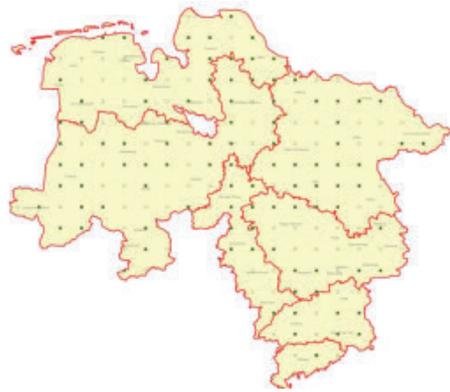


Potenzialanalyse zur Bereitstellung von natürlicher Biomasse (NatBio)



Abschlussbericht

im Rahmen der Forschungskoooperation Biomasse für SunFuel[®]
(2. Phase, 2009-2014)

finanziert durch

VOLKSWAGEN

AKTIENGESELLSCHAFT



Niedersächsisches Ministerium
für Ernährung, Landwirtschaft,
Verbraucherschutz und Landesentwicklung

**Zuwendungsgeber: Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft,
Verbraucherschutz und Landesentwicklung**

Postfach 243; 30002 Hannover

Volkswagen AG

Brieffach 1662/7; 38436 Wolfsburg

Bearbeitung durch:



Gutenbergstraße 33; 37075 Göttingen



Abteilung Waldinventur und Fernerkundung des
Burckhardt-Instituts, Universität Göttingen

Büsgenweg 5; 37077 Göttingen

Projektbearbeitung: Tim Exner, M.Sc.

Anna-Maria Engel, M.Sc.

Koordination: Dr. Jens Wegener

Dr. Lutz Fehrmann

30. September 2011 in Göttingen

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Stand der Forschung	2
3. Methoden der Potenzialabschätzung durch Fernerkundung	4
3.1 Datengrundlagen.....	5
3.2 Inventurdesign	5
3.2.1 Stratifizierung.....	5
3.2.2 Zweistufiges Stichprobenverfahren.....	6
3.3 Aufnahmedesign.....	8
3.3.1 Klassifizierung von Biomassepotentialen	9
3.3.2 Konzipierung des Interpretationsschlüssels	10
3.3.3 Ablauf der Kartierung	13
3.4 Auswertungsdesign.....	13
3.4.1 Schätzer für das Linienabschnittsverfahren (Line Intercept Sampling):.....	14
3.4.2 Schätzer für die stratifizierte Stichprobe:.....	14
4. Ergebnisse der Potentialabschätzung für die Flächenpotentiale.....	16
4.1 Auswertung der Flächenklassen	16
4.2 Auswertung der Bestockungsklasse	19
5. Ergebnisse der Potentialabschätzung für die Biomassepotentiale: Von der Erhebungen von Flächenpotentialen zum Biomassevorkommen.....	22
5.1 Angaben zu Biomassedichten aus der Literatur	23
5.2 Destruktive Untersuchungen der Biomassedichte	24
5.3 Inventurdesign	25
5.4 Aufnahme	25
5.5 Auswertung.....	26
5.6 Ergebnisse.....	27
5.7 Diskussion der Ergebnisse/Kalkulation der Biomassepotentiale anhand von Literaturwerten	28
5.7.1 Zuordnung der Literaturwerte zu den Bestockungsklassen des NatBio-Projektes/Ergebnisse der Kalkulation	28
6. Überwachte Klassifikation zur Detektion von Heckengehölzen aus RapidEye-Satellitenbildern	32
6.1 Ziele der Studie.....	32
6.2 Methodik und Ablauf einer überwachten Klassifikation.....	32
6.3 Durchführung der überwachten Klassifikation.....	33

6.3.1	Festlegung der Klassenart und Klassenanzahl	33
6.3.2	Auswahl der Trainingsgebiete und Sammeln der Referenzsignaturen	33
6.3.3	Anwendung des Maximum-Likelihood-Algorithmus	34
6.4	Ergebnis und Genauigkeit der Klassifikation	35
6.4.1	Visuelle Validierung	35
6.4.2	Accuracy Assessment.....	36
6.4.3	Ergebnis des Accuracy Assessments.....	38
6.5	Bewertung und Diskussion	39
7.	Technikeinsatz in der Landschaftspflege.....	40
7.1	Erntekosten	41
7.2	Praxisbeispiel.....	44
7.3	Kosten der Ernte der für Niedersachsen ermittelten Biomasse	45
7.4	Gewinn durch die Holzhackschnitzel	48
8.	Fazit & Ausblick	51
9.	Literaturquellen.....	53
10.	Internetquellen.....	57
11.	Anhang	58

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Stratifizierung der Landesfläche in 6 landwirtschaftliche Großregionen.	6
Abbildung 2: Systematisches Grundraster zur Auswahl von Luftbildkacheln. Die zufällig ausgewählten Luftbildkacheln sind ausgefüllt (rot) dargestellt.	7
Abbildung 3: Innerhalb jeder ausgewählten Luftbildkachel ist ein systematisch angeordnetes Cluster von Stichprobenpunkten festgelegt (links). Als Aufnahmeeinheit ist an jedem Punkt eine Stichprobenlinie definiert.	9
Abbildung 4: Beispiel eines kartierten Transekts	13
Abbildung 5: Geschätzte mittlere relative Flächenanteile in den einzelnen Flächenklassen für die Straten 1 bis 6.	17
Abbildung 6: Relative Flächenanteile in den einzelnen Bestockungsklassen für die Straten 1 bis 6.	19
Abbildung 7: Relative Flächenanteile der Flächenklassen (li.) bzw. der Bestockungsklassen (re.) für die Gesamtfläche Niedersachsens.....	21
Abbildung 8: Verteilung der Bestockung in den Flächenklassen Ackerrandstreifen (A), Brachflächen (B), bereits mit natürlicher Biomasse bestockte Flächen (N) und Straßenrandstreifen (S) in Bezug auf die Gesamtfläche Niedersachsens.....	22
Abbildung 9: Inventurdesign der Biomasseerhebung mit festen Probeflächen (1 – 16), Einmesspunkt (F)	25
Abbildung 10: Biomassevorrat in t/ha in den unterschiedlichen Klassen für Gesamt-Niedersachsen.....	30
Abbildung 11: Biomasse-Gesamtertrag in Tonnen in den unterschiedlichen Klassen für Gesamt-Niedersachsen.	31
Abbildung 12: Auswahl der Trainingsgebiete, in denen die Trainingssignaturen gesammelt wurden	34
Abbildung 13: Links: Ergebnis der Klassifizierung (hellgrün: holzartige Biomasse, dunkelgrün: bewirtschaftete Felder, braun: Brachland, lila: urbane Flächen, blau: Wasserflächen). Rechts zum Vergleich das Original RapidEye-Satellitenbild.	35
Abbildung 14: Visuell ausgewählte Referenzflächen und aus diesen zufällig ausgewählte Referenzpunkte, die zum Accuracy Assessment benutzt wurden.	38
Abbildung 15: Klassifikationsergebnisse der überwachten Klassifizierung.....	61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Interpretations- und Kartierschlüssel für Flächen- und Bestockungsklassen.....	12
Tabelle 2: Fläche in den einzelnen Klassen in Hektar, relativer Standardfehler in Prozent (kursiv) und Stichprobenumfang in den einzelnen Straten. Bei der Berechnung der Gesamtpotentiale ist die flächenproportionale Gewichtung der Straten zu beachten.....	18
Tabelle 3: Fläche in den einzelnen Bestockungsklassen in Hektar mit relativem Standardfehler in Prozent.....	20
Tabelle 4: Biomassepotentiale sortiert nach Art der Biomasse.....	23
Tabelle 5: Ergebnisse der Stichprobenerhebung des Biomassevorkommens von 16 Stichprobenflächen.....	28
Tabelle 6: Mögliche Biomasseerträge kalkuliert anhand von Literaturangaben (ohne Angabe statistischer Fehler).	29
Tabelle 7: Ergebnis des Accuracy Assessments (ERDAS Imagine) auf Basis der Referenzpunkte.....	38
Tabelle 8: Ernteverfahren von Landschaftspflegematerial dargestellt mit den jeweiligen fixen und variablen Kosten in €/a.....	42
Tabelle 9: Erntekosten verschiedener Ernteverfahren aus Literaturangaben.....	43
Tabelle 10: Erntekosten nach Literaturangaben für die einzelnen Bestockungsklassen.....	47
Tabelle 11: Erntekosten der Bestockungsklassen berechnet nach	48
Tabelle 12: Preise für Holzpellets und Holzhackschnitzel.....	49
Tabelle 13: Kosten und Gewinn durch Hackschnitzel der einzelnen Bestockungsklassen bezogen auf die Gesamtfläche in Niedersachsen	49
Tabelle 14: Erntekosten für die einzelnen Bestockungsklassen in Euro pro Tonne und Euro pro Hektar.....	50
Tabelle 15: Potentiale und Konvertierungen Pflanzenvolumen zu Biomasse	58
Tabelle 16: Classification Accuracy Report.....	59
Tabelle 17: Accuracy Total Report	60
Tabelle 18: Kappa Statistics Report	60

1. Einleitung

Die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien auf 20% des Endenergieverbrauchs in Europa bis 2020 ist ein wichtiges Ziel der EU als auch der Bundesregierung (Ammermann, 2008; Widmann 2007). Dafür stehen Abfall- und Restprodukte in einem breiten Spektrum zur Verfügung (Kaltschmitt, 2005; Oechsner, 2005). Die Menge von anfallendem Landschaftspflegematerial wurde bisher selten quantifiziert und spielt bisher bei der Energiegewinnung eine untergeordnete Rolle. Biomassen aus der Landschaftspflege sind jedoch nicht in der Kritik, in Konkurrenz zur Anbaubiomasse oder zur stofflichen Nutzung des Holzes zu stehen, was z. B. eindeutig für Mais aus der Landwirtschaft oder Hackschnitzel aus der Forstwirtschaft zutrifft. Auch kann die Nutzung von Biomasse aus der Landschaftspflege die Biodiversität erhöhen, da dadurch naturschutzfachlich wertvolle Lebensraumtypen des Offenlandes erhalten werden können, indem eine Nutzungsveränderung durch Gehölzsukzession vermieden wird.

Die Beerntung vorhandener Potentiale wurde bisher eher als ein notwendiges Übel und weniger als wirtschaftlich sinnvolle Maßnahme gesehen, da zum einen landwirtschaftliche Flächen von Büschen und Hecken frei gehalten werden sollen und zum anderen das Lichtraumprofil von Verkehrswegen zur Gewährleistung der Verkehrssicherheit offen gehalten werden muss. Eine gezielte Nutzung des gewonnenen Materials ist oftmals nicht vorgesehen. Eine Erfassung könnte jedoch für die wirtschaftliche Betrachtung von großer Bedeutung sein; bisher weist Landschaftspflegematerial einen geringen Marktwert auf, was zum Einen an mangelnder Kenntnis über angepasste Ernte- und Logistikverfahren und zum Anderen an dem geringen Wissen über Bereitstellungspotentiale liegt (Naturstiftung David, 2009). Außerdem kommt in Land- und Forstwirtschaft gewonnener Biomasse, die in Form von Festbrennstoffen vorliegt, neben der Biomassenutzung für Biogas und Biokraftstoffe, eine herausragende Stellung zu, da sie technisch effizient und wirtschaftlich nutzbar ist (Fischbeck, 2007).

Das hier vorgestellte Projekt hat zum Einen das Ziel mit Mitteln der Fernerkundung das Potenzial natürlicher Biomasse in Niedersachsen abzuschätzen und zum Anderen die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Ernteverfahren für die verschiedenen klassifizierten Biomassen darzustellen. Das Projekt gliedert sich in zwei Teile, die von den zwei beteiligten Instituten, der Abteilung Waldinventur und Fernerkundung der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie und der Abteilung Agrartechnik der Fakultät für Agrarwissenschaften der Universität Göttingen durchgeführt werden.

Der erste Teil des Projektes besteht aus einer stichprobenbasierten Erfassung von Gehölzen im Offenland in ganz Niedersachsen. Auch solche Flächen, die nicht genutzt und bewachsen sind, werden mit in die Potentialanalyse aufgenommen, weil hier eine Bestockung mit Landschaftspflegematerial wie Büschen oder ähnlichem für eine weitere Nutzung in Frage kommen kann. Im zweiten Teil werden mögliche Ernteverfahren sowohl aus der Landwirtschaft als auch aus der Forstwirtschaft vorgestellt und gegeneinander abgewogen. Die Verfahrenskosten werden mittels einer Literaturrecherche und Expertengesprächen ermittelt.

2. Stand der Forschung

Landschaftspflegeholz wird von Cremer et al. (2006) definiert als die „gesamte holzige Biomasse, die außerhalb geschlossener Waldbestände bei Pflegearbeiten oder landespflegerischen Maßnahmen an Straßen- und Feldrändern, entlang von Bahnlinien oder bei der Gewässertrandpflege und vergleichbaren Eingriffen anfällt, sowie das Material aus Maßnahmen in Naturschutzgebieten oder anderen naturschutzfachlich wichtigen Landschaftselementen.“

Die Abschätzung des Potentials an holziger Biomasse aus der Landschaftspflege stellt aufgrund des heterogenen Aufwuchses eine große Herausforderung dar. (Muchin, Bilke & Böge, 2007; Wenzelides et al., 2008; u.a.). Diese Schwierigkeiten bestehen bereits auf der kleinsten Ebene (also der Einzelfläche) und vergrößern sich bei der Betrachtung der regionalen Ebene oder auf der Ebene von Bundesländern. Als Beispiel seien hier die Erhebungen von Tonn et al. (2006) und Buddenberg und Kralemann (2002) angeführt. Erster schätzt das Potential von Landschaftspflegeholz bundesweit auf 0,62 Mio. t_{atro} /Jahr. Buddenberg und Kralemann wiederum haben allein für Niedersachsen eine Spanne von 4,6 bis 9,22 Mio. t_{atro} /Jahr geschätzt. Die Diskrepanz der Schätzergebnisse ist auch durch Unterschiede bei den Methoden der Erfassung bzw. Schätzung zu suchen, erfolgten diese doch zum Teil durch terrestrische Felddaufnahmen und zum Teil durch Fernerkundung, aber auch durch kombinierte Anwendungen beider Verfahren. Weiterhin führen unterschiedliche Umrechnungen bei der Ermittlung der Ausdehnung der Biomasse im Raum zu großen Abweichungen bei der Größenordnung des Biomassepotentials (vgl. Naturstiftung David, 2009).

Die menschliche Nutzung von Land steht in direkter Konkurrenz zur natürlichen Landbedeckung. Diese spielt für die Erhaltung der biologischen Vielfalt und als Kohlenstoffspeicher eine wichtige Rolle. Wird die Nutzung der Biomasse zur Energieerzeugung intensiviert, so

steigt auch der Druck auf die Nutzung bisher ungenutzter Flächen und führt zu einer Konkurrenz mit der Produktion von Nahrungsmitteln (vgl. WBGU, 2009).

Der wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen (WBGU) schätzt das technische Potential von Bioenergie aus Rest- und Abfallstoffen auf einen Betrag von ca. 50 EJ pro Jahr (*ExaJoule* = 10^{18} J). Der nachhaltig nutzbare Anteil daran wird allerdings deutlich niedriger sein. Bisher ist nur schwer abzuschätzen, wie groß der Abzug am Gesamtbetrag aufgrund ökologischer und ökonomischer Gesichtspunkte ist. Hier spielen insbesondere naturschutzfachliche Aspekte eine begrenzende Rolle, ebenso muss die Ausgeglichenheit des Nährstoffhaushalts Berücksichtigung finden. In diesem Zusammenhang erscheint dem WBGU auch die Beachtung einer naturverträglichen räumlichen Verteilung der Biomassenutzung wichtig. Hier besteht ein genereller, weitergehender Forschungsbedarf.

Allgemein festzustellen ist aber, dass durch die Nutzung biogener Abfall- und Reststoffe, Nutzungskonkurrenzen z.B. beim Energiepflanzenanbau für Agroenergie vermieden werden können. Auch die Bilanz im Hinblick auf die Klimaschutzwirkung fällt bei der Nutzung von Reststoffen vorteilhafter aus, insbesondere bei der Verstromung. (vgl. WBGU, 2009).

Für die Ermittlung des Biomassepotentials ist es unabdingbar erst zu betrachten, welche Potentiale unterschieden werden. Im Folgenden werden die verschiedenen Potentialdefinitionen vorgestellt:

- **Theoretisches Potential:** Unter theoretischem Potential versteht man die physikalische Obergrenze der Energie (= Biomasse), die aus einer bestimmten Quelle stammt.
- **Technisches Potential:** Das technische Potential wird durch eine Technologie, die zur Erzeugung der Energie/Biomasse benötigt wird, gekennzeichnet. Diese Technologie bestimmt den Wirkungsgrad der aus dem theoretischen Potential mit Hilfe einer (technischen) Umwandlung erzeugten Energie.
- **Wirtschaftliches Potential:** Unter wirtschaftlichem Potential versteht man den unter ökonomischen Rahmenbedingungen wirtschaftlich nutzbaren Anteil des technischen Potentials.
- **Nachhaltiges Potential:** Bei der Einschätzung dieses Potentials werden alle Aspekte hinsichtlich Nachhaltigkeit berücksichtigt, z.B. ökologische (naturschutzfachliche) und sozio-ökologische Gesichtspunkte (vgl. WBGU, 2009).

Einige Untersuchungen zur Erfassung des Potentials holziger Biomasse mittels Fernerkundung sind bereits durchgeführt worden von Gregoire and Valentine (2008), der Naturstiftung David (2010), Ramezani und Holm (2011) und anderen. Da schmale, linienförmige Flächen mit einem Punkteraster und kreisförmigen Erhebungseinheiten nicht repräsentativ erfasst werden können, haben Johst et al. (Naturstiftung David, 2010) streifenförmige Untersuchungsflächen als Aufnahmeeinheiten gewählt. Gregoire and Valentine (2008) beschreiben Stichprobenverfahren wie das Line Intersect sampling (LIS), das gerade im Bereich von Erhebungen, die nicht ausschließlich Aussagen über Holzprodukte des Waldes liefern sollen, gut geeignet sind. Außerdem können diese gute Datengrundlagen in Bezug auf Habitate von Fauna und Flora liefern. Auch gerade bei der Verwendung von Fernerkundungsdaten ist LIS ein probates Mittel. (Marshall et al. 2000, Esseen et al. 2006) Große bzw. lange Objekte haben dabei eine höhere Wahrscheinlichkeit in die Stichprobe aufgenommen zu werden als kleine Objekte. Bereits Battles et al. haben 1996 die gute Eignung für die Flächenschätzung von zweidimensionalen Objekten erkannt.

Ramezani & Holm (2011) verwenden Line Intersect Sampling als Aufnahmedesign. Dabei hat sich im Hinblick auf den RMSE (Route mean squared error = Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler; der RMSE ist ein Maß für die Abweichung eines Schätzers von einem Parameter) und auf den Bias folgende Konfiguration als am besten geeignet herausgestellt:

- systematisches Stichprobendesign
- Linien als Aufnahmedesign
- zufällige Orientierung der Linien.

3. Methoden der Potenzialabschätzung durch Fernerkundung

Zielsetzung dieser Untersuchung ist die Abschätzung von bereits mit Biomasse bestockter sowie potentiell zum Anbau von holziger Biomasse geeigneter Flächen außerhalb des Waldes. Die erste Projektphase konzentrierte sich hierbei zum Einen auf die Erstellung eines Klassifizierungsschlüssels zur Beschreibung von Gehölzressourcen im Offenland und zum Anderen auf die Erarbeitung geeigneter Methoden zur stichprobenbasierten Erfassung von vorhandenen und potentiellen Flächen. Das Untersuchungsgebiet umfasst hierbei die Landesfläche Niedersachsens, wobei geschlossener Wald zunächst unberücksichtigt bleibt.

3.1 Datengrundlagen

Als Datengrundlage für die Luftbildstichproben stehen Orthophotos der Landesvermessung + Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) zur Verfügung. Die digitalen Orthophotos im Maßstab 1:5.000 weisen eine Bodenauflösung von 20 cm auf und stammen von Befliegungen aus den Jahren 2004 bis 2009. Dabei wurden die Bilder von 2004 bis 2006 mit einer Bodenauflösung von 40 cm aufgenommen und anschließend auf eine Auflösung von 20 cm prozessiert, die Bilder von 2007 bis 2009 sind von vornherein mit einer Auflösung von 20 cm aufgenommen worden.

Weiterhin standen Vektorgeometrien der niedersächsischen Landkreise vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie zur Verfügung. Zur Abgrenzung von Waldgebieten wurden weitere GIS Datengrundlagen durch das Forstplanungsamt Wolfenbüttel zur Verfügung gestellt.

3.2 Inventurdesign

3.2.1 Stratifizierung

Die räumliche Verteilung sowie die Gesamtpotentiale holziger Biomasse außerhalb Wald sind stark von der vorherrschenden Nutzung der Landschaft beeinflusst. Landwirtschaftliche Anbauformen sind wiederum von den naturräumlichen Gegebenheiten wie z.B. Boden und Klima beeinflusst. Vor diesem Hintergrund wird eine hohe Variabilität von Biomassepotentialen zwischen verschiedenen landwirtschaftlichen Großregionen erwartet. Daher ist es bei der Einschätzung von Biomassepotentialen nicht zielführend, Niedersachsen als Ganzes zu betrachten. Eine Möglichkeit dieser Variabilität zu begegnen ist die Stratifizierung der Stichprobe in homogenere Untereinheiten. Da die Variabilität innerhalb einzelner Straten geringer ist, kann der Standardfehler einer Stichprobeninventur auf diese Weise deutlich gesenkt werden, wodurch die Schätzung für die gesamte Landesfläche in ihrer Genauigkeit gesteigert wird.

