©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

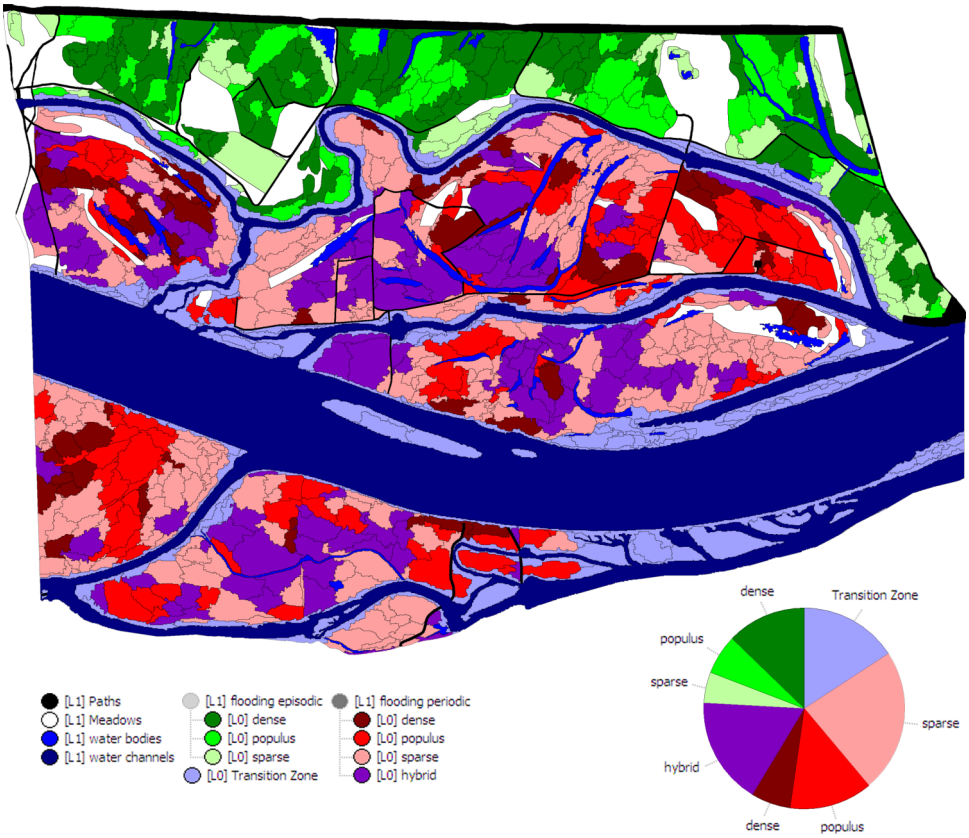
WISSENSCHAFTLICHE REIHE

Heft 57/2016

Die Anwendung von Objekt-basierten Bildklassifikationsverfahren zur Erstellung eines hierarchischen Klassifizierungssystems der offenen Au im Nationalpark Donau-Auen

In der vorliegenden Arbeit werden neue Methoden der Fernerkundung mit landschaftsökologischen Konzepten kombiniert um ein Klassifizierungssystem der offenen Au zu erstellen.

Iris Wagner



KOSTBARE NATUR FÜR GENERATIONEN
nationalpark donauauen

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

Die Anwendung von Objekt-basierten Bildklassifikationsverfahren zur Erstellung eines hierarchischen Klassifizierungssystems der offenen Au im Nationalpark Donau-Auen

Iris Wagner

November 2008

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

I began at the top end and I've been working my way down ever since

Orson Welles

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

"[I]n every respect the valley rules the stream. Its rock dominates the availability of ions, its soil, its clay, even its slope. The soil and the climate determine the vegetation, and the vegetation rules the supply of organic matter. The particulate nitrate and phosphate control the decay of the litter, and hence lie right at the root of the food cycle [...]. These relationships [...] make it clear that every stream is likely to be individual and thus not really very easily classifiable"

Hynes (1975)

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

ZUSAMMENFASSUNG

Die rund 50 km lange freie Fließstrecke der Donau zwischen Wien und der österreichischen Staatsgrenze stellt eine der letzten größeren, zusammenhängenden Auenlandschaften in Europa dar. Jedoch ist die größtenteils noch intakte hydrologische Konnektivität der Auen mit dem Hauptstrom zunehmend durch das Absinken des Grundwasserspiegels gefährdet. In Restaurationsprojekten wird daher versucht eine Verbesserung der ökologischen Situation im Nationalpark Donauauen zu erreichen.

In der vorliegenden Arbeit werden neue Methoden der Fernerkundung mit landschaftsökologischen Konzepten kombiniert um ein Klassifizierungssystem der offenen Au zu erstellen. Das *Hierarchical patch dynamic* (HPD) Paradigma ermöglicht die konzeptionelle Gliederung von räumlich-zeitlichen Mustern und Prozessen in einem hierarchischen Patch-Mosaik Netzwerk. Objekt-basierte Bildklassifikationsverfahren (*Object-based image analysis*, OBIA) erlauben deren räumliche Modellierung durch ein hierarchisches Bild-Objekt Netzwerk. Bild-Objekt Netzwerke werden durch *Multi-resolution Segmentation* von Fernerkundungs- und Geodaten konstruiert, wobei homogene Bereiche in den unterschiedlichen Skalierungsniveaus zu Bild-Objekten zusammengefasst werden. Die Bild-Objekte können durch ihre Eigenschaften (Spektrale Information, Shape und Textur), ihre Nachbarschafts- und hierarchischen Beziehungen definiert werden.

Das hierarchische Bild-Objekt Netzwerk der offenen Au im Nationalpark Donauauen wurde durch drei Ebenen unterschiedlichster Skalierung anhand von semantischen *Rule sets* definiert. Die Waldgesellschaften (Focal level, Level 0) wurden einerseits durch die oberste Ebene (Level 1) in unterschiedliche Überflutungszonen unterteilt und andererseits, basierend auf einem *Fuzzy Classification System* der untersten hierarchischen Ebene (Level -0), durch ihre spektralen und räumlichen Eigenschaften charakterisiert. Dieser Merkmalsraum bildete die Grundlage für die Klassendefinition im *Nearest Neighbour Classification System*, wobei die 2006 erhobenen Vegetationsaufnahmen als Referenzsystem dienten.

Das entwickelte semantische *Rule set* wurde auf ein Teilgebiet der offenen Au, im Bereich der Großen und Kleinen Binn nahe Orth a. d. Donau, angewandt. Innerhalb des Teilgebietes konnten 43% der Fläche als *Fraxino-Populetum* Bestände unterschiedlicher Ausprägung klassifiziert werden, während die des *Fraxino-Ulmetum* nur 14% der Fläche bedecken. 27% der Fläche nehmen die Donau, ihre angebundenen Seitenarme und Altarme ein. Die aufgrund ihrer räumlichen Nähe zu den Gewässern definierten Ökotone werden mit einem Flächenanteil von 16% ausgewiesen. Die Genauigkeit der Klassifizierungsmethoden wurde mittels zwei verschiedenen Bewertungsverfahren überprüft. Basierend auf den Kategorien von Landis & Koch (1977) konnten die unterschiedlichen Ausprägungen der Waldhabitate als „nahezu perfekt“ bzw. aufgrund ihrer Vegetationszusammensetzung sehr ähnliche Habitate als „substantiell“ klassifiziert werden. Die Gesamtgenauigkeit basierend auf einer „Error

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

matrix based on samples“ liegt bei 90% und der KIA-Wert bei 87%. Diese Werte weisen auf ein insgesamt präzises Klassifizierungssystem hin und verdeutlichen, dass der umfangreiche Merkmalsraum, definiert durch Objekt-Eigenschaften, Nachbarschafts- und hierarchische Beziehungen der Bild-Objekte sowie die Gliederung in einem hierarchischen Objekt-Netzwerk, die Definition von einem komplexen Klassifizierungssystem ermöglicht. Im Gegensatz zu Pixel-basierten Klassifizierungsmethoden werden räumliche Muster in einer Objekt-basierten Umgebung besser erkannt. Der Prozess-orientierte Ablauf in Form von semantischen *Rule sets* erlaubt einerseits die Einbindung von Expertenwissen und ermöglicht andererseits die Erstellung von reproduzierbaren, standardisierten Klassifikationssystemen, weshalb diese bei Bedarf für spezifische Fragestellungen adaptiert und erweitert werden können.

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung 7
2. Das Flussbauliche Gesamtprojekt östlich von Wien 9
3. Manuscript for publication 11
3.1 Introduction 12
3.2 Study Site 13
3.3 Methods 16
3.3.1. Image pre-processing and thematic layer 16
3.3.2. Field data 18
3.3.3. Hierarchical object network 19
3.3.3.1. Super objects (Level 1) 20
3.3.3.2. Object primitives (Level -1) 21
3.3.3.3. Semantic objects (Focal Level, Level 0) 21
3.3.4. Accuracy assessment 23
3.4. Results and discussion 23
3.4.1. Super objects (Level 1) 23
3.4.2. Object primitives (Level -1) 24
3.4.3. Semantic objects (Focal Level, Level 0) 27
3.5. Conclusion 30
4. APPENDIX I: Rule-Sets 32
5. APPENDIX II: Die Wälder der offenen Au – Geländedaten 34
5.1. Einleitung 34
5.2. Methodik 36
5.3. Ergebnisse und Diskussion 38
5.3.1. Classes Flooding periodic: sparse | populus | dense | hybrid – “Weiche Au“ 39
5.3.2. Classes Flooding episodic: sparse | populus | dense – “Harte Au” 40
5.3.3. Class Transition Zone – Ökotone der Fließgewässer 42
5.4: Anhang: Beispiel einer Geländekarte 43
6. Literaturverzeichnis 44

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

1. EINLEITUNG

Fließgewässersysteme formen, obwohl als azonale Ökosysteme definiert, seit Jahrtausenden unsere Landschaft. Durch den ständigen Wechsel von Erosion und Akkumulation haben sich tief eingeschnittene Flusstäler, aber auch breite Tallandschaften, entwickelt. Diese Dynamik ist jedoch aufgrund des zunehmenden menschlichen Einflusses stark gestört und so finden sich in Mitteleuropa kaum noch unregulierte oder freie Fließstrecken entlang der größeren Fließgewässer (Drescher & Fraissl 2006). Fließgewässer bzw. Feuchtgebiete im Allgemeinen sind daher vielfach Ziel von internationalen und nationalen Schutzprogrammen (z. B. Ramsar Konvention, EU Wasserrahmenrichtlinie) und auch das *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA) widmet diesem Thema einen eigenen Bericht „*Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water Synthesis"* (Millennium Ecosystem Assessment 2005). Das MEA unterstreicht damit die globale Bedeutung von Feuchtgebieten und hebt besonders die Wichtigkeit eines nachhaltigen Flussgebietsmanagements hervor. Nachhaltiges Management bedarf jedoch der Kenntnis der wirksamen räumlich-zeitlichen Schlüsselprozesse und Muster (Ward et al. 2002) auf Basis eines multidimensionalen, hierarchischen Ansatzes (Finlayson et al. 2002).

Ein erstes hierarchisches Klassifizierungssystem für Fließgewässer wurde von Frissell et al. (1986) beschrieben, wobei er versuchte, Konzepte der Fließgewässerökologie (*River Continuum Concept*, Vannote et al. 1980; Tabelle 1) mit jenen der Landschaftsökologie (*Patch mosaic*, Forman 1995) in einem hierarchischen System zu organisieren. Poole (2002) erweiterte dieses System um das von Wu & Loucks (1995) propagierte *Hierarchical patch dynamic* (HPD) Paradigma als zentrales Konzept der Landschaftsökologie sowie um neuere Konzepte der Fließgewässerökologie (Tabelle 1). Räumlich-zeitliche Muster und Prozesse können so als hierarchisches Netzwerk innerhalb der longitudinalen, lateralen und vertikalen Konnektivität von Fließgewässersystemen für jeden Fluss spezifisch definiert werden.

Tabelle 1: Konzepte der Fließgewässerökologie

Konzept	Beschreibung
RIVER CONTINUUM CONCEPT	Beschreibt die Veränderung des Fließgewässersystems entlang seines longitudinalen Verlaufs von der Quelle bis zur Mündung. Abiotische und dadurch auch biotische räumliche Prozesse und Muster ändern sich kontinuierlich entlang der Fließstrecke (Vannote et al. 1980).
SERIAL DISCONTINUUM CONCEPT (Hyporheic Corridor Concept)	Eine Adaption des *River Continuum Concepts* auf die heutige Situation der Fließgewässersysteme, welche durch flussbauliche Maßnahmen in ihrem Kontinuum immer wieder unterbrochen sind (Diskontinuum). Longitudinale, vertikale und laterale räumliche Prozesse und Muster charakterisieren das Fließgewässersystem (Ward & Stanford 1983, 1995; Stanford & Ward 1993, 2001).

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

FLOOD PULSE CONCEPT	Bezieht die Auenökosysteme in das Fließgewässersystem mit ein. Die Hochwasserdynamik wird als zeitlicher Schlüsselprozess definiert, welcher die räumlichen Muster bestimmt (Junk et al. 1989, Tockner et al. 2000).

Das HPD Paradigma nach Wu & Loucks (1995) umfasst zwei unterschiedliche Ansätze in der Ökologie: (I) Das *Patch mosaic* Konzept (Forman 1995) unterteilt Landschaften in homogene Einheiten (Patches). (II) Die *Hierarchy theory* hingegen beschreibt die Tendenz von komplexen Systemen sich in hierarchisch gegliederten Subsystemen zu organisieren (O'Neill et al. 1986). Die Kombination von beiden Ansätzen im HPD Paradigma ermöglicht die konzeptionelle Gliederung von räumlich-zeitlichen Mustern und Prozessen in einem hierarchischen Patch-Mosaik Netzwerk (Wu & Loucks 1995) und erlaubt so eine Modellierung von komplexen Landschaften durch Objekt-orientierte Ansätze (Poole 2002).
Auch in der Fernerkundung hat sich das HPD Paradigma im *Object-based image analysis* (OBIA) Ansatz etabliert, wobei hier die Patches als homogene *Image-Objects* innerhalb eines multidimensionalen Netzwerks aufgefasst werden (Burnett & Blaschke 2003). Dies führte zeitgleich zur Entwicklung einer speziellen, Objekt-orientierten Bildklassifikationssoftware *Definiens Professional* der Firma Definiens AG (in früheren Versionen als *eCognition* bezeichnet und mittlerweile Teil des *Definiens Developer 7*) abseits der gängigen Fernerkundungssoftware wie z. B. *ERDAS Imagine*. Fernerkundungsdaten in Kombination mit Geodaten können mit dieser kommerziellen Software in einem multidimensionalen hierarchischen Netzwerk basierend auf semantischen Rule-sets klassifiziert werden (Details siehe Manuscript for publication). OBIA ermöglicht durch die Integration von Expertenwissen (in Form der semantischen Rule-sets), mit neuen Methoden der Fernerkundung in einer Objekt-orientierten Umgebung, eine verbesserte Klassifikation von komplexen Landschaften, wie sie Flusslandschaften darstellen.

Die vorliegende Diplomarbeit versucht durch die Anwendung des *Object-based image analysis* Ansatzes auf die Donauauen östlich von Wien folgende Ziele zu erreichen: (I) die Entwicklung eines reproduzierbaren, standardisierten Klassifizierungssystems für die terrestrischen Lebensräume innerhalb der offenen Au (sensu Jelem 1974) im Nationalpark Donauauen, (II) die Integration von Expertenwissen in Form von semantischen Rule-sets in dieses System und (III) durch die Anwendung neuer Fernerkundungsmethoden, basierend auf vorhandenen räumlichen Daten (Orthofotos, Höhenmodell und Vektordaten), eine möglichst präzise semi-automatisierte Klassifikation der terrestrischen Lebensräume zu erstellen.
Die Umsetzung dieser Diplomarbeit erfolgte im Rahmen des „Flussbaulichen Gesamtprojekts östlich von Wien" innerhalb der Fachgruppe Ökologie.

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

2. DAS FLUSSBAULICHE GESAMTPROJEKT ÖSTLICH VON WIEN

Das „Flussbauliche Gesamtprojekt östlich von Wien“ (2002 - 2015) umfasst ein im Auftrag der VIADONAU (ehem. Österreichische Wasserstraßen GmbH) durchgeführtes integratives Gesamtprojekt mit dem Ziel die freie Fließstrecke (~ 50 km) zwischen dem Kraftwerk Freudenau bei Wien und der österreichischen Staatsgrenze zu stabilisieren.

Tabelle 2: Hauptzielsetzungen der einzelnen Fachgruppen innerhalb des Flussbaulichen Gesamtprojekts (VIADONAU, 2006)

WASSERBAU	----->	Stabilisierung der Sohlerosion
ÖKOLOGIE	----->	Nachhaltige Verbesserung der Auenökosysteme
SCHIFFFAHRT	----->	Sicherung der Fahrwassertiefen bei Regulierungsniedrigwasser (RNW)

Dies soll durch eine Reihe von integrierten Maßnahmen des Wasserbaus, der Ökologie und der Schifffahrt erreicht werden:

(I) Eine <u>granulometrische Sohlstabilisierung</u> soll durch die Zugabe von Kies- und Schottermaterial unterschiedlicher Korngröße der zunehmenden Eintiefung (Sohlerosion) der Donau entgegenwirken. Die Sohlerosion ist bedingt durch die stark veränderte hydromorphologische Dynamik der Donau (ca. 2 - 3,5 cm pro Jahr), da aufgrund der stromaufwärts liegenden Kraftwerke keine durchgehende Konnektivität des Fließgewässersystems mehr gegeben ist. Die fehlende natürliche Geschiebefracht verursacht eine zunehmende Erosion der Stromsohle und dadurch auch ein Absinken des Grundwasserspiegels in den angrenzenden Auenökosystemen. Durch die Sohlstabilisierung soll der Wasserspiegel insgesamt angehoben werden, wodurch die laterale Konnektivität der Augewässer zum Hauptstrom verbessert würde (VIADONAU, 2006).

