Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz	Heft 18 (2019)	S. 31–51	3 Fig., 7 Tab.	urn:nbn:de:0041-afsv-01828

Scopus Indexed Journal

Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz – *Forest Ecology, Landscape Research and Nature Conservation*

www.afsv.de/index.php/waldoekologie-landschaftsforschung-und-naturschutz

Qualitätsprüfung der Karte aktueller naturnaher Ökosystemtypen Deutschlands und ihr Upscaling am Beispiel des Nationalparks Kellerwald-Edersee

Quality assessment of the map of current near natural ecosystem types in Germany and their upscaling using the example of the Kellerwald-Edersee National Park

Stefan Nickel, Winfried Schröder & Barbara Völksen

Abstract

This study aims to examine the map of current near natural ecosystem types (ANOEST) in Germany (1 : 500,000; Jenssen et al. 2013, Schröder et al. 2015) and, respectively, the ANOEST map for the Kellerwald National Park (1 : 5,000) with regard to their data quality and reusability.

In accordance with DIN EN ISO 19113 and DDGI 2007, the positional accuracy (absolute positional accuracy) and thematic accuracy (classification correctness) were quantitatively determined. For this purpose, a comparison was made with geometrical data of well-known positional accuracy such as ATKIS-DLM (Hesse) as well as with maps of biotopes and habitat types (Hesse), vegetation samplings from the Kellerwald National Park (permanent random sample inspection, own survey) and German-wide vegetation samplings from the W.I.E. database (since 1990).

The map of ANOEST Germany has an absolute positional accuracy of ± 42.29 m (≈ ± 42 m). It has been classified correctly to approx. 30 %. A further approx. 35 % are ecologically similar to the existing forest ecosystem types (together 65 %). In a further approx. 15 %, the ecosystem types were correctly classified, but only appeared as non-dominant ecosystem types. Approximately 15 % occurred only as an ecologically similar ANOEST (together 30 %). 5 % of the spatial objects were mapped incorrectly. In the Kellerwald National Park (1 : 25,000) about 22 % of the ANOEST were classified correctly. Misclassifications on both scales were often due to wrong assignments to the altitude level (e.g., Eb-5n-C2 instead of D1-5n-C2) and, respectively, to the humus species (e.g., Eb-5n-D1 instead of Eb-5n-D1a).

The main reason for misclassifications must be seen in high thematic differentiation of the ecosystem classification according to Jenssen et al. (2013). Data on biotopes and habitat-types are more appropriate for a falsification than for a verification of ANOEST. However, the spatial information is valuable for comparisons with regard to the occurrence of ANOEST as the main or accompanying ecosystem type. The correctness of the classification can best be verified by vegetation samplings, but only at the site level. Vegetation samplings can also be used to increase the quality of the ANOEST, especially at the regional level (1 : 5,000 to 1 : 25,000). On this spatial scale, it is recommended, to use preferably the key for identifying forest ecosystems in Germany (Schröder et al. 2018, Bd. 3).

Keywords: *Ecosystem types; GIS mapping; Quality control*

Zusammenfassung

Ziel der Untersuchungen zur Regionalisierung der Ökosystemtypen war es, die Qualität und Nachnutzungsmöglichkeiten der Karte der aktuellen naturnahen Ökosystemtypen (ANOEST) Deutschlands im Maßstab 1 : 500.000 (Jenssen et al. 2013, Schröder et al. 2015) sowie die für die regionale Ebene erstellte Karte der ANOEST für den Nationalpark Kellerwald-Edersee im Maßstab 1 : 5.000 (Jenssen et al. 2013) zu überprüfen.

In Anlehnung an die DIN EN ISO 19113 und DDGI (2007) wurden die geometrische Genauigkeit (absolute Positionsgenauigkeit) und thematische Genauigkeit (Richtigkeit der Klassifikation) als quantitative Qualitätsmerkmale ermittelt. Hierzu erfolgte ein Vergleich mit Geometriedaten bekannter Lagegenauigkeit des ATKIS-DLM (Hessen), naturschutzfachlichen Kartierungen von Biotop- und Lebensraumtypen (Hessen), aktuellen Vegetationsaufnahmen aus dem Nationalpark Kellerwald (Permanente Stichprobeninventur - PSI (Meyer 2012), eigene Erhebungen) sowie bundesweit vorliegenden Vegetationsaufnahmen nach 1990 aus der Datenbank des Waldkunde-Instituts Eberswalde.

Die Karte der ANOEST Deutschlands hat eine absolute Positionsgenauigkeit von ± 42,29 m (≈ ± 42 m) und wurde zu ca. 30 % richtig klassifiziert. Weitere ca. 35 % sind den tatsächlich vorhandenen Waldökosystemen ökologisch nahstehend (zusammen 65 %). Bei weiteren ca. 15 % wurden die Ökosystemtypen zwar richtig klassifiziert, kommen aber nur als Begleitökosystemtyp, d. h. im Flächenobjekt nicht dominanter Ökosystemtyp vor. Etwa 15 % traten nur als ökologisch nahstehender Begleitökosystemtyp auf (zusammen 30 %). 5 % der Flächenobjekte waren gänzlich falsch kartiert. Die Karte der ANOEST im Nationalpark Kellerwald (Maßstab 1 : 5.000) wurde zu ca. 22 % richtig klassifiziert. Häufige Fehlklassifikationen auf beiden Maßstabsebenen betrafen die Zuordnungen zur Höhenstufe (z. B. Eb-5n-C2 statt D1-5n-C2) und stellenweise auch zum Stoffhaushaltstyp (z. B. Eb-5n-D1 statt Eb-5n-D1a).

Der Hauptgrund für Fehlbestimmungen ist in der hohen thematischen Auflösung der Ökosystemtypisierung nach Jenssen et al. (2013) zu sehen. Die Biotop- und Lebensraumtypenkartierungen sind aufgrund ihrer i. d. R. geringeren thematischen Differenzierung eher geeignet, die Ansprache der ANOEST zu widerlegen, als diese zu verifizieren. Ihr räumlicher Informationsgehalt ist aber für Vergleiche im Hinblick auf das Vorkommen als Haupt- oder Begleitökosystemtyp wertvoll. Die Richtigkeit der Klassifikation kann am ehesten durch repräsentative Vegetationsaufnahmen überprüft werden, allerdings nur punktuell. Festgestellte Abweichungen konnten anschließend genutzt werden, um die Qualität der ANOEST-Kartierung insbesondere auf der regionalen Ebene (1 : 5.000 bis 1 : 25.000) zu erhöhen. Grundsätzlich ist für Kartierungen im regionalen Maßstab die Anwendung des Bestimmungsschlüssels für Wald- und Forstökosystemtypen (Schröder et al. 2018, Bd. 3) empfehlenswert.

Schlüsselwörter: Geoinformationssysteme, Ökosystemtypen, Qualitätskontrolle

1 Hintergrund und Ziel

Jenssen et al. (2013, 2015), Nickel et al. (2015) und Schröder et al. (2015) entwickelten eine Methodik zur integrativen Ermittlung und Einstufung von Veränderungen der Ökosystemintegrität unter Berücksichtigung der Wirkungen des Klimawandels in Kombination mit Stoffeinträgen. Als Merkmale der Ökosystemintegrität gelten Selbstorganisationsfähigkeit, Funktionalität und Übereinstimmung abiotischer und biotischer Eigenschaften mit dem natürlichen Standortpotenzial (Identität). Die Methodik basiert auf einer umfangreichen vegetationskundlichen Datenbank, bundesweit verfügbaren Daten aus Kartengrundlagen und Langzeit-Monitoringprogrammen. Sie wird durch dynamische Modellierungen zukünftiger Klima- und Bodenverhältnisse ergänzt. Der Zustand von Ökosystemen wird dabei anhand der Kriterien Funktionalität, naturraumtypische Ausprägung chemischer und biologischer Kriterien sowie Stresstoleranz gegenüber anthropogenen Stickstoffeinträgen und Veränderungen des Klimas bewertet. Die Methodik ermöglicht die Bestimmung und Kartierung potenziell natürlicher Ökosystemtypen und aktuell naturnaher Ökosystemtypen. Für bestimmte Klimaszenarien und atmosphärische Stickstoffeinträge (2011 – 2070) können zukünftig plausible Ökosystementwicklungen projiziert und bewertet werden. Das Konzept stellt eine Ergänzung bereits existierender Bewertungsverfahren für Ökosystemzustände dar, indem es abiotische Umweltfaktoren und ihre Veränderungen als Treiber biologischer Veränderungen und Ökosystemfunktionen stärker einbezieht. Gleichzeitig soll es dazu dienen, die Ursachen von Störungen möglichst früh zu erkennen und geeignete Maßnahmen zum Erhalt und zur Entwicklung eines guten Ökosystemzustands abzuleiten.

Grundlegender Bestandteil der Methodik ist die Typisierung naturnaher Ökosysteme Deutschlands. Ihre Konkordanz zu anderen Ökosystemklassifizierungen, für die bisher keine bundesweit durchgeführte räumliche Konkretisierung vorliegt (EUNIS, Rieken et al. 2006; Lebensraumtypen (LRT) nach Anhang I der FFH-Richtlinie), wurde erreicht. Damit ist die entwickelte Ökosystemtypisierung anschlussfähig, und die mit ihr verknüpften Systematisierungen gewinnen an ökologisch fundierter Interpretierbarkeit und räumlicher Differenzierung. Für 61 ausgewählte Ökosystemtypen erfolgte die Quantifizierung eines historischen Referenzzustandes basierend auf Daten aus dem Zeitraum 1961 – 1990 (Jenssen et al. 2013, 2015; Schröder et al. 2015; Schröder et al. 2018). Als Referenzzustand wurde ein typenspezifischer Zustand von Ökosystemen definiert, dessen Merkmalsausprägungen durch Intervalle von historischen Zustandsvariablen (1961 – 1990) gekennzeichnet sind, die weniger durch Stoffeinträge und Klimawandel verändert sind als diejenigen nachfolgender Zeiten.

Für ausgewählte Ökosystemfunktionen (Lebensraumfunktion, Netto-Primärfunktion, Kohlenstoffspeicherung, Nährstoffffluss, Wasserfluss und Anpassungsfähigkeit) wurden Indikatoren gewählt, mit denen aktuelle und modellierte zukünftige Zustände von Ökosystemen mit dem jeweiligen ökosystemtypenspezifischen Referenzzustand verglichen werden können. Die Indikation erfolgte quantitativ mit Daten aus Monitoringprogrammen und aus der Datenbank des W. I. E., wobei Auswirkungen von Veränderungen der abiotischen systemischen Entwicklungsgrundlagen im Mittelpunkt standen.

Die für 40 Wald- und 21 Forstökosystemtypen quantifizierten Referenzzustände beziehen sich auf den Zeitraum bis 1990, schwerpunktmäßig ab 1960, in Einzelfällen jedoch auf Daten, die bis in die zwanziger und dreißiger Jahre des vergangenen Jahrhunderts zurückreichen. Für jeden Ökosystemtyp ist sein Referenzzustand gekennzeichnet durch ein Datenblatt mit folgenden Angaben:

1. Ökosystemcode: 1. Stelle = Klimaökologische Koordinate, 2. Stelle = Wasserhaushaltstyp, 3. Stelle = Stoffkreislauftyp, Beschreibung s. Bestimmungsschlüssel (Schröder et al. 2018, Bd.3),
2. Ökosystembezeichnung,
3. EUNIS-Klasse,
4. Biotoptyp BfN (Riecken et al. 2006),
5. Vegetationstyp nach verbreiteten pflanzensoziologischen Klassifizierungen,
6. Foto,
7. Lebensraumtyp nach der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-RL) (Ssymank et al. 1998),
8. Stellung im zweidimensionalen Ökogramm mit den Koordinaten Bodenfeuchte und Basensättigung,

9. Standortsfaktoren: Bodenform, Bodentyp, Geländeform, Makroklima,

10. Lebensraumfunktion: Kennzeichnende Artenverbindung mit Stetigkeit und mittlerer Mengenentfaltung der Bodenbedeckung, maximale Kullback-Distanz der Einzelaufnahmen zur mittleren Artenmengenverteilung, minimale Ähnlichkeit der Einzelaufnahmen mit der mittleren Artenmengenverteilung,

11. Netto-Primärproduktion: oberirdische durchschnittlich jährliche NPP zum Zeitpunkt der Kulmination an Baumholz, Blatt-/Nadelmasse, Bodenvegetation und Gesamtmasse, Bestandesoberhöhe im Alter 100 als Vergleichskennwert,

12. Kohlenstoffspeicherung: Kohlenstoffvorrat im Humus (C_{org} in Humusauflage und im Boden bis 80 cm Tiefe),

13. Nährstofffluss: pH-Wert in 1/10 KCl, Basensättigung V in % und C/N-Verhältnis in den obersten 5 cm vom H- bis Ah-Horizont (Intervall aus Mittelwert und Standardabweichung), Humusform, Ernährungskennwerte N%, P%, K%, Ca%, Mg% im Assimilationsapparat der Bäume in g/100g der Blatt-/Nadel-Trockenmasse (Zeitpunkt August, Intervall aus Mittelwert und Standardabweichung),

14. Wasserfluss: Feuchtekennzahl (Intervall aus Mittelwert und Standardabweichung) sowie

15. Anpassung an veränderliche Umweltbedingungen: maximale Mengenanteile der natürlichen Standortsbaumarten in selbstorganisierten Entwicklungsstadien.

Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, die Qualität der für die Fläche Deutschlands vorliegenden Karte der aktuellen naturnahen Ökosystemtypen Deutschlands (ANOEST) im Maßstab 1 : 500.000 (Jenssen et al. 2013; Schröder et al. 2015) zu prüfen (Abschnitt 2), um so eine Bewertung der Datenqualität für die Nachnutzung nach ihrem Upscaling am Beispiel des Nationalparks Kellerwald zu ermöglichen (Abschnitt 3). Die Qualität wurde definiert durch die kartografische Positionsgenauigkeit sowie die thematische Genauigkeit, ermittelt durch eine kartografisch-statistische Prüfung der Klassifikation und ihre empirische Validierung mit nicht zur Klassifikation benutzten Daten.

2 Methodik und Ergebnisse der Qualitätsprüfung

2.1 Operationale Definition

Die zuvor genannte Qualitätsdefinition wurde wie folgt operationalisiert: Es wurde eine Auswahl qualitätsbezogener Metadaten getroffen, welche quellenspezifische Merkmale von Daten bezüglich ihrer Qualität beschreiben. Diese lehnt sich an gebräuchliche Normen für die Beschreibung der Qualität von Geoinformationen: DIN EN ISO 19113 (ISO 2005) bzw. das hierauf aufbauende Qualitätsmodell des Deutschen Dachverbandes für Geoinformation e. V. (DDGI 2007) an. Unter einem Qualitätsmodell wird hiernach ein allgemeines und personenunabhängiges Bewertungs- und Beschreibungssystem für raumbezogene Daten und deren Folgeprodukte verstanden. Das Qualitätsmodell des DDGI unterscheidet zwischen quantitativen und nicht-quantitativen Qualitätsinformationen. Nicht-quantitative Metadaten beziehen sich insbesondere auf die Inhalte des Datensatzes, den Hersteller und die ursprüngliche Verwendung, auf Herkunft und Datenquellen sowie Produktmerkmale (Maßstab, Produktaktualität, Datentyp u. ä.). Quantitative Qualitätsmerkmale und die ihnen zugeordneten Subelemente können einen Geodatensatz nach messbaren Einheiten kennzeichnen. Diese Qualitätsmerkmale können sich auf verschiedene Ebenen eines Datenbestandes beziehen, also auf den Datenbestand als Ganzes (Klasse), auf eine Untermenge oder auf einzelne Teile des Datenbestandes, wie Subtypen, Objekte oder Attribute (DDGI 2007).

Die Qualitätskontrolle des ANOEST-Datensatzes fußt auf folgenden Qualitätsmerkmalen (DDGI 2007):

1. Thematische Genauigkeit (Subelement: Richtigkeit der Klassifikation, d. h. Richtigkeit der Klassifizierung der Objekte und ihrer Beziehungen),

2. Positionsgenauigkeit (Subelement: absolute Positionsgenauigkeit als Maß der Übereinstimmung zwischen dem Ergebnis der Positionsbestimmung und dem wahren oder als wahr akzeptierten Wert der Position eines Objekts).

Eine Übersicht der verwendeten Methoden zur Ermittlung dieser Qualitätsmerkmale zeigt Tabelle 1.

Nachfolgend werden die Methoden und Ergebnisse einschließlich möglicher Ursachen für festgestellte Mängel

Tab. 1: Quantitative Qualitätsmerkmale (nach DIN EN ISO 19113, DDGI 2007) und verwendete Methoden.

Tab. 1: *Quality characteristics (according to DIN EN ISO 19113, DDGI 2007) and methods used.*

Qualitäts-merkmale	Teilkriterien (Subelemente)	Methode	Einheit
Positions-genauigkeit	Absolute Positionsgenauigkeit	Messung der Distanzen zu ATKIS-Grenzen (Hessen) unter Einbeziehung der Fehlerfortpflanzung	+/- m
Thematische Genauigkeit	Richtigkeit der Klassifikation	Vergleich mit empirischen flächendifferenzierten Kartierdaten des Bundeslandes Hessen	0 – 100 %
		Vergleich mit aus „punktuellen“ Vegetationsaufnahmen (W. I. E.) abgeleiteten Ökosystemtypen	0 – 100 %

Tab. 2: Quantitative Qualitätsmerkmale der Karte der ANOEST Deutschlands 1 : 500.000.

Tab. 2: *Quantitative quality characteristics of the map of ANOEST Germany 1 : 500,000.*

Qualitätsmerkmal*	ISO-Feld**	Merkmalsausprägung
Positionsgenauigkeit		
Absolute (äußere) Positionsgenauigkeit	117	+/- 42 m
Thematische Genauigkeit		
Richtigkeit der Klassifikation	125	65 % (mit 30 % der Fälle, bei denen der angegebene ANOEST in dem jeweiligen Flächenobjekt als Leitökosystemtyp vorkommt bzw. 35 % der Fälle, bei denen ein ähnlicher, ökologisch nahestehender ANOEST in dem jeweiligen Flächenobjekt als Leitökosystemtyp vorkommt)
Vollständigkeit		
Datenmangel	110	0 %
Logische Konsistenz		
Wertekonsistenz	113	100 %
Thematische Konsistenz		100 %
Zeitliche Genauigkeit		
Zeitliche Gültigkeit	123	1991 – 2010
* DDGI 2007; ** DIN EN ISO 19113		

(Geometrie, Thematik) erläutert. Die Ergebnisse der Qualitätskontrolle der Karte der aktuellen naturnahen terrestrischen Ökosysteme Deutschlands (ANOEST, 1 : 500.000) sind zusammenfassend in Tabelle 2 in Anlehnung an die Standards des DDGI-Qualitätsmodells (DDGI 2007) dokumentiert.

2.2 Positionsgenauigkeit

2.2.1 Methode

Die Schätzung der absoluten Positionsgenauigkeit der ANOEST-Flächengeometrien, d. h. ihrer Nähe zum wahren Positionswert erfolgte durch Vergleich mit Daten bekannter Lagegenauigkeit. Als Referenzdatensatz wurde das Digitale Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM) des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems Hessen (ATKIS Hessen) mit einer geometrischen Genauigkeit von ± 3 m (HVBG 2014) herangezogen. Alle Laub-, Misch- und Nadelwälder des ATKIS-DLM wurden zu einer Landnutzungsklasse „Wald“ zusammengefasst und mit den Flächenobjekten der ANOEST (Wald- und Forstökosystemtypen) räumlich überlagert. Zwischen insgesamt 400 augenscheinlich identischen Entitäten wurden die Distanzen zwischen den jeweiligen Repräsentanten an ausgewählten Stützpunkten der Objektgrenzen gemessen. Hierzu wurden 200 Fälle ausgewählt, bei denen die Punktobjekte des Referenzdatensatzes (ATKIS) innerhalb der ANOEST-Flächen liegen bzw. 200 Fälle, wo diese außerhalb liegen. Fälle größer der dreifachen Standardabweichung wurden als Ausreißer eliminiert. Die Verteilungseigenschaften wurden grafisch als Histogramm und Quantile-Quantile-Plots (QQ-Plots) dargestellt sowie mit dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung überprüft. Darauf basierend wurde zunächst die relative Positionsgenauigkeit als Standardabweichung der Messwerte ermittelt (Gleichung 1).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} a^2 + b^2 + c^2 + x_n^2} \qquad \text{(Gleichung 1)}$$

In einem zweiten Schritt wurde unter Einbeziehung der bekannten Lagegenauigkeit des Referenzdatensatzes die absolute Positionsgenauigkeit in Anlehnung an das allgemeine Fehlerfortpflanzungsgesetz (Gleichung 2) bestimmt.

$$S = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma^2} \qquad \text{(Gleichung 2)}$$

2.2.2 Ergebnis

Die Stichprobengröße beträgt nach Eliminierung der Ausreißer N = 395. Der Shapiro-Wilk-Test zeigt auf einem Signifikanzniveau von α = 0,05 keine Anzeichen für eine Normalverteilung. Abbildung 1 zeigt zumindest aber eine gute Annäherung an die Normalverteilung.

Die Standardabweichung der Distanzmessungen berechnet sich zu ± 42,19 m (= relative Positionsgenauigkeit der ANOEST-Geometrien in Relation zu ATKIS). Addiert man die bekannte Lageungenauigkeit der ATKIS-Geometrien nach Gleichung 2 hinzu, ergibt sich eine absolute Positionsgenauigkeit der ANOEST von ± 42,29 m (≈ ± 42 m).

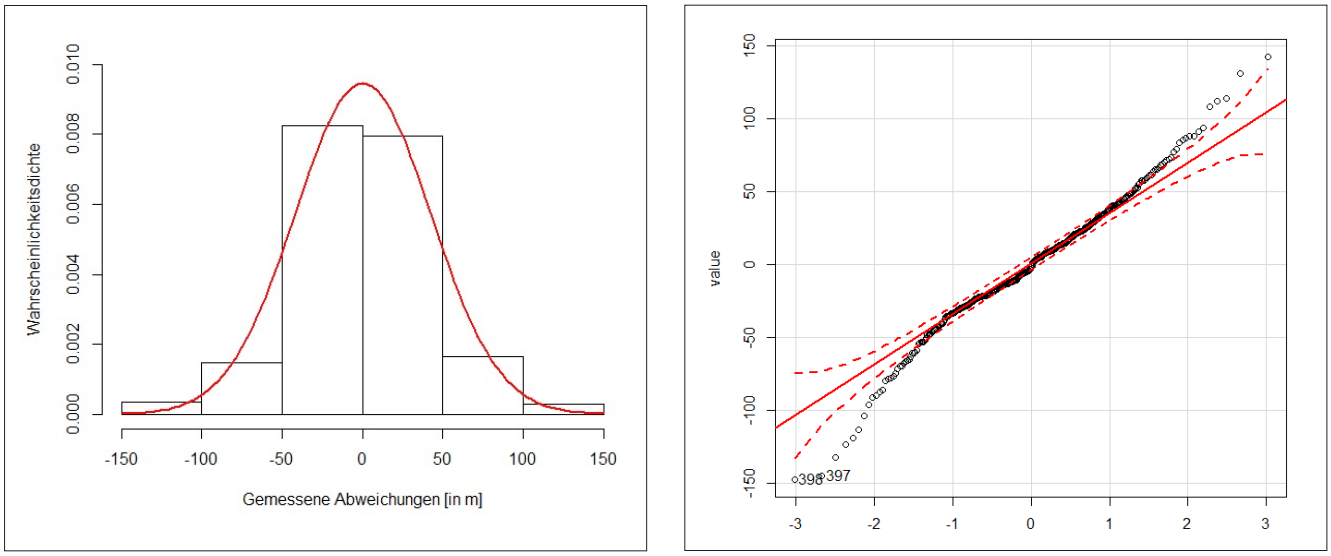

Abb. 1: Histogramm und QQ-Plot zu den gemessenen Abweichungen zwischen ATKIS-DLM und ANOEST-Geometrien (n = 395).

Fig. 1: Histogram and QQ plot of the measured deviations between ATKIS-DLM and ANOEST geometries (n = 395).