Von Seiten des Ministeriums für Landwirtschaft wurde die Aufteilung Niedersachsens in sechs Regionen vorgeschlagen. Die zugrunde gelegte Einteilung der Landesfläche erfolgt hierbei auf Grundlage von Expertenwissen und fasst sechs in sich möglichst homogene Großlandschaften zusammen, die sich durch eine mehr oder weniger einheitliche landwirtschaftliche Bewirtschaftungsform auszeichnen. Die räumliche Abgrenzung der Straten orientiert sich dabei an den Landkreisgrenzen (Abbildung 1).

Die Einteilung erfolgt in

- (1) Nordniedersächsische Küsten-/Marschgebiete,
- (2) West- & Mittelniedersächsische Geestgebiete,
- (3) Lüneburger Heide,
- (4) Südostniedersächsische Flach- & Hügelland/Lößgebiete,
- (5) Weser-/Leinebergland und
- (6) Harz & Solling.

Die Einteilung folgt dabei analog den Niedersächsischen Wuchsregionen/-bezirken (vgl. AK Standortkartierung, 1985).

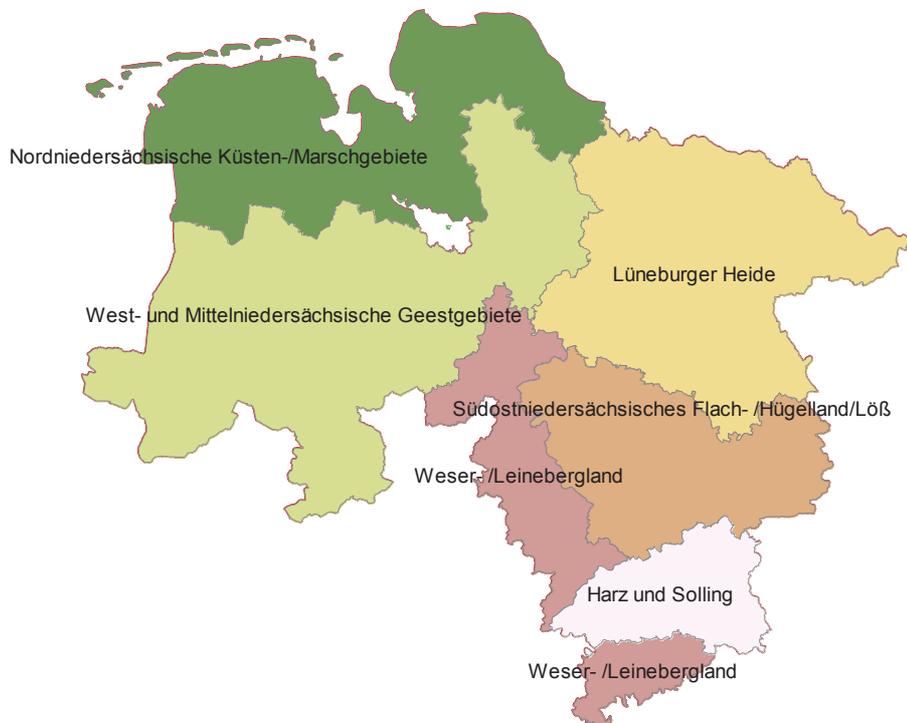


Abbildung 1. Stratifizierung der Landesfläche in 6 landwirtschaftliche Großregionen.

3.2.2 Zweistufiges Stichprobenverfahren

Bei großflächigen Untersuchungsgebieten (wie z.B. Niedersachsen) sind herkömmliche Stichprobenverfahren aufgrund der Größe des betrachteten Gebiets oft schwer umzusetzen. Um dieses Problem zu umgehen bieten sich Kombinationen verschiedener Verfahren an. Dabei erfolgt die Auswahl der Stichprobeneinheiten in mehreren Schritten. Man spricht von

zweistufigen Verfahren, wenn zunächst eine Auswahl von Gruppen von Elementen erfolgt und dann in einem zweiten Schritt Stichproben jeweils aus diesen Gruppen von Elementen gezogen werden.

In der **ersten Stufe** erfolgt die räumliche Verteilung von Stichprobenpunkten über die Landesfläche von Niedersachsen anhand eines systematischen Rasters mit einer Rasterweite von 16 x 16 km. Die absolute Lage und Rasterweite dieses Probeflächennetzes wurde hierbei auf Grundlage des systematischen Rasters der Bundeswaldinventur (BWI) festgelegt. Das bundesweite Grundnetz der BWI liegt in einem 4 x 4 km Raster vor und wurde im Rahmen dieser Studie auf 16 x 16 km erweitert (Abbildung 2). Das Raster analog zur BWI ergibt 188 Aufnahmeeinheiten. Dies bietet den Vorteil, dass im Rahmen des NatBio-Projektes erhobene Daten später mit Daten der BWI kombiniert werden können.

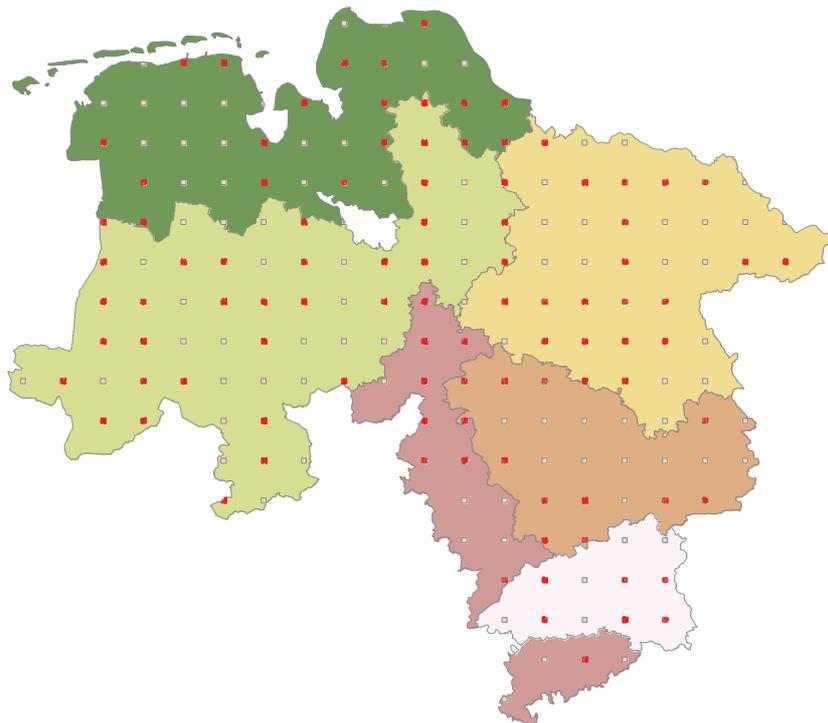


Abbildung 2: Systematisches Grundraster zur Auswahl von Luftbildkacheln. Die zufällig ausgewählten Luftbildkacheln sind ausgefüllt (rot) dargestellt.

Da für eine statistisch belastbare Auswertung nicht alle 188 Aufnahmeeinheiten ausgewertet werden müssen und einige Flächen auch aufgrund ihrer Landnutzung (z.B. ausschließlich Siedlung oder Wald) nicht für eine Auswertung in Frage kommen, erfolgt eine Zufallsauswahl

von 99 Aufnahmeeinheiten. Die Anzahl pro Stratum orientiert sich dabei an der Flächengröße der einzelnen Straten, d.h. die Anzahl der Aufnahmeeinheiten ist proportional zur Größe des Stratums.

Da im Rahmen der Biomasseschätzung auf Orthophotos der Landesvermessung + Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) zurückgegriffen wird, wird jeder Stichprobenpunkt zur Auswahl einer Luftbildkachel verwendet. Diese decken jeweils einen Bereich von 2 x 2 km ab. Der Stichprobenpunkt liegt dabei jeweils im Bereich der unteren linken (südwestlichen) Ecke der Orthophotos und somit Aufnahmeeinheit.

In der **zweiten Stufe** der Stichprobenerhebung soll in den Luftbildern der LGN mit Hilfe von Luftbildstichproben die eigentliche Inventur des Biomassevorkommens bzw. des Biomassepotentials erfolgen. Dazu werden mit Hilfe eines systematischen Rasters Punkte im Abstand von 500 x 500 m in die den Orthophotokacheln entsprechenden Flächen gelegt.

3.3 Aufnahmedesign

Das Aufnahmedesign definiert, wie die Beobachtungen an den Zielobjekten erfolgen. Da die im Inventurdesign erstellten Rasterpunkte innerhalb der Luftbildkacheln für eine Flächen- und Massenschätzung aufgrund ihrer Dimensionslosigkeit nicht geeignet sind, muss eine geeignete Beobachtungseinheit definiert werden. Hier bestehen im Bereich der Waldinventur eine Vielzahl von angewandten und erprobten Designs, welche grob in die Kategorien „zweidimensionale Probeflächen“ (bspw. die in den Bundeswaldinventuren verwendeten Probekreise) und „eindimensionale Stichprobeneinheiten“ (Linien) eingeteilt werden.

In der vorliegenden Studie wird ein Linienstichprobenverfahren angewendet. Im Gegensatz zu den oft verwendeten Probeflächen liegen die Vorteile einer Linienstichprobe in der einfachen Anwendung und der zeit- und kosteneffizienten Durchführung (Oehmichen, 2007). Zur späteren Schätzung von Biomassevorräten wurde hier speziell das sogenannte Linienabschnittsverfahren (Line Intercept Sampling - LAV) angewendet. Bei diesem Verfahren wird entlang einer Linie (Transekt) die Länge der Abschnitte in den definierten Zielklassen gemessen. Im Folgenden können so Schätzungen der Gesamtfläche bestimmter Flächenklassen erfolgen (siehe Auswertedesign). Verschiedene Verfahren der Linienstichproben (LIS) werden bereits seit vielen Jahren im Rahmen von terrestrischen Waldinventuren zur Erfassung von liegendem Totholz angewendet und haben sich hier

hinsichtlich ihrer Genauigkeit bewährt (Oehmichen, 2007). Modifizierte Verfahren des Line Intercept Samplings eröffnen jedoch auch neben der terrestrischen Anwendung weitere Einsatzgebiete, wie beispielsweise die Erfassung von Geländeobjekten (Hecken, Straßen, Wasserläufe) aus Luftbildern (Hildebrandt, 1996). Inwiefern die Anwendung des LAV auch für die Erfassung von Objekten wie Feldgehölzen geeignet ist, sollen durch Studien im Rahmen des NatBio-Projektes validiert werden. Bei ausreichender Genauigkeit stellt das LAV ein sehr effizientes Verfahren für fernerkundungsbasierte Inventuren dar.

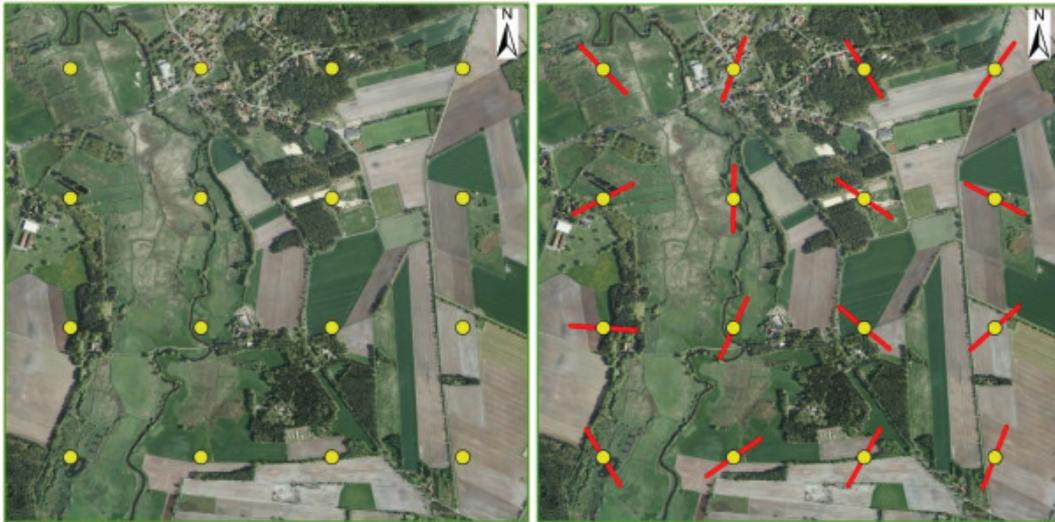


Abbildung 3: Innerhalb jeder ausgewählten Luftbildkachel ist ein systematisch angeordnetes Cluster von Stichprobenpunkten festgelegt (links). Als Aufnahmeeinheit ist an jedem Punkt eine Stichprobenlinie definiert.

Die Aufnahmeeinheiten der Linienstichprobe, die in jeder ausgewählten Luftbildkachel definiert wurden, ist ein Cluster von 16 systematisch angeordneten Einzellinien mit jeweils 250 Meter Länge. Die Richtung der einzelnen Linien wurde zufällig gewählt, um mögliche Verzerrungen der Schätzung durch einen Ausrichtungstrend der Zielobjekte (z.B. Hecken oder Straßenränder) in der Landschaft zu vermeiden.

Durch das angewandte Design soll die Auswahlwahrscheinlichkeit für alle Zielobjekte gleich sein, um eine möglichst unverzerrte Schätzung der Biomassevorkommen zu gewährleisten.

3.3.1 Klassifizierung von Biomassepotentialen

Zur Erfassung von Flächenanteilen von Gehölzstrukturen, ihrer räumlichen Verteilung und den daraus abgeleiteten Biomassepotentialen ist alternativ zu terrestrischen Erhebungen die

visuelle Auswertung von Luftbildern in entsprechender Auflösung prinzipiell gut geeignet. Bei der Zuweisung der zu klassifizierenden Objekte in die zuvor festgelegten Klassen dienen dem Luftbildinterpreten vor allem die Erscheinungsformen der im Offenland vorkommenden Gehölze. Dies schließt sowohl deren morphologischen Aufbau, ihre räumliche Zusammensetzung, wie etwa typische Objektverbände und ihre Dimensionen ein. Höhereigenschaften von zu klassifizierenden Objekten lassen sich meist gut über deren Schattenwurf im Luftbild ableiten. Diese Information kann dann zusätzlich zur besseren Unterscheidung und Zuweisung der Objekte in die betreffenden Klassen genutzt werden.

3.3.2 Konzipierung des Interpretationsschlüssels

Die Luftbildinventur wurde von zwei Interpreten anhand eines speziell für das NatBio-Projekt erarbeiteten Interpretations- und Kartierschlüssels vorgenommen. Unter Berücksichtigung des Ziels dieser Studie, eine möglichst genaue und anwendungsbezogene Schätzung sowohl der vorhandenen Biomasse als auch potentieller, bisher ungenutzter Standorte für verwertbare Biomasse im Offenland über ganz Niedersachsen vorzunehmen, sollte der Interpretationsschlüssel speziell für diese Aufgabenstellung konzipiert sein. Dabei sollte die Anzahl der zu unterscheidenden Klassen unter Aspekten der Zeiteffizienz bei größtmöglichem Informationsgewinn in einem möglichst kleinen Rahmen gehalten werden.

Zur Erfassung sowohl der tatsächlich vorhandenen als auch der potentiellen Vegetation wurde zunächst zwischen zwei Hauptklassen unterschieden:

a) Flächenklasse:

In dieser Klasse wird zunächst ohne weitere Betrachtung etwaiger Gehölze zwischen zehn Flächenarten unterschieden. Zum einen kann somit in der späteren Auswertung die kartierte Vegetation hinsichtlich ihres räumlichen Vorkommens ausgewertet werden, zum anderen kann eine Quantifizierung hinsichtlich unbestockter Flächen, welche als potentiell bestockungstauglich eingeschätzt werden, vorgenommen werden. Wichtige Flächenarten stellen hier unter anderem Ackerrandstreifen, landwirtschaftliche Nutzflächen, Straßenrandstreifen, aber auch Flächen, auf denen keine Vegetation möglich ist (bspw. Verkehrsflächen), dar.

Da sich die Inventur nur auf Gehölze im Offenland bezieht, werden Wald und Siedlungen, sobald der Mittelpunkt der Stichprobenlinie in diese Objekte fällt, nicht erhoben („X“). Wird dagegen ein Waldbestand lediglich tangiert, wird dies vermerkt („W“), da sich an Waldrändern auch potentiell nutzbare Biomasse befinden kann. Zur besseren Unterscheidung von Wald und größeren Feldgehölzen wurden Informationen in Form einer GIS-kompatiblen Walddecker-Karte hinzugezogen. Im Rahmen des Line Intercept Samplings wird in manchen Klassen auch die Aufnahme der Objektbreite nötig.

b) Bestockungsklasse

In dieser Klasse wird die tatsächlich vorhandene Bestockung, welche in die Stichprobe fällt, kartiert. Insgesamt wird hier zwischen zehn verschiedenen Bestockungsarten, einschließlich einer Klasse „ohne Bestockung“, unterschieden. Durch die Klassen werden neben Einzelsträuchern und Einzelbäumen sowohl kleinere Vegetationsverbände (Strauchhecke, Baumhecke) als auch größere Vegetationszusammenschlüsse (Baumreihen, Gehölzgruppen, Feldgehölze und Sukzessionsflächen unterschiedlicher Intensitätsgrade) erfasst.

Tabelle 1: Interpretations- und Kartierschlüssel für Flächen- und Bestockungsklassen.

FLÄCHENKLASSE						
Flächennutzung	A	Ackerrandstreifen				Breite erheben
	B	Brachfläche				
	F	Feldwege				nur als Zusatzinformation
	G	Grünland				nur als Zusatzinformation
	L	landwirtsch. Nutzfläche (Acker, etc.)				nur als Zusatzinformation
	N	mit nat. Biomasse bestockte Fläche im Sinne der Bestockungsklassen				
	O	ohne relevante Bestockung				
	S	Straßenrandstreifen				Breite erheben
	V	Verkehrsfläche (öffentl. Straßen, Bahn- & andere Leitungstrassen)				nur als Zusatzinformation
	X	nicht erhoben (da Stipropunkt z.B. in Siedlung oder Wald)				
	W	Wald				nur als Zusatzinformation
	BESTOCKUNGSKLASSE					
			<i>Breite#:</i>	<i>Länge#:</i>	<i>Größe#:</i>	<i>Ausmaß#:</i>
tatsächliche Bestockung	1	Einzelstrauch				
	2	Einzelbaum	Durchm. erheben			bis zu 3 Bäume
	3	Gebüsch/Gehölzgruppe		< 10 m	< 30 m	< 300 m ²
	4	Strauchhecke	Breite erheben	< 10 m	> 10 m	
	5	Baumhecke	Breite erheben	< 10 m	> 10 m	
	6	Geschl. Baumreihe	Breite erheben			mind. 4-5 Bäume
	7	Feldgehölz				300- 5000 m ² "inselartig"
	8	Sukzessionsfläche mit <u>geringem</u> Gehölzanteil				
	9	Sukzessionsfläche mit <u>hohem</u> Gehölzanteil				
	0	ohne Bestockung*				
<p>#Quellen: * im Sinne der Nutzbarkeit für das Projekt</p> <p>vgl. Spahl, H. & Bönecke, L. (1990). Hecken und Feldgehölze. in: Mitteilungen der Forstl. Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. Freiburg.</p> <p>vgl. LfL – Bayerische Landesanstalt f. Landwirtschaft (2005). Hecken, Feldgehölze und Feldraine in der landwirtschaftlichen Flur. Freising-Weihenstephan.</p>						

Zur Ansprache der unterschiedlichen Klassen werden Informationen wie Breite, Länge und die sich daraus ergebende Flächengröße herangezogen. Auch das Ausmaß, bspw. die Anzahl von sich aneinanderreihenden Bäumen, stellt ein wichtiges Differenzierungskriterium dar. Um bei der späteren Auswertung Hochrechnungen der erfassten Biomasse tätigen zu können, müssen in vielen Fällen auch die Baumkronen- bzw. Objektbreiten aufgenommen werden.

Über allometrische Beziehungen zwischen z.B. Kronendurchmesser und Biomasse von Einzelbäumen, könnte auf diese Weise modellbasiert die Biomasse hergeleitet werden.

3.3.3 Ablauf der Kartierung

Jede Stichprobenlinie wird anhand des beschriebenen Kartierschlüssels in Segmente unterteilt, denen sowohl eine Flächenklasse als auch eine Bestockungsklasse zugewiesen werden. Somit trägt jedes kartierte Liniensegment neben seiner Länge eine spezifische Kombination, anhand derer Rückschlüsse auf die Art und das räumliche Vorkommen möglich sind. Insgesamt wurden auf diese Weise 5708 einzelne Liniensegmente den jeweiligen Klassen zugeordnet.

