

Projekt "Historische Nutzung des Gebietes und seine Bedeutung für den zukünftigen Schutz wichtiger Arten entlang der bayerisch-tschechischen Grenze", Projekt Nr. 293.

Abschlussbericht über die Analyse der Sedimentationsdaten (Aktivität A1.4)

Karls-Universität - Petr Kuneš, Přemysl Bobek, Václav Šulc, Januar 2023



**Europäische Union
Evropská unie**

Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung
Evropský fond pro
regionální rozvoj



Ziel ETZ | Cíl EÚS

Freistaat Bayern –
Tschechische Republik
Česká republika –
Svobodný stát Bavorsko
2014 – 2020 (INTERREG V)



Inhaltsübersicht

Einführung	2
Untersuchungsgebiet	3
Methodik	6
Datierung und Chronologie	6
Geochemie	7
Pollenanalyse	7
Quantitative Rekonstruktion der Vegetation	8
Rekonstruktion der Brandgeschichte	9
Ergebnisse und Interpretation	10
Datierung der Profile	10
Vegetationsgeschichte	10
Veränderungen in der Waldzusammensetzung im AR-Gebiet	10
Veränderungen in der Waldzusammensetzung in der PC-Region	14
Regionale Veränderungen der Vegetationsbedeckung/Bodenbedeckung (REVEALS, land cover)	15
Branddynamik	16
Diskussion und Methoden des Schutzes	20
Ursprünglichkeit der Waldzusammensetzung	20
Brände als natürlicher Bestandteil der Walddynamik	22
Menschlicher Einfluss und Landschaftsstruktur	23
Schlussfolgerung und Empfehlungen für den Naturschutz	24
Literatur	26
Anhänge	29
Alters-Tiefen-Modelle für alle Sedimentaufzeichnungen	29

Einführung

Die heutige Landschaft spiegelt Prozesse wider, bei denen sich die Artenzusammensetzung, der Anteil der Entwaldung oder die natürlichen und anthropogenen Störungen der letzten Jahrhunderte verändert haben. Eine langfristige Perspektive ist daher für das Verständnis heutiger Landschaften unerlässlich und kann wesentlich zu dem Schutz der sog. Schirmarten und Erhaltung der Artenvielfalt beitragen.

Veränderungen in der Landschaft auf der Skala von Jahrzehnten und Jahrhunderten können anhand verschiedener Sedimentaufzeichnungen untersucht werden. Dazu gehören

natürliche Archive aquatischer und terrestrischer Umgebungen, die an Orten mit hoher Ansammlung organischer Stoffe - Seen, Torfmoore, Niedermoore usw. - erhalten sind. Diese Archive enthalten Informationen über das Vorkommen von Pflanzen in der Vergangenheit in Form von Pollen und anderen Pflanzenresten oder über verlaufende Störungen wie Brände in Form von verkohlten Partikeln oder Schädlingen und Herbivorie in Form von Pilzsporen. Die genaue Datierung dieser Sedimentaufzeichnungen mit modernen Methoden ermöglicht es, die Ereignisse auf einer zeitlichen Skala einzuordnen und mit anderen (z. B. historischen) Datenquellen zu vergleichen.

Wir wählten mehrere Sedimentaufzeichnungen in unseren Untersuchungsgebieten aus, datierten sie und führten paläoökologische Analysen durch. Wir haben uns vor allem auf die Beantwortung folgender Fragen konzentriert: (i) wie war das Verhältnis von Wald zum Waldlosen Gebiet, (ii) wie hat sich die Walddzusammensetzung verändert und welche Arten können als natürlich angesehen werden, (iii) wie häufig gab es Brände, (iv) und wann kam der Mensch in die Landschaft und wie stark hat er sie beeinflusst?

Untersuchungsgebiet

Das gesamte Untersuchungsgebiet besteht aus zwei Regionen: dem **nördlichen Aš/Rehau (AR)** und dem südlichen **Pfreimd-Flussgebiet (PC)** (Abb. 1). In jeder Region wurden zunächst 4x4 km große Quadrate für eine detaillierte Vegetations- und Landschaftskartierung festgelegt. Daher wurde die Auswahl geeigneter Standorte für Sedimentarchive an diese Quadrate angepasst.

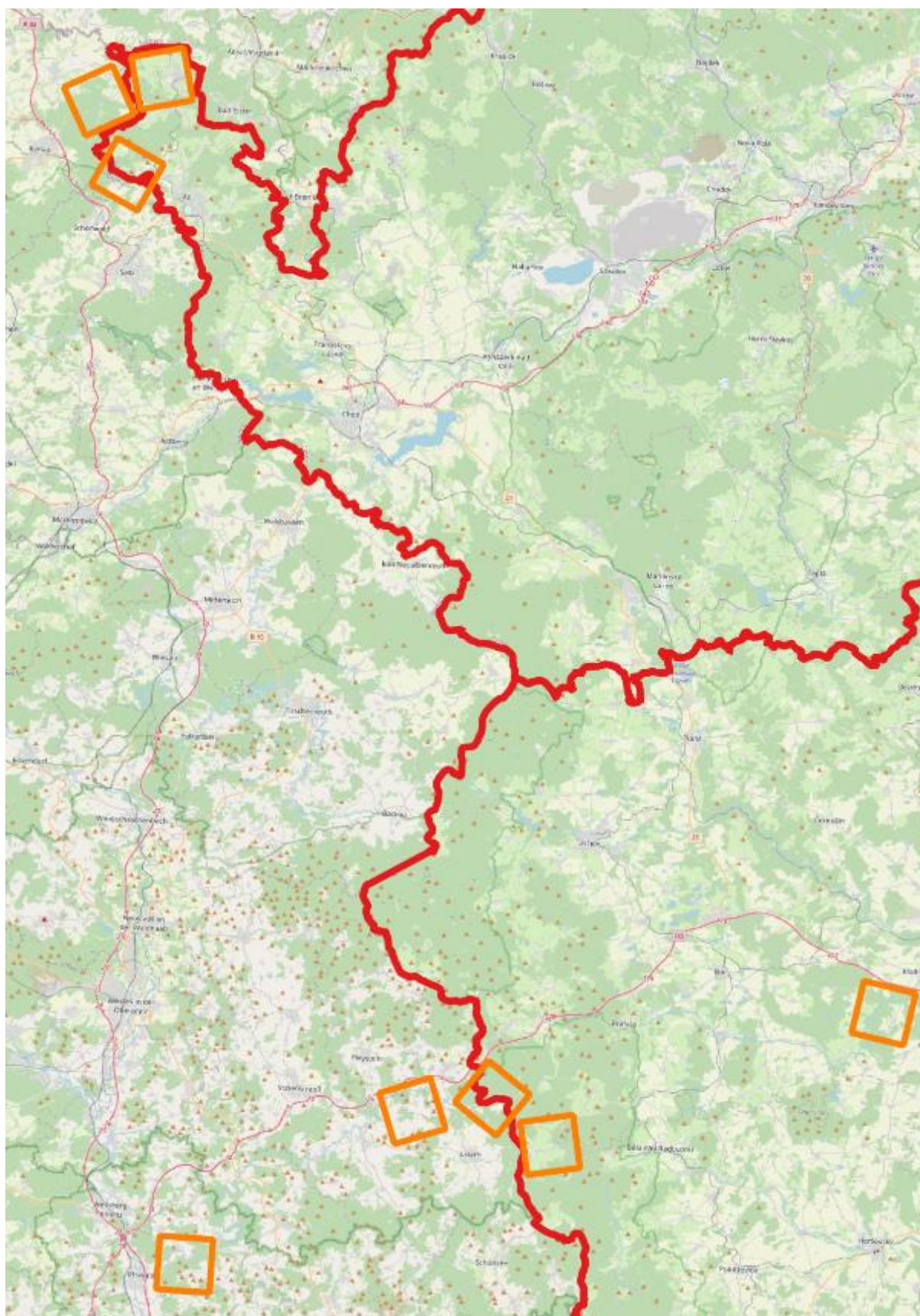


Abb. 1: Links: Lage der Kartierungsquadrate (orange) in den nördlichen (AR) und südlichen (PC) Gebieten. Oben rechts: Lage der beprobten Profile im Gebiet Aš/Rehau (AR); Unten rechts: Lage des beprobten Profils im Flussgebiet der Pfreimd. Zusätzliche Pollendaten für die Erstellung des quantitativen Modells wurden für Standorte in der weiteren Umgebung (linke Karte) gewonnen - siehe Tabelle 3 für eine vollständige Liste.

In der AR-Region haben wir nach einer detaillierten Prospektion des gesamten Gebiets drei Profile ausgewählt. Die Standorte befinden sich direkt in den Quadraten oder in deren unmittelbarer Nähe. In der PC-Region suchten wir zunächst im Mittelquadrat nach potentiell vorhandenen Profilen, die auf früheren paläoökologischen Untersuchungen beruhen (Windbruch-Profil, KNIPPING 1997). Leider war im Grenzgebiet aufgrund des früheren intensiven Torfabbaus kein geeignetes Material vorhanden. Daher fanden wir nur in der weiteren Umgebung das erhaltene Torfmoor Podkovák, etwa 10 km von der Grenze unseres Kartierungsquadrats entfernt. Da die paläoökologischen Daten (insbesondere die Pollenanalyse) ein regionales Signal liefern, gehen wir davon aus, dass die Daten von diesem Standort im Kontext der kartierten Standorte interpretiert werden können.

Tabelle 1: Liste der beprobten Sedimentprofile mit Lage und Tiefe der Probenahme in beiden Untersuchungsgebieten.

Standort	Koordinaten	Datum der Probenahme	Tiefe bei Probenahme
<i>Aš/Rehau (AR)</i>			
Dinesloh	N 50.273322 E 12.071468	4.6.2020	132 cm
Újezd bei Krásná	N 50.247183 E 12.106841	29.6.2021	114 cm
Studánka	N 50.276239 E 12.172885	29.6.2021	81 cm
<i>Pfreimd-Flussgebiet (PC)</i>			
Podkovák	N 49.7361389 E 12.52267	7.7.2020	283 cm

Für die Zwecke der regionalen quantitativen Vegetationsrekonstruktion wurden verfügbare und analysierte paläoökologische Daten aus einem Radius von etwa 60 km aus der tschechischen Quartärpollendatenbank (PALYCZ, KUNEŠ et al. 2009) gesammelt. Aus dieser Datenbank wurden fünf weitere Standorte in der AR-Region (vier auf der deutschen Seite des Fichtelgebirges und einer im Egerer Becken, Tab. 3, Abb. 1) und vier weitere Standorte in der PC-Region ausgewählt (Tab. 3, Abb. 1).

Methodik

Datierung und Chronologie

Das Alter aller Sedimentprofile wurde durch radiometrische Datierung mit der ^{14}C AMS-Methode bestimmt. Die Proben wurden im Hinblick auf die Stratigraphie jedes Profils einheitlich entnommen (einschließlich etwaiger Lücken usw.) und anschließend an das Tschechische Radiokarbonlabor (CRL) geschickt. Die daraus resultierenden Alter werden als konventionelle (Radiokohlenstoff-)Alter angegeben, die mithilfe von Kalibrierungskurven in Kalenderalter umgerechnet werden müssen (REIMER et al. 2020). Gegebenenfalls wurde der obere Teil des Bohrkerns mit dem Pb-Isotop²¹⁰ im Radiometrischen Labor der Fakultät für Naturwissenschaften der Karls-Universität datiert. Zur Schätzung des Alters der einzelnen Proben, die zwischen den datierten Schichten analysiert wurden, haben wir das so genannte "Alters-Tiefen-Beziehung Modell (age-Depth)" verwendet, das auf statistischen bayesischen Techniken beruht. Die einzelnen Modelle wurden mit dem Programm rbacon in der Sprache R erstellt (BLAAUW & CHRISTEN 2011). Cal. BP kennzeichnet kalibrierte Altersangaben vor 1950. Alle Alters-Tiefen-Beziehung Modelle sind im Anhang aufgeführt.

Tabelle 2: Liste der datierten Proben in den einzelnen Profilen; das ^{14}C -Alter ist ein unkalibriertes Alter, das weiter kalibriert werden muss, um ein kalendarisches Alter zu erhalten. Die Kalibrierung ist in die Erstellung der Alterstiefenmodelle einbezogen (siehe Methoden). ^{210}Pb -Alter sind in unseren Altersangaben enthalten. Eine potenziell kontaminierte Probe ist mit einem Sternchen gekennzeichnet.