2.2.3 Diskussion

Die Ursachen der Positionsungenauigkeiten liegen insbesondere in den maßstabsbedingten Ungenauigkeiten der Eingangsdaten, namentlich der Karte der Potenziellen Natürlichen Vegetation PNV (BfN 2010) sowie den aus der Corine Landcover 2006 (CLC 2006) abgeleiteten Nutzungseinheiten. Einschränkend ist zu sagen, dass die Angaben zur Positionsgenauigkeit nur etwas zur Genauigkeit der Wald/Nicht-Wald-Grenze aussagen.

2.3 Thematische Genauigkeit

2.3.1 Methode zur Bestimmung von Ökosystemtypen an Vegetationsaufnahmeflächen

Die Bestimmung eines Ökosystemtyps erfolgt idealerweise und mit größter Sicherheit nach dem Bestimmungsschlüssel für Kartierungen vor Ort (Schröder et al. 2018, Bd. 3). Ist eine solche Bestimmung nicht möglich, kann eine Zuordnung auch durch computergestützten Vergleich einer Vegetationsaufnahme der Untersuchungsfläche mit den bei Schröder et al. (2018, Bd.2: Anhang M2) sowie Jenssen et al. (2019) dokumentierten Referenzzuständen erfolgen. Dies geschieht durch Anwendung eines Computerprogramms oder durch eine Tabellenkalkulation, mit deren Hilfe der Abstand der Vegetationszusammensetzung der Fläche mit der mittleren Mengenentfaltung der durch Schröder et al. (2018, Bd. 2: Anhang M2) ausgewiesenen Ökosystemtypen (mögliche Referenzzustände) berechnet wird. Berechnet wird dabei als Abstandsmaß die Kullback-Information gemäß Gleichung 3 (Kullback 1959, Jenssen 2010, Schröder et al. 2018: Kapitel 7):

$$K\left(p_1,..,p_S,{p_1}^O,..,{p_S}^O\right)=\sum_{i=1}^{S} p_i \ln\left(\frac{p_i}{p_i^O}\right) \qquad \text{(Gleichung 3)}$$

Die p_i bezeichnen die prozentuale Mengenentfaltung der auf der Fläche vorkommenden (mit i indizierten) Arten, die p_i^O bezeichnen den aus der Gesamtheit der zum jeweiligen Ökosystemtyp vorliegenden Vegetationsaufnahmen abgeleiteten Referenzzustand der Vegetation. Die über sämtliche Arten summierten Deckungswerte werden dabei gemäß Gleichung 4 auf 1 normiert, d. h.

$$\sum_{i=1}^{S} p_i = 1 \qquad \text{(Gleichung 4)}$$

Es erfolgt eine Zuordnung zu dem Typ, zu dem der geringste Kullbackabstand vorhanden ist. Folgender Algorithmus wird dabei angewandt:

1. Händische Auswahl möglicher Ökosystemtypen (Referenzzustände) z. B. über Hauptbaumart, Humusform, geografische Zuordnung. Für jeden möglichen Referenztyp werden die folgenden Schritte durchgeführt:

2. Übernahme der Daten zum Referenztyp aus den Vegetationsgesamttabellen bei Jenssen et al. (2019; „Ökocode_Vegetationsgesamttabelle.xls“). Reduktion des Tabellenblattes auf Aufnahmen vor 1991 durch Filterung in Zeile „Datum“ (Anzahl der Aufnahmen / Spalten= *k*).

3. Erstellen eines Referenzvektors $(p_1^O, \ldots, p_R^O)$, der für jede mit *i* indizierte Art der Vegetationsaufnahme ($i=1, \ldots, R$) die mittlere Artenmenge p_i enthält. Die mittlere Artenmenge ist definiert als die Summe aller in der Tabelle vorkommenden Deckungswerte einer Art in %, dividiert durch die Anzahl *k* der Vegetationsaufnahmen in der Tabelle (Hofmann 2002, S. 203). Die Deckungswerte „+“ und „r“ werden gleich 0,1 bzw. 0,01 gesetzt. Nicht besetzte Zellen werden gleich „0“ gesetzt. Die Deckungswerte einer Art über verschiedene Schichten werden aufsummiert. Die mittlere Artenmenge p_i^O einer Art erhält man in einer Tabellenkalkulation, indem man für jede Zeile (Art) die Summe über alle Spalten bildet und durch die Anzahl der aufsummierten Spalten dividiert. Jede Art besetzt genau eine Zeile. Der Referenzvektor $(p_1^O, \ldots, p_R^O)$ steht in einer neuen Spalte.

4. Erstellen eines Zustandsvektors *(p_1, … , p_Z)*, der für jede mit *i* indizierte Art der Vegetationsaufnahme der Untersuchungsfläche (*i=1, … , Z*) den Deckungswert p_i enthält, analog zu Schritt 3.

5. Reduktion des Referenzvektors *(p_1^O, … , p_R^O)* und des Zustandsvektors *(p_1, … , p_Z)* auf die Anzahl *S* derjenigen Arten, die sowohl in der Referenztabelle als auch in der Vegetationsaufnahme der Untersuchungsfläche vorkommen. Man erhält zwei neue Vektoren *(p_1^O, … , p_S^O)* und *(p_1, … , p_S)*.

6. Normierung des Referenzvektors *(p_1^O, … , p_S^O)* durch Division jeder seiner Komponenten p_i^O (mittlere Artenmengen für jede Art) durch die Summe der mittleren Artenmengen über alle Arten, d. h.

$$p_i^{\,O} := \frac{p_i^{\,O}}{\sum_{i=1}^{S} p_i^{\,O}} \qquad \text{(Gleichung 5)}$$

   In einer Tabellenkalkulation erhält man den normierten Referenzvektor in einer neuen Spalte, indem man jede Zelle durch die Spaltensumme dividiert.

7. Normierung des Zustandsvektors *(p_1, … , p_S)* analog zu Schritt 6. Es gilt nach Ausführung von Schritt 6 und

$$\sum_{i=1}^{S} p_i = \sum_{i=1}^{S} p_i^{\,O} = 1 \qquad \text{(Gleichung 6)}$$

   als Vorbedingung für Schritt 8.

8. Berechnung der Kullbackdistanz *K(p_1^O, … , p_S^O, p_1, …, p_S)* zwischen der Referenzverteilung des Ökosystemtyps und der Artenverteilung der Untersuchungsfläche nach Gleichung 3.

9. Wiederholung von Schritt 2 bis 8 für alle in Schritt 1 ausgewählten Ökosystemtypen.

10. Die Untersuchungsfläche wird dem Referenztyp zugeordnet, zu dem ihre Vegetationszusammensetzung den geringsten Kullbackabstand besitzt.

Beispiel: ICP Forests Level II Standort 1605

Die Level II-Fläche 1605 (Großer Eisenberg) befindet sich in der Modellregion „Thüringer Wald“ in den Kammlagen des Thüringer Waldes und besitzt die geografischen Koordinaten (R 3626697 H 5609904). Unter diesen geografischen Koordinaten findet man in der ANOEST-Karte den Ökosystemtyp C3-6d-B2 (Rohhumus-Fichten-Tannen-Buchen-Hochbergwald). Aufgrund der geringen räumlichen Auflösung dieser Karte wird die Zuordnung nun mithilfe des beschriebenen Verfahrens präzisiert. Hierzu werden weitere mögliche Ökosystemtypen ausgewählt und mit aus dem Jahr 1960 stammenden Vegetationsdaten zur Fläche verglichen. Im vorliegenden Beispiel ist neben dem Ökosystemtyp C3-6d-B2 insbesondere auch der Ökosystemtyp C4-6d-B1 (Rohhumus-Fichten-Hochbergwald) als möglicher Referenzzustand in Betracht zu ziehen. In Tabelle 3 wird der Referenzvektor (p_1^O, …, p_R^O) für den Ökosystemtyp C4-6d-B1 in Form einer Tabellenkalkulation beispielhaft berechnet. Hierzu wurden aus Jenssen et al. (2019; „C4-6d-B1_Vegetationsgesamttabelle.xls“) insgesamt 36 Vegetationsaufnahmen ausgewählt, die aus den Jahren zwischen 1942 und 1963 stammen (Schritt 2). Tabelle 3 enthält Deckungswerte zu insgesamt R=59 Pflanzenarten. Die mittlere Artenmenge p_i^O zu jeder dieser Arten wurde ermittelt, indem für jede Zeile (Art) die Summe über alle Spalten gebildet und durch die Anzahl der aufsummierten Spalten dividiert wurde (Schritt 3). Der Referenzvektor (p_1^O, …, p_R^O) steht in der letzten Spalte der Tabelle 3. Tabelle 4 enthält unter der Flächennummmer „STO180“ in der dritten Spalte den Zustandsvektor (p_1, …, p_Z) mit den Deckungswerten der vorkommenden Pflanzenarten (Schritt 4). Die Aufnahme zur Fläche LII-1605 aus dem Jahr 1960 ist unter der Flächenbezeichnung STO 180 (Jenssen et al. 2019; („C4-6d-B1_Vegetationsgesamttabelle.xls“) dokumentiert. Dabei wurde Tabelle 4 auf die 18 Arten reduziert, die sowohl in der Referenztabelle als auch in der Vegetationsaufnahme der Untersuchungsfläche vorkommen (Schritt 5). Die vierte und die fünfte Spalte enthalten den normierten Referenzvektor bzw. den normierten Zustandsvektor (Schritt 6 und 7). Die letzte Spalte enthält die einzelnen Summanden der Kullbackdistanz, deren Summe in der letzten Zeile der letzten Spalte die Kullbackdistanz von K = 0,31 zwischen der Referenzverteilung des Ökosystemtyps C4-6d-B1 und der Artenverteilung der Untersuchungsfläche im Jahr 1960 ergibt (Schritt 8). Diese Berechnungen wurden ebenfalls für den Typ C3-6d-B2 sowie weitere mögliche Ökosystemtypen durchgeführt (Schritt 9). Dabei stellte sich der Wert K = 0,31 als der geringste Kullbackabstand heraus. Somit wird die LII-Fläche 1605 „Großer Eisenberg“ aufgrund ihrer Vegetationszusammensetzung im Jahr 1960 dem Referenztyp C4-6d-B1 zugeordnet.

2.3.2 Durchführung

Die Ermittlung der Richtigkeit der Klassifikation für die Karte der aktuellen naturnahen Ökosystemtypen Deutschlands (ANOEST, Maßstab 1 : 500.000) erfolgte durch (Tab. 1):

1. Vergleich mit empirischen flächenbezogenen Kartierdaten des Bundelandes Hessen und

2. Vergleich mit auf der Basis von Vegetationsaufnahmen aus der Datenbank des W. I. E. abgeleiteten Ökosystemtypen.

2.3.2.1 Verifizierung mit Vegetationsdaten aus Hessen

Die Verifizierung mit empirischen Kartierdaten stützte sich zum einen auf im Land Hessen durchgeführte Grunddatenerhebungen in den FFH-Gebieten Nr. 5517-301 Wehrholz (Stand 2012), Nr. 5419-303 Wälder und Flachwasserteiche östlich Lich (Stand 2006), Nr. 4926-350 Boyneburg und Schickeberg bei Breitau (Stand 2004), Nr. 5917-305 Schwanheimer Wald (Stand 2004) sowie Daten aus dem Naturschutzgroßprojekt Vogelsberg (Stand 2012). Die Einstufung der Richtigkeit der Klassifikation erfolgte anhand der in Tabelle 5 dokumentierten Zuordnungen der ANOEST (hier: Waldökosystemtypen) zu den Typen der Potentiellen natürlichen Vegetation (PNV), den Biotoptypen nach Hessischer Biotopkartierung (HB) sowie den Lebensraumtypen nach Anhang I der FFH-Richtlinie (LRT). Bezüglich der Forstökosystemtypen wurden zudem Daten der Forsteinrichtung

Tab. 3: Erstellen eines Referenzvektors (p_1^o, …, p_R^o) für den Ökosystemtyp C4-6d-B1. In der Tabelle wurde die Anzahl der dargestellten Aufnahmen und der Arten aus Übersichtsgründen beschränkt.