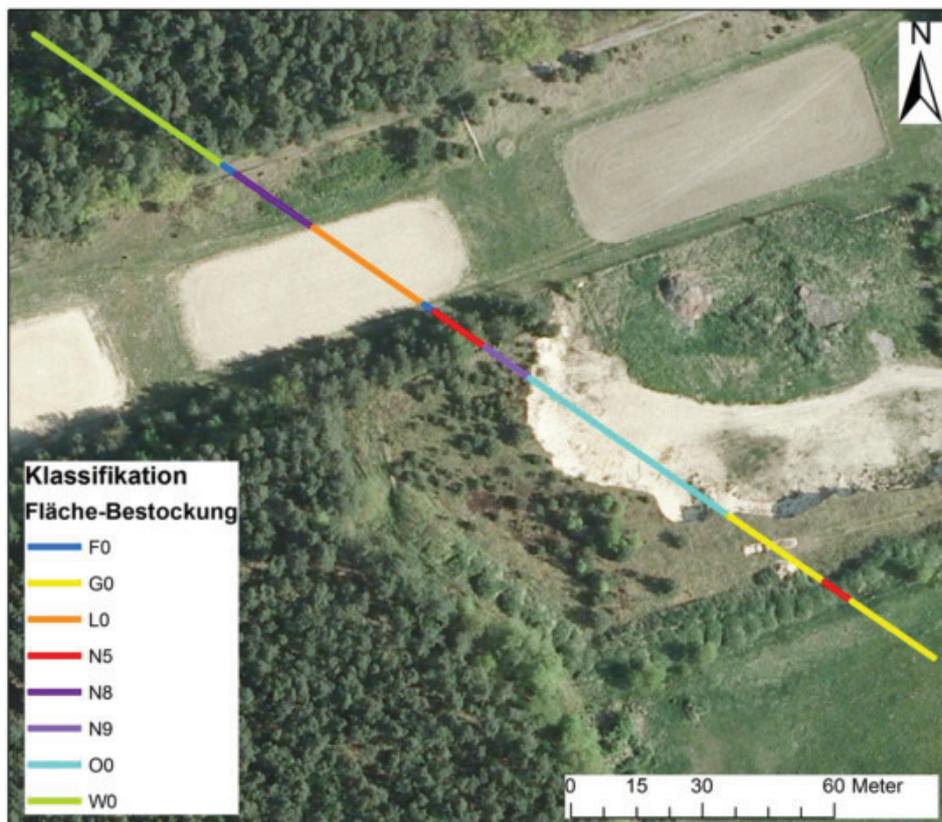


Abbildung 4: Beispiel eines kartierten Transekts

3.4 Auswertungsdesign

Durch das angewandte Inventur- und Aufnahmedesign müssen für die Auswertung der Daten Schätzer sowohl eines Linienabstandsverfahrens als auch einer stratifizierten Stichprobe kombiniert werden.

3.4.1 Schätzer für das Linienabschnittsverfahren (Line Intercept Sampling):

Beim Linienabschnittsverfahren (LAV) wird die Länge der Abschnitte gemessen, die in eine bestimmte definierte Zielklasse fällt. Dabei erfolgt die Unterteilung der Linien anhand festgelegter Kriterien, in dieser Studie anhand des vorgestellten Kartierschlüssels. Mittels Verhältnissbildung der Gesamtlinielänge zur Länge, die eine bestimmte Klasse einnimmt, kann der Gesamtanteil einer Klasse (und daraus die Gesamtfläche) für ein räumlich definiertes Gebiet geschätzt werden. Hier wurde dieses Verfahren dazu genutzt, um den Anteil der jeweiligen Flächen- und Bestockungsklassen für Niedersachsen zu schätzen.

Zunächst werden die Anteile jeder Klasse pro Stichprobenlinie wie folgt ermittelt:

$$y_{i(x)} = \frac{l_{i(x)}}{l_{i(\text{total})}} \quad (1)$$

Aus $y_{i(x)}$ wird der gemittelte Anteil einer Klasse für die jeweilige Luftbildkachel j geschätzt. Da die 16 einzelnen Linien pro Luftbildkachel nicht unabhängig voneinander ausgewählt wurden, müssen sie als Cluster betrachtet werden und geben pro Luftbild nur eine unabhängige Beobachtung:

$$\hat{p}_{j(x)} = \frac{\sum_{i=1}^n y_{i(x)}}{n} \quad (2)$$

= Anteil der Klasse x an der Linie i = gemittelter Anteil der Klasse x für Luftbildkachel j .
Aus den nun vorliegenden geschätzten Anteilen einer Klasse pro Luftbildkachel wird im nächsten Schritt für jedes Stratum h separat ein Mittelwert $\hat{y}_{h(x)}$ je Klasse x geschätzt:

$$\hat{y}_{h(x)} = \frac{\sum_{j=1}^m \hat{p}_{j(x)}}{m} \quad (3)$$

Wobei:

m = Anzahl der Luftbildkacheln in Stratum h

$\hat{y}_{h(x)}$ = geschätzter Mittelwert (Anteil) der Klasse x im Stratum h

3.4.2 Schätzer für die stratifizierte Stichprobe:

Die Schätzer der stratifizierten Stichprobe beruhen auf einfachen Linearkombinationen und bestehen grundlegend aus den Summen der gewichteten Mittelwerte der betrachteten Klassen

innerhalb der einzelnen Straten. Da in dieser Studie die jeweiligen Straten unterschiedliche Größen besitzen, müssen die Schätzungen zusätzlich gewichtet werden. Die Gewichtung wurde für erste Berechnungen durch Verhältnissbildung der jeweiligen Stratengröße zur Gesamtfläche Niedersachsens errechnet.

Demnach ergibt sich für die Schätzung des Mittelwertes \hat{y} der Gesamtpopulation:

$$\hat{y} = \sum_{h=1}^L \frac{N_h}{N} \hat{y}_{h(x)} = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^L N_h \hat{y}_{h(x)} \quad (4)$$

Ein verzerrungsfreier Schätzer für die Varianz ergibt sich aus:

$$var(\hat{y}) = \frac{1}{N^2} \sum_{h=1}^L N_h^2 \frac{S_h^2}{n_h} \quad (5)$$

Wobei

- L = Anzahl der Straten $h=1, \dots, L$
- N = Gesamtgröße der Population (*hier*: Landesfläche Niedersachsen)
- N_h = Größe des Stratum (*hier*: Fläche des Stratum)
- \hat{y} = Geschätzter Mittelwert der Population
- \hat{y}_h = geschätzter Mittelwert im Stratum h
- S_h^2 = Stichprobenvarianz in Stratum h
- $\frac{N_h}{N}$ = Gewichtung des jeweiligen Stratum

Die Dimensionen der ermittelten Werte stellen relative Flächen- bzw. Bestockungsanteile dar. Um auf Grundlage dieser relativen Anteile auf absolute Flächengrößen τ (sog. *Total*) zu schließen, müssen die relativen Werte mit der Flächengröße Niedersachsens multipliziert werden:

$$\tau = N\hat{y} = \sum_{h=1}^L \frac{N_h}{N} \hat{\tau}_h = \sum_{h=1}^L N_h \hat{y}_{h(x)} \quad (6)$$

4. Ergebnisse der Potentialabschätzung für die Flächenpotentiale

Zunächst wurden die in ArcGis visuell klassifizierten Linienabschnitte in eine Datentabelle überführt, um eine weitere Aggregation und Auswertung zu ermöglichen. Aufgrund des beschriebenen Inventurdesigns fallen insgesamt 1562 Stichprobenpunkte in die betrachtete Fläche. Von diesen befinden sich jedoch nur 1183 außerhalb geschlossener Waldflächen und wurden für die weitere Analyse herangezogen. Die an jedem Stichprobenpunkt festgelegten Aufnahmelinien wurden wie oben beschrieben segmentweise den festgelegten Klassen zugeordnet. Insgesamt wurden auf diese Weise 5708 einzelne Linienabschnitte zugewiesen. Da sich die Betrachtung der Biomassepotentiale zunächst nur auf Flächen außerhalb Wald beschränkt, wurden solche Abschnitte, die in Waldflächen fallen, von der Auswertung ausgeschlossen. Um eine unverzerrte Schätzung zu ermöglichen, wurden bei Linien außerhalb des Waldes die jedoch teilweise Waldflächen schneiden, nur die Gesamtlinielänge außerhalb des Waldes berücksichtigt.

Zur Berechnung der relativen Anteile einzelner Klassen an der Gesamtfläche einer Luftbildkachel wurde zunächst die Gesamtlinielänge aller Abschnitte außerhalb des Waldes aufsummiert und mit der Gesamtlänge pro Klasse ins Verhältnis gesetzt. Hierbei wird die Varianz zwischen den Stichprobenpunkten innerhalb einer Kachel nicht berücksichtigt, da die systematische Stichprobe pro Kachel als Cluster mit dem Umfang 1 betrachtet wird. Die so ermittelten relativen Anteile pro Kachel wurden dann über alle betrachteten Luftbilder gemittelt und die dazugehörige Varianz der Beobachtungen geschätzt. Die im Weiteren dargestellten Ergebnisse beziehen sich zunächst ausschließlich auf eine Auswertung nach dem Konzept des Line Intercept Samplings. Eine Schätzung der Gesamtlänge linienhafter Gehölzstrukturen mit Hilfe des Line Intersect Sampling folgt in der weiteren Projektphase.

4.1 Auswertung der Flächenklassen

Wie bereits beschrieben stützte sich die Abgrenzung einzelner Straten zunächst auf Expertenwissen und der Annahme, dass das vorherrschende landwirtschaftliche Regime zu signifikanten Unterschieden in der räumlichen Verteilung sowie den relativen Anteilen verschiedener Flächen- und Bestockungsklassen führt. Wie Abbildung 5 zeigt, lassen sich Unterschiede in den relativen Flächenanteilen der Flächenklassen finden.

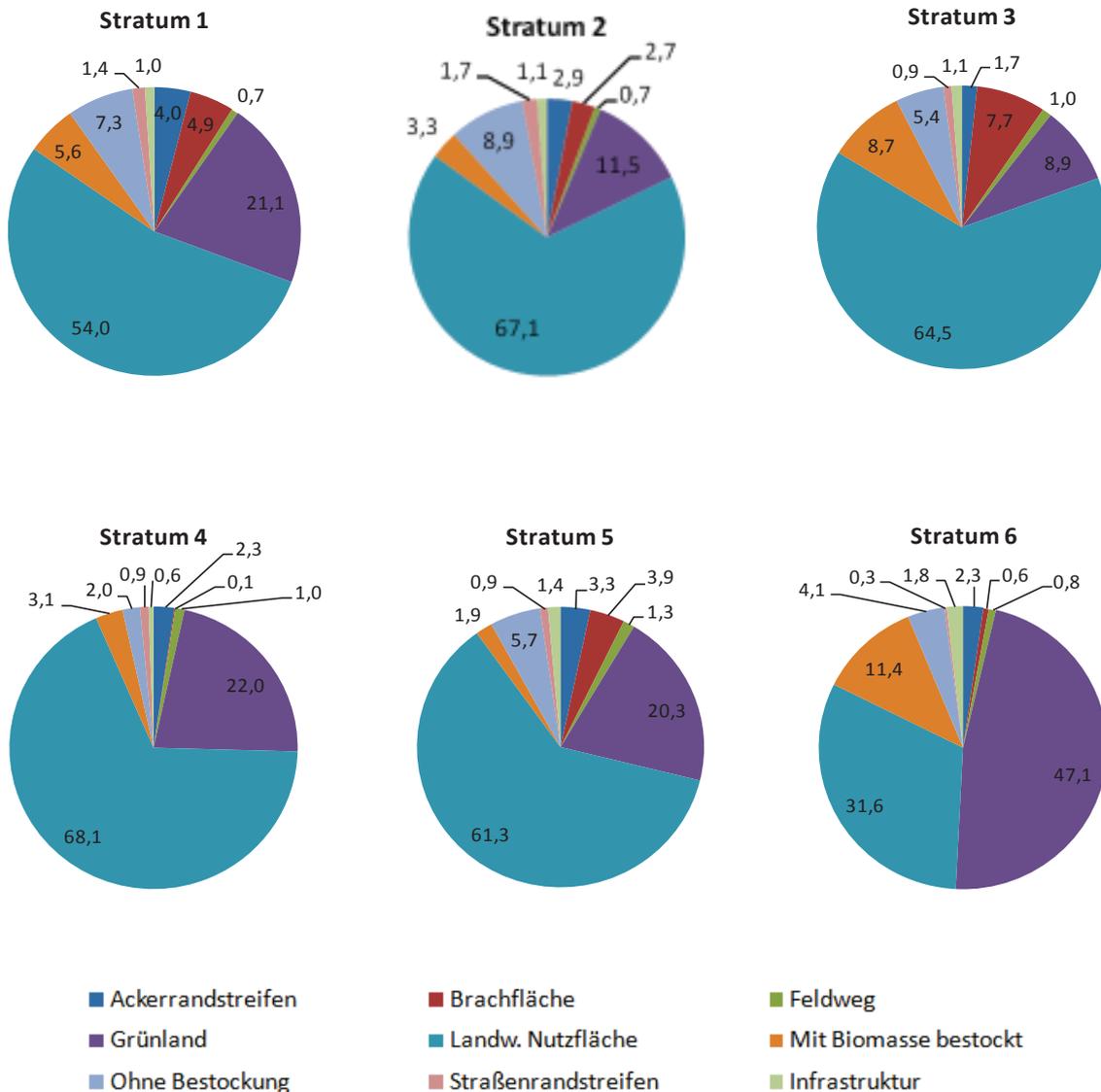


Abbildung 5: Geschätzte mittlere relative Flächenanteile in den einzelnen Flächenklassen für die Straten 1 bis 6.

Bis auf das Stratum 6 werden die höchsten relativen Anteile mit bis 54% bis 68% für landwirtschaftliche Nutzflächen geschätzt. Aufgrund der Landschaftsstruktur im Stratum 6, das auch den Solling und den Harz einschließt, beträgt der geschätzte Anteil landwirtschaftlicher Nutzflächen hier lediglich 31%. Die bereits mit holziger Biomasse bewachsenen Flächenanteile schwanken zwischen 1,9% (Stratum 5) und 11,4% (Stratum 6).

Tabelle 2 zeigt die auf die Gesamtfläche hochgerechneten Flächenanteile der Flächenklassen in Hektar und die zugehörigen relativen Standardfehler in Prozent.

Tabelle 2: Fläche in den einzelnen Klassen in Hektar, relativer Standardfehler in Prozent (kursiv) und Stichprobenumfang in den einzelnen Straten. Bei der Berechnung der Gesamtpotentiale ist die flächenproportionale Gewichtung der Straten zu beachten.

Flächenklasse	Stratum						Flächenpotential ha gewichtet
	1 <i>n = 18</i>	2 <i>n = 33</i>	3 <i>n = 19</i>	4 <i>n = 12</i>	5 <i>n = 10</i>	6 <i>n = 6</i>	
A* Ackerrand	37.268 <i>15,4</i>	41.345 <i>9,9</i>	16.953 <i>15,9</i>	13.754 <i>33,6</i>	16.386 <i>24,6</i>	6.473 <i>54,5</i>	102.782 <i>3,53</i>
B* Brachfläche	46.498 <i>32,3</i>	41.820 <i>22,8</i>	75.146 <i>70,3</i>	806 <i>100,0</i>	19.385 <i>64,2</i>	1.727 <i>80,6</i>	135.105 <i>10,42</i>
F Feldweg	6.682 <i>16,5</i>	10.609 <i>13,0</i>	10.502 <i>20,3</i>	6.764 <i>18,3</i>	6.298 <i>27,2</i>	2.295 <i>62,7</i>	29.292 <i>3,97</i>
G Grünland	201.184 <i>24,0</i>	163.959 <i>22,2</i>	100.503 <i>23,8</i>	147.393 <i>40,5</i>	94.606 <i>36,5</i>	132.124 <i>35,6</i>	539.289 <i>5,94</i>
L Ackerfläche	491.253 <i>12,8</i>	954.745 <i>5,2</i>	633.183 <i>10,9</i>	393.080 <i>15,3</i>	286.160 <i>13,3</i>	90.783 <i>45,9</i>	2.140.102 <i>2,06</i>
N* Bestockt	63.937 <i>32,3</i>	46.591 <i>19,1</i>	89.077 <i>53,0</i>	15.015 <i>42,5</i>	8.740 <i>41,5</i>	34.517 <i>70,5</i>	167.929 <i>8,23</i>
O ohne Relevanz	77.511 <i>31,6</i>	129.706 <i>19,9</i>	57.973 <i>27,6</i>	11.948 <i>63,1</i>	26.160 <i>37,6</i>	12.655 <i>34,4</i>	265.795 <i>7,53</i>
S* Straßenrand	13.612 <i>23,0</i>	31.044 <i>27,8</i>	11.107 <i>29,9</i>	8.305 <i>44,9</i>	4.245 <i>32,1</i>	735 <i>100,0</i>	58.275 <i>10,38</i>
V Verkehrsflächen	10.755 <i>38,7</i>	23.082 <i>28,6</i>	32.556 <i>47,9</i>	9.535 <i>69,4</i>	6.720 <i>39,8</i>	5.992 <i>47,1</i>	59.791 <i>9,73</i>
Potentiell	161.315 <i>31,0</i>	160.800 <i>23,2</i>	192.282 <i>34,7</i>	37.880 <i>52,2</i>	48.756 <i>54,3</i>	43.451 <i>52,5</i>	464.091 <i>7,91</i>

Die relativ hohen relativen Standardfehler der Schätzung resultieren aus der getrennten Betrachtung der Straten und der Auswertung der einzelnen Luftbildkacheln als Clusterstichprobe. Hierdurch reduziert sich die Anzahl der Beobachtungen auf die Anzahl der Luftbildkacheln pro Stratum. Weiterhin sind besonders die Klassen, die sehr selten und in vielen Luftbildern gar nicht vorzufinden sind, mit einem höheren Fehler behaftet. In folgenden Auswertungen soll daher überprüft werden, in welchem Umfang die Gesamtauswertung über alle Straten die Genauigkeit der Schätzung erhöht.

4.2 Auswertung der Bestockungsklasse

Abbildung 6 zeigt die geschätzten relativen Anteile der ausgeschiedenen Bestockungsklassen an der Gesamtfläche der einzelnen Straten.

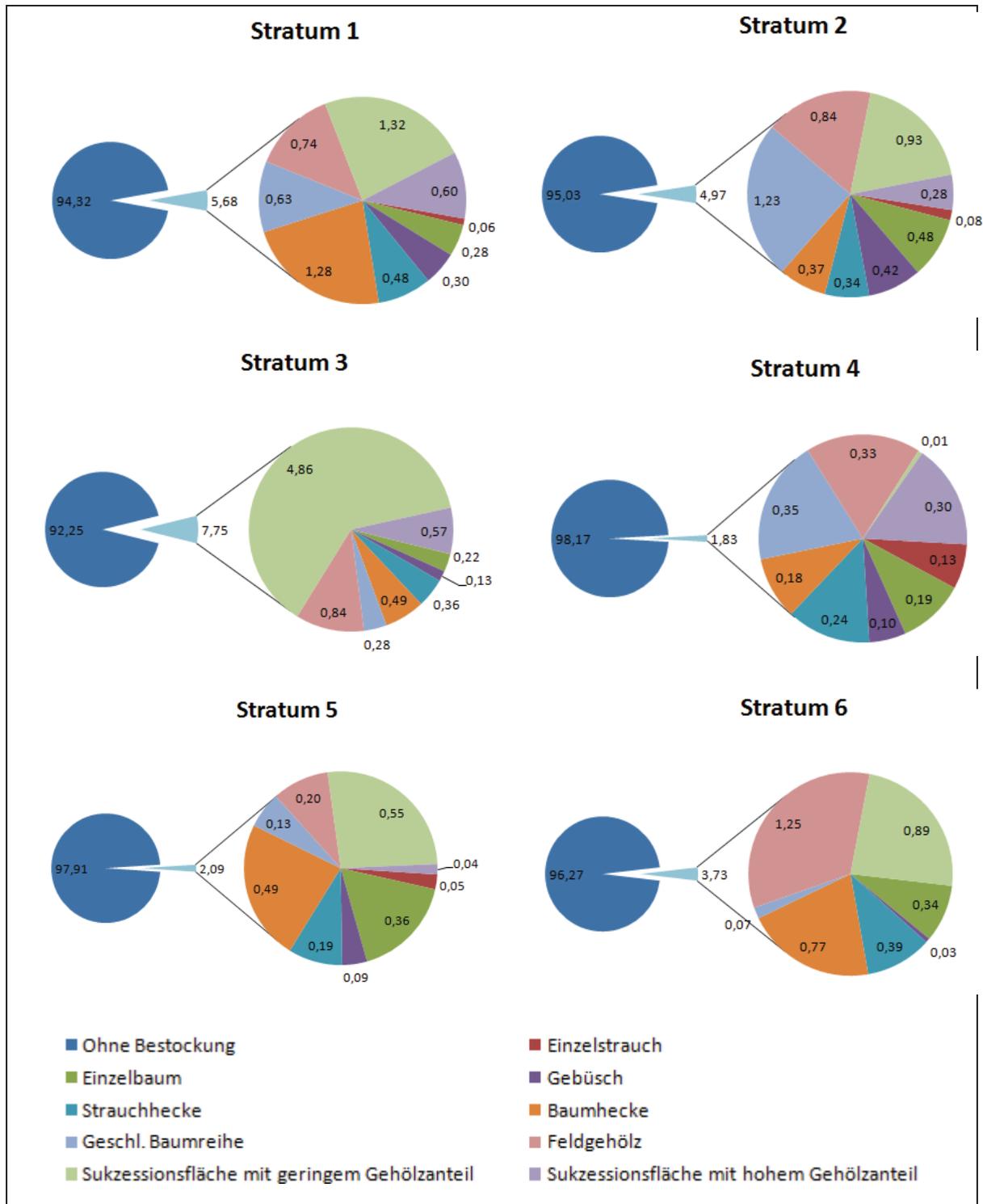


Abbildung 6: Relative Flächenanteile in den einzelnen Bestockungsklassen für die Straten 1 bis 6.

Als eine Auffälligkeit ist der hohe Flächenanteil an Baumreihen in Stratum 2 anzumerken. Daneben gibt es einen sehr hohen Sukzessionsflächenanteil in Stratum 3, was u.a. auf die Truppenübungsplätze im Bereich der Lüneburger Heide zurückzuführen ist. Weiterhin wurde ein hoher Feldgehölzanteil in Stratum 6 geschätzt.