(II) Der <u>Uferrückbau</u> von befestigten Böschungen an Gleitufern soll eine weitgehend natürliche hydro-morphologische Seitenerosion ermöglichen, wobei an stark zur Erosion neigenden Abschnitten eine Befestigung auf Höhe des Regulierungsniedrigwasser (RNW) erhalten bleibt. An unbefestigten Ufern können sich einerseits durch Umlagerungen wieder neue Pionierstandorte ausbilden, und andererseits bewirkt die mit dem Rückbau verbundene Querschnittsverbreiterung zusätzlichen Hochwasserschutz (VIADONAU, 2006).

(III) Die Fortführung der <u>Gewässervernetzung</u> soll eine verbesserte laterale Konnektivität der Augewässer an den Hauptstrom ermöglichen. Neben den bereits realisierten Vernetzungsprojekten bei Regelsbrunn, Maria Ellend, Orth a. d. Donau und Schönau soll durch weitere Anbindungsmaßnahmen der Nebengewässer im Nationalpark Donauauen den zunehmenden Verlandungstendenzen entgegengewirkt werden (VIADONAU, 2006).

(IV) Die <u>Niederwasserregulierung</u> soll durch den Bau neuer, tiefer liegender Buhnen bzw. Leitwerke höhere Fahrwassertiefen unter Regulierungsniedrigwasser (RNW) ermöglichen. Alte, nicht mehr benötigte bzw. eingeschotterte Buhnen werden dabei abgetragen (VIADONAU, 2006).

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

(V) Die schifffahrtstechnische Maßnahmen beinhalten die Optimierung sowie eine streckenweise Verlegung der Schifffahrtsrinne, wobei tiefere Sohlbereiche und Kolke als Fahrrinne genutzt werden sollen (VIADONAU, 2006).

Durch die integrative Umsetzung der oben genannten Maßnahmen soll aus Sicht der Fachgruppe Ökologie eine Verbesserung der ökologischen Situation gewährleistend werden.

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

3. MANUSCRIPT FOR PUBLICATION

Das nachfolgende „*Manuscript for publication*“ umfasst eine ausführliche Einführung in die Thematik, die Beschreibung des Untersuchungsgebietes und den detaillierten methodischen Ablauf, sowie Ergebnisse und Diskussion der vorliegenden Diplomarbeit.
Das Manuskript soll in gekürzter und leicht veränderter Form bei einem *Remote Sensing Journal* eingereicht werden. Weiters ist die Anwendung der Methode auf andere Teilbereiche innerhalb des Nationalparks Donauauen geplant.

THE DANUBE FLOODPLAIN HABITATS – APPLICATION OF THE OBJECT-BASED IMAGE ANALYSIS APPROACH

Abstract: In this paper, new remote sensing methods were applied to define a framework for the assessment of the hydrological connected floodplain habitats in the Danube Floodplain National Park (Eastern Austria). Based on semantic rule sets, a three level hierarchical object network was processed by multi-resolution segmentation of very high resolution (VHR) images and GIS-ready information. Within the object network, the floodplain habitats (Level 0) inherited their hydrological connectivity from the top level (Level 1) and the initial fuzzy classification from the lowest data-driven hierarchy level (Level -1). This feature space defined the class descriptions of the habitat types in the nearest neighbour classification system. In a subset near Orth a. d. Donau, in which the rule set was utilized, 43% of the floodplains were classified as Fraxino-Populetum, whereas Fraxino-Ulmetum habitats covered 14% of the area. The braided water channels and water bodies accounted for 27%, their aquatic -terrestrial transition zone for 16% of the area. The “Error matrix based on samples” showed an overall accuracy of 90% and a KIA value of 87%. The “strength of agreement” categorized every class as *almost perfect* and related habitat types with similar species composition as *substantial*. Compared to pixel-based classification, the hierarchical object network can compensate shortages in patch recognition and can serve as replicable, systematic framework for specific research topics and decision makers.

Key words: OBIA; process-based; orthorectified aerial images; Laser scan; conservation; monitoring; forestry; community; vegetation; expert-knowledge

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

3.1 Introduction

Wetlands cover more than 1.2 million square kilometres of land surface worldwide as estimated by the Millenniums Ecosystem Assessment (MEA, 2005). Wetlands are valuable ecosystems, which directly or indirectly benefit the human well-being by providing a broad range of ecosystem services and functions. Especially rivers and floodplains affect a broad range of adjacent ecosystems on large scale by their transport, buffer and supply functions, creating a mosaic of aquatic and terrestrial ecosystems (Millennium Ecosystem Assessment 2005). These riverine landscapes are heterogeneous habitat complexes, shaped by the spatio-temporal dynamics of the water regime (Ward et al. 2002b). Today, these landscapes are among those most affected by human activities worldwide. Most of the rivers and their floodplains in the developed countries have been modified in their water connectivity, vegetation structure and succession by alterations in their hydrological dynamics and hydromorphological processes (e.g. channel straightening, river embankments). Changes in land cover over centuries resulted in fragmentation and substantial loss of riverine landscapes, so that only a few intact riverine remnants are left in Europe. Preserving these remnants and improving their longitudinal and lateral connectivity is a priority objective of nature conservation and demands extended restoration projects (Lake et al. 2007). Hence, knowledge of the key spatio-temporal processes and patterns is necessary to maintain a near-natural condition (Ward et al. 2002a). For the assessment and management of wetlands by means of an implementation of a multi-scale hierarchical framework systematic and standardized approaches are essential (Finlayson et al. 2002).

A first hierarchical classification system for riverine landscapes was defined by Frissell et al. (1986), who created a conceptual multi-scaled framework to define the spatio-temporal processes and patterns along the longitudinal connectivity. Poole (2002) enhanced the multi-scaled framework by integrating the hierarchical patch dynamics (HPD) paradigm as proposed by Wu & Loucks (1995) to provide better understanding of the spatio-temporal processes and patterns in unique river systems. The paradigm combines two different concepts in ecology: (I) The concept of *patch mosaics,* which delineates landscapes consisting of homogeneous units (patches) (Forman 1995). (II) The *hierarchy theory* assumes that complex systems tend to organize themselves into nested subsystems. Each subsystem is defined by its own scale, processes and patterns within the hierarchical system (O'Neill et al. 1986). The HPD paradigm conceives landscapes as nested patch mosaic hierarchies (Wu & Loucks 1995). In a river system, the longitudinal hydrological dynamics and hydromorphological processes define the lateral structure in the lower hierarchy levels by determining the flooding frequency and duration. The lateral structure, in turn, influences the type and distribution of the habitats at the next lower levels (Poole 2002).

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

Due to the nested concept of the HPD, this paradigm can be utilized for object-based modelling of complex landscapes (Poole 2002). Based on the same conceptual framework as proposed by Wu & Loucks (1995), Peterseil et al. (2004) accomplished a model of the Austrian agricultural landscapes to map ecological sustainability by using an expert-knowledge fuzzy classification system based on the automatic segmentation of satellite images. A theoretical framework for object-based modelling of complex landscapes was formulated by Burnett & Blaschke (2003), where new remote sensing approaches and the HPD paradigm were combined to define a methodology for landscape analysis and classification, for which the term object-based image analysis (OBIA) was established (Blaschke et al. 2008). OBIA consists of (Burnett & Blaschke 2003; Benz et al. 2004): (I) the multi-resolution segmentation of remote sensing imagery, which enables the delineation of image objects simultaneously on different scales. (II) image objects, linked through a hierarchical object network, where each image object is described by its object features (spectral values, shape and texture), by neighbour and hierarchy-related features. (III) a classification of the image objects based on their feature space. Different supervised classification strategies can be combined within rule-based procedures to create a semantic classification system to represent real world objects. However, OBIA offers a detailed, process-oriented approach to assess heterogenic landscape mosaics and provides a systematic and standardized framework to integrate GIS-ready information and remote sensing data.

The present study attempted to apply the OBIA approach described above to assess the Danube River floodplain habitats between Vienna and the Austrian-Slovakian border to achieve the following objectives: (I) the definition of a replicable, standardized framework for the assessment of the Danube River floodplain forest habitats, (II) the integration of expert-knowledge into the framework and (III) to apply new remote sensing methods to create an accurate semi-automatic classification system based on available remote sensing data and GIS-ready information.

3.2 Study Site

The study was conducted in the Danube Floodplain National Park, which extends 50 km along the Danube River between Vienna and the Austrian-Slovakian border, comprising a total area of 115 km² (Figure 1). A subset near Orth a. d. Donau, which was part of a reconstruction project, was selected to apply the semi-automatic classification system.

The Upper Danube River is characterized by high current velocities in the main channel, coarse-grained sediments and high mean water levels during summer, forming broad alluvials with braided courses and extended floodplains. However, like all large river systems in Europe, the Danube has been strongly influenced by land cover changes and

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

modifications of the hydrological dynamics and hydromorphological processes (Schiemer et al. 1999). These alterations led to a massive loss of hydrological intact riverine landscapes during past decades. The Danube Floodplain National Park represents one of the last remnants of such landscapes in the whole Danube Basin, therefore it was declared as IUCN National Park in 1996. The free flowing stretch of the Danube and its connected side channels provide a partly functional longitudinal connectivity (e.g. flooding, sediment transport), whereas the river embankments and flood protection measures have reduced the lateral connectivity (e.g. sediment accumulation, water retention) (Schiemer et al. 1999; Tockner et al. 1999).

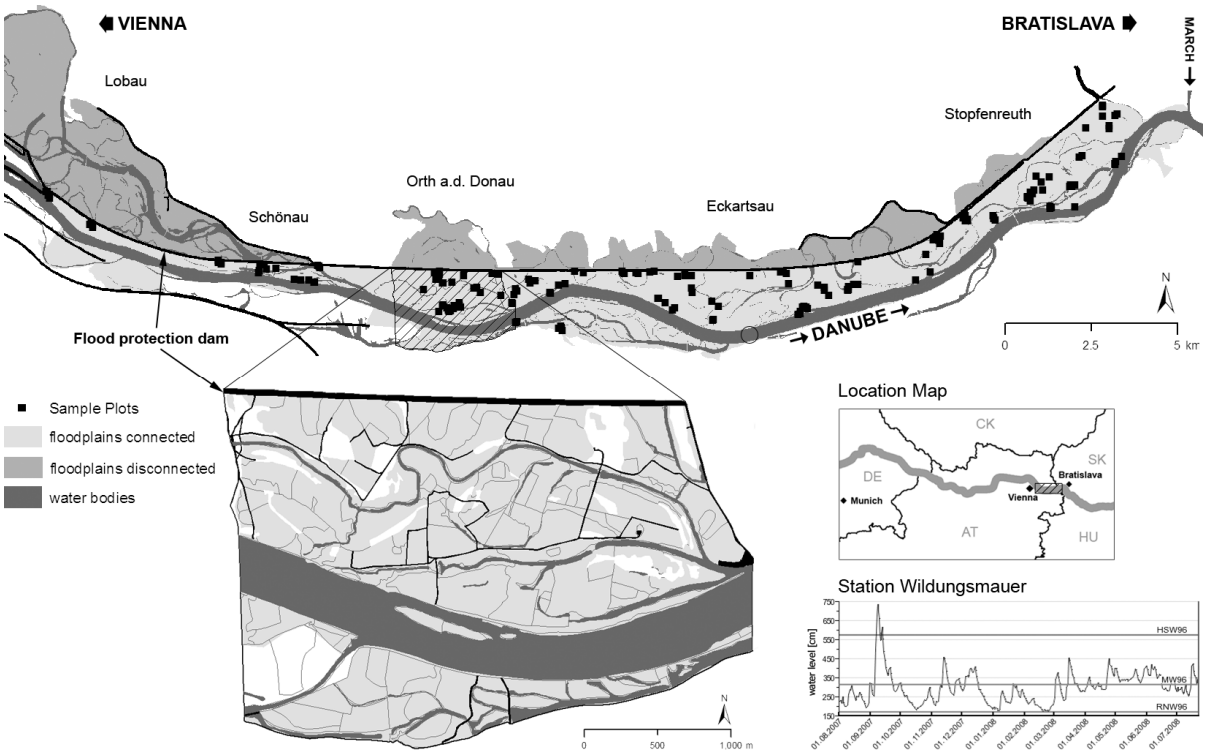


Figure 1: Location of the Danube Floodplain National Park between Vienna and the Austrian-Slovakian border. A flood protection dam (bold black lines) divides the the floodplains into a hydrological connected (light grey areas) and a disconnected (dark grey areas) part. Black squares mark the sample plots of the field data, collected in 2006. The subset near Orth a.d. Donau is shown magnified (bottom left). For the official water level station Wildungsmauer (circle), the water level curve for 2007 is shown bottom right. The lowest line marks the low water level (RNW96 = 139.48 cm), the centered line describes the mean water level (MW96 = 316 cm) and the upper line the highest navigable water level (HSW96 = 576 cm) (www.doris.bmvit.gv.at, www.noel.gv.at, accessed 23.07.2008).

A flood protection dam, which accompanies the Danube River from Vienna downstream to the Austrian-Slovakian border, divides the floodplains of the National Park into a hydrological connected and a disconnected part. In the connected part, the hydrological processes define the spatial extent of the floodplain complexes. Beyond the dam, the floodplains are connected by groundwater exchange solely, causing increased siltation and fragmentation (Figure 2) (Jelem 1974).

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

Mean monthly water level, flooding events and the groundwater level are the key spatio-temporal driving factors (Tockner et al. 1999) in the hydrological connected part. Their dynamics define vegetation structure and succession of habitat in the floodplain complexes. Each flooding event leads to erosion and accumulation at the aquatic-terrestrial transition zone (ecotone). According to the type of sediment accumulations, different succession states can be distinguished (Jelem 1974; Lazowski 1984), (Drescher & Fraissl 2006): (I) Gravel banks in the main channel are primarily populated by sparse grass communities (*Rumici crispi Agrostietum stoloniferae*, Moor 1958), followed by shrub willows (*Salix purpurea* L.). The willows are filtering finer sediments, causing sandy soil formations, where *Salix alba* is able to germinate. On coarser drier sediments, black poplar (*Populus nigra* L.) stands can be found. However, in most parts of the main channel, the embankments and ripraps inhibit the accumulation of coarse-grained sediments and therefore only sandy and silty sediments are transported into the floodplains. Hence, pioneer gravel habitats and their characteristic succession states have almost vanished (Drescher & Fraissl 2006). (II) The side channels and small tributaries are characterized by fine-grained, sandy sediments. Their banks are stabilized by narrow reed belts (*Rorippo-Phalaridetum,* Kopecky' 1961), whereas (III) reeds (*Phragmitetum australis,* Soó 1927) are typically forming broader belts surrounding oxbows. In contrast to the braided channels, the siltation here is mainly caused by organic accumulation.

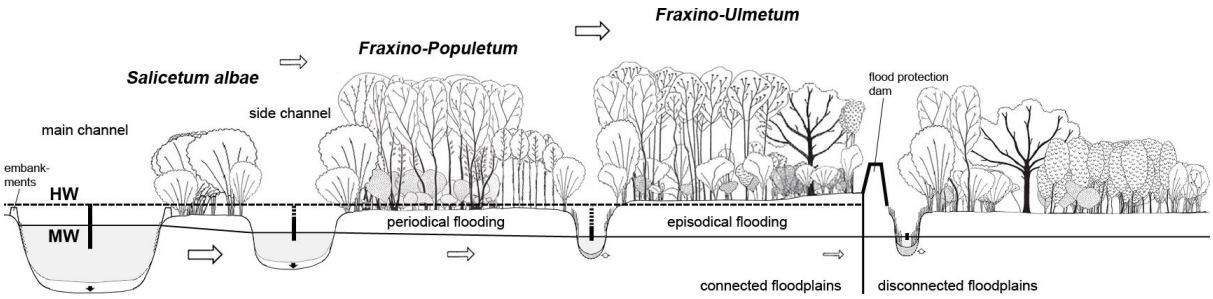


Figure 2: Hydrological connectivity and succession scheme in the Danube Floodplains near Vienna (modified after Schiemer et al. 1999; Drescher & Fraissl 2006). Main channel of the Danube River enclosed by embankments and ripraps, which alter the natural flooding dynamics. Floodplains adjacent to braided courses (*Salicetum albae*, followed by *Fraxino-Populetum* communities) mostly affected by water level fluctuations (HW, MW). Flooding events decrease with increasing distance to the main channel. High water levels (HW, dashed horizontal line) induce a higher ground water level (MW, horizontal line, vertical lines in the water bodies) in the floodplains. In the episodically flooded parts, the forest is developed as rich structured *Fraxino-Ulmetum* community. Beyond the flood protection dam, the floodplains are connected with the water body by groundwater exchange only.

Willows (*Salicetum albae*, Issler 1926) form the first adjacent forest community still strongly influenced by the dynamics of the water level. At higher levels, characterized by periodical flooding and increased soil formation, white poplars (*Populus alba*) or alders (*Alnus incana*) dominate the forests (*Fraxino-Populetum,* Jurko 1958). Alders are mainly distributed in

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

upstream areas, whereas white poplar natural frequency increases in lowlands downstream. However, the frequent occurrence of white poplars in the National Park is caused by clearcuts, followed by suckering leading to monodominant stands (Lazowski 1984). Due to the spreading of the Dutch elm disease (*Ophiostoma ulmi*), the white poplars often replaced the field elms (*Ulmus minor*), which almost disappeared from the canopy layer during the last decades (Kirisits & Konrad 2004).