Tab. 3: *Creation of a reference vector (p_1^o, …, p_R^o) for the ecosystem type C4-6d-B1. In the table, the number of samplings and species has been reduced for clarity.*

Flächen-nummer	**ST0184**	**ST0183**	**ST0182**	**ST0181**	**ST0179**	**ST0178**	**ST0176**	**ST0173**	**ST0172**	**ST0171**	**ST0170**	**ST0169**	**ST0168**	**ST0163**	**ST0162**	**ST0161**	**GE1_23**	**GE1_22**	**GE1_21**	**GE1_20**	**GE1_17**	**GE1_16**	**GE1_15**	**GE1_14**	**GE1_13**	**GE1_12**	**GE1_03**	**GE1_02**	**FKH02_29**	
Datum	**13.8.59**	**13.8.59**	**17.9.58**	**11.8.59**	**11.8.59**	**12.8.59**	**12.8.59**	**24.8.58**	**26.7.60**	**26.7.60**	**26.7.60**	**1.7.61**	**25.7.63**	**14.8.59**	**24.7.63**	**25.7.63**	**1.7.43**	**1.7.43**	**1.7.57**	**1.7.57**	**1.7.44**	**1.7.43**	**1.7.43**	**1.7.43**	**1.7.57**	**1.7.57**	**1.7.57**	**1.7.57**	**28.8.42**	
Autor	**Schlüter**	**Schlüter**	**Grüneberg**	**Schlüter**	**Schlüter**	**Schlüter**	**Schlüter**	**Grüneberg**	**Schlüter**	**Schlüter**	**Schlüter**	**Schlüter**	**Schlüter**	**Schlüter**	**Schlüter**	**Schlüter**	**Hartmann**	**Hartmann**	**Genssler**	**Genssler**	**Hartmann**	**Hartmann**	**Hartmann**	**Hartmann**	**Genssler**	**Genssler**	**Genssler**	**Genssler**	**Hartmann**	
Baum- und Strauch-schichten																														
Picea abies	62,1	62,0	65,0	62,1	43,0	65,10	65,0	62,1	77,0	65,2	52,0	87,0	62,0	62,1	62,0	80,1	87,0	87,0	37,1	37,2	87,0	87,0	102,0	62,00	62,0	87,1	87,0	87,01	65,0	**73,74**
Abies alba			0,1																	0,1										**0,01**
Sorbus aucuparia	0,0	0,01		0,1	0,10			0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,01	0,0	0,1	0,2	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,10	0,0	0,1	0,11	0,1	0,0	**0,13**
Krautschicht																														
Calamagrostis villosa	62,0	87,0	62,0	37,0	15,0	37,0	3,0	15,0	37,0	15,0	15,0	15,0	15,0	3,0	3,0	15,0	62,0	62,0	62,0	62,0	15,0	15,0	3,0	15,0	37,0	37,0	62,0	62,0	62,0	**30,50**
Vaccinium myrtillus	15,0	0,1	0,1	15,0	37,0	37,0	37,0	15,0	15,0	37,0	37,0	15,0	37,0	15,0	15,0	37,0	3,0	15,0	0,1	0,1	3,0	15,0	0,10	15,0	15,0	15,0	3,0	3,0	15,0	**18,27**
Deschampsia flexuosa	37,0	15,0	37,0	15,0	15,0	37,0	15,0	15,0	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0	62,0	37,0	3,0	15,0	15,0	15,0	37,0	37,0	37,00	37,0	15,0	15,0	37,0	37,0	37,0	**29,03**
Galium saxatile				0,1	3,0	15,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	0,1	0,1	0,1	0,1	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	**2,37**
Trientalis europaea				3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	0,1	0,1	0,10	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	**2,19**

Flächen-nummer	*Dryopteris carthusiana*	*Epilobium angustifolium*	*Blechnum spicant*	*Carex pilulifera*	*Oxalis acetosella*	*Rumex acetosella*	*Vaccinium vitis-idaea*	*Luzula sylvatica*	*Carex canescens*	*Agrostis capillaris*	*Maianthemu bifolium*	*Pteridium aquilinum*	*Carex ovalis*	*Luzula luzuloides*	*Luzula pilosa*
FKH02_29								3,0						3,0	
GE1_02	15,0		0,1		3,0			0,1							
GE1_03	0,1		3,0	0,1	15,0										
GE1_12	0,1														
GE1_13	0,1							0,1		0,1	0,1				0,1
GE1_14	3,0				3,00										
GE1_15	0,1				3,0										
GE1_16	3,0		0,1		15,0										
GE1_17	0,1		3,0	0,1	3,0			0,1							0,1
GE1_20	0,1	0,1	0,1												
GE1_21	0,1	0,1													
GE1_22	3,0	0,1						0,1		0,1					
GE1_23	3,0				3,0			0,1							
ZK0161									0,01						
ZK0162			0,1												
ZK0163		0,1	0,01												
ZK0168			0,1				0,1								
ZK0169															
ZK0170		0,1							3,0						
ZK0171															
ZK0172			0,1	0,01					0,1						
ZK0173		0,1		0,1					0,1	0,1					
ZK0176		0,1	0,01	0,1	0,1	3,0						0,1		0,01	
ZK0178		0,1	0,01			0,1									
ZK0179		0,1	3,0			3,0						3,0	0,01		
ZK0181		0,01		0,1		0,1				0,1			0,1		
ZK0182		0,1		0,1							0,1				
ZK0183		0,01													
ZK0184						0,1									
Summe	**27,70**	**1,15**	**16,03**	**0,71**	**45,10**	**6,50**	**0,22**	**3,50**	**3,21**	**0,50**	**0,20**	**6,10**	**0,12**	**3,02**	**0,20**
pi0	**0,77**	**0,03**	**0,45**	**0,02**	**1,25**	**0,18**	**0,01**	**0,10**	**0,09**	**0,01**	**0,01**	**0,17**	**0,00**	**0,08**	**0,01**

Flächen-nummer		FKH02_29	GE1_02	GE1_03	GE1_12	GE1_13	GE1_14	GE1_15	GE1_16	GE1_17	GE1_20	GE1_21	GE1_22	GE1_23	ST0161	ST0162	ST0163	ST0168	ST0169	ST0170	ST0171	ST0172	ST0173	ST0176	ST0178	ST0179	ST0181	ST0182	ST0183	ST0184	Summe	pi0
Moosschicht																															
Polytrichum formosum			15,0	15,0	37,0	15,0	15,0	3,0	3,0	15,0	3,0	3,0	3,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	3,0	3,0	3,0	37,0	15,0	3,0	0,1	3,0	3,0	0,1	3,0	**320,40**	**8,90**
Dicranum scoparium			3,0	3,0	0,1		15,0	37,0	15,0	15,0	3,0	3,0		3,0	15,0	15,0	3,0	15,0	0,1	3,0	15,0	15,0	3,0	3,0	0,1	3,0	15,0	15,0		3,0	**292,30**	**8,12**
Plagiothecium undulatum			15,0	15,0	15,0	0,10	15,0	15,0	0,1	15,0	0,1	0,1		3,0	0,01	3,0	3,0	3,0	0,1	3,0		0,1	3,0		0,1	3,0		15,0			**191,01**	**5,31**
Sphagnum girgensohnii				15,0			0,1			0,1	3,0			0,10	0,1	3,0	3,0		3,0		0,1									**36,60**	**1,02**
Barbilophozia floerkei				0,1	0,1			3,0				0,1			0,01		0,1	0,1			0,1	0,1								**7,21**	**0,20**
Dicranella heteromalla																					3,0			0,1	0,1		0,1		0,01	**3,71**	**0,10**
Rhytidiadelphus loreus						0,1	3,0	15,0		3,0	0,1	0,1			0,1	0,01														**27,62**	**0,77**
Lepidozia reptans			0,1						0,1					0,01	0,1		3,0				0,1			0,1						**9,61**	**0,27**
Plagiothecium denticulatum																0,1			0,1		0,1	3,0		0,1	0,1		0,1			**10,00**	**0,28**
Pohlia nutans												3,0							0,1							0,01				**12,21**	**0,34**
Sphagnum nemoreum				0,1	0,1																		0,1				15,0			**33,50**	**0,93**
Pleurozium schreberi						0,1	3,0	3,0			0,1	0,1	0,1														3,0			**12,50**	**0,35**
Bazzania trilobata											0,1	0,1				0,1	0,1										0,1			**9,70**	**0,27**

Tab. 4: Berechnung der Kullback-Distanz zwischen dem Zustandsvektor (p_1, …, p_Z) der Versuchsfläche LII-1605 (Großer Eisenberg) und dem Referenzvektor (p_1^O, …, p_R^O) des Ökosystemtyps C4-6d-B1 (Tabelle 3).

Tab. 4: *Calculation of the Kullback distance between the ecosystem state vector (p_1, …, p_Z) of the sample site LII-1605 (Großer Eisenberg) and the reference vector (p_1^O, …, p_R^O) of the ecosystem type C4-6d-B1 (Table 3).*

Flächennummer	**p_i^0**	**ST0180**	**p_i^0 normiert**	**p_i normiert**	**$p_i * \ln(p_i/p_i^0)$**
Datum		13.7.60			
Autor		Schlüter			
Baum- und Strauchschichten					
Picea abies	73,7364	164,00	0,441779	0,543370	0,1125
Sorbus aucuparia	0,0003	0,01	0,000002	0,000033	0,0001
Fagus sylvatica	0,0003	0,10	0,000002	0,000331	0,0018
Krautschicht					
Calamagrostis villosa	30,5000	15,00	0,182736	0,049698	-0,0647
Vaccinium myrtillus	18,2667	37,00	0,109442	0,122590	0,0139
Deschampsia flexuosa	29,0306	37,00	0,173932	0,122590	-0,0429
Galium saxatile	2,3725	15,00	0,014214	0,049698	0,0622
Trientalis europaea	2,1947	15,00	0,013149	0,049698	0,0661
Dryopteris dilatata	1,5256	0,10	0,009140	0,000331	-0,0011
Maianthemum bifolium	0,0056	0,10	0,000033	0,000331	0,0008
Pteridium aquilinum	0,1694	0,10	0,001015	0,000331	-0,0004
Luzula pilosa	0,0056	0,10	0,000033	0,000331	0,0008
Moosschicht					
Dicranum scoparium	8,1194	0,10	0,048646	0,000331	-0,0017
Barbilophozia floerkei	0,2003	0,10	0,001200	0,000331	-0,0004
Pleurozium schreberi	0,3472	3,00	0,002080	0,009940	0,0155
Lophocolea heterophylla	0,0139	0,10	0,000083	0,000331	0,0005
Dicranum majus	0,4194	15,00	0,002513	0,049698	0,1483
Summe	**166,9078**	**301,82**	**1,000000**	**0,999967**	**0,3112**

(Hessen-Forst, FENA) und hier insbesondere die Angaben zur Hauptbaumart hinzugezogen. Da die Ökosystemtypisierung thematisch i. d. R. höher aufgelöst ist als die empirischen Kartierdaten, wurde zudem auf vorhandene Geländekenntnisse in den o. g. Gebieten zurückgegriffen. Die Überprüfung beruht auf einer Stichprobe von 20 ANOEST-Flächenobjekten. Dieser Stichprobenumfang entspricht der erforderlichen Mindestprobenanzahl (MPZ), welche anhand der Gleichung 7, die auch bei qualitativen Daten Anwendung finden kann (Friedrichs 1990), ermittelt wurde:

$$MPZ = 10 * K^V \qquad \text{(Gleichung 7)}$$

mit: K = Anzahl der Merkmalsausprägungen
V = Anzahl der betrachteten Merkmale

Da im Falle der ANOEST-Kartierung nur ein einziges Merkmal „Wahrheitswert“ (V = 1), bei dem die Anzahl der Merkmalsausprägungen K = 2 („richtig“, „falsch“) beträgt, betrachtet wird, ergibt sich nach Gleichung 3 eine MPZ von 20 ANOEST-Flächenobjekten. Geprüft wurde jeweils, ob der für das jeweilige ANOEST-Flächenobjekt angegebene Ökosystemtyp als Leit- oder Begleitökosystemtyp vorkommt oder überhaupt nicht vorhanden ist. Dies ist insofern von Bedeutung, da aufgrund der Kleinmaßstäbigkeit und der damit verbundenen Generalisierung der ANOEST-Karte (1 : 500.000) starke Inhomogenitäten innerhalb der ANOEST-Raumeinheiten auftreten können. Als Leitökosystemtyp soll hier die vorherrschende Einheit und als Begleitökosystemtyp eine aufgrund ihrer kleinflächigen Verbreitung nicht darstellbare, aber vorhandene Einheit verstanden werden.

