummer der Transferregion, Verknüpfungsfeld für Tabelle Transfers.
ID_SCHUTZGEBIET	Identifikationsnummer exogener Schutzgebietsklassifizierung; wird zur Auswahl der beplanbaren Standorte verwendet.
NFK	Nutzbare Feldkapazität in mm bis 100 cm Bodentiefe.
NS_JAN - NS_DEZ	Monatliche Niederschlagssumme in mm.
TEMP_JAN - TEMP_DEZ	Monatliche Summe der Tagesmitteltemperatur in °C.
SLOPE	Hangneigung in °.
WIDERSTAND	Bodenwiderstand in Kategorien leicht, mittel, schwer.
Shape_Length	ArcGIS Systemfeld, Objektumfang in m.
Shape_Area	ArcGIS Systemfeld, Objektgröße in m ² .

Quelle: Eigene Darstellung, z.T. vereinfacht nach SHERIDAN, 2010.

Die Berücksichtigung von Berechnungsflächen konnte aufgrund der lückenhaften Datengrundlage nicht erfolgen. Daher wird unterstellt, dass die Feldberechnung primär in den Gemüseanbaugebieten stattfindet, welche ohnehin aufgrund ihrer besonderen Stellung und Vorzüglichkeit nicht zur Modellierung freistehen (vgl. Abschnitte 3.2.2 und 4.1.1).

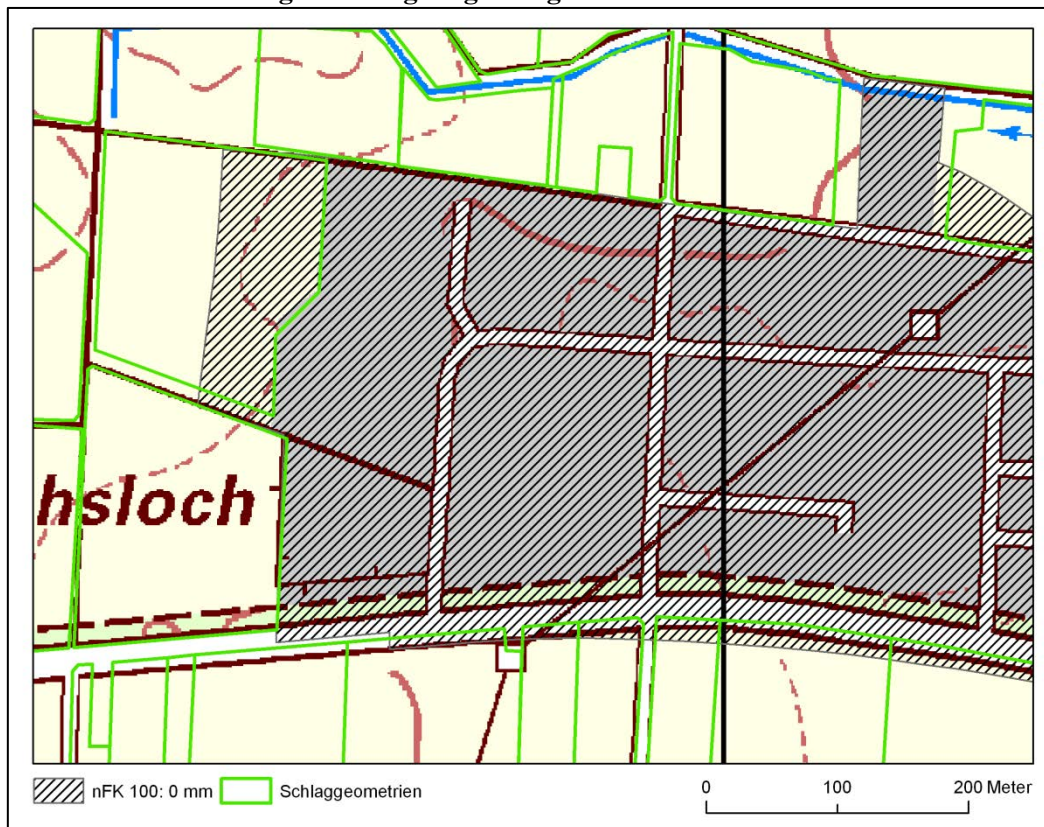
Zu Modellierungszwecken erfolgt eine Verknüpfung der Standortdatenbank mit der Verfahrensdatenbank von ProLand, die neben den Daten zu den Produktionsverfahren auch Preise und Berechnungsalgorithmen enthält. Insbesondere für die Bestimmung der monetären Leistungen ist eine Aktualisierung der Preiszeitreihen von ProLand erforderlich, welche mittels Zeitreihendaten der Zentralen Markt- und Preisberichtsstelle für Erzeugnisse der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft GmbH (ZMP, 2008) erfolgt. Auch beim Aufbau der Standortdatenbank ergibt sich die Notwendigkeit der Datenaktualisierung, wie im folgenden Abschnitt exemplarisch anhand der Daten zur nutzbaren Feldkapazität beschrieben ist.

3.7.2 Korrektur der nutzbaren Feldkapazität

Im Bereich der Informatik existiert die prägnante Redensart „garbage in, garbage out“ (GIGO). Im Falle von räumlichen Analysen bedeutet dies, dass aus qualitativ minderwertigen Daten kein gutes Ergebnis erzeugt werden kann. Neben der lagebezogenen Genauigkeit ist deshalb auch die Fehlerlosigkeit der zugewiesenen Attribute wichtig. Daher gilt es jeden verwendeten Geodatenatz auf diese beiden Inkonsistenzen zu prüfen. Neben kleineren

Fehlern innerhalb des Datensatzes „Klimadaten BRD 1979 bis 2006“ ergibt sich insbesondere im Datensatz Bodenflächendaten (BFD 50), welcher zur Ermittlung der schlagspezifischen nutzbaren Feldkapazität in 100 cm Bodentiefe (nFK 100) dient, folgende Fehlerquelle. Im Datensatz BFD 50 liegen für bebauten Flächen keine nFK-Werte vor. Versiegelte Flächen haben daher den nFK-Wert „0“. Siedlungsflächen überlagern aufgrund von Digitalisierungsungenauigkeiten bzw. aus Gründen unterschiedlicher Datenaktualität des vorliegenden Bodenflächendatensatzes jedoch in 3745 Fällen die landwirtschaftlichen Flächen aus dem Datensatz Schlaggeometrien. Die Lageungenauigkeit der Bodendaten lässt sich anhand der Digitalen Topographischen Karte (DTK 25) belegen, wie Abbildung 3.16 verdeutlicht.

Abbildung 3.16: Lageungenauigkeit der Bodenflächendaten



Quelle: Eigene Darstellung, Kartengrundlage DTK 25, Schlaggeometrien Hessen, 2007 und BFD 50, 2003. Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Wiesbaden. Vereinbarung Nr. 22 2008 0100.

Deutlich erkennbar ist die Abweichung der nach DTK 25 grau dargestellten, tatsächlichen überbauten Siedlungsfläche von der laut Bodenflächendaten ausgewiesenen überbauten Fläche mit einer nFK von 0, welche in Abbildung 3.16 schraffiert dargestellt ist.

Die Überlagerung von Siedlungsflächen und Schlaggeometrien bewirkt bei der Bildung des gewichteten schlagspezifischen Mittels der nFK-Werte ein verfälschtes Ergebnis, so dass die ausgewiesenen nFK-Werte der betroffenen Parzellen zu gering sind. Die nFK-Werte wirken sich direkt auf die Ertragspotentialschätzung aus. Somit prognostiziert das Modell ProLand für die

betroffenen Schläge zu geringe Erträge. Allen betroffenen Schlägen erhalten daher unter der Annahme, dass keine wesentliche Änderung der Bodeneigenschaften innerhalb der Teilstücke erfolgt, über Aktualisierungsabfragen in der Standortdatenbank des Modells ProLand die nFK-Werte der benachbarten Schlagfragmente. Die Vorgehensweise soll anhand des folgenden Beispiels näher erläutert werden.

Abbildung 3.17: Lageungenauigkeit der schlagspezifischen nFK-Werte



Quelle: Eigene Darstellung. Kartengrundlage: Schlaggeometrien Hessen, 2007 und BFD 50, 2003. Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Wiesbaden. Vereinbarung Nr. 22 2008 0100.

Der in der Abbildung 3.17 oben links dargestellte Schlag hat eine Fläche von 2,9 ha. Das linke Teilstück des Schlags liegt mit rund 0,6 ha auf einem Boden mit einer nFK von 142,69 mm. 0,9 ha des linken Teilstücks weist einen nFK-Wert von 133,5 mm auf. Das rechte Teilstück (schraffiert) mit einer Fläche von 1,3 ha hat eine nFK von 0 mm. Das gewichtete Mittel der nFK beträgt folglich 73,2 mm. Ausgehend von der Annahme, dass die Siedlungsflächen falsch digitalisiert und die landwirtschaftlichen Flächen nicht auf bebauten Böden, in diesem Fall Siedlungsflächen liegen, wird dem rechten Teilstück das gewichtete Mittel des linken Teilstücks zugeordnet, so dass die nFK des Schlags von ursprünglich 73,2 auf 137,1 mm ansteigt. Diese Vorgehensweise wurde für alle 3.745 betroffenen Schläge

durchgeführt. Eine weitere Fehlerquelle im Datensatz Bodenflächendaten ergibt sich dadurch, dass 340 Schläge einen nFK-Wert in Höhe von 0 mm aufweisen. Die Prüfung der betroffenen Schläge macht deutlich, dass es sich bei allen Flächen um landwirtschaftliche Parzellen handelt, die vollständig innerhalb der falsch ausgewiesenen Siedlungsflächen liegen. Die Berechnung von Ertragspotentialen und somit auch eine Landnutzungsprognose wären in diesen Fällen nicht möglich. Zur Korrektur dieses Fehlers erhalten die 340 betroffenen Parzellen die gewichteten nFK-Werte der nächstgelegenen landwirtschaftlichen Nutzfläche.

3.7.3 Aufbau der ProSite-Geodatenbank

Die Geodatenbank von ProSite enthält alle Daten, die zur Bestimmung der restriktiven und selektiven Faktoren nötig sind. Der Großteil der Daten stammt aus dem amtlichen topographisch-kartographischen Informationssystem (ATKIS). ATKIS ist ein im Vektorformat vorliegendes digitales Landschaftsmodell, welches als Basisdatenbestand fungiert und hauptsächlich zur Verknüpfung mit weiteren Fachdaten dient (De Lange, 2002). Die restriktiven Faktoren befestigte Verkehrswege, Gewässer, Naturschutzgebiete, Infrastruktur, überbaute Gebiete, Wald, Wasserschutzgebiete, Wohnbauflächen und sonstige Flächen stammen aus dem ATKIS-Bestand. In diesen Fällen gilt es entsprechend des Objektartenkatalogs diejenigen Geoobjekte zu selektieren, die eine Bebauung verhindern (siehe Kapitel 4.2.1 und Anhang 8.2).

Im Fall der Erdgasnetze ergänzen Daten des Projektpartners das ATKIS-Datenmodell. So besteht der in der ProSite-Datenbank verwendete Datensatz sowohl aus Leitungsnetzen, die aus ATKIS stammen als auch aus den Netzplänen des Projektpartners. Die Lage der Erdgasleitungen ist für die Bestimmung der restriktiven Ebene insofern von Bedeutung, als dass die Gasleitungen in einem Abstand von 100 m aus Sicherheitsgründen nicht von Biogasanlagen überbaut werden dürfen (MA et al., 2005).

Die Standorte bestehender Biogasanlagen des Projektpartners und deren Einzugsgebiete stehen ebenfalls nicht für neue Anlagen zur Verfügung. Die Koordinaten der Anlagen stammen von der HSE. Die Einzugsgebietsermittlung erfolgt anhand einer Netzwerkanalyse der Verkehrsinfrastruktur (siehe Abschnitt 3.5.1, 4.1.2 u. 4.2.2).

Als weiteres Kriterium mit Ausschlussfunktion ist eine Hangsteigung von über 15 % definiert. Sämtliche Flächen mit einer Steigung von über 15 % sind aufgrund der erhöhten Bau- und Betriebskosten für Biogasanlagen ungeeignet. Die Ermittlung der Hangsteigung basiert auf dem amtlichen digitalen Geländemodell mit einer Rasterweite von 25 m (DGM 25). In einem separaten Berechnungsschritt wird mittels der Geoverarbeitungsfunktion „Slope“ aus dem

Höhenmodell eine Steigungskarte berechnet. Anschließend werden die Wertebereiche von 0 bis 15 % Steigung als geeignet und alle Werte über 15% als ungeeignet klassifiziert.

Der für die Ermittlung der restriktiven Faktoren bereits verwendete ATKIS-Datensatz dient ebenfalls als Quelle zur Verortung einiger selektiver Faktoren. So dienen die Stromleitungen als Einspeisepunkte für den in den Blockheizkraftwerken der Biogasanlagen produzierten Strom. Gleichzeitig begünstigt die Nähe zu den Leitungen die Versorgung der Anlagen mit elektrischem Strom. Zwar könnte die für den Biogasproduktionsprozess benötigte Energie auch aus dem Kraftwerk der Anlage entnommen werden, allerdings sprechen die Bezugskosten für konventionellen Strom gegenüber den entgangenen Nutzen der Einspeisevergütung gegen eine Eigenversorgung (BÖSS, 2008).

Außer den Stromleitungen ist auch das Verkehrsnetz aus ATKIS entnommen. Die Auswahl der geeigneten Straßentypen umfasst sämtliche Verkehrswege außer Bundesautobahnen. Folglich sind in der ProSite-Datenbank alle Bundes-, Landes-, Kreis- und Gemeindestraße abgelegt. Für biomethanproduzierende Anlagen ist die Nähe zum Erdgasnetz unabdingbar. So hat der vom Projektpartner zur Verfügung gestellte Datensatz nicht nur restriktive Wirkung, sondern ist gleichzeitig ein selektiver Faktor.

Um die Versorgung der Anlagen mit Substraten zu gewährleisten, ist die Nähe von ackerbaulichen Produktionsflächen notwendig, die für den Anbau von Energiemais geeignet sind. Die Informationen über die Lage und Verteilung der Flächen basieren auf dem InVeKos-Datensatz, welcher zur Bestimmung der Vorzüglichkeit und Naturalerträge mit dem Modell ProSite aufbereitet wurde.

Zur Lokalisation der Verfügbarkeit von Gülle dienen Daten der hessischen Tierseuchenkasse (HTSK, 2008). Der zur Verfügung gestellte Datensatz bezieht sich auf alle in den Kreisen Frankfurt am Main, Offenbach, Groß-Gerau, Darmstadt-Dieburg, Darmstadt, Bergstraße und Odenwaldkreis liegenden rinder- und schweinehaltenden Betriebe. Neben der Anzahl der Rinder und Schweine ist auch die Anschrift der Betriebsstätten, bestehend aus Postleitzahl, Orts- und Straßennamen sowie Hausnummer, enthalten. Im Einzelnen enthält der Datensatz Angaben über 848 schweinehaltende sowie 1144 rinderhaltende Betriebe. Für eine Verortung zum Zwecke der Standortanalyse reichen diese Angaben jedoch nicht aus, da sie nicht geocodiert sind, d.h. keine Koordinaten enthalten. Daher erfolgt eine Geocodierung unter Zuhilfenahme des Datensatzes „Georeferenzierte Gebäudeadressen“ (auch „Amtliche Hauskoordinaten“ genannt), welcher von der hessischen Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (HVBG, 2008) stammt und neben der Anschrift auch die Koordinaten

von Gebäuden enthält. Die Geocodierung ermöglicht durch eine Verknüpfung der in beiden Datensätzen vorkommenden Adresse sowohl die Ermittlung der Koordinaten der Betriebe als auch die dort vorkommende Anzahl an Rindern und Schweinen (siehe Abschnitt 3.6.).

Für konventionelle Biogasanlagen tritt anstelle der Gasleitung als selektives Kriterium die Nähe zu Wärmeabnehmern. Dieser Faktor ist insofern erforderlich, als dass beim Betrieb einer Biogasanlage Wärmenutzungskonzepte aus Gründen der Effizienz und Wirtschaftlichkeit gegeben sein sollten. Die entsprechenden Geodaten stammen ebenfalls aus dem ATKIS-Datensatz. Als potentielle Wärmenachfrager kommen baulich geprägte Flächen mit besonderer Funktion wie z.B. Krankenhäuser, Schulen, Universitäten, Kasernen sowie Gärtnereien in Frage, wobei quantifizierte Angaben zum Energiebedarf dieser Einrichtungen nicht vorliegen.

Der letzte Datensatz beinhaltet einen aus den ATKIS-Polylinien berechneten Netzwerkdatensatz, auf dessen Grundlage die Kalkulation der Einzugsgebiete erfolgt. Hierfür werden lediglich die für den Biomassetransport geeigneten Verkehrswege selektiert. So stehen z.B. Autobahnen und Wirtschaftswege innerhalb von Waldflächen nicht zur Verfügung. Zudem sind ebenfalls die Einzugsgebiete in Form von Polygonen in der Datenbank abgelegt.

4 Ergebnisse

Dieses Kapitel beschreibt die Ergebnisse der längerfristig zu erwartenden Auswirkungen des EEG auf das Landnutzungsmuster und die Wirtschaftlichkeit der Landnutzung in der Untersuchungsregion Südhessen. Zunächst erfolgt die Bestimmung einer Ausgangssituation als Vergleichsbasis. Anschließend werden die Ergebnisse der räumlich expliziten, d.h. auf jeden landwirtschaftlichen Schlag der Untersuchungsregion bezogenen Berechnungen der Modelle ProLand und ProSite näher vorgestellt. Die Ergebnisse sind entsprechend der Zielvorgaben in mehrere Szenarien gegliedert. Es sei darauf hingewiesen, dass die durchgeführten Prognosen und Modellierungen erst aufgrund von vereinfachenden Annahmen realisiert werden konnten. Diese Vereinfachung, gekoppelt mit der Visualisierung der gewonnenen Daten anhand von Karten, ermöglicht einen Überblick über die komplexen Sachverhalte. BLASCHKE & LANG (2007, S. 293) betonen: „Modellbildung und Simulation können von ihrem Potenzial her eine wesentliche Grundlage bei Planungs- und Entscheidungsprozessen bilden, in dem sie Zusammenhänge verdeutlichen und visualisieren, welche zum Teil so komplex sind, dass sie von Entscheidungsträgern und Betroffenen nur selten in Gänze erfasst werden.“ Leistungsfähige und raumbezogene Modelle ermöglichen dabei die flexible Darstellung von denkbaren Szenarien (ebd.). Die vorliegende Arbeit versteht unter dem Begriff Szenario die plausible Beschreibung eines zukünftigen Zustands, der sich aus bestimmten, gegenüber der Ausgangslage veränderten Rahmenbedingungen ergibt. Im Sinne der hier relevanten Fragestellung gestatten Szenarien weiterführende Analysen und quantifizierte Bewertungen möglicher zukünftiger Effekte der Biogasproduktion in Südhessen.

4.1 Landnutzungsprognosen mit dem Modell ProLand

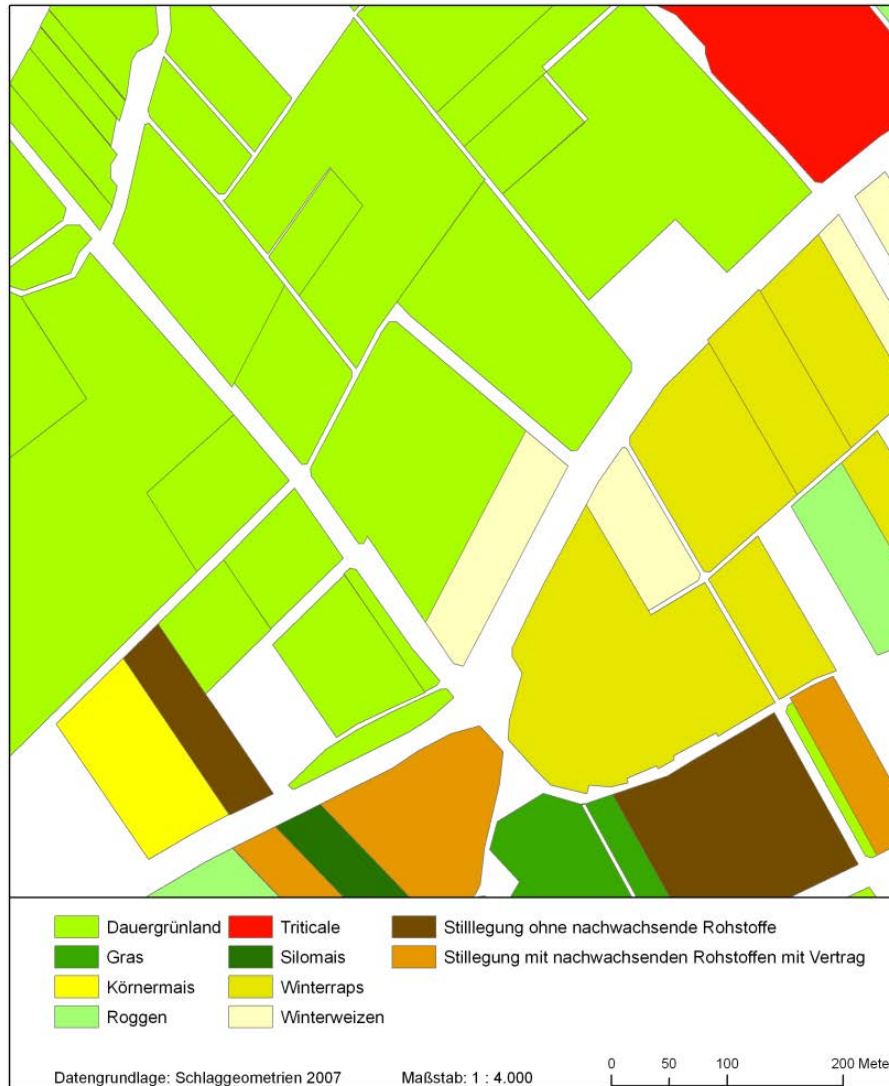
Um eine Aussage hinsichtlich der Auswirkungen einer steigenden Nachfrage nach Bioenergiepflanzen auf die Landnutzung sowie auf die landwirtschaftliche Beschäftigung treffen zu können, ist zunächst die Bestimmung der Vorzüglichkeit aller Landnutzungsaktivitäten gemessen an den Erwartungswerten ihrer Bodenrente nötig. Anschließend erfolgt die Auswahl der bodenrentenmaximalen Alternativen sowie die schlaggenaue Verortung der optimalen Landnutzungsprogramme. Je nach Fragestellung ist das Modell ProLand in der Lage unterschiedliche Rahmenbedingungen in Form von Szenarien zu berücksichtigen und prognostische Aussagen zu ökonomischen Kennzahlen der Landnutzung zu kalkulieren. Grundsätzlich gilt es dabei für jedes Szenario ein Referenzszenario zu schaffen, welches die Vergleichbarkeit der Modellierungsergebnisse

gewährleistet. Diese Referenz erfolgt in Form von einer Bewertung der momentanen Landnutzung vorzunehmen, wie der folgende Abschnitt näher erläutert.

4.1.1 Definition der Ausgangssituation

Zur Bewertung der Landnutzungsänderungen ist ein Vergleich der Modellprognosen mit dem Ausgangszustand notwendig. Daher ist der erste Schritt sämtlicher Modellierungsversuche die Festlegung einer Ausgangssituation, die als Vergleichsbasis für weitere Berechnungen dient. Die Ausgangssituation verdeutlicht räumlich explizit das aktuelle Vorkommen von Kulturpflanzen auf den landwirtschaftlichen Schlägen und ermöglicht mit den im Modell ProLand hinterlegten schlagspezifischen Informationen aus der Standortdatenbank sowie den landwirtschaftlichen Produktionsverfahren aus der Datenbank Landnutzungssysteme die Berechnung von ökonomischen Kennzahlen wie z.B. der Bodenrente. Aus der gegenwärtigen Landnutzung ist ein Flächennutzungs- bzw. Ackerflächenverhältnis zu erstellen. Dieses Anbauverhältnis gilt es in der Ausgangssituation möglichst realitätsnah abzubilden, um somit eine Voraussetzung für die ökonomische Bewertung der gegenwärtigen ackerbaulichen Landnutzung durch das Modell ProLand zu schaffen.

Die Bestimmung der aktuellen Landnutzung erfolgt unter Zuhilfenahme des vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie zur Verfügung gestellten Datensatzes „Schlaggeometrien“ (HLUG, 2007). Der Datensatz beinhaltet neben der geometrischen Form auch die geographische Lage der landwirtschaftlichen Schläge sowie eine differenzierte Aufschlüsselung nach Kulturart bzw. Nutzung. Wie in Abbildung 4.1 zu erkennen ist, handelt es sich bei dem Geodatensatz Schlaggeometrien lediglich um eine Momentaufnahme, die verdeutlicht, welche Einzelfrüchte auf den Schlägen im Jahre 2007 angebaut wurden.

Abbildung 4.1: Ausschnitt aus dem Geodatenatz Schlaggeometrien

Quelle: Eigene Darstellung. Kartengrundlage: Schlaggeometrien Hessen, 2007. Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Wiesbaden. Vereinbarung Nr. 22 2008 0100.

Aus dieser schlagspezifischen Momentaufnahme wird für jede landwirtschaftliche Nutzfläche eine plausible Fruchtfolge ermittelt. Zwar sind zur Durchführung einer ökonomischen Bewertung mit dem Modell ProLand prinzipiell auch Flächenanteile geeignet, dennoch wird in der vorliegenden Arbeit ein auf Fruchtfolgen basierender Ansatz gewählt, da diese Anforderung an das Modell ProLand von Seiten der nachgelagerten Modelle aus dem ITE²M-Modellverbund definiert wurde (siehe Abschnitt 3.2.2).

Annuelle Ackerpflanzen werden aufgrund von integrierend wirkenden Kräften in Fruchtfolgen angebaut (BRINKMANN, 1922). Ihr Auftreten ist somit sowohl zeit- als auch raumvariant. Daher kann der Datensatz in der vorliegenden Ausprägung nicht ohne weitere Bearbeitung verwendet werden. Folglich gilt es zunächst Fruchtfolgen zu generieren, die die tatsächlichen Anteile der einzelnen Früchte in der Untersuchungsregion widerspiegeln. Dazu erfolgt die Berechnung der Flächensummen und aus diesen abgeleitet die Ermittlung der

prozentualen Anteile aller ackerbaulichen Kulturarten. Die Anteile der wichtigsten Ackerkulturen ohne Stilllegungsflächen und Sonderkulturflächen sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Eine Tabelle aller Kulturarten bzw. Nutzungen auf den landwirtschaftlichen Flächen in der Untersuchungsregion ist in Anhang 8.1 enthalten.

Tabelle 4.1: Flächensummen und Anteile der wichtigsten ackerbaulichen Kulturarten in der Untersuchungsregion

Kulturart	Fläche in ha	Anteil
Kartoffeln	1.930,6	5%
Körnermais	1.422,2	4%
Roggen	2.230,6	6%
Silomais	2.771,8	7%
Sommergerste	3.783,6	9%
Wintergerste	4.914,9	12%
Winterraps	1.959,3	5%
Winterweizen	11.907,9	30%
Zuckerrüben	4.088,9	10%
Sonstige	4.994,9	12%
Summe	40.004,8	100%

Quelle: Eigene Darstellung vereinfacht und ergänzt nach Schlaggeometrien Hessen (2007), Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Wiesbaden. Vereinbarung Nr. 22 2008 0100.

Abstrahiert man von der Betriebsebene, so handelt es sich bei den dargestellten Anteilen um das Anbauverhältnis der Untersuchungsregion. Das Anbauverhältnis bezieht sich auf die, meist annuellen, Ackererzeugnisse und wird über die Anteile der Ackerfrüchte an der Ackerfläche definiert (KUHLMANN, 2004). Nachdem das Anbauverhältnis der Untersuchungsregion bekannt ist, gilt es Fruchtfolgen zu definieren, die dieses Verhältnis realistisch widerspiegeln. Diese Fruchtfolgen müssen die in Tabelle 4.1 genannten Kulturarten enthalten und zur Vermeidung von Monokulturen und damit verbundener Probleme wie z.B. Schädlingsdruck die Bedingung erfüllen, dass nach einer Anbauperiode mit Blattfrucht mindestens eine, besser zwei Perioden mit Halmfrüchten folgen. Unter Berücksichtigung dieser Bedingungen sind die in Tabelle 4.2 aufgeführten Fruchtfolgeglieder ermittelt worden.

Tabelle 4.2: Fruchtfolgeglieder zur Ermittlung der Ausgangssituation

Fruchtfolgegliednr.	Blattfrucht	Halmfrucht	Halmfrucht
1	Zuckerrübe (ZR)	Winterweizen (WW)	Wintergerste (WG)
2	Zuckerrübe (ZR)	Winterweizen (WW)	Sommergerste (SG)
3	Kartoffel (Ka)	Winterweizen (WW)	-
4	Silomais (SM)	Winterweizen (WW)	Wintergerste (WG)
5	Körnermais (KM)	Winterweizen (WW)	Sommergerste (SG)
6	Raps (Ra)	Winterweizen (WW)	Roggen (Ro)

Quelle: Eigene Darstellung.

Aus den Anteilen der Ackerkulturen (Tabelle 4.1) und den Fruchtfolgegliedern (Abbildung 4.2) ergeben sich die in Tabelle 4.3 genannten Fruchtfolgen.

Tabelle 4.3: Regionalfruchtfolgen der Ausgangssituation

Fruchtfolgenr. (ID_FF aus ProLand)	Fruchtfolgegliedernr.	Kulturen und zeitliche Abfolge
300	1 und 4	ZR, WW, WG, SM, WW, WG
400	2 und 5	ZR, WW, SG, KM, WW, SG
500	3 und 6	Ka, WW, Ra, WW, Ro

Quelle: Eigene Darstellung.