Standort	Labor-Code	^{14}C-Alter	^{210}Pb-Alter	Abweichung	Probe	Datiertes Material
Dinesloh	Crl-21_588	-2376		16	DIN 8-9	Torf
Dinesloh	Crl-21_589	337		18	DIN 23-24	Torf
Dinesloh	Crl-21_590B	1519		17	DIN 36-37	Torf
Dinesloh	Crl-21_591	5094		26	DIN 48-49	Torf
Dinesloh	Crl-21_592	6792		26	DIN 64-65	Torf
Dinesloh	Crl-21_593B	9244		29	DIN 75-76	Torf
Dinesloh	Crl-21_594	9448		29	DIN 99-100	Torf
Podkovák			2018	2.3	Podk 0-2	Torf
Podkovák			2011	2.4	Unterabschnitte 2-4	Torf
Podkovák			2000	2.9	Unterabschnitt 4-6	Torf
Podkovák			1983	4	Aushilfen 6-8	Torf
Podkovák			1963	6	Unterabschnitt 8-10	Torf
Podkovák			1953	6.1	Unterabschnitt	Torf

					10-12	
Podkovák			1930	8.2	Unterabschnitt 12-14	Torf
Podkovák			1899	10.9	Nachträge 14-16	Torf
Podkovák	Crl-21_375	158		16	20-21	Torf
Podkovák	Crl-21_369	2081		19	50-51	Torf
Podkovák	Crl-21_370	4283		23	125-126	Torf
Podkovák	Crl-21_371	4695		25	140-141	Torf
Podkovák	Crl-21_372	6177		24	185-186	Torf
Podkovák	Crl-21_373	7750		27	225-226	Torf
Podkovák	Crl-21_374	11264		38	273-274	Torf
Studánka	Crl-22_0022	3906		21	44-45	Torf
Studánka	Crl-22_0023	5937		49	55-56	Torf
Studánka	Crl-22_0024	8434		33	80-81	Torf
Újezd	Crl-22_0419	902		21	30-31	Kohlenstoffpartikeln 5x <i>Picea abies</i>
Újezd	Crl-22_0420	4246		20	42-43	Kohlenstoffpartikeln von <i>Picea abies</i>
Újezd	Crl-22_0421	6876		29	73-74	Nadeln <i>Picea</i> , <i>Carex</i> Samen
Újezd	Crl-22_0422*	5378		27	96-97	Torf

Geochemie

Die Röntgenfluoreszenzspektroskopie (XRF) wurde zur Bestimmung der Elementzusammensetzung des Sediments eingesetzt. Zu diesem Zweck wurde eine programmierbare, horizontal bewegliche Plattform verwendet, die mit einem Computer verbunden war. Jeder Sedimentkern wurde in einen mit einer Polyethylenmembran abgedeckten Sedimentbehälter gelegt. Die RFA-Analysen wurden entlang der gesamten Länge der Kerne in 5-mm-Schritten durchgeführt, wobei ein kollimierter Strahldurchmesser von 2,2 mm und eine Belichtungszeit von 6 Minuten für jede Messstelle verwendet wurde. Wir verwendeten den Geochem-Modus mit zwei Strahlen (bis zu 11 keV für leichtere Elemente für 3 Minuten und bis zu 50 keV für schwerere Elemente für 3 Minuten). Um die Korrelation der einzelnen Kerne zu überprüfen, wurden Variationen verschiedener Elemente verwendet.

Pollenanalyse

Jedes Profil wurde für die Pollenanalyse so beprobt, dass wichtige Zeiträume erfasst wurden und für die oberen Teile der Aufzeichnungen eine höhere zeitliche Auflösung gewählt wurde.

Die Proben wurden nach Standardmethoden für die Palynologie vorbereitet. Ein bekanntes Volumen an Tracer (Lycopodium-Tabletten, hergestellt von <https://www.geology.lu.se/services/pollen-tablets>) wurde vor der chemischen Behandlung zu einem bekannten Volumen der Probe (1 cm³) hinzugefügt.

In jeder Probe wurden mindestens 500 Pollenkörner von Landpflanzen bestimmt. Die Identifizierung der Pollenarten erfolgte anhand der Bestimmungsschlüssel von PUNT et al. (1976-2009), die bei Bedarf ergänzt wurden (BEUG 2004). Neben der Identifizierung der Pollenkörner wurden auch die mikroskopische Holzkohlepartikeln (größer als 20 µm) nach Größenklassen quantifiziert. Gleichzeitig wurden auch Nicht-Pollen-Objekte identifiziert. Für die Identifizierung wurden die neuesten Erkenntnisse aus der Internet-Datenbank dieser Objekte <http://non-pollen-palynomorphs.uni-goettingen.de/> verwendet.

Die Daten wurden für das gesamte Profil in der Primärdatentabelle über die Anzahl der einzeln identifizierten Mikrofossilien in jeder Probe zusammengeführt. Darüber hinaus wurde mit der Tilia-Software (<https://www.neotomadb.org/apps/tilia>) ein Diagramm der Pollenanteile erstellt.

Die Zonierung der Pollendiagramme wurde auf der Grundlage einer stratigraphisch bedingten Clusteranalyse und einer visuellen Beurteilung der Zonen bestimmt.

Quantitative Rekonstruktion der Vegetation

Für jedes Untersuchungsgebiet schätzten wir die regionale Präsenz der regionalen Vegetation anhand der Grundlage einer Kombination von regional verfügbaren Pollenaufzeichnungen (REVEALS-Modell). Die Methodik von ABRAHAM et al. (2016) verwendet einen maximalen Flächenparameter von 60 km (das Gebiet mit einem Radius von 60 km, für das die Schätzungen berechnet wurden) und eine Windgeschwindigkeit von 4 m/s. Schätzungen der Pollenproduktivität und der Pollenfallrate wurden in Anlehnung an ABRAHAM et al. (2016) verwendet. Insgesamt wurden acht Pollendatensätze für die AR-Region und fünf Datensätze für die PC-Region verwendet (Tabelle 3).

Tabelle 3: Liste der für das REVEALS-Modell verwendeten Standorte. Die im Rahmen dieses Projekts analysierten Standorte sind mit einem Sternchen gekennzeichnet.

Standort	Region	Koordinaten	Höhenlage [m über dem Meeresspiegel]	Größe des Standorts [ha]	Höchstalter [cal. BP]
Dinesloh *	AR	N 50.273322; E 12.071468	600	0.4	10992
SOOS	AR	N 50.14944; E 12.40361	435	452	11930
Sauborst	AR	N 50.27617; E 12.09961	572	0.5	8182
Seelohe	AR	N 50.0262; E 11.859	778	0.5	7547
Studánka *	AR	N 50.276239; E 12.172885	600	0.1	9547

Újezd bei Krásná *	AR	N 50.247183; E 12.106841	580	0.2	9486
Weißensstadter Forst	AR	N 50.133784; E 11.881848	725	0.5	7025
Wolfslohe	AR	N 49.90756; E 12.04038	826	1	5397
Bretenlohe	PC	N 49.78722; E 12.4625	745	1	13146
Kulzer Moos	PC	N 49.39472; E 12.44278	481	12	6200
Podkovák *	PC	N 49.7361389; E 12.52268	705	0.5	13212
Weiherlohe	PC	N 49.72972; E 12.3875	685	1	11369
Windbruch	PC	N 49.60917; E 12.54278	497	20	8628

Rekonstruktion der Brandgeschichte

Veränderungen in der Konzentration der makroskopischen Holzkohlenpartikeln in Moorsedimenten spiegeln vergangene Feueraktivitäten wider (WHITLOCK & LARSEN 2001). An allen Untersuchungsstandorten wurden Analysen von Holzkohlenpartikeln durchgeführt, um die lokale Feuergeschichte zu rekonstruieren. Die beprobten Profile wurden kontinuierlich in Abständen von 1 cm bemustert.

Das Volumen der Sedimentprobe betrug 3 ml, um die Empfindlichkeit der Methode für schwächere Brände zu gewährleisten. Die Proben wurden zunächst 24 Stunden lang in 10%igem Kaliumhydroxid (KOH) aufgelöst, um das Sediment zu zersetzen. Anschließend wurden sie mit Hilfe eines Wasserstrahls, der aus einer Düse gesprüht wurde, durch 125 µm Maschensiebe gesiebt. Das nicht verkohlte organische Material wurde durch 6-stündige Behandlung mit 10 %iger Natriumhypochloritlösung (NaOCl) entfärbt. Um die Zählung der Holzkohlepartikeln zu erleichtern, wurde der größte Teil der unverkohlten Pflanzenreste manuell unter einem Stereomikroskop entfernt. Die Probe wurde dann gleichmäßig in einer Petrischale verteilt und die Holzkohlepartikeln wurden bei 63-150-facher Vergrößerung gezählt. Die Gesamtzahl der Holzkohlepartikeln in einer Probe mit bekanntem Volumen wurde in eine Konzentration (Partikel cm⁻³) umgerechnet. Der Konzentrationswert wurde als Ablagerungsrate der Holzkohlepartikeln (Partikel cm⁻² Jahr⁻¹; CHAR = Holzkohlepartikeln - Akkumulationsrate) unter Verwendung des Sedimentationsratenmodells ausgedrückt. Die lokale Brandgeschichte wurde mit Hilfe einer Zerlegungsmethode rekonstruiert, die das Brandsignal in eine Komponente des langfristigen Trends und in deutliche Spitzen der Ablagerung der Holzkohlepartikeln aufteilt. Als Grundlage für die Modellierung des Trends mittels LOESS-Funktionen wurde ein Zeitfenster von 2000 Jahren betrachtet. Der methodische Ansatz wird in BOBEK et al. (2018) ausführlicher beschrieben.

Ergebnisse und Interpretation

Datierung der Profile

Die Datierung (siehe Tabelle 2) ergab ein überraschend hohes Alter aller untersuchten Fundstellen. Der älteste Standort in der AR-Region ist Dinesloh, wo die Sedimentation fast zu Beginn des Holozäns begann. Das Alter der Fundstelle Újezd bei Krásná konnte aufgrund des Einflusses einer jüngeren Datierung an der Basis des Profils, das wahrscheinlich durch Wurzeleinwuchs verursacht wurde, nicht eindeutig bestimmt werden, aber aufgrund des biostratigraphischen Vergleichs mit den anderen Fundstellen datieren wir den Beginn der Sedimentation ebenfalls in das ältere Holozän. Alle Standorte weisen eine uneinheitliche Sedimentation auf, so dass wir von mehreren Sedimentationsbrüchen ausgehen können, die eine genauere Datierung der Schichten erschweren, insbesondere am Übergang zwischen dem mittleren und jüngeren Holozän (ca. 4.000-2.000 cal. BP). Für das Studánka-Profil geben wir das Alter in der oberen Hälfte des Profils nicht an, da in diesem Teil keine Daten vorliegen und möglicherweise eine Unterbrechung der Sedimentation vorliegt, die das Alters-Tiefen-Beziehung Modell erheblich präzisieren würde. Die Datierung der Podkovák-Fundstelle im PC-Gebiet zeigt eine kontinuierliche Sedimentation seit dem Spätglazial. Der oberste Teil war auch für ^{210}Pb -Datierungen geeignet, die die letzten 150 Jahre in einem Bereich von etwa 20 cm zeigten.

Vegetationsgeschichte

Die Vegetationsgeschichte wird in Form von Pollendiagrammen dargestellt (Abb. 2-5). Diese werden auf der vertikalen Achse als Zeit und auf der horizontalen Achse als Prozentsatz der verschiedenen Pollentaxa dargestellt. Pflanzen produzieren Pollen, und dieser repräsentiert somit die umgebende Vegetation.

Veränderungen in der Waldzusammensetzung im AR-Gebiet

Das Dinesloh-Profil umfasst die Vegetationsgeschichte der letzten 11.000 Jahre (Abb. 2). Leider enthält er mehrere Sedimentationsbrüche (zersetztes Material), die eine lückenlose Interpretation der Vegetationsgeschichte verhindern.

Dinesloh

The diagram illustrates the Dinesloh stratigraphic profile, showing the distribution of various plant taxa across different depths (0 to 100 cm) and pollen zones (PZ1 to PZ6). The taxa are categorized into three main groups: Bäume und Sträucher (Trees and Shrubs), Kräuter (Herbaceous plants), and NPP* (Non-pollen plants).

Left Y-axis: Depth (cm) and Age (years before 1950). The scale ranges from 0 to 100 cm depth, corresponding to ages from 0 to 10,000 years before 1950.

Right Y-axis: Pollen Zones (PZ1 to PZ6). The zones are defined by depth intervals: PZ6 (0-10 cm), PZ5 (10-20 cm), PZ4 (20-30 cm), PZ3 (30-40 cm), PZ2 (40-50 cm), and PZ1 (50-100 cm).