Tabelle 3 zeigt die auf die Gesamtfläche hochgerechneten Flächenanteile der verschiedenen Bestockungsklassen in Hektar und die zugehörigen relativen Standardfehler in Prozent. Auch hier treten wie in

Tabelle 2 höhere relative Standardfehler der Schätzung auf. Diese resultieren aus der getrennten Betrachtung der Straten und der Auswertung der einzelnen Luftbildkacheln als Clusterstichprobe. Hierdurch reduziert sich die Anzahl der Beobachtungen auf die Anzahl der Luftbildkacheln pro Stratum. Weiterhin sind besonders die Klassen, die sehr selten und in vielen Luftbildern gar nicht vorzufinden sind, mit einem höheren Fehler behaftet.

Tabelle 3: Fläche in den einzelnen Bestockungsklassen in Hektar mit relativem Standardfehler in Prozent.

Flächenklasse	Stratum					
	1 <i>n</i> = 18	2 <i>n</i> = 33	3 <i>n</i> = 19	4 <i>n</i> = 12	5 <i>n</i> = 10	6 <i>n</i> = 6
0 Ohne Bestockung	894794 <i>1,14</i>	1371202 <i>0,60</i>	947415 <i>4,82</i>	595513 <i>0,50</i>	458909 <i>0,72</i>	276570 <i>1,96</i>
1 Einzelstrauch	548 <i>46,39</i>	1164 <i>42,70</i>	21 <i>100,00</i>	777 <i>62,64</i>	243 <i>53,41</i>	0
2 Einzelbaum	2685 <i>32,53</i>	6868 <i>20,00</i>	2260 <i>27,12</i>	1154 <i>45,55</i>	1675 <i>50,09</i>	983 <i>36,30</i>
3 Gebüsch	2848 <i>50,15</i>	6016 <i>23,30</i>	1319 <i>55,20</i>	629 <i>69,51</i>	405 <i>80,71</i>	74 <i>100,00</i>
4 Strauchhecke	4522 <i>38,81</i>	4947 <i>17,77</i>	3690 <i>52,39</i>	1446 <i>61,83</i>	881 <i>45,56</i>	1128 <i>52,20</i>
5 Baumhecke	12138 <i>26,87</i>	5375 <i>26,21</i>	5065 <i>38,23</i>	1076 <i>57,25</i>	2305 <i>58,89</i>	2208 <i>89,69</i>
6 Baumreihe	5997 <i>34,47</i>	17803 <i>18,30</i>	2850 <i>39,62</i>	2150 <i>51,27</i>	593 <i>77,51</i>	192 <i>66,21</i>
7 Feldgehölz	7002 <i>47,42</i>	12076 <i>26,77</i>	8596 <i>28,52</i>	1974 <i>47,93</i>	928 <i>84,23</i>	3581 <i>63,61</i>
8 Sukz. mit geringem Gehölzanteil	12512 <i>47,90</i>	13466 <i>31,28</i>	49940 <i>93,92</i>	73 <i>100,00</i>	2591 <i>79,71</i>	2564 <i>69,16</i>
9 Sukz. mit hohem Gehölzanteil	5654 <i>39,25</i>	3982 <i>45,96</i>	5845 <i>56,96</i>	1807 <i>67,45</i>	171 <i>100,00</i>	0

Im Folgenden sind die aus den sechs Straten zusammengeführten relativen Flächenanteile der Flächenklassen und der Bestockungsklassen für Gesamt-Niedersachsen dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass das niedersächsische Offenland zu fast $\frac{2}{3}$ durch landwirtschaftliche Nutzung geprägt ist. Weiterhin sind 95 % der Offenlandfläche unbestockt. Von den bestockten 5 % machen den größten Anteil die Sukzessionsflächen mit geringem Gehölzanteil aus, gefolgt von Flächen mit Feldgehölzen und geschlossenen Baumreihen.

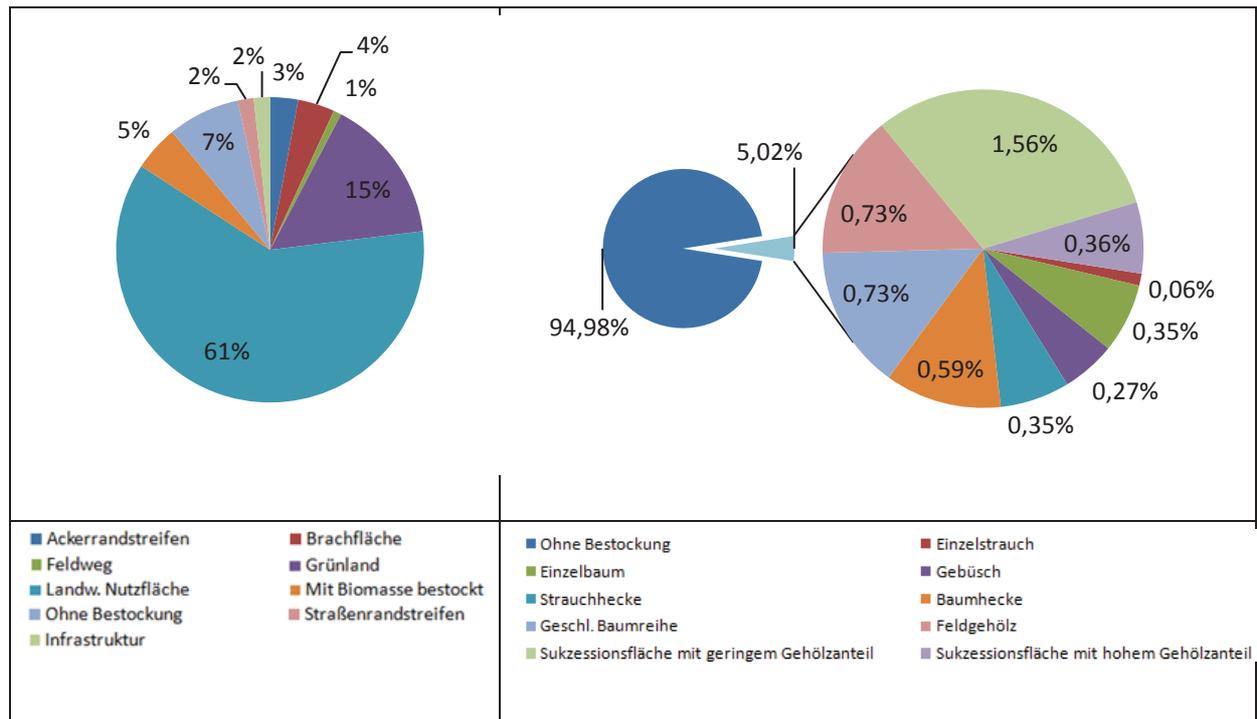


Abbildung 7: Relative Flächenanteile der Flächenklassen (li.) bzw. der Bestockungsklassen (re.) für die Gesamtfläche Niedersachsens

Betrachtete man die Kombination aus Flächen- und Bestockungsklassen (Abbildung 8), so fällt auf, dass ungefähr die Hälfte der Fläche aller Ackerrandstreifen und ca. $\frac{1}{3}$ aller Straßenrandstreifen unbestockt sind und hier somit ein größeres Potential für den Anbau weiterer Biomasse gegeben ist.

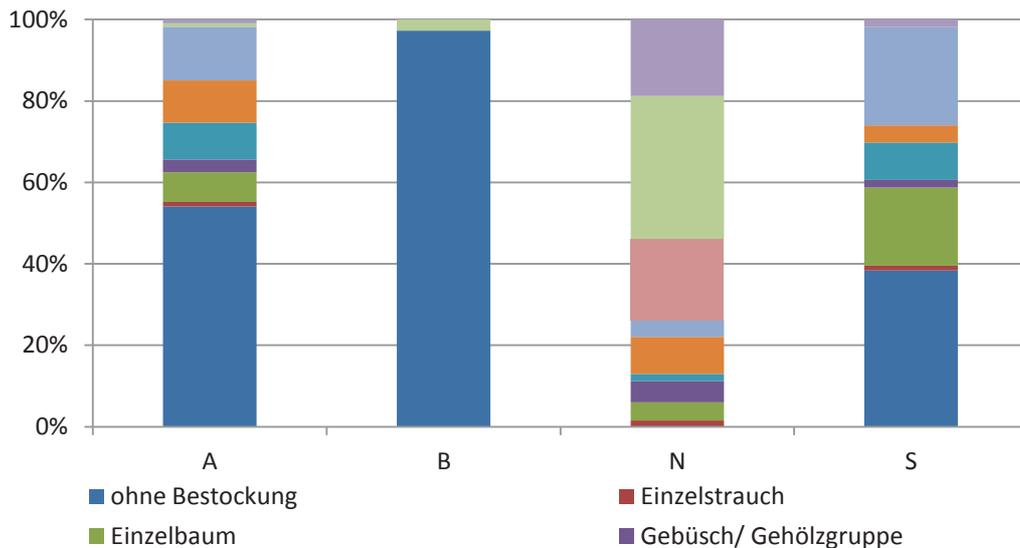


Abbildung 8: Verteilung der Bestockung in den Flächenklassen Ackerrandstreifen (A), Brachflächen (B), bereits mit natürlicher Biomasse bestockte Flächen (N) und Straßenrandstreifen (S) in Bezug auf die Gesamtfläche Niedersachsens

5. Ergebnisse der Potentialabschätzung für die Biomassepotentiale: Von der Erhebungen von Flächenpotentialen zum Biomassevorkommen

Ziel dieser Untersuchung ist im ersten Schritt die Abschätzung von bereits mit Biomasse bestockter sowie potentiell zum Anbau von holziger Biomasse geeigneter Flächen außerhalb des Waldes. Die erste Projektphase konzentrierte sich neben der Erstellung eines Klassifizierungsschlüssels zur Beschreibung von Gehölzressourcen im Offenland und der Erarbeitung geeigneter Methoden zur stichprobenbasierten Erfassung von vorhandenen und potentiellen Flächen auf die GIS-basierte Erhebung der Flächenvorkommen.

In der zweiten Projektphase wird von den Flächenpotentialen auf das tatsächliche Vorkommen bzw. die Masse der Biomasse geschlossen. Zuerst werden mit Hilfe einer Literaturrecherche Biomassepotentiale anderer Untersuchungen gesichtet. Dann wird durch destruktive Probebeerntungen die Trockenmasse der Biomasse pro Fläche bestimmt. Über Hochrechnungen an Hand der Literaturwerte werden mögliche Flächenpotentiale abgeleitet.

5.1 Angaben zu Biomassedichten aus der Literatur

Zahlreiche Studien beschäftigen sich mit der Abschätzung der Biomasse (Tabelle 4).

Tabelle 4: Biomassepotentiale sortiert nach Art der Biomasse

Art der Biomasse	Potential	Quelle
Straßenbegleitgrün (Bundesstr.)	ca. 2 t _{FM} /(km · a)	1) Weller, N. (2010)
Straßenbegleitgrün (Autobahnen)	ca. 4 t _{FM} /(km · a)	
Streuobstwiesenschnitt	0,4 – 1,5 t _{FM} /(ha · a)	
Knickpflege	pro ha landwirtsch. Fläche ca. 40-45 lfd. m Knicks → pro lfd. m ca. 0,2 m ³ Hackschnitzel (dh. in einem Radius v. 540 km ca. 108.000 m ³ Hackschnitzel → 20 – 40 m ³ Hackschnitzel/100 m Knick (bei Wachstum > 30 a) → 10 – 20 m ³ Hackschnitzel/100 m Knick (bei Wachstum < 30 a)	2) Augustin, J. (2010)
Knickpflege	2 m ³ Hackschnitzel/10 m Hecke	3) DLZ Agrarmagazin (2009)
Strauchhecken (mit/ohne Überhälter)	15 Sm ³ auf 100 m Wallhecke nach 15 Jahren ohne Pflege	4) Wiehe, J. (2003)
Baumreihe m. Sträuchern, dicht gewachsen	15 Sm ³ auf 100 m Wallhecke nach 15 Jahren ohne Pflege	
Baumreihe m. Sträuchern, stark lückig	7,5 Sm ³ auf 100 m Wallhecke nach 15 Jahren ohne Pflege	
Eingriff unter NatSch-Aspekten	Halbierung o.g. Werte	
Knickpflege	$\frac{\text{Länge der Hecke in m}}{100} \times 15$ = Menge an nutzbaren Sm ³	
Landschaftspflegeheu	4,5 t/(ha · a)	5) FNR (2007)
Waldrestholz	1,0 t/(ha · a)	
KUP (z.B. Weide, Pappel)	12,0 t/(ha · a)	
mittlerer Derbhohlvorrat an Flurgehölzen	168 m ³ /km bzw. 276 m ³ /ha Flurgehölze	6) Schrödl, G. (1985)
Biotopverbundflächen	1 t holzartige bzw. 3,5 t halmgutartige Biomasse (Ø 2 t Biomasse) pro ha Biotopverbundfl.	7) Arbeitsgem. DLR/IFEU/WI (2004)
Buchen (Kalkbuchenwald)	siehe „Biomassetafel“	8) Pellinen, P. (1986)
	<u>Mittlerer Biomasseertrag (StAbw.)</u>	9) Mann, S. & Runge, K. (2010)
Gebüsche < 5 m	0,32 t TM/100 m ² = 1,6 Srm (0,20)	
Gebüsche m. Einzelbäumen > 5 m	0,78 t TM/100 m ² = 3,9 Srm (0,24)	
Gebüsche innerhalb v. Streuobstbeständen	0,54 t TM/100 m ² = 2,7 Srm (0,13)	
Material v. Naturschutzflächen und Wege- und Gewässerrändern	4 t TM/ha	10) Scheffer, K. (2008)
Holzpotential aus der Pflege von Streuobstwiesen	1,0 t atro/ha pro Jahr 1,6 t atro/ha pro Jahr 3,8 t atro/ha pro Jahr 0,4 t atro/ha pro Jahr	11) Wiegmann, Heintzmann, Peters, Scheuermann, Seidenberger, Thoss (2007)
Holzchnitt von Gehölzaufwuchs	100 Srm/ha	12) Naturstiftung David (2009)

Tabelle 4 gibt eine Übersicht über Biomassepotentiale für verschiedene Biomassearten. Als problematisch ist dabei anzusehen, dass Einheiten und Bezugsmaße sehr uneinheitlich sind, es wird u.a. mit Srm/ha , $t_{\text{atro}}/\text{Meter Hecke}$, m^3/m^2 u.a. gearbeitet. Weiterhin weisen die unterschiedlichen Literaturangaben teilweise eine große Streuung in den Werten auf. Dies erschwert die Vergleichbarkeit. Ebenso ist eine passende Zuordnung der Potentiale zu den für dieses Projekt gebildeten Vegetationsklassen nicht immer ohne Einschränkungen möglich. Die Qualität einer Hochrechnung anhand von Literaturwerten ist daher schwer einzuschätzen, zumal dabei mehrere Fehlerquellen berücksichtigt werden müssen, die zumeist aber unbekannt bleiben. Dazu zählen z.B. der Stichprobenfehler der Flächenschätzung (führt gegebenenfalls zu einer Verzerrung der Ergebnisse) und mögliche Modellfehler.

5.2 Destruktive Untersuchungen der Biomassedichte

Im Rahmen des laufenden Projektes sind nur beispielhafte destruktive Untersuchungen an bestimmten Gehölztypen möglich. Dazu stand eine Untersuchungsfläche im nördlichen Stadtbereich Göttingens zur Verfügung, auf der eine Teilerntung genehmigt wurde. Die leicht in südwestliche Richtung geneigte, 2,37 ha große Fläche liegt auf ca. 220 m Höhe ü.N.N. Naturräumlich gehört das Untersuchungsgebiet zum Wuchsgebiet des südniedersächsischen Berglandes bzw. zum Wuchsbezirk Göttinger Wald. Der Boden wird in der Umgebung Göttingens hauptsächlich aus den Gesteinen des Trias' und den Sedimenten des Quartärs gebildet. Hier ist als bodenbildendes Ausgangsmaterial der Muschelkalk zu finden. Klimatisch liegt die Fläche im Großraum der sogenannten "Mitteldeutschen Gebirgsschwelle". Hier weist das Klima noch stark atlantische Züge auf, die durch Parameter wie z.B. Gesamtniederschlagsmenge, relative Luftfeuchtigkeit und besonders den charakteristischen Temperaturschwankungen im Jahresverlauf deutlich werden. Dieses Klima schwächt sich im Wuchsgebiet Südniedersächsisches Bergland von West nach Ost immer mehr ab, so dass im Südosten Niedersachsens und damit im Wuchsbezirk des Göttinger Waldes bereits ein schwach kontinental getöntes Klima vorherrscht. Die mittlere jährliche Lufttemperatur beträgt $8,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, die mittlere Niederschlagsmenge ist 628 mm im Jahr und die mittlere Niederschlagsmenge in der Vegetationsperiode (Mai-September) wird mit 340 mm angegeben. (vgl. <http://www.uni-goettingen.de>.)

Zur Aufnahme der Biomasse wurde auf der Fläche ein Bereich ausgewählt, der mit Gewächsen eines Biotoptyps bestanden ist und der einer der in diesem Projekt verwendeten Klassen möglichst nahe kommt. Somit ist eine spätere Übertragbarkeit der Ergebnisse auf eine Klasse

des Kartier- und Inventurschlüssels möglich. Dazu wurde ein Bereich im südlichen Teil der Untersuchungsgebietsfläche ausgewählt, der streifig und überwiegend mit Schlehe (*Prunus spinosa*) bestanden ist. Dieser ist einer Schlehenhecke, die auf einem breiteren Ackerrandstreifen steht in Bezug auf Form, Dichte und Ausdehnung sehr ähnlich.

5.3 Inventurdesign

Die Ermittlung der Biomasse erfolgt auf festen Probeflächen. Diese haben quadratische Form ($1,5\text{ m} \times 1,5\text{ m} = 2,25\text{ m}^2$) und sind in ein quadratisches Raster mit einer Rastweite von 10 m eingehängt. Es wurden zwei Reihen mit jeweils 8 Probeflächen beerntet, siehe Abbildung 9. Insgesamt wurde eine Fläche von $16 \times 2,25\text{ m}^2 = 36\text{ m}^2$ beerntet.



Abbildung 9: Inventurdesign der Biomasseerhebung mit festen Probeflächen (1 – 16), Einmesspunkt (F)

5.4 Aufnahme

Auf den einzelnen Stichprobenflächen erfolgte eine vollflächige Entnahme aller holzartigen Pflanzen (Beerntungszeitpunkt 04. bzw. 08. Februar 2011). Von den entfernten Pflanzen wurde Baumart, Höhe, Trieblänge, Wurzelhalsdurchmesser und das Feuchtgewicht bestimmt. Weiterhin wurden Proben aus Höhe des Wurzelhalses, sowie 50 % und 75 % der Strauchhöhe

entnommen. Die Proben wurden, um ein Austrocknen und somit einen Verlust des Feuchtgewichts zu vermeiden, luftdicht in kleine Plastiktüten verpackt.

5.5 Auswertung

Nach Ende der Feldaufnahmen wurden die eingetüteten Proben aus Höhe des Wurzelhalses, sowie 50 % und 75 % der Baumhöhe gewogen (Bestimmung des Feuchtgewichts), anschließend im Labor getrocknet und dann ihr Trockengewicht bestimmt. Im Einzelnen wurde wie folgt vorgegangen:

1. Ermittlung des Feuchtgewichts der **Gesamtpflanze** (Feld)
2. Ermittlung des Feuchtgewichts der **Proben** aus Höhe des Wurzelhalses, sowie 50% und 75% der Baumhöhe (Labor)
3. Trocknung der **Proben** aus Höhe des Wurzelhalses, sowie 50% und 75% der Baumhöhe (Labor)
4. Ermittlung des Trockengewichts der **Proben** aus Höhe des Wurzelhalses, sowie 50 % und 75 % der Baumhöhe (Labor)
5. Berechnung des Verhältnisses von Feuchtgewicht der **Proben** aus Höhe des Wurzelhalses, sowie 50 % und 75 % der Baumhöhe zu Trockengewicht der **Proben**.
6. Ausgehend vom Feuchtgewicht der **Gesamtpflanze** wird über das zuvor ermittelte Verhältnisses von Feuchtgewicht zu Trockengewicht der **Proben** das Trockengewicht der **Gesamtpflanze** ermittelt.

Das Trockengewicht der Gesamtpflanze stellt die nutzbare Biomasse dar.

Hinweis: Nur bei Stichprobenfläche 1 bis 4 wurde die Proben aus Höhe des Wurzelhalses, sowie 50% und 75% der Baumhöhe einzeln getrocknet und gewogen, ab Stichprobenfläche 5 zwecks Rationalisierung des Aufwandes erfolgte das Trocknen und Wiegen der drei Proben gemeinsam. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Proben aus den einzelnen Entnahmehöhen möglichst gleich groß waren und somit eine homogene Trocknung erfolgte.

Mittels der folgenden Formeln wurden der Mittelwert, die Varianz, die Standardabweichung und der Standardfehler für die Stichprobe berechnet.

Berechnung des Mittelwertes \bar{y} :

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (7)$$

Berechnung der Varianz s^2 :

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (8)$$

Berechnung der Standardabweichung s_y :

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (9)$$

Berechnung des Standardfehlers $s_{\bar{y}}$:

$$s_{\bar{y}} = \frac{s_y}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

wobei n die Anzahl der Stichprobenelemente der Stichprobe und y_i der Wert aller Beobachtungen ist.