With further distance from the braided channels the flooding events are becoming less frequent. Only extreme flooding events reach the outer part of the connected floodplains. The soil depth is increasing and the groundwater level drops. These changes in the environmental conditions modify the species composition and induce a shift in the abundance of species. The monodominant stand of alders or poplars are replaced manly by ashes (*Fraxinus excelsior*), accompanied by species like common oak (*Quercus robur*) and sycamore maple (*Acer pseudoplatanus*). This mixed forest community (*Fraxino-Ulmetum,* Tx. Ex Oberd. 1953) delineates the end of the succession state at the outer boundary of the floodplains and leads over to oak-hornbeam forests (*Carpinion*).

The tree species distribution, composition and abundance in the Danube floodplains were modified by forestry until recently. Clearcuts were the main coppice forest system in the connected floodplains, beside coppice-with-standards trees in the outer parts of the floodplains (Drescher & Fraissl 2006). Larger stands of poplar plantations (*Populus* x *canadensis*) can be found at *Salicetum albae* and *Fraxino-Populetum* habitats in the periodically flooded areas. Likewise the mixed forest communities (*Fraxino-Ulmetum*) in the episodically flooded parts were altered in their canopy layer, where now monodominant ashes and maples stands occur.

3.3 Methods

3.3.1. Image pre-processing and thematic layer

The object-based image analysis (OBIA) was conducted using orthorectified aerial images, covering the whole Danube Floodplain area, provided by VIADONAU. The images were taken in the course of the environmental impact assessment during the “Integrated River Engineering Project” (2002-2015). True-Colour (RGB) images originate from late spring 2006 and the Colour Infra-Red (CIR) images from the following vegetation period. For each image data set, the single images were combined into an image mosaic with a final pixel resolution of 1 m.

Due to the highly correlated spectral bands within the images, the bands of the two image sets were combined to enhance the spectral and textural feature space (Figure 3). Feature space analysis of the spectral bands showed a high correlation of the RGB bands (r = 0.96 -

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

0.98) and the Green and Blue band (r = 0.97) of the CIR image. A Principal Component Analysis (PCA) was performed to reduce the highly correlated spectral bands. Further image analysis was proceeded using the Infra-Red band (NIR) of the CIR image and the first axis of the PCA from the Green-Blue CIR (pcaCIR) and RGB images (pcaRGB).

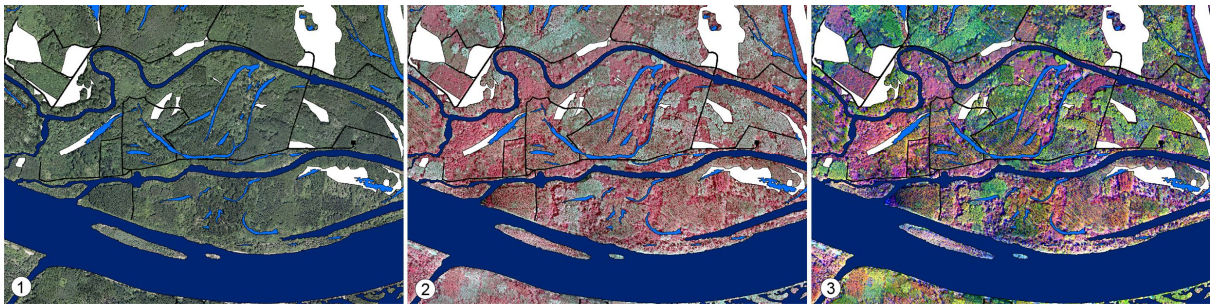


Figure 3: Orthorectified aerial images including the permanent water bodies (blue), paths (black) and meadows (white) RGB (1) and CIR (2) image bands were processed together (3) to enhance the spectral and textural variability.

A Laser scan conducted by TopoSys based digital elevation model (DEM) provided by VIADONAU with a resolution of 2.5 m was used as basis for the water level assessment in the hierarchical object network. The DEM was corrected (by the Department of Landscape, Spatial and Infrastructure Sciences (BOKU, Vienna) and by the Department of Conservation Biology, Vegetation- and Landscape ecology (University Vienna) in the course of restoration projects by order of the Danube Floodplain National Park) to adjust the downstream slope of the Danube River stretch within the study area. The permanent *water bodies* were defined using the official low water level value defined by the water level station Wildungsmauer (www.doris.bmvit.gv.at, www.noel.gv.at, accessed 23.07.2008) (Figure 1, station Wildungsmauer).

The digital habitat map (Umweltdata GmbH 1999) was used to implement the anthropogenic fragmentation in the hierarchical object network, by extracting the different grassland types as *meadows* and pathways as *paths*. The permanent *water bodies*, *meadows* and *paths* were merged to create a negative mask (Figure 4, 1), which was used to extract the image bands feature space of the remaining floodplains (Figure 4, 2-3). Based on the masked images, a classification into 32 quantile classes was conducted (rcNIR, rcCIR, rcRGB). The classification straightened the feature space to flatten the density distribution, which better fits into the fuzzy classification system, where the spectral values are divided into three vague classes. Finally, the classified images were smoothened using a low pass filter with a 3x3 kernel to eliminate single pixel distortion (Figure 4, 4).

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

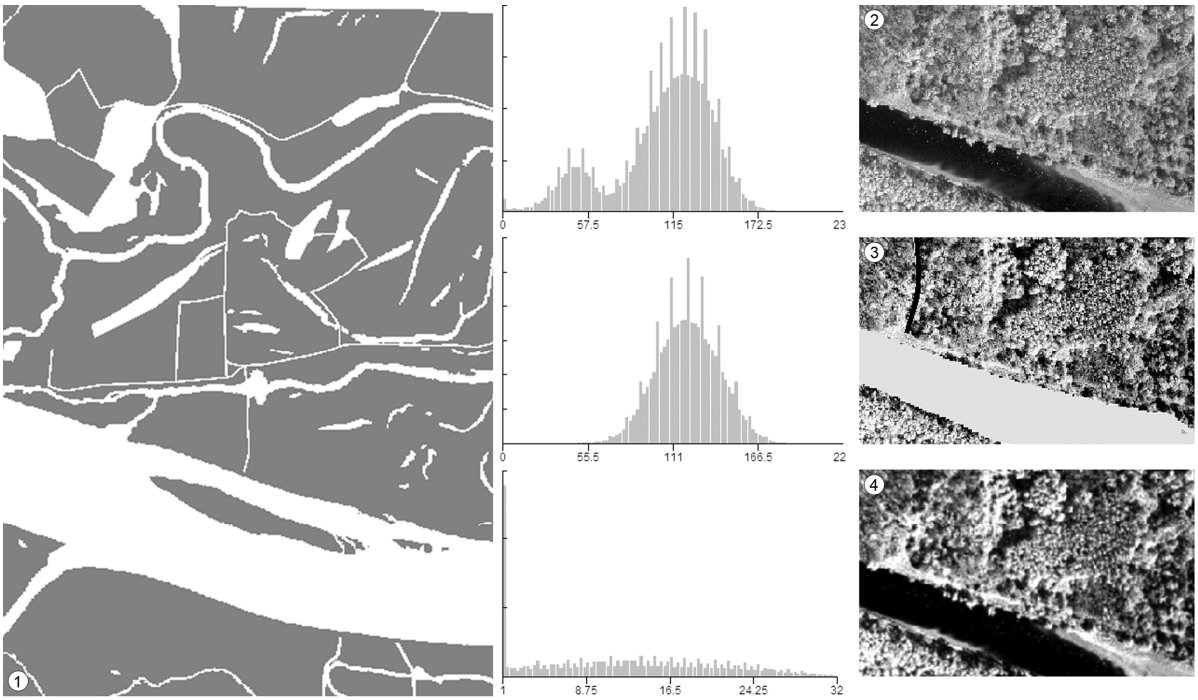


Figure 4: Image pre-processing (example NIR layer). The negative mask excludes permanent *water bodies* at low water level, *paths* and *meadows* (1). The feature space of the unprocessed NIR band (2) contains a density peak at low spectral values, whereas this peak is exclueded in the feature space of the masked NIR band (3). The classified NIR band (4) contains the flattened density distribution.

3.3.2. Field data

The Danube River floodplains near Vienna have been studied by scientists for decades, mostly investigating parts of the National Park (e.g. Miletich 1996, Schratt-Ehrendorfer & Rotter 1999, Schratt-Ehrendorfer 2000) or research focusing on specific topics (e.g. Strausz & Janauer 2007, Lazowski 1984)

Spatial data covering the whole area are available as digital habitat map (Umweltdata GmbH 1999), as digital forestry map (ÖBF, Danube Floodplain Nationalpark) and as forest inventory (ÖBF, Danube Floodplain Nationalpark). Since the habitat map covers only non-forest areas and the forestry maps are processed from the forestry point of view, a field survey was conducted during the vegetation period 2006 to gather information from an ecological perspective.

A stratified random sampling (Reiter 1993) was used to select the locations of the sample plots. The hydrological connected part of the National Park was partitioned into 500x500 m grid cells as framework for the sampling design. The grid was intersected with the available thematic maps (digital habitat map, DEM). Afterwards the intersected layer was classified into homogeneous regions. In each region, two random selected grid cells were investigated, in which homogeneous forest community patches were sampled in *c*. 200 m² plots. The species composition, their abundance and the vegetation structure were recorded (Figure 1,

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

sample plots). Each sample plot was georeferenced using GPS. The collected field data built the framework for the floodplain habitat delineation within the hierarchical object network.

3.3.3. Hierarchical object network

In the present study the commercial software Definiens Professional 5 (Definiens AG 2006) was used to apply the object-based image analysis (OBIA) approach. The object network of the Danube River floodplains was specified as a three level hierarchy (Figure 5): The lowest hierarchical level (Level -1) was defined by the pre-processed image data. The top hierarchical level (Level 1) was based on the hydrological dynamics (DEM). The Focal Level (Level 0), located in between, represented the floodplain habitats. Different classification systems were used for each hierarchy level.

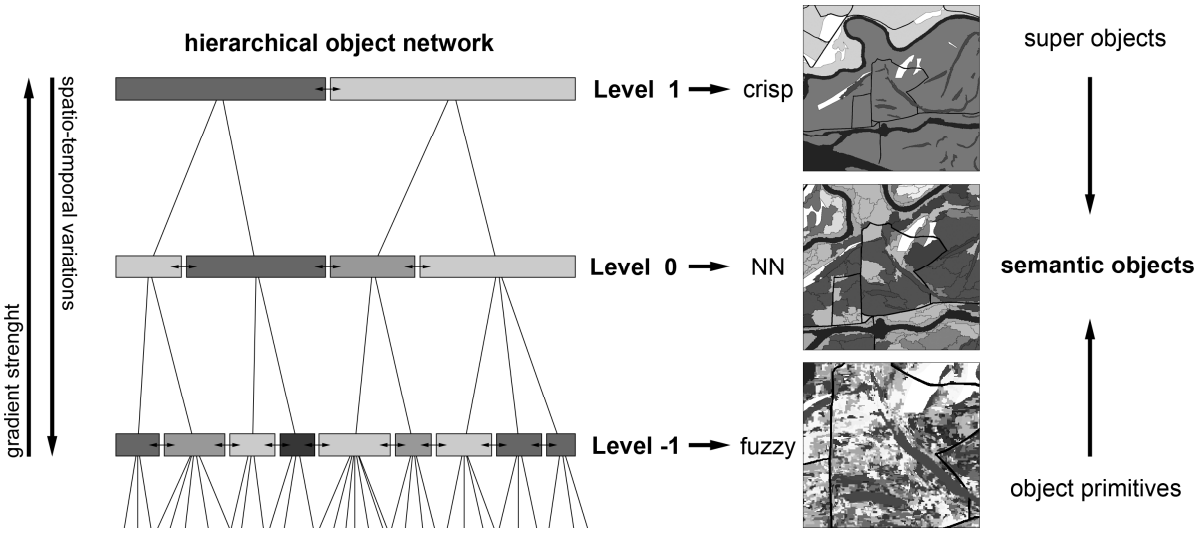


Figure 5: Scheme of the hierarchical object network. Strong gradients and low spatio-temporal variations result in distinct boundaries (super objects) at highest hierarchy level (Level 1). The boundaries of the lowest level (Level -1) are variable and defined by weak gradients (object primitives). Between these two levels, semantic objects are delineated (after Wu & Loucks 1995, Blaschke 2006).

The first processing step in building a hierarchical object network creates image objects by an initial segmentation (Benz et al. 2004). The multi-resolution segmentation algorithm implemented in Definiens Professional 5 is a bottom up region-merging technique in witch single pixels are merged into homogeneous regions based on homogeneity criteria weighted between 0 and 1: The criterion Colour weights the influence of the spectral information, the criterion Shape is negative correlated with the Colour criterion and weights the Smoothness or Compactness of the region. For each possible region a “merging cost” is calculated, which represents the degree of fitting to the criteria. The merging procedure stops when the threshold defined by the Scale Parameter as “least degree of fitting” is reached. Hence, the Scale Parameter defines the relative size of the resulting segmented image objects (Baatz & Schäpe 2000).

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

Image objects can be classified using different classification systems: (I) Fuzzy classification systems are powerful soft classifier, which allow overcoming image data limitations and uncertainties (e.g. sensor parameter variations, variations of the spectral information of the imagery within the study area) (Benz et al. 2004) based on a vague class description. The class descriptions are defined by fuzzy sets, which are characterized by fuzzy membership functions. These functions translate the crisp “true” or “false” membership into a continuous range of membership degree values between 0 and 1. The higher the membership values, the better an image object suits to the class description (for details see Zadeh 1965). For each class a membership value is assigned to the image objects, the highest reached value defines the final class assignment (defuzzification). In addition, fuzzy sets can be combined by logical operators to create a more advanced classification system (Definiens AG 2006). (II) The Nearest Neighbour (NN) classification system is based on samples selected by the user, which represent the NN-classes. The NN-class description is defined by a set of user selected features (e.g. object features, neighbour or hierarchy-related features). Each image object is assigned to its NN by a fuzzy classification algorithm based on the defined feature space. The higher the classification membership value the better an objects feature space fits to the user selected samples. The highest reached value again defines the final NN-class assignment (Definiens AG 2006).

3.3.3.1. Super objects (Level 1)

The super object boundaries at the top level (Level 1) of the hierarchical object network (Figure 1, Level 1) were first delineated by an initial segmentation of the DEM and the thematic layer by default settings (Scale Parameter = 10, Shape = 0.1, Colour = 0.5). The image objects were classified into crisp classes based on the official water level thresholds defined by the station Wildungsmauer (Figure 1, station Wildungsmauer). Permanent *water bodies* were determined by the low water level threshold. The highest water level marked the upper most elevated floodplain areas, called *flood protection dam* (Figure 1). In the next step, the image objects were merged into larger homogeneous regions based on their classification (permanent *water bodies*, *flood protection dam*, unclassified areas). The object feature “Border length” was used for further classification. *Water bodies* with very long borders were classified as *water channels* to define braided courses. Image objects classified as *flood protection dam* earlier but having a short border length were removed from this class. The image objects remaining unclassified were divided into episodically and periodically flooded areas based on their neighbouring features. Objects adjacent to the *flood protection dam* were classified as *flooding episodic*. Still unclassified objects adjacent to the braided channels were assigned as *flooding periodic*.

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

Figure 6: Level 1 of the hierarchical object network, based on the DEM (1). The image objects (2) classified into *flooding episodic* (3, light grey) and *flooding periodic* (3, dark grey) regions as well as *water bodies* and *water channels (2 and 3, black)*. *Paths* (2 and 3, black) and *meadows* (2 and 3, white).

Finally, based on the digital habitat map, a new segmentation of the flooded areas was conducted to delineate *meadows* and *paths*.

3.3.3.2. Object primitives (Level -1)

The lowest hierarchical level (Figure 6, Level -1) was processed on the basis of the super objects (Level 1). The multi-resolution segmentation was conducted utilizing the same settings as used for the top level initial segmentation, delineating small, data-driven object primitives, characterizing the micro geomorphological processes of the floodplains.

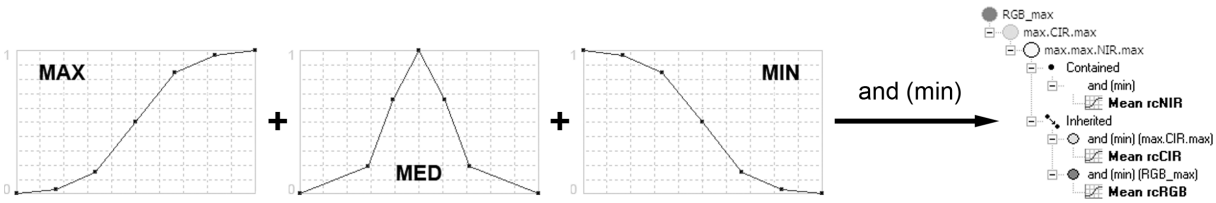


Figure 7: The membership functions of *MAX*, *MED*, *MIN* fuzzy sets. Example for a nested class description.

The classification of the image objects was processed by defining fuzzy sets for the “Mean Layer Values” of the pre-processed images rcNIR, rcCIR and rcRGB. The *MIN* and *MAX* fuzzy sets were characterized by a one-sided sigmoid function and the *MED* fuzzy set by a two-sided function (Figure 7). The inheritance class hierarchy (“parent-and-child” principle) implemented in Definiens Professional 5 was used to create a nested class description (Figure 7). For each of the pre-processed images each fuzzy set was applied and combined by using an “and (min)” operator, which finally resulted in 27 classes.