Plant Taxa and their Distribution:

- Bäume und Sträucher (Trees and Shrubs):** Includes *Betula nana*, *Pinus cembra*, *Pinus*, *Corylus*, *Quercus*, *Fraxinus*, *Ulmus*, *Tilia*, *Acer*, *Picea*, *Alnus*, *Fagus*, *Abies*, *Corylus*, *Larix*, *Juniperus*, *Salix*, *Salix vulgaris*, *Vaccinium-type*, *Prunella-type*, *Cyperaceae*, *Artemisia vulgaris-type*, *Tricoma-type*, *Fennel-type*, *Plantago-type*, *Rumex-type*, *Urtica-type*, *Philadelphus-type*, *Shrub-type*, *Neurospora*, *Sordaria*, *Ustilago-type*, *Ustilago-type*.
- Kräuter (Herbaceous plants):** Includes *Betula nana*, *Pinus cembra*, *Pinus*, *Corylus*, *Quercus*, *Fraxinus*, *Ulmus*, *Tilia*, *Acer*, *Picea*, *Alnus*, *Fagus*, *Abies*, *Corylus*, *Larix*, *Juniperus*, *Salix*, *Salix vulgaris*, *Vaccinium-type*, *Prunella-type*, *Cyperaceae*, *Artemisia vulgaris-type*, *Tricoma-type*, *Fennel-type*, *Plantago-type*, *Rumex-type*, *Urtica-type*, *Philadelphus-type*, *Shrub-type*, *Neurospora*, *Sordaria*, *Ustilago-type*, *Ustilago-type*.
- NPP* (Non-pollen plants):** Includes *Betula nana*, *Pinus cembra*, *Pinus*, *Corylus*, *Quercus*, *Fraxinus*, *Ulmus*, *Tilia*, *Acer*, *Picea*, *Alnus*, *Fagus*, *Abies*, *Corylus*, *Larix*, *Juniperus*, *Salix*, *Salix vulgaris*, *Vaccinium-type*, *Prunella-type*, *Cyperaceae*, *Artemisia vulgaris-type*, *Tricoma-type*, *Fennel-type*, *Plantago-type*, *Rumex-type*, *Urtica-type*, *Philadelphus-type*, *Shrub-type*, *Neurospora*, *Sordaria*, *Ustilago-type*, *Ustilago-type*.

The diagram shows the relative abundance of these taxa across the different depths and pollen zones, with the x-axis representing the percentage of each taxon in the pollen sample.

Abb. 2: Diagramm des prozentualen Pollenanteils im Dinesloh-Profil. Die horizontalen gestrichelten Linien trennen die verschiedenen im Text beschriebenen Zonen. Die Prozentsätze sind auf der horizontalen Achse angegeben. Der erste Balken zeigt den Anteil von Kräutern - graue Farbe, gegenüber holzigen Pflanzen - weiße Farbe. Für jedes Taxon ist in Schwarz der Prozentsatz in der Probe und in Grau das Zehnfache dieses Prozentsatzes angegeben. *NPP = Nicht-Pollen-Objekte (non pollen palynomorphs), **PZ1-PZ6 = Entwicklungszonen

Anhand der Veränderungen in den Pollenspektren haben wir in diesem Pollendiagramm sechs Entwicklungszonen (PZ) gebildet. In der ersten Zone PZ1 dominieren Pollen von Kiefer und Birke, später mit zunehmender Tendenz Hasel. Der Pollenanteil der krautigen Vegetation beträgt nicht mehr als 20 % und setzt sich hauptsächlich aus Gräsern, Seggen und Mädesüß zusammen. Erlen- und Fichtenpollen nehmen in der zweiten Zone PZ2 auf Kosten von Kiefer und Birke zu. Die relative Häufigkeit von Kräuterpollen ist rückläufig. Buche und Tanne beginnen sich im PZ3 auszubreiten und bilden zusammen mit der Fichte die Hauptbaumarten der Baumschicht. Die Erlenbestände gehen erneut kontinuierlich zurück. Die Zone PZ4 ist gekennzeichnet durch eine Zunahme von primären (Getreide) und sekundären anthropogenen Pollenindikatoren (*Plantago lanceolata*-Typ, *Rumex*, *Centaurea cyanus*-Typ), eine Zunahme von Pollen anderer Kräuter (*Poaceae*, *Cyperaceae*) und das Auftreten von Sporen koprophiler Pilze (*Sordaria*, *Sporormiella*), die auf Beweidung hinweisen. Die Zone PZ5 ist durch den höchsten Anteil an Kräuterpollen und einen plötzlichen Rückgang oder ein fast vollständiges Verschwinden der Pollen von Tanne und Buche gekennzeichnet. In der letzten Zone, PZ6, treten wieder einige Baumpollenkörner auf, vor allem von Fichten.

Die beiden anderen Profile, Újezd bei Krásná und Studánka (Abb. 3 und Abb. 4), unterscheiden sich zwar in einzelnen Details, die allgemeine Entwicklung bleibt jedoch sehr ähnlich. Die Zonierung der Vegetationsentwicklung entspricht dem Dinesloh-Profil.

Auf der Grundlage der Aufschlüsselung aller Pollendiagramme interpretieren wir die folgenden Entwicklungsstadien der Vegetation:

Die erste und älteste Phase ist das **alte Holozän/der hemiboreale Wald (bis ca. 6.000 cal. BP)**. In dieser wahrscheinlich wärmsten Periode entwickelte sich der Wald schnell und hatte

gleichzeitig ausreichend Nährstoffe in den Böden zur Verfügung. Es überwiegen lichte Birken-Kiefernwälder mit einem reichen Unterwuchs an Gräsern und Kräutern wie Klein Mädesüß und Berg-Wachtelweizen. Das höhere Strauch- und niedrigere Baumschicht besteht aus Haselnuss. Die Feuchtgebiete sind mit Seggen und Gräsern, eventuell mit Mädesüß, bewachsen. In der weiteren Region sind auf den fruchtbareren Böden auch Linden und Ulmen zu finden.

Die nächste, d. h. die zweite Phase, wird als **Fichtentaiga (6.000-3.000 cal. BP)** bezeichnet. Während dieser Periode scheint es zu einer erheblichen Befeuchtung des Klimas gekommen zu sein. Die Fichte beginnt in den Wald einzudringen und der Charakter des Waldes verändert sich: Er wird dunkel, und die lichtliebenden Arten Birke und Kiefer ziehen sich zurück. Die Hasel hält jedoch stand und ist nach wie vor ein wichtiger Bestandteil des Waldbestandes. Möglicherweise haben Erlen die Feuchtgebiete örtlich überwuchert, was zu einem erheblichen Rückgang der Gräser geführt hat.

Mit der Ausbreitung von Buche und Tanne in der dritten Phase beobachten wir einen Übergang zum **Mischwald (ca. 3.000-1.000 cal. BP)**, wobei sich die Buche jedoch weniger stark etabliert und nicht zur führenden Waldart wird, was als regionale Besonderheit im Vergleich zu anderen mitteleuropäischen Regionen angesehen werden kann. Die Tanne ist zusammen mit der Fichte die wichtigste Baumart der Nadelbaumbestände. Der Erlenbewuchs geht an einigen Stellen zurück, wahrscheinlich aufgrund teilweiser Entwässerung und Austrocknung, und die Dynamik der Erlen könnte einen großen Einfluss auf die Sedimentationspause gehabt haben, da sie die Zersetzung älterer organischer Sedimente verursacht haben könnte. In der weiteren Region sind die ersten Anzeichen menschlicher Aktivitäten bereits sporadisch sichtbar. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Weideindikatoren (Spitz- und Mittlerer Wegerich, Sauerampfer). Roggenpollen sind ein Beweis für den Beginn des Ackerbaus.

Nachfolgende Zeiträume sind bereits stark durch menschliche Aktivitäten beeinflusst. Während der **mittelalterlichen Besiedlung (1.000-400 cal. BP)** begann in der weiteren Umgebung ein Prozess der Entwaldung, der mit dem Rückgang der Tanne einherging. Die landwirtschaftlichen Aktivitäten in der weiteren Umgebung sind durch Roggen- und Weizenpollen eindeutig belegt. Es entstehen Weideflächen, auf denen Sauerampfer, Wegerich und Wacholder reichlich vorhanden sind.

Auf diese erste Phase der Kulturlandschaftsentwicklung folgt die **Landschaft der Neuzeit (400-100 cal. BP)**, in der die intensivste Entwaldung, d. h. das höchste Verhältnis von Kräutern zu Bäumen, zu beobachten ist. Die ehemaligen Fichten-Tannen-Buchen-Mischwälder werden intensiv abgeholzt und der Spontanverjüngung überlassen. Davon profitiert vor allem die Kiefer, die sich schnell auf den Wiesen ansiedeln kann. Tanne und Buche sind weiter rückläufig. Auch Weideland mit Wacholder, Wegerich und Sauerampfer entwickelt sich, und in der Agrarlandschaft sind Weizen und Roggen weit verbreitet. In der jüngsten Entwicklungsphase beobachten wir die Entstehung von **Kulturwäldern (in den letzten 150 Jahren)**. Ende des 18. Jahrhunderts kommt es zu bedeutenden Veränderungen in der Waldbewirtschaftung. Die Wälder werden in großem Umfang kultiviert, und ihre Artenzusammensetzung und Struktur ändert sich, was in diesem Stadium bereits den heutigen Charakter ausmacht - es handelt sich zweifellos um einen Kulturfichtenwald. Die Landschaft ist im Allgemeinen stärker bewaldet als in der vorangegangenen Periode. Die Feuchtgebiete sind nur spärlich mit Kiefern bewachsen, und der Unterwuchs besteht aus einer Gras- und Seggenvegetation.

Újezd bei Krásná

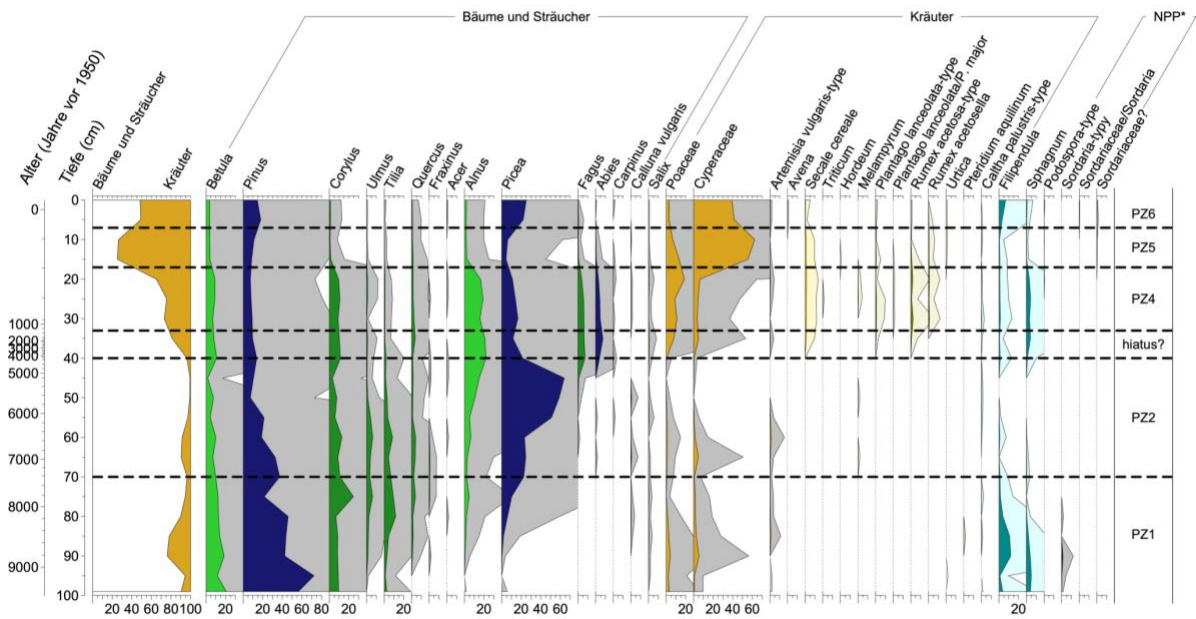


Abb. 3: Prozentuales Pollendiagramm des Profils Újezd bei Krásná. Die horizontalen gestrichelten Linien trennen die einzelnen im Text beschriebenen Zonen. Die Prozentsätze sind auf der horizontalen Achse angegeben. Der erste Balken zeigt den Anteil der Kräuter - graue Farbe, im Vergleich zu den holzigen Pflanzen - weiße Farbe. Für jedes Taxon ist in Schwarz der Prozentsatz in der Probe und in Grau das Zehnfache dieses Prozentsatzes angegeben. *NPP = Nicht-Pollen-Objekte (non pollen palynomorphs), **PZ1-PZ6 = Entwicklungszonen