2.3.2.2 Verifizierung mit Vegetationsdaten aus dem Waldkunde-Institut

Die Überprüfung der Richtigkeit der Klassifikation stützte sich zum anderen auf Vegetationsaufnahmen aus der W. I. E.-Datenbank mit folgenden Angaben (Willmanns 1998):

1. Anzahl der Vegetationsschichten im Wald und deren jeweiliger Deckungsgrad bezogen auf die Probefläche [in %].

1. Liste aller in der jeweiligen Probefläche vorkommenden höheren Pflanzen und Moose.

2. Deckungsgrad der Arten bezogen auf die Probefläche [in %].

Es konnten insgesamt 364 Vegetationsaufnahmen nach 1990 mit bekannter Zuordnung des aktuellen Ökosystemtyps mit den ANOEST-Objekten räumlich verknüpft und auf Übereinstimmung bzw. Nicht-Übereinstimmung untersucht werden.

2.3.3 Ergebnisse

(1) In der Stichprobe der 20 ANOEST-Flächenobjekte sind insgesamt 7 unterschiedliche Waldökosystemtypen (subatlantische Tiefland-Buchenwald-, nadelbaumfreie Buchen-Bergwald- und Schwarzerlenwald-Ökosysteme) und 3 Forstökosystemtypen repräsentiert. Die Stichprobe umfasst damit verbreitete Waldökosystemtypen, wobei insbesondere die Buchenwälder aufgrund ihrer weiten klimatischen Amplitude und hohen Toleranz gegenüber den Standortbedingungen eine besondere Stellung in Mitteleuropa einnehmen.

Die Auswertung auf der Basis der flächenbezogenen Kartierdaten unter Hinzuziehung von Expertenwissen über das Gebiet ergab hinsichtlich der Richtigkeit der Klassifikation eine Genauigkeit von 65 %, d. h. bei etwa 2/3 der Flächenobjekte erschien der angegebene ANOEST als Leitökosystemtyp plausibel. In 30 % der Fälle tauchte der ANOEST immerhin noch als Begleitökosystemtyp auf, und in einem Fall war der angegebene ANOEST auf der untersuchten Fläche nicht vorhanden. Bei den Waldökosystemtypen betrug nach dieser Methode der Qualitätsprüfung der Anteil der richtig klassifizierten Objekte 77 %, dagegen bei den Forstökosystemtypen 43 %.

(2) An den 364 Vegetationsaufnahmeflächen mit gut bekannten ANOEST ergibt sich eine Übereinstimmung mit der Karte der ANOEST Deutschlands (1:500.000) in 104 Fällen (= 29 % Richtigkeit der Klassifikation). Werden die drei Ziffern des Ökoschlüssels separiert, ergeben sich 60 % Übereinstimmung bei der ökoklimatischen Klassifikation, 44 % bei der Feuchtekennzahl und 38 % beim Stoffhaushaltstyp. Betrachtet man nur die Waldökosystemtypen, beträgt die Richtigkeit der ANOEST-Karte 39 %. Für die ökoklimatische Klassifikation ergibt sich eine Übereinstimmung bei 67 %, für die Feuchteklassifikation bei 55 % und für den Stoffhaushaltstyp bei 44 % der untersuchten 255 Fälle. Bei den Forstökosystemtypen wurden nur 5 % der ANOEST richtig kartiert. Allerdings ergeben sich wesentlich höhere Übereinstimmungen bei den Klimakennwerten (45 %), bei der Feuchtekennzahl (18 %) und auch beim Stoffhaushaltstyp (23 %).

2.3.4 Diskussion

Methodische Unsicherheiten bei der Kennwertermittlung selbst ergeben sich aufgrund der geringen Stichprobenumfänge (n = 20 ANOEST-Flächenobjekte) sowie bezüglich der Einstufung als Leit- oder Begleitökosystemtyp. Letzteres begründet sich insbesondere durch Datenmangel, d. h. nicht hinreichender Überdeckung der ANOEST-Objekte mit entsprechenden empirischen Kartierdaten (7 von 20 der untersuchten ANOEST-Flächenobjekte). Beim Vergleich mit empirischen Kartierdaten ergibt sich die größte Unsicherheit aus der hohen Differenzierung der Ökosystemtypisierung, da die Kartierdaten thematisch geringer aufgelöst sind. Auch die Hinzuziehung von Geländekenntnissen konnte diese Lücke nicht schließen, da zum Zeitpunkt der Geländearbeiten der Kartierschlüssel für die Ökosystemtypen noch nicht vorlag. Die Validierung auf der Basis der Vegetationsaufnahmen ist als verlässlicher anzusehen und führt zu stärker abweichenden Ergebnissen (Kapitel 5). Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass auf der Basis der vorliegenden Daten ökologisch nahestehende Ökosystemtypen ohne weitere Information nur schwerlich unterschieden werden konnten. Allerdings lässt die standortbezogene Betrachtung keine Validierung im Hinblick auf das Vorkommen als Hauptökosystemtyp zu. Des Weiteren wurde am Beispiel der fließgewässerbegleitenden Bruchweiden-Schwarzerlen-Auwälder deutlich, dass die absolute Positions(un)genauigkeit der ANOEST, die bei ± 42 m liegt, eine Validierung insbesondere der linienhaften Objekte i. d. R. erschwert. Die vergleichsweise geringe Trefferquote bei den Forst- gegenüber den Waldökosystemtypen lässt sich insbesondere auf Ungenauigkeiten der für die ANOEST-Kartierung verwendeten Datengrundlagen (Corine Landcover, Baumartenverteilung) zurückführen. Probleme bei der Interpretation der Karte der ANOEST ergeben sich insbesondere auch aus der Angabe nur eines ANOEST für jede Raumeinheit, wodurch eine i. d. R. nicht vorhandene räumliche Homogenität vermittelt wird. Abhilfe könnten hier eher umschreibende Angaben leisten, welche die Schwankungsbreite wichtiger Merkmale oder typische Vergesellschaftungen verschiedener Ökosystemtypen widerspiegeln, wie es beispielsweise auch in der bodenkundlichen Kartierung (AG Boden 2005) üblich ist.

Insgesamt ergibt sich bei Berücksichtigung der Ergebnisse beider Methodenanwendungen folgende Einschätzung: In der Karte der ANOEST Deutschlands ist der angegebene Hauptökosystemtyp in 65 % der Fälle richtig bis ähnlich, d. h. ökologisch nahestehend (30 % richtig; 35 % ähnlich). Bei 30 % der Flächenobjekte ist der angegebene ANOEST als richtiger oder ökologisch nahestehender Begleitökosystemtyp einzustufen (etwa 15 % richtig und 15 % ähnlich). 5 % der Flächenobjekte sind gänzlich falsch kartiert.

3 Nachnutzungsmöglichkeiten am Beispiel der Kartierung von Ökosystemtypen im regionalen Maßstab

3.1 Ziel

Für Betrachtungen der Ökosystemintegrität auf regionaler Ebene (z. B. für Naturschutz und Forstwirtschaft) ist die bundesweite Karte der ANOEST im Maßstab 1 : 500.000 aufgrund der damit verbundenen geringen räumlichen Auflösung bzw. Genauigkeit nur bedingt zweckdienlich. Kleinräumige

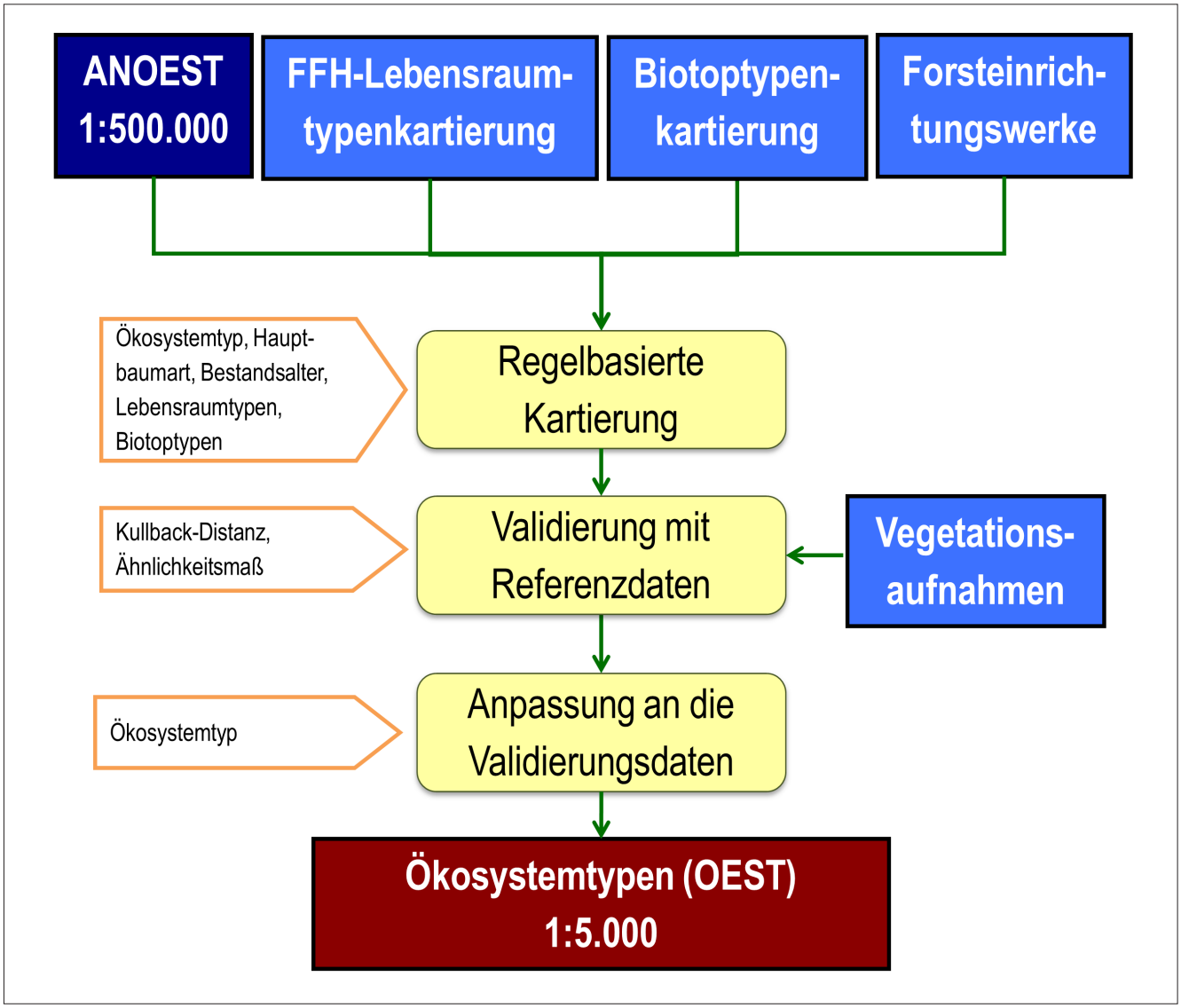

Abb. 2: Verfahren der mittelmaßstäbigen Kartierung der OEST im Nationalpark Kellerwald-Edersee.

Fig 2: *Procedure of medium-scale mapping of the ecosystem types in the Kellerwald-Edersee National Park.*

standortbezogene Bestimmungen der Ökosystemtypen mit Hilfe von Vegetationsaufnahmen genügen zwar den Genauigkeitsanforderungen für o. g. Zwecke, sind aber für Kartierungen auf der regionalen Ebene vergleichsweise zeitaufwändig und damit wenig praktikabel. Diese methodische Lücke soll daher im Folgenden durch ein Verfahren zur mittelmaßstäbigen Kartierung der Ökosystemtypen (1 : 5.000 bis 1 : 25.000) geschlossen werden.