Zwar sind auch andere Kombinationen der Fruchtfolgeglieder aus Tabelle 4.2 möglich, allerdings hat die vorgenommene Zuordnung der Fruchtfolgen einen entscheidenden Vorteil. Bei der folgenden Zuweisung der Flächenanteile ergibt sich eine gute Übereinstimmung der Anteile der Einzelfrüchte im Vergleich mit dem Anbauverhältnis in der Untersuchungsregion. Zur Verteilung der in Tabelle 4.3 genannten Fruchtfolgen auf die Flächen wird angenommen, dass alle Flächen, auf denen im Jahr 2007 Silomais oder Wintergerste angebaut wurde, zur Fruchtfolge 300 gehören. Auf allen Ackerflächen, auf denen Körnermais oder Sommergerste vorkamen, zählen zu Fruchtfolge 400. Flächen, die mit Kartoffeln, Raps oder Roggen bestellt waren, entsprechen Fruchtfolge 500. Somit enthalten die Fruchtfolgen alle in Tabelle 4.1 genannten Kulturarten. Darüber hinaus müssen die Anteile der Einzelfrüchte in der Summe den Anteilen der Situation von 2007 entsprechen. Betrug z.B. der Anteil der Kartoffel im Jahr 2007 rund 5 % der Ackerfläche, so muss dieser Anteil auch in der Ausgangssituation gewährleistet sein. Die einzige Fruchtfolge, in der die Kartoffel enthalten ist, ist die Fruchtfolge 500. Sie besteht zu 1/5 aus Kartoffel. Da der Anteil der Kartoffel in der Ausgangssituation dem Stand von 2007, d.h. rund 5 % Anbauverhältnis auf einer Fläche von 1.930,6 ha entsprechen soll (siehe Tabelle 4.1), ist die Fruchtfolge 500 auf rund 9.977 ha auszudehnen. Diese Anteile gelten somit auch für Raps und Roggen, die lediglich in der Fruchtfolge 500 zu finden sind. 2/5 der Fruchtfolgenr. 500 macht Winterweizen aus, dies bedeutet, dass ca. 3.990 ha Winterweizen in dieser Fruchtfolge enthalten sind.

Tabelle 4.4: Anteile der Kulturen der Fruchtfolge 500

Kultur	Anteil	Anteil in ha	Anbauumfang der Fruchtfolge in ha
Kartoffel	1/5	1.995,40	9.976,98
Winterweizen	2/5	3.990,78	9.976,98
Raps	1/5	1.995,40	9.976,98
Roggen	1/5	1.995,40	9.976,98

Quelle: Eigene Darstellung.

Somit ist der Anteil von Weizen noch nicht erschöpft, wohingegen die Kulturen Kartoffel, Raps und Roggen vollständig verteilt sind (vergleiche Tabelle 4.1). Dieses Vorgehen wird für

die restlichen Kulturen und Fruchtfolgen angewendet. Daraus resultiert die in Tabelle 4.5 dargestellte Situation.

Tabelle 4.5: Kulturen und ihre Anteile im Vergleich

Kultur	2007		Ausgangssituation	
	Fläche in ha	Anteil	Fläche in ha	Anteil
Kartoffeln	1.930,6	5%	1.995,4	5%
Körnermais	1.422,2	4%	1.761,2	4%
Raps	1.959,3	5%	1.995,4	5%
Roggen	2.230,6	6%	1.995,4	5%
Silomais	2.771,8	7%	2.408,3	6%
Sommergerste	3.783,6	9%	3.522,3	9%
Wintergerste	4.914,9	12%	4.816,6	12%
Winterweizen	11.907,9	30%	12.329,7	31%
Zuckerrüben	4.088,9	10%	4.169,4	10%
Sonstige	4.994,9	12%	5.011,2	13%
Summe	40.004,8	100%	40.004,8	100%

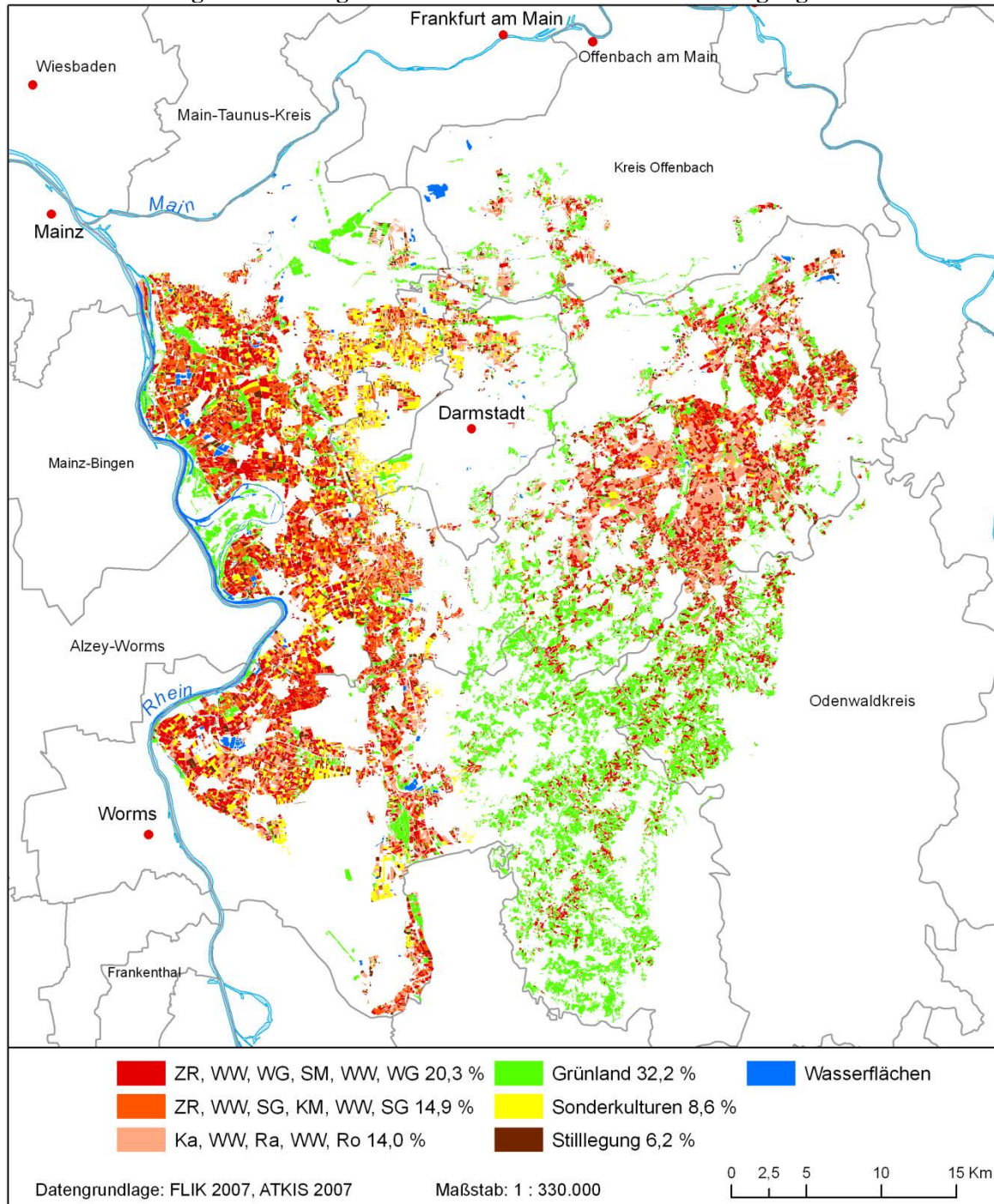
Quelle: Eigene Darstellung.

Es ergeben sich bei diesem Vorgehen gewisse Abweichungen, insbesondere bei Körnermais, Silomais und Winterweizen, jedoch ist der Fehler von max. 420 ha Abweichung bezogen auf die Gesamtsumme gering. Zudem dient die Ausgangssituation als Vergleichsgrundlage für weitere Berechnungen, wobei die Relationen zwischen Ausgangssituation und den Prognoserechnungen und weniger die absoluten Werte zwischen dem Ist-Stand 2007 und der errechneten Ausgangssituation relevant sind.

Die Anteile der Kulturpflanzen in den Regionalfruchtfolgen bilden in Summe die aus den Schlaggeometrien bekannten Flächennutzungsanteile ab. Die Regionalfruchtfolgen aus Tabelle 4.3 berücksichtigen Kulturpflanzen wie z.B. Hafer oder Ackerbohne nicht. Dies hängt einerseits mit den geringen Flächenanteilen (1,08 % Hafer; 0,04 % Ackerbohne; siehe Anhang 8.1) solcher Kulturen zusammen. Andererseits ist das Vorkommen dieser Kulturen stark an bestimmte Abnehmer, wie beispielsweise die Pferdezucht gebunden, deren räumliche Verteilung und Nachfragepotential jedoch nicht bekannt sind.

Nach der Definition der Regionalfruchtfolgen ordnet das Modell die Fruchtfolgen den Standorten zu, auf denen sie die jeweils höchste Bodenrente erzielen. Der Anbauumfang der einzelnen Fruchtfolgen wird dabei insofern limitiert, als dass die darin enthaltenen Kulturen nicht beliebig ausgedehnt werden, sondern die im rechten Teil von Tabelle 4.5 genannten Anteile erfüllen. Das Ergebnis der räumlichen Zuordnung ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

Abbildung 4.2: Nutzung der Landwirtschaftsfläche in der Ausgangssituation



Quelle: Eigene Darstellung auf der Grundlage von Berechnung mit ProLand. Datengrundlage: Schlaggeometrien Hessen 2007. Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Wiesbaden. Vereinbarung Nr. 22 2008 0100.

Deutlich zu erkennen ist die Konzentration der Zuckerrüben-Fruchtfolgen im westlichen Teil des Untersuchungsgebiets, während die Fruchtfolge mit Kartoffeln eher im Reinheimer Hügelland und in der Untermainebene im Nordosten des Untersuchungsgebiets zu finden ist. Grünland, Sonderkulturen und Stilllegungsflächen stehen in der Ausgangssituation nicht zur Modellierung frei. Neben der räumlich expliziten Zuordnung der Regionalfruchtfolgen zu den landwirtschaftlichen Schlägen ermittelt das Modell ProLand noch eine Vielzahl an

ökonomischen Kennzahlen, die solch eine Zuweisung überhaupt erst ermöglichen. Die wichtigsten Parameter Fruchtfolgen, Anbauanteile, Bodenrente und Arbeitskraftstunden der Ausgangssituation sind in Tabelle 4.6 in aggregierter a-räumlicher Form aufgeführt.

Tabelle 4.6: Kennzahlen der Ausgangssituation

ID_FF	Fruchtfolge	Anteil in ha	Anteil in %	Bodenrente in €	Arbeitskraft- stunden
300	ZR, WW, WG, SM, WW, WG	14.449,64	41,3	6.045.809,35	160.791
400	ZR, WW, SG, KM, WW, SG	10.566,94	30,2	4.169.964,85	96.362
500	Ka, WW, Ra, WW, Ro	9.976,98	28,5	12.780.593,98	136.854
	Zwischensumme	34.993,56	100,0	22.996.368,18	394.007
	Sonstige	5.011,24			
	Summe	40.004,8			

Quelle: Eigene Darstellung.

Die Kennzahlen der Ausgangssituation werden für die folgenden Landnutzungsprognosen als Vergleichsgrößen verwendet.

4.1.2 Szenario „punktuelle Nachfrage“

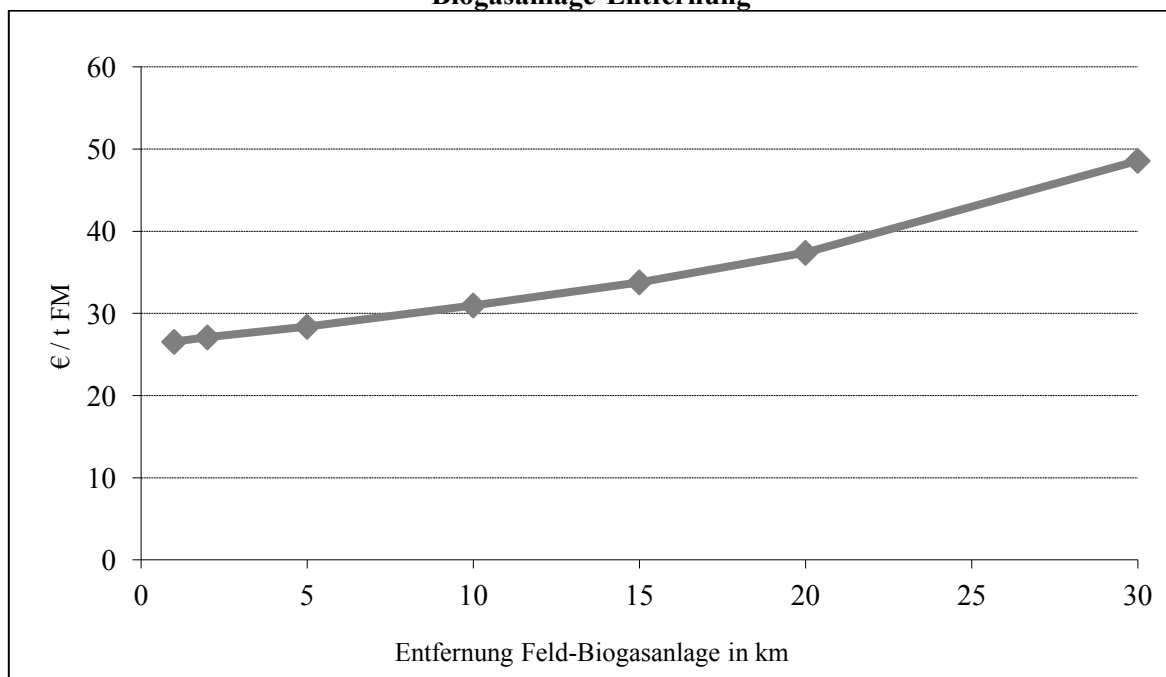
Zur Verdeutlichung der Ergebnisse der Landnutzungsprognosen des Modells ProLand dient eine Gegenüberstellung der Ausprägung der prognostizierten Landnutzung mit der bestehenden Landnutzung. Aus der Differenz zwischen den Kennzahlen der bestehenden Landnutzung und der prognostizierten Kennzahlen lässt sich quantifizieren, welche Auswirkungen mit einer bestimmten Maßnahme einhergehen. Ziel der folgenden Landnutzungsprognosen ist demzufolge nicht nur die Bewertung der zukünftigen Landnutzung mittels der verfügbaren Indikatoren des Modells ProLand, sondern darüber hinaus die anschließende Betrachtung der Differenzen zwischen Ausgangssituation und Modellierungsergebnis.

Die Beschreibung der Modellierungsversuche erfolgt entsprechend der Reihenfolge der Teilziele (vgl. Abschnitt 1.1) Das erste Teilziel erfordert unter der Annahme, dass lediglich die vom Industriepartner projektierten Biogasanlagen als Nachfrager für Bioenergiepflanzen vorhanden sind, sowohl die Bestimmung der relativen Vorzüglichkeit des Anbaus von Energiepflanzen zur Nutzung in Biogasanlagen als auch die Quantifizierung der Effekte auf das Landnutzungsmuster und die Landnutzungsintensität sowie auf die landwirtschaftliche Beschäftigung und das Einkommen (SFB 299, 2007). Im Folgenden wird dieses Szenario „punktuelle Nachfrage“ genannt.

In diesem Szenario sind die Standorte der Biogasanlagen vorgegeben, so dass zunächst die Bestimmung der Substrateinzugsgebiete nötig ist. Es wird angenommen, dass der Transport von Silomais nur auf Landstraßen, sowie auf Wirtschaftswegen außerhalb von Waldflächen

stattfindet. Die maximale Transportentfernung vom Feld zur Anlage beträgt 12,5 km, wie vom Projektpartner vorgegeben. Es ist zu anmerken, dass die gegebene maximale Transportentfernung aus Berechnungen erfolgt, die aufzeigen bis zu welcher Entfernung gerade noch Kostendeckung erreicht wird. Die ermittelte Entfernung ist eine Funktion der Einspeisevergütung und der Anlagenkosten und in diesem Fall vom Kooperationspartner festgelegt. Die zur Analyse benötigten Informationen über die Verkehrsinfrastruktur und die Landnutzung liegen als Geodaten aus dem amtlichen topographisch-kartographischen Informationssystem (ATKIS, 2007) vor. Die Anlagenstandorte sind vom Industriepartner vorgegeben. Unter Zuhilfenahme der Erweiterung „Network Analyst“ des geographischen Informationssystems „ArcGIS Desktop“ erfolgt die Definition der Einzugsgebiete unter Berücksichtigung der genannten Parameter. Die Einzugsgebiete der drei Biogasanlagen sind in Abbildung 4.4 (S. 83) als graue Flächen dargestellt. Zudem kalkuliert das Modell ProSite für jeden Schlag innerhalb der Einzugsgebiete der drei Biogasanlagen die einfache Wegstreckenentfernung vom Feld zur nächstgelegenen Anlage entlang der vorhandenen Transportnetze. Die Entfernungsangaben ermöglichen gemeinsam mit den aus dem Modell ProLand prognostizierten Ertragswerten die Berechnung der Transportkosten. Aufgrund des hohen Wassergehaltes von Silomais ist seine geringe Transportwürdigkeit begründet, so dass steigende Transportentfernungen zu einem relativ starken Anstieg der Substratkosten und somit der Stückkosten führen, wie Abbildung 4.3 illustriert.

Abbildung 4.3: Stückkosten der Silomaisproduktion (50 t FM/ha) in Abhängigkeit von der Feld-Biogasanlage-Entfernung



Quelle: eigene Darstellung, verändert nach Kuhlmann, 2010. Datengrundlage KTBL 2010.

Im Modell ProLand wird für das Anbauverfahren Silomais eine durchschnittliche Transportentfernung und somit durchschnittliche Transportkosten, unabhängig von der Feld-Hof-Entfernung unterstellt. Diese Annahme ist für die vorliegende Fragestellung nicht zulässig, da im Raum nur wenige Absatzmöglichkeiten für Energiemais existieren und gleichzeitig die Transportkostenintensität des Anbauverfahrens hoch ist. Daher erfolgt die Bestimmung der Transportkosten je tatsächlich zurückgelegtem Tonnenkilometer (tkm). Die zusätzlich ermittelten Transportkosten, d.h. der Kostenaufschlag für die Beförderung des Häckselguts vom Feld zur Anlage, sind für ein mittleres Ertragsniveau von 50 t FM/ha mit 0,23 €/tkm beziffert. Es handelt sich dabei um einen Zuschlag auf die bereits im Modell ProLand im Produktionsverfahren „Silomais konventionell“ enthaltenen Erntekosten aus KTBL (2008, S. 293). Die Berechnung der Bodenrente für das im Modell ProLand neu definierte Verfahren Energiemais erfolgt gemäß Formel 4.1.

Formel 4.1: Bodenrentenberechnung für das Landnutzungssystem Energiemais

$$B_s = (E_s \times p_s) + T_s - (E_s \times K_{E_s}) - K_{F_s} - K_{B_s} - K_{H_s} - K_{T_s}$$

mit

B_s = Bodenrente des Landnutzungssystems Silomais in Geldeinheit je Flächeneinheit

E_s = Naturalertrag des Landnutzungssystems Silomais in Masseinheit je Flächeneinheit

p_s = Produktpreis des Landnutzungssystems Silomais in Geldeinheit je Masseinheit

T_s = Transferzahlung des Landnutzungssystems Silomais in Geldeinheit je Flächeneinheit

K_{E_s} = Ertragsabhängige Produktionskosten des Landnutzungssystems Silomais in Geldeinheit je Masseinheit

K_{F_s} = Flächenabhängige Produktionskosten des Landnutzungssystems Silomais in Geldeinheit je Flächeneinheit

K_{B_s} = Bodenartenabhängige Produktionskosten des Landnutzungssystems Silomais in Geldeinheit je Flächeneinheit

K_{H_s} = Hangneigungsabhängige Produktionskosten des Landnutzungssystems Silomais in Geldeinheit je Grad Hangneigung

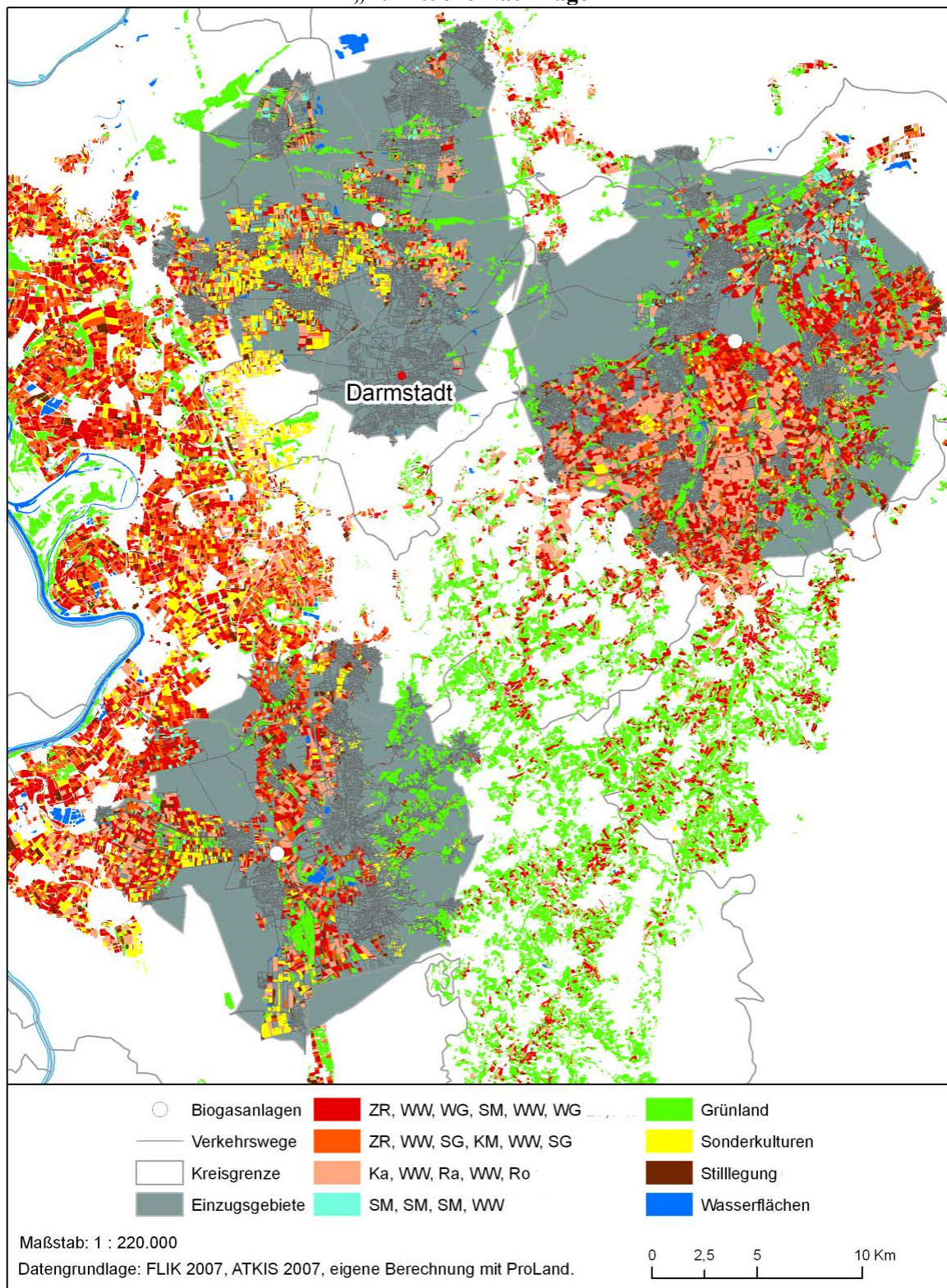
K_{T_s} = Transportkosten des Landnutzungssystems Silomais in Geldeinheit je Tonnenkilometer

Die räumlich explizit vorliegenden Erträge ermöglichen in Kombination mit den ermittelten Wegstreckenentfernungen und der Zuweisung der Anbauflächen zu der nächstgelegenen Biogasanlage die Bestimmung der Bodenrente des Anbauverfahrens Energiemais und zwar für jeden Schlag innerhalb der Einzugsgebiete abzüglich der Transportkosten. Die Berechnung der ökonomischen Vorzüglichkeit der benutzerdefinierten, nicht zur

Biogasproduktion verwendeten Fruchtfolgen Nr. 601 bis 627 (siehe Tabelle 3.3, S. 36) erfolgt für das gesamte Untersuchungsgebiet wie in der Ausgangssituation beschrieben, während innerhalb der Einzugsgebiete der Biogasanlage des Projektpartners auch die Energiemaisfruchtfolgen „Silomais, Silomais gefolgt von Winterweizen“ sowie „Silomais, Silomais, Silomais gefolgt von Winterweizen“ zur Auswahl stehen. Der Anbauumfang dieser Fruchtfolgen ist auf den Bedarf der zugehörigen Biogasanlage limitiert.

Abbildung 4.4 illustriert die Lage der Anlagenstandorte sowie die Ausdehnung der Einzugsgebiete. Zudem stellt die Abbildung die Landnutzung gemäß der Ausgangssituation dar (vgl. auch Abbildung 4.2). Innerhalb der Einzugsgebiete ist außerdem die Auswahl der vorzüglichen Standorte der bodenrentenmaximalen Fruchtfolge „Silomais, Silomais, Silomais, Winterweizen“, welche aus der Berücksichtigung der spezifischen Transportkosten resultiert, zu erkennen.

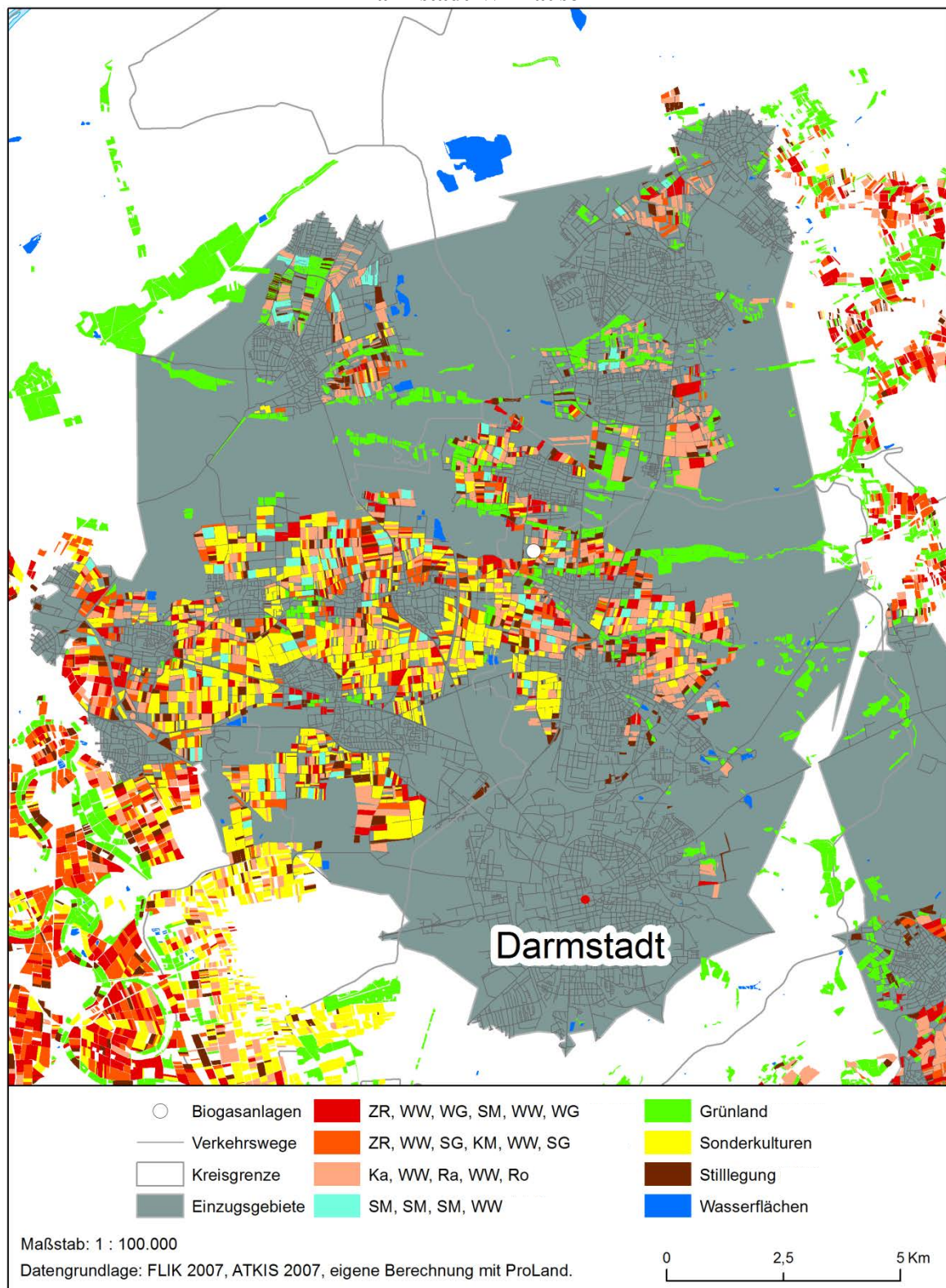
Abbildung 4.4: Einzugsgebiete und Nutzung der Landwirtschaftsfläche des Szenarios „Punktueller Nachfrage“



Quelle: Eigene Darstellung. Datengrundlage: Schlaggeometrien Hessen, 2007 und ATKIS Basis-DLM, 2009. Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Wiesbaden. Vereinbarung Nr. 22 2008 0100.

Zur deutlicheren Anschauung zeigen die Abbildungen 4.5 bis 4.7 die Simulationsergebnisse in den einzelnen Einzugsgebieten in einem größeren Maßstab.