Studánka

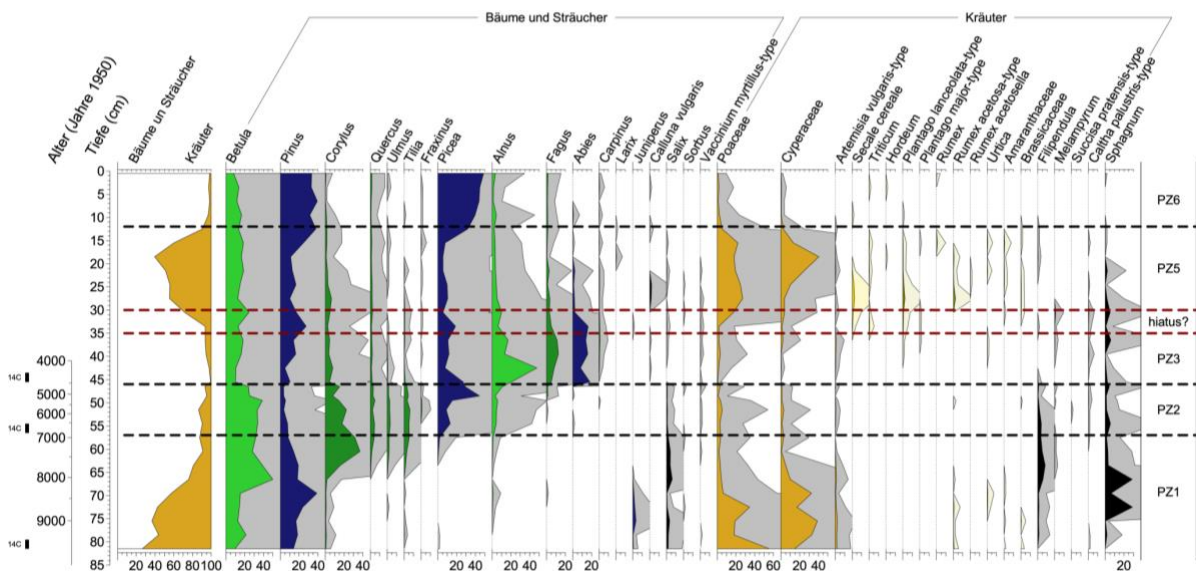


Abb. 4: Prozentuales Pollendiagramm des Studánka-Profiles. Die horizontalen gestrichelten Linien trennen die einzelnen im Text beschriebenen Zonen. Die Prozentsätze sind auf der horizontalen Achse angegeben. Der erste Balken zeigt den Anteil von Kräutern - graue Farbe, gegenüber holzigen Pflanzen - weiße Farbe. Für jedes Taxon ist in Schwarz der Prozentsatz in der Probe und in Grau das Zehnfache dieses Prozentsatzes angegeben. *PZ1-PZ6 = Entwicklungszonen

Veränderungen in der Waldzusammensetzung in der PC-Region

Das Podkovák-Profil umfasst die Geschichte der Vegetation in den letzten 13.000 Jahren. Die Sedimentation ist hier kontinuierlich und nimmt hin zur Gegenwart zu. Wir haben sechs Zonen der Vegetationsentwicklung identifiziert, die dem Gebiet von Aš/Rehau ähneln. Die erste Zone PZ1 wird von Kiefern- (*Pinus*) und Birkenpollen (*Betula*) dominiert, später nimmt der Anteil von *Corylus* und anderen Laubbäumen der gemäßigten Zone (*Alnus*, *Quercus*, *Ulmus*, *Tilia*) zu. Der Anteil der krautigen Pollen (Landkräuter) ist im untersten Teil des Profils höher, was auf das Ende der späten Eiszeit hinweist. Nach dem Beginn des Holozäns übersteigt er nicht mehr als 20 % und setzt sich hauptsächlich aus *Poaceae*, *Filipendula* und *Melampyrum* zusammen. In der zweiten Zone PZ2 nimmt der Pollen der Fichte (*Picea*) auf Kosten der Kiefer (*Pinus*) zu. Der Anteil der Kräuter nimmt ab. In der Zone PZ3 beginnen Buche (*Fagus*) und Tanne (*Abies*) sich auszubreiten und bilden mit der Fichte einen kodominanten Pollen; die Tanne erreicht in dieser Zone ihr Maximum. Die Zone PZ4 ist durch den Beginn des Auftretens sekundärer anthropogener Pollenindikatoren (*Plantago lanceolata*-Typ, *Rumex*, *Melampyrum*) gekennzeichnet. Die nächste Zone PZ5 ist durch eine Zunahme der primären anthropogenen Indikatoren (Getreide) und eine weitere Zunahme der sekundären anthropogenen Indikatoren und des Anteils der Pollen anderer Kräuter (*Poaceae*) gekennzeichnet. Gleichzeitig ist das Gebiet durch einen plötzlichen Rückgang oder ein fast vollständiges Verschwinden von *Abies* und später auch von *Fagus* gekennzeichnet, während *Pinus* wird dominant. Die letzte Zone PZ6 weist eine Zunahme der *Picea*-Pollen und eine Abnahme der primären anthropogenen Indikatoren auf.

Podkovák

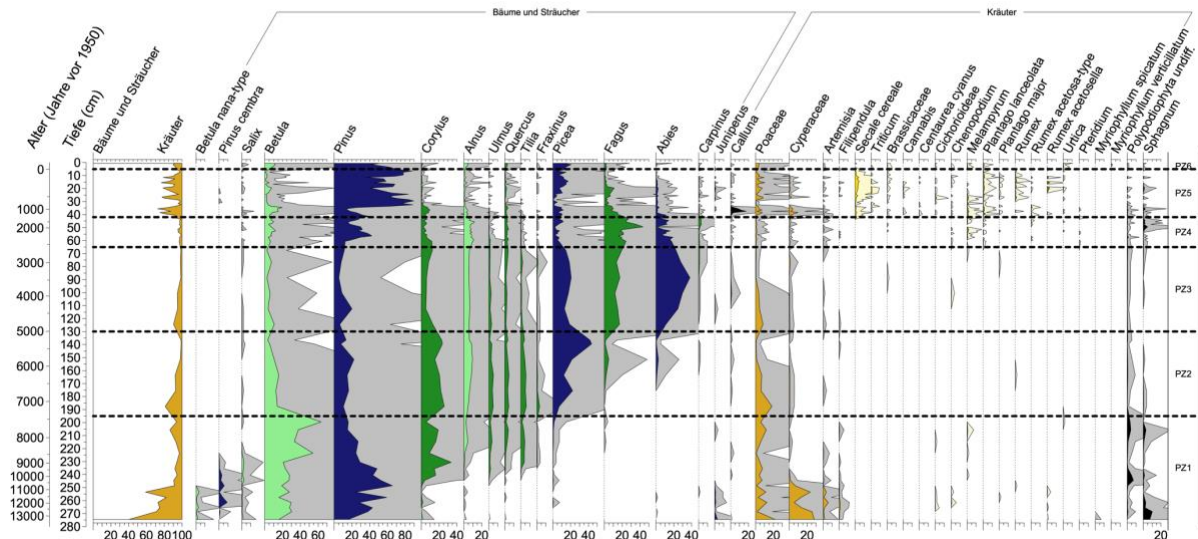


Abb. 5: Prozentuales Pollendiagramm des Podkovák-Profiles. Die horizontalen gestrichelten Linien trennen die verschiedenen im Text beschriebenen Zonen. Die Prozentsätze sind auf der horizontalen Achse angegeben. Der erste Balken zeigt den Anteil von Kräutern - graue Farbe, gegenüber holzigen Pflanzen - weiße Farbe. Für jedes Taxon ist in Schwarz der Prozentsatz in der Probe und in Grau das Zehnfache dieses Prozentsatzes angegeben. *PZ1-PZ6 = Entwicklungszonen

Regionale Veränderungen der Vegetationsbedeckung/Bodenbedeckung (REVEALS, land cover)

Eine quantitative Rekonstruktion auf der Grundlage des REVEALS-Modells zeigt den Prozentsatz der Vegetationsbedeckung für die beiden Untersuchungsgebiete mit einem Radius von 60 km und in Zeitintervallen von 500 Jahren (Abb. 6). Diese Ergebnisse umfassen alle derzeit und früher untersuchten Standorte innerhalb der gesamten Regionen. Im frühen Holozän (vor der Ausbreitung der Fichte, 11.500-8.000 cal. BP) war die Landschaft relativ offen, mit einem höheren Anteil an offener Landschaft in der PC-Region (bis zu 70 %). Im Baumbestand dominieren Kiefern-Eichenwälder, während Hasel (*Corylus*) und andere laubabwerfende Taxa in der späteren Periode weit verbreitet wurden. Die Fichte beginnt sich im mittleren Holozän auszubreiten und erreicht zwischen 8.000 und 5.500 cal. BP die Dominanz in der Baumschicht. Hasel, Eiche und andere Laubbaumarten der gemäßigten Klimazone bleiben in geringerem Umfang erhalten, aber *Alnus* ist im PC etwas häufiger als im AR-Gebiet anzutreffen. Offene Flächen sind rückläufig. Die Wälder mussten nach und nach ihre Bestände schließen und deutlich dichter werden. Die Buche beginnt sich ab 5.500 cal. BP auszubreiten, später zusammen mit der Tanne; sie erreichen jedoch nie einen höheren Anteil als die Fichte. Ab dem späten Holozän sind allmählich Anzeichen menschlicher Aktivitäten in der Landschaft zu beobachten, die sich in der Zunahme des Getreideanbaus und der Öffnung der Landschaft manifestieren. Der menschliche Einfluss ist im PC-Gebiet früher und ausgeprägter und begann bereits um 5.000 cal. BP mit landwirtschaftlichen Aktivitäten (Getreide) und Entwaldung. In der AR-Region ist der menschliche Einfluss für die allmähliche Entwaldung verantwortlich, wobei die landwirtschaftliche Tätigkeit seltener ist. Die Fichte geht in AR vor allem auf Kosten der offenen Landschaft leicht zurück, in PC viel stärker, wo sie stärker durch die Ausbreitung von Buche und Tanne beeinflusst wird. Im letzten Jahrtausend haben wir eine rasche Abholzung der Wälder und landwirtschaftliche Aktivitäten zunächst in PC und später in AR beobachtet. Tanne und Buche sind die wichtigsten Baumarten, die vom menschlichen Einfluss betroffen sind. Offene und landwirtschaftlich genutzte Landschaften erreichen im PC höhere Werte von bis zu 50 %. In den Wäldern ist die Fichte nach wie vor die vorherrschende Baumart.

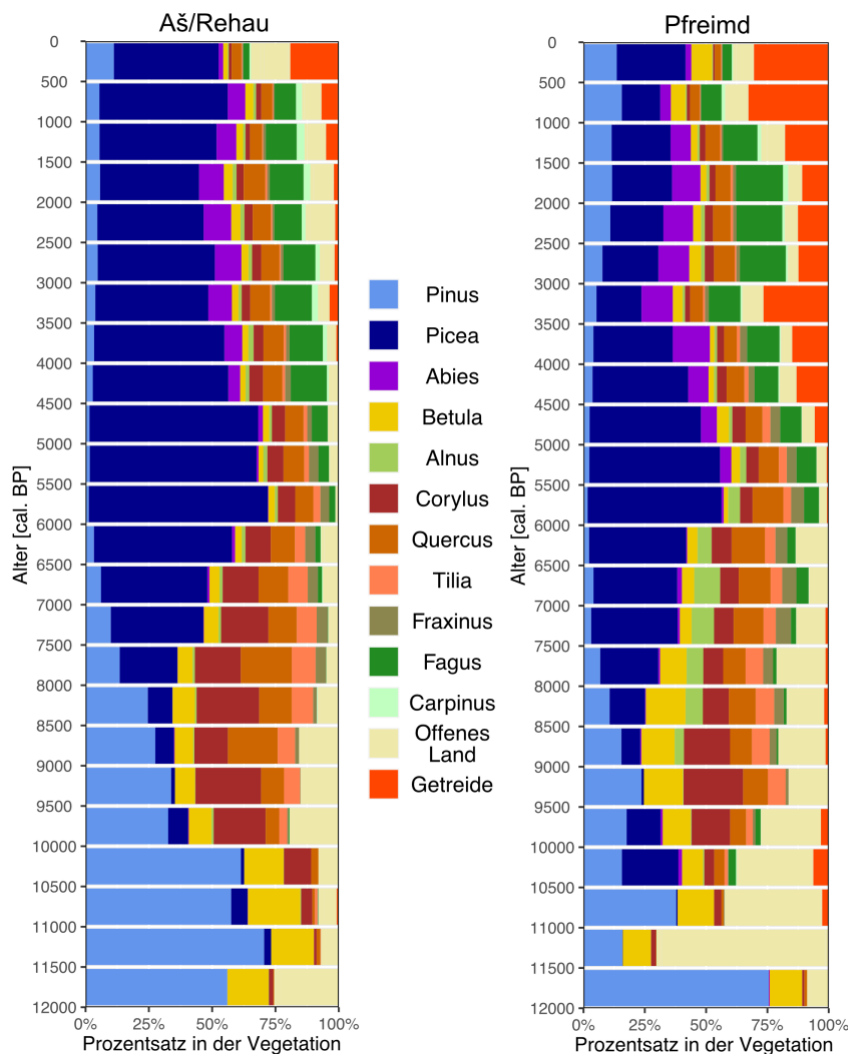


Abb. 6 a,b: REVEALS-Vegetationsschätzungen für zwei Untersuchungsregionen: AP links und PC rechts.