3.2 Methode

Die Methodik wurde am Beispiel des Nationalparks Kellerwald-Edersee (Hessen) im Zusammenwirken mit der Nationalparkverwaltung als Kooperationspartner entwickelt und erprobt. Hierfür wurde folgendes Datenmaterial verwendet:

1. Karte der Aktuellen Naturnahen Ökosystemtypen (ANOEST) Deutschlands (1 : 500.000),
2. Grunddatenerfassung für das FFH-Gebiet Nr. 4920-401 Kellerwald mit flächenbezogenen Daten zur Verbreitung von FFH-Lebensraumtypen (LRT) sowie Biotoptypen nach dem Hess. Biotopkartierschlüssel (HB)[1],
3. Flächenbezogene Daten der Forsteinrichtung (FE)[2] mit Angaben zum Baumartenanteil und zum Bestandsalter,
4. Standortbezogene Daten zu Ökosystemtypen, bestimmt anhand von 105 Vegetationsaufnahmen an 99 Standorten der permanenten Stichprobeninventur (PSI) der Waldstruktur der Jahre 2007–2009[2] sowie 6 eigenen Aufnahmen des Jahres 2015.

Das Prinzip des methodischen Vorgehens veranschaulicht Abbildung 2. In einem ersten Schritt wurde eine regelbasierte Kartierung mit verfügbaren flächenbezogenen Daten aus dem Nationalpark durchgeführt (Variante A, vereinfachter Ansatz). Die resultierende Karte (Maßstab 1 : 5.000) wurde anschließend unter Verwendung von standortbezogenen

1 Quelle: Nationalparkverwaltung Kellerwald-Edersee

2 Quelle: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen (NW-FVA)

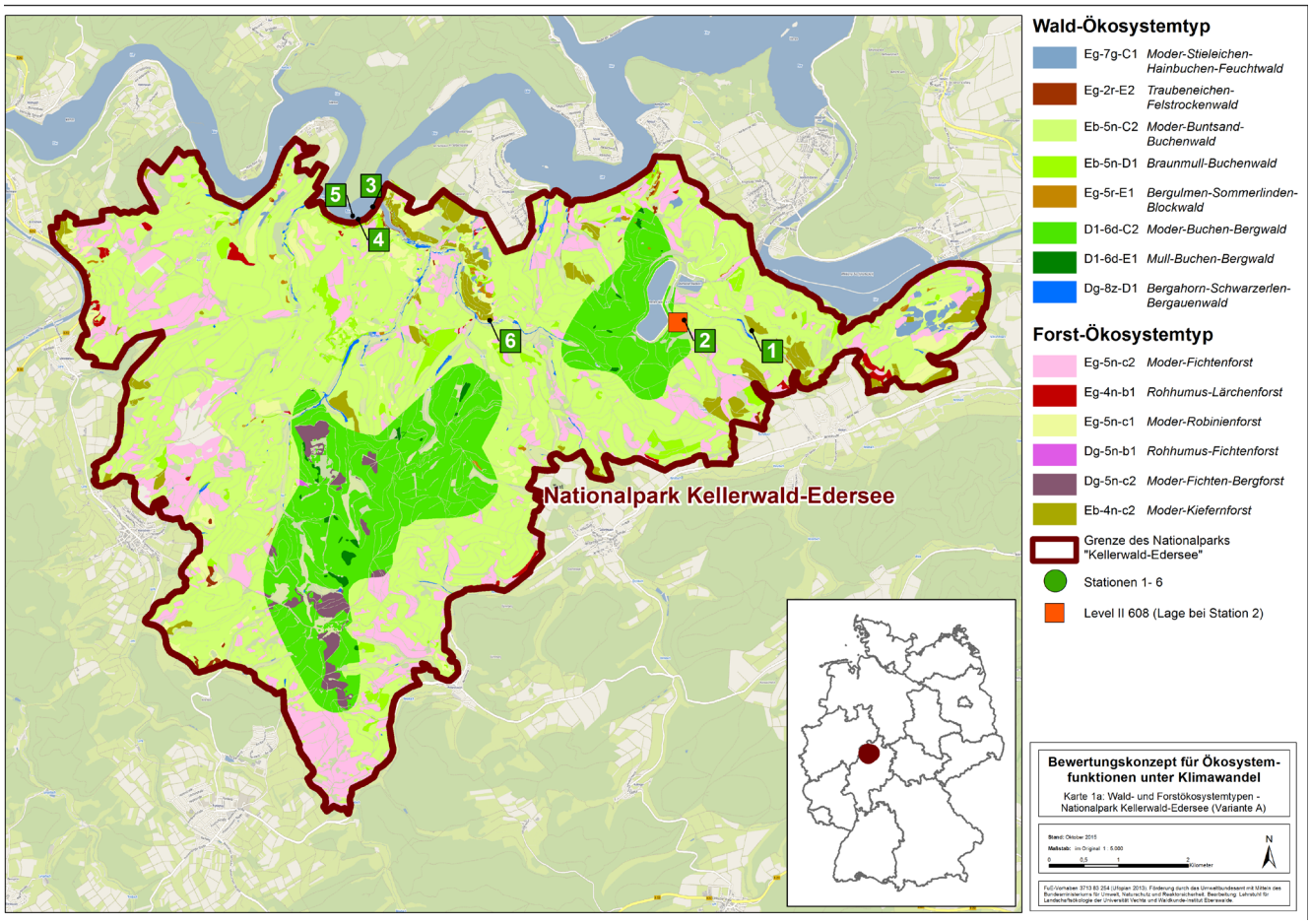

Abb. 3: Wald- und Forstökosystemtypen – Nationalpark Kellerwald-Edersee (Variante A), Maßstab im Original 1 : 5.000.

Fig. 3: *Forest ecosystem types - Kellerwald-Edersee National Park (variant A), original scale 1 : 5,000.*

Daten zu Wald- und Forstökosystemtypen, die aus Vegetationsaufnahmen abgeleitet wurden, validiert. In einem dritten Schritt wurden die Resultate der Validierung für die Qualitätsverbesserung der Karte genutzt (Variante B). Abschließend erfolgte ein Vergleich beider Kartierungsvarianten. Parallel wurde erprobt, ob eine stichprobenhafte Überprüfung im Gelände die vergleichsweise aufwändige Validierung mittels Vegetationsaufnahmen ersetzen kann. Dies erfolgte unter Einbeziehung von Experten der Nationalparkverwaltung.

3.2.1 Regelbasierte Kartierung

Am Beispiel des Nationalparks Kellerwald-Edersee erfolgte die Erstellung einer Hypothesenkarte der Wald- und Forstökosystemtypen (ANOEST) durch Anwendung gebietsspezifisch definierter Zuordnungsregeln auf verfügbare Informationen über die Verbreitung von Lebensraumtypen (LRT) nach Anhang I der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie bzw. Biotoptypen nach dem Schlüssel der Hessischen Biotopkartierung (HB), über die regionale hypsometrische und horizontale ökoklimatische Zuordnung der Potenziellen natürlichen Ökosystemtypen (PNOEST, 1 : 500.000, Jenssen et al. 2013) sowie Angaben zur Hauptbaumart aus Forsteinrichtungswerken (FE) im Prämissenteil der Regelbasis (Tab. 5).

So wurden beispielsweise die im Kellerwald im Maßstab 1 : 5.000 kartierten LRT 9110 Hainsimsen-Buchenwälder (*Luzulo-Fagetum*) durch Hinzuziehung weiterer Informationen aus der bundesweiten PNOEST-Karte zur ökoklimatischen Gebietsklassifizierung (D1 = Bergwaldlage, Eb = Tief- bis untere Bergwaldlage) weiter zu Moder-Buchen-Bergwald (D1-6d-C2) und Moder-Buntsand-Buchenwald (Eb-5n-C2) ausdifferenziert. Als anderes Beispiel werden 21,67 ha des Nationalparks Kellerwald durch den LRT 91E0* Erlen- und Eschenwälder an Fließgewässern (*Alno-Padion, Alnion incanae, Salicion albae*) bzw. Biotoptyp 01.173 Bachauenwälder eingenommen. Beide wurden dem Ökosystemtyp Dg-8z-D1 Bergahorn-Schwarzerlen-Bergauenwald zugeordnet, da auch die bundesweite Karte der ANOEST diesen Ökosystemtyp im Bereich des Nationalparks Kellerwald als den häufigsten Auen-Ökosystemtyp zeigt.

Die so entwickelte Hypothesenkarte im Maßstab 1 : 5.000 zeigt Abbildung 3.

3.2.2 Validierung mit Referenzdaten

Die regelbasierte Kartierung ist aufgrund der Einfachheit des methodischen Ansatzes mit mehr oder minder großen Ungenauigkeiten behaftet, welche aber quantifiziert werden können. Entsprechend wurde die thematische Genauigkeit auf Basis einer Zufallsstichprobe (Schröder et al. 2018, Bd. 1: Kapitel 8.1) als Qualitätsmerkmal gemäß DDGI (2007) ermittelt. Hierzu standen 82 Vegetationsaufnahmen mit bekannten Zuordnungen der Wald- und Forstökosystemtypen zur Verfügung (Schröder et al. 2018, Bd. 1: Kapitel 5).

Tab. 5: Regelbasis zur Ableitung der Hypothesenkarte der Wald- und Forstökosystemtypen im Nationalpark Kellerwald-Edersee aus verfügbaren Daten.

Tab. 5: *Rule base for deriving the hypothetical map of forest ecosystem types in the Kellerwald-Edersee National Park from available data.*

Prämissenteil				**Schlussfolgerungsteil**	
LRT	**HB**	**PNOEST**	**FE**	**ANOEST**	**Beschreibung**
1. Waldökosystemtypen					
9110		D1, Dg		D1-6d-C2	Moder-Buchen-Bergwald
9110		D1, Dg		Eb-5n-C2	Moder-Buntsand-Buchenwald
9130		D1, Dg		Eb-5n-D1 Eb-5n-D1a	Lehmbraunmull-Buchenwald Sandbraunmull-Buchenwald
9130		D1, Dg		D1-6d-D1 D1-6d-E1	Braunmull-Buchen-Bergwald Mull-Buchen-Bergwald
9160	01.150			Eg-7g-C1 Eg-7g-D1	Moder-Stieleichen-Hainbuchen-Feuchtwald Braunmull-Stieleichen-Hainbuchen-Feuchtwald
9170	01.150			Eg-2r-E2	Traubeneichen-Felstrockenwald
9180*	01.162			Eg-5r-E1	Bergulmen-Sommerlinden-Blockwald
91E0*	01.173			Dg-8z-D1	Bergahorn-Schwarzerlen-Bergauenwald
	01.142			Eg-7g-C1	Moder-Stieleichen-Hainbuchen-Feuchtwald
2. Forstökosystemtypen					
	01.183	Eb, Eg	Eiche	Eg-5n-c1	Moder-Eichenforst
	01.220	Eb, Eg		Eg-5n-c2	Moder-Fichtenforst
	01.220	D1, Dg		Dg-5n-c2	Moder-Fichten-Bergforst
	01.220	Eb, Eg	Kiefer	Eb-4n-c2	Moder-Kiefernforst
	01.220	D1, Dg		Dg-5n-b1	Rohhumus-Fichten-Bergforst
	01.300	Eb, Eg	Eiche	Eg-5n-c1	Moder-Eichenforst
	01.300	D1, Dg		Dg-5n-c2	Moder-Fichten-Bergforst
	01.300	Eb, Eg		Eg-5n-c2	Moder-Fichtenforst
	01.300	Eb, Eg	Kiefer	Eb-4n-c2	Moder-Kiefernforst
	01.300	Eb, Eg	Lärche	Eg-4n-b1	Rohhumus-Lärchenforst

LRT: Lebensraumtypen nach Anhang I der FFH-Richtlinie: 9110 = Hainsimsen-Buchenwald (Luzulo-Fagetum); 9130 = Waldmeister-Buchenwald (Asperulo-Fagetum); 9160 = Sternmieren-Eichen-Hainbuchenwälder (Carpinion betuli); 9170 = Labkraut-Eichen-Hainbuchenwald (Galio-Carpinetum); 9180* = Schlucht- und Hangmischwälder (Tilio-Acerion); 91E0* = Erlen- und Eschenwälder an Fließgewässern (Alno-Padion, Alnion incanae, Salicion albae);

HB: Hessische Biotopkartierung: 01.150 = Eichenwälder; 01.162 = Sonstige Edellaubbaumwälder; 01.173 = Bachauenwälder; 01.142 = Sonstige Eichen-Hainbuchenwälder; 01.183 = Übrige stark forstlich geprägte Laubwälder; 01.220 = Sonstige Nadelwälder; 01.300 = Mischwälder;

PNOEST: Regionale hypsometrische und horizontale ökoklimatische Zuordnung der Potenziellen natürlichen Ökosystemtypen (PNOEST, 1:500.000): Eb = subatlantisch, Tiefland; Eg = Tief- bis untere Bergwaldlagen insgesamt; D1 = Bergwaldlagen - nadelbaumfrei; Dg = Bergwaldlagen insgesamt

FE: Informationen zu vorkommenden Hauptbaumarten aus Hessischen Forsteinrichtungswerken.