3.3.3.3. Semantic objects (Focal Level, Level 0)

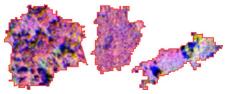
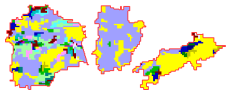
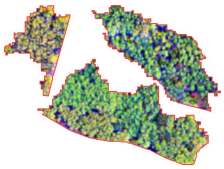
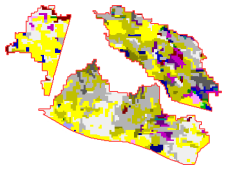
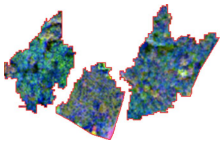
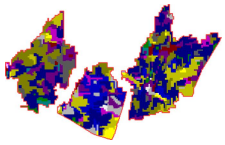
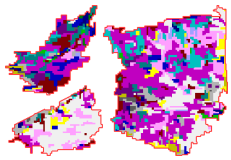
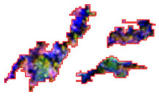
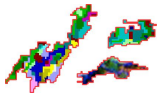
The Focal Level (Level 0) (Figure 5, Level 0) was used to create the semantic objects. The initial segmentation at this level was conducted using fine scaled parameters (Scale Parameter = 10, Shape = 0.3, Colour = 0.7). The *transition zone* between aquatic and terrestrial floodplain habitats was detached based on neighbour features. Image Objects

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

adjacent to the class *water channel* were assigned to the *transition zone*. Image Objects sharing more than half of their Relative Border Length with the *transition zone,* or which were completely enclosed by this class, were also classified as *transition zone*. Afterwards, the final boundary of the floodplain habitats was delineated by a further multi-resolution segmentation using coarser parameters (Scale Parameter = 60, Shape = 0.1, Colour = 0.5). The minimum mapping unit (MMU) was determined by an area larger than 200 m². All objects smaller than MMU were merged with their larger neighbouring objects.

The floodplain habitats were classified into NN-classes (Table 1), which were treated separately for *flooding periodic* and *flooding episodic* areas. Sparse forested habitats or shrubs were classified as NN-*sparse,* dense forest stands with mixed tree species composition as NN-*dense*. NN-*populus* class was used for forested habitats, dominated by white poplar. NN-*shadows* represented textural artefacts (e.g. tree shadows). Poplar plantations (*Populus* x *canadensis*) in the *flooding periodic* areas were classified as NN-*hybrid*. The discrimination between the NN-classes was based on the fuzzy classification system of the lowest hierarchy level (Level -1). The feature “Relative area of sub objects” and the “Classification value” for the fuzzy classes were used for the class description. For each NN-class a minimum of ten image objects were selected as samples from the Focal Level. The field data were applied as reference system for the sample selection. Finally, each NN-class was renamed according to the respective flooding area. The NN-*shadow* classified image objects were merged with their neighbours based on the feature “Border length”.

Table 1: Nearest neighbour (NN) classification scheme for the NN-classes. Table shows a variety of selected samples.

NN-classes	Focal Level	Level -1	Description
NN-*sparse*			Sparse stands, shrubs and non-forest habitats within *flooding episodic* and *flooding periodic* areas.
NN-*populus*			Forests dominated by white poplar stands within *flooding episodic* and *flooding periodic* areas.
NN-*dense*			Dense mixed forests within *flooding episodic* and *flooding periodic* areas.
NN-*hybrid*			*Populus* x *canadensis* plantations in *flooding periodic* areas.
NN-*shadows*			Shadow image objects within *flooding episodic* and *flooding periodic* areas.

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

3.3.4. Accuracy assessment

The accuracy of the classifications was evaluated based on the “strength of agreement” proposed by Landis & Koch (1977). The classification membership values were broken down into four categories (Table 2), which allowed a quick evaluation of the classifications accuracy and stability. To accomplish that, the average classification value for each class was calculated.

Additionally, the NN classification was evaluated using the “Error Matrix based on samples” implemented in Definiens Professional 5.

Table 2: Categories for “strength of agreement” proposed by (Landis & Koch 1977)

Strength of agreement	Classifcation value	Category
almost perfect	1.00 - 0.81	I
substantial	0.80 - 0.61	II
moderate	0.60 - 0.41	III
fair	0.40 - 0.21	IV

The stepwise multi-resolution segmentation, the different classification methods and neighbour assignments were defined by so called rule sets. The rule sets construct the hierarchical object network and permit repetition and adaption of individual process steps applied to different subsets within the Danube floodplains.

Finally, the classified levels of the hierarchical object network were saved as shapefiles, whereby the classification membership values of the fuzzy- and NN-classes were included as attributes.

3.4. Results and discussion

Aerial imagery, thematic map and DEM were the basis for the construction of the hierarchical object network within the OBIA approach applied on a subset near Orth a. d. Donau (Figure 1, subset). Within the object network, the floodplain habitats inherited their hydrological connectivity from the top level and the initial fuzzy classification from the lowest data-driven hierarchy.

3.4.1. Super objects (Level 1)

The top level (Level 1) contained the super objects, which delineate the *water bodies*, *water channels, paths* and *meadows* and divide the floodplains into *flooding episodic* and *flooding periodic* areas (Figure 8). The *paths* account for 3%, whereas the *meadows* cover 6% of the subset area. Less than 30% of the subsets surface is water. The Danube River and its connected braided channels (*water channels*) cover 25% and the *water bodies* 2% of the subset area. Almost 50% of the floodplains in the subset are flooded regularly (*flooding*

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

periodic). The forest habitats within the *flooding periodic* part can be assigned to the *Fraxino-Populetum* community, although the succession states of the habitats are heterogeneous. *Populus* x *canadensis* plantations were introduced by forestry into these parts of the floodplains. Less than 20% of the floodplains are affected only by extreme flooding events (*flooding episodic*). Hence, with increasing siltation and soil development *Fraxino-Ulmetum* stands are able to establish in different succession states.

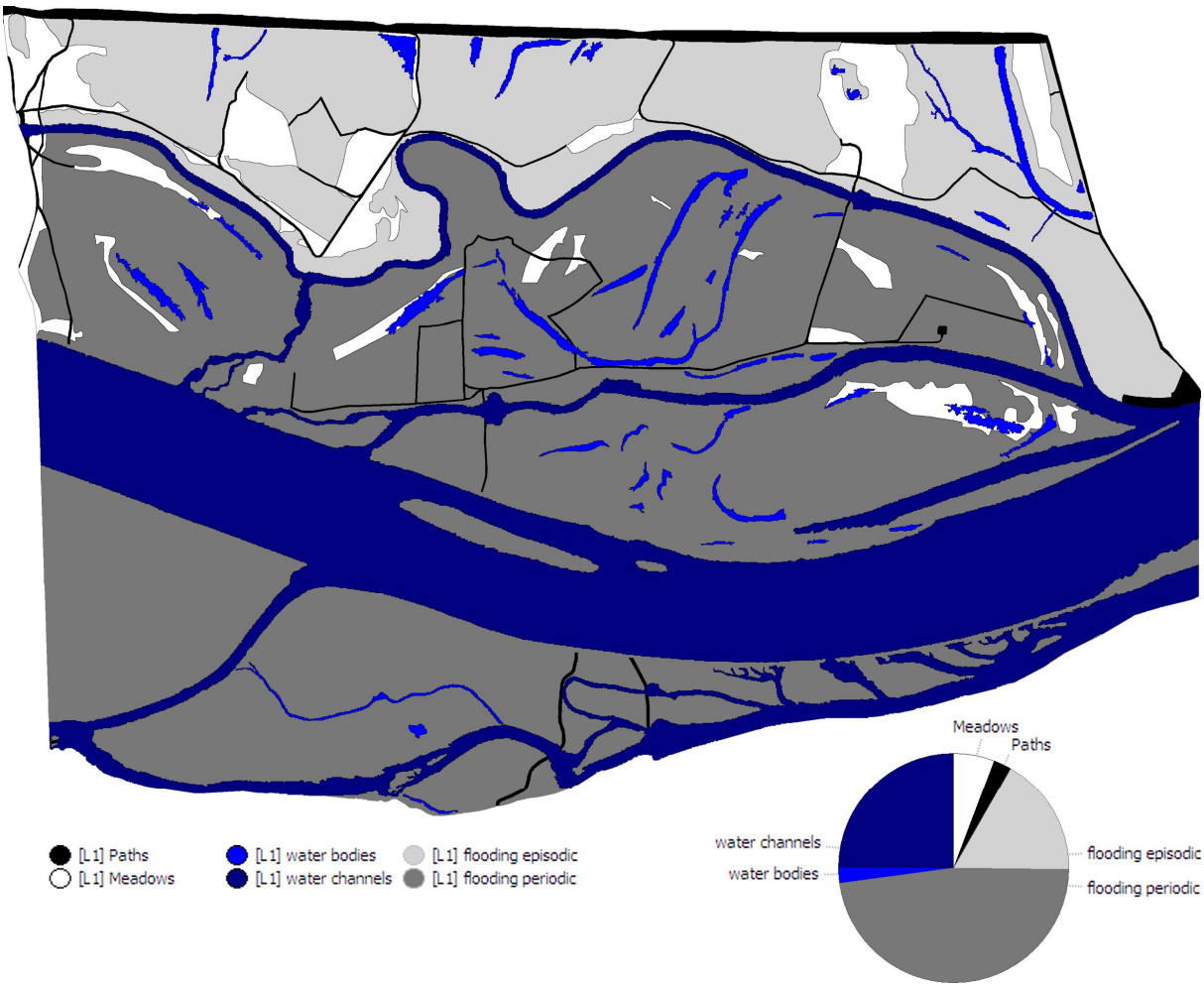


Figure 8: Super objects (Level 1) delineating *flooding episodic* (light grey) and *flooding periodic* (dark grey) areas. *Water channels* (dark blue) and *water bodies* (blue) based on low water level from the station Wildungsmauer. *Paths* (black) and *meadows* (white) originate from digital habitat map. Pie chart displays area proportion of the different classes.

3.4.2. Object primitives (Level -1)

The lowest hierarchical level (Level -1) defined the object primitives, which were classified into 27 classes based on the feature “Mean spectral value” of the pre-processed images (Figure 9). Nearly 60% of the subsets area is classified within the *RGB_max* fuzzy set. Classes nested within *RGB_med* cover more than 30%, whereas *RGB_min* fuzzy set represents less than 10% of the subsets area.

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

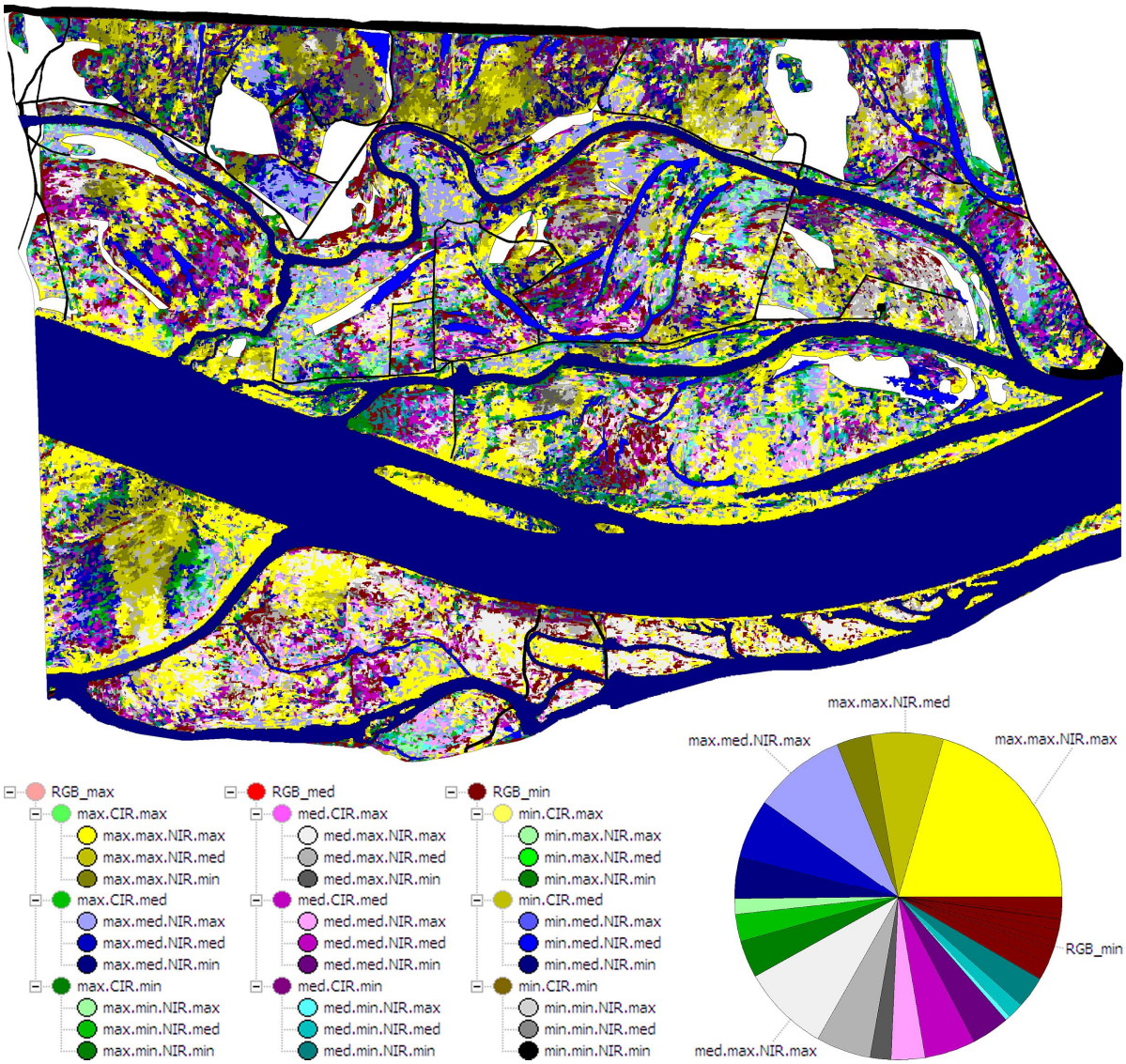


Figure 9: Object Primitives (Level -1) classified into 27 classes based on a fuzzy classification system. Pie chart displays the area proportion of the classes (largest proportions labelled). Classes nested within *RGB_min* fuzzy set coloured dark red.

The higher the classification membership value and the lower the value of the alternative classes, the better an object suits the fuzzy class description. The maximum average membership value for the classes lies between 0.75 and 0.88. Eight fuzzy classes are assigned to category I (*almost perfect*), while the other 19 classes are categorized to category II (*substantial*) (Table 3). The average values of most classes are positioned on the transition between *almost perfect* and *substantial* with an overall average classification value of 0.79. This indicates a solid classification result for the lowest hierarchy level, which defines the feature space of the NN-classification in the Focal Level (Level 0).

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

Table 3: Fuzzy classification system average membership values displayed as “strength of agreement” categories proposed by Landis & Koch (1977). Category I (*almost perfect,* 1.00-0.81), category II (*substantial,* 0.80-0.61), category III (*moderate,* 0.60-0.41), category IV (*fair,* 0.40-0.21)

Average classification value

Classification membership values	max.max.max	max.max.med	max.max.min	max.med.max	max.med.med	max.med.min	max.min.max	max.min.med	max.min.min	med.max.max	med.max.med	med.max.min	med.med.max	med.med.med	med.med.min	med.min.max	med.min.med	med.min.min	min.max.max	min.max.med	min.max.min	min.med.max	min.med.med	min.med.min	min.min.max	min.min.med	min.min.min	MAX
max.max.max	I	III		II	III					III	III		III	III		IV									IV			0.88
max.max.med		I	IV	IV	III	IV					III	IV	IV	III	IV										IV			0.80
max.max.min		III	II		III	III					III	III		III	III										IV			0.78
max.med.max		IV		I	III		III	IV			IV		III	III		III	IV								IV			0.81
max.med.med		IV	IV	IV	II	IV	IV	IV			IV	IV	IV	III	IV	IV	IV								IV			0.79
max.med.min		IV	IV		III	II		IV	IV		IV	IV		III	III		IV	IV							IV			0.79
max.min.max				III	III		II	III					III	IV		III	III								IV			0.77
max.min.med				IV	III	IV	IV	II	IV				IV	III	IV	IV	III	IV							IV			0.78
max.min.min					III	III		III	I					III	III		III	III							IV			0.83
med.max.max		IV			IV					I	III		III	III		IV			IV	IV		IV	IV		IV			0.81
med.max.med		IV	IV		IV					IV	II	III	IV	III	IV					IV	IV	IV	IV		IV			0.78
med.max.min		IV	IV		IV	IV					III	II		III	III					IV	IV		IV	IV	IV			0.77
med.med.max				IV	IV		IV				IV		II	III		III	IV					IV	IV		IV	IV		0.78
med.med.med					IV						IV	IV	IV	II	IV	IV	III					IV	IV	IV	IV	IV		0.78
med.med.min					IV	IV					IV	IV		III	II		IV	IV			IV		IV	IV	IV	IV		0.78
med.min.max					IV		IV	IV					III	III		II	III					IV	IV		IV	IV		0.75
med.min.med					IV			IV					IV	III	IV	III	II	IV				IV	IV		IV	IV		0.77
med.min.min					IV	IV		IV	IV					III	III		III	I					IV	IV	IV	IV	IV	0.80
min.max.max										III	III		III	IV		IV			I	III		III	III		IV			0.81
min.max.med											III	IV	IV	III	IV				IV	II	IV	IV	III	IV	IV			0.79
min.max.min											III	III		IV	III					III	II		III	III	IV			0.77
min.med.max											IV		III	III		IV	IV			IV		II	III		III	IV		0.78
min.med.med											IV	IV	IV	III	IV	IV	IV			IV	IV	IV	II	IV	IV	IV		0.78
min.med.min											IV	IV		III	III		IV	IV		IV	IV		III	II	IV	IV	IV	0.79
min.min.max													IV	IV		III	III					III	III		II	III		0.76
min.min.med													IV	III	IV	IV	III	IV				IV	III	IV	III	II		0.78
min.min.min														IV	III		III	III					III	III	IV	III	I	0.83

The object-based fuzzy classification system provides advantages in contrast to pixel-based classification methods. According to recent studies (e.g. Jobin, Labrecque et al. 2008, Cleve, Kelly et al. 2008) pixel-based classification shows the typical “salt-and-pepper” effect and therefore an object-based approach is more suitable for the delineation of specific classes as habitat types within a heterogeneous landscape mosaic. As clearly demonstrated in Figure 10, the classified object primitives (Level -1) display the spatial relation with more contrast between the classes, compared to the fine-grained texture of the pixel-based classification method.