5.6 Ergebnisse

Der Mittelwert der Stichprobe stellt die geschätzte Biomasse pro Hektar dar. Diese beträgt 23,9 Tonnen. Dieser Wert kann nach Berechnung des Standardfehlers um bis zu 40,4% schwanken, was $\pm 9,67$ Tonnen/ha entspricht.

In der folgenden Tabelle sind die Mittelwerte der Biomasseerhebungen auf den einzelnen Teilflächen der Stichprobe und die Ergebnisse für die Gesamtfläche dargestellt.

Tabelle 5: Ergebnisse der Stichprobenerhebung des Biomassevorkommens von 16 Stichprobenflächen.

Nr. der StiPro	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
t/ha	10,7	16,1	90,1	36,0	135,7	12,8	3,5	3,0	1,5	0,3	0,1	0,9	30,8	14,4	3,1	10,7
Ergebnisse für die Gesamtstichprobe:																
<i>Mittelwert (t/ha)</i>				23,94				<i>Standardfehler (t/ha)</i>				9,68				
<i>Varianz</i>				1497,67				<i>Standardfehler (%)</i>				40,42				
<i>Standardabweichung</i>				38,7												

5.7 Diskussion der Ergebnisse/Kalkulation der Biomassepotentiale anhand von Literaturwerten

Die im vorherigen Abschnitt dargestellten Ergebnisse stellen nur eine „Momentaufnahme“ für den auf der Untersuchungsfläche erhobenen Biotoptyp dar und sind somit nur eingeschränkt übertragbar. Es können somit nur Aussagen über sehr ähnliche Strukturen abgeleitet werden. Zur Erweiterung der Untersuchung wurde daher eine Literaturrecherche durchgeführt, die den Zweck hat, ähnlich gelagerte Projekte auf Kalkulationen von Biomassevorkommen (Transversion von Fläche zu Volumen) zu untersuchen.

5.7.1 Zuordnung der Literaturwerte zu den Bestockungsklassen des NatBio-Projektes/Ergebnisse der Kalkulation

Trotz der Einschränkungen hinsichtlich der Aussagekräftigkeit wurde beispielhaft für einige Bestockungsklassen mit Hilfe der Literaturangaben die Gesamtbiomasse für einige Flächenklassen kalkuliert. Die Stichprobenfehler der Flächenschätzung wurden hierbei nicht berücksichtigt, da die Genauigkeit der verwendeten Richtwerte oft nicht angegeben ist und somit eine Gesamtfehlerbetrachtung nicht möglich ist.

Tabelle 6: Mögliche Biomasseerträge kalkuliert anhand von Literaturangaben (ohne Angabe statistischer Fehler).

	Bestockungsklasse	Vgl. Literatur	Biomasseertrag	Biomasse t/ha	Biomasse ganz Nds. t
1	Einzelstrauch	9) Gebüsche < 5 m	0,32 t TM/100 m ² = 1,6 Srm	32	93.682
2	Einzelbaum	11) Holzpotential aus der Pflege von Streuobstwiesen	0,4 -3,8 t atro/ha pro Jahr	4 bis 38	6.748 bis 64.114
3	Gebüsch/ Gehölzgruppe	9) Gebüsche m. Einzelbäumen > 5 m	0,78 t TM/100 m ² = 3,9 Srm	78	1.020.962
4	Strauchhecke	4) Strauchhecken (mit/ohne Überhälter)	15 Sm ³ auf 100 m Wallhecke	46	773.493
5	Baumhecke	4) Baumreihe m. Sträuchern, stark lückig	7,5 Sm ³ auf 100 m Wallhecke	13	375.568
6	Geschl. Baumreihe	4) Baumreihe m. Sträuchern, dicht gewachsen	15 Sm ³ auf 100 m Wallhecke	31	1.075.907
7	Feldgehölz	6) mittlerer Derbholtzvorrat an Flurgehölzen	276 m ³ /ha Flurgehölze	20	697.657 bis 5.535.910
		12) Holzschnitt von Gehölzaufwuchs	100 Srm/ha	159	
8	Sukzessionsfläche mit <u>geringem</u> Gehölzanteil	<i>keine Entsprechung gefunden</i>	k. A.		
9	Sukzessionsfläche mit <u>hohem</u> Gehölzanteil	<i>keine Entsprechung gefunden</i>	k. A.		

Ein Problem bei der Berechnung der Biomasseerträge stellen die Angaben der Berechnungsfaktoren in Bezug auf die Länge der Hecke dar. Im Projekt NatBio wurden mit Hilfe des Line Intersept Samplings Flächen für das Vorkommen der einzelnen Bestockungsarten ermittelt. Da jedoch bei der Erhebung im GIS auch die Breiten dieser Strukturen erhoben wurden (Strauchhecke, Baumhecke und geschlossene Baumreihe), konnte die mittlere Breite der Strukturen für die einzelnen Bestockungsklassen ermittelt werden. Über diese mittlere Breite konnte dann auf die Gesamtlänge der Strukturen geschlossen werden und somit der Biomasseertrag näherungsweise bestimmt werden.

In der folgenden Abbildung ist der theoretische Biomassevorrat in Tonnen pro ha für Niedersachsen dargestellt. Bei den Klassen Einzelbäume und Feldgehölz sind die je nach verwendeter Literatur variierenden Unter- bzw. Obergrenzen angegeben.

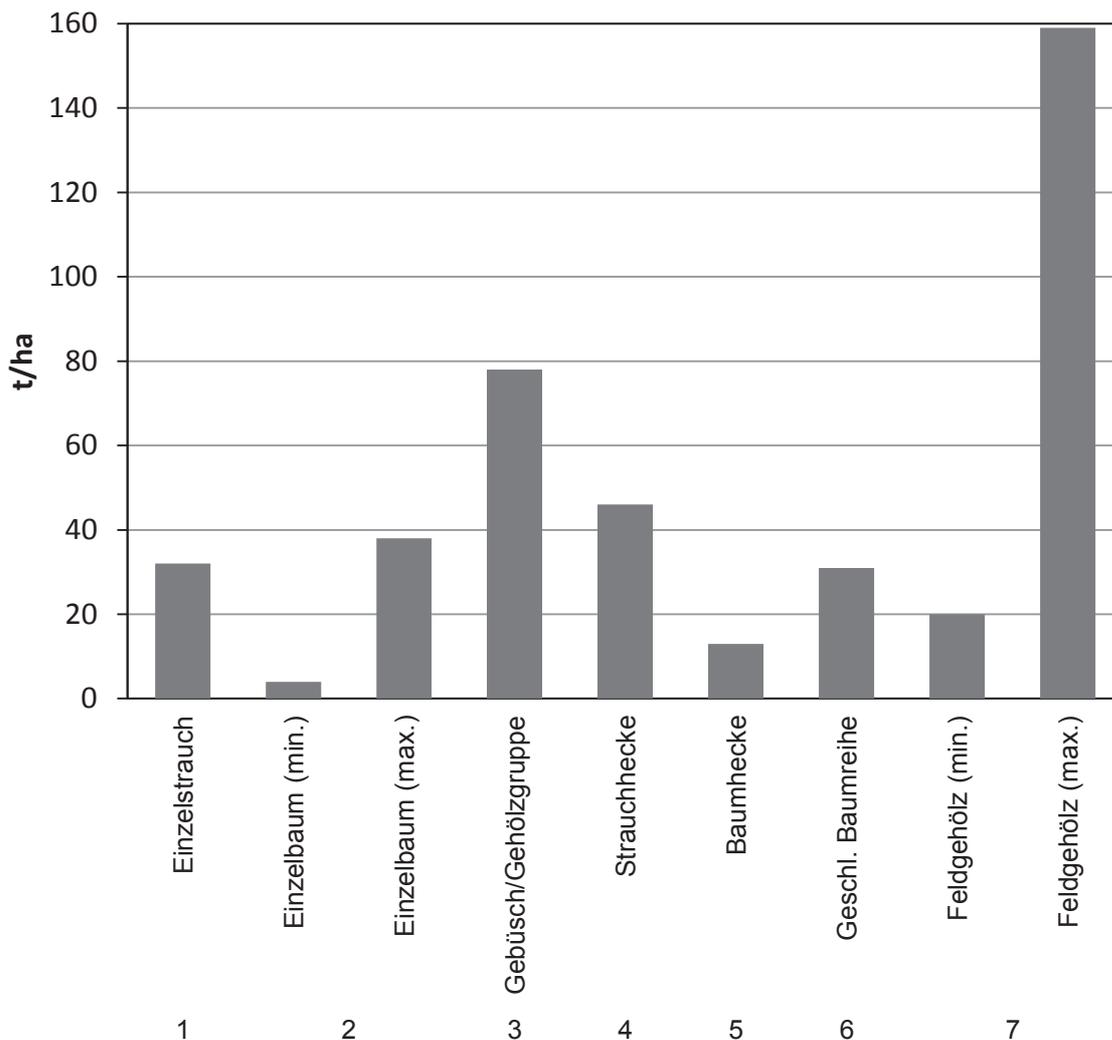


Abbildung 10: Biomassevorrat in t/ha in den unterschiedlichen Klassen für Gesamt-Niedersachsen

Gut zu erkennen ist, dass Literaturangaben zur Bestockung mit einem hohen Strauch- bzw. Gebüschanteil einen größeren Biomassevorrat aufweisen, als Bestockung, die überwiegend durch Bäume geprägt sind. Ebenso ist gut zu erkennen, dass unterschiedliche Literaturwerte große Bandbreiten im Hinblick auf das mögliche Biomassevorkommen liefern, so in Bestockungsklasse 2 (Einzelbaum) und 7 (Feldgehölz).

In der folgenden Abbildung ist das theoretische Gesamtpotential an Biomasse in Tonnen für die Gesamtfläche Niedersachsens dargestellt. Wiederum sind bei den Klassen Einzelbäume und Feldgehölz die, je nach verwendeter Literatur, variierenden Unter- bzw. Obergrenzen angegeben.

Das größte Potential liegt innerhalb der niedersachsenweiten Betrachtung bei geschlossenen Baumreihen und Gebüschen/Gehölzgruppen und bei Verwendung großzügiger Berechnungswerte aus der Literatur ebenso bei Feldgehölzen.

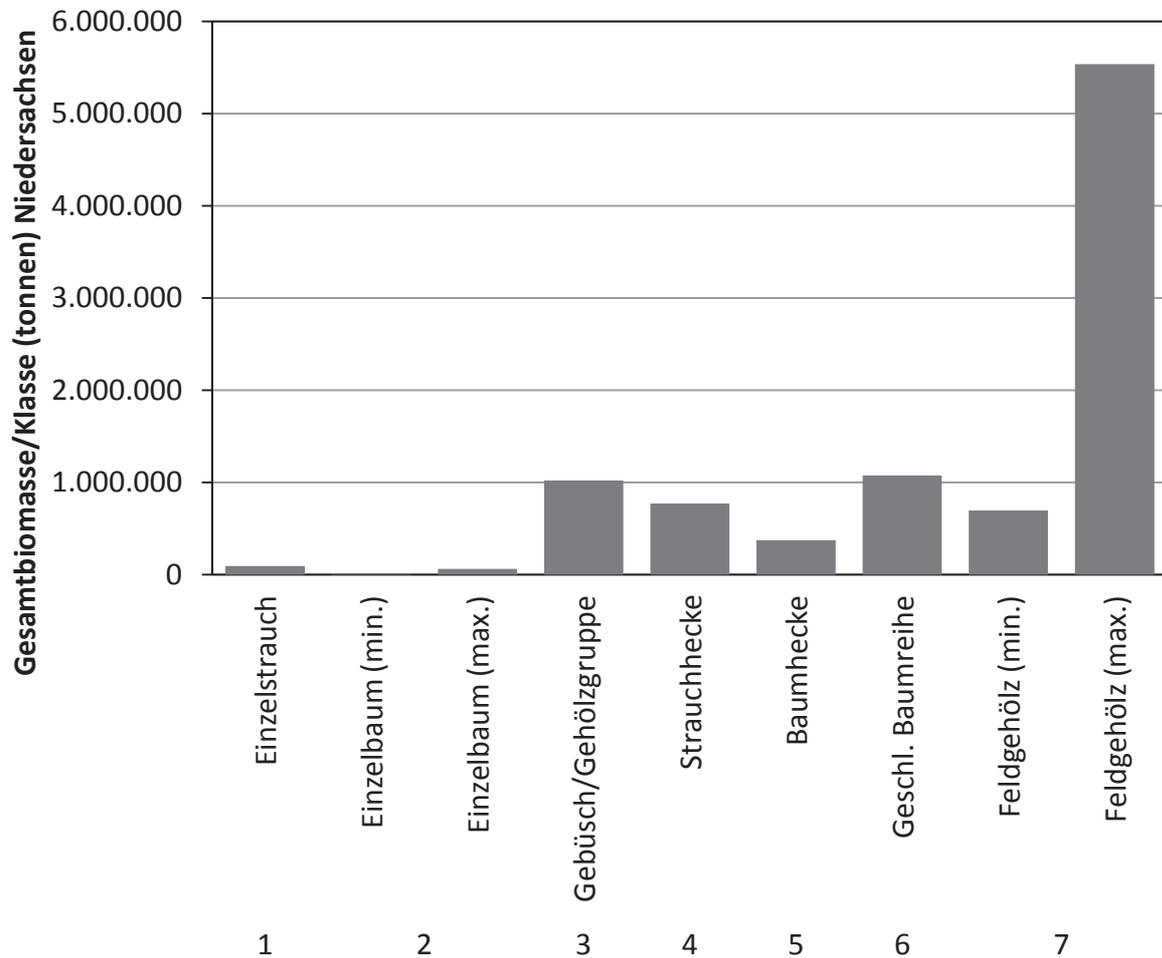


Abbildung 11: Biomasse-Gesamtertrag in Tonnen in den unterschiedlichen Klassen für Gesamt-Niedersachsen.

6. Überwachte Klassifikation zur Detektion von Heckengehölzen aus RapidEye-Satellitenbildern

6.1 Ziele der Studie

Aufbauend auf die im Projekt durchgeführte Inventur von Offenlandgehölzen in Niedersachsen würde die automatisierte Detektion dieser Biomassevorkommen ein kosten- und zeitsparendes Verfahren darstellen, um die bestehenden Potentiale zu lokalisieren. Daher soll untersucht werden, ob mittels fernerkundungsbasierter Klassifikationsverfahren die linienhaften Gehölzvorkommen in den vorliegenden Rapideye-Bildern erfasst werden können. Um einen ersten Überblick bezüglich der Durchführbarkeit und eventueller Problematiken zu erhalten, wurde beispielhaft für ein 2 x 2 km großen Ausschnitt einer RapidEye-Szene eine überwachte Klassifikation unter Benutzung des Bildverarbeitungsprogrammes *ERDAS IMAGINE* und *ArcGIS* durchgeführt.

6.2 Methodik und Ablauf einer überwachten Klassifikation

Das Prinzip einer überwachten Klassifikation basiert auf der Annahme, dass jedes Objekt bzw. jede Objektklasse über eine individuelle Reflektionscharakteristik verfügt, durch welche diese sich von Objektklassen anderer Art unterscheidet. Diese Reflektionscharakteristik wird in einem Luft- bzw. Satellitenbild durch die Pixelwerte in Form von Digital Numbers, Reflektionsgrad oder anderweitigen Umrechnungen repräsentiert. Trägt man daher die Pixelwerte für eine thematische Klasse in einem n-dimensionalen Merkmalsraum auf, ergeben sich für jede Klasse spezifische Cluster. Dieses Phänomen macht sich das Verfahren der überwachten Klassifikation zu Nutze: Auf Basis ausgewählter spektraler Trainingsdaten und entsprechenden Algorithmen wird jedes Pixel einer der im Vorhinein festgelegten Klassen zugeordnet. Für das Durchführen einer überwachten Klassifikation sind folgende Arbeitsschritte notwendig:

- 1) Festlegen von Anzahl und Art der Klassen
- 2) Sammeln von repräsentativen Pixeln für jede Klasse mittels Trainingsgebiete
- 3) Schätzung von Parametern zur Beschreibung der Klassen (Signaturen)

- 4) Anwendung eines Algorithmus zur Entscheidung über die Klassenzugehörigkeit jedes Pixels
- 5) Genauigkeitsbewertung des Klassifikationsergebnisses

6.3 Durchführung der überwachten Klassifikation

6.3.1 Festlegung der Klassenart und Klassenanzahl

Da es sich bei dieser Untersuchung um eine erste Annäherung an die Möglichkeit einer erfolgreichen Klassifikation der zum Teil sehr schmalen Gehölzstrukturen handelt, wurde die Anzahl der Klassen bewusst klein gehalten (5 Klassen), was die Detailliertheit der visuell durchgeführten Inventur deutlich unterschreitet. Folgende thematische Klassen sollen zunächst erkannt werden:

1. Brachflächen
2. Bewirtschaftete Ackerflächen
3. Gehölzartige Biomasse (Bäume, Sträucher, Hecken)
4. Urbane Flächen
5. Wasserflächen

6.3.2 Auswahl der Trainingsgebiete und Sammeln der Referenzsignaturen

Bei der Wahl der Trainingsgebiete ist darauf zu achten, dass durch diese ein Großteil der spektralen Heterogenität einer Klasse abgedeckt wird. Daher wurden die Trainingsgebiete über die gesamte Versuchsfläche verteilt (siehe Abbildung 12). Um für jede Klasse gesicherte Informationen bezüglich der spektralen Signatur zu erhalten sollte außerdem sichergestellt werden, dass pro Klasse mindestens 1000 Trainingspixel gesammelt werden. Des Weiteren ist das Sammeln von Mischpixeln (sog. „Mixels“), welche die spektrale Information von mehr als einer Klasse enthalten, zu vermeiden. Dies kann sich gerade für schmale, linienförmige Objekte wie Gehölzstreifen und Hecken als schwierig erwiesen. Deswegen wurden in diesem Fall die Trainingspixel mit einem *growing-seed*-Verfahren gesammelt. Bei diesem Verfahren wird zunächst ein einzelnes Pixel (sog. *seed-pixel*) manuell ausgewählt. Dieses Pixel wird als Modellpixel genutzt, mit welchem die angrenzenden Pixel mittels einstellbarer Parameter verglichen werden. Unterschreiten die betrachteten Pixel einen wählbaren Schwellenwert,

werden sie in den Sample hinzugefügt und der neue Pixelmittelwert auf Basis der neuen Menge errechnet. Dieses Verfahren wiederholt sich so lange, bis kein angrenzendes Pixel mehr die spektralen Anforderungen erfüllt. Bei diesem Verfahren wächst der Sample vom Modellpixel aus nach Außen und wird anschließend als Trainingsgebiet verwendet. Bei strenger Parameterwahl können so Mischpixel weitestgehend vermieden werden, allerdings birgt dieses Verfahren auch das Risiko, die Varianz einer Klasse zu unterschätzen.

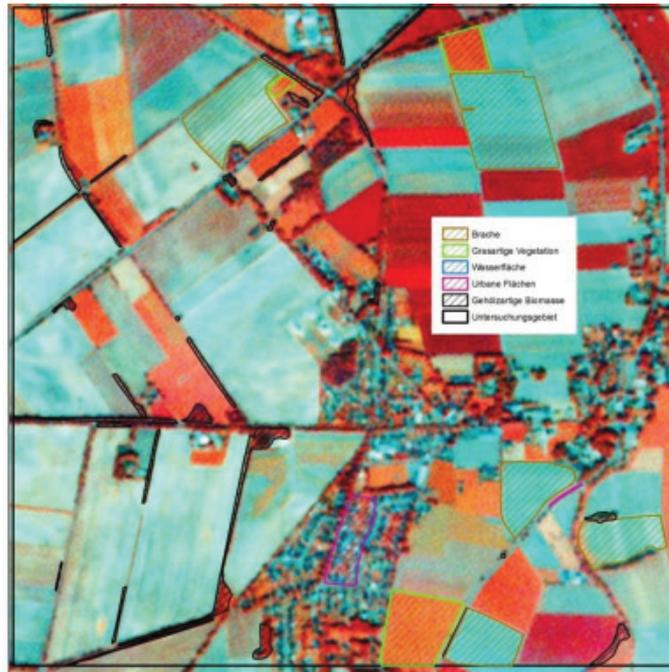


Abbildung 12: Auswahl der Trainingsgebiete, in denen die Trainingssignaturen gesammelt wurden

6.3.3 Anwendung des Maximum-Likelihood-Algorithmus

Nachdem für jede thematische Klasse, die mittels Trainingsgebieten gesammelten Trainingspixel zu einer Referenzsignatur verrechnet wurden, sollte nun durch die Anwendung eines Algorithmus jedes Originalpixel der RapidEye-Szene einer der 5 thematischen Klassen zugeordnet werden. Dazu wurde das Maximum-Likelihood-Klassifikationsverfahren angewendet. Es handelt sich hierbei um ein statistisches Verfahren, bei dem aufgrund der Trainingsdaten der Mittelwert und die Varianz-/Covarianz-Daten der Klassensignaturen benutzt werden, um die Vorab-Wahrscheinlichkeit zu berechnen, mit der ein Pixel in die jeweilige Klasse gehört. Anschließend wird jedes Pixel dieser Klasse zugeordnet, für deren Zugehörigkeit es die höchste Wahrscheinlichkeit besitzt.