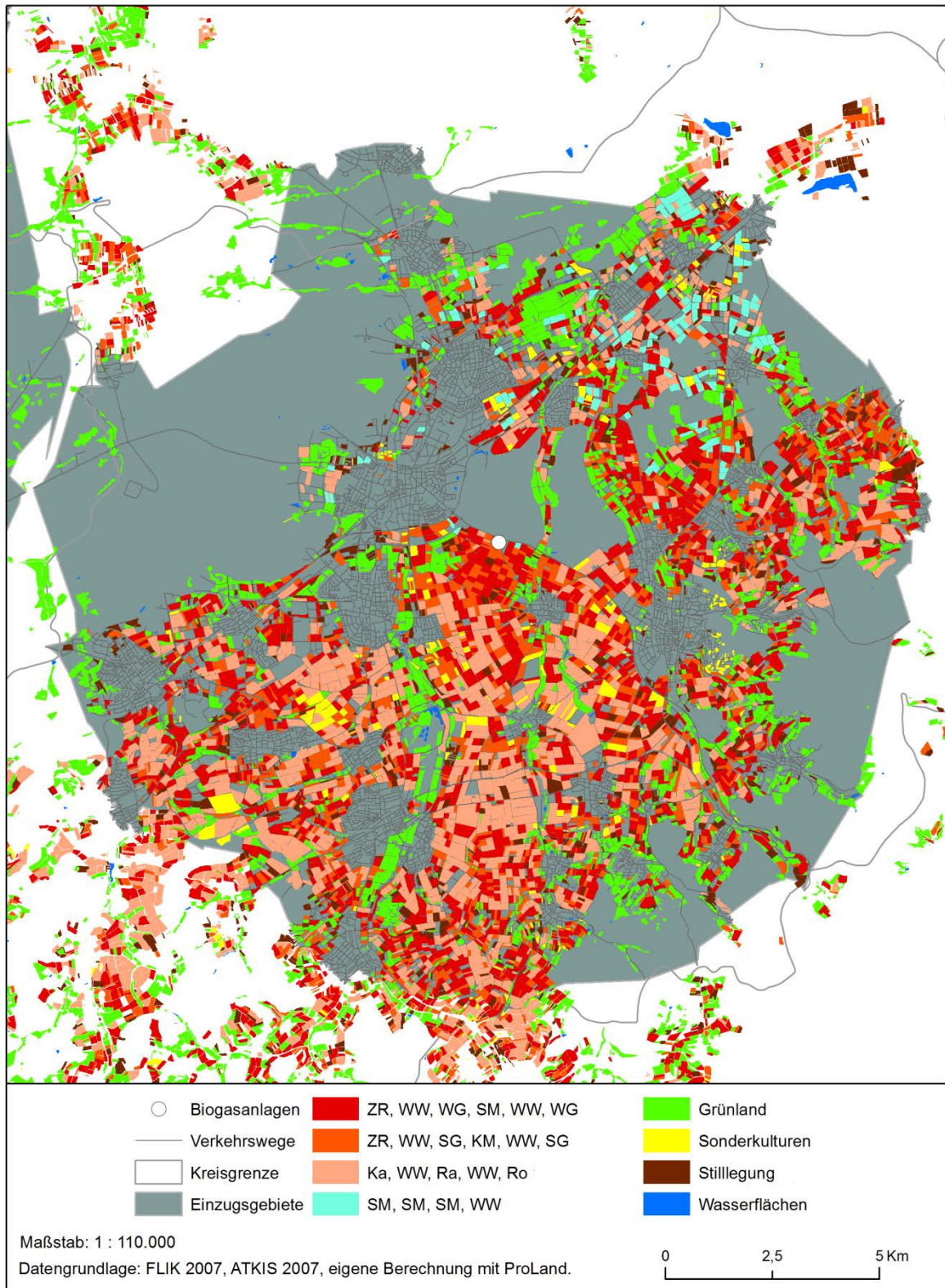
Abbildung 4.5: Nutzung der Landwirtschaftsfläche im Einzugsgebiet der Biogasanlage Darmstadt-Wixhausen



Quelle: Eigene Darstellung. Datengrundlage: Schlaggeometrien Hessen, 2007 und ATKIS Basis-DLM, 2009. Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Wiesbaden. Vereinbarung Nr. 22 2008 0100.

Die Verteilung der Silomaisflächen im Einzugsgebiet der Biogasanlage Darmstadt-Wixhausen stellt sich homogen dar. Die Anbaustandorte reichen vom Rand des Einzugsgebiets bis in die unmittelbare Nähe der Biogasanlage. Eine Konzentration auf einen

oder wenige Bereiche ist nicht erkennbar. Dieses Verteilungsmuster war in dieser Form nicht zu erwarten. Vielmehr müssten aufgrund der hohen Transportkostenintensität vorzügliche Standorte für den Anbau von Energiemais ringförmig und in unmittelbarer Nähe der Anlage ausgewiesen werden. Die Ursache der gleichmäßigen Verteilung der Energiemaisanbauflächen liegt an dem mit 24,7 % relativ hohen Anteil der Sonderkulturen im Einzugsgebiet der Anlage, die gegenüber dem Energiemais vorzüglich sind und daher dem Verdrängungseffekt nicht unterliegen.

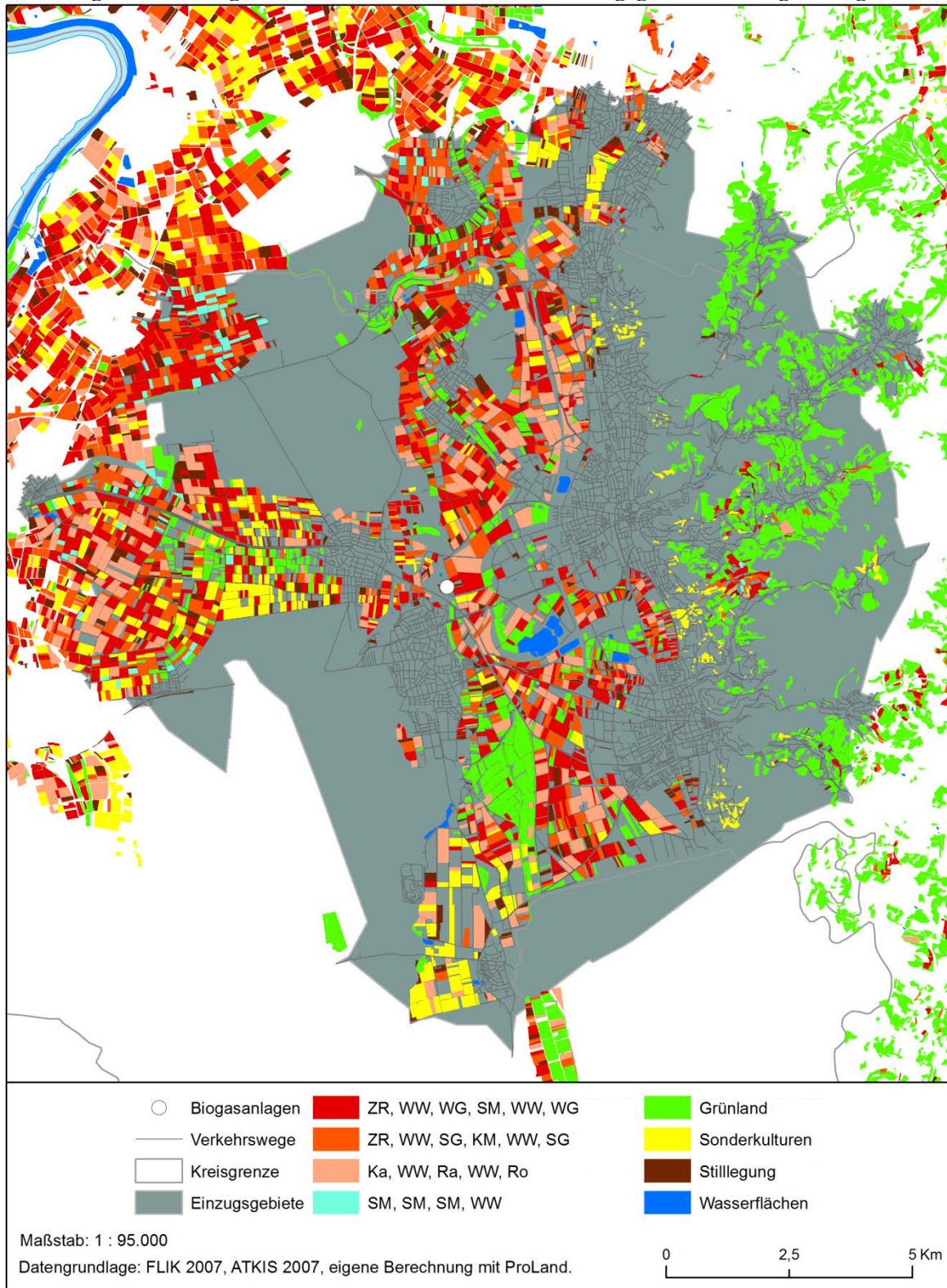
Abbildung 4.6: Nutzung der Landwirtschaftsfläche im Einzugsgebiet der Biogasanlage Semd

Quelle: Eigene Darstellung. Datengrundlage: Schlaggeometrien Hessen, 2007 und ATKIS Basis-DLM, 2009. Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Wiesbaden. Vereinbarung Nr. 22 2008 0100.

Die Anbausituation im Einzugsgebiet der Biogasanlage Semd hingegen ist zweigeteilt. Während südlich der Anlage die Zuckerrüben- und Kartoffel-Fruchtfolgen dominieren, sind Fruchtfolgen mit Silomais fast ausschließlich im nördlichen Bereich zu finden. Einzelne

Energiemaisflächen liegen unweit des Anlagenstandorts direkt in westlicher und östlicher Richtung. Aufgrund der Vorzüglichkeit der Kartoffel- und Zuckerrübenfruchtfolgen, ist ähnlich wie im Ergebnis der Anlage Darmstadt-Wixhausen auch im Einzugsgebiet der Anlage Semd der Anbau von Energiemais nicht ausschließlich in unmittelbarer Nähe der Anlage vorzüglich. Die höheren Transportkosten der weiter entfernt liegenden Anbauflächen relativieren die mit der natürlichen Standortgunst einhergehenden Vorteile nicht.

Abbildung 4.7: Nutzung der Landwirtschaftsfläche im Einzugsgebiet der Biogasanlage Lorsch



Quelle: Eigene Darstellung. Datengrundlage: Schlaggeometrien Hessen, 2007 und ATKIS Basis-DLM, 2009. Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Wiesbaden. Vereinbarung Nr. 22 2008 0100.

Die Silomaisflächen im Einzugsgebiet der Biogasanlage Lorsch sind ebenfalls ungleichmäßig verteilt. Eine Konzentration des Silomaisanbaus ist am äußersten Rand im Nordwesten zu erwarten. Zudem liegen vorzügliche Flächen hauptsächlich am Rand des Einzugsgebiets im

Norden sowie auch im Westen. Vereinzelt sind vorzügliche Energiemaisbaustandorte östlich der Anlage zu finden. Im Einzugsgebiet sind sowohl hohe Anteile an Zuckerrüben- und Kartoffel Fruchtfolgen als auch Sonderkulturen vorhanden. Diese Kulturen sind gegenüber dem Energiemais vorzüglich, so dass in diesem Fall ebenfalls kein konzentrierter Anbau im direkten Umkreis der Anlage prognostiziert wird.

Die Kennzahlen des Szenarios „Punktueller Nachfrage“ sind im Vergleich zu den Kennzahlen der Ausgangssituation in Tabelle 4.7 aufgelistet.

Tabelle 4.7: Kennzahlen Ausgangssituation im Vergleich zum Szenario „punktueller Nachfrage“

	Ausgangssituation	Punktueller Nachfrage	Veränderung
Ackerflächenverhältnis	in % der AF	in % der AF	in %
Körnermais	5,03	4,93	-0,1
Raps	5,7	5,5	-0,2
Roggen	5,7	5,5	-0,2
Silomais	6,88	8,46	1,58
Sommergerste	10,07	9,87	-0,2
Speisekartoffeln	5,70	5,5	-0,2
Wintergerste	13,76	13,56	-0,2
Winterweizen	35,23	34,98	-0,25
Zuckerrüben	11,91	11,71	-0,2
Maisanteil an der AF in %	11,91	13,39	1,48
Maisanteil an der LF in %	6,32	7,22	0,9
Ø Bodenrente ¹ der AF in €*ha ⁻¹ *a ⁻¹	657,16	687,22	4,57
Ø Arbeit ² auf der AF in Akh*ha ⁻¹ *a ⁻¹	11,26	12,05	7,03
¹⁾ inkl. Flächenprämie (302,00 €/ha) und ohne Betriebsgemeinkostenanteil			
²⁾ für die Produktionsverfahren			

Quelle: Eigene Darstellung, Berechnungen mit ProLand.

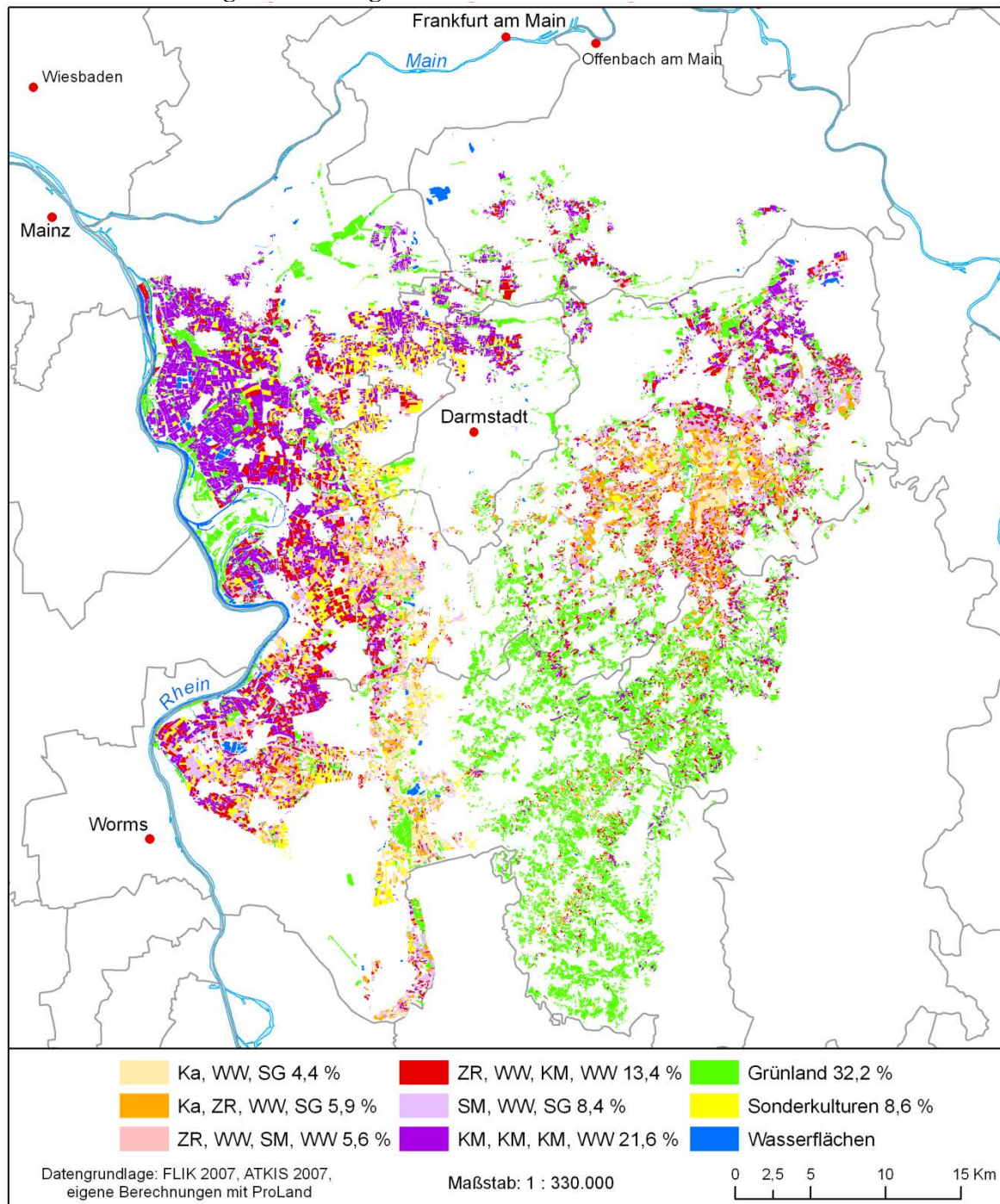
Zu erkennen ist eine Zunahme des Ackerflächenanteils von Silomais in Höhe von rund 1,6 % und die damit verbundene Erhöhung der durchschnittlichen jährlichen Bodenrente in der Region um rund 30 € pro Hektar. Die Arbeitszeit auf der Ackerfläche nimmt um rund 7 % zu. Es ist zu beachten, dass die hier vorgestellten Werte lediglich eine Aussage zu den Effekten auf der Ackerfläche und nicht im gesamtwirtschaftlichen Kontext zulassen. Der Gesamtanteil von Mais, d.h. Körner- und Silomais steigt in der Untersuchungsregion um ca. 1,5 % an.

4.1.3 Referenzszenario

Bevor die Bewertung der Auswirkungen einer flächenhaften Nachfrage nach Energiemais auf die Landnutzungsmuster und die landwirtschaftliche Produktion erfolgen kann, wird zunächst ein Vergleichsszenario benötigt. Dieses Referenzszenario beschreibt die zukünftige Landnutzung ohne zusätzliche flächendeckende energetische Pflanzenverwertung und dient zur Vergleichbarkeit der weiteren Modellierungsergebnisse. Aus den angebotenen Fruchtfolgen (vgl. Tabelle 3.3, S. 36) berechnet das Modell ProLand die Bodenrente auf

jedem Standort, wobei in diesem Szenario die Energiemaisfruchtfolgen Nr. 701 und 702 nicht zur Verfügung stehen. Das Ergebnis der Prognose ist in Abbildung 4.8 illustriert.

Abbildung 4.8: Nutzung der Landwirtschaftsfläche – Referenzszenario



Quelle: Eigene Darstellung. Datengrundlage: Schlaggeometrien Hessen, 2007. Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Wiesbaden. Vereinbarung Nr. 22 2008 0100.

Deutlich zu erkennen ist eine Ausdehnung des Körnermaisbaus in Form der Fruchtfolge „Körnermais, Körnermais, Körnermais gefolgt von Winterweizen“ sowohl im Westen, als auch im Norden und äußersten Nordosten des Untersuchungsgebiets. In Richtung Zentrum des Untersuchungsgebiets schließen sich Fruchtfolgen mit Zuckerrüben und Kartoffeln an. Der Anbauswerpunkt von Silomais für die bestehende Viehhaltung ist im Nordosten des

Untersuchungsgebiets in Form der Fruchtfolgen „Silomais, Winterweizen und Sommergerste“ zu finden. Tabelle 4.8 zeigt die wichtigsten Kennzahlen für das Referenzszenario im Vergleich zur Ausgangssituation.

Tabelle 4.8: Kennzahlen Ausgangssituation im Vergleich zum Referenzszenario

	Ausgangssituation	Referenzszenario	Veränderung
Flächennutzungsverhältnis	in % der LF	in % der LF	in %
Grünland	32,16	32,16	0
Sonderkulturen	8,61	8,61	0
Stilllegung	6,22	0,0	-6,22
Ackerfläche	53,22	59,23	6,01
Ackerflächenverhältnis	in % der AF	in % der AF	in %
Körnermais	5,03	32,98	27,95
Raps	5,7	0,0	-5,7
Roggen	5,7	0,0	-5,7
Silomais	6,88	7,10	0,22
Sommergerste	10,07	9,70	-0,37
Speisekartoffeln	5,7	4,95	-0,75
Wintergerste	13,76	0,00	-13,76
Winterweizen	35,23	34,80	-0,43
Zuckerrüben	11,91	10,47	-1,44
Maisanteil an der AF in %	11,91	40,08	28,17
Maisanteil an der LF in %	6,32	23,74	17,42
Ø Bodenrente ¹ der AF in €*ha ⁻¹ *a ⁻¹	657,16	737,75	12,26
Ø Arbeit ² auf der AF in Akh*ha ⁻¹ *a ⁻¹	11,26	11,07	-1,69
¹⁾ inkl. Flächenprämie (302,00 €/ha) und ohne Betriebsgemeinkostenanteil			
²⁾ für die Produktionsverfahren			

Quelle: Eigene Darstellung, Berechnung mit ProLand.

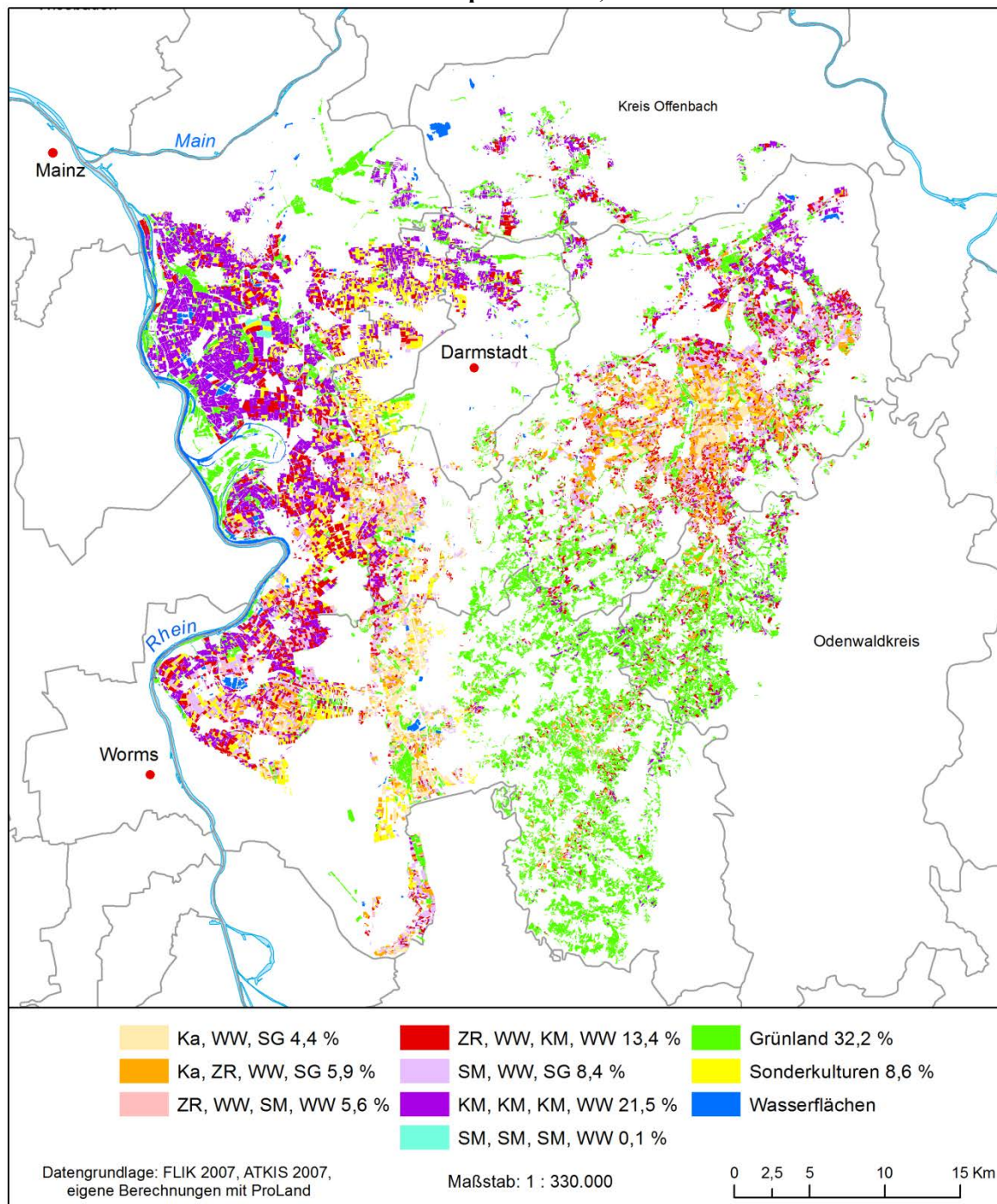
Das Flächennutzungsverhältnis steigt zu Gunsten der Ackerfläche, da in der Ausgangssituation noch Stilllegungsflächen vorhanden sind. Auf der Ackerfläche ist mit einer Ausdehnung des Körnermaisbaus zu rechnen. Der Körnermaisanteil erhöht sich zu Lasten der ertragsschwachen Getreidearten Wintergerste und Roggen sowie des in der Untersuchungsregion wenig vorzüglichen Rapses um rund 28 % auf ca. 33 % der Ackerfläche. Der Gesamtmaisanteil, d.h. der Anteil von Silo- und Körnermais steigt somit von rund aktuell 6 % auf ca. 24 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche der Untersuchungsregion an. Auf der Ackerfläche wird für die Bodenrente ein Anstieg von etwa 80 € je Hektar und Jahr bzw. eine Zunahme von rund 12,3 % prognostiziert, während die durchschnittlichen Arbeitsaufwände um rund 0,20 € pro Hektar und Jahr bzw. um ca. 1,7 % sinken. Auffallend ist in diesem Szenario die starke Ausdehnung des Maisbaus. Gründe für diese starke Zunahme sind in Kapitel 5 genannt.

4.1.4 Szenario „flächenhafte Nachfrage“

Nachdem zur Bewertung der Ergebnisse ein Vergleichsszenario vorliegt, erfolgt die Modellierung der Landnutzungsprognose unter Berücksichtigung der Vorgaben des zweiten

Teilziels: „Zweites Teilziel ist die Bestimmung der relativen Vorzüglichkeit des Anbaus von Bioenergiepflanzen zur energetischen Nutzung und die Quantifizierung der genannten Effekte bei flächenhafter Nachfrage, das heißt unter der Annahme, dass in der gesamten Region Biomasseveredelungsanlagen als Nachfrager von Bioenergiepflanzen zur Verfügung stehen“ (SFB 299, 2007, S. 31). In diesem Szenario wird Silomais nicht nur als Futterpflanze für die bestehende Viehhaltung, sondern zusätzlich auch als Energiepflanze zur Verwertung in Biogasanlagen angebaut, wobei davon ausgegangen wird, dass eine flächendeckende Nachfrage existiert, d.h. dass im gesamten Untersuchungsgebiet Biogasanlagen vorhanden sind. Der Umfang des Energiemaisanbaus hängt jedoch stark vom Produktpreis ab. Je höher der Preis für Energiemais, desto mehr Mais wird zu Ungunsten von anderen Kulturen angebaut. Die folgenden Preise gelten für die Tonne Frischmasse frei Anlage mit einem Trockenmassegehalt von 33 %. Während bei einem Preis in Höhe von 27,5 € der Energiemais nur auf 0,1 % der Ackerfläche vorzüglich ist, beträgt sein Anteil bei einem Preis von 32,5 € bereits 15,8 %. Die Abbildungen 4.9 bis 4.11 verdeutlichen diesen Zusammenhang. Wie Abbildung 4.9 zeigt, ist der Anbau von Energiemais bereits ab einem relativ geringen Preisniveau von 27,5 € auf ca. 0,1 % der Ackerflächen im Nordwesten des Untersuchungsgebiets vorzüglich. Die Vorzüglichkeit ist derart ausgeprägt, dass die bis dato bodenrentenmaximale, nicht limitierte Fruchtfolge „Körnermais, Körnermais, Körnermais gefolgt von Winterweizen“ verdrängt wird durch die Fruchtfolge „Silomais, Silomais, Silomais gefolgt von Winterweizen“.

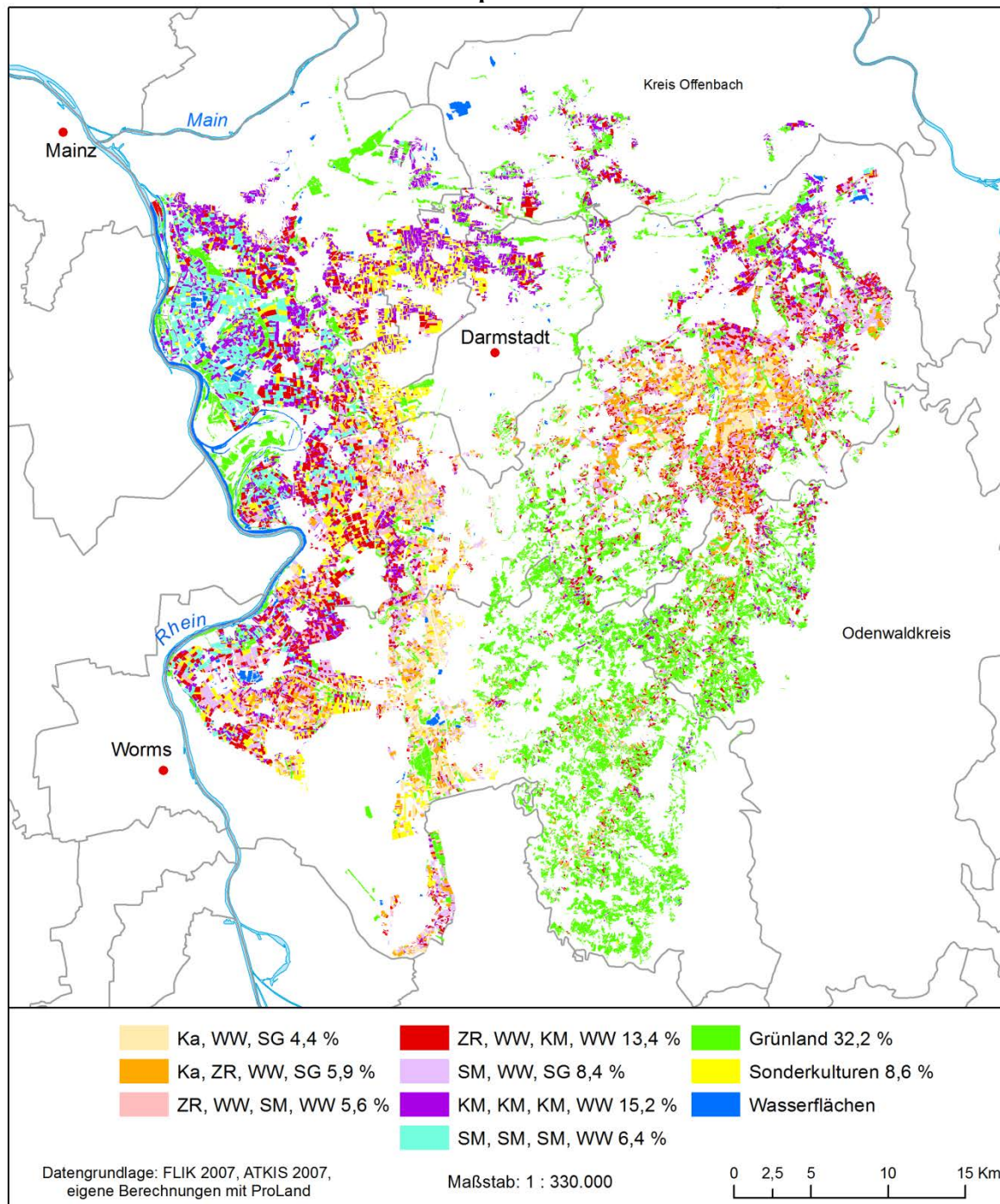
Abbildung 4.9: Nutzung der Landwirtschaftsfläche im Szenario „flächenhafte Nachfrage“ mit einem Silomaispreis von 27,5 €/t FM



Quelle: Eigene Darstellung. Datengrundlage: Schlaggeometrien Hessen, 2007. Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Wiesbaden. Vereinbarung Nr. 22 2008 0100.