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

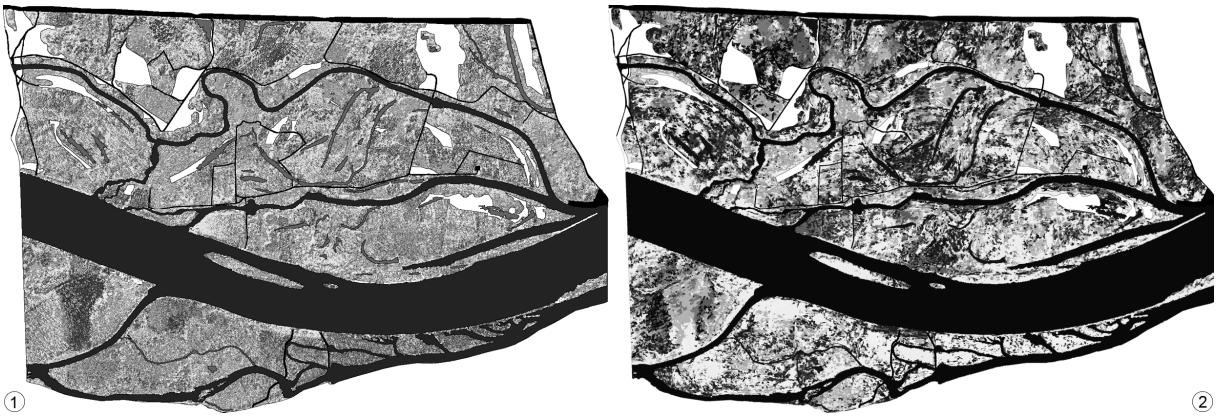


Figure 10: Comparison of pixel-based (1) vs. object-based (2) classification methods using identical imagery. (1) fine-grained texture ("salt-and-pepper" effect), resulting from ISODATA classification. (2) texture with more contrast, resulting from the fuzzy classification system of the object primitives (Level -1)

3.4.3. Semantic objects (Focal Level, Level 0)

The Focal Level (Level 0) is embedded between the highest and lowest hierarchical level and was used to classify the floodplain habitats. The *transition zone* between aquatic and terrestrial habitats (ecotone) contains 220 image objects covering 16% of the subsets surface. These ecotones are mainly consisting of *Salicetum albae* communities, which appear as first pioneer formation. Along smaller side channels, *Fraxino-Populetum* stands also can be found in the transition zone. In the *flooding periodic* areas, characterized by *Fraxino-Populetum* communities in different succession states, *sparse* habitats covering 23% (272 image objects). 125 image objects with a relative area of 13% are classified as *populus* dominated forests, whereas the poplar plantations (*hybrid*) cover 17% containing 128 image objects. *Dense* mixed forest objects (63) occupy the smallest area proportion with 6%. The *flooded episodic* areas, where increasing siltation and soil development results in forests dominated by *Fraxino-Ulmetum* communities, show a different class distribution: *dense* mixed forests dominate with a relative area of 13% (108 image objects), *populus* forests only account for 6% (55 image objects) and *sparse* habitats cover the smallest proportion with 5% (51 image objects) (Figure 11).

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

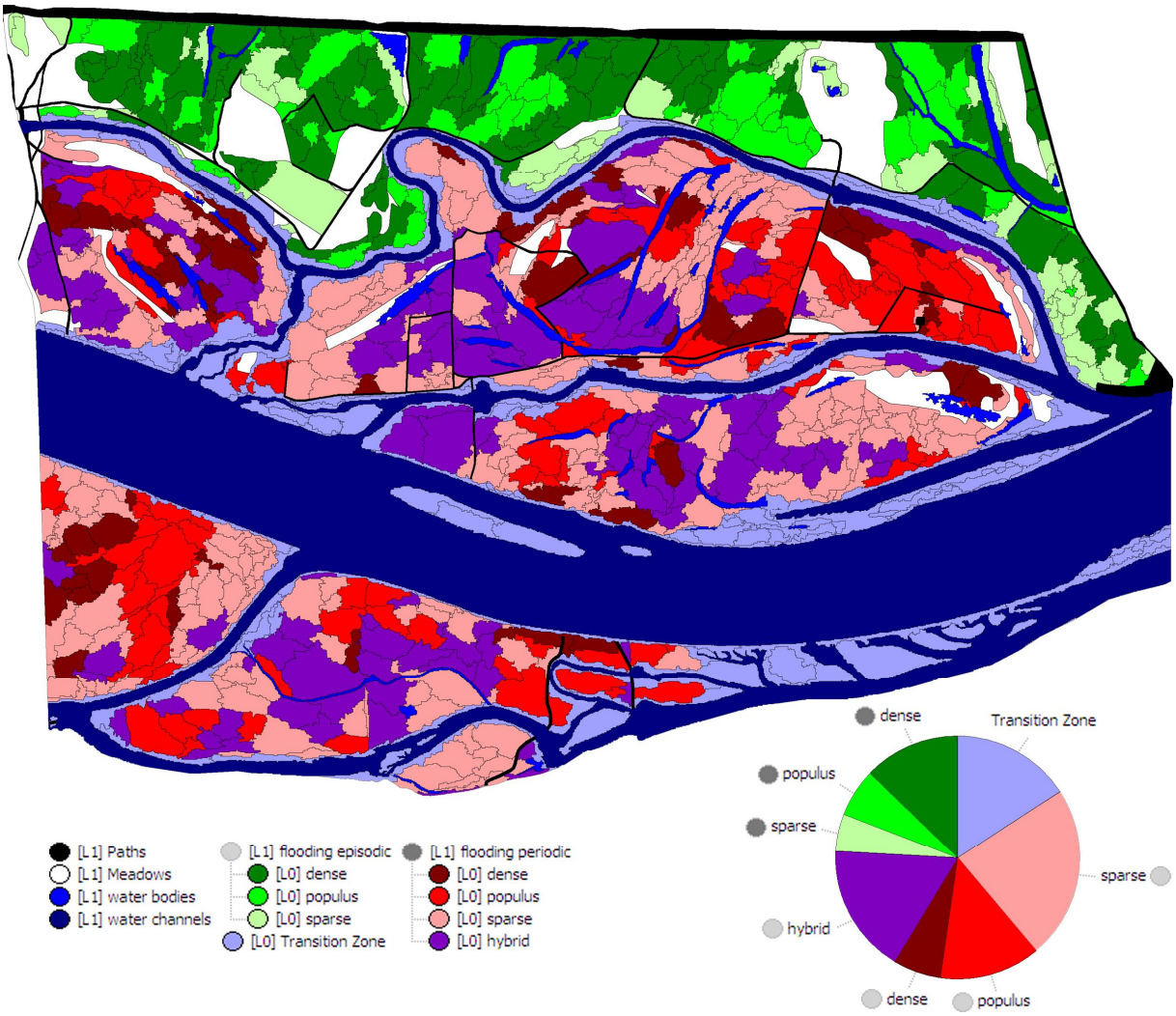


Figure 11: Semantic Objects (Focal Level, Level 0) classified via nearest neighbour (NN) classification system for *flooding periodic* and *flooding episodic* separately. Pie chart displays the area proportion of the NN-classes depending on occurrence of flooding events.

The *flooding periodic* and *flooding episodic* areas respectively, were classified using a sample based NN classification system. The resulting maximum average class membership values lie between 0.75 and 0.92. With exception of the *transition zone*, which was delineated based on neighbour features, each NN-class can be categorized as category I (*almost perfect*) and the "Error matrix based on samples" shows an overall accuracy of 90% and a KIA value of 87%. (Table 4). This indicates an accurate overall classification of floodplain habitat types. If the tree species composition between related habitat types is similar, the classes show *substantial* average alternative membership values. In the *flooding periodic* areas, the *sparse Fraxino-Populetum* communities can be dominated by shrubs like *Cornus sanguinea*, *Crataegus monogyna* or by monodominant *Alnus incana* stands. These species can also dominate the understorey of the class *populus*. Analogously, in the *flooding episodic* areas, the *sparse Fraxino-Ulmetum* community and *populus* classes show a similar category distribution (Table 4).

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

Due to the fuzzy characteristic of the NN classification system, the different class membership values for each image object are preserved. Thus, during the visualisation process the thematic mapping can be adopted for specific topics. As an example, the *transition zone* containing heterogenic habitat types adjacent to *water channels* can be visualized by splitting the class into *sparse* and *populus* ecotones, since these two NN-classes show *substantial* average membership values (Table 4).

Table 4: Nearest neighbour (NN) classification systems average membership values displayed as “strength of agreement” categories proposed by Landis & Koch (1977). Category I (*almost perfect,* 1.00-0.81), category II (*substantial,* 0.80-0.61), category III (*moderate,* 0.60-0.41), category IV (*fair,* 0.40-0.21). On the right, the table depicts the “Error Matrix based on samples”.

NN-classes	*Transition Zone*	*flooding periodic*				*flooding episodic*			Error Matrix based on samples					
		sparse	*populus*	*dense*	*hybrid*	*sparse*	*populus*	*dense*	NN-*sparse*	NN-*populus*	NN-*dense*	NN-*hybrid*	Producer	User
NN-*sparse*	II	I	II	III	II	I	II	III	36	0	0	0	1.00	0.88
NN-*populus*	II	II	I	III	III	III	I	III	0	25	0	0	1.00	0.96
NN-*dense*	IV	IV	III	I	III	III	III	I	0	0	17	0	1.00	0.85
NN-*hybrid*	III	II	III	II	I	II	III	III	0	0	0	21	1.00	1.00
MAX	0.75	0.89	0.92	0.87	0.91	0.86	0.87	0.82				Overall Accuracy		0.90
												KIA		0.87

In contrast to the forest site map of Jelem et al. (1961, 1973) (Figure 12), the Focal Level classifies forestry habitats. Although the map from Jelem displays the forest communities in more detail than possible with the available remote sensing and thematic data, the hierarchical object network includes alterations by forestry. *Populus x canadensis* plantations are delineated as class *hybrid* in the *flooded periodical* areas and white poplar dominated stands as class *populus*. The boundaries of the image objects in the Focal Level are based on a multi-resolution segmentation and are more likely to represent gradients in the real world (“*meaningful objects”,* Baatz & Schäpe 2000) than the site map produced by Jelem.

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

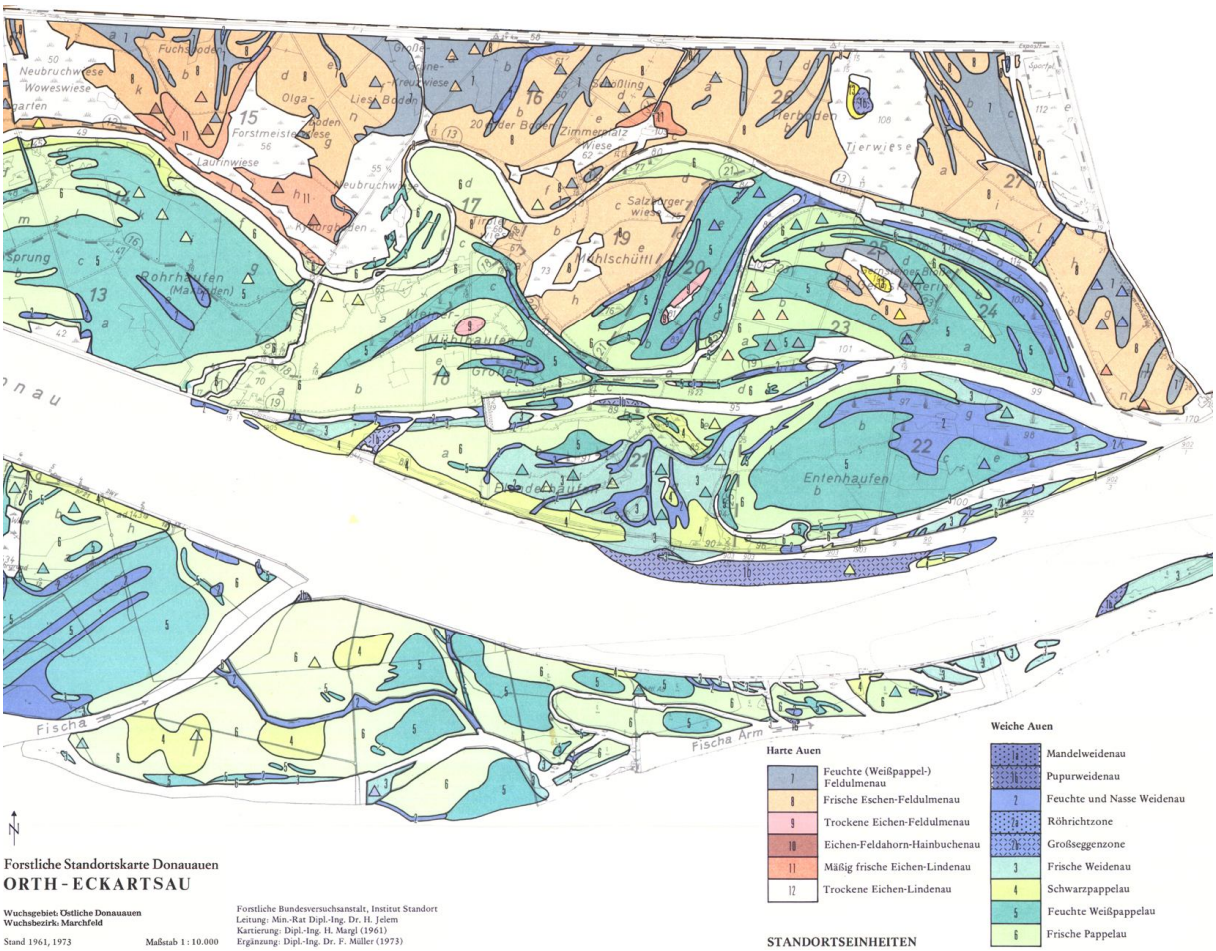


Figure 12: Subset of the forestry site map “Danube Floodplains Orth – Eckartsau“ after Jelem et al. (1961, 1973).

3.5. Conclusion

Remote sensing approaches have been widely used to classify wetlands. As mentioned in the review from Ozesmi & Bauer (2002), due to the fact, that the classification of wetlands strongly depends on the water level, phenological state and image resolution, there can be some classification problems when using spectral features only. Improving workstations and new remote sensing approaches allow the processing of advanced classification systems, especially with the increasing availability of very high resolution (VHR) imagery. In the object-based image analysis (OBIA) approach, remote sensing images and GIS-ready information (e.g. DEM, thematic maps) are combined in a multi-scale environment - the hierarchical object network, where image objects instead of single pixels are the basic processing unit. The image objects can be assessed by their own object features (spectral values, shape and texture), by neighbouring features, hierarchy and class related features (Benz et al. 2004), permitting an advanced classification procedure that can not be implemented within the uni-scale environment of single pixels (Burnett & Blaschke 2003). Compared to pixel-based classification, the hierarchical object network is able to compensate shortages in patch

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

recognition, since according to the HPD paradigm the strongness of patch boundaries varies between different scales. That means pixel-based classification has to be a compromise, especially when using VHR images as basis for the assessment of heterogeneous landscape mosaics, where the increasing presence of mixed pixels impairs the classification accuracy by “salt-and-pepper” effects (Lu & Weng 2007). Therefore, small scaled patch recognition is often processed by traditional photo interpretation, especially when only analogue aerial images are available. New digital sensors (e.g. for hyperspectral images) have been developed leading to improving acquisition of aerial imagery, which can be used to create process-oriented automatic classification systems (Hájek 2008). The processes compensate the spectral and textural variations of aerial images within a study site (e.g. caused by different flight dates) and allow the utilization of advanced classification systems at large extent. Since OBIA conceives a more detailed, process-oriented approach to assess heterogenic landscapes, it provides a replicable, systematic and standardized framework for specific research topics and decision makers.

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

4. APPENDIX I: RULE-SETS

Screenshots der im *Manuscript for publication* definierten Rule-Sets.