6.4 Ergebnis und Genauigkeit der Klassifikation

6.4.1 Visuelle Validierung

Eine erste visuelle Überprüfung des Klassifikationsergebnisses (Abbildung 13 links) zeigt, dass eine gute Trennung der linienhaften Gehölzflächen im Offenland gegenüber Brachflächen möglich ist. Dies zeigt sich besonders im linken unteren Teil des Bildes, hier ist der Verlauf der als „gehölzartige Biomasse“ klassifizierten Pixel nahezu identisch mit dem realen Verlauf (Abbildung 13 rechts). Auch die Identifikation der vermeintlichen Brachflächen scheint gut möglich, obwohl hier des Öfteren einzelne Pixel fälschlicherweise als „urbane Fläche“ klassifiziert wurden. Dies deutet darauf hin, dass die Trennung zwischen diesen beiden Klassen aufgrund der ähnlichen spektralen Charakteristik nicht gut gelungen ist. Ein möglicher Grund hierfür könnte sein, dass innerhalb der Ortschaften viele Grünflächen in Form von Rasen existieren, welche beim Trainieren mit eingeschlossen wurden und den Brachflächen spektral sehr ähnlich sind.

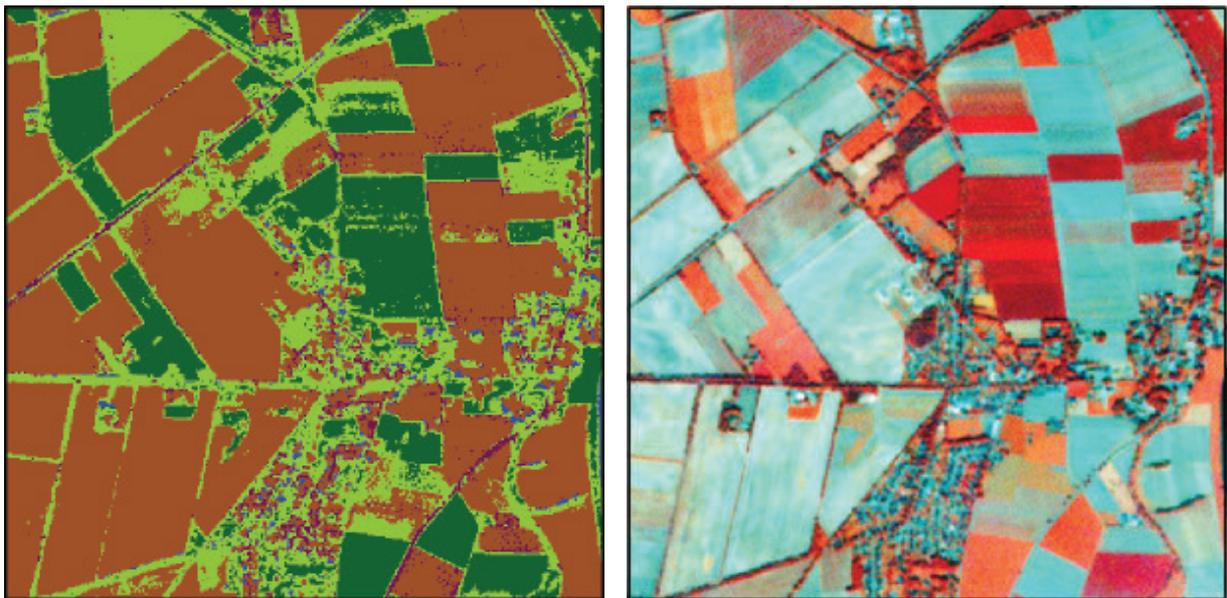


Abbildung 13: Links: Ergebnis der Klassifizierung (hellgrün: holzartige Biomasse, dunkelgrün: bewirtschaftete Felder, braun: Brachland, lila: urbane Flächen, blau: Wasserflächen). Rechts zum Vergleich das Original RapidEye-Satellitenbild.

Des Weiteren scheint die richtige Trennung von „grasartiger Vegetation“ und „gehölzartiger Vegetation“ nicht immer möglich zu sein. Dies wird bei der Betrachtung des linken oberen Teils und des mittigen unteren Teils des Untersuchungsgebietes deutlich. Hier scheint der Anteil gehölzartiger Vegetation deutlich überschätzt zu sein. Auch sollte mit Vorsicht genos-

sen werden, dass die meisten Ackerflächen von gehölzartiger Biomasse komplett umrandet sein sollen. Hier fehlen leider echte Ground Truth-Daten, um dies zu bewerten, da dies aus den Originalbildern nicht immer ersichtlich war.

Um eine bessere Trennung einiger Klassen (z.B. holzartige Biomasse und bewirtschaftetes Ackerland, urbane Gebiete) zu erreichen, sollte auch die Anzahl von Trainingspixeln in den jeweiligen Klassen erhöht werden.

6.4.2 Accuracy Assessment

Um gesicherte, quantitative Aussagen über die erreichte Klassifikationsgenauigkeit zu treffen, wurden zunächst Referenzflächen im Originalbild ausgewählt und anschließend aus diesen 300 Referenzpunkte zufällig ausgewählt (siehe Abbildung 14). Es wurde dabei darauf geachtet, dass die Referenzpunkte nicht in Gebieten lagen, welche bereits als Trainingsgebiete verwendet wurden, da dies zu einer Überschätzung der Klassifikationsgenauigkeit führen würde. Die Referenzpunkte wurden hinsichtlich ihrer thematischen Klasse unter Verwendung des hochaufgelösten Luftbildes visuell interpretiert. Anschließend wurden die 300 Referenzpunkte im Bildverarbeitungsprogramm *ERDAS IMAGINE* dazu verwendet, ein Accuracy Assessment auf Basis einer Fehlermatrix durchzuführen. Die maßgeblichen Kenngrößen sind im Folgenden zusammengefasst:

1. Gesamtgenauigkeit (Overall-Accuracy):

Die Gesamtgenauigkeit ist die einfachste Kennzahl, welche sich aus einer Fehlermatrix ableiten lässt. Sie stellt das Verhältnis der Gesamtzahl aller korrekt klassifizierten Objekte zur Gesamtheit aller betrachteten Objekte dar.

2. Herstellergenauigkeit (Producer's-Accuracy):

Die Herstellergenauigkeit ergibt sich aus der Anzahl der korrekt klassifizierten Objekte einer Klasse im Vergleich zur Gesamtheit der verfügbaren Referenzobjekte dieser Klasse. Sie charakterisiert also die Proportion der korrekt zugewiesenen Referenzobjekte einer Klasse; dementsprechend ergibt sich daraus der Anteil der nicht erkannten Objekte einer Klasse (error of commission).

3. Nutzergenauigkeit (User`s-Accuracy):

Die Nutzergenauigkeit ergibt sich aus der Anzahl der korrekt klassifizierten Objekte einer Klasse im Vergleich zur Gesamtheit der dieser Klasse zugewiesenen Objekte; sie beschreibt somit den Fehler, der auf Kosten einer Fehlzugewiesung zu einer der Konkurrenzklassen entsteht (error of commission).

4. Cohen`s Kappa-Koeffizient:

Der Kappa-Koeffizient setzt die tatsächlich mit den Referenzdaten übereinstimmenden Validierungsobjekte in Bezug zu den sich bei einer zufälligen Verteilung ergebenden Übereinstimmungen. Er wird nach folgender Vorgabe berechnet (Congalton and Green 1999):

$$\kappa = \frac{n \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r x_{i.} \cdot x_{.i}}{n^2 - \sum_{i=1}^r x_{i.} \cdot x_{.i}} \quad (11)$$

Mit:

- r = Anzahl der Zeilen bzw. Spalten der Fehlermatrix
- x_{ii} = Anzahl der Beobachtungen im Matrixelement (Diagonale)
- $x_{i.}$ = Summe der Zeile i (Klassifizierte Werte)
- $x_{.i}$ = Summe der Spalte i (Referenzdaten)
- n = Summe aller Beobachtungen in der Matrix

Sein Wertebereich liegt zwischen -1 (alle Übereinstimmungen zwischen Klassifikationsergebnis und Referenzdaten sind zufällig) und 1 (es gibt keine zufälligen Übereinstimmungen zwischen Klassifikationsergebnis und Referenzdaten).

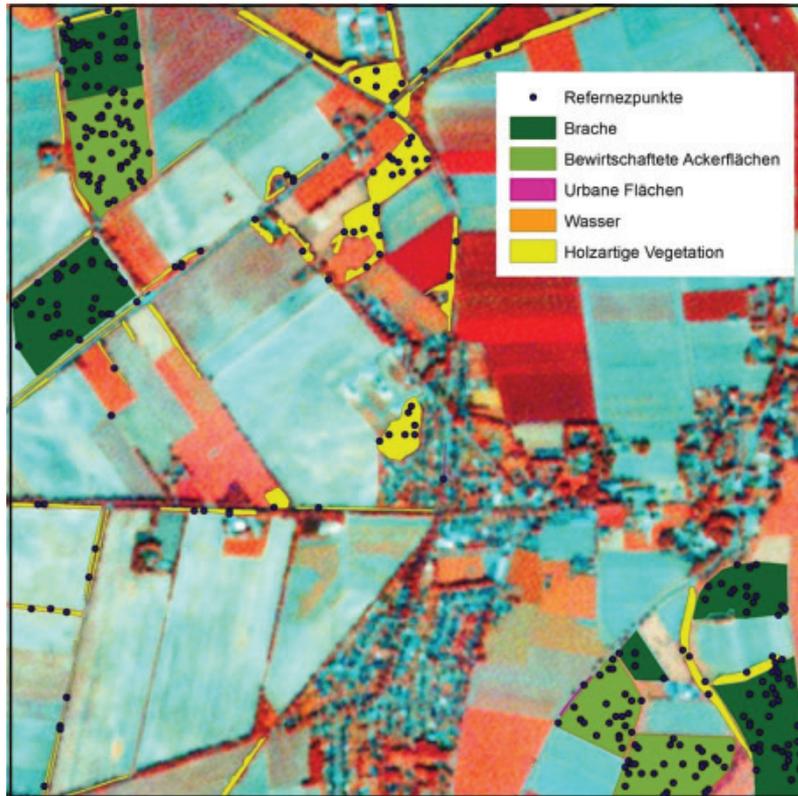


Abbildung 14: Visuell ausgewählte Referenzflächen und aus diesen zufällig ausgewählte Referenzpunkte, die zum Accuracy Assessment benutzt wurden.

6.4.3 Ergebnis des Accuracy Assessments

Die Ergebnisse des Accuracy Assessments lassen auf ein sehr gutes Klassifikationsergebnis schließen. Die Overall-Accuracy liegt bei 90.67 % und auch die Producers und Users Accuracy liegen bis auf die Klasse „Urbane Flächen“ sehr hoch. Vor allem der Kappa-Wert von 0.8614 spricht für ein sehr gutes Klassifikationsergebnis.

Tabelle 7: Ergebnis des Accuracy Assessments (ERDAS Imagine) auf Basis der Referenzpunkte

Class Name	Reference Totals	Classified Totals	Number Correct	Producers Accuracy	Users Accuracy
Unclassified	0	0	0	-----	-----
Brache	116	113	109	93.97%	96.46%
Bew. Ackerfläche	97	104	92	94.85%	88.46%
Urbane Fläche	3	4	2	66.67%	50.00%
Wasser	3	3	3	100.00%	100.00%
Holzartige Biomasse	81	76	66	81.48%	86.84%

Allerdings ist davon auszugehen, dass dieses Ergebnis die Klassifikationsgenauigkeit deutlich überschätzt. Dies ist maßgeblich bedingt durch die Verteilung der Referenzpunkte: Durch das oben beschriebene Verfahren zur Auswahl der Referenzpunkte ergab sich eine unausgeglichene Verteilung der Referenzpunkte auf die 5 Klassen. Auf die Klasse „Brachfläche“, die erwiesenermaßen sehr einfach zu klassifizieren war, fallen 116 der 300 Referenzpunkte wohingegen die Klasse „urbane Fläche“ und „Wasser“ nur 3 Referenzpunkte zugewiesen wurden. Dadurch ist von einer erheblichen Verzerrung der Genauigkeitsbeurteilung der Klassifikation mit Tendenz zu einer Überschätzung der Genauigkeit auszugehen. Daher ist es empfehlenswert, in diesem Fall mehr Gewicht auf die visuelle Validierung der Klassifikation zu legen.

6.5 Bewertung und Diskussion

Es konnte in diesem ersten Versuch gezeigt werden, dass eine erfolgreiche Detektion von linienhafter Gehölzvegetation im Offenland möglich ist, obwohl aufgrund der Auflösung der RapidEye-Daten (5 x 5 Meter) mit einer hohen Anzahl von Mischpixeln beim Trainieren am schmalen Gehölzstreifen gerechnet wurde. Gerade wenn diese Vorkommen relativ isoliert (beispielsweise umgeben von Brachflächen) vorkommen, funktioniert eine Erkennung sehr gut. Es darf aber nicht vergessen werden, dass es sich hier um eine sehr grobe Klassifikation gehandelt hat, in der keinerlei Unterscheidung der Art von holziger Vegetation (Bäume, Sträucher, Hecken) versucht wurde. Es konnte lediglich gezeigt werden, dass man holzige Vegetation relativ gut von Ackerland trennen kann und dass der spektrale Einfluss in Form von Mischpixeln durch Acker und Grasland nicht dazu führt, dass linienhafte Hecken unter diesen Umständen nicht detektiert werden.

Weiterhin erwies sich für die Genauigkeitsanalyse der Klassifikation das hier angewandte Verfahren zur Auswahl von Referenzpunkte als nicht geeignet. Es sollte stets darauf geachtet werden, dass eine Mindestanzahl an Referenzpunkten pro Klasse verwendet wird und dass die Referenzpunkte nicht gehäuft sondern über die gesamte Szene verteilt liegen. Die Referenzpunkte sollten dabei jedoch trotzdem, wenn möglich, zufällig ausgewählt werden, um statistisch abgesicherte Werte zu erhalten. Ein geeignetes Verfahren wäre hier, ohne vorherige Festlegung von Referenzgebieten, eine hohe Anzahl an zufällig verteilten Punkten über die gesamte Szene zu legen und diese Punkte visuell oder besser durch Feldbegehung zu klassifizieren.

Ein weiteres Problem bei der Aussage über die Klassifikationsgenauigkeit ist die Unsicherheit bei der Klassifizierung der Referenzdaten, anhand derer die Klassifikationsergebnisse validiert werden. Bei der Auflösung von 5 x 5 Metern stößt die visuelle Interpretation von Hecken und Sträuchern definitiv an ihre Grenzen und auch unter Zuhilfenahme von höher aufgelösten Luftbildern bleiben hohe Unsicherheiten, zumal die Aufnahmezeitpunkte der beiden Daten deutlich auseinanderlag. Für weitere Klassifizierungen, in denen auch mehr ins Detail gegangen werden soll (Unterscheidung von Gehölzarten), ist die Erhebung von gesicherten „Ground Truth“-Daten unerlässlich.

Des Weiteren würde sich für die Detektion von Gehölzstreifen im Offenland definitiv die Verwendung eines objektbasierten Klassifikationsverfahrens (z.B. eCognition) gegenüber einem hier angewendeten pixelbasierten Verfahren anbieten. Dieses Verfahren macht es möglich, zusätzlich zu den spektralen Informationen auch geometrische Informationen der zu klassifizierenden Objekte zu verwenden. Somit können Objekte schon aufgrund ihrer geometrischen Form bei einer automatisierten Klassifikation ausgeschlossen bzw. detektiert werden. Dies würde bezüglich der oft linienförmig vorkommenden Offenlandgehölzverbände eine vielversprechende Alternative sein.

Um dem Effekt von Mischpixeln bei der für diese Aufgabe relativ niedrigen Auflösung von 5x5-Meter zu begegnen wäre es sinnvoll, neben sog. „Hard-classifiern“, wie der hier benutzte Maximum-Likelihood-Algorithmus, auch sog. „Soft-classifier“ zu verwenden. Mit diesen ist es möglich, den Anteil einer bestimmten Klasse an einem Pixel zu schätzen.

7. Technikeinsatz in der Landschaftspflege

Landschaftspflegematerial gezielt für die Energiegewinnung zu nutzen ist bisher in der Praxis nicht üblich gewesen. Meistens stellt die Beerntung ein Muss dar, damit Verkehrsstraßen nicht zuwachsen bzw. Ackerflächen nicht durch Randstreifen beeinträchtigt werden. Oft wird das Material direkt an Ort und Stelle gehäckselt und als Gründung wieder dem natürlichen Kreislauf zugeführt. Eine Option ist jedoch die energetische Nutzung des Materials in z.B. Biogasanlagen, Verbrennungs- oder Vergasungsanlagen. In der Praxis finden sich bereits zahlreiche Landschaftspflegeprojekte, in denen die natürliche Biomasse, die im ersten Teil des hier vorgestellten Projekts quantifiziert wurde, mit unterschiedlicher Technik beerntet

wird. Die Auswahl der Maschinenteknik hängt oft davon ab, welche Maschinen im Unternehmen zur Verfügung stehen, wie die örtlichen Geländebedingungen beschaffen sind und wie das Material anschließend verwertet werden soll. Auch der Aufwuchs hat einen Einfluss auf die Ernteverfahren, denn nicht jedes Verfahren eignet sich für jedes Gelände; so macht es einen deutlichen Unterschied, ob verbuschte Flächen, die seit langem brach liegen, beerntet werden müssen, oder ob es sich um Hecken oder sogar Einzelbäume zur Begrenzung von Äckern handelt. Im Folgenden soll eine Differenzierung und eine Auswahl geeigneter Ernteverfahren durchgeführt werden, außerdem sollen die entstehenden Kosten der Verfahren betrachtet werden.

7.1 Erntekosten

Anhand einer ausführlichen Literaturrecherche (vgl. NatBio-Zwischenbericht, 2010) wurden vier verschiedene Erntesysteme ausgewählt, die in der Landschaftspflege wirtschaftlich sinnvoll eingesetzt werden. Die Verfahren setzen sich zusammen aus drei absätzigen Verfahren und einem Vollernteverfahren und kommen sowohl aus dem landwirtschaftlichen als auch aus dem forstwirtschaftlichen Bereich. In Tabelle 8 sind die vier Verfahren mit den variablen und fixen Kosten pro Arbeitsstunde dargestellt. Die Kosten sind Mittelwerte aus der KTBL-Datensammlung (2006). Auch die jeweilige Nutzungsdauer ist daraus entnommen. So ergeben sich zum Beispiel für die Motorsäge mit einem Nutzungsumfang von 1500 h in 4 Jahren feste Kosten von 112 bis 280 Euro/Jahr inklusive Abschreibung und variable Kosten von 3,18 bis 4,62 Euro/Stunde inklusive Reparaturkosten je nach Leistung der Motorsäge.

Tabelle 8: Ernteverfahren von Landschaftspflegematerial dargestellt mit den jeweiligen fixen und variablen Kosten in €/a

Absätziges Verfahren						Vollernteverfahren	
System 1		System 2		System 3		System 4	
Verfahren	Kosten	Verfahren	Kosten	Verfahren	Kosten	Verfahren	Kosten
Motorsäge ^{a)}	1684,8	Fäller-Bündler	42955,0	Heckenschere, Ausleger ^{a)}	1637,8	Forstmulcher ^{a)}	2449,6
Holzhacker, angebaut ^{a)}	10034,5	Holzhacker, angehängt ^{a)}	17891,7	Holzhacker, angebaut ^{a)}	10034,5	Standardtraktor Allradantrieb ^{a)}	20771,3
Standardtraktor, Allradantrieb ^{a)}	20771,3	Zweiachsiger Dreiseitenkipper ^{a)}	1539,9	Standardtraktor Allradantrieb ^{a)}	20771,3	2-achsiger Dreiseitenkipper ^{a)}	1539,9
Einachsiger Dreiseitenkipper ^{a)}	871,2	Standardtraktor Allradantrieb ^{a)}	20771,3	Einachsiger Dreiseitenkipper ^{a)}	871,2	Standardtraktor Allradantrieb ^{a)}	20771,3
	33361,8		60171,0		33314,8		45532,1

Quellen: ^{a)} KTBL (2005), KWF (2010)

Bezogen auf den geernteten Kubikmeter stellt sich die Ermittlung der Kosten schwieriger dar. Hierfür werden ebenfalls Angaben aus der Literatur hinzugezogen. In Praxiseinsatz und Forschungsprojekten liegen die Daten in einer großen Spanne, wie dies in Tabelle 9 ersichtlich ist. Schwierig ist hierbei auch der Vergleich der unterschiedlichen Bezugsgrößen. Häufig werden die Kosten bezogen auf den Schüttraummeter (Srm) angegeben. Bei Lohnunternehmern findet man jedoch auch Angaben bezogen auf die Arbeitsstunde.