Abbildung 4.10 illustriert die Landnutzungsprognose für den Fall, dass in der gesamten Untersuchungsregion Biogasanlagen als Nachfrager von Energiemais zur Verfügung stehen und hierfür einen Preis von 30 € anbieten. Vorzügliche Flächen für Energiemais sind demnach im Nordwesten zu finden. Auch im Südwesten, Nordosten und nördlich von Darmstadt ersetzen Energiemaisfruchtfolgen vereinzelt die Körnermaisfruchtfolgen. In etwa 6,4 % der Ackerfläche würde unter den gegebenen Preisannahmen auf die Fruchtfolge „Silomais, Silomais, Silomais gefolgt von Winterweizen“ entfallen.

Abbildung 4.10: Nutzung der Landwirtschaftsfläche im Szenario „flächenhafte Nachfrage“ mit einem Silomaispreis von 30 €/t FM

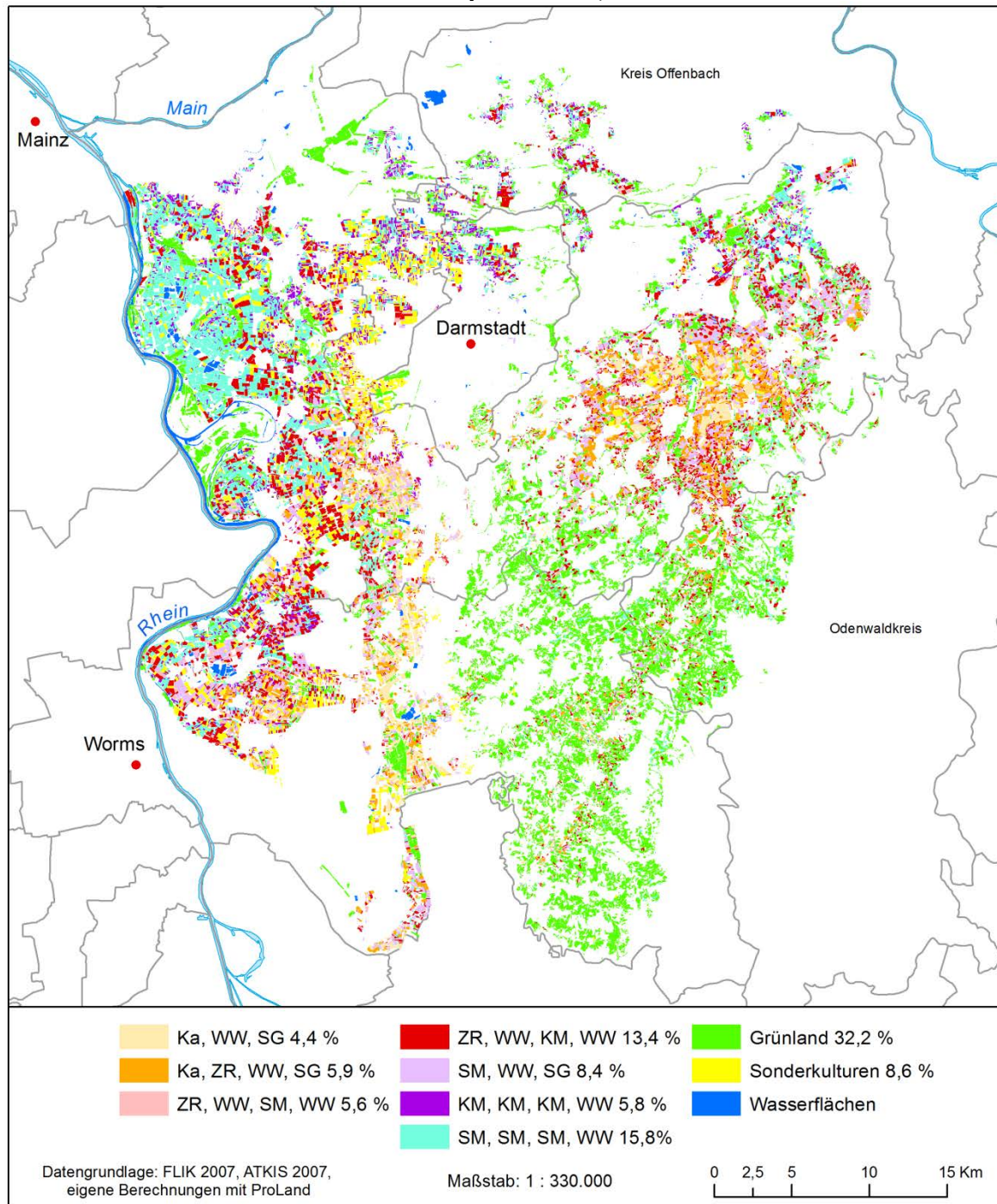


Quelle: Eigene Darstellung. Datengrundlage: Schlaggeometrien Hessen, 2007. Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Wiesbaden. Vereinbarung Nr. 22 2008 0100.

Die räumliche Auswirkung der dritten Berechnungsvariante mit einem Silomaispreis in Höhe von 32,5 € ist in Abbildung 4.11 dargestellt. In diesem Szenario konkurriert der Energiemais stärker mit dem Körnermais, so dass 15,2 % der Ackerfläche für den Anbau von Silomais und 6,4 % für den Anbau von Körnermais prognostiziert werden. Neben den Gebieten im Nordwesten des Untersuchungsgebiets findet auch im Südwesten sowie im Nordosten eine Ausdehnung der Energiemaisanbauflächen statt. Eine verstärkte Zunahme der Silo-

maisanteile ist auch nördlich von Darmstadt sowie in einem westlich entlang des Odenwalds verlaufenden Gebiet zu beobachten.

Abbildung 4.11: Nutzung der Landwirtschaftsfläche im Szenario „flächenhafte Nachfrage“ mit einem Silomaispreis von 32,5 €/t FM



Quelle: Eigene Darstellung. Datengrundlage: Schlaggeometrien Hessen, 2007. Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Wiesbaden. Vereinbarung Nr. 22 2008 0100.

Tabelle 4.9 fasst die Kennzahlen der drei Varianten im Vergleich zur Ausgangssituation und zum Referenzszenario zusammen. Der Körnermais geht gegenüber der Referenzsituation von

ca. 33 % auf rund 13 % zurück. Eine entgegengesetzte Entwicklung ist beim Silomais zu beobachten. Aufgrund der flächendeckenden Möglichkeit der energetischen Verwertung in Biogasanlagen steigt der Anteil von Silomais von ursprünglich rund 7 % der Ackerfläche auf ca. 27 % an. Der gesamte Maisanteil, d.h. Körner- und Silomais bleibt jedoch insgesamt mit etwa 24 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche konstant. Verglichen mit der Ausgangssituation ist allerdings ein Anstieg des gesamten Maisanteils von rund 6 % auf etwa 24 % der LF zu erkennen. Die durchschnittliche Bodenrente steigt gegenüber dem Referenzszenario, welches die flächendeckende Nutzung von Energiemais nicht vorsieht, von 738 €/ha auf 762 €/ha an. Gleichzeitig ist auf der Ackerfläche ein Anstieg der Arbeitskraftstunden zu beobachten. Der direkte Arbeitseinsatz nimmt von rund 11 auf ca. 13,5 Akh/ha Ackerfläche zu. Ob durch den Anbau von Energiemais auch ein volkswirtschaftlicher Beschäftigungseffekt in der Untersuchungsregion eintritt, bleibt offen. Schließlich ist die Vorzüglichkeit des Energiemaisanbaus durch die vom EEG festgelegten relativ hohen Einspeisevergütungen begründet. Die Mehrkosten für Strom und Wärme aus dem nachwachsenden Rohstoff Mais werden auf alle Energieverbraucher umgelegt und erhöhen somit die Lebenshaltungskosten. Gleichzeitig vergrößert sich mit den zusätzlichen Mengen an Energie aus regenerativen Quellen das Angebot auf dem Markt, welches seinerseits positive Auswirkungen auf die Preise haben sollte, wenn man den logischen Zusammenhängen von Angebot und Nachfrage folgt und dabei von einer konstanten oder in Relation zur Energieproduktion weniger stark zunehmenden Energienachfrage ausgegangen wird. Die Ermittlung der Relation zwischen Nutzen und Kosten des Energiemaisanbaus aus volkswirtschaftlicher Sicht kann in dieser Arbeit nicht erfolgen, so dass hier sicherlich weiterer Forschungsbedarf besteht.

Tabelle 4.9: Vorhersage der Entwicklung der Landwirtschaft ohne und mit flächendeckend gegebener Möglichkeit der Pflanzenverwertung zur Biogasferzeugung und variierenden Silomaispreisen

	Ausgangssituation	Referenzszenario	Flächenhafte Nachfrage nach Silomais durch BGA		
			Preis ³ = 27,5 €/t	Preis ³ = 30 €/t	Preis ³ = 32,5 €/t
Ackerflächenverhältnis	in % der AF	in % der AF	in % der AF	in % der AF	in % der AF
Körnermais	5,03	32,98	32,81	24,88	12,98
Raps	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0
Roggen	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0
Silomais	6,88	7,1	7,21	15,2	27,1
Sommergerste	10,07	9,7	9,7	9,7	9,7
Speisekartoffeln	5,7	4,95	4,95	4,95	4,95
Wintergerste	13,76	0,0	0,0	0,0	0,0
Winterweizen	35,23	34,8	34,8	34,8	34,8
Zuckerrüben	11,91	10,47	10,47	10,47	10,47
Maisanteil an der AF in %	11,91	40,08	40,08	40,08	40,08
Maisanteil an der LF in %	6,32	23,74	23,74	23,74	23,74
Ø Bodenrente ¹ der AF in €*ha ⁻¹ *a ⁻¹	657,16	737,75	737,75	742,4	762,13
Ø Arbeit ² auf der AF in Akh*ha ⁻¹ *a ⁻¹	11,26	11,07	11,08	11,83	13,52

¹⁾ inkl. Flächenprämie (302,00 €/ha) und ohne Betriebsgemeinkostenanteil
²⁾ für die Produktionsverfahren
³⁾ frei eingelagert in den Silos der Biogasanlage.

Quelle: Eigene Darstellung, verändert nach KUHLMANN, 2010a. Berechnungen mit ProLand.

4.2 Standortanalysen mit dem Modell ProSite

Das dritte Teilziel der vorliegenden Arbeit „ist die Bestimmung der optimalen Standorte von Biomasseveredelungsanlagen in Südhessen unter Berücksichtigung der zahlreichen, konkurrierenden Nutzungsoptionen“ (SFB 299, 2007, S. 31). Der folgende Abschnitt widmet sich den Ergebnissen dieses Ziels am Beispiel von Biogasanlagen. Die folgenden Standortbestimmungs- und Standortbewertungsanalysen untersuchen sowohl konventionelle als auch biomethanproduzierende Anlagen. Die Kopplung der Modelle ProLand und ProSite eröffnet weitergehende Analyseschritte wie z.B. die Standortbestimmung unter Berücksichtigung von Transportkosten und Substratpotentialen. Das Modell ProSite liefert jedoch auch als alleinstehendes Modell differenzierte Analyseergebnisse, wie Abschnitt 4.2.3 verdeutlicht.

Die hier gewonnenen räumlichen Modellierungsergebnisse dienen grundsätzlich als Hinweis für mögliche zukünftige Entwicklungen und müssen vor Ort validiert werden, da eine Modellierung bestimmter Gegebenheiten nicht möglich ist. Erst dieser „field check“ gestattet eine gesicherte Aussage auf deren Grundlage weitere Maßnahmen erfolgen können.

4.2.1 Bestimmung der optimalen Anlagenstandorte

Wie bereits im methodischen Teil beschrieben, ist für die Bestimmung der optimalen Standorte zunächst die Ermittlung restriktiver Kriterien und schließlich einer restriktiven Endebene erforderlich. Die in Frage kommenden restriktiven Faktoren sind in Tabelle 4.10 überblickshalber dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung aller Geoobjekte mit restriktiver Wirkung ist in Anhang 8.2 zu finden.

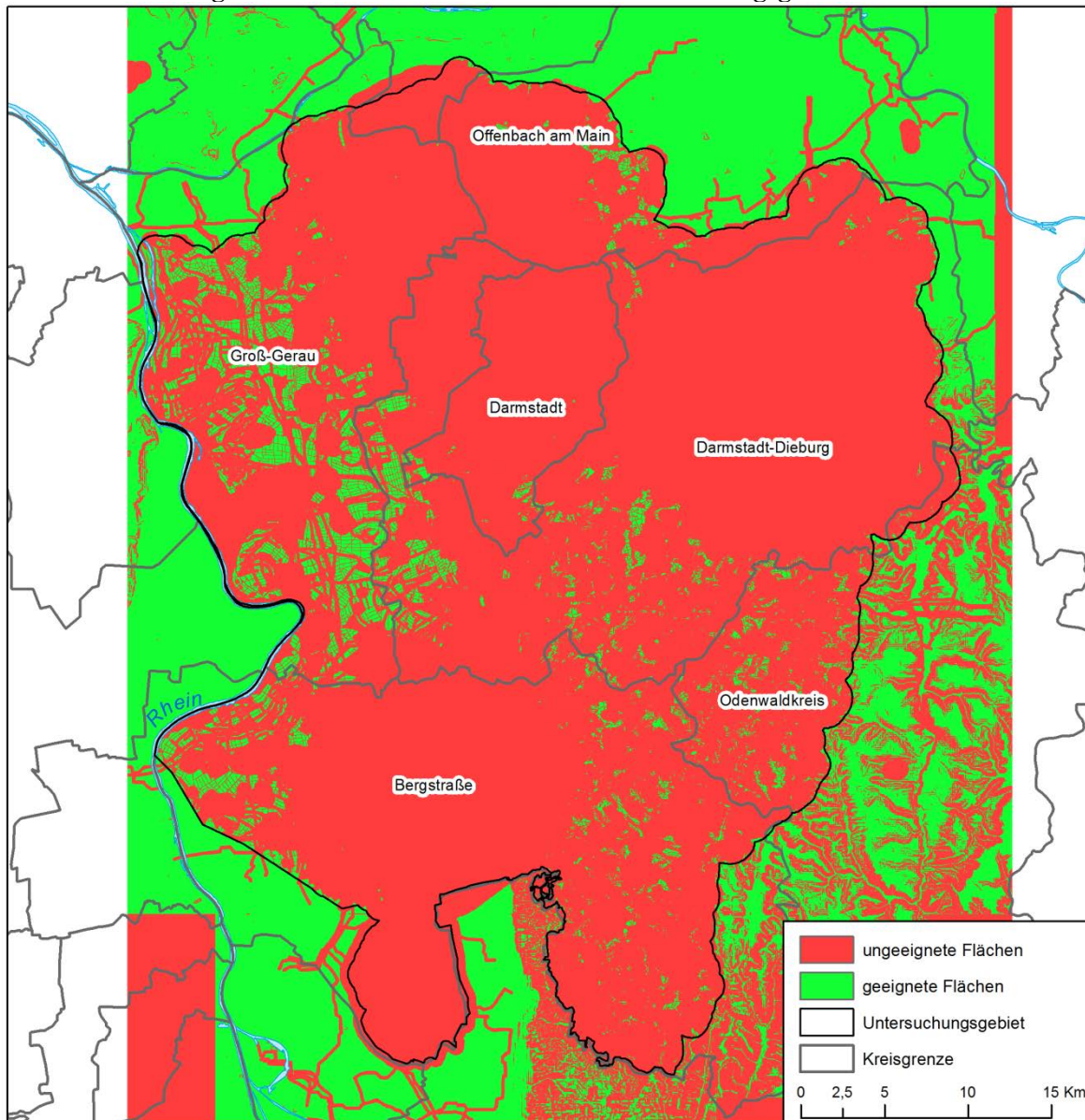
Tabelle 4.10: Restriktiven Faktoren zur Standortbestimmung

Restriktive Faktoren	Mindestabstände
Befestigte Verkehrswege	20 m
Biogasanlagen des Projektpartners	12,5 km*
Erdgasnetz	100 m
Flughäfen	500 m
Gewässer, Quellen	100 m
Hangsteigung > 15 %	-
Naturschutzgebiete	-
Infrastruktur (z.B. Brücken, Leitungen, Masten)	-
Sonstiges (z.B. Nationalpark, Archäologische Fundstätten)	-
Überbaute Gebiete	-
Wald, Gehölz, Baumreihen	-
Wasserschutzgebiete Zonen I und II	-
Wohnbauflächen	300 m
* Wegstreckenentfernung entlang der Verkehrsinfrastruktur außer Autobahnen und Wirtschaftswegen innerhalb von Waldflächen	

Quelle: Eigene Darstellung, teilweise nach MA et al. (2005), FSTRG (2007) und TA LUFT (2002).

Aus der Multiplikation der einzelnen Rasterebenen resultiert für das Untersuchungsgebiet Südhessen die in Abbildung 4.12 dargestellte restriktive Endebene.

Abbildung 4.12: Restriktive Endebene des Untersuchungsgebiets Südhessen



Quelle: Eigene Darstellung. Datengrundlage: eigene Berechnung nach ATKIS Basis-DLM Hessen, 2009 und DGM25.

Lediglich die grün dargestellten Flächen stehen als potentielle Standorte für neue Biogasanlagen zur Verfügung.

Der zweite Analyseschritt besteht darin, Kriterien zu definieren, die für einen potenziellen Biogasanlagenstandort relevant sind. Zunächst erfolgt die Bestimmung der optimalen Standorte von konventionellen Biogasanlagen, d.h. Anlagen, die neben der Stromgenerierung mittels eines Blockheizkraftwerks auch Wärme produzieren. Die für diesen Anlagentyp relevanten selektiven Faktoren fasst Tabelle 4.11 zusammen.

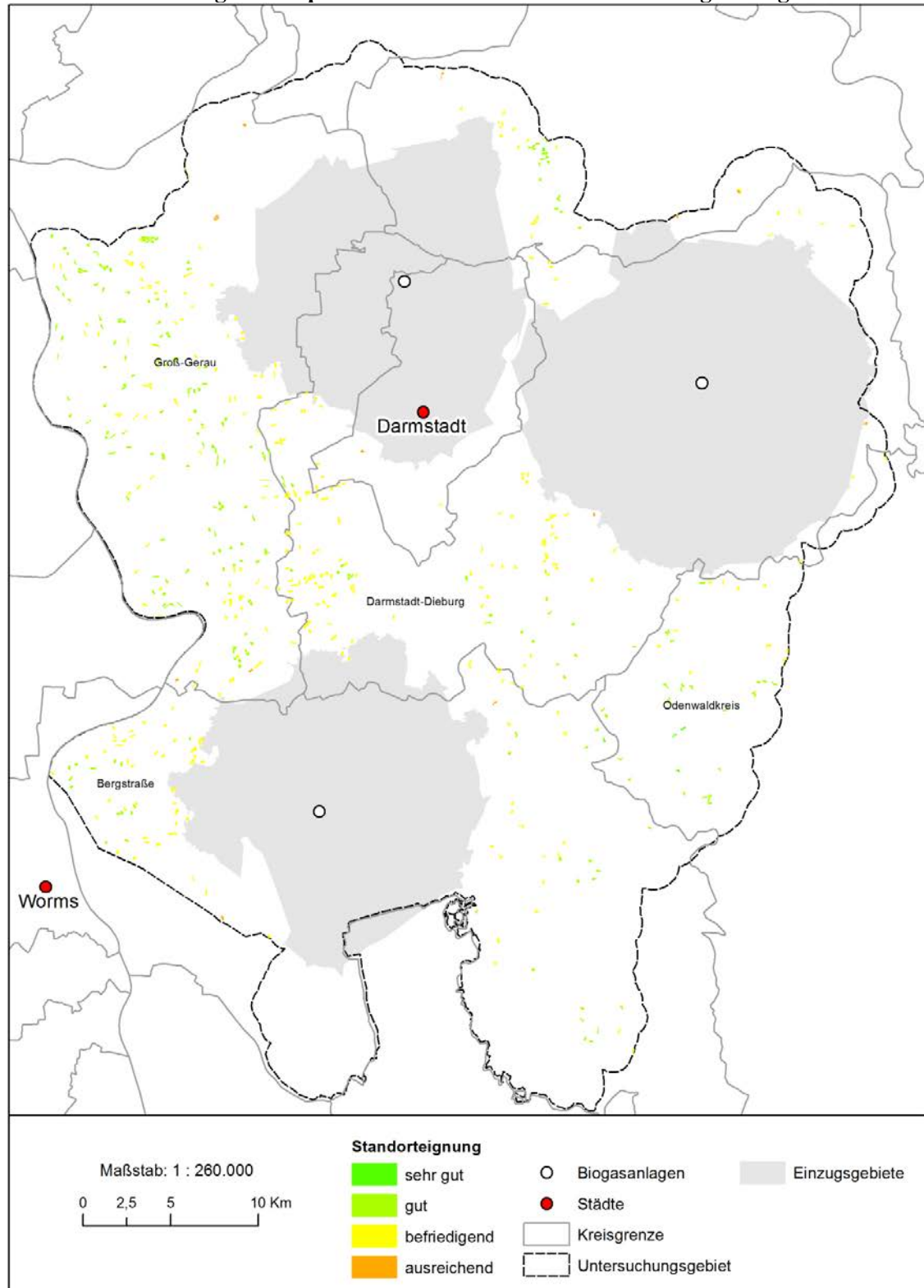
Tabelle 4.11 Selektive Faktoren, Klassengrenzen und Gewichtungen zur Standorteignung konventioneller Anlagen

Selektive Faktoren	Klassengrenzen in km	Gewichtung
Einzugsgebiete	I > 40 < II > 6 < III > 4,5 < IV > 3 < V > 1,5	3 (sehr hoch)
Gülleverfügbarkeit	I < 0,2 > II < 0,4 > III < 0,6 > IV < 0,8 > V < 1	3 (sehr hoch)
Silomaisverfügbarkeit	I < 0,4 > II < 0,8 > III < 1,2 > IV < 1,6 > V < 2	3 (sehr hoch)
Stromnetz	I < 0,8 > II < 1,6 > III < 2,4 > IV < 3,2 > V < 4	1 (normal)
Verkehrsnetz*	I < 0,1 > II < 0,2 > III < 0,3 > IV < 0,4 > V < 0,5	2 (hoch)
Wärmeabnehmer	I < 0,4 > II < 0,8 > III < 1,2 > IV < 1,6 > V < 2	3 (sehr hoch)
* befestigte Verkehrswege außer Bundesautobahnen		

Quelle: eigene Darstellung.

Zur Festlegung der Klasseneinteilungen und Gewichtungen sind sowohl Erwartungswerte als auch Expertenwissen erforderlich. Die Validierung der Ergebnisse erfolgt dadurch, dass mehrere Berechnungsdurchläufe getätigt werden, die sich ihrerseits auf die Modifikation der Gewichtungen und Klasseneinteilungen auswirken. Die Berechnungen erfolgen unter der Annahme, dass die neuen Anlagenstandorte nicht innerhalb der Einzugsgebiete der bereits vorhandenen Anlagen des Projektpartners fallen dürfen. Für den Faktor "Einzugsgebiete" gilt, dass mit zunehmender Entfernung zu den Einzugsgebieten der bereits installierten Anlagen auch die Eignung des neuen Standorts steigt. Für die übrigen selektiven Faktoren hingegen nimmt die Standortgunst mit zunehmender Entfernung zu den jeweiligen Objekten ab. Das Ergebnis der Standortbestimmungsanalyse illustriert Abbildung 4.13.

Abbildung 4.13: Optimale Standorte konventioneller Biogasanlagen



Quelle: eigene Darstellung.

Das Modell weist insgesamt 574 geeignete Flächen aus, wovon fünf als „sehr gut“ für konventionelle Biogasanlagen eingestuft sind. Sie liegen größtenteils im östlichen Teil des Landkreises Bergstraße bzw. im Odenwaldkreis im Osten der Untersuchungsregion. 231 Standorte werden vom Modell mit der Bewertung „gut“ ausgezeichnet. Sie liegen hauptsächlich im Westen des Untersuchungsgebiets. Die befriedigenden und ausreichenden

Standorte verteilen sich über den gesamten Raum, wobei zahlreiche befriedigende Flächen im Zentrum des Gebiets zu finden sind, während die schlechtesten Standorte hauptsächlich in den nördlichen Randgebieten liegen. Aufgrund der Nachteile von konventionellen Biogasanlagen, die insbesondere in der unvollständigen Wärmeverwertung begründet sind, wird die vorgestellte Modellierung nicht weiterverfolgt, zumal die verfügbare Datengrundlage keine Aussage zu den absetzbaren Wärmemengen erlaubt. In diesem ersten Anwendungsfall sollte lediglich aufgezeigt werden, dass ProSite zur Lösung der Fragestellung geeignet ist. Ein vielversprechendes Nutzungskonzept weisen Anlagen auf, die das erzeugte Biogas auf Erdgasqualität aufbereiten und das sogenannte Biomethan in die Erdgaspipelines einspeisen. Die Standortbestimmung für diesen Anlagentyp gestaltet sich mit ProSite sehr ähnlich zu der Standortbestimmung von konventionellen Anlagen. Anstelle der Wärmeabnehmer tritt das Erdgasnetz des Projektpartners als selektiver Faktor. Alle übrigen restriktiven und selektiven Kriterien bleiben unverändert. Die für diesen Anlagentyp relevanten weichen Faktoren samt Entfernungen und Gewichtungen sind in Tabelle 4.12 aufgeführt.

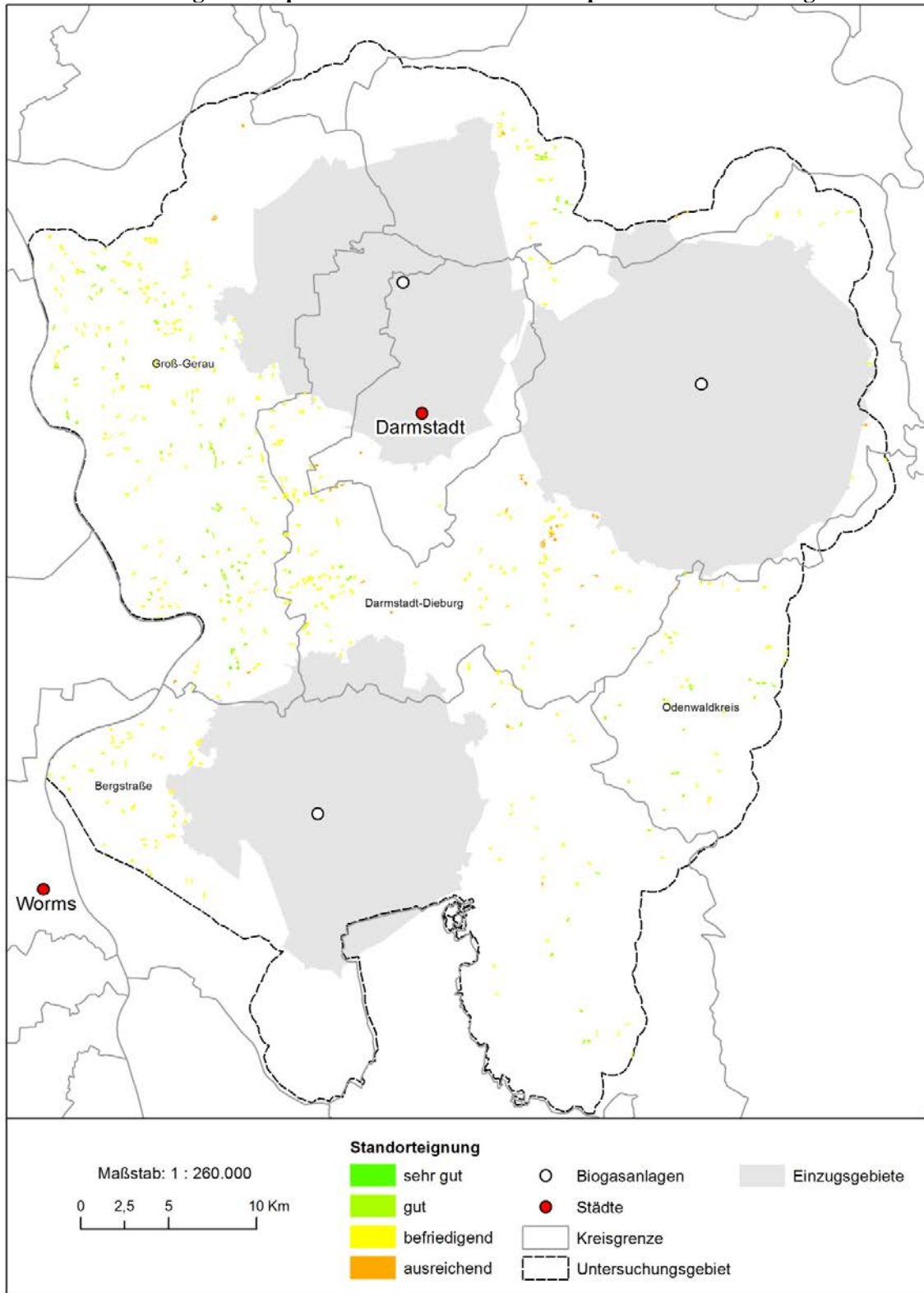
Tabelle 4.12: Selektive Faktoren, Klassengrenzen und Gewichtungen zur Standorteignung von Biomethananlagen

Selektive Faktoren	Klassengrenzen in km	Gewichtung
Einzugsgebiete	I > 40 < II > 6 < III > 4,5 < IV > 3 < V > 1,5	3 (sehr hoch)
Erdgasnetz	I < 0,16 > II < 0,32 > III < 0,48 > IV < 0,64 > V < 0,8	3 (sehr hoch)
Gülleverfügbarkeit	I < 0,2 > II < 0,4 > III < 0,6 > IV < 0,8 > V < 1	3 (sehr hoch)
Silomaisverfügbarkeit	I < 0,4 > II < 0,8 > III < 1,2 > IV < 1,6 > V < 2	3 (sehr hoch)
Stromnetz	I < 0,8 > II < 1,6 > III < 2,4 > IV < 3,2 > V < 4	1 (normal)
Verkehrsnetz*	I < 0,1 > II < 0,2 > III < 0,3 > IV < 0,4 > V < 0,5	2 (hoch)
* befestigte Verkehrswege außer Bundesautobahnen		

Quelle: eigene Darstellung.