Super objects (Level 1)

- Level 1: Super Objects
  - Multiresolution Segmentation
    - 10 [shape:0.1 compct.:0.5] creating 'Level 1'
    - with Id: AOI = 0 at Level 1: [ACTIVE]
    - unclassified at Level 1: [NA]
    - [NA] at Level 1: merge region
    - [ACTIVE] at Level 1: unclassified
  - Define Water Bodies, Dam
    - crisp classification
      - unclassified at Level 1: [L1] floodprotection dam, [L1] water bodies
    - check assignment
    - merge
      - [L1] floodprotection dam at Level 1: merge region
      - [L1] water bodies at Level 1: merge region
      - unclassified at Level 1: merge region
    - small objects
      - unclassified at Level 1: enclosed by [L1] water bodies: [ACTIVE] +
      - [ACTIVE] with Area > 500 at Level 1: unclassified
      - [ACTIVE] at Level 1: [L1] water bodies
      - [L1] water bodies at Level 1: merge region
      - [L1] water bodies with Area <= 500 at Level 1: [ACTIVE]
      - [ACTIVE] at Level 1: unclassified
      - unclassified at Level 1: merge region
    - assign
      - dam
        - [L1] floodprotection dam with Border length <= 3000 at Level 1: unclassified
        - unclassified at Level 1: merge region
      - water
        - [L1] water bodies with Border length >= 5000 at Level 1: [L1] water channels
  - Define Flooding
    - for episodic
      - unclassified with Border to [L1] floodprotection dam >= 1 at Level 1: [L1] flooding episodic
      - loop: unclassified with Border to [L1] flooding episodic >= 1 at Level 1: [L1] flooding episodic
    - for periodic
      - unclassified at Level 1: enclosed by [L1] water channels: [L1] flooding periodic +
      - unclassified with Border to [L1] water channels >= 1 at Level 1: [L1] flooding periodic
      - loop: unclassified with Border to [L1] flooding periodic >= 1 at Level 1: [L1] flooding periodic
      - unclassified at Level 1: [L1] flooding periodic
  - Forestry Map
    - new segmentation
      - [L1] flooding episodic, [L1] flooding periodic at Level 1: 1000 [shape:0.1 compct.:0.5]
    - defined
      - [L1] flooding episodic, [L1] flooding periodic at Level 1: [L1] Meadows, [L1] Paths
    - merge
      - [L1] flooding episodic at Level 1: merge region
      - [L1] flooding periodic at Level 1: merge region
      - [L1] floodprotection dam, [L1] Paths at Level 1: merge region

Object primitives (Level -1)

- Level -1: Object Primitives
  - Multiresolution Segmentation
    - [L1] flooding episodic, [L1] flooding periodic at Level 1: 10 [shape:0.1 compct.:0.5] creating 'Level -1'
    - with Id: AOI = 0 at Level -1: [ACTIVE]
    - unclassified at Level -1: [NA]
    - [NA] at Level -1: merge region
    - for Defined SuperObjects
      - [ACTIVE] at Level -1: unclassified
      - with Existence of super objects [L1] water channels (1) = 1 at Level -1: [L1] water channels
      - with Existence of super objects [L1] water bodies (1) = 1 at Level -1: [L1] water bodies
      - with Existence of super objects [L1] Meadows (1) = 1 at Level -1: [L1] Meadows
      - with Existence of super objects [L1] Paths (1) = 1 at Level -1: [L1] Paths
      - with Existence of super objects [L1] Paths (1) = 1 at Level -1: [L1] Paths
  - for Object Primitives
    - unclassified at Level -1: max.max.NIR.max, max.max.NIR.med, max.max.NIR.min, max.med.NIR.max,

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

Semantic objects (Focal Level, Level 0)

- Level 0: Semantic Objects
  - Transition Zone
    - Multiresolution Segmentation
      - max.CIR.max, max.CIR.med, max.CIR.min, max.max.NIR.max, max.max.NIR.med, max.max.NIR.min, max.med.NIR.max, max.med.NIR.med,
      - for Defined SuperObjects
        - with Existence of super objects [L1] water channels (1) = 1 at Level 0: [L1] water channels
        - with Existence of super objects [L1] water bodies (1) = 1 at Level 0: [L1] water bodies
        - with Existence of super objects [NA] (1) = 1 at Level 0: [NA]
        - with Existence of super objects [L1] Meadows (1) = 1 at Level 0: [L1] Meadows
        - with Existence of super objects [L1] Paths (1) = 1 at Level 0: [L1] Paths
        - with Existence of super objects [L1] Paths (1) = 1 at Level 0: [L1] Paths
        - [L1] water channels at Level 0: merge region
    - Boundary to Channels
      - unclassified with Border to [L1] water channels >= 1 at Level 0: [ACTIVE]
      - loop: unclassified with Rel. border to [ACTIVE] >= 0.5 at Level 0: [ACTIVE]
      - [L1] water channels, [L1] water bodies at Level 0: enclosed by [ACTIVE]: [ACTIVE] +
      - [ACTIVE] at Level 0: [L0] Transition Zone
  - new Segmentation
    - unclassified at Level 0: 40 [shape:0.1 compct.:0.5]
    - [L0] Transition Zone at Level 0: 60 [shape:0.1 compct.:0.5]
  - Floodplain Forests
    - enclosed by class to Transition Zone
      - unclassified at Level 0: enclosed by [L0] Transition Zone: [ACTIVE] +
      - [ACTIVE] at Level 0: [L0] Transition Zone
      - edge effects -> manual correction
      - [ACTIVE] at Level 0: [L0] Transition Zone
    - TTA - select
    - MMU <200m²
    - Sample Selection
      - [L0] Transition Zone, [L1] Meadows, [L1] Paths, [L1] water bodies, [L1] water channels at Level 0: classified image objects to samples
      - Add nearest nghb to:[nn] dense, [nn] shadows, [nn] sparse, [nn] hybrid, [nn] popdom
    - NN Classification
      - for episodic
        - classify
          - unclassified with Existence of super objects [L1] flooding episodic (1) = 1 at Level 0: [nn] dense, [nn] shadows, [nn] sparse, [nn] popdom
        - for Shadows
          - dense
            - [nn] shadows with Border to [nn] dense > 1 at Level 0: [nn] dense
          - sparse
            - [nn] shadows with Border to [nn] sparse > 1 at Level 0: [nn] sparse
          - popdom
            - [nn] shadows with Border to [nn] popdom > 1 at Level 0: [nn] popdom
        - assign
          - [nn] dense at Level 0: [L0] dense (episodic)
          - [nn] popdom at Level 0: [L0] populus (episodic)
          - [nn] sparse at Level 0: [L0] sparse (episodic)
          - [nn] shadows at Level 0: [L0] sparse (episodic)
      - for periodic
        - classify
          - unclassified with Existence of super objects [L1] flooding periodic (1) = 1 at Level 0: [nn] dense, [nn] shadows, [nn] sparse, [nn] hybrid
        - for Shadows
          - sparse
            - [nn] shadows with Border to [nn] sparse > 1 at Level 0: [nn] sparse
          - dense
            - [nn] shadows with Border to [nn] dense > 1 at Level 0: [nn] dense
          - hybrid
            - [nn] shadows with Border to [nn] hybrid > 1 at Level 0: [nn] hybrid
          - popdom
            - [nn] shadows with Border to [nn] popdom > 1 at Level 0: [nn] popdom
        - assign
          - [nn] hybrid at Level 0: [L0] hybrid (periodic)
          - [nn] dense at Level 0: [L0] dense (periodic)
          - [nn] popdom at Level 0: [L0] populus (periodic)
          - [nn] sparse at Level 0: [L0] sparse (periodic)

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

5. APPENDIX II: DIE WÄLDER DER OFFENEN AU – GELÄNDEDATEN

Ziel der Datenerhebung im Untersuchungsgebiet war es unterschiedliche Wald-Sukzessionsstadien, der in der offenen Au dominierenden Vegetationsgesellschaften, qualitativ und quantitativ zu erfassen. Die dazu in der Vegetationsperiode 2006 durchgeführten Vegetationsaufnahmen dienten als Grundlage für die Auswahl der *Samples* im *Nearest Neighbour Classification System* (Focal Level, Level 0) innerhalb des *Hierarchical Object Networks* (siehe *Manuscript for publication*).

5.1. Einleitung

Der Nationalpark Donauauen ist zu 62 Prozent (~ 93 km²) mit Wald (Umweltdata GmbH 1999) unterschiedlichster Sukzessionsstadien bedeckt, wobei die Waldgesellschaften der offenen Au grundsätzlich den uferbegleitenden Weidenauen der Klasse *Salicetea purpureae* und dem großflächig entwickelten Verband des *Alnion incanae* zugeteilt werden können (Tabelle 3).

Tabelle 3: Syntaxonomische Übersicht (nach Willner & Grabherr 2007) der Waldgesellschaften in der offenen Au.

KLASSE	SALICETEA PURPUREAE	
Ordnung	Salicetalia purpureae	
Verband	*Salicion triandrae*	
Assoziation	Salicetum triandrae	Mandelweiden-Korbweidengebüsch
Assoziation	Salicetum purpureae	Purpurweidengebüsch
Verband	*Salicion albae*	
Assoziation	Salicetum albae	Silberweiden-Auwald
Subass.	-phalaridetosum	("tiefe Weidenau")
Subass.	-cornetosum	("hohe Weidenau")
KLASSE	QUERCO-FAGETEA	
Ordnung	Fagetalia sylvaticae	
Verband	*Alnion incanae*	
Unterverband	Alnenion glutinoso-incanae	
Assoziation	Fraxino-Populetum	Silberpappel-Auwald
Subass.	-phalaridetosum	("feuchte Pappelau")
Subass.	-typicum	("frische Pappelau")
Unterverband	Ulmenion	
Assoziation	Fraxino-Ulmetum	Mitteleurop. Stieleichen-Ulmen-Eschen-Auwald
Subass.	-phalaridetosum / -alnetosum glutinosae	
Subass.	-typicum	
Subass.	-caricetosum albae	("Lindenau")

Die Klasse *Salicetea purpureae* (bzw. deren Ordnung *Salicetalia purpureae*) ist charakteristisch für Pionierstandorte in den Uferbereichen von Fließgewässern und wird in zwei Verbände unterteilt (nach Willner & Grabherr 2007): (I) Der Verband *Salicion triandrae* umfasst die gebüschdominierten Weidengesellschaften mit zwei Assoziationen, welche aufgrund ihrer standörtlichen Substratbedingungen unterschiedliche Weidengebüsche

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

beinhalten. Das *Salicetum triandrae* (Malcuit 1929) (Mandelweiden-Korbweidengebüsch) ist als schmaler Saum vom Ufer her dem *Salicetum albae* vorgelagert und wird von *Salix triandra* bzw. *Salix viminalis* dominiert. Die Gesellschaft ist hauptsächlich auf feinkörnigen Sedimenten zu finden. Im Gegensatz zum *Salicetum purpureae* (Wendelb.-Zel. 1952) (Purpurweidengebüsch), welches von der ausschließlich auf grobkörnigem Substrat wachsenden *Salix purpurea* charakterisiert wird. Die Gesellschaft ist daher auf den heute sehr selten gewordenen Pionierstandorten der dynamischen Schotterbereiche der schnell fließenden Gewässer zu finden. (II) Der Verband *Salicion albae* entwickelt sich vom Ufer her zu den ersten niederen Waldgesellschaften und beinhaltet drei Assoziationen, wobei nur das *Salicetum albae (*Issler 1926*)* (Silberweiden-Auwald), dominiert von *Salix alba*, ausgeprägter in den Donauauen zu finden ist. Die Gesellschaft stockt auf sehr nährstoffreichen, sandig bis tonig-humosen Böden, weshalb in der Krautschicht *Urtica dioica*, *Rubus caesius* und *Phalaris arundinacea* als stete Begleiter zu finden sind. Silberweiden-Auwälder an Verlandungen langsam fließender oder stehender Gewässer werden der Subassoziation *Salicetum albae-phalaridetosum* („Tiefe Weidenau“) zugeordnet, während die eher trockeneren, sandig bis schottrigen Weiden-Standorte mit gut entwickelter Krautschicht zur Subassoziation *Salicetum albae-cornetosum* („Hohe Weidenau”) gezählt werden.
Die Klasse der *Salicetea purpureae* ist aufgrund der fehlenden hydro-morphologischen Dynamik stark gefährdet, da sich dadurch kaum neue Bestände ausbilden können bzw. die vorhandenen Bestände zunehmend veraltern (Drescher & Fraissl 2006).

Der Verband *Alnion incanae* wird der Klasse *Querco-Fagetea sylvaticae* innerhalb der Ordnung *Fagetalia sylvaticae* zugeordnet und umfasst feuchte, mineralstoffreiche Wälder. Dieser wird in zwei Unterverbände aufgeteilt (nach Willner & Grabherr 2007): (I) Der Unterverband *Alnenion glutinoso-incanae* ist durch Erlen-, Eschen-dominierte Wälder charakterisiert. In den Donauauen östlich von Wien ist der Unterverband mit einer Assoziation vertreten, dem *Fraxino-Populetum* (Jurko 1958) (Silberpappel-Auwald), welche stromabwärts im pannonischen Teil der Donau das *Equiseto-Alnetum incanae* (Moor 1958) (Tieflagen Grauerlenwald) ersetzt. Die Gesellschaft bildet in der Sukzessionsfolge der Augesellschaften das Bindeglied zwischen den Weidenauen des *Salicetum albae* und den als Harten Auen bezeichneten *Fraxino-Ulmetum*. Als stete Begleiter sind *Populus alba*, *Alnus incana* in der Baumschicht, *Cornus sanguinea* in der Strauchschicht und *Rubus caesius*, *Ranunculus ficaria*, *Glechoma hederacea*, *Urtica dioica*, *Gallium aparine*, *Impatiens noli-tangere* und *Aegopodium podagraria* in der Krautschicht, zu finden. Je nach standörtlicher Ausprägung werden zwei Subassoziationen unterschieden. Das *Fraxino-Populetum-phalaridetosum* (“Feuchte Pappelau“) stockt auf hohem Grundwasserspiegel und wird regelmäßig überflutet. Der Baumschicht kann dann *Salix alba* beigemischt sein. Das *Fraxino-Populetum-typicum* (“Frische Pappelau“) hingegen stockt auf mittlerem Grundwasserstand

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

und wird dadurch weniger häufig überschwemmt als die feuchte Ausprägung. In der Baumschicht kann sich *Fraxinus excelsior* und *Acer campestre* entwickeln. (II) Der Unterverband *Ulmenion* beinhaltet die stromfernen, von Eichen, Ulmen und Eschen dominierten Auwälder („Harte Au“, „Hartholzau“), welche die Endgesellschaften innerhalb der Auen-Sukzessionsreihe darstellen. Die Standorte entlang großer Fließgewässer sind im Allgemeinen gut entwickelt und werden nur mehr sehr selten überschwemmt. Der Unterverband ist in den Donauauen mit zwei Assoziationen zu finden. Stromabwärts, v. a. ab dem Mündungsbereich der March, dominiert *Fraxinus angustifolia* ssp. *pannonica* mit *Quercus robur* und daher wird die Gesellschaft als *Fraxino pannonicae-Ulmetum* (Soó 1936 corr. 1963) aufgefasst. Stromaufwärts ist hingegen *Fraxinus excelsior* mit *Quercus robur* bestandsbildend und diese Assoziation wird als *Fraxino-Ulmetum* (Tx. ex Oberd. 1953) bezeichnet. Neben den oben erwähnen Baumarten sind als stete Begleiter in der Strauchschicht *Cornus sanguinea*, *Rubus caesius*, *Evonymus europaea*, *Crataegus monogyna*, *Prunus padus* und in der Krautschicht *Brachypodium sylvaticum*, *Aegopodium podagraria*, *Paris quadrifolia* beigemischt. Je nach standörtlicher Ausprägung wird die Gesellschaft in drei Subassoziationen unterteilt. Das *Fraxino-Ulmetum-phalaridetosum* (bzw. *-alnetosum glutinosae*) besiedelt noch vernässte Standorte am Ende einer Verlandungsserie, während auf frischen Standorten der mittleren Lagen das *Fraxino-Ulmetum-typicum* ausgeprägt ist. Diese Subassoziation nimmt den größten Teil des *Fraxino-Ulmetum* ein. Als Sonderausprägung an trockenen, auf Schotterflächen anstehenden Standorten ist das *Fraxino-Ulmetum-caricetosum albae* zu finden, in dem der Baumschicht *Tilia cordata* beigemischt ist.

5.2. Methodik

Die Auswahl der Flächen, welche im Gelände näher untersucht wurden, erfolgte anhand eines *Stratified-Random Sampling* Ansatzes (Reiter 1993) Das Gebiet der offenen Au im Nationalpark Donauauen wurde dazu in 500 x 500 m Zellen (Straten) unterteilt. Jeder Zelle wurden durch Verschneidungsoperationen verschiedene Parameter aus den Geodatensätzen (I) Biotoptypen (*digital habitat map*, Umweltdata GmbH 1999) und (II) eingeebnetes Höhenmodel (*DEM*, Details siehe *Manuscript for publication*) zugewiesen. Anschließend wurden die Zellen anhand dieser Parameter mittels TWINSPAN (Hill 1979, siehe unten im Text) in homogene Gruppen zusammengefasst. Aus jeder homogenen Gruppe wurden per Zufall zwei Zellen für die Kartierung im Gelände ausgewählt. Die Kartierungszelle (und deren benachbarte Zellen) wurde visuell, basierend auf Ortho-Infrarot Bildern, auf unterschiedliche Habitat-Typen untersucht und die einzelnen Habitate wurden durch eine Vegetationsaufnahme charakterisiert. Die genaue Verortung der Aufnahmeflächen erfolgte mittels ArcPad und Handheld GPS.

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

Die Abgrenzung der Aufnahmefläche innerhalb eines Habitat-Typs wurde so gewählt, dass diese möglichst in sich standörtlich und strukturell homogen war. Die Größe der Aufnahmefläche wurde anhand des im „Handbuch des vegetationsökologischen Monitorings“ (Traxler 1998) angegebenen Richtwertes für das Minimumareal von Wäldern mit 200 m² gewählt.

Die qualitative und quantitative Erfassung der Vegetation pro Aufnahmefläche erfolgte anhand einer veränderten Abundanz-Dominanz-Skala nach Braun-Blanquet (Braun-Blanquet 1964). Die Zusammensetzung der Vegetation (Artenliste) wurde in Abhängigkeit des Vorkommens in der Krautschicht, Strauchschicht sowie den Baumschichten 1 und 2 erfasst. Anschließend wurde die Abundanz der einzelnen Arten anhand ihres Deckungsgrades geschätzt (Tabelle 4).