Tab. 6: Vegetationstabelle zur Qualitätsprüfung der regelbasierten Kartierung im Nationalpark Kellerwald-Edersee.

Tab. 6: *Vegetation table for the quality control of rule-based mapping in the Kellerwald-Edersee National Park.*

Parameter		**Wald-Ökosysteme**					**Forst-Ökosysteme**
Ökosystem-Gruppe		**1.1.1.**	**1.6.2.**	**1.3.1.**	**1.3.1.**	**1.5.1.**	
Wald-Ökosystemtyp		**Dg-8z-D1**	**D1-6d-C2**	**Eb-5n-D1**	**Eb-5n-C2**	**Eg-5r-E1**	**Eb-4n-c2**
		Bergahorn-Schwarz-erlen-Berg-auenwald	Moder-Buchen-Bergwald	Braunmull-Buchenwald	Moder-Buntsand-Buchen-wald	Bergulmen-Sommer-linden-Blockwald	Moder-Kiefern-forst *)
Lebensraumtyp		**91E0***	**9110**	**9130**	**9110**	**9180***	**-**
Gesellschaft		Car. rem.-Frax.	Luz.-Fag.	Asp.-Fag.	Luz.-Fag.	Tilio-Ac.	-
Station-Nr.: **)		1	2	3	4	5	6
Aufnahmedatum	29.04.2015						
Bestandshöhe (m) (1. Baumschicht)		20 – 22	30 – 35	25	18	20	15 – 18
Bestandshöhe (m) (2. Baumschicht)			15	10	8	10	2 – 6
Bestandshöhe (m) (Strauchschicht)		4,0	2,0	1,5	2,5	4,0	
Deckung 1. Baumschicht (%)		60	60	25	40	40	29
Deckung 2. Baumschicht (%)		0	25	40	20	15	8
Deckung Strauchschicht (%)		4	3	0,3	5	27	0
Deckung Krautschicht (%)		54	3	12	12	37	1
Deckung Moosschicht (%)		0	0,1	0	29	0	25
C/N gewichtetes Mittel		13,18	17,74	15,62	23,09	14,81	29,42
charakteristisches C/N Verhältnis (Ziff. 3 Öko-Code)			13 – 18	13 – 18	18 – 23	11 – 14	
Humusform nach KA5, Tab. 56-58		Mull	mullartiger Moder	F-Mull	Moder	Mull	Moder
Artname	**Schicht**	**Deckungsgrad in %**					
Acer platanoides	B1					1	
Acer pseudoplatanus	B1					10	
Alnus glutinosa	B1	40					
Betula pendula	B1						1
Carpinus betulus	B1	15		5			

Parameter		**Wald-Ökosysteme**					**Forst-Ökosysteme**
Ökosystem-Gruppe		**1.1.1.**	**1.6.2.**	**1.3.1.**	**1.3.1.**	**1.5.1.**	
Wald-Ökosystemtyp		**Dg-8z-D1**	**D1-6d-C2**	**Eb-5n-D1**	**Eb-5n-C2**	**Eg-5r-E1**	**Eb-4n-c2**
		Bergahorn-Schwarzerlen-Bergauenwald	Moder-Buchen-Bergwald	Braunmull-Buchenwald	Moder-Buntsand-Buchenwald	Bergulmen-Sommerlinden-Blockwald	Moder-Kiefernforst *)
Lebensraumtyp		**91E0***	**9110**	**9130**	**9110**	**9180***	**-**
Fagus sylvatica	B1		60	20	40		
Larix decidua	B1						3
Pinus sylvestris	B1						25
Salix caprea	B1	5					
Tilia cordata	B1					25	
Betula pendula	B2						1
Carpinus betulus	B2			10		1	
Fagus sylvatica	B2		25	30	20	1	5
Pinus sylvestris	B2						1
Quercus robur	B2					3	1
Tilia cordata	B2					10	
Ulmus glabra	B2					3	
Artname	**Schicht**	**Deckungsgrad in %**					
Acer platanoides	S					1	
Acer pseudoplatanus	S			0,1		3	
Corylus avellana	S					10	
Fagus sylvatica	S	0,2	3	0,2	5		
Lonicera xylosteum	S					3	
Quercus robur	S				0,1		
Ribes alpinum	S					5	
Rubus idaeus	S					0,1	
Sambucus nigra	S	1					
Sambucus racemosa	S					1	
Sorbus aucuparia	S		0,2			1	
Tilia cordata	S						
Ulmus laevis	S					3	
Artname	**Schicht**	**Deckungsgrad in %**					
Acer campestre	K	0,2					
Acer platanoides juv.	K			0,2			

Parameter		**Wald-Ökosysteme**					**Forst-Ökosysteme**
Ökosystem-Gruppe		**1.1.1.**	**1.6.2.**	**1.3.1.**	**1.3.1.**	**1.5.1.**	
Wald-Ökosystemtyp		**Dg-8z-D1**	**D1-6d-C2**	**Eb-5n-D1**	**Eb-5n-C2**	**Eg-5r-E1**	**Eb-4n-c2**
		Bergahorn-Schwarzerlen-Bergauenwald	Moder-Buchen-Bergwald	Braunmull-Buchenwald	Moder-Buntsand-Buchenwald	Bergulmen-Sommerlinden-Blockwald	Moder-Kiefernforst *)
Lebensraumtyp		**91E0***	**9110**	**9130**	**9110**	**9180***	**-**
Acer pseudoplatanus K.	K		0,1				
Acer pseudoplatanus juv.	K			0,2			
Aegopodium podagraria	K	0,2					
Ajuga reptans	K	0,2					
Alliaria petiolata	K	0,1					
Anemone nemorosa	K	3	0,2	0,2			
Arum maculatum	K	0,2				1	
Athyrium filix-femina	K	0,2					
Brachypodium sylvaticum	K	0,2					
Cardamine flexuosa	K	0,1					
Cardamine impatiens	K					1	
Carex pilulifera	K		0,2				
Carex remota	K	3					
Carex sylvatica	K	0,2					
Chrysosplenium alternifolium	K	1					
Chrysosplenium oppositifolium	K	1					
Circea alpina	K	0,1					
Crataegus laevigata juv.	K	0,2					
Deschampsia cespitosa	K	3	0,1				
Dryopteris carthusiana	K					5	
Dryopteris dilatata	K	1					
Dryopteris filix-mas	K			1		1	
Epilobium spec.	K					0,2	
Fagus sylvatica K.	K					0,1	
Fagus sylvatica juv.	K	0,2	1	0,2	1		0,2
Festuca altissima	K			5		1	
Festuca gigantea	K				1		
Galium aparine	K	0,2				1	

Parameter		**Wald-Ökosysteme**					**Forst-Ökosysteme**
Ökosystem-Gruppe		**1.1.1.**	**1.6.2.**	**1.3.1.**	**1.3.1.**	**1.5.1.**	
Wald-Ökosystemtyp		**Dg-8z-D1**	**D1-6d-C2**	**Eb-5n-D1**	**Eb-5n-C2**	**Eg-5r-E1**	**Eb-4n-c2**
		Bergahorn-Schwarzerlen-Bergauenwald	Moder-Buchen-Bergw.	Braunmull-Buchenw.	Moder-Buntsand-Buchenw.	Bergulmen-Sommerlinden-Blockwald	Moder-Kiefernforst *)
Lebensraumtyp		**91E0***	**9110**	**9130**	**9110**	**9180***	**-**
Galium odoratum	K			1		3	
Galium sylvaticum	K					1	
Glechoma hederacea	K	0,2					
Hypericum hirsutum	K					0,2	
Impatiens noli-tangere	K	1					
Impatiens parviflora	K					1	
Lamium galeobdolon	K	3					
Larix decidua	K						0,2
Luzula luzuloides	K		0,2		5		
Mercurialis perennis	K			1		20	
Moehringia trinervia	K					0,2	
Oxalis acetosella	K	1	0,2	1			
Phyteuma nigrum	K	0,1					
Pinus sylvestris juv.	K						0,1
Poa nemoralis	K	0,2					
Polypodium vulgare	K				0,2		
Prunus avium juv.	K		0,1				
Quercus robur juv.	K				0,1		0,1
Ranunculus ficaria	K	30					
Rosa cf. arvensis	K					0,2	
Rumex sanguineus	K	1					
Sambucus racemosa	K	0,1		0,2			
Scrophularia nodosa	K			0,1			
Sorbus aucuparia	K						
Sorbus aucuparia juv.	K		0,2				
Stachys sylvatica	K	1					
Stellaria nemorum	K	1					
Urtica dioica	K	1		0,2		1	
Vaccinium myrtillus	K				3		

Parameter		Wald-Ökosysteme					Forst-Ökosysteme
Ökosystem-Gruppe		**1.1.1.**	**1.6.2.**	**1.3.1.**	**1.3.1.**	**1.5.1.**	
Wald-Ökosystemtyp		**Dg-8z-D1**	**D1-6d-C2**	**Eb-5n-D1**	**Eb-5n-C2**	**Eg-5r-E1**	**Eb-4n-c2**
		Bergahorn-Schwarzerlen-Bergauenwald	Moder-Buchen-Bergw.	Braunmull-Buchenw.	Moder-Buntsand-Buchenw.	Bergulmen-Sommerlinden-Blockwald	Moder-Kiefernforst *)
Lebensraumtyp		**91E0***	**9110**	**9130**	**9110**	**9180***	**-**
Acer spec. K.	K			1			
Deschampsia flexuosa	K				1		0,2
Dianthus gratianopolitanus	K						0,2
Fagus sylvatica K.	K		1	0,2	0,2		0,2
Artname	**Schicht**	**Deckungsgrad in %**					
Polytrichum commune	M				8		
Polytrichum formosum	M		0,1				
Rhytidiadelphus loreus	M				1		
Cladonia spec.	M						10

Aufgrund angenommener geometrischer Unsicherheiten wurden Übereinstimmungen in einem 50 m – Puffer um die Vegetationsaufnahmepunkte geprüft. Im Ergebnis waren an 18 von 82 Vegetationsstandorten (= 22 %) die Ökosystemtypen durch die regelbasierte Kartierung richtig im Sinne aller drei Standortmerkmalgruppen des ANOEST-Schlüssels klassifiziert. Häufige Fehlklassifikationen betrafen – wie auch bei der bundesweiten Karte der ANOEST – die Zuordnung zur Höhenstufe (z. B. Eb-5n-C2 statt D1-5n-C2, Eb-5n-D1 statt D1-6d-D1, Eg-5n-c2 statt Dg-5n-c2), aber auch teilweise Zuordnungen zum Stoffhaushaltstyp (z. B. Eb-5n-D1 statt Eb-5n-D1a, Eg-7g-C1 statt Eg-7g-D1). Bei den Fehlklassifikationen handelt es sich somit häufig um im Vergleich zur regelbasierten Kartierung ähnliche, sich ökologisch nahestehende Ökosystemtypen.

Darüber hinaus wurden durch Geländebegehung im Juni 2015 sechs ANOEST-Flächenobjekte unter Hinzuziehung von Experten der Nationalparkverwaltung überprüft. Für diese Flächenobjekte erfolgten vereinfachte Aufnahmen folgender Parameter (Tab. 6).

1. Anzahl der Vegetationsschichten im Wald und deren jeweiliger Deckungsgrad bezogen auf die Probefläche [in %].
2. Liste aller in der jeweiligen Probefläche vorkommenden höheren Pflanzen und Moose,
3. Deckungsgrad der Arten bezogen auf die Probefläche z. B. nach Londo (1974) [in %].

Dieser Vergleich ergab eine geschätzte thematische Genauigkeit der regelbasierten Kartierung von 80 – 90 %.