Tabelle 9: Erntekosten verschiedener Ernteverfahren aus Literaturangaben

Quelle	Maschineneinsatz	Kosten	Geerntetes Material
1) Appelfelder (2011)	Bagger, Forwarder, Hacken	9,60 €/srm	Energieholz (KUP)
	Motormanuell, Forwarder, Hacken	14,10 €/srm	Energieholz (KUP)
	Bagger, mobiler Hacker	10,70 €/srm	Energieholz (KUP)
2) Böhmer (2010)	Motormanueller/ maschineller Hieb, Mobiler Hacker, Lagerung, Transport	109,51€/srm (77,24-141,78 €/srm je nach Fläche und Hieb)	Streuobstwiesen, Schutzgebiete, Sukzessionsflächen, Waldumbau
3) Burger und Scholz (2004)	Motormanuell, Einachshacker	65 €/h 10 €/srm	Energieholz (KUP)
	Fäller-Bündler, 2 stationäre Hacker	82 €/h 11,3 €/srm	Energieholz (KUP)
4) Conrady (2010)	Motormanueller Hieb, manuelles oder maschinelles Vorkonzentrieren, Hacken, Pelletieren, Abtransport	46,87 €/srm (15,42-77,12 €/Srm je nach Fläche)	Landschaftspflegematerial (Streuobstwiese und Biotoplandschaft Halb- und Sandtrockenrasen)
5) DLZ Agrarmagazin (Hrsg.) (2009)	Kettenbagger mit Knickschere, selbstfahrender Hacker	30 €/t _{FM} (Preis für Hackschnitzel: 60 €/t _{TM})	Ackerrandstreifen, Wallhecken, Knicks (Schleswig-Holstein)
	Kettenbagger mit Knickschere, selbstfahrender Hacker	11-12 €/srm (Preis für Hackschnitzel: 19.20 €/t _{TM})	Ackerrandstreifen, Wallhecken, Knicks (Münsterland)
6) Meyer (2011)	Harvester, Kettenbagger mit Fäll-/Sägeaggregaten, Hacker	110 €/h	Autobahnrandstreifen
7) Textor (2008)	Motorsäge/Freischneider, Hacken	90 €/t _{atro} (entspricht 12,33 €/srm)	Energieholz (KUP)
	Fäller-Bündler, Hacken	80 €/t _{atro} (entspricht 10,96 €/srm ^{b)})	Energieholz (KUP)
8) Weiß et al. (2010)	Motormanueller Hieb, Forwarder, Hacker	24 €/Fm (entspricht 7,9 €/srm ^{b)})	Waldränder, Sukzessionsflächen

^{b)}Quelle: Hagauer et al. (2009)

Es bestehen deutliche Unterschiede bei den Erntekosten innerhalb der einzelnen Projekte. So ist zu sehen, dass es Unterschiede zwischen der Ernte von Energieholz in Form von Kurzumtriebsplantagen und der von Landschaftspflegematerial in unterschiedlichen Vegetationsformen gibt. Auch werden Unterschiede zwischen motormanuellen und maschinellen Verfahren deutlich.

Die Biomasserträge werden von Tonnen in Schüttraummeter (srm) nach Hagauer et al. (2009) umgerechnet, um die Gesamtkosten in Euro pro srm zu erhalten. Dabei entspricht

1 Tonne_{atro} 7,3 srm. Hagauer et al. (2009) geht davon aus, dass es sich um Holzhackgut für Anlagen mit einer Nennleistung über 500 kW und einem mittleren Wassergehalt von 35% der Holzhackschnitzel handelt.

Die durchschnittlichen Preise für die Ernte von Energieholz aus Kurzumtriebsplantagen liegen bei den motormanuellen Verfahren bei 12,14 €/srm (von 10 €/srm bis 14,10 €/srm), bei maschinellen Verfahren bei 10,64 €/srm (von 9,60 €/srm bis 11,30 €/srm). Im Landschaftspflegebereich sieht die Preisspanne wesentlich höher aus, da hier viele unterschiedliche Verfahren zum Einsatz kommen können und verschiedenste Erntebedingungen sich auf die Kosten auswirken. So ergeben sich Kosten zwischen 46,87 €/srm und 109,51 €/srm bei den motormanuellen Verfahren und 7,9 €/srm und 109,51 €/srm bei den maschinellen Verfahren. Letzteres ist ein Durchschnittswert, der sich aus mehreren Verfahren zusammensetzt, hier kann somit davon ausgegangen werden, dass die höheren Preise durch die motormanuellen und die tieferen Preise durch die maschinellen Verfahren verursacht werden.

Die Ermittlung der durchschnittlichen Erntekosten stellt sich oft als schwierig dar, da diese von vielen verschiedenen Faktoren abhängen, wie Aufwuchs, Befahrbarkeit des Geländes und anderem. So ist es durchaus möglich, dass ein Verfahren in einem Einsatz nur halb so viel Kosten verursacht, wie in einem anderen Einsatz, weil die Erntebedingungen in dem einen Fall wesentlich ungeeigneter sind. Auch kommt es auf den Erlös der gewonnenen Hackschnitzel an. Teilweise ist es auf Grund eines geringen Aufwuchses nicht lohnenswert, aus der geernteten Biomasse Hackschnitzel zu gewinnen, sodass diese direkt wieder in die Hecke geblasen werden und der komplette Erntevorgang vom Auftraggeber (wenn es in Lohnarbeit durchgeführt wird) bezahlt werden muss. Teilweise behält der Lohnunternehmer die gewonnenen Hackschnitzel ein und verrechnet diese mit den Erntekosten.

7.2 Praxisbeispiel

Fallbeispiele für die Beerntung von Biomasse gibt es zahlreiche. Im Folgenden soll der Praxisfall der Beerntung an der A7 vorgestellt werden. Hier wurden die Randstreifen der Autobahn A7 zwischen Bockenem und dem Salzgitterdreieck für einen Autobahnausbau komplett abgeerntet. Die Maßnahme fand von Anfang Februar bis Mitte April statt, bis zum 11. März wurde die Biomasse gefällt, bis Ende März gehackt und bis in den April hinein wurden Nacharbeiten durchgeführt. Die Länge des Autobahnstreifens beträgt beidseitig 12 km, was einer

Fläche von 25,5 ha entspricht. Der Aufwuchs bestand zu 80 bis 90% aus armdicken Bäumen, sodass hier der Einsatz von Forsttechnik nötig war. Eingesetzt wurden hierfür ein Harvester (Sampo 1066) und Kettenbagger mit Fäll- bzw. Sägeaggregaten: der Schnitt-Griffy als Baumschere und eine Maschine aus dem Eigenbau; beide können Bäume bis zu einem Durchmesser von 60 cm ernten.

Die gewonnenen Hackschnitzel sind in Heizkraftwerke verkauft worden. Der erzielte Preis lag bei 6 bis 10 Euro/m³, wobei dieser in der Regel von der Qualität abhängig ist. Insgesamt gesehen war die Qualität durchschnittlich bis gut, da ein hoher Anteil armdicker Bäume zu ernten war. Aus der gesamten Erntemaßnahme konnten 7 500 m³ Holzhackschnitzel gewonnen werden. Die Kosten für diesen Ernteeinsatz lagen bei durchschnittlich 110 Euro pro Stunde beim Einsatz der hier genannten Maschinen (Meyer, 2011).

Die Beerntung und Pflege von Straßen- und Autobahnstreifen wird in Niedersachsen nur noch beschränkt von den Straßen- und Autobahnmeistereien durchgeführt. Auf Grund umfangreicher Einsparungen des Landes Niedersachsen und einer flächendeckenden Umstrukturierung bei den Straßenbauverwaltungen, bei der unter anderem auch viele Stellen gestrichen wurden, stehen die Kapazitäten für eigene Erntemaßnahmen als auch der erforderliche Maschinenpark nicht zur Verfügung (Wolf, 2011). Deshalb erfolgen diese immer in Fremdvergabe an Lohnunternehmen. Es stehen lediglich Kontrollteams bereit, die für die Kontrolle der Straßensicherheit zuständig sind. Erntemaßnahmen in Eigenregie werden nur durchgeführt, wenn bei den Meistereien die Kapazitäten gegeben sind. Sollte dies der Fall sein, werden kleine Geräte eingesetzt oder die Biomasse wird mittels Handrodung geerntet, wobei das geerntete Material jedoch wieder in die Grünanlage zurückgeführt wird. Bei großen Aufträgen ab 250 000 m² werden für die Maßnahmen Ausschreibungen nach dem Niedersächsischen Vergabegesetz gemacht, sodass die zuschlagerhaltenden Lohnunternehmen dann in einem festgesetzten Zeitrahmen die Erntemaßnahmen durchführen müssen (Mees, 2011).

7.3 Kosten der Ernte der für Niedersachsen ermittelten Biomasse

Um die möglichen Erntekosten zu berechnen müssen einige Annahmen getroffen werden. In Tabelle 10 werden die verschiedenen Biomassen mit den berechneten Gesamtaufwüchsen (vergleiche Tabelle 6) dargestellt; für die einzelnen Bestockungsklassen werden mögliche Ernteverfahren, wie in Tabelle 9 beschrieben, aufgeführt und mit den durchschnittlichen Kos-

ten aus Literaturangaben kombiniert. Dabei werden jedoch die Kosten bevorzugt herangezogen, die bei der Ernte von Landschaftspflegematerial berechnet wurden, während dargestellte Erntekosten aus Kurzumtriebsplantagen vernachlässigt werden, da die Erntebedingungen erheblich von denen aus der Landschaftspflege abweichen. Lediglich für den Einsatz des Fällerbündlers werden Daten aus der Ernte von Kurzumtriebsplantagen herangezogen, da keine weiteren Angaben zur Verfügung stehen.

Tabelle 10: Erntekosten nach Literaturangaben für die einzelnen Bestockungsklassen

Bestockungsklasse		Biomasse ganz Nds. t ^{a)}	Mögliche Ernteverfahren	Vergleiche Literatur	Gesamtkosten für Ernte in €
1	Einzelstrauch	93.682	Motormanueller Hieb, mobiler Hacker	2)= 109,51 €/srm	74.891.546
				4)= 46,87 €/srm	32.053.390
2	Einzelbaum	35.431 (6.748 bis 64.114)	Motomanueller Hieb, Hacker	2)= 109,51 €/srm	28.324.356
				4)= 46,87 €/srm	12.122.752
			Harvester mit Sägeaggregaten, Hacker	6)= 110 €/h	
3	Gebüsch/ Gehölzgruppe	1.020.962	Kettenbagger mit Knickschere, Hacker	5)= 11,5 €/srm	85.709.760
			Motormanueller Hieb, mobiler Hacker	2)= 109,51 €/srm 4)= 46,87 €/srm 8)= 24 €/Fm (entspricht 7,9 €/srm ^{b)})	816.180.505 349.323.169 58.878.879
4	Strauchhecke	773.493	Kettenbagger mit Knickschere, Hacker	5)= 11,5 €/srm	64.934.737
			Motormanueller Hieb, mobiler Hacker	2)= 109,51 €/srm 4)= 46,87 €/srm	618.348.095 264.651.403
5	Baumhecke	375.568	Motormanueller Hieb, Mobiler Hacker	2)= 109,51 €/srm 4)= 46,87 €/srm	300.237.697 128.500.967
			Kettenbagger mit Knickschere, Hacker	5)= 11,5 €/srm	31.528.934
			Harvester, Kettenbagger mit Fäll-/Sägeaggregaten, Hacker	6)= 110 €/h	
6	Geschl. Baumreihe	1.075.907	Fäller-Bündler, Hacken	3)= 11,3 €/srm 7)= 80 €/t _{atro} (entspricht 11 €/srm ^{b)})	88.751.568 86.395.332
			Kettenbagger mit Knickschere, Hacker	5)= 11,5 €/srm	90.322.393
			Harvester, Kettenbagger mit Fäll-/Sägeaggregaten, Hacker	6)= 110 €/h	
7	Feldgehölz	3.116.784 (697.657 bis 5.535.910)	Motormanueller Hieb, mobiler Hacker	2)= 109,51 €/srm 4)= 46,87 €/srm 8)= 24 €/Fm (entspricht 7,9 €/srm ^{b)})	2.491.628.816 1.066.410.762 179.744.933
			Kettenbagger mit Knickschere, Hacker	5)= 11,5 €/srm	261.654.017
8	Sukzessionsfläche mit geringem Gehölzanteil	k. A.	In Frage kommt motormanueller Hieb als auch maschineller	Keine Entsprechungen gefunden	k. A.
9	Sukzessionsfläche mit hohem Gehölzanteil	k. A.	In Frage kommt motormanueller Hieb als auch maschineller	Keine Entsprechungen gefunden	k. A.

Quellen: ^{a)}vergleiche Tabelle 5, ^{b)} Hagauer et al., 2009,

Die Erntekosten für die unterschiedlichen Vegetationsklassen in Niedersachsen hängen stark von den Ernteverfahren und anderen Bedingungen ab. Aus diesem Grund ergeben sich große Preisspannen innerhalb der einzelnen Klassen. Für weitere Berechnungen, bzw. Wirtschaftlichkeitsvergleiche, werden in der Tabelle 11 Durchschnittswerte dieser berechneten Ergebnisse dargestellt. Für die Vegetationsklassen 8 und 9, Sukzessionsflächen mit geringem bzw. hohem Gehölzanteil, konnten keine dementsprechenden Werte aus der Literatur gefunden und ermittelt werden, sodass dieser Bereich in der folgenden Berechnung wie ein Gebüsch bzw. eine Gehölzgruppe betrachtet und berechnet wird.

Tabelle 11: Erntekosten der Bestockungsklassen berechnet nach

Bestockungsklasse		Erntekosten für Gesamt-Niedersachsen in €	
		Motormanuelle Beerntung	Maschinelle Beerntung
1	Einzelstrauch	53.472.468	k. A.
2	Einzelbaum	20.223.554	k. A.
3	Gebüsch/ Gehölzgruppe	408.127.518	85.709.760
4	Strauchhecke	441.499.749	64.934.737
5	Baumhecke	214.369.332	31.528.934
6	Geschl. Baumreihe	k. A.	88.489.764
7	Feldgehölz	1.245.928.170	261.654.017
8	Sukzessionsfläche mit geringem Gehölzanteil	408.127.518	85.709.760
9	Sukzessionsfläche mit hohem Gehölzanteil	408.127.518	85.709.760

Klar zu erkennen ist hierbei, dass eine maschinelle Beerntung wesentlich preisgünstiger ist als eine motormanuelle Beerntung. Bei einer maschinellen Beerntung muss jedoch gewährleistet sein, dass die zu erntenden Flächen für die maschinelle Bearbeitung geeignet sind. Hierzu zählen Faktoren wie die Hangneigung und die Bodenbeschaffenheit einer Fläche, die die Befahrbarkeit stark einschränken. Auch Hindernisse, wie Steine, die von Äckern gesammelt wurden, oder Zäune wirken sich auf die Eignung für Erntefahrzeuge aus.

7.4 Gewinn durch die Holzhackschnitzel

In Tabelle 12 sind Preise für Holzpellets und Hackschnitzel aus den Jahren 2007 und 2011 dargestellt. Für die weiteren Berechnungen wird der Preis von 95,25 €/t von C.A.R.M.E.N. e.V. gewählt, da es sich hierbei um eine Hochrechnung des aktuellen Durchschnittspreises handelt.

Tabelle 12: Preise für Holzpellets und Holzhackschnittel

Produkt	Preis	Bezugsjahr	Quelle
Holzpellets	190 €/t	2007	http://www.agriserve.de/Pflanzenheizungen-Allgemeines.html
Hackschnittel	95,25 €/t	2011	http://www.carmen-ev.de/dt/energie/bezugsquellen/hackschnipreise.html

Um die endgültige Wirtschaftlichkeit der Ernteverfahren darzustellen, werden die gewonnenen Mengen an Biomasse mit dem Durchschnittspreis (siehe Tabelle 12) für Hackschnittel multipliziert. Es wird davon ausgegangen, dass die gewonnene Biomassemenge auch der gewonnenen Hackschnittelmenge entspricht. Die Ergebnisse, die in den einzelnen Bestockungsklassen erzielt werden, werden den Kosten der Ernteverfahren gegenübergestellt (siehe Tabelle 13). Dabei werden sowohl die Erntekosten der maschinellen Beerntung in Betracht gezogen als auch die der maschinellen Beerntung. Teilweise stehen für die verschiedenen Bestockungsklassen keine Daten zur Verfügung, sodass deren Angaben hier ausgespart wurden.

Tabelle 13: Kosten und Gewinn durch Hackschnittel der einzelnen Bestockungsklassen bezogen auf die Gesamtfläche in Niedersachsen

	Bestockungsklasse	Biomasse (=Hackschnittel) in ganz Niedersachsen in t	Gewinn durch Hackschnittel in €	Kosten Ernteverfahren in €	Differenz in €
Mit motormanueller Beerntung					
1	Einzelstrauch	93.682	8.923.211	53.472.468	-44.549.257
2	Einzelbaum	35.431 (6.748 bis 64.114)	3.374.803	20.223.554	-16.848.751
3	Gebüsch/ Gehölzgruppe	1.020.962	97.246.631	408.127.518	-310880887
4	Strauchhecke	773.493	73.675.208	441.499.749	-367.774.541
5	Baumhecke	375.568	35.772.852	214.369.332	-178.596.480
6	Geschl. Baumreihe	1.075.907	102.480.142	k. A.	k. A.
7	Feldgehölz	3.116.783,5 (697.657 – 5.535.910)	296.687.628	1.245.928.170	-949.240.542
Mit maschineller Beerntung					
3	Gebüsch/ Gehölzgruppe	1.020.962	97.246.631	85.709.760	11.536871
4	Strauchhecke	773.493	73.675.208	64.934.737	8.740.471
5	Baumhecke	375.568	35.772.852	31.528.934	4.243.918
6	Geschl. Baumreihe	1.075.907	102.480.142	88.489.764	13.990.377
7	Feldgehölz	3.116.783,5 (697.657 – 5.535.910)	296.687.628	261.654.017	35.033.612

Wie in Tabelle 13 deutlich zu sehen ist, ist lediglich die maschinelle Beerntung positiv zu bewerten durch die Gewinnung der Holzhackschnitzel. Eine motormanuelle Beerntung bewegt sich im Verlustbereich und ist somit nicht lohnenswert, wenn nicht andere Nutzen mit betrachtet werden, die in dieser Untersuchung jedoch keine Rolle spielen. Ein Nutzen von Ackerrandstreifen ist z.B. die Gewährleistung der Biodiversität durch das Pflegen des Biotops Hecke, in dem seltene Tier- und Pflanzenarten Unterschlupf finden aber auch die Verminderung der Bodenerosion durch Heckenbarrieren. Werden diese Argumente nicht mit betrachtet, ist die Beerntung von Ackerrandstreifen oder Straßenbegleitgrün durch motormanuelle Verfahren eine unwirtschaftliche Maßnahme. Bei der maschinellen Beerntung sieht dies anders aus. In Tabelle 14 werden zur besseren Veranschaulichung noch die Kosten der einzelnen Bestockungsklassen bezogen auf den Hektar dargestellt. Es handelt sich bei allen Zahlen um Durchschnittswerte, die nicht auf alle Maßnahmen gleichermaßen bezogen werden können. Die Erntekosten hängen zum großen Teil von der Beschaffenheit der Biomasse als auch von der Befahrbarkeit und Erreichbarkeit des Geländes ab. Auch können ähnliche Aufwuchsstrukturen vollkommen unterschiedliche Erträge bringen. Da die zu beerntenden Flächen durchaus nicht alle durchgängig zu erreichen sind, ist eine Veranschaulichung des Hektarpreises in der weiteren Diskussion nützlich. Die Daten werden aus Werten der Tabellen 6 und 10 errechnet. Bei der Berechnung entspricht nach Hagauer et al. (2009) 1 Tonne_{atro} 7,3 srm.

Tabelle 14: Erntekosten für die einzelnen Bestockungsklassen in Euro pro Tonne und Euro pro Hektar

	Bestockungs- klasse	Biomasse t/ha	Motormanuelle Verfahrenskosten in €/t	Maschinelle Verfahrenskosten in €/t	Motormanuelle Verfahrenskosten in €/ha	Maschinelle Verfahrenskosten in €/ha
1	Einzelstrauch	32	10,71	k. A.	342,72	k. A.
2	Einzelbaum	4 bis 38	10,71	k. A.	224,91 (42,84 bis 406,98)	k. A.
3	Gebüsch/ Gehölzgruppe	78	7,5	1,58	585,00	123,24
4	Strauchhecke	46	10,71	1,58	492,66	72,68
5	Baumhecke	13	10,71	1,58	139,23	20,54
6	Geschl. Baum- reihe	31	k. A.	1,54	k. A.	47,74
7	Feldgehölz	20 bis 159	7,5	1,58	671,25 (150 bis 1192,5)	282,82 (31,6 bis 251,22)

Auch in Tabelle wird klar ersichtlich, dass die maschinellen Erntekosten in €/ha wesentlich günstiger sind als die der motormanuellen. Mittels einer detaillierteren Untersuchung der Flächenstruktur ließe sich berechnen, wie hoch die Kosten für z. B. die Beerntung von Ackerlandstreifen liegen, wenn diese nicht durchgängig zu erreichen sind und mit den Maschinen noch länger Strecken zurückgelegt werden müssten. Dazu ist eine weitere Untersuchung der Flächen- und Bestockungsstruktur nötig.

8. Fazit & Ausblick

Die vorgestellte Methodik stellt eine geeignete Methode dar das Potential an natürlicher holziger Biomasse zu schätzen. Mit Hilfe von fernerkundungsbasierten Verfahren ist die Kartierung der Lage und Ausdehnung von mit Biomasse bestockten Flächen gut möglich. Das Biomassepotential linearer Strukturen lässt sich mit den erprobten Methoden statistisch abgesichert erheben. Um jedoch genauere Aussagen über das Biomassevolumen zu machen sind ergänzende Feldaufnahmen unabdingbar. So können wichtige Parameter wie Höhe, Brusthöhendurchmesser und Struktur in vertikaler Ausdehnung ermittelt werden. Ergänzt mit Angaben aus der Literatur ergibt sich daraus ein schlüssiges Gesamtpotential der gewachsenen Biomasse. Regressionsmöglichkeiten von terrestrischen Geländedaten hin zu Daten aus einer Luft-/Satellitenbilddauswertung müssen vertieft untersucht werden, diese Möglichkeit besteht mit einer zukünftigen Ergänzung der Untersuchung mit RapidEye Satellitendaten.