Die Nomenklatur der Pflanzenarten richtet sich nach der „Exkursionsflora von Österreich“ (Adler et al. 1994). Außerdem wurde der „Exkursionsflora von Deutschland - Atlasband“ (Rothmaler et al. 2000) als weitere Bestimmungshilfe verwendet. Zusätzlich zur Vegetation wurden folgende Strukturparameter erhoben: Höhe der einzelnen Schichten, deren prozentuelle Deckung bzw. der Anteil an stehendem und liegendem Totholz und der Anteil an offener (vegetationsloser) Fläche. Als Kopfdaten der Aufnahmefläche wurden Datum, Kartierungszellennummer, fortlaufende Aufnahmenummer und eine allgemeine Beschreibung der Fläche notiert.

Tabelle 4: Veränderte neunstufige Abundanz-Dominanz-Skala nach Braun-Blanquet (1964).

Schätzwert	Deckung
r	< 1
+	2
1	3
2m	4-5
2a	5-15
2b	15-25
3	25-50
4	50-75
5	75-100

Die Analyse der Vegetationsdaten wurde mit der Freeware JUICE 6.5 (Tichý 2002) durchgeführt, welche die Bearbeitung, Analyse und Klassifikation von Vegetationstabellen ermöglicht. Die insgesamt 153 Vegetationsaufnahmen wurden zuvor in einer MS Access Datenbank tabellarisch erfasst, wobei die genaue räumliche Lage und Ausdehnung der Aufnahmeflächen mittels ArcMap in einer MS Access-Geodatenbank zusammengefasst und über Abfragen mit den Vegetationsaufnahmen verknüpft wurden.

In einem ersten Analyseschritt wurden die Aufnahmen anhand ihrer räumlichen Lage zu den im Level 1 (siehe Manuscript for publication, Super Objects) definierten episodisch (*episodic flooding*) bzw. periodisch (*periodic flooding*) überfluteten Aubereichen zugeteilt. Die Vegetationsaufnahmen wurden anschließend über Kreuztabellen als *comma separated*-Textdatei exportiert und im JUICE als *Spread Sheet File* importiert.

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

In einer ersten Gruppierung wurden die einzelnen Aufnahmen nach der Überflutungshäufigkeit in *periodic flooding* und *episodic flooding* sortiert und anschließend mittels TWINSPAN (*two-way-indicator-species-analysis*) in Untergruppen unterteilt. Das Fortran-Programm TWINSPAN, welches als Subprogramm in JUICE integriert ist, wurde von Hill (1979) zur Analyse von Vegetationstabellen entwickelt und basiert auf einem divisiven-hierarchischen Klassifikationsverfahren. Die Tabelle wird dabei aufgrund des Vorkommens bestimmter Arten (Indikatorarten) in Gruppen unterteilt, wobei von dem Programm zuerst eine *correspondence analysis* und anschließend eine *refined ordination* durchgeführt wird (Leyer & Wesche 2008). Das Ergebnis einer TWINSPAN-Analyse ist eine geordnete zweidimensionale Vegetationstabelle, in der die Aufnahmen nach ihrer Ähnlichkeit und die einzelnen Arten nach ihrem Indikatorwert sortiert sind.

Die TWINSPAN-Gruppen wurden anhand der Euklidischen Distanz auf ihre Ähnlichkeit zueinander hin überprüft und den Waldgesellschaften der Donauauen (nach Willner & Grabherr 2007) (vgl. Tabelle 3) zugeordnet. Arten die in mehreren Schichten vorkamen, wurden in Anlehnung an den „Die Wälder und Gebüsche Österreichs – Tabellenband“ (Willner & Grabherr 2007) im JUICE zu einem Tabelleneintrag reduziert. Zur Beschreibung der ausgewiesenen Gesellschaften wurde eine *Analysis of Constancy Columns in Synoptic Table* durchgeführt und als Textfile exportiert. Diese Analyse wertet die einzelnen Gruppen hinsichtlich ihrer diagnostischen (Indikatorwerte, *Fidelity*), konstanten (*Frequency*) und dominanten (*Cover*) Artenkombination aus. Die Berechnung der Indikatorwerte erfolgte anhand des von Dufrene & Legendre (1997) entwickelten *Species Indicator Value*-Algorithmus, wobei nur Arten mit einer Signifikanz von $P < 0{,}05$ in die Analyse miteinbezogen wurden.

Die Unterteilung der einzelnen Assoziationen erfolgte mit besonderem Augenmerk auf die visuelle Unterscheidbarkeit der verschiedenen Ausprägungen auf den Ortho-Infrarot-Bildern, welche die Grundlage für die Klassifizierung mittels *Nearest Neighbour Classification Systems* im Focal Level (Level 0) des *Hierarchic Object Networks* darstellten (siehe *Manuscript for publication*).

5.3. Ergebnisse und Diskussion

Die 153 Vegetationsaufnahmen, erhoben in der Vegetationsperiode 2006, konnten den Assoziationen *Salicetum albae*, *Fraxino-Populetum* und *Fraxino-Ulmetum* zugeordnet werden (Tabelle 3). Die Gesellschaften des Verbandes *Salicion triandrae* wurden aufgrund des Sampling Designs nicht erfasst. Die randlich des Kartierungsgebietes (in nur einer Aufnahme) vorkommende Assoziation *Fraxino pannonicae-Ulmetum* wurde in das *Fraxino-Populetum* integriert.

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

Die folgende Beschreibung richtet sich nach dem Schema des *Nearest Neighbour Classification Systems* (NN) im Focal Level (Level 0) des *Hierarchic Object Networks* (siehe *Manuscript for publication*). Für jede ausgewiesene Gruppe werden Indikatorarten sowie konstante und dominante Arten aufgelistet.

5.3.1. Classes Flooding periodic: sparse | populus | dense | hybrid – "Weiche Au"

Die Klassen der periodisch überfluteten Auwälder (*flooding periodic*) können der Assoziation *Fraxino-Populetum* zugewiesen werden und auf Basis der verfügbaren Ortho-Infrarot Bilder visuell in drei verschiedene Gruppen der Assoziation unterteilt werden:

(I) Die Grauerlen-dominierten Waldbestände (Abbildung 1, 1) umfassen insgesamt 12 Aufnahmen und können innerhalb der *NN-Classification* der Klasse *sparse* zugeordnet werden.

Tabelle 5: Grauerlen-dominierte Waldbestände des *Fraxino-Populetums*

Indikatorarten:	*Alnus incana* [B] 87.0; *Alnus incana* (juv) 90.9;
Konstante Arten:	*Alnus incana* [B] 100; *Cornus sanguinea* [HF] 92, *Rubus caesius* [HF] 100, *Crataegus monogyna* [S] 67, *Evonymus europaea* [S] 75, *Sambucus nigra* [S] 75; *Acer negundo* (juv) 75, *Aegopodium podagraria* 83, *Alnus incana* (juv) 100, *Galium aparine* 83, *Glechoma hederacea* 92, *Urtica dioica* 100;
Dominante Arten:	*Alnus incana* [B] 42; *Cornus sanguinea* [HF] 17, *Rubus caesius* [HF] 8, *Crataegus monogyna* [S] 8; *Allium ursinum* 17, *Ranunculus ficaria ssp. bulbifera* 8;

Abbildung 1: Die Grauerlen-dominierten Wälder (1) (Klasse *sparse*) und Hybrid-Pappel Forste (2) (Klasse *hybrid*) innerhalb des *Fraxino-Populetums.* Die weiße Linie markiert den Stand des letzten Hochwassers.

(II) Die Hybrid-Pappel Bestände (Abbildung 1, 2) innerhalb des *Fraxino-Populetums* wurden als eigene Klasse *hybrid* ausgewiesen. Es wurden 16 verschiedene Hybrid-Pappel Bestände kartiert.

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

Tabelle 6: Hybrid-Pappel Forste auf Standorten des *Fraxino-Populetums*

Indikatorarten:	*Populus* x *canadensis* [B] 54.9; *Viscum album* 27.6;
Konstante Arten:	*Populus* X *canadensis* [B] 100; *Cornus sanguinea* [HF] 69, *Rubus caesius* [HF] 88, *Crataegus monogyna* [S] 75, *Evonymus europaea* [S] 88; *Glechoma hederacea* 81, *Urtica dioica* 88;
Dominante Arten:	*Populus* x *canadensis* [B] 19, *Juglans nigra* [B] 6, *Ulmus laevis* [B] 6; *Cornus sanguinea* [HF] 12; *Urtica dioica* 19;

(III) Die restlichen 31 Aufnahmen innerhalb der periodisch überfluteten Au (Abbildung 2) wurden nicht weiter aufgeteilt. Diese Aufnahmen beschreiben, abhängig von ihrer Vegetationsstruktur, mehrere Klassen innerhalb des *NN-Classification systems*. Bei geringer Deckung der Baumschicht wurde die Klasse *sparse*, bei Pappel-dominierten Waldbeständen die Klasse *populus* und bei Mischbeständen innerhalb der periodisch überfluteten Au die Klasse *dense* zugewiesen.

Tabelle 7: Das *Fraxino-Populetum*

Indikatorarten:	*Sambucus nigra* [S] 23.8; *Acer negundo* (juv) 20.9, *Alliaria petiolata* 29.8, *Arctium* sp. 25.3, *Chelidonium majus* 22.6, *Galium aparine* 20.2, *Impatiens parviflora* 26.8, *Urtica dioica* 20.7; *Clematis vitalba* 23.5;
Konstante Arten:	*Cornus sanguinea* [HF] 84, *Rubus caesius* [HF] 90, *Crataegus monogyna* [S] 68, *Evonymus europaea* [S] 81, *Sambucus nigra* [S] 94; *Acer negundo* (juv) 77, *Arctium* sp. 68, *Galium aparine* 74, *Glechoma hederacea* 77, *Impatiens parviflora* 84, *Urtica dioica* 94; *Clematis vitalba* 68;
Dominante Arten:	*Cornus sanguinea* [HF] 10, *Acer negundo* [B] 6, *Ailanthus altissima* [B] 10, *Populus alba* [B] 6, *Populus nigra* [B] 10, *Prunus padus* [B] 6; *Crataegus monogyna* [S] 6; *Glechoma hederacea* 6, *Urtica dioica* 6;

Abbildung 2: Das linke Bild (1) zeigt ein *Cornus sanguinea* dominiertes Gebüsch (Klasse *sparse*). Das rechte Bild (2) zeigt einen Mischbestand (Klasse *dense*) nach einem Hochwasser (weiße Line).

5.3.2. Classes Flooding episodic: sparse | populus | dense – "Harte Au"

Die episodisch überfluteten Bereiche der höher gelegenen Auwälder (*flooding episodic*) können der Klasse *Fraxino-Ulmetum* zugewiesen werden. Aufgrund der Ortho-Infrarot Bilder wurden zwei verschiedene Ausprägungen unterteilt:

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

(I) Die Pappel-dominierten Auwaldbereiche innerhalb des *Fraxino-Ulmetums* werden der Klasse *populus* zugeteilt, wobei die Bereiche mit 16 Aufnahmen charakterisiert werden konnten.

Tabelle 8: Die Pappel-dominierten Bestände des *Fraxino-Ulmetums*

Indikatorarten:	*Acer campestre* [B] 24.3, *Populus alba* [B] 47.7; *Corylus avellana* [S] 27.6; *Acer campestre* (juv) 27.2, *Anemone ranunculoides* 20.1, *Carex sylvatica* 21.5, *Circaea lutetiana* 26.2;
Konstante Arten:	*Populus alba* [B] 100; *Cornus sanguinea* [HF] 88, *Rubus caesius* [HF] 81, *Corylus avellana* [S] 62, *Evonymus europaea* [S] 81, *Sambucus nigra* [S] 75; *Acer campestre* (juv) 88, *Circaea lutetiana* 75, *Fraxinus excelsior* (juv) 81, *Impatiens noli-tangere* 75, *Impatiens parviflora* 62, *Viola odorata* 62;
Dominante Arten:	*Populus alba* [B] 81; *Cornus sanguinea* [HF] 31, *Corylus avellana* [S] 6; *Allium ursinum* 12;

(II) Die verbleibenden 57 Vegetationsaufnahmen wurden dem *Fraxino-Ulmetum* zugeteilt (Abbildung 3). Diese Gruppe umfasst, ebenso wie das eigentliche *Fraxino-Populetum*, je nach Vegetationsstruktur bei geringer Deckung der Baumschicht die Klasse *sparse* und bei den Mischbeständen die Klasse *dense*.

Tabelle 9: Das *Fraxino-Ulmetum*

Indikatorarten:	*Acer campestre* [B] 28.9, *Fraxinus excelsior* [B] 27.9; *Corylus avellana* [S] 29.8; *Acer campestre* (juv) 33.1, *Convallaria majalis* 20.2, *Fraxinus excelsior* (juv) 25.9, *Polygonatum latifolium* 30.8, *Viola odorata* 29.4, *Viola reichenbachiana* 30.4;
Konstante Arten:	*Acer campestre* [B] 61, *Fraxinus excelsior* [B] 63; *Cornus sanguinea* [HF] 95, *Rubus caesius* [HF] 77, *Corylus avellana* [S] 65, *Crataegus monogyna* [S] 82, *Evonymus europaea* [S] 82, *Sambucus nigra* [S] 65; *Acer campestre* (juv) 96, *Aegopodium podagraria* 61, *Circaea lutetiana* 65, *Fraxinus excelsior* (juv) 91, *Impatiens parviflora* 75, *Viola odorata* 82, *Viola reichenbachiana* 61;
Dominante Arten:	*Acer campestre* [B] 5, *Carpinus betulus* [B] 5, *Fraxinus excelsior* [B] 18, *Juglans regia* [B] 5; *Cornus sanguinea* [HF] 9; *Allium ursinum* 12;

Abbildung 3: Das *Fraxino-Ulmetum* in verschiedenen Ausprägungen.

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

5.3.3. Class Transition Zone – Ökotone der Fließgewässer

Die *Transition Zone*, welche basierend auf Nachbarschaftsbeziehungen der *Image Objects* zu dem Gewässersystem definiert wurde (siehe *Manuscript for publication*), kann einerseits durch Gebüschformationen des *Fraxino-Populetums* und andererseits durch das an diesen Standorten charakteristische *Salicetum albae* beschrieben werden. Im Gegensatz zu den Überflutungsbereichen (*flooding periodic, flooding episodic*) wird die *Transition Zone* in der *NN-Classification* nicht weiter unterteilt. Das *Salicetum albae* konnte insgesamt durch 22 Aufnahmen beschrieben werden (Abbildung 4).

Tabelle 10: Das *Salicetum albae*

Indikatorarten:	*Populus nigra* [B] 29.5, *Salix alba* [B] 81.4; *Rubus caesius* [HF] 54.3; *Acer negundo* (juv) 44.1, *Agrostis stolonifera* 40.9, *Cirsium arvense* 26.7, *Deschampsia cespitosa* 34.0, *Persicaria hydropiper* 34.2, *Phalaris arundinacea* 80.2, *Phragmites australis* 22.8, *Populus nigra* (juv) 25.2, *Rorippa* sp. 22.7, *Salix alba* (juv) 36.4, *Senecio sarracenicus* 20.1, *Solidago gigantea* 54.8, *Symphytum officinale* 54.0, *Urtica dioica* 51.5; *Calystegia sepium* 27.3, *Solanum dulcamara* 45.7;
Konstante Arten:	*Salix alba* [B] 91; *Rubus caesius* [HF] 100, *Sambucus nigra* [S] 82; *Acer negundo* (juv) 68, *Phalaris arundinacea* 95, *Solidago gigantea* 68, *Symphytum officinale* 64, *Urtica dioica* 91;
Dominante Arten:	*Populus nigra* [B] 9, *Salix alba* [B] 45; *Rubus caesius* [HF] 9; *Urtica dioica* 9;

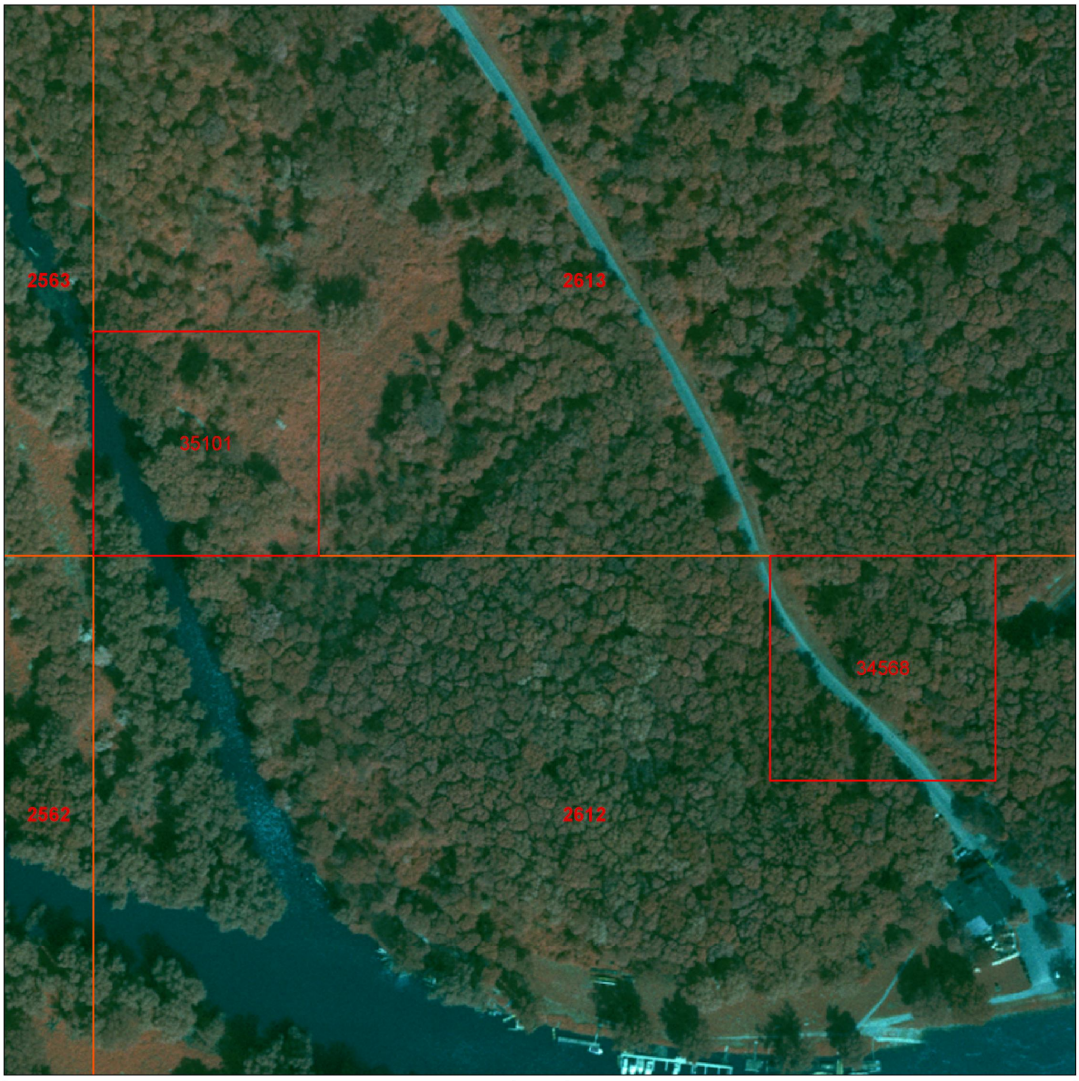
Abbildung 4: Das linke Bild (1) zeigt einen frischen Uferkantenanriss an der Donau im Bereich der Naturversuchsstrecke des Flussbaulichen Gesamtprojektes. Das rechte Bild (2) stellt einen Seitenarm der Donau bei Niedrigwasser dar.