3.2.3 Anpassung an die Validierungsdaten

Die in der Qualitätsprüfung festgestellten Fehlklassifikationen wurden genutzt, um die regelbasierte Kartierung an die Validierungsdaten anzupassen. Dies betraf insbesondere Erweiterungen zugunsten des Moder-Buchen-Bergwald (D1-5n-C2), Sandbraunmull-Buchenwaldes (Eb-5n-D1a), Braunmull-Buchen-Bergwaldes (D1-6d-D1) und Braunmull-Stieleichen-Hainbuchen-Feuchtwaldes (Eg-7g-D1), zulasten des Moder-Buntsand-Buchenwaldes (Eb-5n-C2), Braunmull-Buchenwaldes (Eb-5n-D1) sowie des Moder-Stieleichen-Hainbuchen-Feuchtwaldes (Eg-7g-C1) (Tab. 7). Ökosystemtypen, die nur mit einer Vegetationsaufnahme belegt waren, wurden bei der Qualitätsverbesserung der OEST-Karte nicht berücksichtigt.

3.3 Diskussion

Die regelbasierte Kartierung liefert ein approximatives Resultat (Hypothesenkarte), dessen thematische Richtigkeit durch Hinzuziehung von Vegetationsaufnahmen unter Einhaltung einer erforderlichen Mindestprobenzahl (MPZ) quantifiziert werden kann. Die Überprüfung durch Experten im Gelände war – ohne den zu diesem Zeitpunkt noch nicht vorliegenden Kartierschlüssel (Schröder et al. 2018, Bd. 3) – kaum geeignet, da allein mit den Informationen aus den Steckbriefen zu den Ökosystemtypen, d. h. ohne Vegetationsaufnahmen mit anschließender Auswertung anhand der Referenzzustände eine Unterscheidung ökologisch nahestehender Ökosystemtypen auch erfahrenen Experten oftmals

Tab. 7: Flächenbilanzierung der im Nationalpark Kellerwald-Edersee kartierten Ökosystemtypen (Zeitraum 1991 – 2010).

Tab. 7: *Area calculation for the ecosystem types mapped in the Kellerwald-Edersee National Park (period 1991 – 2010).*

Öko-Code	Bezeichnung	Variante A		Variante B	
		Flächengröße [ha]	Flächenanteil [%]	Flächengröße [ha]	Flächenanteil [%]
D1-5n-C2	Moder-Buchen-Bergwald	852,74	16,81	3165,70	62,39
D1-6d-E1	Mull-Buchen-Bergwald	15,31	0,30	15,31	0,30
D1-6d-D1	Braunmull-Buchen-Bergwald	---	---	42,61	0,84
Dg-5n-b1	Rohhumus-Fichten-Bergforst	0,76	0,01	0,76	0,01
Dg-5n-c2	Moder-Douglasien-Bergforst	61,82	1,22	61,82	1,22
Eb-4n-c2	Moder-Kiefernforst	163,15	3,22	163,15	3,22
Eb-5n-C2	Moder-Buntsand-Buchenwald	2732,36	53,85	410,55	8,09
Eb-5n-D1	Braunmull-Buchenwald	118,44	2,33	5,55	0,11
Eb-5n-D1a	Sandbraunmull-Buchenwald	---	---	79,13	1,56
Eg-2r-E2	Traubeneichen-Felstrockenwald	12,07	0,24	12,07	0,24
Eg-4n-b1	Rohhumus-Lärchenforst	29,68	0,59	29,68	0,59
Eg-5n-c1	Moder-Eichenforst	175,26	3,45	175,26	3,45
Eg-5n-c2	Moder-Fichtenforst	682,87	13,46	682,87	13,46
Eg-5r-E1	Bergulmen-Sommerlinden-Blockwald	17,30	0,34	17,30	0,34
Eg-7g-C1	Moder-Stieleichen-Hainbuchen-Feuchtwald	33,20	0,65	21,76	0,43
Eg-7g-D1	Braunmull-Stieleichen-Hainbuchen-Feuchtwald	---	---	11,44	0,23
Dg-8z-D1	Bruchweiden-Schwarzerlen-Auenwald	21,67	0,43	21,67	0,43
Sonstige	Offenland, Gewässer, Wege	157,30	3,10	157,30	3,10
Summe		5073,94	100	5073,94	100

Variante A = regelbasierte Kartierung; Variante B = regelbasierte Kartierung nach Anpassung an die Validierungsdaten

schwer viel. Beispielsweise konnte zwischen Buchenwäldern des unteren Berglandes (Stufe E) und Buchenwäldern des Berglandes (Stufe D) im Gelände nicht sicher differenziert werden. Potenziale der regelbasierten Methodik liegen aber in einer im Vergleich zur Geländekartierung effizienten Kartierung in einem für die Praxis (z. B. Naturschutz, Forstwirtschaft) gebräuchlichen Maßstabsbereich (1 : 5.000 bis 1 : 25.000). Die auf vorhandenen Daten aufbauende Kartierung muss aber durch ein ausreichend dichtes Netz von Vegetationsaufnahmen ergänzt werden oder auf den Kartierschlüssel aufbauen, um eine realitätsnähere Ansprache der Ökosystemtypen zu gewährleisten. Aber auch bei der Bestimmung des wahrscheinlichsten Ökosystemtyps aus den Vegetationsaufnahmen (Schröder et al. 2018, Bd. 1: Kapitel 5) ist zu beachten, dass die Ermittlung der Kullback-Distanz eine entsprechende Referenzbeschreibung voraussetzt. Die geringste Distanz führt also nicht in jedem Fall zum richtigen Ökosystemtyp, wie am Beispiel eines Sandbraunmull-Buchenwaldes (Eb-5n-D1a, Standort PW1), der pflanzensoziologisch zum Winkelseggen-Erlen-Eschen-Wald (Carici remotae-Fraxinetum) und damit zum Bergahorn-Schwarzerlen-Bergauenwald (Dg-8z-D1, ohne Referenzzustand) zu stellen wäre, deutlich wurde. Ähnliches trat bei einem Bergulmen-Sommerlinden-Blockwald (Eg-5r-E1, Standort PW5) auf, welcher aus demselben Grund fälschlicherweise zum Braunmull-Buchen-Bergwald (D1-6d-E1) gestellt wurde.

Danksagung

Für die finanzielle Förderung und den fachlichen Rat bedanken wir uns beim Umweltbundesamt (Dessau-Roßlau, Deutschland).

Literatur

BfN (Bundesamt für Naturschutz; Hrsg.) (2010): Karte der Potenziellen Natürlichen Vegetation Deutschlands, M 1 : 500.000. Bonn-Bad Godesberg, 24 S. Legende + 7 Karten.

CLC (2006): Karte der Bodenbedeckung, CORINE Land Cover 2006, URL: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster-2/clc-2006-100m/g100_06.zip/at_download/file/g100_06.zip

DDGI (2007): Qualitätsmodell für die Beschreibung von Geodaten (PAS 1071:2007-10). Beuth Verlag: Berlin, 14 S. + Anh.

Friedrichs, J. (1990): Methoden empirischer Sozialforschung, 14. Aufl., Westdeutscher Verlag, Opladen, 430 S.

Hofmann, G. (2002): Entwicklung der Waldvegetation des nordostdeutschen Tieflandes unter den Bedingungen steigender Stickstoffeinträge in Verbindung mit Niederschlagsarmut. Mit Anlagen. In: Anders, S. et al (eds): Ökologie und Vegetation der Wälder Nordostdeutschlands. Dr. Kessel: Oberwinter: 24-41, 201-283 (www.forstbuch.de).

HVBG (2014): Digitales Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM) von Hessen. Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation. http://www.hvbg.hessen.de

Jenssen, M. (2010): Modellierung und Kartierung räumlich differenzierter Wirkungen von Stickstoffeinträgen in Ökosysteme im Rahmen der UNECE-Luftreinhaltekonvention. Teilbericht IIII: Modellierung der Wirkung der Stickstoff-Deposition auf die biologische Vielfalt der Pflanzengesellschaften von Wäldern der gemäßigten Breiten. UBA-Texte 09/2010. Dessau-Roßlau.

Jenssen, M., Hofmann, G., Nickel, S., Pesch, R., Riediger, J., Schröder, W. (2013): Bewertungskonzept für die Gefährdung der Ökosystemintegrität durch die Wirkungen des Klimawandels in Kombination mit Stoffeinträgen unter Beachtung von Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Forschungsvorhaben 3710 83 214, UBA-FB 001834. UBA-Texte 87/2013. Dessau, Textband + 9 Anhänge: 381 S.

Jenssen, M., Schröder, W., Nickel, S. (2015): Typisierung von Wald- und Forstökosystemen als Grundlage zur Einstufung ihrer Integrität. Integrität von Wald- und Forstökosystemen unter dem Einfluss von Klimawandel und atmosphärischen Stickstoffeinträgen – Teil I. Naturschutz und Landschaftsplanung **47**(12): 391-399.

Jenssen, M., Nickel, S., Schröder, W. (2019): 61 Referenzzustände zur Beurteilung der ökologischen Integrität von Wald- und Forstökosystemen, Link zu Forschungsdaten (Version v1) [Data set]. ZENODO, http://doi.org/10.5281/zenodo.2582888

Kullback, S. (1959): Information Theory and Statistics. Wiley: New York/London, 395 p.

Londo, G. (1974): The decimal scale for relevés of permanent quadrats. In: Knapp, R. (ed.): Sampling methods in vegetation science: p. 45-49. W. Junk Publishers, The Hague/Boston/London.

Meyer, P. (2012): Auf dem Weg zum Naturwald. Standortbestimmung des Nationalparks Kellerwald-Edersee auf Grundlage der permanenten Stichprobeninventur 2007-2009. 3. Hessisches Naturwaldforum Buche, 5.–6. Mai 2010, Bad Wildungen, Proceedings: 11-14.

Nickel, S., Schröder, W., Jenssen, M. (2015): Veränderungen deutscher Wälder durch Klimawandel und Stickstoffdeposition. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen **166**(5): 325-334.

Riecken, U., Finck, P., Raths, U., Schröder, E., Ssymank, A. (2006): Rote Liste der gefährdeten Biotoptypen Deutschlands. Natursch. Biol. Vielf. **34**: 1-318.

Schröder, W., Nickel, S., Jenssen, M., Riediger, J. (2015): Methodology to assess and map the potential development of forest ecosystems exposed to climate change and atmospheric nitrogen deposition: a pilot study in Germany. Science of the Total Environment **521-522**:108-122.

Schröder, W., Nickel, S., Jenssen, M., Hofmann, G., Schlutow, A., Nagel, H.-D., Burkhard, B., Dworczyk, C., Elsasser, P., Lorenz, M., Meyerhoff, J., Weller, P., Altenbrunn, K. (2018): Anwendung des Bewertungskonzepts für die Ökosystemintegrität unter Berücksichtigung des Klimawandels in Kombination mit Stoffeinträgen. Abschlussbericht Forschungsvorhaben UFOPLAN 3713 83 254 im Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, **Bd. 1**: 1-493 + 7 Anhänge, **Bd. 2**: 1-343, **Bd. 3**: 1-303. Dessau.

Ssymank, A., Hauke, U., Rückriem, C., Schröder. E. (1998): Das europäische Schutzgebietssystem NATURA 2000. BfN-Handbuch zur Umsetzung der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (92/43/EWG) und der Vogelschutz-Richtlinie (79/409/EWG). Schriftenr. Landschaftspfl. Natursch. **53**: 1-560.

Willmanns, O. (1998): Ökologische Pflanzensoziologie – eine Einführung in die Vegetation Mitteleuropas. 6. Aufl., Quelle & Meyer: Wiesbaden, 479 S.

submitted: 25.03.2019
reviewed: 01.04.2019
accepted: 03.04.2019

Autorenanschriften:

Dr.-Ing. Stefan Nickel, M.Sc.
Lehrstuhl für Landschaftsökologie, Universität Vechta
Postfach 1553
49364 Vechta
E-Mail: stefan.nickel@uni-vechta.de

Prof. Dr. rer. nat. Winfried Schröder, M.A.
Lehrstuhl für Landschaftsökologie, Universität Vechta
Postfach 1553
49364 Vechta
E-Mail: winfried.schroeder@uni-vechta.de

Dipl.-Biol. Barbara Völksen
PlanWerk – Büro für ökologische Fachplanungen
Unterdorfstr. 3
63667 Nidda
E-Mail: b.voelksen@planwerk-nidda.de