Branddynamik

Die Rekonstruktion der Brandgeschichte der Untersuchungsgebiete in AR ist in Abb. 7-10 dargestellt. Im frühen und mittleren Holozän wurde eine höhere Brandhäufigkeit festgestellt. Die höchsten Werte der Holzkohlepartikelnablagerung fallen in den Zeitraum 5.500-5.000 cal. BP, wenn die größte Entwicklung der Fichtenwälder stattfindet. Im jüngeren Teil des Holozäns sind Brände weniger häufig. Im Mittelalter und in der frühen Neuzeit sind die größten Brände zu verzeichnen.

An allen untersuchten Standorten wurden Aufzeichnungen über die holozäne Brandgeschichte gewonnen, deren Qualität jedoch zwischen den einzelnen Abschnitten der beprobten Profile erheblich variiert. Aufgrund von Lücken und geringen Sedimentakkumulationsraten sind schwächere bzw. weiter entfernte Brände in einigen Zeiträumen schlecht aufgelöst. Die hohen Depositionswerte der Holzkohlepartikeln sind daher wahrscheinlich auf Brände in situ zurückzuführen, die in erster Linie die Feuchtgebietsvegetation betrafen. Brände während des frühen und mittleren Holozäns (10.000-6.000 cal. BP) sind am besten in den Profilen von Újezd und Studánka

dokumentiert, wo die Auflösung der Sedimente 60-90 Jahre/cm beträgt, was ausreichend ist, um einzelne Brände zu erfassen.

Neben einem starken Anstieg der Ablagerungen von Holzkohlepartikeln an allen drei Standorten um das Jahr 1.000 cal. BP, was darauf hindeutet, dass die Holzkohlepartikeln vor allem aus Gräsern und Kräutern stammen, beobachten wir eine Zunahme der Pollenvielfalt und eine umfangreiche Entwaldung (Abb. 12).

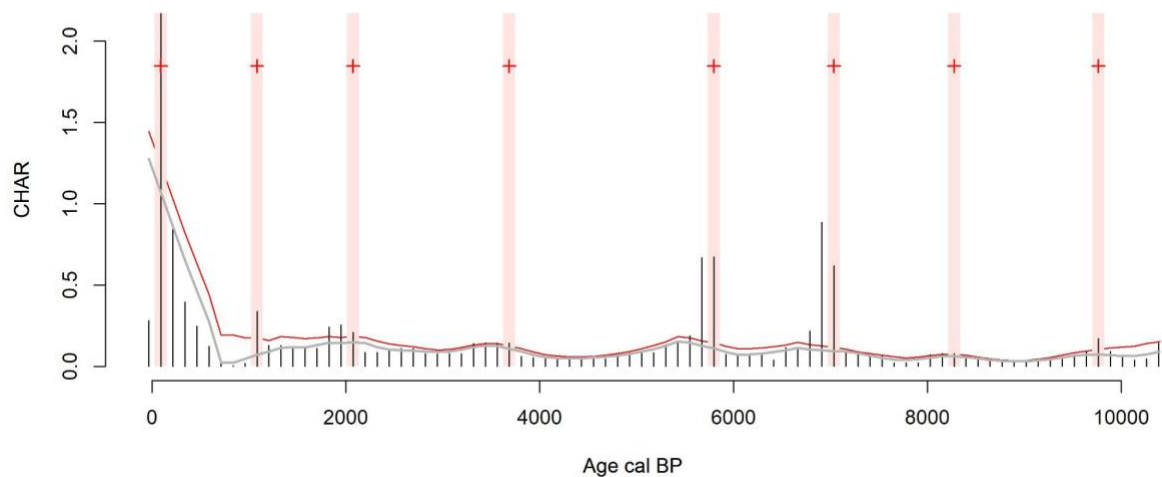


Abb. 7: Verlauf der Brandgeschichte am Standort Dinesloh, das Brandereignis wird durch das rote Symbol dargestellt, der Hintergrund wird auf der Grundlage eines 1000-jährigen Zeitfensters (rote Linie) ermittelt.

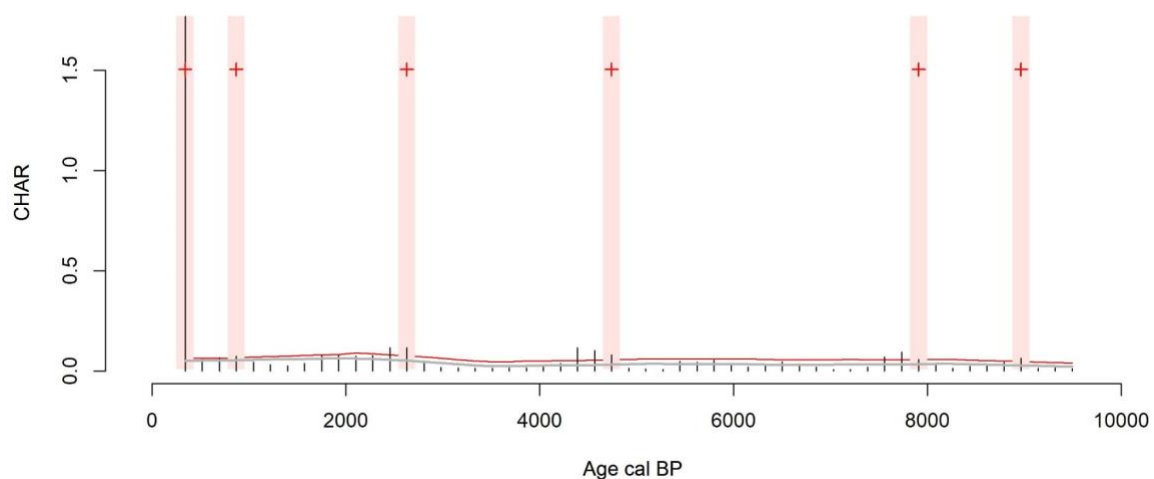


Abb. 8: Verlauf der Brandgeschichte am Standort Studánka, das Brandereignis wird durch das rote Symbol dargestellt, der Hintergrund wird auf der Grundlage eines 1000-jährigen Zeitfensters (rote Linie) ermittelt.

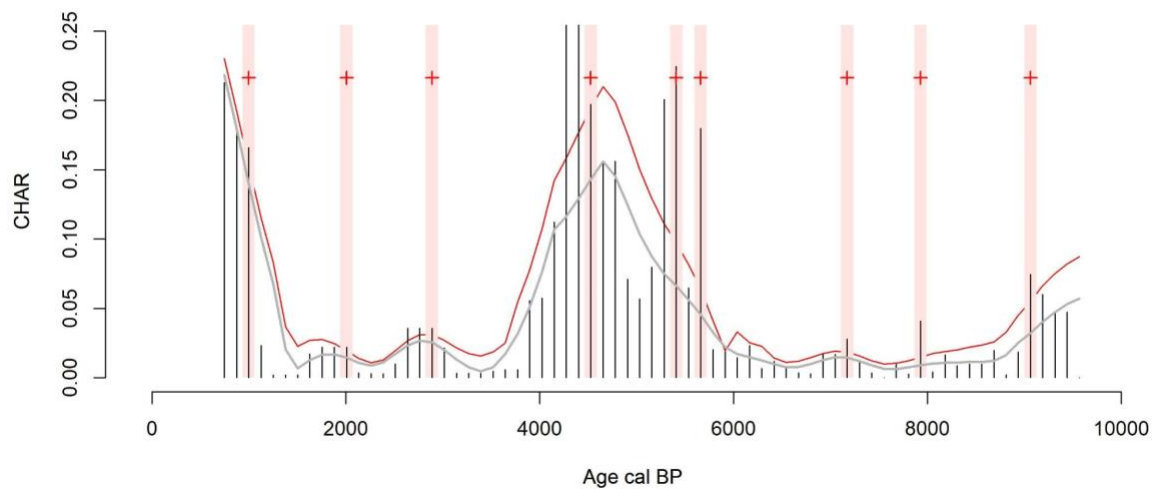


Abb. 9: Verlauf der Brandgeschichte in Újezd u Krásné, das Brandereignis ist durch das rote Symbol dargestellt, der Hintergrund wird durch ein 1000-jähriges Zeitfenster (rote Linie) bestimmt.

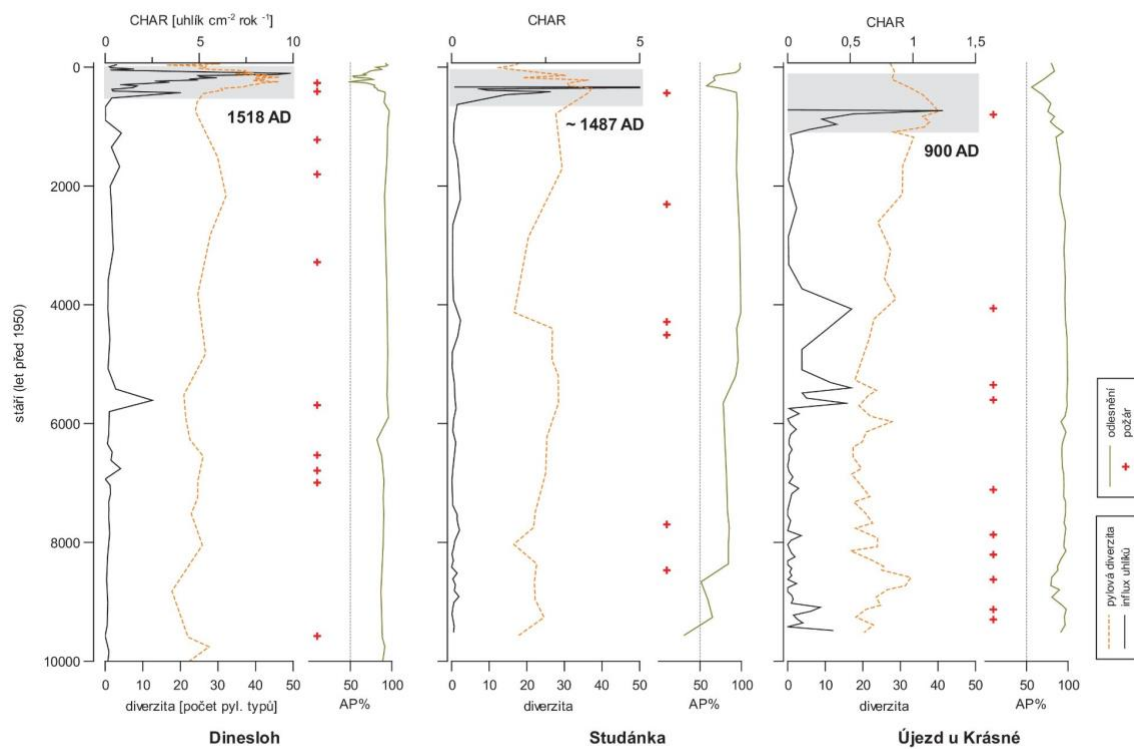


Abb 10: Ablagerungsrate der Holzkohlepartikeln ($>125 \mu\text{m}$, CHAR) und Veränderungen der Pollendiversität (Artenreichtum) in Dinesloh, Újezd bei Krásná und Studánka. Rote Kreuze zeigen rekonstruierte lokale Brände an. Die Entwaldungsrate ergibt sich aus dem prozentualen Anteil von Baum- und Strauchpollen in der Probe (AP% = Baumpollen). Im oberen Teil der Profile ist die Phase des Abbrennens von Feuchtgebieten, die mit einer Zunahme der Pollenvielfalt und einer erheblichen Entwaldung einherging, grau markiert. Ihr Einsetzen wird auf der Grundlage des Sedimentationsmodells geschätzt.