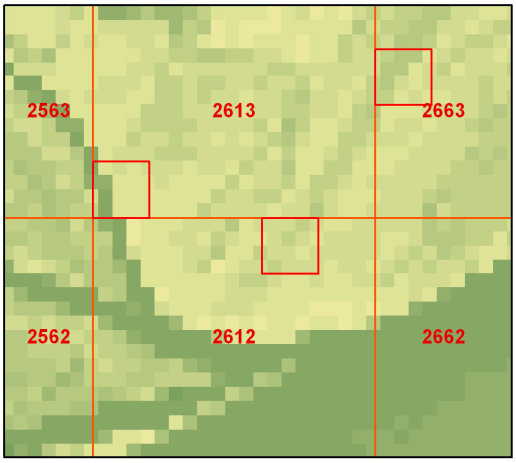
©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

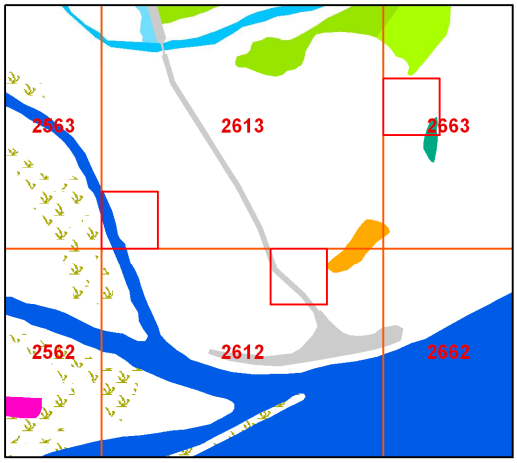
5.4: Anhang: Beispiel einer Geländekarte

Die Geländekarten umfassten einen Ortho-Infrarot-Bild Ausschnitt (oben, hier am Beispiel der Kartierungszellen 35101 und 34568) in Kombination mit dem eingeebneten Höhenmodell (links unten) und der Biotoptypenkarte (rechts unten).

Fläche 35101 | 34568 **Orth**







©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

6. LITERATURVERZEICHNIS

ADLER, W., OSWALD, K. & FISCHER, R. (1994). *Exkursionsflora von Österreich*. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart-Wien.

BAATZ, M. & SCHÄPE, A. (2000). Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In J. Strobl (Ed.) *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000*, (pp. 12-23). Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe.

BENZ, U.C., HOFMANN, P., WILLHAUCK, G., LINGENFELDER, I. & HEYNEN, M. (2004). Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *58* (3-4), 239-258.

BLASCHKE, T. (2006). The role of the spatial dimension within the framework of sustainable landscapes and natural capital. *Landscape and Urban Planning*, *75* (3-4), 198-226.

BLASCHKE, T., LANG, S. & HAY, G.J. (Eds.) (2008). *Object-Based Image Analysis: Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications*. Springer-Verlag.

BRAUN-BLANQUET, J. (1964). *Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde*. Springer-Verlag.

BURNETT, C. & BLASCHKE, T. (2003). A multi-scale segmentation/object relationship modelling methodology for landscape analysis. *Ecological Modelling*, *168* (3), 233-249.

CLEVE, C., KELLY, M., KEARNS, F.R. & MORITZ, M. (2008). Classification of the wildland-urban interface: A comparison of pixel- and object-based classifications using high-resolution aerial photography. *Computers, Environment and Urban Systems*, *32* (4), 317-326.

DEFINIENS A.G. (2006). Definiens professional 5 - User Guide (Document version 5.0.6.2) and Reference Book (Document version 5.0.6.1).

DRESCHER, A. & FRAISSL, C. (2006). Dealpine und demontane Auen im südöstlichen Mitteleuropa. *Waldschutzgebiete Baden-Württemberg*, *10,* 53-68.

DUFRENE, M. & LEGENDRE, P. (1997). Species assemblages and indicator species: The need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*, *67* (3), 345-366.

FINLAYSON, C.M., BEGG, G.W., HOWES, J., DAVIES, J., TAGI, K. & LOWRY, J. (2002). *A Manual for an Inventory of Asian Wetlands: Version 1.0*. Kuala Lumpur, Malaysia.

FORMAN, R.T.T. (1995). *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions*. Cambridge University Press.

FRISSELL, C.A., LISS, W.J., WARREN, C.E. & HURLEY, M.D. (1986). A hierarchical framework for stream habitat classification: Viewing streams in a watershed context. *Environmental Management*, *10* (2), 199-214.

HÁJEK, F. (2008). Process-based approach to automated classification of forest structures using medium format digital aerial photos and ancillary GIS information. *European Journal of Forest Research*, *127* (2).

HILL, M.O. (1979). *TWINSPAN: A Fortran Program for Arranging Multivariate Data in an Ordered Two-way Table by Classification of the Individuals and Attributes*. Ithaca, NY, USA: Ecology And Systematics, Cornell University.

JELEM, H. (1974). Die Auwälder der Donau in Österreich. *Mitteilungen der Forstlichen Bundes-Versuchsanstalt, 109*. Wien.

JELEM, H., MARGL, H. & MÜLLER, F. (1961, 1973). *Forstliche Standortskarte Donauauen. Orth-Eckartsau.* Forstliche Bundesversuchsanstalt Wien, Institut Standort.

JOBIN, B., LABRECQUE, S., GRENIER, M. & FALARDEAU, G. (2008). Object-based classification as an alternative approach to the traditional pixel-based classification to identify potential habitat of the grasshopper sparrow. *Environmental Management*, *41* (1), 20-31.

JUNK, J.W., BAYLEY, P.B. & SPARKS, R.E. (1989). The flood pulse concept in river floodplain systems. *Canadian Special Publications of Fisheries and Aquatic Sciences*, *106*, 110-127.

KIRISITS, T. & KONRAD, H. (2004). Dutch elm disease in Austria. *Invest Agrar: Sistemas y Recursos Forestales (Forest Resources and Systems), 13* (1), 81-92.

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

LAKE, P.S., BOND, N. & REICH, P. (2007). Linking ecological theory with stream restoration. *Freshwater Biology*, *52* (4), 597-615.

LANDIS, R.J. & KOCH, G.G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, *33* (1), 159-174.

LAZOWSKI, W. (1984). Über die Auwälder an Donau, March und Thaya. *ÖKO-L, 6* (4), 27-32.

LEYER, I. & WESCHE, K. (2008). *Multivariate Statistik in der Ökologie: Eine Einführung*. Springer-Verlag.

LU, D. & WENG, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, *28* (5), 823-870.

MILETICH, D. (1996). *Die Vegetation der Stopfenreuther Au und ihre standörtliche Differenzierung.* Diplomarbeit. Universität Wien, Institut für Pflanzenphysiologie.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005*). Ecosystems and human well-being: Wetlands and water synthesis*. URL http://www.millenniumassessment.org

O'NEILL, R.V., DEANGELIS, D.L. & WAIDE, J.B. (1986). *A Hierarchical Concept of Ecosystems*. Princeton University Press, Princeton.

OZESMI, S.L. & BAUER, M.E. (2002). Satellite remote sensing of wetlands. *Wetlands Ecology and Management*, *10* (5), 381-402.

PETERSEIL, J., WRBKA, T., PLUTZAR, C., SCHMITZBERGER, I., KISS, A., SZERENCSITS, E., REITER, K., SCHNEIDER, W., SUPPAN, F. & BEISSMANN, H. (2004). Evaluating the ecological sustainability of Austrian agricultural landscapes - the SINUS approach. *Land Use Policy*, *21* (3), 307-320.

POOLE, G.C. (2002). Fluvial landscape ecology: addressing uniqueness within the river discontinuum. *Freshwater Biology*, *47* (4), 641-660.

REITER, K. (1993): *Computergestützte Methoden der Vegetationsökologie, unter besonderer Berücksichtigung der Stichprobenerhebung mit Unterstützung eines geographischen Informationssystems.* Dissertation. Universität Wien, Institut für Pflanzenphysiologie.

JÄGER, E. J. & WERNER, K. (Eds.) (2000). Exkursionsflora von Deutschland, 4 Bde., Bd.3, Gefäßpflanzen, Atlasband. Spektrum Akademischer Verlag.

SCHIEMER, F., BAUMGARTNER, C. & TOCKNER, K. (1999). Restoration of floodplain rivers: The 'Danube restoration project'. *River Research and Applications*, *15* (1-3), 231-244.

SCHRATT- EHRENDORFER, L. & ROTTER, D. 1999. Die Donaualtwässer der Lobau bei Wien im Überblick. In: Schratt-Ehrendorfer & Rotter (Ed.) (1999) *Geobotanik und Ökologie der Donaualtwässer bei Wien,* (pp. 1-21). Oberösterreichisches Landesmuseum, Biologiezentrum Linz.

SCHRATT- EHRENDORFER, L. 2000. Entwicklungstendenzen von Vegetationseinheiten an Sonderstandorten der Donauauen bei Wien (Untere Lobau). *Verhandlungen der Zoologischen- Botanischen Gesellschaft Österreich, 137*. 137-146.

STANFORD, J.A. & WARD, J.V. (1993). An ecosystem perspective of alluvial rivers, connectivity and the hyporheic corridor. *Journal of the North American Benthological Society*, *12,* 48-60.

STANFORD, J.A. & WARD, J.V. (2001). Revisiting the serial discontinuity concept. *Regulated Rivers: Research & Management*, *17* (4-5), 303-310.

TICHÝ, L. (2002). JUICE, software for vegetation classification. *Journal of Vegetation Science*, *13,* 451-453.

TOCKNER, K., MALARD, F. & WARD, J.V. (2000). An extension of the flood pulse concept. *Hydrological Processes*, *14* (16-17), 2861-2883.

TOCKNER, K., SCHIEMER, F., BAUMGARTNER, C., KUM, G., WEIGAND, E., ZWEIMÜLLER, I. & WARD, J.V. (1999). The Danube restoration project: Species diversity patterns across connectivity gradients in the floodplain system. *River Research and Applications*, *15* (1-3), 245-258.

TRAXLER, A. (Ed.) (1998). *Handbuch des vegetationsökologischen Monitorings. Methoden, Praxis, angewandte Projekte.* Monographien, 89A. Umweltbundesamt, Wien.

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

UMWELTDATA GmbH (1999): *Biotoptypenerhebung von Flächen außerhalb des Waldes im Nationalpark Donau-Auen aus Farbinfrarotbildern*. *Endbericht zur Luftbildinterpretation und Kartenerstellung*. Unter Mitarbeit von H. Burger und H. Dogan-Bacher. Wien.

VANNOTE, R.L., MINSHALL, G., CUMMINS, K.W., SEDELL, J.R. & CUSHING, C.E. (1980). The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *37* (1), 130-137.

VIADONAU (Österreichische Wasserstraßen-GmbH) (2006). Das Flussbauliche Gesamtprojekt Donau östlich von Wien. www.donau.bmvit.gv.at.

WARD, J.V. & STANFORD, J.A. (1983). *The serial discontinuity concept of lotic ecosystems*. Ann Arbor Scientific Publishers: Ann Arbor.

WARD, J.V. & STANFORD, J.A. (1995). The serial discontinuity concept: Extending the model to floodplain rivers. *Regulated Rivers: Research & Management, 10* (2-4), 159-168.

WARD, J., MALARD, F. & TOCKNER, K. (2002a). Landscape ecology: a framework for integrating pattern and process in river corridors. *Landscape Ecology*, *17* (0), 35-45.

WARD, J.V., TOCKNER, K., ARSCOTT, D.B. & CLARET, C. (2002b). Riverine landscape diversity. *Freshwater Biology*, *47* (4), 517-539.

WILLNER, W. & GRABHERR, G. (Eds.) (2007). *Die Wälder und Gebüsche Österreichs: Ein Bestimmungswerk mit Tabellen (in zwei Bänden).* Spektrum Akademischer Verlag.

WU, J. & LOUCKS, O.L. (1995). From balance of nature to hierarchical patch dynamics: A paradigm shift in ecology. *The Quarterly Review of Biology*, *70* (4), 439-466.

ZADEH, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, *8* (3), 338-353.

©Nationalpark Donau-Auen GmbH, download www.zobodat.at

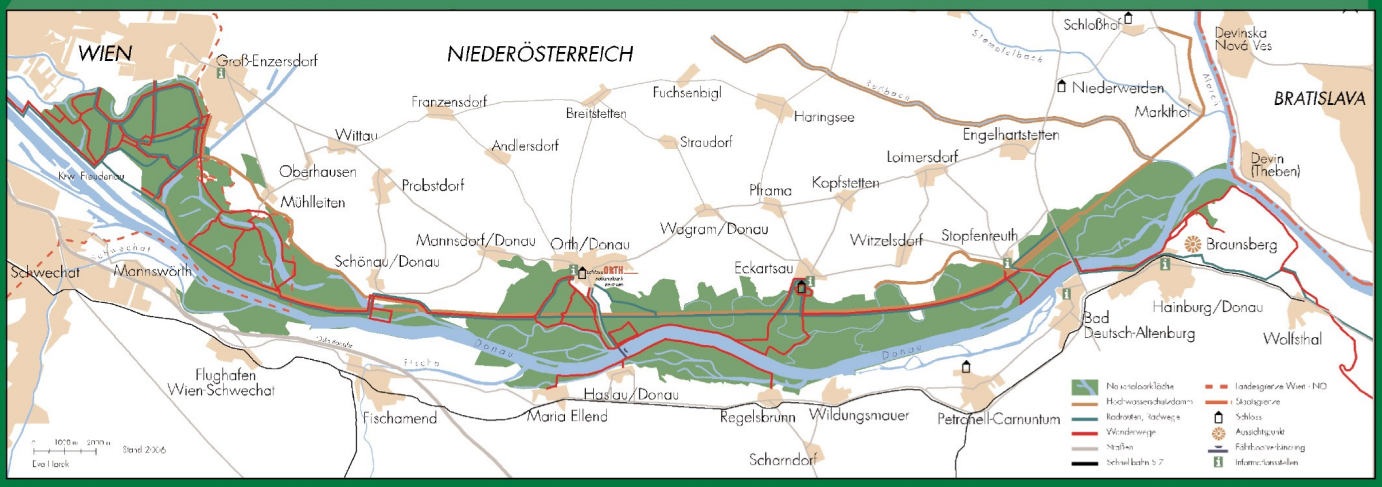
- Herausgeber: Nationalpark Donau-Auen GmbH
- Titelbild: I. Wagner
- Für den Inhalt sind die Autoren verantwortlich

- Für den privaten Gebrauch beliebig zu vervielfältigen
- Nutzungsrechte der wissenschaftlichen Daten verbleiben beim Rechtsinhaber

- Als pdf-Datei direkt zu beziehen unter www.donauauen.at

- Bei Vervielfältigung sind Titel und Herausgeber zu nennen / any reproduction in full or part of this publication must mention the title and credit the publisher as the copyright owner: © Nationalpark Donau-Auen GmbH

- Zitiervorschlag: WAGNER, I. (2016) Die Anwendung von Objekt-basierten Bildklassifikationsverfahren zur Erstellung eines hierarchischen Klassifizierungssystems der offenen Au im Nationalpark Donau-Auen. Wissenschaftliche Reihe Nationalpark Donau-Auen, Heft 57



Nationalpark Donau-Auen GmbH
A-2304 Orth/Donau, Schloss Orth
Tel. 02212/3450, Fax DW 17
nationalpark@donauauen.at, www.donauauen.at

KOSTBARE NATUR FÜR GENERATIONEN

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Nationalpark Donauauen - Wissenschaftliche Reihe

Jahr/Year: 2016

Band/Volume: 57

Autor(en)/Author(s): Wagner Iris

Artikel/Article: Die Anwendung von Objekt-basierten Bildklassifikationsverfahren zur Erstellung eines hierarchischen Klassifizierungssystems der offenen Au im Nationalpark Donau-Auen 1-46