Als Ergebnis weist ProSite insgesamt 573 potentielle Standorte aus. Davon ist ein Standort „sehr gut“ geeignet, 114 Flächen als „gut“ und 422 Standorte als „befriedigend“ ausgewiesen. 36 Flächen fallen in die Kategorie "ausreichend". Abbildung 4.14 verdeutlicht das Ergebnis dieser Standortanalyse.

Abbildung 4.14: Optimale Standorte biomethanproduzierender Anlagen



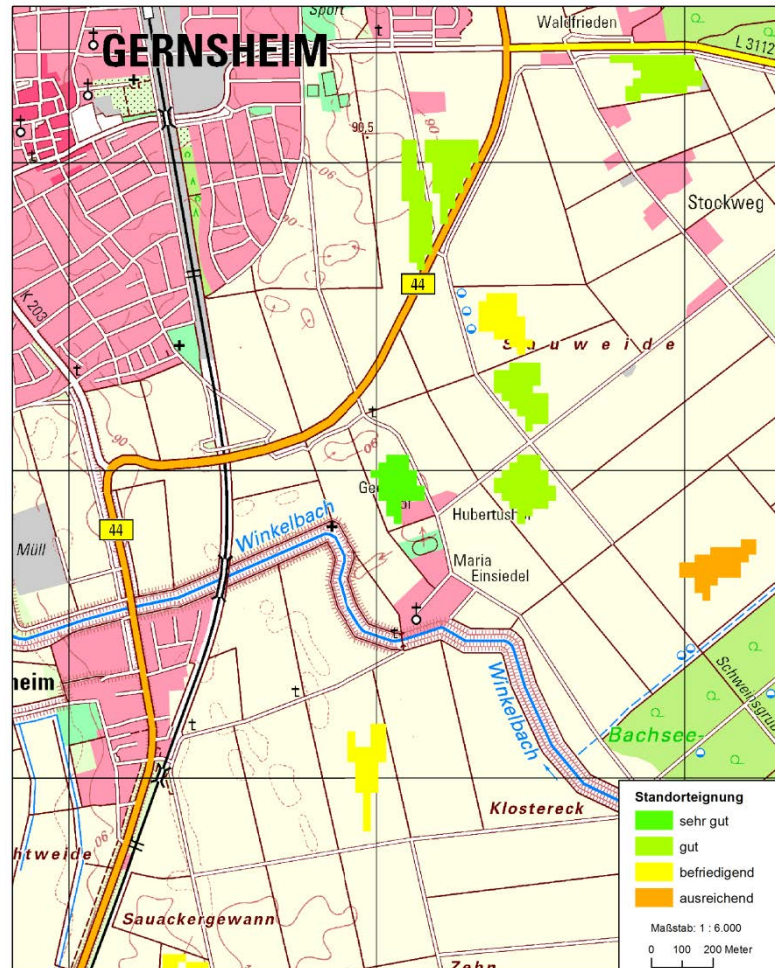
Quelle: Eigene Darstellung.

Die Mehrzahl der potentiellen Standorte für biomethanproduzierende Anlagen ist im Landkreis Groß Gerau im westlichen Teil des Untersuchungsgebiets zu finden. Hier befindet sich auch der sehr gut geeignete Standort. Weitere mögliche Standorte liegen am südwestlichen Rand der Untersuchungsregion im Landkreis Bergstraße. Auch im Nordosten sowie im östlichen Bereich weist das Modell geeignete Standorte aus.

4.2.2 Transportkostenanalyse und Substratpotentialeermittlung

Anhand des bestgeeigneten Standorts für biomethanproduzierende Anlagen erfolgt exemplarisch die Anwendung der weiteren Analyseschritte. Der Standort befindet sich südöstlich der Ortschaft Gernsheim, seine genaue Lage zeigt Abbildung 4.15.

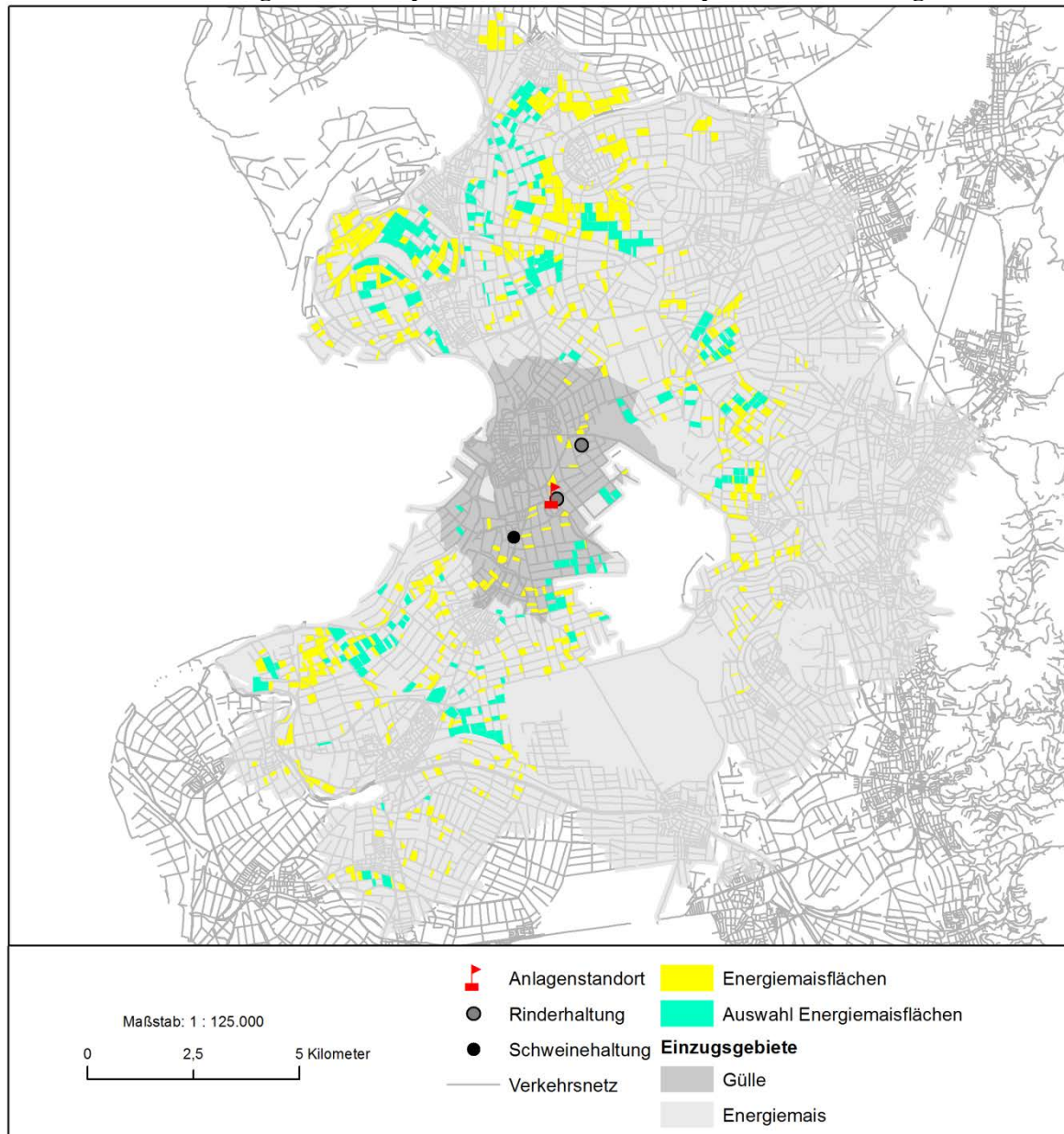
Abbildung 4.15: Potentieller Standort einer Biomethananlage



Quelle: Eigene Darstellung. Darstellung der Rasterdaten der topographischen Karte 1:25.000 mit Genehmigung vom Hessischen Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation vom 29.05.09.

Da die Standortanalysen keine quantitativen Aussagen zur Substratverfügbarkeit zulassen, aber bei der Bewertung der Standorteignung für neue Biogasanlagen auch die Substratpotentiale zur Bestimmung der maximalen Anlagenleistung von Interesse sind, berechnet ProSite in Kopplung mit ProLand die verfügbaren Substratmengen unter Berücksichtigung von Transportkosten. Das Ergebnis der Transportkosten- und Substratmengenanalyse zeigt Abbildung 4.16.

Abbildung 4.16: Transportkosten- und Substratpotentialermittlung



Quelle: Eigene Darstellung. Kartengrundlage: ATKIS Basis-DLM Hessen, 2009; Schlaggeometrien Hessen, 2007; Amtliche Hauskoordinaten auf Basis des Liegenschaftskatasters des Landes Hessen, 2008 und Rinder- und Schweinebestände, 2008. Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Wiesbaden. Vereinbarung Nr. 22 2008 0100.

Die gelb markierten Produktionsflächen stellen unter der Annahme eines Silomaispreises von 32,5 € / t FM frei Anlage und eines Einzugsgebiets von 12,5 km vorzügliche Flächen für Energiermais dar. Insgesamt sind dies im Umkreis der Anlage rund 1.943 ha. Nach Berechnung der Transportkosten verbleiben Anbauflächen in Höhe von etwa 717 ha, welche in Abbildung 4.16. hellblau markiert sind. Das Ertragspotential dieser Flächen beträgt in Summe ca. 36.680 t Energiermais, was einem durchschnittlichen Ertrag von 51 t FM/ha entspricht. Die im Einzugsgebiet von 4 km Wegstreckenentfernung liegenden 160 GVE produzieren ca. 2.500 t FM Wirtschaftsdünger pro Jahr. Somit ist die verfügbare Güllemenge zur Versorgung der Anlage ausreichend. Aus den Substratmengen erzeugt die Anlage ca. 7,97

Mio. m³ Biogas pro Jahr, das entspricht einer Biomethanproduktion von etwa 4,15 Mio. m³/a. Somit besteht ein Potential zur Deckung des jährlichen Energiebedarfs von rund 2.075 Einfamilienhäusern.

4.2.3 Bewertung bestehender Anlagenstandorte

Das Modell ProSite dient außer der Bestimmung von optimalen Standorten für Biomassekonvertierungsanlagen auch zur Bewertung von bereits bestehenden Anlagenstandorten. Dieser Anwendungsfall tritt insbesondere bei einem Wechsel der Betreiber bzw. Investoren auf. Die durchgeführte Bewertung von Anlagenstandorten des Projektpartners dient zur Überprüfung der getroffenen Standortwahl und zur Validierung der Analyseergebnisse. Das Vorgehen zur Standortbewertung gleicht der Herangehensweise, welche bereits zur Standortbestimmung verwendet wurde. Es gilt zunächst Kriterien aufzustellen, aus denen restriktive Faktoren zu ermitteln sind. Auf Grundlage dieser Faktoren erfolgt die Berechnung der restriktiven Endebene. Im Gegensatz zur Standortbestimmung für neue Anlagen stehen für die Bewertung bestehender Anlagen sowohl die Standorte der Biogasanlagen als auch die Einzugsgebiete zur Analyse frei. Daher fehlt in Tabelle 4.13 der bisher verwendete Faktor "Biogasanlagen des Projektpartners" sowie das dazugehörige Einzugsgebiet von 12,5 km Wegstreckenentfernung.

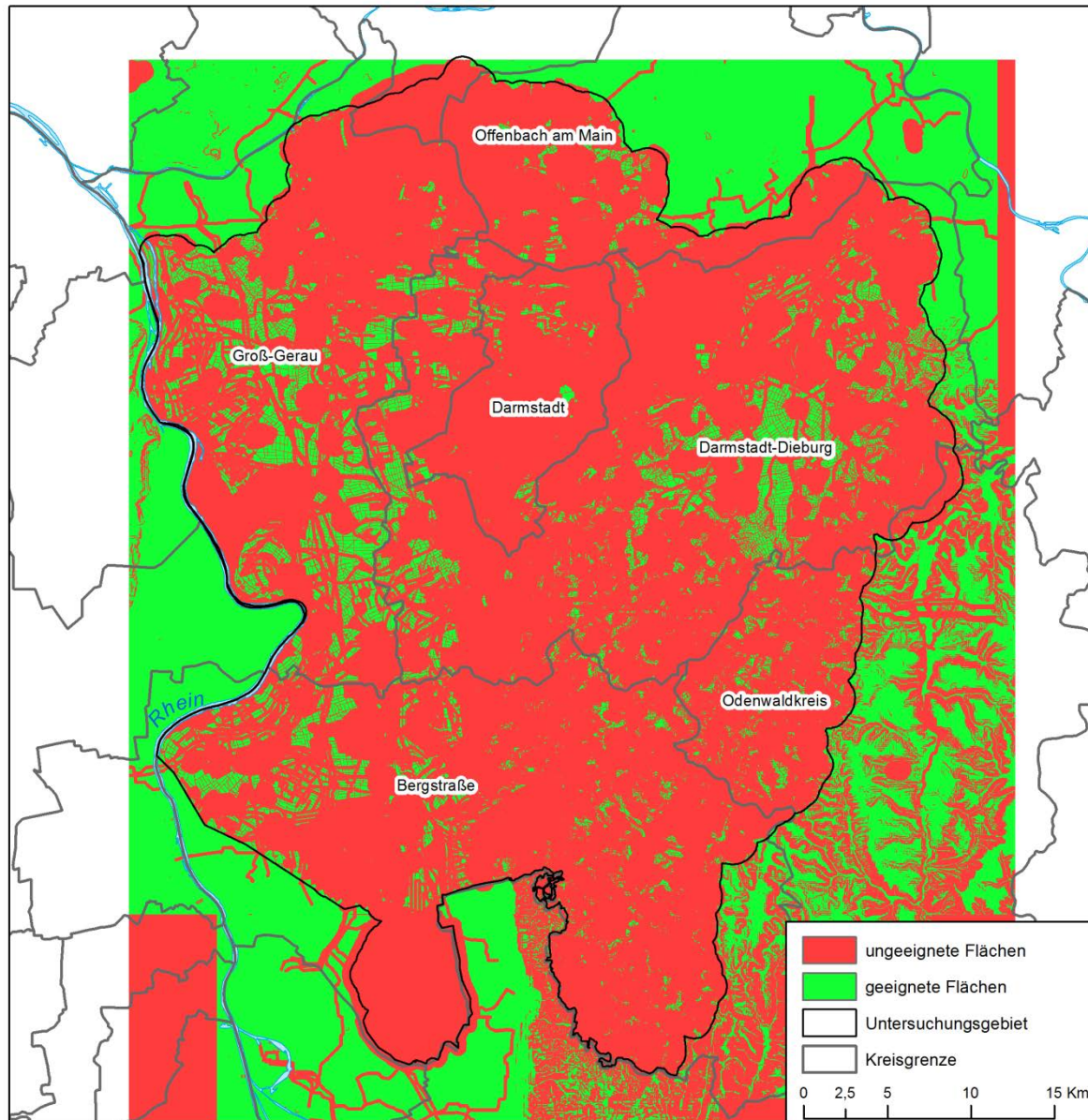
Tabelle 4.13: Restriktive Faktoren zur Standortbewertung

Restriktive Faktoren	Mindestabstände
Befestigte Verkehrswege	20 m
Erdgasnetz	100 m
Flughäfen	500 m
Gewässer, Quellen	100 m
Hangsteigung > 15 %	-
Naturschutzgebiete	-
Infrastruktur (z.B. Brücken, Leitungen, Masten)	-
Sonstiges (z.B. Nationalpark, Archäologische Fundstätten)	-
Überbaute Gebiete	-
Wald, Gehölz, Baumreihen	-
Wasserschutzgebiete Zonen I und II	-
Wohnbauflächen	300 m

Quelle: Eigene Darstellung, teilweise nach MA et al. (2005), FSTRG (2007) und TA LUFT (2002).

Der restriktive Endlayer weist demzufolge zusätzliche geeignete Flächen aus, wohingegen die Summe der ungeeigneten Gebiete im Vergleich mit der bisher verwendeten restriktiven Endebene (siehe Abbildung 4.12) geringer ist, wie Abbildung 4.17 verdeutlicht.

Abbildung 4.17: Restriktive Endebene des Untersuchungsgebiets Südhessen



Quelle: Eigene Darstellung. Datengrundlage: Esri Data & Maps Europe, 2008; eigene Berechnung nach ATKIS Basis-DLM Hessen, 2009 und DGM25.

Der Projektpartner betreibt im Untersuchungsgebiete drei Biogasanlagen, wobei die Anlagen in der Nähe von Darmstadt und Semd das Biogas aufbereiten und direkt in die Erdgasleitungen einspeisen. Die dritte in der Nähe der Ortschaft Lorsch im südwestlichen Teil der Untersuchungsregion gelegene Anlage ist eine konventionelle Anlage mit Blockheizkraftwerk. Zunächst erfolgt die Standortbewertungsanalyse anhand des letztgenannten Anlagentyps, der neben elektrischem Strom auch Wärme produziert. Der Standortbewertung liegen die in Tabelle 4.14 dargestellten weichen Kriterien zugrunde.

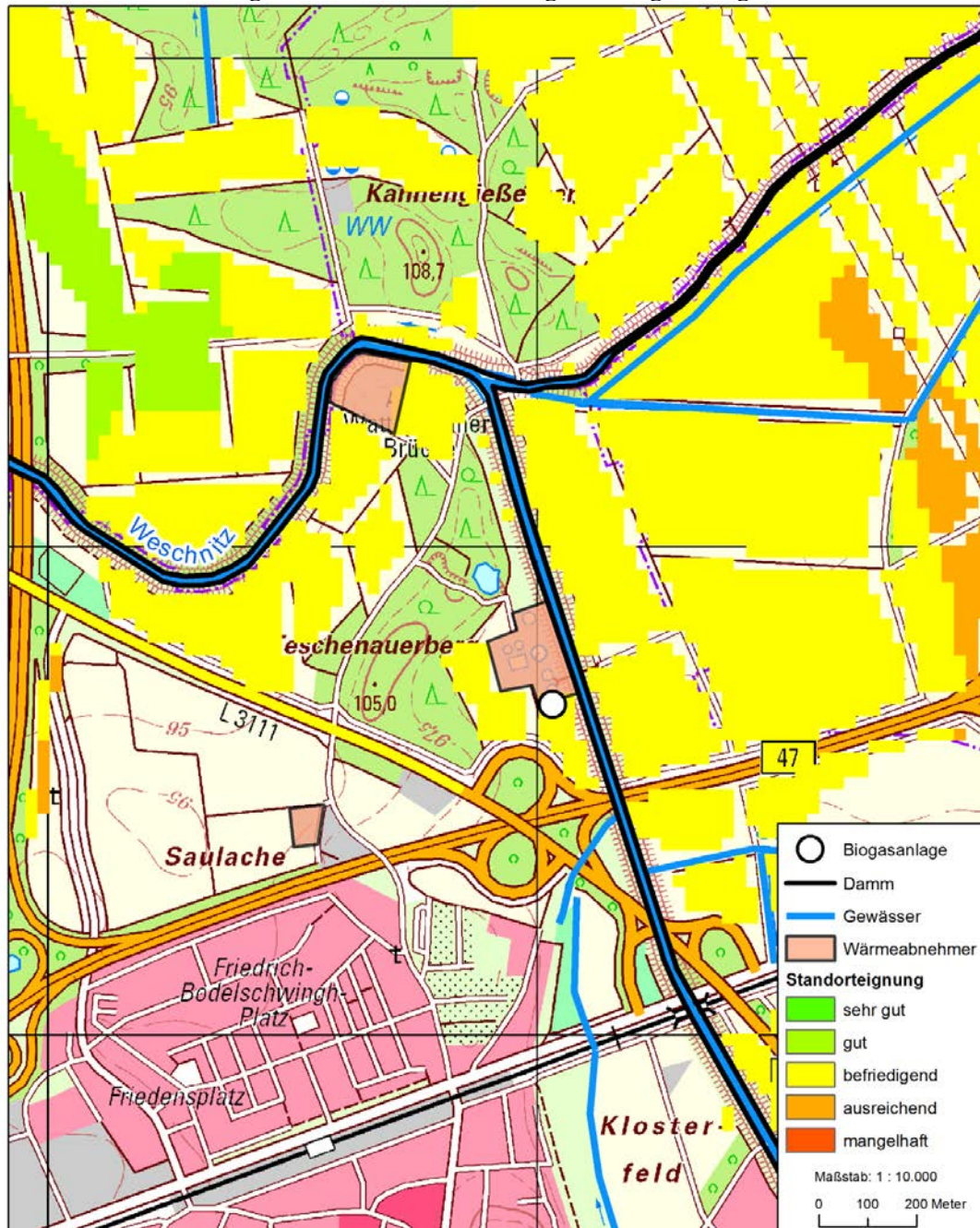
Tabelle 4.14 Selektive Faktoren, Klassengrenzen und Gewichtungen zur Standortbewertung konventioneller Anlagen

Selektive Faktoren	Klassengrenzen in km	Gewichtung
Gülleverfügbarkeit	I < 0,2 > II < 0,4 > III < 0,6 > IV < 0,8 > V < 1	3 (sehr hoch)
Silomaisverfügbarkeit	I < 0,4 > II < 0,8 > III < 1,2 > IV < 1,6 > V < 2	3 (sehr hoch)
Stromnetz	I < 0,8 > II < 1,6 > III < 2,4 > IV < 3,2 > V < 4	1 (normal)
Verkehrsnetz*	I < 0,1 > II < 0,2 > III < 0,3 > IV < 0,4 > V < 0,5	2 (hoch)
Wärmeabnehmer	I < 0,4 > II < 0,8 > III < 1,2 > IV < 1,6 > V < 2	3 (sehr hoch)
* befestigte Verkehrswege außer Bundesautobahnen		

Quelle: eigene Darstellung.

ProSite hat im ersten Durchlauf den Standort der Biogasanlage als ungeeignet ausgewiesen. Die nähere Betrachtung der Zwischenergebnisse der durchgeführten Analyse hat ergeben, dass der Mindestabstand von 100 m zum restriktiven Faktor "Gewässer" zu diesem Ergebnis führt. Der Abstand der Gärbehälter der Anlage beträgt ca. 55 m zur östlich verlaufenden Weschnitz. Da der Mindestabstand unterschritten wird, weist ProSite den Standort der Anlage entsprechend der Analysevorgaben als ungeeignet aus. Die Zwischenergebnisse verdeutlichen zudem eine Besonderheit des Standorts, denn direkt an das Gewässer grenzt ein Damm, der ebenfalls als restriktiver Faktor vom Modell berücksichtigt wird. Der Damm erlaubt eine Ansiedlung der Anlage in unmittelbarer Nähe zum Gewässer, denn er verhindert einen folgenschweren Eintrag von Gärresten in das Gewässer, wie bereits bei Havarien von Biogasanlagen geschehen. Diese besondere Konstellation erlaubt es in diesem Fall den Mindestabstand von 100 m zum restriktiven Faktor "Gewässer" aus den restriktiven Parametern der Analyse zu entfernen. ProSite bewertet nach dieser Modifikation den Standort als befriedigend, wie Abbildung 4.18 verdeutlicht.

Abbildung 4.18: Standortbewertung der Biogasanlage Lorsch



Quelle: eigene Darstellung. Datengrundlage: eigene Berechnung nach ATKIS 2009 und Schlaggeometrien Hessen 2007. Darstellung der Rasterdaten der topographischen Karte 1:25.000 mit Genehmigung vom Hessischen Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation vom 29.05.09.

Zwar liegen in unmittelbarer Nachbarschaft der Anlage ein Klärwerk sowie eine Gärtnerei, welche als potentielle Wärmeabnehmer in Frage kommen, jedoch hebt die relativ große Entfernung zu güllieliefernden Betrieben und Anbauflächen für Energiemais diesen Vorteil auf. Besser geeignete Standorte sind nordwestlich des gewählten Anlagenstandorts zu finden. Inwiefern diese Flächen allerdings zur Pacht oder zum Verkauf freistehen ist nicht bekannt. Auch ist unklar, ob eine über die Weschnitz verlaufende Nahwärmeleitung realisierbar ist. Schließlich wäre eine solche Installation zur Versorgung der Gärtnerei und der Kläranlage notwendig, wenn der Anlagenstandort auf der gegenüberliegenden Seite des Gewässers

positioniert wäre. In diesem Fall stößt das Modell an seine Grenzen. So berücksichtigt ProSite Geoobjekte, die als Barrieren wirken, nicht. Allerdings kann das Modell aufgrund seiner Struktur flexibel auf besondere Anforderungen angepasst werden.

Die Bewertungskriterien für die Direkteinspeisungsanlagen Darmstadt-Wixhausen und Semd sind identisch. Der selektive Faktor "Erdgasnetz" ersetzt den Faktor "Wärmeabnehmer". Tabelle 4.15 sämtliche Parameter der relevanten selektiven Faktoren.

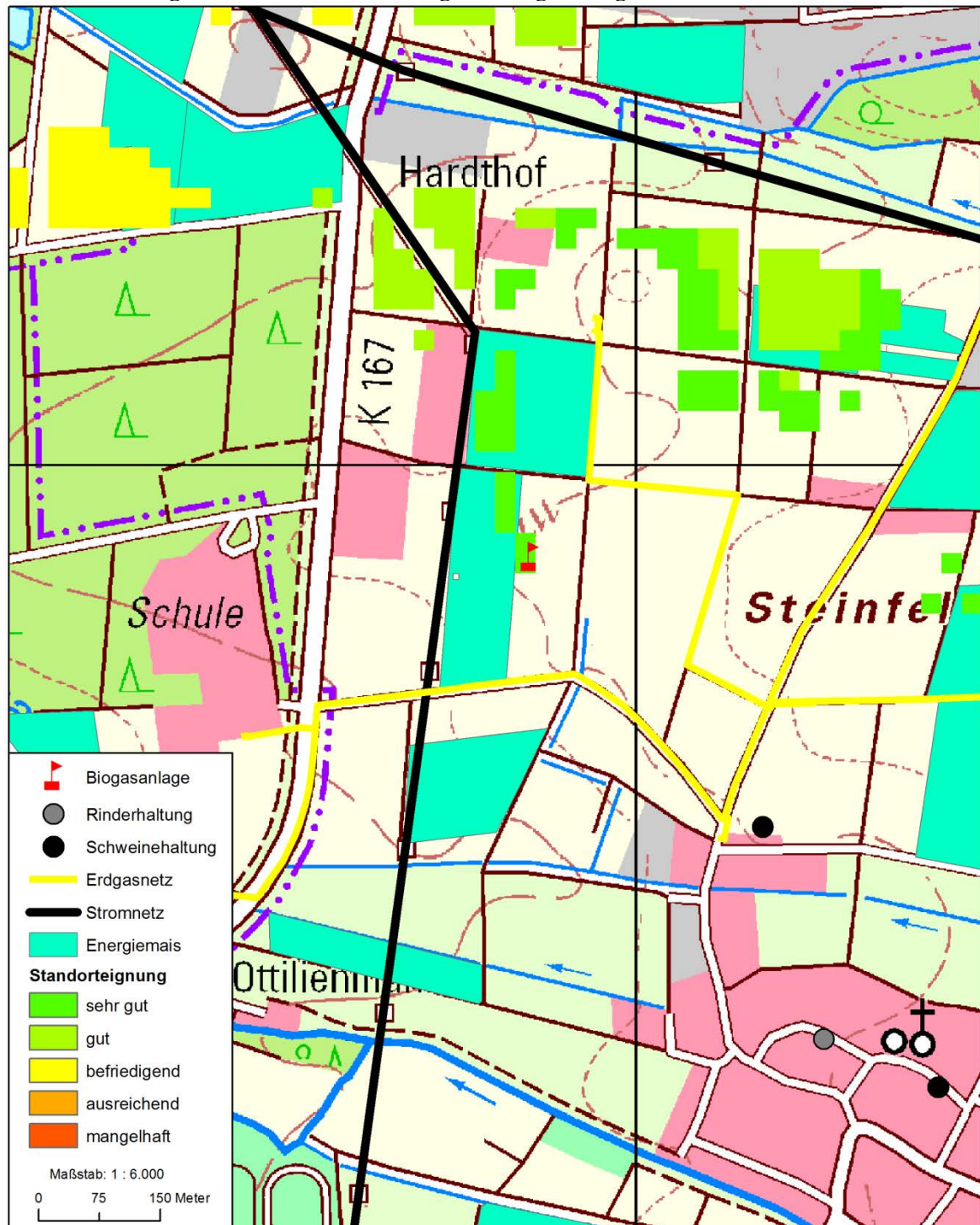
Tabelle 4.15: Selektive Faktoren, Klassengrenzen und Gewichtungen zur Standortbewertung von Biomethananlagen

Selektive Faktoren	Klassengrenzen in km	Gewichtung
Erdgasnetz	I < 0,16 > II < 0,32 > III < 0,48 > IV < 0,64 > V < 0,8	3 (sehr hoch)
Gülleverfügbarkeit	I < 0,2 > II < 0,4 > III < 0,6 > IV < 0,8 > V < 1	3 (sehr hoch)
Silomaisverfügbarkeit	I < 0,4 > II < 0,8 > III < 1,2 > IV < 1,6 > V < 2	3 (sehr hoch)
Stromnetz	I < 0,8 > II < 1,6 > III < 2,4 > IV < 3,2 > V < 4	1 (normal)
Verkehrsnetz*	I < 0,1 > II < 0,2 > III < 0,3 > IV < 0,4 > V < 0,5	2 (hoch)
* befestigte Verkehrswege außer Bundesautobahnen		

Quelle: eigene Darstellung.