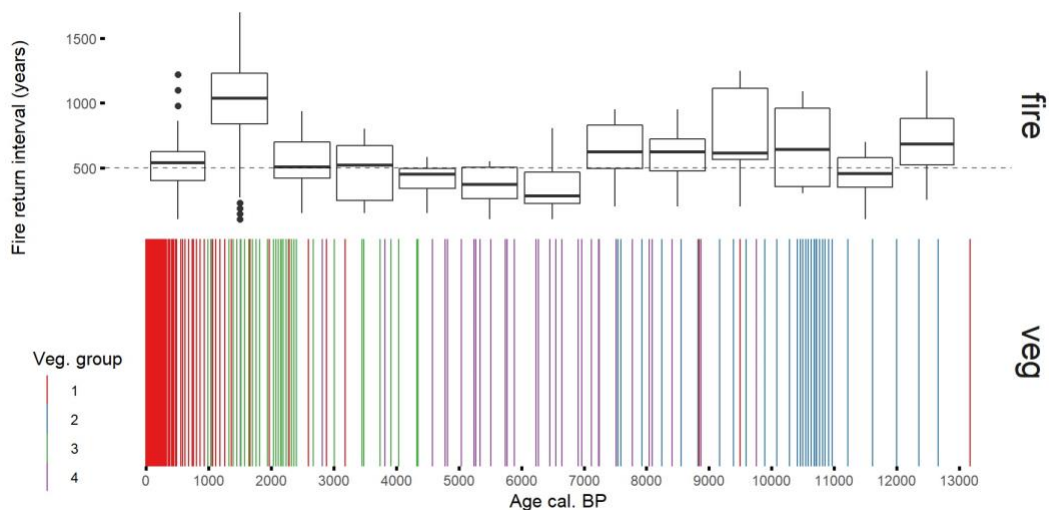


Abb. 11: Variationsbreite der Brandhäufigkeit während des Holozäns. Boxplots zeigen die Verteilung der geschätzten Wiederkehrintervalle von Bränden innerhalb eines 1000-jährigen Zeitfensters. Die verschiedenen Phasen der regionalen Vegetationsentwicklung werden durch vier Gruppen dargestellt: 1 - mittelalterlicher und neuzeitlicher Wald (durchschnittliche Pollenhäufigkeit von *Picea* 13%, *Pinus* 34 %, *Fagus* 2 %, *Betula* 6 %), 2 - frühholozäner hemiborealer Wald (*Picea* 0,5 %, *Pinus* 35 %, *Fagus* 0 %, *Betula* 21 %), 3 - Mischwald (*Picea* 9 %, *Pinus* 20 %, *Fagus* 18 %, *Betula* 7 %), 4 - Fichten-Taiga (*Picea* 12 %, *Pinus* 12 %, *Fagus* 1 %, *Betula* 12 %).

Eine Rekonstruktion der Brandgeschichte im PC-Gebiet am Standort Podkovák ist in Abb. 12 dargestellt. Eine höhere Brandhäufigkeit wurde zwischen ca. 8.500-2.500 cal. BP verzeichnet, was mit der Ausbreitung und Dominanz der Fichte zusammenfällt. Im jüngeren Teil des Holozäns traten Brände weniger häufig auf, aber um 1.300 cal BP sind bedeutende Brände dokumentiert, was mit der ersten Periode der Entwaldung zusammenhängt, die aus den Pollendaten hervorgeht. In der Gegenwart ist eine weitere Zunahme der Feueraktivität zu beobachten.

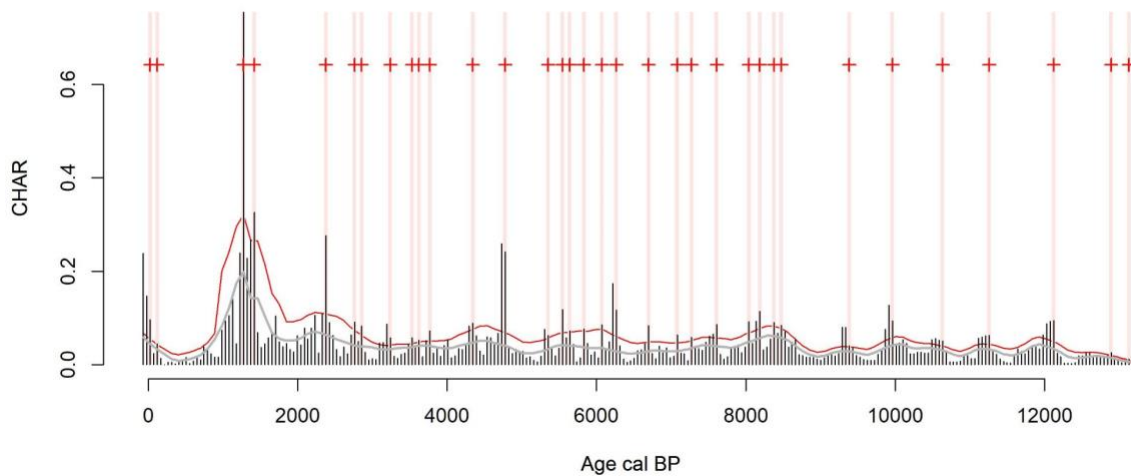


Abb. 12: Verlauf der Brandgeschichte am Standort Podkovák, das Brandereignis wird durch das rote Symbol dargestellt, der Hintergrund wird auf der Grundlage eines 1000-jährigen Zeitfensters (rote Linie) ermittelt.

Diskussion und Methoden des Schutzes

Ursprünglichkeit der Waldzusammensetzung

Die Ergebnisse der Pollenanalyse zeigen, dass sich die heutigen Pollenspektren von denen aus der Zeit vor der umfangreichen mittelalterlichen Besiedlung der Landschaft unterscheiden. Der Hauptunterschied liegt im vollständigen Verlust oder sogar im völligen Verschwinden von Buchen- und Tannenspollen, die in der Zeit vor der intensiven Abholzung bis zu 20 % in AR erreichten, wobei die Tanne häufiger vorkam als die Buche. Die Tanne (*Abies*) war in der PC-Region zur Zeit ihres Verbreitungsmaximums um 3.500 cal. BP sogar stärker verbreitet als die Buche (*Fagus*). Im Vergleich zu umliegenden Gebieten wie dem Böhmischem Wald / Oberpfälzer Wald (PC-Region), dem Böhmerwald oder dem Erzgebirge war die Abundanz beider Baumarten in der AR-Region jedoch relativ gering (VERON et al. 2014; KNIPPING 1989; CARTER et al. 2018a). Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Waldes waren Kiefern und Birken, die hauptsächlich in der Erholungsphase nach verschiedenen Störungen auftraten.

Die Natürlichkeit des Waldes wird in der Karte der potentiellen natürlichen Vegetation (PPV) behandelt, die das Vorkommen von acidophilen Buchenwäldern im größten Teil des Gebiets beider Gebiete angibt, möglicherweise mit lokalen feuchten Fichtenwäldern (NEUHÄUSLOVÁ et al. 1998). Die Frage nach der Verwendung und dem Ursprung dieser Karte wurde in verschiedenen Arbeiten behandelt, siehe z. B. die Arbeit von ABRAHAM et al. (2016), die auch feststellen, dass die PPV in vielen Fällen durch rekonstruierte Vegetation inspiriert wurde, die durch palynologische Untersuchungen ermittelt wurde. Dies wird auch durch den Vergleich der PPV mit rekonstruierter Vegetation aus verschiedenen Zeiträumen in der Vergangenheit nahegelegt, wobei die größte Ähnlichkeit aus dem frühen Mittelalter stammt, d. h. aus der Zeit vor der intensiven Besiedlung der Randgebiete.

Im Falle der AR-Region ist dieser Vergleich aufgrund der neu gewonnenen Daten jedoch problematischer, da die Buche in dem fraglichen Zeitraum generell eine eher untergeordnete Rolle spielt und die Wälder als Nadelwälder (Fichte, Tanne, Kiefer) oder als Mischwälder mit Buche rekonstruiert werden können. Selbst auf der Grundlage der aktuellen Vegetationskartierung ist offensichtlich, dass die Buche im AR wahrscheinlich nicht von Natur aus stark vertreten ist. Unsere Feldbeobachtungen zeigen, dass sich isolierte Buchenbestände nur wenig spontan verjüngen. Selbst ausgewachsene Exemplare leiden unter späten Frühjahrsfrösten. Zu den anderen Baumarten, die im Laufe der Zeit konstant, aber in geringem Umfang auftreten, gehört die Eiche. Vereinzelte Bestände sind auch im AP-Gebiet zu erwarten, aber größere Bestände kommen eher in niedrigeren Lagen in der weiteren Region vor, z. B. im Egerer Becken (siehe Diskussion unten).

In der PC-Region war die Buche viel häufiger vertreten und erreichte ihr Pollenmaximum um 2.000 cal BP. Die Waldzusammensetzung war hier vor der Besiedlung und dem frühen menschlichen Einfluss gleichmäßiger zwischen Fichte, Buche und Tanne verteilt.

Die Bestimmung der Natürlichkeit der Artenzusammensetzung eines Waldes auf der Grundlage der vergangenen Entwicklung hängt natürlich davon ab, wie weit wir in die Vergangenheit zurückblicken. Bei einer Abgrenzung bis 1800 n. Chr., d. h. vor Beginn der allgemein akzeptierten intensiven Waldbewirtschaftung, können wir die relativ junge Vergangenheit untersuchen, als noch eine relativ spontane Waldverjüngung stattfand. Darüber hinaus verfügen wir nicht nur über paläoökologische, sondern auch über historische Daten, denen zufolge, wie in anderen Regionen Nadelwälder vorherrschten und vom Menschen weiter in Fichtenmonokulturen umgewandelt wurden (SZABÓ et al. 2017). In beiden Regionen ist jedoch bereits vor diesem Zeitraum eine deutlich stärkere Entwaldung der Landschaft zu beobachten als heute (siehe unten), wahrscheinlich auch im Zusammenhang mit einer gezielten Waldverjüngung. Aus historischen Quellen wissen wir, dass Markgraf Georg Friedrich 1586 die erste Verordnung zur allgemeinen Waldbewirtschaftung erließ und dass im Vogtland 1593 die erste Forstordnung erlassen wurde, um eine gezielte Waldverjüngung zu gewährleisten, da es nur noch sehr wenig Wald übrigblieb (ALBERTI 1934). Diese Hinweise widerlegen die Möglichkeit einer Suche nach einer natürlichen Waldzusammensetzung in der Neuzeit.

In der Zeit vor der mittelalterlichen Besiedlung des Gebiets war die Zusammensetzung des Waldes wahrscheinlich natürlicher. Der menschliche Einfluss ist jedoch auch in dieser Periode offensichtlich und kontinuierlich, so dass es sehr schwierig ist, die Vorstellung zu akzeptieren, dass die Ökosysteme nicht vom Menschen beeinflusst wurden. Außerdem entfernen wir uns mit einer größeren zeitlichen Verzögerung von vielen tausend Jahren von der klimatischen Realität der Gegenwart, und andere Prozesse wie Bodenentwicklung, Artenwanderung usw. spielen eine Rolle. Wir könnten irgendwann im mittleren Holozän, vor der Bronzezeit, nach wirklich natürlichen Ökosystemen suchen, aber dort herrschen bereits andere Bedingungen. Es wird häufig angenommen, dass der mesolithische Mensch die Ökosysteme ebenfalls maßgeblich beeinflusst hat, z. B. durch Bewirtschaftung von Feuer oder die gezielte Ausbreitung von Arten (KUNEŠ et al. 2008, PTÁKOVÁ et al. 2021). In einem solchen Fall könnte man die gesamte Nacheiszeit als vom Menschen beeinflusst betrachten.