Ein Überblick über eingesetzte Erntetechnik ergibt, dass das geeignete Verfahren für das Landschaftspflegematerial nicht zur Verfügung steht. Für die hier angegebene Menge der unterschiedlichen Aufwüchse gibt es eine Vielzahl angewandter Erntetechniken, aus denen im Rahmen des Projekts NatBio die vier am meisten genutzten ausgewählt wurden und theoretisch berechnet wurden. Eine Literaturrecherche vervollständigt die Darstellung der Kosten bezogen auf die einzelnen Vegetationsformen. In einem örtlich begrenzten Projekt sind eine konkrete Berechnung der aufkommenden Biomasse im Landkreis und die logistische Betrachtung bei der Verwertung dieser in einem lokalen Biomasseheizkraftwerk praktisch durchführbar. Damit besteht die Möglichkeit, konkrete Zahlen für ein praktisches Fallbeispiel zu bekommen. Dies stellt einen weiteren Arbeitsschritt im Rahmen der bearbeitenden Thematik zur Potentialanalyse von holziger Biomasse und ihrer Beerntbarkeit dar, die zukünftig weiter verfolgt werden wird.

Wie deutlich an den Ergebnissen der Potentialstudie zu sehen ist, besteht mit 464 091 ha ein erhebliches Potential an Fläche in Niedersachsen, die für eine energetische Nutzung zur Verfügung steht. Lediglich 5% dieser Fläche ist bestockt, wäre es nun möglich auf den nicht bestockten Flächen Pflanzen für die energetische Nutzung anzubauen, könnten sowohl enorme Mengen CO₂-Emissionen eingespart werden als auch hohe Zuwächse in der Energiegewinnung aus Biomasse erzielt werden.

Im Bereich der Ernteverfahren ist zu sagen, dass ein Verfahren für die vielen ausdifferenzierten Vegetationsformen nicht zur Verfügung steht. Im Bereich solch diverser Aufwüchse muss überlegt werden, welches Verfahren sich am besten eignet und auch welches überhaupt zur Verfügung steht. Allerdings wird mit den hier dargestellten Kosten ein Überblick geschaffen, der verdeutlicht, welches Verfahren ökonomisch sinnvoll und praktikabel eingesetzt werden kann. Es wird ersichtlich, dass maschinelle Verfahren bei einer ordentlichen Auslastung wesentlich kostengünstiger einzusetzen sind als motormanuelle Verfahren. Bei prognostizierten steigenden Preisen für Holzhackschnitzel könnten sich allerdings auch diese Ernteverfahren als wirtschaftlich erweisen bei der Ernte von Landschaftspflegematerial.

Eine Abschätzung des technischen und ökonomischen Potentials ist im Rahmen des Projekts nicht möglich gewesen. Dafür müsste eine genauere Klassifizierung der Flächen durchgeführt werden, die mit Hilfe der hier verwendeten digitalen Orthophotos nicht erreichbar ist. Diese Abschätzung des technischen Potentials kann dann durchgeführt werden, wenn erkenntlich ist, welche Flächen tatsächlich beerntbar sind. Abhängig ist dies von der Gelände- und Bodenbeschaffenheit und der Hangneigung, die die Befahrbarkeit stark einschränken können, außerdem beeinflussen störende Objekte in Ackerrandstreifen, wie z. B. Steine oder Zäune o. ä. die Befahrbarkeit. An Hand der Orthophotos sind solche Eigenschaften nicht festzustellen.

Eine bessere Abschätzung ist geplant mit Hilfe einer Umfrage unter Praktikern, d.h. in erster Linie Lohnunternehmern, die Landschaftspflegemaßnahmen durchführen. Hier werden der Maschineneinsatz, die Flächen, die innerhalb solcher Maßnahmen beerntet werden und vor allem die Kosten dieser abgefragt. Auch für Lohnunternehmer ist es schwierig, genaue Kosten für einen Maschineneinsatz in einer Maßnahme abzuschätzen auf Grund der verschiedenen Faktoren. Mit dieser Umfrage, die für den Januar 2012 angesetzt ist, sollen durchschnittliche Werte für Kosten, Maschineneinsatz und beerntete Flächen berechnet werden, die die erzielten Zahlen bestätigen und unterstützen sollen.

9. Literaturquellen

- AK Standortkartierung (1985): Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke in der Bundesrepublik Deutschland. Münster-Hiltrup.
- Ammermann, K. (2008): Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe – Auswirkungen auf die Biodiversität und Kulturlandschaft. *Natur und Landschaft* 83, 3: 108-110.
- Appelfelder, J. (2011): Energieholzernte 2010 im NSG Forsthaus Präsa. Konferenz „Energetische Nutzung von Landschaftspflegematerial“. 01.03.2011. Berlin.
- Arbeitsgemeinschaft DLR/IFEU/WI (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Forschungsvorhaben im Auftrag des BMU. Projektbericht Langfassung. Stuttgart, Heidelberg, Wuppertal.
- Augustin, J. (2010): Stadtwerke Schleswig. Vortrag auf der Fachtagung „Bioenergie aus der Landschaftspflege“, 09.02.2010, Berlin.
- Battles, J., Dushoff, G., Fahey, J. (1996): Line intersect sampling of forest canopy gaps. *For Sci* 42: 131-138.
- Böhmer, J. (2010): Organisation von Biomasse aus der Landschaftspflege in regionale Verwertungswege. IfaS (Institut für angewandtes Stoffstrommanagement). Fachtagung vom Deutschen Verband für Landschaftspflege: Bioenergie aus der Landschaftspflege am 09./10.02.2010 in Berlin.
- Buddenberg, J., Kralemann, M. (2002): Welches Potenzial bietet der Energieholzmarkt wirklich? Status und Entwicklungstendenzen in Deutschland am Beispiel Niedersachsen. in Wiemer, K., Kern, M. (2003): Bio- und Restabfallbehandlung VII. Biologisch – mechanisch – thermisch. Neues aus Forschung und Praxis, Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH.
- Burger, F., Scholz, V. (2004): Stand der Technik bei der Ernte von Energiewäldern. *Holz-Zentralblatt* Nr. 46. S.610-611.
- Conrady, D. (2010): Biodiversität und Energieholz. Die Nutzung von Energieholz als Ansatz zur Erhaltung und Entwicklung national bedeutsamer Lebensräume. Naturstiftung David. Die Stiftung des BUND Thüringen. Fachtagung vom Deutschen Verband für Landschaftspflege: Bioenergie aus der Landschaftspflege am 09./10.02.2010 in Berlin.

- Cremer, T., Morhart, C., Oorshot, J. (2006): Mobilisierung holzartiger Biomasse aus der Landschaft – Organisatorische, technische und wirtschaftliche Aspekte von Nutzung und Logistik. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt. Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz. 104 S.
- DLZ Agrarmagazin (Hrsg.) (2009): Hecken und Knicks zu Schnitzeln. DLZ-Agrarmagazin Dez. 2009
- Engel, A., Wegener, J., Exner, T., Hill, A., Fehrmann, L. (2010): Potentialanalyse zur Bereitstellung natürlicher Biomasse (NatBio). Zwischenbericht im Rahmen der Forschungs-kooperation Biomasse für SunFuel. Universität Göttingen.
- Esseen, P.A., Jansson, K.U., Nilsson, M. (2006): Forest edge quantification by line intersect sampling in aerial photographs. *For Ecol Manage* 230: 32-42.
- Fachagentur nachwachsende Rohstoffe (FNR) (2007): Leitfaden Bioenergie.
- Fischbeck, G. (2007): Energie aus Biomasse – Ökonomische und ökologische Bewertung. in: Bayerische Akademie der Wissenschaften (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Ökonomische und ökologische Bewertung. Rundgespräche der Kommission für Ökologie 33: 11-26.
- Gregoire, T. G., Valentine, H. T. (2008): Sampling strategies for natural resources and the environment. Chapman & Hall/CRC Applied environmental statistics 1. Boca Raton. London.
- Hagauer, D., Lang, B., Pasteiner, C., Nemestothy, K. (2009): Empfohlene Umrechnungsfaktoren für Energieholzsortimente bei Holz- bzw. Energiebilanzberechnungen. Klima:aktiv energieholz. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien.
- Hildebrandt, G. (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung. Wichmann Verlag. Heidelberg
- Kaltschmitt, M. (2005): Energetische Biomassenutzung – Status Quo und Perspektiven. in: Brickwede, F., Fuellhaas, U., Stock, V., Wachendörfer, V. & Wahmhoff, W. (Hrsg.): Landnutzung im Wandel – Chancen oder Risiken für den Naturschutz. Erich Schmidt Verlag: 217-235.
- Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A. (2006): Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Springer, Berlin.

- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft) (2006): Landschaftspflege 2005. Daten zur Kalkulation von Arbeitszeit und Maschinenkosten. Darmstadt.
- LfL – Bayerische Landesanstalt f. Landwirtschaft (2005): Hecken, Feldgehölze und Felldraine in der landwirtschaftlichen Flur. Freising-Weihenstephan.
- Mann, S., Runge, K. (2010): GIS-basierte Analyse von holzartigen Biomassepotentialen aus der Landschaftspflege am Beispiel des Unteren Saaletals. Hochschule Anhalt/Institut f. angewandtes Stoffstrommanagement. Paper zu Vortrag auf d. Fachtagung „Bioenergie aus der Landschaftspflege“, 09.02.2010, Berlin
- Marshall, P.L., Davis, G., LeMay, V.M. (2000): Using line intersect sampling for coarse woody debris. Technical report TR-003. Research Section, Vancouver Forest Region, British Columbia Ministry of Forests.
- Mees, - (2011): Telefonat vom 12.04.2011. Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr. Regionaler Geschäftsbereich Gandersheim. Zuständig für Erntemaßnahmen.
- Meyer, R. (2011): Telefonat vom 21. April 2011. Lohnunternehmen Stühmer GmbH. Zuständiger für die Abholzarbeiten an der A7.
- Muchin, A., Bilke, G., Böge, R. (2007): Energiepotential der Wälder in Brandenburg – Das theoretisch nutzbare Potential. Landesforstanstalt Eberswalde, Selbstverlag: 32 S. + Anhang.
- Naturstiftung David (2009): Brennpunkt Kulturlandschaft – Biodiversität und Energieholz. Erfurt.
- Naturstiftung David (2009): Energieholz und Biodiversität – Die Nutzung von Energieholz als Ansatz zur Erhaltung und Entwicklung national bedeutsamer Lebensräume. Projektantrag, Erfurt.
- Naturstiftung David (2010): Energieholz und Biodiversität – Die Nutzung von Energieholz als Ansatz zur Erhaltung und Entwicklung national bedeutsamer Lebensräume. Zwischenbericht, Erfurt.
- Nitsch, J. (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Forschungsvorhaben im Auftrag des BMU. Köllen Druck.

- Oechsner, H. (2005): Möglichkeiten zur energetischen Nutzung von Landschaftspflegeheu. *Natur und Landschaft* 80, 9/10: 403-412.
- Oehmichen, K. (2007): Erfassung der Totholzmasse – Zusammenstellung von Verfahrensansätzen und Bewertung ihrer Eignung für massenstatistische Erhebungen. Arbeitsbericht des Instituts für Waldökologie und Waldinventuren 2007/1. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Instituts für Waldökologie und Waldinventuren, Eberswalde.
- Pellinen, P. (1986): Biomasseuntersuchungen im Kalkbuchenwald. Dissertation, Göttingen 1986.
- Ramezani, H., Holm, S. (2011): Sample based estimation of landscape metrics; accuracy of line intersect sampling for estimating edge density and Shannon's diversity index. *Environ Ecol Stat* 2011, 18: 109-130.
- Scheffer, K., (2008): Vom Bioenergiedorf zur autonomen Solarenergie-Region. *Solarzeitalter* 4/2008, S. 23-30.
- Schrödl, G. (1985): Inventur und Bewirtschaftung von Flurgehölzen. *Sozialist. Forstwirtschaft* 35 (1985) 2
- Spahl, H., Bönecke, L. (1990): Hecken und Feldgehölze. in: *Mitteilungen der Forstl. Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg*. Freiburg.
- Textor, B. (2008): Logistikkette Energieholz: Pflanzung, Ernte, Transport, Lagerung. *Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg*.
- Thoss, C. (2011): Bioenergie und Landschaftspflege. Standpunkte des DLV. Konferenz „Energetische Nutzung von Landschaftspflegematerial“. 01.03.2011. Berlin.
- Tonn, B., Thumm, U., Claupein, W. (2006): Bioenergiepotentiale von Landschaftspflegeholz. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* 18: 230-231.
- Weiß, D., Vögtlin, J., Wippel, B., (2010): Energetische Nutzung von Sukzessionsgehölzen im Mittelgebirge. ARGE-Landnutzung. Fachtagung vom Deutschen Verband für Landschaftspflege: Bioenergie aus der Landschaftspflege am 09./10.02.2010 in Berlin.
- Weller, N. (2010): Dt. Biomasseforschungszentrum GmbH (Vortrag auf der Fachtagung „Bioenergie aus der Landschaftspflege“, 09.02.2010, Berlin)

- Wenzelides, M., Hagmann, H., Vorpal, A. (2008): Energetische Nutzung von Holz aus der Landschaftspflege. AFZ 2/2008: 82-85.
- Widmann, B. (2007): Biomasse für die Erzeugung von Wärme, Kraftstoffen und Strom – in: Bayerische Akademie der Wissenschaften (Hrsg.): Energie aus Biomasse: Ökonomische und ökologische Bewertung. Rundgespräche der Kommission für Ökologie 33: 27-38
- Wiegmann, K., Heintzmann, A., Peters, W., Scheuermann, A., Seidenberger, T., Thoss C. (2007): Bioenergie und Naturschutz: Sind Synergien durch die Energienutzung von Landschaftspflegeresten möglich? Endbericht an das BMU. Öko-Inst. Darmstadt.
- Wiehe, J. (2003): Die energetische Nutzung von Holz aus der Landschaftspflege. Wallhecken als Wärmequelle für den Landkreis Grafschaft Bentheim. Diplomarbeit am Institut f. Landesplanung und Raumforschung und am Institut f. Landschaftspflege und Naturschutz, Universität Hannover.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, WBGU (Hrsg.), (2009): Welt im Wandel: Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung. WBGU, Berlin.
- Wolf, - (2011): Telefonat vom 14.04.2011. Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr. Regionaler Geschäftsbereich Gandersheim. Zuständig für Begrünungsmaßnahmen.
- Woomer, P.L., Tieszen, L.L., Tappan, G., Touré, A., Sall, M. (2004): Land use change and terrestrial carbon stocks in Senegal. Journal of Arid Environments 59: 625-642.

10. Internetquellen

<http://www.uni-goettingen.de/de/10232.html>, abgerufen am 11.04.2011.

<http://www.agriserve.de/Pflanzenheizungen-Allgemeines.html>, abgerufen am 05.09.2011.

<http://www.carmen-ev.de/dt/energie/bezugsquellen/hackschnippreise.html>, abgerufen am 05.09.2011.

11. Anhang

Die Darstellung weiterer Biomassepotentiale und verschiedene Konvertierungen von Pflanzenvolumen zu Biomasse sind in folgender Tabelle 8 zu finden.

Tabelle 15: Potentiale und Konvertierungen Pflanzenvolumen zu Biomasse

Art d. Biomasse	Potential	Quelle
Konvertierung Pflanzenvolumen → Biomasse für Strauchvegetation im südl. Senegal	0,38 kg Biomasse /m ³ Strauchvolumen	Woomer et al. (2004)
Holz aus der Landschaftspflege f. Niedersachsen	610.000 t/a – 1.22 Mio. t/a	Buddenberg & Kralemann (2002)
Holz aus der Landschaftspflege f. Gesamt-Deutschland	4,6 Mio. t/a – 9.22 Mio. t/a	
Holz aus der Landschaftspflege f. Gesamt-Deutschland	ca. 1 Mio. Sm ³	Wiehe, J. (2003)
Potentielle Fläche f. den Biomasseanbau in D	<u>Fläche (Mio. ha) Energieertrag/a</u>	Nitsch, J. (2004)
2010	1,97-2,5 694 PJ	
2020	3,4-3,45 944 PJ	
2030	4,3-4,44 1193 PJ	
2040	5,2 1443 PJ	
2050	4,2-6,1 1693 PJ	
Technisches Biomassepotential	<u>Potenzial als Festbrennstoff:</u>	Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A. (2006)
- halmgutartige Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle	53,58 kWh/a (193 PJ/a)	
- holzartige Rückstände	156,5 kWh/a (563 PJ/a)	
- sonstige Rückstände (organ. Abfälle etc.)	nicht relevant	
- Energiepflanzen	28,1 kWh/a (101 PJ/a)	
Biomasse aus der Landschaftspflege	Gesamtpotential 3 – 4 Mio. ha, 2,7 ha lt. Schätzungen des DLV nutzbares Potential ca. 900.000 ha	Thoss, C. (2011)

In den Tabellen 9 und 10 sind das Accuracy Reporte etc. der Auswertung mit Erdas Imagine (siehe Kapitel 6.4) und eine detaillierte Abbildung mit den Klassifikationsergebnissen der überwachten Klassifizierung abgebildet:

Tabelle 16: Classification Accuracy Report

CLASSIFICATION ACCURACY ASSESSMENT REPORT				

Image File : z:/natbio/auswertung rapideye/klass-versuche/test1.img				
User Name : A.Hill				
Date : Tue Jan 18 15:27:46 2011				
ERROR MATRIX				

		Reference Data		

Classified Data	Unclassified	1	2	3
-----	-----	-----	-----	-----
Unclassified	0	0	0	0
1	0	109	1	0
2	0	0	92	0
3	0	1	1	2
	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	6	3	1
Column Total	0	116	97	3
		Reference Data		

Classified Data		5	6	Row Total
-----	-----	-----	-----	-----
Unclassified	0	0	0	0
Brache 1	0	0	3	113
Bewirtsch. 2	0	0	12	104
Urbane Fl. 3	0	0	0	4
	0	0	0	0
Wasser 5	0	3	0	3
Holzige B. 6	0	0	66	76
Column Total	0	3	81	300
----- End of Error Matrix -----				

Tabelle 17: Accuracy Total Report

ACCURACY TOTALS						

Class Name	Reference Totals	Classified Totals	Classified Correct	Accuracy	Number Producers Accuracy	Users

Unclassified	0	0	0	---	---	
Brache 1	116	113	109	93.97%	96.46%	
Bewirtsch. 2	97	104	92	94.85%	88.46%	
Urbane Fl. 3	3	4	2	66.67%	50.00%	
	0	0	0	---	---	
Wasser 5	3	3	3	100.00%	100.00%	
Holzige B. 6	81	76	66	81.48%	86.84%	
Totals	300	300	272			
Overall Classification Accuracy = 90.67%						
----- End of Accuracy Totals -----						

Tabelle 18: Kappa Statistics Report

KAPPA (K [^]) STATISTICS	

Overall Kappa Statistics = 0.8614	
Conditional Kappa for each Category.	

Class Name	Kappa

Unclassified	0.0000
1	0.9423
2	0.8295
3	0.4949
0.0000	
5	1.0000
6	0.8198
----- End of Kappa Statistics -----	

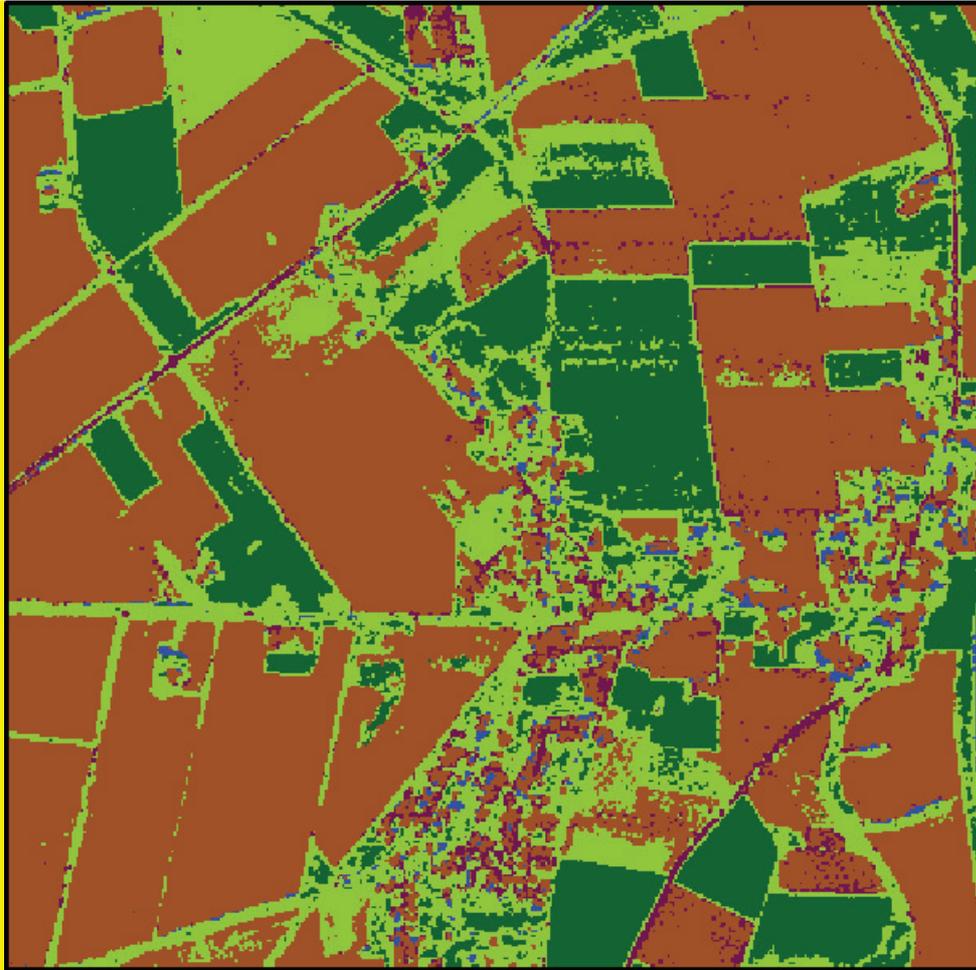


Abbildung 15: Klassifikationsergebnisse der überwachten Klassifizierung