Die Lage der wichtigsten selektiven Faktoren sowie das Ergebnis der Standortbewertungsanalyse verdeutlicht Abbildung 4.19. Der Standort der Direkteinspeisungsanlage Darmstadt-Wixhausen ist sehr gut geeignet. So liegen in unmittelbarer Nähe zur Anlage nicht nur potentielle Energiemaisanbauflächen, sondern auch mehrere gülleliefernde Betriebe. Der nächste Betrieb mit ausreichenden Beständen zur Versorgung der Anlage mit Schweinegülle ist ungefähr 450 m entfernt. In rund 850 m Wegstreckenentfernung liegt zudem ein rinderhaltender Betrieb. Außerdem ist die Entfernung zur Erdgasleitung sowie zur Stromleitung mit ca. 130 Metern bzw. 90 Metern gering.

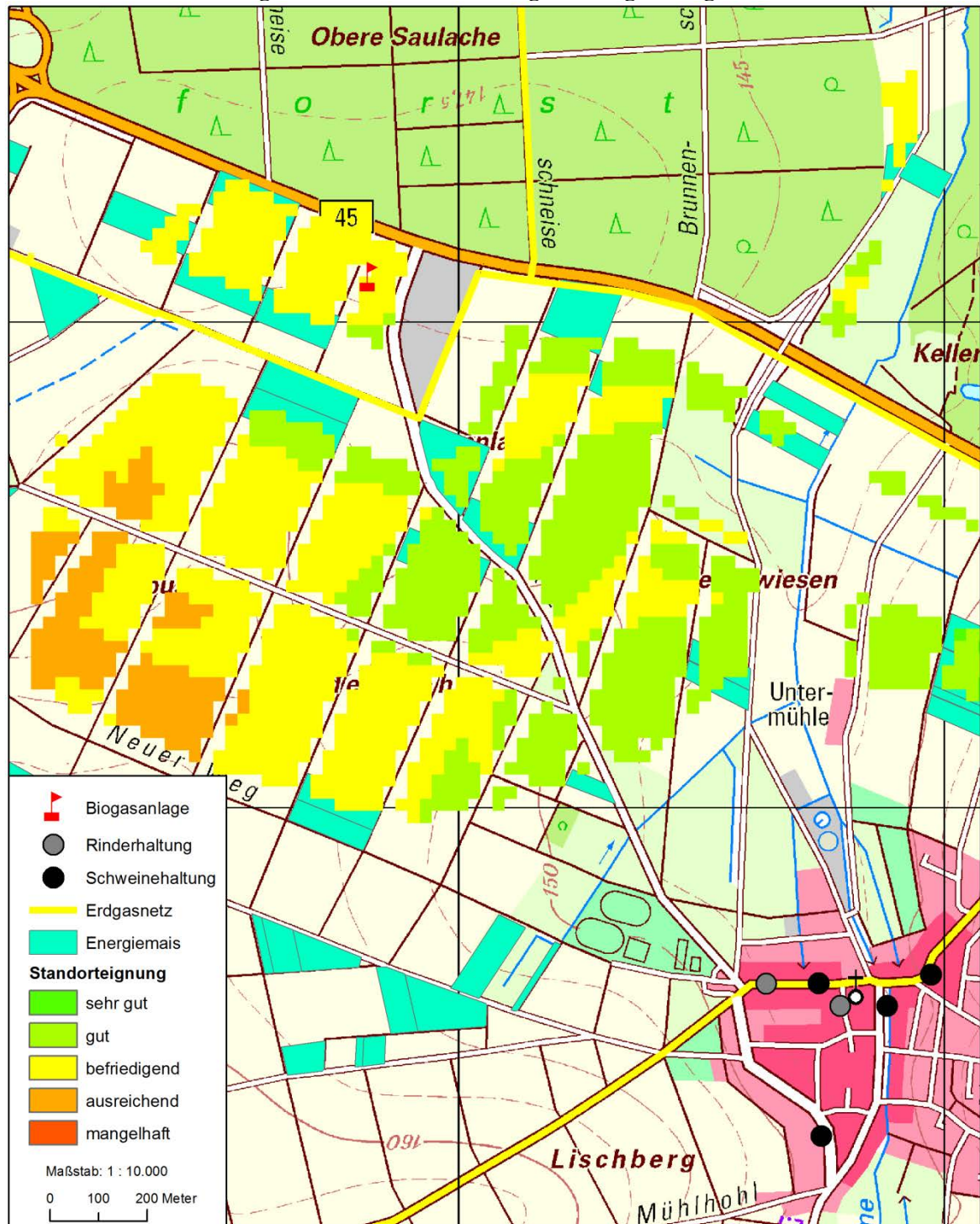
Abbildung 4.19: Standortbewertung der Biogasanlage Darmstadt-Wixhausen



Quelle: eigene Darstellung. Datengrundlage: eigene Berechnung nach ATKIS 2009 und Schlaggeometrien Hessen 2007. Darstellung der Rasterdaten der topographischen Karte 1:25.000 mit Genehmigung vom Hessischen Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation vom 29.05.09.

Für die Bewertung der Biomethananlage Semd gelten ebenfalls die in Tabelle 4.15 genannten selektiven Faktoren. Das Ergebnis der Standortbewertung sowie die Lage der am höchsten gewichteten selektiven Faktoren "gülleliefernde Betriebe", "Energiemaisanbauflächen" und "Erdgasnetz" illustriert Abbildung 4.20.

Abbildung 4.20: Standortbewertung der Biogasanlage Semd



Quelle: eigene Darstellung. Datengrundlage: eigene Berechnung nach ATKIS 2009 und Schlaggeometrien Hessen 2007. Darstellung der Rasterdaten der topographischen Karte 1:25.000 mit Genehmigung vom Hessischen Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation vom 29.05.09.

Das Modell weist den Standort der Biogasanlage Semd als befriedigend bis gut geeignet aus. Zwar verläuft in nur ca. 180 m Entfernung vom Standort der Anlage das Erdgasnetz und es sind potentielle Energiemaisanbauflächen vorhanden, allerdings ist der nächste Güllieferant erst in etwa 1,7 km zu finden. Vorteilhaft ist an diesem Standort jedoch die Vielzahl der verschiedenen tierhaltenden Betriebe sowie deren Bestandszahlen, so dass die Anlage

sicherlich einen höheren Anteil an Reststoffen und weniger nachwachsende Rohstoffe verwerten kann.

Über die Anwendung beim Projektpartner HSE hinaus wurde das Modell ProSite von weiteren Interessenten angefragt. Die grundsätzliche Fragestellung von Unternehmen, die Kapital in die Biogaserzeugung investieren, hängt mit der Rentabilität der Anlagen zusammen. Wie bereits mehrfach erwähnt, spielt der Standort aufgrund der hohen Standortsensitivität von Biogasanlagen bei der Bewertung eine wichtige Rolle. Der folgende Abschnitt stellt exemplarisch Ergebnisse ausgewählter Standortbewertungsanalysen vor.

Zur Bewertung des Standorts der Biogasanlage Leibach in Nordhessen existieren insgesamt vier Szenarien, wovon in dieser Arbeit zwei vorgestellt werden. Aus Gründen der Datenverfügbarkeit konnte in den folgenden Analysen keine Landnutzungsprognose und Ertragspotentialermittlung mit dem Modell ProLand erfolgen. Folglich können keine Aussagen zu Substratmengen und Transportkosten getroffen werden. Für die folgenden Standortbewertungen gelten die in Tabelle 4.16 illustrierten Faktoren mit Ausschlussfunktion.

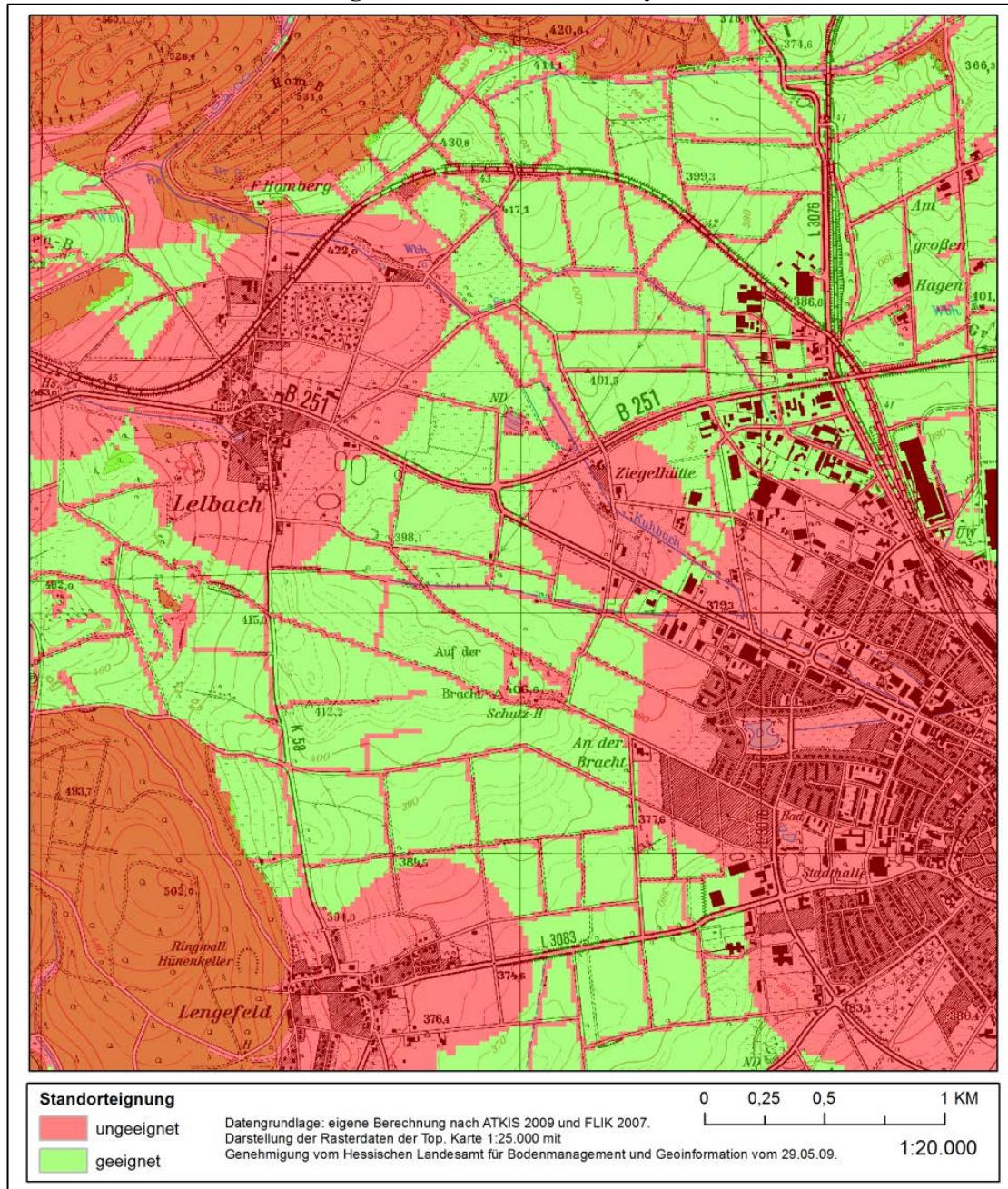
Tabelle 4.16: Übersicht der restriktiven Faktoren Leibach

Restriktive Faktoren	Mindestabstände
Hangsteigung > 15 %	-
Wald, Gehölz, Naturdenkmäler, Baumreihen	-
Gewässer, Quellen	100 m
Überbaute Gebiete	-
Wohnbauflächen	300 m
Befestigte Verkehrswege	20 m
Naturschutzgebiete	-
Naturparks	-
Sonstiges	-

Quelle: Eigene Darstellung.

Die aufgeführten Geoobjekte dienen lediglich dem Überblick. Eine ausführliche Objektbeschreibung ist in Anhang 8.2 zu finden. Durch Überlagerungsoperationen wird im GIS aus den oben genannten Geodaten der in Abbildung 4.21 dargestellte, restriktive Endlayer erzeugt. Diese Datenebene hat Ausschlussfunktion und ist für alle folgenden Berechnungsvarianten gültig. Alle in Abbildung 4.21 rot eingefärbten Flächen sind aufgrund bereits bestehender Nutzung nicht zur Errichtung einer Biogasanlage geeignet. Grün dargestellte Flächen hingegen stehen als potentielle Anlagenstandorte zur Verfügung.

Abbildung 4.21: Restriktiver Endlayer Lelbach



Quelle: Eigene Darstellung.

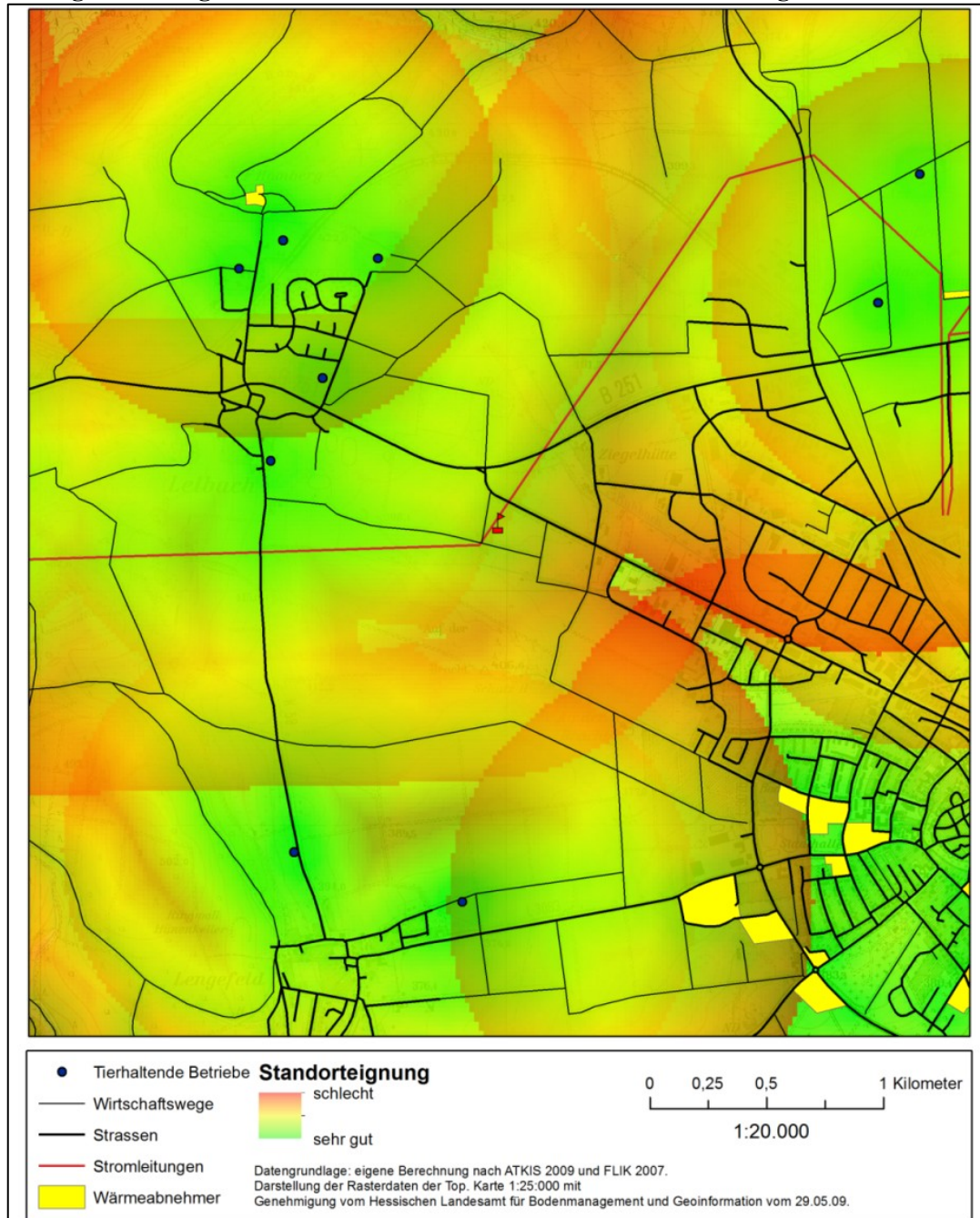
Für die Standortbestimmung sind neben den restriktiven Faktoren ferner die selektiven Faktoren von Bedeutung. Die Nähe einer Biogasanlage zu diesen Faktoren wirkt sich positiv auf die Standorteignung aus. Das erste Analyseszenario beinhaltet die in Tabelle 4.17 aufgeführten selektiven Faktoren. Dabei ist zu beachten, dass eine vorherige Prognose der vorzüglichen Landnutzung mit dem Modell ProLand in diesem Fall nicht erfolgt ist. Folglich stehen die Bodenrenten der Anbauprogramme nicht zur Verfügung. Anstelle des selektiven Faktors "vorzügliche Energiemaisanbaufläche" tritt der Faktor "Ackerland". Es wird somit unterstellt, dass sämtliche ackerbaulich genutzten Flächen für den Anbau von Energiemais geeignet sind, unabhängig von konkurrierenden und evtl. lohnenderen Nutzungen.

Tabelle 4.17: Übersicht der selektiven Faktoren Lelbach - Szenario 1

Selektive Faktoren	Klassifizierung	Gewichtung
Ackerland*	I < 600 m > II < 1200 m > III < 1800 m > IV < 2400 m > V < 3000 m	3 (sehr hoch)
Stromleitung	I < 200 m > II < 400 m > III < 600 m > IV < 800 m > V < 1000 m	1 (normal)
Landwirtschaftliche Flächen	I < 400 m > II < 800 m > III < 1200 m > IV < 1600 m > V < 2000 m	2 (hoch)
Tierhaltende Betriebe	I < 200 m > II < 400 m > III < 600 m > IV < 800 m > V < 2000 m	3 (sehr hoch)
Verkehrswege	I < 100 m > II < 200 m > III < 300 m > IV < 400 m > V < 500 m	2 (hoch)
Wärmeabnehmer	I < 400 m > II < 800 m > III < 1200 m > IV < 1600 m > V < 2000 m	2 (hoch)
*Ackerland beinhaltet alle Nutzungen außer: Dauergrünland, 20jährige Flächenstilllegung auf Uferrändern, Aufforstung, Grünland aus der Produktion genommen, Gemüse und Pilze unter Glas, Blumen und Zierpflanzen unter Glas, Kern- und Steinobst, Streuobst, Beerenobst, sonstige Obstanlagen, Haselnüsse, Walnüsse, Baumschulen, Beerenobst zur Vermehrung, Weihnachtsbäume, Niederwald mit Kurzumtrieb, Rebland, Rebschulflächen, Unterlagsrebbau, Steillagenweinbau, Weinbergsbrache, sonstige Dauerkulturen, Haus- und Nutzgärten und unbefestigte Mieten.		

Quelle: Eigene Darstellung.

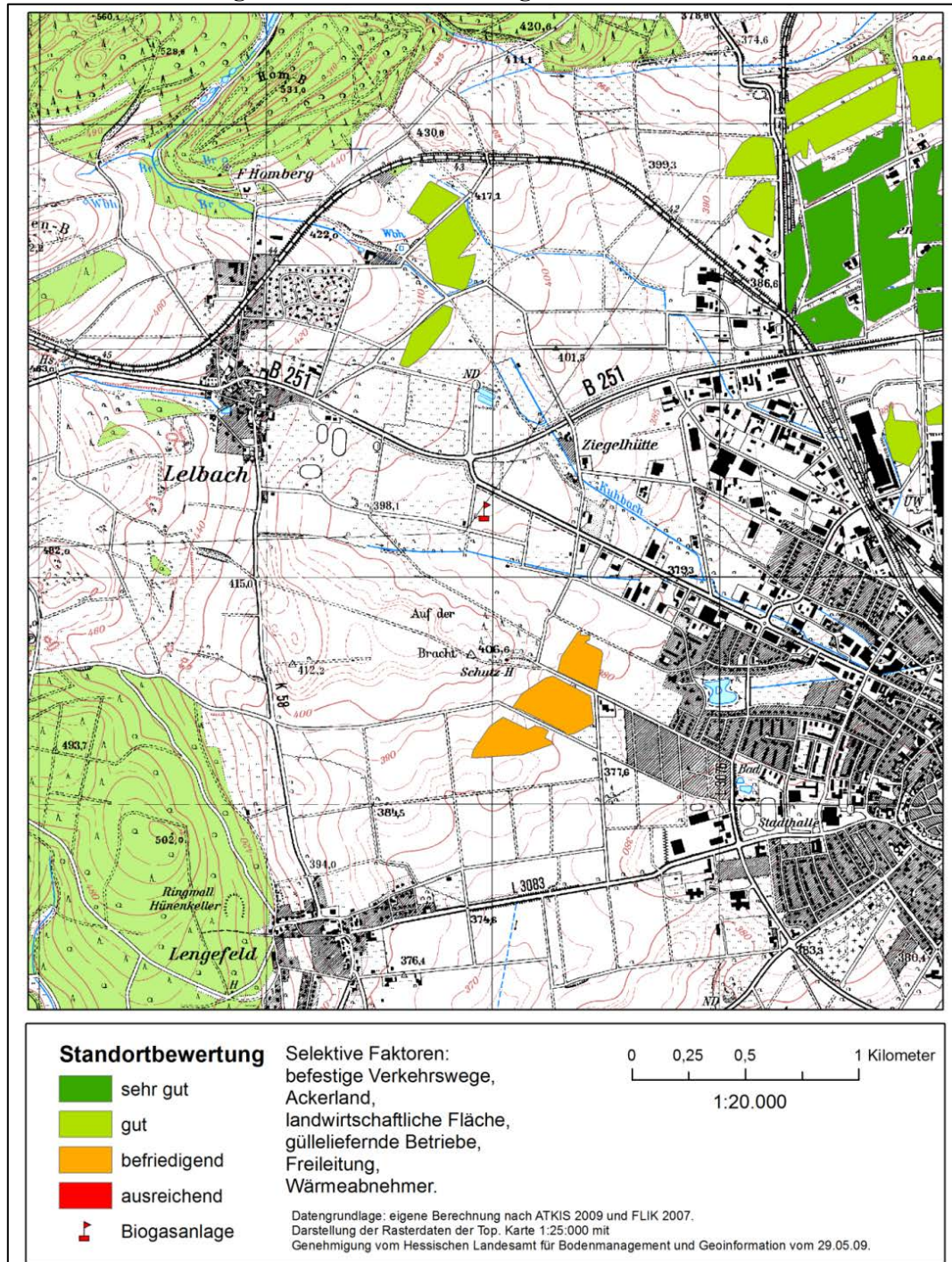
In diesem Fall fließt nicht nur die Nähe des Standorts zu Ackerland, Stromleitungen, landwirtschaftlichen Flächen, tierhaltenden Betrieben sowie befestigten Verkehrswegen in das Ergebnis ein, sondern es wird zudem die Nähe zu potentiellen Wärmeabnehmern berücksichtigt. Somit wird von einer Vermarktung der bei den Fermentierungsprozessen anfallenden Wärme zu potentiellen Abnehmern wie z.B. Gärtnereien, Schwimmbädern und Schulen ausgegangen. Abbildung 4.22 zeigt zur Verdeutlichung des methodischen Vorgehens die entfernungsabhängige Bewertungsklassifizierung ausgewählter selektiver Faktoren sowie ihre Überlagerungen.

Abbildung 4.22: Ausgewählte selektive Faktoren der Standortbewertung Lelbach - Szenario 1

Quelle: Eigene Darstellung.

Bereits diese Ansicht liefert einen ersten Hinweis darauf, dass der Standort der Anlage, welcher durch ein rotes Fähnchen gekennzeichnet ist, aufgrund der relativ hohen Entfernung zu tierhaltenden Betrieben sowie insbesondere zu potentiellen Wärmeabnehmern nicht optimal geeignet ist. Die grün eingefärbten Bereiche südöstlich des Standorts könnten diesbezüglich besser situiert sein, wobei die Möglichkeit der Bebauung dieser Bereiche gegeben sein muss. Erst die Verschneidung des restriktiven Endlayers (Abbildung 4.21) mit den selektiven Faktoren (Abbildung 4.22) ergibt das in Abbildung 4.23 gezeigte Bewertungsergebnis für das erste Szenario.

Abbildung 4.23: Standortbewertungskarte Lelbach - Szenario 1



Quelle: Eigene Darstellung.

Deutlich wird, dass der Standort der Biogasanlage nicht bewertet wird, d.h. der Standort ist unter den angenommenen Bedingungen für eine Biogasanlage ungeeignet. Dieses Ergebnis spricht zwar nicht für den Standort der real existierenden Anlage, allerdings für das Modell, da die Biogasanlage de facto über keine externe Wärmeverwertung verfügt. Im Südosten des Kartenausschnitts befinden sich Standorte, die aufgrund ihrer größeren Nähe zu Wärmeabnehmern jedoch gleichzeitig auch der relativ hohen Entfernung zu gülleliefernden Betrieben immerhin noch als „befriedigend“ ausgewiesen werden. Im Nordosten liegen

mehrere mit „sehr gut“ bewertete Standorte für Anlagen, die neben dem generierten Strom auch Wärme an externe Nachfrager veräußern könnten.

Wie in den zuvor vorgestellten Standortbewertungsanalysen gilt auch in diesem Fall ein Flächenbedarf der potentiellen Anlagenstandorte von mindestens 2,1 ha, der für die Errichtung vom Silos, Fermentern und sonstigen Gebäuden benötigt wird.

Um der Frage nachzugehen, wie der Anlagenstandort vom Modell bewertet wird, wenn die Wärmenutzung bei der Bewertung unberücksichtigt bleibt, ist ein weiteres Analyseszenario erforderlich. Dazu kommen die in Tabelle 4.18 dargestellten selektiven Faktoren zum Einsatz.

Tabelle 4.18: Übersicht der selektiven Faktoren BGA Lelbach Szenario 2

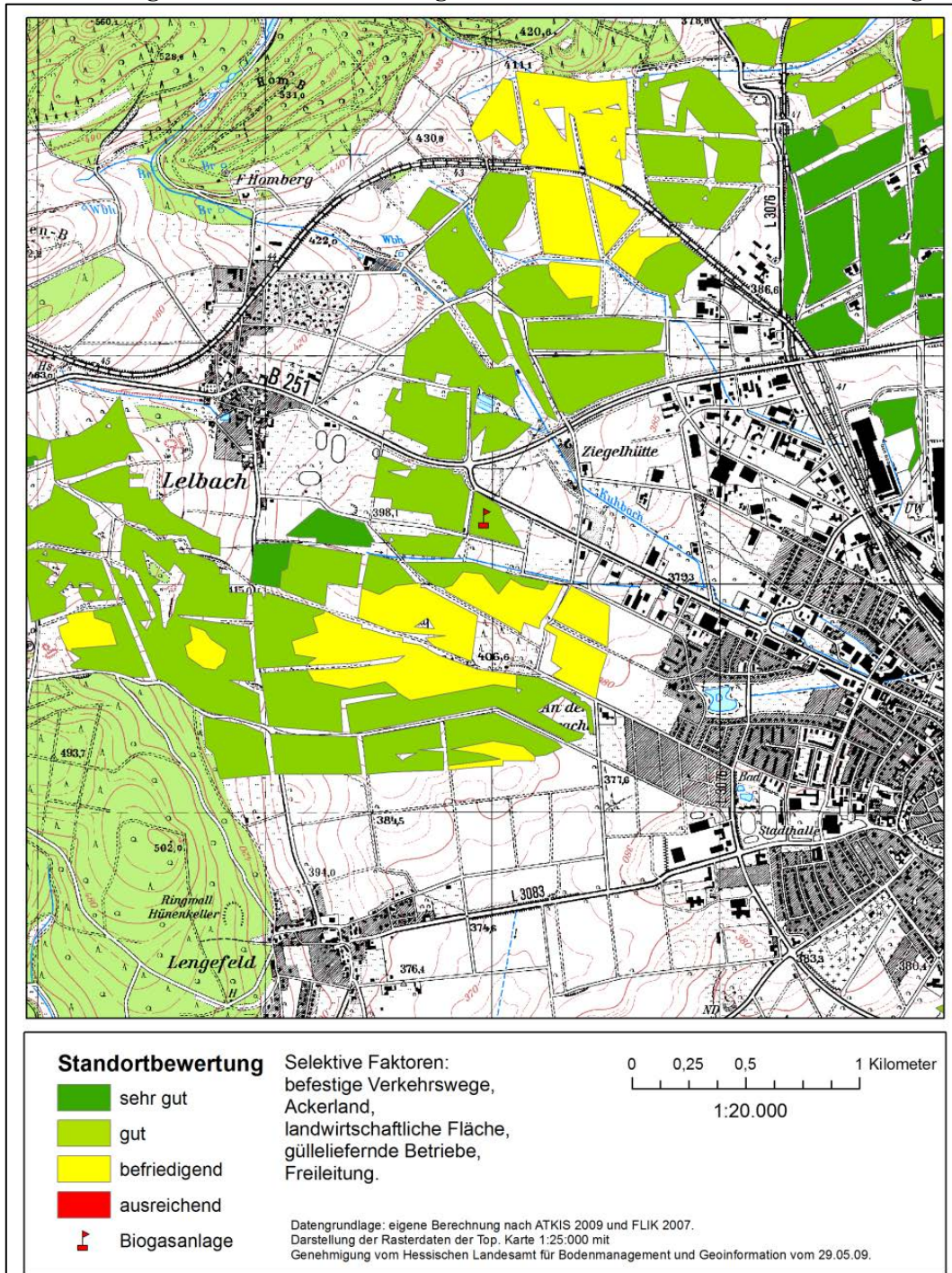
Selektive Faktoren	Klassifizierung	Gewichtung
Ackerland*	I < 600 m > II < 1200 m > III < 1800 m > IV < 2400 m > V < 2500 m	3 (sehr hoch)
Stromleitung	I < 200 m > II < 400 m > III < 600 m > IV < 800 m > V < 1000 m	1 (normal)
Landwirtschaftliche Flächen	I < 300 m > II < 600 m > III < 900 m > IV < 1200 m > V < 1500 m	2 (hoch)
Tierhaltende Betriebe	I < 300 m > II < 600 m > III < 900 m > IV < 1200 m > V < 1500 m	3 (sehr hoch)
Verkehrswege	I < 100 m > II < 200 m > III < 300 m > IV < 400 m > V < 500 m	2 (hoch)
*Ackerland beinhaltet alle Nutzungen außer: Dauergrünland, 20jährige Flächenstilllegung auf Uferrändern, Aufforstung, Grünland aus der Produktion genommen, Gemüse und Pilze unter Glas, Blumen und Zierpflanzen unter Glas, Kern- und Steinobst, Streuobst, Beerenobst, sonstige Obstanlagen, Haselnüsse, Walnüsse, Baumschulen, Beerenobst zur Vermehrung, Weihnachtsbäume, Niederwald mit Kurzumtrieb, Rebland, Rebschulflächen, Unterlagsrebbau, Steillagenweinbau, Weinbergsbrache, sonstige Dauerkulturen, Haus- und Nutzgärten und unbefestigte Mieten.		