Die palynologischen Daten zeigen jedoch, dass sich die Artenzusammensetzung der Wälder in den letzten sechstausend Jahren nicht wesentlich verändert hat, wobei die Fichte im AR-Gebiet lange Zeit die vorherrschende Baumart war bzw. im PC-Gebiet gemeinsam mit Buche und Tanne dominierte. Der Mensch hat wahrscheinlich das Verschwinden der Tanne und den Rückgang der Buche verursacht. Die Eiche und wahrscheinlich auch andere

anspruchsvollere Laubbaumarten waren in der weiteren Region ebenfalls vorhanden, spielten aber nach der Ausbreitung der Fichte in der AR-Region und der Ausbreitung von Buche und Tanne in der PC-Region keine bedeutende Rolle mehr. Bei der Wiederherstellung der Wälder sollten daher die oben genannten Informationen berücksichtigt werden, gleichzeitig müssen aber auch mögliche Szenarien eines allmählichen Klimawandels für das nächste Jahrhundert in Betracht gezogen werden, die für unsere Region nicht nur einen Anstieg der Temperaturen, sondern vor allem eine noch nie dagewesene Trockenheit beinhalten (BÜNTGEN et al. 2021).

Brände als natürlicher Bestandteil der Walddynamik

An allen Untersuchungsstandorten wurden Aufzeichnungen über die holozäne Brandgeschichte gewonnen. Ihre Qualität variiert jedoch erheblich zwischen den einzelnen Abschnitten der untersuchten Profile. Aufgrund von Sedimentationsunterbrechungen und geringen Sedimentakkumulationsraten sind schwächere/weit entfernte Brände in einigen Zeiträumen schlecht zu unterscheiden. Die hohen Depositionswerte der Holzkohlepartikeln sind daher wahrscheinlich auf Brände in situ zurückzuführen, die in erster Linie die Feuchtgebietsvegetation betrafen.

In der AR-Region sind Brände während des frühen und mittleren Holozäns (10.000-6.000 cal. BP) am besten in den Profilen von Újezd und Studánka dokumentiert, wo die Auflösung der Sedimente 60-90 Jahre/cm beträgt, was ausreicht, um einzelne Brände zu erfassen. Das häufigere Auftreten von Bränden hängt mit dem Vorherrschen von Kiefern- und Birken-Kiefernwäldern zusammen, die für Oberflächenbrände geringer Intensität anfällig sind (ADÁMEK et al. 2016). Dies entspricht der am Standort Újezd dokumentierten höheren Feuerhäufigkeit, die zwischen 10.000-8.000 cal. BP liegt.

Während des mittleren Holozäns begann sich die Fichte in dem Gebiet auszubreiten, wurde zur vorherrschenden Baumart in den Wäldern dieser Zeit und überwucherte die Oberfläche der Feuchtgebiete. Diese Veränderung verlangsamte die Torfbildung und führte schließlich zu seiner Zersetzung, so dass dieser Zeitraum schwer zu erkennen und lesbar ist. Quer die untersuchten Profile lässt sich jedoch eine Phase maximaler Fichtenaufforstung feststellen, die in den Zeitraum von 5.500-5.000 cal BP fällt. Zeitgleich mit dieser Phase wird in den Profilen von Dinesloh und Újezd eine erhebliche Akkumulation der Holzkohlepartikeln verzeichnet. Aufgrund der geringen zeitlichen Auflösung und möglicher Lücken ist es nicht möglich zu entscheiden, ob es sich um einen einzelnen Brand oder um eine Abfolge mehrerer Ereignisse handelt. Eine Veränderung des Feuerregimes hin zu weniger häufigen Feuerepisoden von mäßiger und höherer Intensität lässt sich jedoch in den Sedimentaufzeichnungen Ost- und Mitteleuropas beobachten, zusammen mit der Ausbreitung der Fichte im mittleren Holozän (FEURDEAN et al. 2017, CARTER et al. 2018b). Diese Anhäufungen können ein Beweis für denselben Prozess sein.

Die darauffolgende Mischwaldperiode, in der auch Buche und Tanne vorkamen, ist in Bezug auf Brände die am wenigsten aktive Periode des Holozäns. Die Auswirkungen der Umwandlung von überwiegend Nadelwäldern in Mischwälder mit hohem Buchenanteil sind gut kartiert (BOBEK et al. 2019) und gehen mit einer deutlichen Verringerung der Anzahl von Bränden im jüngeren Holozän einher. Die Profile von Dinesloh und Studánka verzeichnen jedoch auch Brände in diesem Zeitraum, was sich dadurch erklären lässt, dass der Mensch zu einem wichtigen Faktor in der Branddynamik geworden ist. Der anthropogene Einfluss wurde während der mittelalterlichen Besiedlung des Gebiets deutlich, als Feuer zur Gewinnung landwirtschaftlicher Flächen eingesetzt wurde.

Im PC-Gebiet können wir anhand der Aufzeichnungen des Podkovák-Standorts, die eine kontinuierliche Sedimentation seit der Eiszeit zeigen, eine viel detailliertere Branddynamik beobachten. Während des frühen und mittleren Holozäns gab es hier ständig Brände (Abb. 14). Die häufigsten Brände sind zwischen 8.000 und 2.500 cal. BP zu beobachten, was dem Zeitraum der Expansion und des maximalen Fichtenvorkommens in diesem Gebiet entspricht. Die Häufigkeit der Brände nimmt um 50.00-4.000 cal. BP leicht ab, begleitet von der Ausbreitung der Buche und später der Tanne. Dies steht im Einklang mit Ergebnissen aus der AR-Region (siehe oben) und der gesamten mitteleuropäischen Region (BOBEK et al. 2019). Die Brandaktivität ist weiterhin gering, es gibt nur wenige Brände bis etwa 1.300 cal. BP, wenn wir einen starken Anstieg der Ansammlung der Holzkohlepartikeln beobachten. Dieses Ereignis ist auch mit einer Zunahme der primären und sekundären anthropogenen Pollenindikatoren und der Offenheit der Vegetation verbunden. Ähnlich wie in der AR-Region ist die erhöhte Feueraktivität wahrscheinlich auf anthropogenen Einfluss während des Mittelalters zurückzuführen.

Unseren Daten zufolge hat das absichtliche Abbrennen vielerorts zur Entwicklung von Feuchtgebietsgemeinschaften beigetragen, wo wir eine Zunahme der Pollenvielfalt und eine weitgehende Entwaldung zusammen mit einem starken Anstieg der Ablagerung der Holzkohlepartikeln beobachten (siehe Abb. 10). Ursprünglich waren Feuchtgebiete zumindest teilweise von Bäumen, vor allem Fichten und Erlen, bedeckt, und mit der Entwaldung der Landschaft wurden auch diese Standorte in baumlose Gebiete umgewandelt. Es ist wahrscheinlich, dass das Feuer in erster Linie zur Unterdrückung der Baumverjüngung eingesetzt wurde. Die Morphotypen der vorhandenen Holzkohlepartikeln deuten auf eine Herkunft aus Gräsern und Kräutern sowie aus dem Holz von Bäumen hin.

Menschlicher Einfluss und Landschaftsstruktur

Wie bereits erwähnt, hat der Mensch die Landschaft im Untersuchungsgebiet seit mehr als einem Jahrtausend beeinflusst. Menschliche Eingriffe haben zu Veränderungen der Artenzusammensetzung (z. B. Wälder) und der Landschaftsstruktur geführt. Eine quantitative Rekonstruktion der Landschaftsbedeckung zeigt, dass die Landschaft im Großraum Nordwestböhmen und dem angrenzenden Teil Bayerns in den letzten tausend Jahren insgesamt um bis zu 40 % entwaldet wurde (Abb. 8, ABRAHAM et al. 2016), wobei die Fichte die verbleibenden Waldbestände dominiert oder mit dominiert. Vor dieser intensiven Entwaldung war die Landnutzung eher sporadisch und seit dem mittleren Holozän ist die Landschaft fast vollständig bewaldet. Interessanterweise war die Fichte bereits im AR-Gebiet der dominierende Waldbaum, während die Buche nur eine untergeordnete Rolle spielte (bis zu 20 %). In dieser Hinsicht unterscheidet sich die Landschaftsstruktur nicht wesentlich von den umliegenden höher gelegenen Gebieten. Im PC-Gebiet waren Buche und Tanne stärker vertreten und bildeten echte Mischwälder mit Fichte. Allerdings begann die intensive Besiedlung in beiden Regionen aufgrund der geringeren Höhenlage etwas früher, was sich in der PC-Region stärker bemerkbar macht.

Vergleichen wir nun die Ergebnisse der Pollenanalysen der einzelnen Profile in der AR-Region. Wir sehen eine lokale Variabilität, die unterschiedliche Grade der Baumlosigkeit in den letzten paar hundert Jahren erfasst. Am Standort Újezd bei Krásná ist die Abholzung am stärksten, und auch der Grad der Baumlosigkeit nimmt bis heute nicht wesentlich ab. Im Gegensatz dazu weisen die Standorte Dinesloh und Studánka einen höheren Grad an Baumlosigkeit während der Besiedlungsperiode und größere Schwankungen zur Gegenwart hin auf, wo eine fast vollständige Bewaldung stattfindet. Alle Standorte weisen also eine

lokale Entwicklung in der unmittelbaren Umgebung auf, die dem heutigen Zustand der Umgebung der Standorte entspricht. Dinesloh und Studánka befinden sich derzeit in einem Waldkomplex, Újezd dagegen in einer waldfreien Enklave eines verschwundenen Dorfes. In der PC-Region können wir eine solche räumliche Variabilität aufgrund des Mangels an Standorten nicht beobachten. Durch hochauflösende Analysen über das letzte Jahrtausend hinweg konnten wir jedoch eine offensichtliche zeitliche Variabilität des Anteils von Bäumen und Kräutern feststellen. Dies deutet darauf hin, dass es möglicherweise zwei Wellen der Entwaldung der Landschaft gab, eine während des frühen Mittelalters und die andere während des Hochmittelalters. Die Aufzeichnungen werden jedoch durch eine starke Zunahme der Pollen von Kiefern (wahrscheinlich Moor-Kiefern - *Pinus rotundata*) verzerrt, die das Moor wahrscheinlich infolge der sich ändernden hydrologischen Bedingungen wiederholt überwuchert haben.

Die Struktur der Landschaft war in den letzten tausend Jahren sehr vielfältig, was sich zusammen mit der extensiven Landnutzung positiv auf die Erhaltung vielfältiger Lebensgemeinschaften und den Fortbestand der von uns untersuchten Arten ausgewirkt haben könnte. Leider ist es sehr schwierig, solche Arten in den paläoökologischen Aufzeichnungen zu erfassen. Der Gewöhnliche Teufelbiss (*Succisa pratensis*) ist eine der in der AR vorkommenden Projektarten. Es handelt sich um eine typische Art für gut erhaltene Feuchtwiesen und Moore. Sie ist auch die einzige Nahrungspflanze der vom Aussterben bedrohten Skabiosen-Schneefalter (*Euphydryas aurinia*) in unseren Gebieten. Wir konnten das Vorkommen von *Succisa pratensis* in den palynologischen Aufzeichnungen der Fundstelle Studánka nachweisen. Dies ist der zweite palynologische Nachweis aus diesem Gebiet, der erste stammt aus dem zuvor untersuchten Sauborst-Profil (Hahne 1992).

Schlussfolgerung und Empfehlungen für den Naturschutz

Unsere Daten und Interpretationen bieten keine klaren Anhaltspunkte für die Bewirtschaftung von Waldökosystemen und Landschaften, sondern ermöglichen nur eine sehr ungenaue Rekonstruktion der verschiedenen Ökosystemzustände und -dynamiken in der Vergangenheit. Selbst wenn man sich dieses bewusst ist, können einige Empfehlungen ausgesprochen werden. Gleichzeitig ist es aufgrund der Ungenauigkeiten von Klimamodellen und -rekonstruktionen sehr problematisch, den aktuellen Klimawandel mit möglichen Situationen in der Vergangenheit in Beziehung zu setzen.