Quelle: Eigene Darstellung.

Im Unterschied zur ersten Analyse fällt in dieser Variante der Standortbewertung der Faktor „Wärmeabnehmer“ weg und schränkt somit die Standortbewertung nicht weiter ein, so dass zur Generierung differenzierter Ergebnisse die Entfernungsangaben zu Ackerland, landwirtschaftlichen Flächen und tierhaltenden Betrieben im Vergleich zum ersten Szenario um jeweils 500 m reduziert sind.

Trotz der vergleichsweise kleinen Datenbasis erzeugt das Modell ProSite zur Standortbewertung geeignete Ergebnisse, wie Abbildung 4.24 zeigt.

Abbildung 4.24: Standortbewertungskarte BGA Lelbach ohne Wärmenutzung



Quelle: Eigene Darstellung.

Der Standort der bestehenden Biogasanlage wird unter den getroffenen Annahmen vom Modell als „gut“ bewertet. Deutlich wird, dass ca. 600 m Meter weiter westlich des aktuellen Anlagenstandorts zwei potentielle Standorte liegen, die „sehr gut“ geeignet sind, da sich diese Standorte näher an gülleliefernden Betrieben befinden.

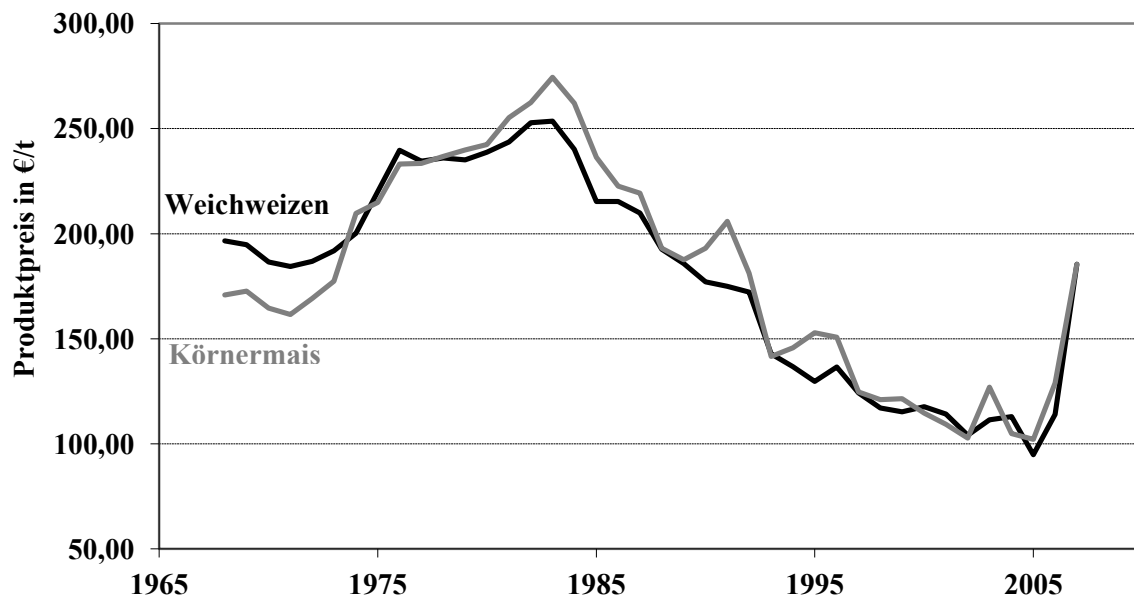
Aufgrund der Datenlage konnte für die Standortbewertung Lelbach keine Landnutzungsprognose und Ertragspotentialermittlung mit dem Modell ProLand erfolgen, so dass die vorliegenden Analysen keine Aussagen zu Substratmengen und Transportkosten

ermöglichen. Die vorliegenden Standortbewertungsergebnisse verdeutlichen, dass das Modell ProSite auch unabhängig vom Modell ProLand eingesetzt werden kann. Es liefert trotz der vergleichsweise kleinen Datenbasis aus nicht weiter aufbereiteten ATKIS und InVeKoS-Daten brauchbare Ergebnisse und lässt sich leicht auf unterschiedliche Anlagentypen anpassen. Zudem stellt es im Sinne eines multikriteriellen räumlichen Entscheidungsunterstützungssystems nachvollziehbare Bewertungsergebnisse räumlich dar und unterstützt so eine objektive Entscheidungsfindung.

5 Diskussion

Die Ergebnisse der Landnutzungsmodellierungen, insbesondere die Ermittlung des Referenzszenarios „Zukünftige Landnutzung ohne zusätzliche energetische Pflanzenverwertung“ werfen auf den ersten Blick einige Fragen auf, wird doch eine Zunahme des Maisanteils in der Untersuchungsregion von über 28 % der Ackerfläche prognostiziert, obwohl in diesem Fall keine Maisnachfrager hinzukommen. Insgesamt ist Mais in diesem Szenario auf über 40 % der Ackerfläche die vorzüglichste Fruchtart. Für die Plausibilität der Ergebnisse sprechen jedoch mehrere Gründe. Erstens kehrte sich die Relation der Marktpreise zwischen Weizen und Mais im Laufe der letzten 30 Jahre um. Lag der Maispreis bis Ende der siebziger Jahre zum Teil deutlich unter dem Weizenpreis, so ist seit 1980 eine umgekehrte Situation zu beobachten, wie Abbildung 5.1 verdeutlicht (KUHLMANN, 2010 a).

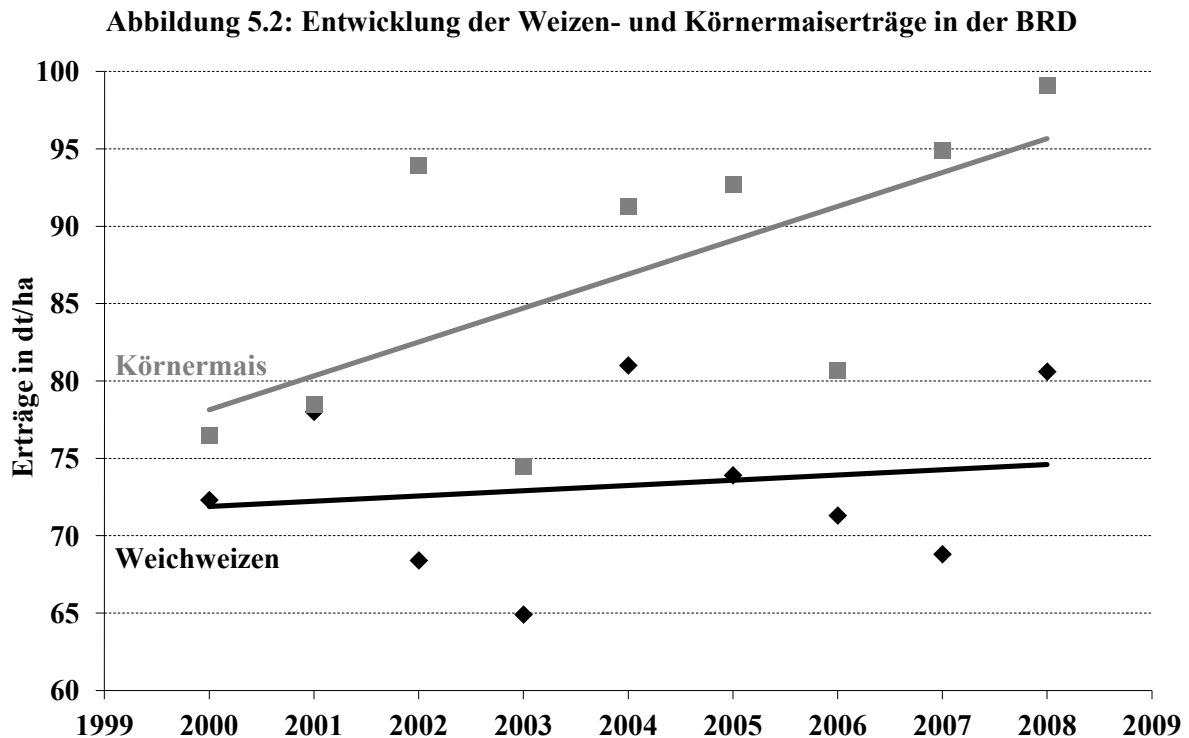
Abbildung 5.1: Durchschnittliche Weichweizen- und Körnermaiserzeugerpreise im Vergleich



Quelle: Eigene Darstellung, verändert nach KUHLMANN, 2010a. Datengrundlage Statistisches Bundesamt, 2009.

Heutzutage dient nicht nur Mais sondern oftmals auch Weizen als Futtermittel. Somit bestimmen die Futterwerte die Preise stärker als in der Vergangenheit. Gleichzeitig weist Mais eine höhere Energiedichte als Weizen auf, so dass die aufgezeigte Preisentwicklung dazu führt, dass für die Erzeuger ein zusätzlicher Anreiz zum Maisanbau vorliegt.

Weitere Argumente welche für die Prognosen des Szenarios „Zukünftige Landnutzung ohne zusätzliche energetische Pflanzenverwertung“ sprechen, sind einerseits das im Vergleich zu Weizen höhere Ertragsniveau von Mais und andererseits die auf Züchtungsfortschritten basierende, vergleichsweise hohe Ertragszunahme von Mais gegenüber der moderaten Ertragssteigerung von Weizen. Abbildung 5.2 verdeutlicht die Entwicklung der Weizen- und Körnermaiserträge in der BRD.



Quelle: Eigene Darstellung, verändert nach KUHLMANN, 2010 a.

Während der durchschnittliche Ertrag von Weichweizen in den Jahren 2000 bis 2008 bei 73,2 dt/ha lag, konnte Mais im gleichen Zeitraum einen Durchschnittsertrag in Höhe von 86,9 dt/ha erzielen. Die mittlere Ertragszunahme betrug im erwähnten Zeitraum für Weizen 0,34 dt/ha jährlich, wohingegen Körnermais Ertragszuwächse in Höhe von 2,19 dt pro Hektar und Jahr aufweisen konnte. Zudem lag in diesen Zeitraum der durchschnittliche Preis für Weizen bei 12,56 €/dt und für Mais bei 12,91 €/dt. Die Differenzen sind im Vergleich zwischen Mais und den ertragsschwachen Getreidesorten Wintergerste und Roggen sowie in der Untersuchungsregion auch zum Raps noch ausgeprägter, so dass ein langfristiger Rückgang dieser wenig vorzüglichen Ackerfrüchte, wie er im Referenzszenario „Zukünftige Landnutzung ohne zusätzliche energetische Pflanzenverwertung“ beschrieben ist, plausibel erscheint (KUHLMANN, 2010 a). Zunächst bleibt allerdings offen, warum in der Untersuchungsregion momentan vergleichsweise wenig Körnermais angebaut wird, obwohl seine Vorzüglichkeit offensichtlich stark ausgeprägt ist. Die Ursachen hierfür liegen ebenfalls auf der Hand. Wie am Beispiel des EEG gezeigt, induziert das politisch-administrative System Veränderungen der Landnutzung. FLITNER (2005, 52) spricht in diesem Zusammenhang von einer zeitlichen „Entkoppelung“, da politische Vorgaben oft mit Verzögerungen eintreten. Daher könnte die individuelle Geschwindigkeit der Erzeuger bei der Anpassung an neue Rahmenbedingungen Ursache für die Differenzen zwischen dem Basisszenario und der Landnutzungsprognose sein, wie BRINKMANN (1922, S. 58) konstatiert: "Im übrigen aber weist auch jede einzelne Stufe wieder die weitgehendste individuelle

Differenzierung auf, und vollzieht sich die Veränderung ihres Niveaus in der Weise, daß zunächst einzelne Individuen als Pfadfinder und Bahnbrecher die Technik ihrer Wirtschaft vervollkommen, die große Masse aber erst nach und nach sich anschließt.“ Unterschiedliche Adaptionsgeschwindigkeiten oder allgemein differierende Befähigungen der Landnutzer werden vom Modell ProLand eben so wenig wie Preiselastizitäten berücksichtigt.

Abgesehen davon weisen die Maiserträge in der Regel einen höheren Variationskoeffizienten als Winterweizenerträge aus. Jedoch unterstellt ProLand risikoneutrales Entscheidungsverhalten, während die Landnutzer in Realität aber eher risikoavers und somit dem Maisanbau gegenüber vorsichtiger agieren.

Grundsätzlich gehen mit den vereinfachenden Annahmen des Modells ProLand einige Einschränkungen einher. So lautet eine der grundlegenden Annahmen des Modells, dass Produkt- und Faktormärkte eine beliebige Größe annehmen können. Folglich kann das Modell keine Preiselastizitäten berücksichtigen. Neben dieser wesentlichen Schwäche von ProLand erschwert auch die nicht bekannte räumliche Verteilung der Märkte und Konsumenten die Modellierung von nachfragebeschränkten Produkten. Die Veredelungs- und Verarbeitungsindustrie beeinflusst jedoch Faktorallokationsentscheidungen zum Teil erheblich. Dies ist insbesondere problematisch, da viele landwirtschaftliche Erzeugnisse transportunwürdige Güter sind. Zwar wird die Bedeutung der Transportkosten zur Landnutzungsmodellierung bereits von SCHROERS (2006) erkannt und in die Berechnungsalgorithmen des Modells ProLand implementiert, allerdings werden in sämtlichen bisherigen Anwendungsfällen stets durchschnittliche Hof-Feld-Entfernungen angenommen. Durch die verstärkte Einbindung von GIS ist in der vorliegenden Arbeit erstmalig die Verortung sowohl von Veredelungs- als auch von Verarbeitungsstandorten erfolgt. Diese Lokalisierung eröffnet die räumlich explizite und standortabhängige Ermittlung von Transportkosten mit ProLand, wodurch die Qualität der Modellierungsergebnisse im Sinne eines multikriteriellen räumlichen Entscheidungsunterstützungssystems erhöht wird.

Interessant ist, dass die Ergebnisse der gekoppelten Modellierung von ProLand und ProSite die Landnutzungstheorie von Thünen nur bedingt abbilden. So ist in keinem der berechneten Einzugsgebiete eine Anordnung von Energiemaisanbauflächen ausschließlich in unmittelbarer Nähe der Biogasanlagen zu finden. Vielmehr dominieren in zwei Fällen standortferne Anbauflächen, während in anderen Fällen eine heterogen verteilte Anordnung der Energiemaisflächen zu beobachten ist. Die differenzierenden Kräfte der natürlichen

Standortbedingungen scheinen eine größere Bedeutung zu haben, als der Transportkostenansatz von WEBER und THÜNEN.

Bei vielen wissenschaftlichen Arbeiten stellt sich die Frage nach dem praktischen Nutzen der gewonnenen Erkenntnisse. Die Anwendung der Methoden und Kenntnisse aus den vorausgegangenen Forschungsperioden des SFB 299 auf eine praktische Fragestellung ist in Zusammenarbeit mit dem industriellen Kooperationspartner des Transferbereichs als gelungen einzustufen. So investiert die HEAG Süd Hessische Energie AG (HSE) in den nächsten Jahren ca. 10 Mio. Euro in den Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energie. Unter anderem plant das Energieunternehmen den Bau von insgesamt vier bis fünf Biogasanlagen in Südhessen und nutzt zur Umsetzung dieser Ziele sowohl das Modell ProSite zur Optimierung der Standortwahl von Biogasanlagen als auch die Ergebnisse der Szenarienrechnungen des Modells ProLand (SFB 299, 2010).

An der in dieser Arbeit beschriebenen Methodik sowie den aus der Kopplung von ProLand und ProSite resultierenden Ergebnissen der Standortbewertungsanalysen zeigten bisher neben dem Projektpartner weitere Unternehmen aus der Energie- und Consultingbranche Interesse. Die Firma "iTerra GmbH" aus Gießen hat die Nutzungsrechte am Modell ProLand erworben. Zudem sind die Unternehmen "agri.capital" aus Münster, "Management Beratung" aus Essen und "Schöttle Consulting" aus Ehingen auf die Möglichkeiten des Modells ProSite aufmerksam geworden. Aus diesem Interesse resultierten bereits durchgeführte Standortbewertungen für bestehende Biogasanlagen in Nordhessen und in Brandenburg. Die Nutzungsperspektiven der vorgestellten Modelle ProSite und ProLand sind aufgrund der Flexibilität der Modelle vielfältig. Die Modelle können zur Entscheidungsunterstützung in der landwirtschaftlichen Produktion und als praktische Beratungsinstrumente mit hoher Transparenz dienen. Potentielle Anwender sind Landwirtschaftsverwaltung, Agrar- und Energiepolitik, Regional- und Landschaftplanung, Investoren und Betreiber von Biomassekonvertierungsanlagen, Energieversorgungs- sowie Beratungsunternehmen. Auch für Praktiker können insbesondere die Ergebnisse des Modells ProLand für Fragestellungen, beispielsweise nach der vorzüglichsten Fruchtfolge, von Interesse sein. Die Übertragbarkeit des in dieser Arbeit beschriebenen Anwendungsfalls zur Bewertung der Standorte von Biogasanlagen ist auf ähnliche Fragestellungen grundsätzlich gegeben. Die Zusammenarbeit mit privatwirtschaftlichen Unternehmen hat allerdings auch einige Schwachpunkte der Modelle aufgezeigt. Als problematisch hat sich vorrangig die Datenbeschaffung erwiesen, die hohe Kosten verursacht. Daher ist ein zukünftiger Einsatz der Modelle in öffentlichen Einrichtungen wahrscheinlicher als der Einsatz in Privatunternehmen, da öffentliche

Institutionen Geodaten zu anderen Konditionen erwerben können, bzw. bereits über die Daten verfügen. Alternative Datenquellen wie z.B. das crowd sourcing Projekt OpenStreetMap (OSM) könnten eine Lösung für Privatunternehmen sein. Das OpenStreetMap-Projekt (OSM) hat das Ziel frei verfügbare Geodaten zu erheben. Das Hauptaugenmerk gilt dabei der Verkehrsinfrastruktur. Zudem ist eine Vielzahl von "Points of Interest", Gebäuden und Flächennutzungsdaten Gegenstand der Datenerfassung. Die Daten werden dabei in erster Linie durch Freiwillige unter Zuhilfenahme von GPS-Geräten erhoben und in eine zentrale Datenbank eingespeist. Problematisch ist die räumlich variierende Qualität dieser Datenquelle. So sind Ballungsräume sehr detailliert erfasst, während ländliche Gebiete nur rudimentär abgedeckt sind. Eine Überprüfung dieser alternativen Datenquelle hat ergeben, dass nicht alle für die Standortbestimmung benötigten Daten verfügbar sind. So fehlen beispielsweise Informationen über Gasleitungen und potentielle Wärmeabnehmer. Vorteilhaft ist, dass OSM Informationen über Verkehrsinfrastrukturen und Landnutzungen enthält. Inwiefern freie Datenquellen für den Zweck der Standortbestimmung zumindest als ergänzende Grundlage geeignet sind, bleibt offen. Zumindest dienen zum jetzigen Zeitpunkt die amtlichen Daten als Basis der Analysen von ProLand und ProSite.

6 Zusammenfassung

Primäres Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Bestimmung der Auswirkungen einer vom EEG induzierten Nachfrage nach Bioenergiepflanzen auf die Landnutzung sowie auf die landwirtschaftliche Beschäftigung in der Untersuchungsregion Südhessen. Ein weiteres Ziel ist die Bestimmung optimaler Standorte von Biogasanlagen unter Berücksichtigung konkurrierender Landnutzungsoptionen.

Der theoretische Teil der Arbeit erläutert die Bedeutung der Boden- und Lagerente bei der Entstehung von Landnutzungszonen nach THÜNEN. Zudem wirken nach BRINKMANN'S Intensitätslehre weitere Faktoren wie z.B. naturräumliche Ausstattung oder Verkehrslage der Produktionsflächen auf die Anbauentscheidung der Landnutzer. Diese und weitere Parameter gilt es für eine präzise Landnutzungsmodellierung möglichst umfassend zu berücksichtigen. Die industrielle Standortbestimmungslehre nach WEBER bildet eine weitere theoretische Grundlage, welche für die Bestimmung optimaler Standorte von Biogasanlagen relevant ist.

Der methodische Teil beschreibt die grundlegenden Strukturen und Funktionsweisen der verwendeten Modelle ProLand und ProSite. Das Landnutzungsprognosemodell ProLand ermöglicht die räumlich explizite Simulation der räumlichen Verteilung von Landnutzungssystemen. Unter der Annahme nutzenmaximierenden Verhaltens der Produzenten berechnet das Modell Bodenrenten und Kennzahlen landwirtschaftlicher Produktionsverfahren wie beispielsweise Arbeitszeitbedarf, Maschinenkosten und Produktmengen für jede Parzelle. Nach einer Anpassung der linear-limitationalen Ertragsfunktionen unter Zuhilfenahme von Versuchsdaten des Bundessortenamtes und Expertenwissen bildet ProLand die standortspezifischen Biomasseerträge in der Untersuchungsregion hinreichend genau ab. Die praxisnahe Anwendung des Modells im Rahmen des Transferbereichs des SFB 299 erfordert aufgrund der weiterführenden Fragestellungen der Projektgruppen die gezielte Vorgabe von Fruchtfolgen. Aus der aktuellen Landnutzung geht eine Vielzahl von pflanzenbaulich kompatiblen und phytosanitär verträglichen Fruchtfolgen hervor, die für die Berechnung der bodenrentenmaximalen Landnutzungsalternativen zur Verfügung stehen.

Das im Rahmen des Transferprojekts entwickelte Modell ProSite identifiziert optimale Standorte zur Erzeugung erneuerbarer Energie aus Biomasse unter Berücksichtigung von zahlreichen restriktiven Faktoren mit Ausschlusswirkung sowie unterschiedlich gewichteten und nach euklidischen Distanzen klassifizierten selektiven Faktoren. Die in dieser Arbeit weiterentwickelte Version des Modells berücksichtigt als potentielle Produktionsflächen von Energiemais diejenigen Flächen, die das Modell ProLand in einem vorherigen

Berechnungsschritt als vorzüglich ausweist. Folglich sind außer der Lage dieser landwirtschaftlichen Parzellen zusätzlich Kennzahlen des Anbauverfahrens "Energimais" wie z.B. Bodenrenten und Biomasseerträge bekannt. Die Koppelung beider Modelle eröffnet weitere Analyseoptionen, wie die Berechnung der Transportkosten des Landnutzungsverfahrens „Energimais“, die Bestimmung von vorzüglichen Anbaugebieten sowie von potentiellen Substratmengen innerhalb der Einzugsgebiete der Biogasanlagen. Somit kalkuliert ProLand erstmalig die von den Standorten der Verarbeitungsindustrie abhängigen Bodenrenten unter Berücksichtigung von räumlich differenzierten Preisen.

Die Ergebnisse der Landnutzungsprognosen verdeutlichen die Auswirkungen des EEG auf die Landnutzung und das landwirtschaftliche Einkommen in der Untersuchungsregion. Unter der Annahme, dass lediglich von den drei bestehenden Biogasanlagen des Projektpartners eine zusätzliche Maisnachfrage ausgeht, prognostiziert ProLand einen Anstieg des Silomaisanteils von rund 6,9 auf ca. 8,5 % der Ackerfläche, was zu einer Erhöhung der Bodenrente von etwa 20 € pro Hektar und Jahr führt. Wird eine flächenhafte Nachfrage nach Energimais unterstellt, dehnt sich im Extremfall bei einem Energimaispreis von 32,5 €/t der Silomaisanteil auf ca. 27,1 % der Ackerfläche aus, was mit einem Anstieg der Bodenrenten um etwa 105 € je Hektar und Jahr einhergeht. Auch ohne zusätzliche Nachfrage nach Energimais ermittelt ProLand eine Zunahme des Maisanteils von ursprünglich rund 12 % auf etwa 40 % der Ackerfläche, welche hauptsächlich durch eine Ausdehnung der Körnermaisflächen auf Kosten von weniger vorzüglichen Kulturen wie z.B. Roggen begründet ist. Ursachen für die prognostizierte Zunahme der Maisflächen liegen nicht nur in der vom EEG induzierten ökonomischen Vorzüglichkeit von Energimais. So ist Mais generell gegenüber anderen Kulturpflanzen wie Weizen u.a. aufgrund des vergleichsweise hohen Marktpreises und wegen fortschreitender Züchtungsfortschritte im Vorteil.

Das Standortbestimmungsmodell ProSite weist in der Untersuchungsregion zahlreiche geeignete Gebiete für unterschiedliche Biogasanlagentypen unter Berücksichtigung von bereits bestehenden Landnutzungen aus. Außer einer Vielzahl von geeigneten Flächen, stuft das Modell im Fall von konventionellen Biogasanlagen fünf potentielle Standorte als „sehr gut“ ein. Für biomethanproduzierende Anlagen weist ProSite im Westen der Untersuchungsregion einen Standort als „sehr gut“ aus. Für diesen Anlagenstandort erfolgt auf Grundlage der Interaktion der Modelle ProLand und ProSite zunächst die Bodenrentenberechnung innerhalb des Einzugsgebiets der Anlage mit anschließender Transportkostenanalyse. Hieraus resultiert ein Ertragspotential in Höhe von ca. 36.680 t Energimais pro Jahr. Aus dieser Substratmenge kann eine Biomethananlage etwa 4,15 Mio. m³ Bioerdgas produzieren. Diese

Gasmenge trägt zur jährlichen Deckung des Energiebedarfs von rund 2.075 Einfamilienhäusern bei.

Außer der Bestimmung von potentiellen neuen Standorten bewertet das Modell ProSite die Standorteignung bestehender Anlagen unter Berücksichtigung der Anforderungen der verschiedenen Anlagentypen. So ist der Standort der konventionellen Biogasanlage des Projektpartners in der Nähe der Ortschaft Lorsch insbesondere aufgrund der hohen Entfernung zu vorzüglichen Energiemaisanbauflächen als "befriedigend" eingestuft. Der Standort der Biomethananlage Darmstadt-Wixhausen hingegen ist "sehr gut" geeignet, da in unmittelbarer Nähe sowohl potentielle Energiemaisanbauflächen, zahlreiche gülleliefernde Betriebe sowie Versorgungsinfrastrukturen vorhanden sind. Der Standort der Biomethananlage Semd ist als "befriedigend" bis "gut" ausgewiesen. In diesem Fall wirkt die relativ hohe Transportstrecke für Gülle negativ auf die Standorteignung. Weiterführende Analysen zeigen, dass ProSite auch als alleinstehendes Modell ohne eine vorherige Landnutzungsmodellierung Standorte biomassekonvertierender Anlagen ausreichend differenziert bewertet.

Aufgrund der Modellerweiterungen und der implementierten Interaktionen der Modelle ProLand und ProSite entsteht ein multikriterielles, räumliches Entscheidungsunterstützungssystem, das auf unterschiedliche Anforderungen flexibel anpassbar ist und die Fragestellung nach optimalen Standorten zur Erzeugung von erneuerbarer Energie aus Biomasse transparent beantwortet.

7 Literaturverzeichnis

- ASCOUGH, J. C.; RECTOR, H. D.; HOAG, D. L.; VANDENBERG, B. C.; SHAFFER, M. J.; WELTZ, M. A. & AHJUA, L. R. (2002). *Multicriteria Spatial Decision Support Systems: Overview, Applications, and Future Research Directions*. In: The International Environmental Modelling and Software Society. Online Proceedings. Volume 3, S. 175-180.
- BAEUMER, K. (1997). *Anbauverhältnis und Fruchtfolge*. In: Hanus, H.; Heyland, K.-U. & E. R. Keller, E.R.: *Handbuch des Pflanzenbaues*, Bd. 1, Grundlagen der Pflanzenproduktion. Stuttgart.
- BATHELT, H. & GLÜCKLER, J. (2003). *Wirtschaftsgeographie* (2. Ausg.). Stuttgart.
- BECKMANN, M. J. (1999). *Lectures on Location Theory*. Berling.
- BLASCHKE, T. & LANG, S. (2007). *Landschaftsanalyse mit GIS*. Stuttgart.
- BOSCH, S. (2011). *Energieplanung 2.0 - Neuorientierung in der Energiebranche*. In: Landmarcs Geo Business News Ausgabe 2, S. 1 und 5.
- BÖSS, G. (9. Januar 2008). Interview zum Thema: Biogasanlagen im südhessischen Versorgungsgebiet der HSE. Darmstadt.
- BRINKMANN, T. (1922). *Die Ökonomik des landwirtschaftlichen Betriebs. Grundriß der Sozialökonomik*, Bd. 7. Tübingen.
- CORMEN, T. H. & MOLITOR, P. (2010). *Algorithmen - eine Einführung*. München.
- CZERANKA, M. (1997). *GIS-basierte Entscheidungsunterstützung in der naturschutzorientierten Raumplanung*. Vechta.
- DE LANGE, N. (2002). *Geoinformatik in Theorie und Praxis*. Berlin.
- DICKEN, P. & LLOYD, P. (1999). *Standort und Raum. Theoretische Perspektiven in der Wirtschaftsgeographie*. Stuttgart.
- EEG: *Gesetz über den Vorrang Erneuerbarer Energien*. (2009). In: Bundesgesetzblatt. Bonn.
- EEWÄRMEG: *Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energie im Wärmebereich*. (2008). In: Bundesgesetzblatt. Bonn.
- ESRI: ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. (2011). *ArcGIS Ressource Center. Desktop Help 10.0*. Abgerufen am 8.12.2011 von <http://help.arcgis.com/de/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#na/004700000067000000/>

- FNR: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (2011). *Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe 2011*. Abgerufen am 06.11.2011 von <http://www.nachwachsenderohstoffe.de>
- FNR: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (2010). *Jahresbericht 2009/2010*. Gülzow.
- FLITNER, M. (2005). *Heimat als Zeitlandschaft: subjektive Zeiten, Eigenzeiten, Weltzeit*. In: Deutscher Rat für Landespflege. Schriftenreihe Landschaft und Heimat, Ausg. 77, S. 50-54.
- FSTRG: Bundesfernstrassengesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. Juni 2007 (BGBl. I S. 1206).
- GADOCHA, S. (2011). *Biomassepotenzial - Modellierung mit GIS*. In: *gis.BUSINESS*, Ausg. 3/2011, S. 47 - 49.
- GEISLER, G. (1988). *Pflanzenbau: ein Lehrbuch. Biologische Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion*. Berlin.
- IE: INSTITUT FÜR ENERGETIK UND UMWELT GGMBH. (2007). *Monitoring zur Wirkung des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse*. Leipzig.
- IE: INSTITUT FÜR ENERGETIK UND UMWELT GGMBH UND UNIVERSITÄT HOHENHEIM. (2005). *Nachhaltige Biomassenutzungsstrategien im europäischen Kontext*. Leipzig.
- KEYMER, U. & REINHOLD, G. (2006). *Grundsätze bei der Projektplanung*. In: FNR e.V. (Hrsg.), *Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung*. (S. 182 - 209). Gülzow.
- KORNATZ, P. (o.J.). *Auswirkungen der Biogaserzeugung auf die Landnutzung in Deutschland*. Gießen.
- KTBL: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT. (2010). *Feldarbeitsrechner*. Abgerufen am 23.02.2010 von <http://www.ktbl.de/index.php?id=806>
- KTBL: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT. (2008). *Betriebsplanung Landwirtschaft 2008/09. Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft. Aufl. 21*. Darmstadt.
- KUHLMANN, F. (2010 a). *Energiepflanzen - Wirtschaftlichkeit und Landnutzungsentwicklung*. Abgerufen am 15.04.2010 von http://www.landschaft-nutzen.de/pdf/Kuhlmann_Symposium_2010_03_11.pdf

- KUHLMANN, F. (2010 b). *Produktionsfunktionen für die Nutzpflanzenerzeugung: Substitutionalität oder Komplementarität der Produktionsfaktoren?* In: Berichte über Landwirtschaft, Band 88, Heft 2, S. 322-360.
- KUHLMANN, F. (2007). *Betriebslehre der Agrar- und Ernährungswirtschaft*. Frankfurt.
- KUHLMANN, F. (2004). *Landwirtschaftliche Standortwirkungslehre*. Gießen.
- KUHLMANN, F.; MÖLLER, D. UND WEINMANN, B. (2002). *Modellierung der Landnutzung - Regionshöfe oder Rasterlandschaft?* In: Berichte über Landwirtschaft, 80. S. 351 - 392.
- LADSTÄTTER, P. (2011). Grenzen der GeoIntelligenz. In: *arcAKTUELL. Mit GIS verknüpfen, was zusammengehört - GeoIntelligenz im Netzwerkeinsatz, Ausgabe 2/2011*, S. 13.
- LEV: LANDESENERGIEVEREIN STEIERMARK. (2005). *Biogaspotenzialstudie für das Land Steiermark*. Graz.
- LANG, S. & LANGANKE, T. (2006). *Object-based mapping and object-relationship modeling for land use classes and habitats*. In: Zeitschrift für Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, Ausg. 1/2006., S. 5-18.
- MA, J.; SCOTT, N. R.; DEGLORIA, S. & LEMBO, A. J. (2005). *Siting analysis of farm-based centralized anaerobic digester systems for distributed generation using GIS*. In: Biomass and Bioenergy 28, S. 591 - 600.
- NUSSER, M., SHERIDAN, P., SEYDEL, P., WALZ, R., & WYDRA, S. (2007). *Makroökonomische Effekte von nachwachsenden Rohstoffen*. In: Agrarwirtschaft, Jg. 56, Heft 5/6, S. 238-248.
- ODENING, M., & BALMANN, A. (1997). *Probleme einer Politikoptimierung – Konsequenzen für die Konstruktion von Agrarsektormodellen*. In: Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus e.V., Bd. 33, S. 371-383.
- ÖKOINSTITUT UND FRAUNHOFER INSTITUT FÜR UMWELT-, SICHERHEITS- UND ENERGIETECHNIK. (2004). *Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse*. Darmstadt.
- PAPADIMITRIOU, C. H. & STEIGLITZ, K. (1982). *Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity*. Englewood Cliffs.
- PLATA, A. (2008). *Optimale Standorte von Biogasanlagen - Eine Multikriterienanalyse mit GIS*. Gießen.
- POMMER, G. (1998). *Fruchtfolgegestaltung*. In: H. Hüffmeier, & M. Munzert, Die Landwirtschaft, Bd.1, Pflanzliche Erzeugung. München.

- RUNTE, O. (2006). *Regeneratives Energiepotential in Südhessen*. Darmstadt.
- SAURER, H. & BEHR, F.-J. (1997). *Geographische Informationssysteme. Eine Einführung*. Darmstadt.
- SCHARDINGER, I. (2007). *Standortevaluierung für Biogasanlagen*. Salzburg.
- SCHROERS, J. O. (2006). *Zur Entwicklung der Landnutzung auf Grenzstandorten in Abhängigkeit agrarmarktpolitischer, agrarstrukturpolitischer und produktionstechnologischer Rahmenbedingungen – eine Analyse mit dem Simulationsmodell ProLand*. Gießen.
- SCHWAP, A. (1995). *Einsatz Geographischer Informationssysteme zur Unterstützung politischer Entscheidungsprozesse in der Regionalplanung*. In: Dollinger, F. & Strobl, J. (Hrsg.): *Salzburger Geographische Materialien, Angewandte Geographische Informationsverarbeitung*, S. 255-264.
- SETTEGAST, H. (1885). *Die Landwirtschaft und ihr Betrieb*, 3. Aufl. Breslau.
- SFB 299: SONDERFORSCHUNGSBEREICH 299 DER JUSTUS-LIEBIG-UNIVERSITÄT. *Landnutzungskonzepte für periphere Regionen*. (2010). *Integrierte Evaluierung Energiepflanzenanbau. Abschlussbericht 2007/2 - 2010/1*. Gießen.
- SFB 299: SONDERFORSCHUNGSBEREICH 299 DER JUSTUS-LIEBIG-UNIVERSITÄT. *Landnutzungskonzepte für periphere Regionen*. (2007). *Integrierte Evaluierung Energiepflanzenanbau. Finanzierungsantrag 2007/2 - 2008 - 2009*. Gießen.
- SHERIDAN, P. (2010). *Das Landnutzungsmodell ProLand - Erweiterungen, Operationalisierungen, Anwendungen*. Gießen.
- TA LUFT: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft in der Neufassung vom 24.07.2002. (GMBL., Nr. 25 - 29, S. 511 - 605).
- TOEWS, T. (2007). *Transportkosten von Silomais. Bremsen die Transportkosten große Biogasanlagen aus?* In: *Lohnunternehmen* Bd. 9, Jg. 62, S. 34 - 37.
- trend:research - Institut für Trend- und Marktforschung. (2009). *Standortprofil Jüterbog*. Bremen.
- VOGNILD, R. (2009). *Mapping the potential for biogas production in a norwegian county*. In: *ArcNews*. Ausg. 31, Nr. 1., S. 35.
- VON THÜNEN, J. H. (1826, verwendet in der Neuauflage der 3. Auflage von 1966). *Der isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie*. Darmstadt.

WAIBEL, L. (1933). *Das Thünensche Gesetz und seine Bedeutung für die Landwirtschaftsgeographie. Probleme der Landwirtschaftsgeographie.* In: Wirtschaftsgeographische Abhandlungen. Nr.1. S. 47 - 78.

WEBER, A. (1922). *Ueber den Standort der Industrien. Erster Teil. Reine Theorie des Standorts.* (2. Ausg.). Tübingen.

WEINMANN, B., & SCHROERS, J. O. (2006). *Simulating the effects of decoupled transfer payments using the land use model ProLand.* In: Agrarwirtschaft 55 (5/6), S. 248-256.

WEINMANN, B. (2002). *Mathematische Konzeption und Implementierung eines Modells zur Simulation regionaler Landnutzungsprogramme.* Gießen.

WEINSCHENK, G. & HENRICHSMEYER, W. (1966). *Zur Theorie und Ermittlung des räumlichen Gleichgewichts der landwirtschaftlichen Produktion.* In: Berichte über Landwirtschaft, Bd. 44 S. 201-241.

WUPPERTAL INTSTITUT FÜR KLIMA, UMWELT, ENERGIE. (2006). *Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse. Band 1.* Wuppertal.

7.1 Datengrundlagen

ATKIS: Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (2009). *Digitales Basis-Landschaftsmodell Hessen (Basis-DLM Hessen).* Wiesbaden.

BfN: Bundesamt für Naturschutz (2003). *Naturräume Deutschlands.* Bonn.

BMELV: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. (2010). *Anbau, Ertrag und Ernte der Feldfrüchte.* Abgerufen am 19. 11. 2010 von <http://berichte.bmelv-statistik.de/SJT-3072200-0000.pdf>

BSA: Bundessortenamt (2007). *Ergebnisse der Wertprüfungen.* Hannover.

DWD: Deutscher Wetterdienst (2006). *Klimadaten BRD 1979 – 2006, AZ: 356_06.* Offenbach.

Esri: Environmental Systems Research Institute, Inc. (2008). *Data & Maps Europe.* Redlands.

HLBG: Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation (2007). *Digitales Geländemodell 25 (DGM 25).* Wiesbaden.

HLBG: Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation (2007). *Rasterdaten der topographische Karte 1:25.000.* Wiesbaden.

HLUG: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2003). *BFD50: Digitale Bodenflächendaten 1 : 50000 Hessen*. Wiesbaden.

HLUG: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2008). *Schlaggeometrien Hessen 2007*. Wiesbaden.

HTSK: Hessische Tierseuchenkasse (2008). *Rinder- und Schweinebestände 2008*. Wiesbaden.

HVBG: Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (2008). *Amtliche Hauskoordinaten auf Basis des Liegenschaftskatasters des Landes Hessen. Georeferenzierte Gebäudeadressen – Bereich Südhessen*. Wiesbaden.

KTBL: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (2010). *Feldarbeitsrechner*. Abgerufen am 23.02.2010 von <http://www.ktbl.de/index.php?id=806>

Statistisches Bundesamt (2009). *GENESIS-Online Datenbank. Erzeugerpreisindizes landwirtschaftlicher Produkte: Deutschland, Monate, Messzahlen ohne Umsatzsteuer, Landwirtschaftliche Produkte*. Wiesbaden.

Abgerufen am 12.02.2010 von <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>.

ZMP: Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle GmbH (2008). *Marktbilanz Getreide, Ölsaaten, Futtermittel*. Bonn.

8 Anhang

8.1 Flächensummen und Anteile der Kulturarten bzw. Nutzungen in der Untersuchungsregion

Kulturart / Nutzung	Fläche in ha	Anteil	Typ*
Acker-, Puff- und Pferdebohnen zur Körnergewinnung	15,5	0,02%	
Ackerland aus der Produktion genommen	390,9	0,55%	
Alle anderen Flächen	512,6	0,72%	
Alle anderen Getreidearten (bitte angeben)	6,1	0,01%	
Alle anderen Handelsgewächse	156,2	0,22%	
alle anderen Hülsenfrüchte	0,1	0,00%	
andere Ölfrüchte (z. B. Körnersenf)	8,6	0,01%	
Aufforstung nach der Erstaufforstungsprämie (ab 1993)	0,2	0,00%	SK
Baumschulen, nicht für Beerenobst	40,8	0,06%	SK
Beerenobst	52,1	0,07%	SK
Bewirtschaftete Gewässer, Teichflächen	1,8	0,00%	SK
Blumen und nicht verholzende Zierpflanzen (Freiland)	54,1	0,08%	SK
Blumen und Zierpflanzen unter Glas	1,3	0,00%	SK
Chinaschilf (Miscanthus)	9,2	0,01%	SK
Corn-Cob-Mix	30,7	0,04%	
Dauergrünland	21167,7	29,81%	GL
Dinkel	30,1	0,04%	
Erbsen zur Körnergewinnung	140,7	0,20%	
Erdbeeren (Freiland)	396,0	0,56%	SK
Futterhackfrüchte (z. B. Futterrüben)	9,9	0,01%	
Gartenbausämerei Obst und Gemüse	6,9	0,01%	SK
Gartenbausämerei Zierpflanzen	0,7	0,00%	SK
Gemüse (Freiland)	4056,4	5,71%	SK
Gemüse und Pilze unter Glas	5,9	0,01%	SK
Gras	790,9	1,11%	
Grassamenvermehrung	9,9	0,01%	
Grünland aus der Produktion genommen	58,7	0,08%	GL
Hafer	864,3	1,22%	
Hartweizen	120,4	0,17%	
Haselnüsse	0,0	0,00%	SK
Haus- und Nutzgärten	39,2	0,06%	
Heil- und Gewürzpflanzen	485,3	0,68%	SK
Kern- und Steinobst	57,7	0,08%	SK
Klee	37,5	0,05%	
Kleegras	746,5	1,05%	
Klee-Luzerne-Gemisch	57,3	0,08%	
Körnermais	1422,2	2,00%	
Küchenkräuter	227,1	0,32%	SK
Luzerne	83,4	0,12%	
Niederwald mit Kurzumtrieb	0,3	0,00%	SK

Kulturart / Nutzung	Fläche in ha	Anteil	Typ*
Rebland	94,1	0,13%	SK
Rhabarber	48,1	0,07%	SK
Roggen	2230,6	3,14%	
Silomais	2771,8	3,90%	
Sommergerste	3783,6	5,33%	
Sommernenggetreide	64,7	0,09%	
Sommerraps (00) und Sommerrüben zur Körnergewinnung	1,2	0,00%	
Sommerweizen (Weichweizen) einschließlich Hartweizen	80,5	0,11%	
Sonnenblumen zur Körnergewinnung	18,1	0,03%	
Sonstige Dauerkulturen	42,4	0,06%	SK
Sonstige Obstanlagen (z. B. Haselnuss, Holunder)	8,3	0,01%	SK
Speisekartoffeln/sonstige Kartoffeln	1930,6	2,72%	
Steillagenweinbau	7,4	0,01%	SK
Stilllegung mit einjährigen nachwachsenden Rohstoffen zur Erzeugung von Biogas	186,6	0,26%	SL
Stilllegung mit Nachwachsenden Rohstoffen mit Vertrag	1487,6	2,09%	SL
Stilllegung mit Nachwachsenden Rohstoffen ohne Vertrag	15,3	0,02%	SL
Stilllegung ohne Nachwachsende Rohstoffe	2413,5	3,40%	SL
Streuobst	55,8	0,08%	SK
Süßlupinen zur Körnergewinnung	2,9	0,00%	
Triticale	649,6	0,91%	
Unbefestigte Mieten, Stroh-, Futter- und Dunglagerplätze	8,0	0,01%	
Walnüsse	3,1	0,00%	SK
Weihnachtsbäume	24,8	0,03%	SK
Weinbergsbrache	0,3	0,00%	SK
Wintergerste	4914,9	6,92%	
Wintermenggetreide	53,8	0,08%	
Winterraps (00) und Winterrüben zur Körnergewinnung	1959,3	2,76%	
Winterweizen (Weichweizen)	11907,9	16,77%	
Zuckermais	65,2	0,09%	
Zuckerrüben	4088,9	5,76%	
Summe	71014,3	100,00%	
* SK = Sonderkultur, GL = Grünland, SL= Stilllegungsfläche			

Quelle: Eigene Darstellung. Datengrundlage Geodatensatz Schlaggeometrien Hessen 2007, Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Wiesbaden. Vereinbarung Nr. 22 2008 0100.

8.2 Faktoren zur Standortbewertung aus ATKIS Basis-DLM Hessen

Code	Langform	Attributtyp / Namenstyp	Attributwert Name	Restriktiv / Selektiv	Eingang in Faktor	Puffer
2111	Wohnbaufläche	Objektart		R	Wohnbauflächen	300 m
2112	Industrie- und Gewerbefläche	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2113	Fläche gemischter Nutzung	Objektart		R	Wohnbauflächen	300 m
2114	Fläche bes. funktionaler Prägung	Objektart		R + S	Überbaute Gebiete + Wärmeabnehmer	300 m
2121	Bergbaubetrieb	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2122	Deponie	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2123	Raffinerie	Objektart		R + S		
2124	Werft	Objektart		R + S		
2126	Kraftwerk	Objektart		R + S		
2127	Umspannstation	Objektart		R + S	Überbaute Gebiete	
2128	Förderanlage	Objektart		R + S		
2129	Kläranlage, Klärwerk	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2131	Ausstellungs-, Messegelände	Objektart		R + S		
2132	Gärtnerei	Objektart		R + S	Überbaute Gebiete + Wärmeabnehmer	
2133	Heizwerk	Objektart		R + S		
2134	Wasserwerk	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2135	Abfallbehandlungsanlage	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2201	Sportanlage	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2202	Freizeitanlage	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2211	Freilichttheater	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2212	Freilichtmuseum	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2213	Friedhof	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2221	Stadion	Objektart		R + S		
2222	Sportplatz	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2223	Schießanlage	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2224	Schwimmbad, Freibad	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2225	Zoo	Objektart		R + S		
2226	Freizeit-, Safaripark, Wildgehege	Objektart		R		
2227	Grünanlage	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2228	Campingplatz	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2229	Autokino, Freilichtkino	Objektart		R		

Code	Langform	Attributtyp / Namenstyp	Attributwert Name	Restriktiv / Selektiv	Eingang in Faktor	Puffer
2230	Golfplatz	Objektart		R		
2301	Tagebau, Grube, Steinbruch	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2302	Halde, Aufschüttung	Objektart		R		
2304	Rieselfeld	Objektart		R		
2311	Gradierwerk	Objektart		R		
2314	Absetz-, Erdfaulbecken, Schlammteich	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2315	Gebäude	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2315	Gebäude	Gebäudefunktion	Schloss	R	Überbaute Gebiete	
2315	Gebäude	Gebäudefunktion	Burg, Festungsgebäude	R	Überbaute Gebiete	
2315	Gebäude	Gebäudefunktion	Kirche	R	Überbaute Gebiete	
2315	Gebäude	Gebäudefunktion	Kapelle	R	Überbaute Gebiete	
2315	Gebäude	Gebäudefunktion	Gotteshaus	R	Überbaute Gebiete	
2315	Gebäude	Gebäudefunktion	Krankenhaus	R	Überbaute Gebiete	
2315	Gebäude	Gebäudefunktion	Windmühle	R	Überbaute Gebiete	
2315	Gebäude	Gebäudefunktion	Pumpstation	R	Überbaute Gebiete	
2315	Gebäude	Gebäudefunktion	Wasserbehälter	R	Überbaute Gebiete	
2315	Gebäude	Gebäudefunktion	Schutzhütte	R	Überbaute Gebiete	
2315	Gebäude	Herausragendes Gebäude	Hochhaus	R	Überbaute Gebiete	
2315	Gebäude	Zustand	verfallen, zerstört ('Ruine')	R	Überbaute Gebiete	
2316	Turm	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2316	Turm	Funktion	Wasserturm	R	Überbaute Gebiete	
2316	Turm	Funktion	Kirchturm, Glockenturm	R	Überbaute Gebiete	
2316	Turm	Funktion	Aussichtsturm	R	Überbaute Gebiete	
2316	Turm	Funktion	Kontrollturm	R	Überbaute Gebiete	
2316	Turm	Funktion	Kühlturm	R	Überbaute Gebiete	
2316	Turm	Funktion	Leuchtturm	R	Überbaute Gebiete	
2316	Turm	Funktion	Wachturm	R	Überbaute Gebiete	
2316	Turm	Funktion	Sende-, Funk, Fernmeldeturm	R	Überbaute Gebiete	
2316	Turm	Funktion	Stadt-, Torturm	R	Überbaute Gebiete	
2316	Turm	Funktion	sonstige	R	Überbaute Gebiete	
2317	Schornstein, Schlot, Esse	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2318	Durchfahrt	Objektart		R		

Code	Langform	Attributtyp / Namenstyp	Attributwert Name	Restriktiv / Selektiv	Eingang in Faktor	Puffer
2319	Brunnen	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2320	Stollenmundloch, Keller-, Höhleneingang, Schachttöffnung	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2323	Dock	Objektart		R		
2325	Pumpe, Pumpstelle	Objektart		R		
2327	Windrad	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2331	Archäologische Fundstätte	Objektart		R	Sonstige	
2331	Archäologische Fundstätte	Archäologischer Typ	Niederlassung	R	Sonstige	
2331	Archäologische Fundstätte	Archäologischer Typ	Fliehburg, Ringwall	R	Sonstige	
2331	Archäologische Fundstätte	Archäologischer Typ	Siedlung	R	Sonstige	
2331	Archäologische Fundstätte	Archäologischer Typ	Lager	R	Sonstige	
2331	Archäologische Fundstätte	Archäologischer Typ	Steingrab	R	Sonstige	
2331	Archäologische Fundstätte	Archäologischer Typ	Hügelgrab	R	Sonstige	
2331	Archäologische Fundstätte	Archäologischer Typ	Wasserleitung	R	Sonstige	
2331	Archäologische Fundstätte	Archäologischer Typ	Aquädukt	R	Sonstige	
2331	Archäologische Fundstätte	Archäologischer Typ	Grenzwall, Schutzwall	R	Sonstige	
2331	Archäologische Fundstätte	Archäologischer Typ	Landwehr, Schanze	R	Sonstige	
2331	Archäologische Fundstätte	Archäologischer Typ	Wachturm (römisch)	R	Sonstige	
2331	Archäologische Fundstätte	Archäologischer Typ	Pfahlbau	R	Sonstige	
2331	Archäologische Fundstätte	Archäologischer Typ	Opferstein	R	Sonstige	
2332	Denkmal, Denkstein, Standbild	Objektart		R	Sonstige	
2333	Bildstock, Wegekreuz, Gipfelkreuz	Objektart		R	Sonstige	
2334	Meilenstein	Objektart		R	Sonstige	
2343	Zuschauertribüne	Objektart		R		
2344	Rennbahn, Laufbahn, Geläuf	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2345	Schwimmbecken	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2346	Sprungschanze (Anlauf)	Objektart		R		
2351	Mauer, Wand	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
2352	Zaun	Objektart		R	Überbaute Gebiete	
3101	Straße	Objektart		R	Verkehrswege	20 m
3101	Straße	Widmung	Bundesautobahn	R	Verkehrswege	20 m
3101	Straße	Widmung	Bundesstraße	R + S	Verkehrswege, befestigte Wege	20 m
3101	Straße	Widmung	Landesstraße, Staatsstraße	R + S	Verkehrswege, befestigte Wege	20 m

Code	Langform	Attributtyp / Namenstyp	Attributwert Name	Restriktiv / Selektiv	Eingang in Faktor	Puffer
3101	Straße	Widmung	Kreisstraße	R + S	Verkehrswege, befestigte Wege	20 m
3101	Straße	Widmung	Gemeindestraße	R + S	Verkehrswege, befestigte Wege	20 m
3102	Weg	Objektart		R	Verkehrswege	
3102	Weg	Breite des Verkehrsweges	Klasse 6: über 0m bis 6m	R	Verkehrswege	
3102	Weg	Breite des Verkehrsweges	Klasse 9: über 6m bis 9m	R	Verkehrswege	
3102	Weg	Breite des Verkehrsweges	Klasse 12: über 9m bis 12m	R	Verkehrswege	
3102	Weg	Breite des Verkehrsweges	Klasse 15: über 12m bis 15m	R	Verkehrswege	
3102	Weg	Breite des Verkehrsweges	Klasse 18: über 15m bis 18m	R	Verkehrswege	
3102	Weg	Breite des Verkehrsweges	Klasse 21: über 18m bis 21m	R	Verkehrswege	
3102	Weg	Breite des Verkehrsweges	Klasse 24: über 21m bis 24m	R	Verkehrswege	
3102	Weg	Breite des Verkehrsweges	Klasse 27: über 24m bis 27m	R	Verkehrswege	
3102	Weg	Breite des Verkehrsweges	Klasse 30: über 27m bis 30m	R	Verkehrswege	
3102	Weg	Funktion	Hauptwirtschaftsweg, Verbindungsweg (Fahrweg)	R + S	Verkehrswege, befestigte Wege	
3102	Weg	Funktion	Wirtschaftsweg (Feld-, Waldweg)	R	Verkehrswege	
3102	Weg	Funktion	Fußweg	R	Verkehrswege	
3102	Weg	Funktion	Park-, Friedhofsweg	R	Verkehrswege	
3102	Weg	Funktion	Reitweg	R	Verkehrswege	
3102	Weg	Funktion	Skaterstrecke	R	Verkehrswege	
3102	Weg	Bauart, Konstruktionsmerkmal	Treppe	R	Verkehrswege	
3103	Platz	Objektart		R	Verkehrswege	
3103	Platz	Kurzbezeichnung	Kennzahl, Name o.ä.	R	Verkehrswege	
3103	Platz	Funktion	Parkplatz	R	Verkehrswege	
3103	Platz	Funktion	Rastplatz	R	Verkehrswege	
3103	Platz	Funktion	Festplatz	R	Verkehrswege	
3103	Platz	Funktion	Fußgängerzone	R	Verkehrswege	
3103	Platz	Funktion	Verkehrsfläche	R	Verkehrswege	
3103	Platz	Funktion	sonstige	R	Verkehrswege	
3201	Schienenbahn	Objektart		R	Verkehrswege	20 m
3202	Seilbahn, Schwebebahn	Objektart		R	Verkehrswege	20 m
3203	Schienenbahn (komplex)	Objektart		R	Verkehrswege	20 m
3204	Bahnkörper	Objektart		R	Verkehrswege	20 m

Code	Langform	Attributtyp / Namenstyp	Attributwert Name	Restriktiv / Selektiv	Eingang in Faktor	Puffer
3205	Bahnstrecke	Objektart		R	Verkehrswege	20 m
3301	Flughafen	Objektart		R + S		500 m
3302	Flugplatz, Landeplatz	Objektart		R	Verkehrswege	500 m
3401	Hafen	Objektart		R		
3402	Hafenbecken	Geographischer Name	amtlicher Name, Eigenname	R		
3501	Bahnhofsanlage	Objektart		R	Verkehrswege	
3502	Raststätte	Objektart		R		
3531	Freileitung	Objektart		R + S	Verkehrswege, Stromleitung	
3531	Freileitung	Funktion	Stromversorgung	R + S	Verkehrswege, Stromleitung	
3531	Freileitung	Lage zur Erdoberfläche	über der Erdoberfläche	R + S	Verkehrswege, Stromleitung	
3532	Rohrleitung, Pipeline	Objektart		R		
3533	Förderband, Bandstraße	Objektart		R		
3541	Mast	Objektart		R	Verkehrswege	
3541	Mast	Funktion	Freileitungsmast	R	Verkehrswege	
3541	Mast	Funktion	Antennen-, Funk-, Sendemast	R	Verkehrswege	
3542	Radioteleskop	Objektart		R		
4107	Wald, Forst	Objektart		R	Wald	
4108	Gehölz	Objektart		R	Wald	
4201	Baum	Objektart		R	Wald	
4201	Baum	Widmung	Naturdenkmal	R	Wald	
4202	Baumreihe	Objektart		R	Wald	
5101	Strom, Fluss, Bach	Objektart		R	Gewässer	100 m
5102	Kanal (Schifffahrt)	Objektart		R	Gewässer	100 m
5103	Graben, Kanal (Wasserwirtschaft)	Objektart		R	Gewässer	100 m
5105	Quelle	Objektart		R	Gewässer	100 m
5112	Binnensee, Stausee, Teich	Objektart		R	Gewässer	100 m
6211	Felsen, Felsblock, Felsnadel	Objektart		R	Sonstige	
6211	Felsen, Felsblock, Felsnadel	Widmung	Naturdenkmal	R	Sonstige	
7301	Nationalpark	Objektart		R	Sonstige	

Quelle: Eigene Darstellung, verändert und erweitert nach ATKIS 2009.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre: Ich habe die vorgelegte Dissertation selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der "Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherstellung guter wissenschaftlicher Praxis" niedergelegt sind, eingehalten.

Hannover, 25.01.2011

Adam Plata