Unserer Ansicht nach ist es akzeptabel, dass bei der Wiederaufforstung und der Waldbewirtschaftung ein größerer Anteil an Fichten in den Wäldern erhalten bleibt und gegebenenfalls die Rückkehr von Tannen angestrebt wird. Zusammen mit einem gewissen Anteil an Kiefern, die auch die Verjüngungsphase des Waldes darstellen, kann ein überwiegend aus Nadelbäumen bestehender Wald in dem Gebiet gut funktionieren. Unsere Daten deuten darauf hin, dass die spontane Sukzession in der Geschichte der menschlichen Besiedlung eine wichtige Rolle gespielt hat (erhöhter Anteil von Birke und Kiefer in Perioden mit verstärktem menschlichem Einfluss). Für die künftige Waldbewirtschaftung kann die spontane oder gesteuerte Sukzession daher sowohl in wirtschaftlicher Hinsicht als auch im Hinblick auf die biologische Vielfalt von Vorteil sein und zu einer größeren Widerstandsfähigkeit der Waldverjüngung beitragen. In dem Gebiet könnte der Klimawandel der Buche zugutekommen, die mancherorts durch Frühjahrsfröste eingeschränkt war (oder noch ist), und zwar stärker als in der Vergangenheit. Dies hat jedoch auch seine Tücken, da mit dem Klimawandel die Wahrscheinlichkeit häufigerer und extremerer Trockenperioden zunimmt, was sich negativ auf die Buche (und ähnlich auf die Tanne) auswirken kann. In

diesem Fall können wir ein begrenztes Beispiel aus der Vergangenheit heranziehen, nämlich das mittlere Holozän, als das Klima verschiedenen Rekonstruktionen zufolge gleichzeitig wärmer und trockener gewesen sein könnte. Zu dieser Zeit war die Eiche in dem Gebiet viel mehr verbreitet, die als Baumart besser auf den Klimawandel hätte reagieren können. Die Eiche ist bereits heute in Waldbeständen in niedrigeren Lagen, z. B. um Hranice, zu finden. Gezieltes Feuermanagement, insbesondere in baumlosen Lebensräumen wie Feuchtgebieten und überwucherten Wiesen, könnte dazu beitragen, die biologische Vielfalt in der Landschaft und damit das Vorkommen der oben genannten Schirmarten zu erhalten (MIDDLETON et al. 2006). Kontrolliertes Abbrennen ist ein wirksames Instrument, das die Sukzession zu Waldgesellschaften wirksam verhindern und die erwünschte Heterogenität in Feuchtgebietsökosysteme bringen kann. Die Aufgabe traditioneller Bewirtschaftungsformen (Beweidung, Mahd) führt zur Ausbreitung konkurrenzfähiger Arten auf diesen Flächen und in der nächsten Phase zur Überwucherung durch Gehölze. Dies geht auch mit einer erheblichen Anhäufung von toter Biomasse einher, die die generative Reproduktion vieler Arten blockiert. Die Folge dieser Prozesse ist ein Verlust an Artenvielfalt bei Pflanzen und anderen Organismengruppen. Dieser negative Trend zeigt sich auch in der Fossilienaufzeichnung, wo der Rückgang der Vielfalt aufgrund der zunehmenden Bewaldung in den jüngsten Schichten aller untersuchten Profile deutlich sichtbar ist. Das Abbrennen von Feuchtgebieten stand in den verschiedenen Regionen in einem spezifischen historischen Kontext, so dass es sich nicht nur um regelmäßige Eingriffe, sondern auch um episodische Ereignisse gehandelt haben kann. Aus den gewonnenen Kohlenstoffdaten geht hervor, dass der Entstehung der Gras-Kraut-Vegetation von Feuchtgebieten und der Zunahme ihrer Artenvielfalt deutliche Brandschichten vorausgehen. Es handelt sich dabei zweifellos um vom Menschen verursachte Brände, die mit der Besiedlung der Region in Verbindung gebracht werden können. Auf diese Weise haben die Menschen die Lebensräume der Feuchtgebiete für ihre wirtschaftlichen Zwecke umgestaltet. Ob es sich dabei um eine regelmäßige Verbrennung handelte, kann aufgrund der geringen Auflösung nicht eindeutig bestätigt werden, aber die gleichbleibend große Menge an Holzkohlepartikeln während dieses Zeitraums legt dies nahe. Daher könnte das kontrollierte Abbrennen von Feuchtgebieten ein vielversprechendes Instrument zur Erhaltung ihrer Vielfalt sein, dass eine wirtschaftlichere Alternative zur Mahd oder Beweidung dieser Lebensräume darstellen könnte.

In diesem Zusammenhang erwähnen wir auch die Möglichkeit kontrollierter Waldbrände (sogenanntes "prescribed burning"), die in borealen Waldgebieten eingesetzt werden, um die Gefahr von Großbränden zu verringern und auch die Artenvielfalt zu fördern. Da die Rekonstruktion der regionalen Vegetationsbedeckung im Holozän hier einen konstant hohen Anteil an Nadelbäumen zeigt, ist es sinnvoll, diese Bewirtschaftungsmethode als einen der hypothetischen Ansätze zu betrachten. Wir sehen ein gewisses Potenzial für diese Technik, insbesondere in Beständen, in denen keine forstwirtschaftliche Bewirtschaftung stattfindet, z. B. in Birkenwäldern in den ehemaligen Gebieten des Eisernen Vorhangs oder in lockeren Kiefernwäldern. Solche Bestände können als Analogie zu Wäldern betrachtet werden, die im frühen Holozän rekonstruiert wurden, wo wir eine höhere Häufigkeit von Bränden dokumentiert haben. Ziel der Eingriffe wäre es vor allem, die lockere Struktur dieser Bestände zu erhalten und damit lichtliebende Arten zu fördern. Wir empfehlen jedoch einen solchen Ansatz in rein experimenteller Form, in kleinem Maßstab und begleitet von einer Beobachtung der Auswirkungen des Feuers auf die Populationen von Organismen in verschiedenen Gruppen. Dennoch sind wir der Meinung, dass das Gebiet von Aš, in dem

diese Lebensräume aufgrund seiner jüngeren Geschichte stark vertreten sind, ein großes Potenzial für den Einsatz dieser Technik hat.

Literatur

- Abraham, V., Kuneš, P., Petr, L., Svitavská-Svobodová, H., Kozáková, R., Jamrichová, E., Švarcová, M.G., & Pokorný, P. 2016. Eine pollenbasierte quantitative Rekonstruktion der holozänen Vegetation aktualisiert die Perspektive auf die natürliche Vegetation in der Tschechischen Republik und der Slowakei. *Preslia* 88: 409-434.
- Adámek, M., Hadincová, V., & Wild, J. 2016. Langfristige Auswirkungen von Waldbränden auf *Pinus sylvestris*-Wälder der gemäßigten Zonen. *Waldökologie und -bewirtschaftung* 380: 285-295.
- Alberti, K. 1934. *Beiträge zur Geschichte der Stadt Asch und des Ascher Bezirkes. Bd. I. Vom Mittelalter bis zum Dreißigjährigen Krieg*. Verlag des Bezirkslehrervereins Asch.
- Beug, H.J. 2004: *Leitfaden der Pollenbestimmung für Mitteleuropa und angrenzende Gebiete*. Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München.
- Blaauw, M., & Christen, J.A. 2011. Flexible Paläoklima-Alters-Tiefen-Modelle mit einem autoregressiven Gamma-Prozess. *Bayes'sche Analyse* 6: 457-474.
- Bobek, P., Svobodová-Svitavská, H., Pokorný, P., Šamonil, P., Kuneš, P., Kozáková, R., Abraham, V., Klinerová, T., Švarcová, M.G., Jamrichová, E., Krauseová, E., & Wild, J. 2019. Divergent fire history trajectories in Central European temperate forests revealed a pronounced influence of broadleaved trees on fire dynamics. *Quaternary Science Reviews* 222: 105865.
- Bobek, P., Svitavská Svobodová, H., Werchan, B., Švarcová, M.G., & Kuneš, P. 2018. Human-induced changes in fire regime and subsequent alteration of the sandstone landscape of Northern Bohemia (Czech Republic). *Das Holozän* 28: 427-443.
- Büntgen, U., Urban, O., Krusic, P.J., Rybníček, M., Kolář, T., Kyncl, T., Ač, A., Koňasová, E., Čáslavský, J., Esper, J., Wagner, S., Saurer, M., Tegel, W., Dobrovolný, P., Cherubini, P., Reinig, F., & Trnka, M. 2021. Recent European drought extremes beyond Common Era background variability. *Nature Geoscience* 14: 190-196.
- Carter, V.A., Chiverrell, R.C., Clear, J.L., Kuosmanen, N., Moravcová, A., Svoboda, M., Svobodová-Svitavská, H., Leeuwen, V., Van Leeuwen, J., van der Knaap, W.O., & Kuneš, P. 2018a. Quantitative Palynologie als Grundlage für die Naturschutzökologie in den böhmisch-bayerischen Wäldern Mitteleuropas. *Frontiers in Plant Science* 8: 1-14.
- Carter, V.A., Moravcova, A., Chiverrell, R.C., Clear, J.L., Finsinger, W., Dresler, D., Halsall, K., & Kuneš, P. 2018b. Branddynamik im Holozän in mitteleuropäischen Fichten-Tannen-Wäldern der gemäßigten Zone. *Quaternary Science Reviews* 191: 15-30.
- Feurdean, A., Florescu, G., Vannièrè, B., Tanțău, I., O'Hara, R.B., Pfeiffer, M., Hutchinson, S.M., Gałka, M., Moskal-del Hoyo, M., & Hickler, T. 2017. Feuer war ein wichtiger Faktor für die Walddynamik in den Karpaten während des Holozäns. *Waldökologie und -bewirtschaftung* 389: 15-26.

- Knipping, M. 1989. *Zur spät- und postglazialen Vegetationsgeschichte des Oberpfälzer Waldes*. J. Cramer, Berlin, Stuttgart.
- Knipping, M. 1997. Pollenanalytische Untersuchungen zur Siedlungsgeschichte des Oberpfälzer Waldes. *Telma* 27: 61-74.
- Kuneš, P., Pokorný, P., & Šída, P. 2008. Nachweis des Einflusses frühholozäner Jäger und Sammler auf die Vegetation in der Tschechischen Republik durch multivariate Analyse von Pollendaten. *Vegetationsgeschichte und Archäobotanik* 17: 269-287.
- Kuneš, P., Abraham, V., Kovářík, O., Kopecký, M., & PALYCZ-Mitwirkende. 2009. Tschechische quartäre palynologische Datenbank - PALYCZ: Übersicht und grundlegende Statistiken der Daten. *Preslia* 81: 209-238.
- Middleton, B.A., Holsten, B., & van Diggelen, R. 2006. Bewirtschaftung von Mooren und Niedermoorwiesen durch Beweidung, Mähen und Abbrennen. *Angewandte Vegetationskunde* 9: 307-316.
- Neuhäuslová, Z., Blažková, D., Grulich, V., Husová, M., Chytrý, M., Jeník, J., Jirásek, J., Kolbek, J., Kropáč, Z., Ložek, V., Moravec, J., Prach, K., Rybníček, K., Rybníčková, E., & Sádlo, J. 1998. *Karte der potenziellen natürlichen Vegetation in der Tschechischen Republik. [Karte der potenziellen natürlichen Vegetation der Tschechischen Republik]*. Academia, Prag.
- Ptáková, M., Šída, P., Vondrovský, V., & Pokorný, P. 2021: Islands of Difference: Ein ökologisch explizites Modell der mitteleuropäischen Neolithisierung, *Umweltarchäologie* 0: 1-9.
- Punt, W., Blackmore, S., Hoen, P., & Stafford, P. (Eds.). 1976-2009. *Die nordwesteuropäische Pollenflora*. Elsevier, Amsterdam.
- Reimer, P.J., Austin, W.E.N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P.G., Ramsey, C.B., Butzin, M., Cheng, H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hajdas, I., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kromer, B., Manning, S.W., Muscheler, R., Palmer, J.G., Pearson, C., Plicht, J. van der, Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Turney, C.S.M., Wacker, L., Adolphi, F., Büntgen, U., Capano, M., Fahrni, S.M., Fogtmann-Schulz, A., Friedrich, R., Köhler, P., Kudsk, S., Miyake, F., Olsen, J., Reinig, F., Sakamoto, M., Sookdeo, A., & Talamo, S. 2020. Die IntCal20-Kalibrierungskurve für das Radiokohlenstoffalter der nördlichen Hemisphäre (0-55 cal kBP). *Radiocarbon* 62: 725-757.
- Szabó, P., Kuneš, P., Svobodová-Svitavská, H., Švarcová, M.G., Křížová, L., Suchánková, S., Müllerová, J., & Hédli, R. 2017. Nutzung der historischen Ökologie zur Neubewertung des Erhaltungszustands der Nadelwälder in Mitteleuropa. *Erhaltungsbiologie* 31: 150-160.
- Veron, A., Novak, M., Brizova, E., & Stepanova, M. 2014. Environmental imprints of climate changes and anthropogenic activities in the Ore Mountains of Bohemia (Central Europe) since 13 cal. kyr BP. *Das Holozän* 24: 919-931.
- Whitlock, C., & Larsen, C. 2001. Holzkohle als Brandbeschleuniger. In Smol, J.P., Birks, H.J.B., & Last, W.M. (eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Terrestrische, algen- und kieselhaltige Indikatoren*, S. 75-97. Entwicklungen in der Paläoumweltforschung. Kluwer Academic Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London,

Moskau.

Anhänge

Alters-Tiefen-Modelle für alle Sedimentaufzeichnungen

