



UNIWERSYTET
IM. ADAMA MICKIEWICZA
W POZNANIU

**ANTROPOGENICZNE ZMIANY SZATY ROŚLINNEJ W PASIE POJEZIERZY W
POLSCE, ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM WIELKOPOLSKI, W
OSTATNICH 1500 LATACH W ŚWIETLE WYSOKOROZDZIELCZYCH ANALIZ
PALEOEKOLOGICZNYCH ORAZ ŹRÓDEŁ HISTORYCZNYCH**

ANTHROPOGENIC VEGETATION CHANGES IN THE LAKE DISTRICT BELT IN
POLAND, WITH SPECIAL EMPHASIS ON GREATER POLAND IN THE LIGHT OF
HIGH-RESOLUTION PALAEOECOLOGICAL ANALYSES AND HISTORICAL
SOURCES

Rozprawa doktorska

Doctoral thesis

mgr Sambor Czerwiński

Rozprawa doktorska napisana pod kierunkiem

Dr hab. Piotra Kolaczka, prof. UAM

Dr hab. Piotra Guzowskiego, prof. UwB

**W Instytucie Geoekologii i Geoinformacji
Wydziału Nauk Geograficznych i Geologicznych
Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu**

Poznań, 2022

PODZIĘKOWANIA

Składam serdeczne podziękowania wszystkim osobom które wspierały mnie w trakcie studiów doktoranckich i przyczyniły się do powstania niniejszej pracy doktorskiej, w szczególności wszystkim współautorom.

Promotorowi pracy doktorskiej dr hab. Piotrowi Kołaczkowi, prof. UAM, który wprowadził mnie w niezwykły świat palinologii dziękuję za niezliczoną liczbę godzin spędżonych wspólnie przy mikroskopie, poświęcony czas na dyskusje, za wszelkie rady, wnikliwe komentarze i motywację do pracy.

Dziękuję prof. dr hab. Mariuszowi Lamentowiczowi za wsparcie, mentoring, wiarę w moje możliwości w chwilach zwątpienia, a także wyjazdy terenowe które zaraziły mnie pasją do torfowisk.

Dziękuję dr hab. Piotrowi Guzowskemu, prof. UwB za pomoc w zrozumieniu historycznych aspektów pracy doktorskiej i poświęcony czas.

Za niezwykle przyjazną atmosferę pracy dziękuję pracownikom i doktorantom Pracowni Ekologii Zmian Klimatu. Szczególne podziękowania kieruję do dr. hab. Katarzyny Marcisz i dr. Dominiki Łuców za dyskusje, życzliwość i wsparcie. Dziękuję dr. Monice Karpińskiej-Kołaczek za celne uwagi i bezinteresowną pomoc przy pisaniu pracy. Dziękuję także Gosi Suchorskiej za pomoc w laboratorium.

Dziękuję dr. hab. Adamowi Izdebskiemu i całej grupie badawczej Palaeo-Science and History (Instytut Maxa Plancka w Jenie) za wspólne spotkania naukowe, inspiracje do dalszych badań, a także za możliwość realizacji stażu badawczego.

Za wszelką pomoc, inspirujące rozmowy i czas spędzony w terenie dziękuję także dr Jakubowi Niebieszczańskiemu, dr. hab. Michałowi Słowińskiemu, prof. IGiPZ, dr hab. Agnieszce Wacnik, prof. IBPAN, dr. Michałowi Jakubowiczowi, dr hab. Maciejowi Gąbce, prof. UAM., dr hab. Mariuszowi Gałce, prof. UŁ.

Składam podziękowania także Instytutowi Geoekologii i Geoinformacji UAM za możliwość pracy doktorskiej oraz koleżankom i kolegom z projektu studiów doktoranckich GEO+ za przyjazną atmosferę.

Szczególne podziękowania należą się mojej rodzinie. Dziękuję żonie Natalii, która wykazała się niezwykłym wsparciem i wyrozumiałością.

FINANSOWANIE BADAŃ

Niniejsza rozprawa doktorska powstała w ramach projektu współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój. „GEO+” nr POWR.03.02.00-00-I039/16, kierownik: dr hab. Jacek Michniewicz, prof. UAM

Rozprawa doktorska została zrealizowana dzięki wsparciu stypendialnemu ze środków Narodowego Programu Rozwoju Humanistyki w ramach projektu:

- W poszukiwaniu transdyscyplinarnej synergii: przełomy gospodarcze Polski z perspektywy historyczno-przyrodniczej na tle europejskim”, Narodowy Program Rozwoju Humanistyki, nr. 2bH 15 0154 83, kierownik: dr hab. Piotr Guzowski, prof. UwB.

Badania zostały zrealizowane także dzięki wsparciu finansowemu ze środków:

- ID-UB Inicjatywa Doskonałości - Uczelnia Badawcza
- Staż badawczy pt. “Palaeoecology and socio-economic history of Eastern Germany and Western Poland” realizowany w Max Planck Institute for Geoanthropology, Jena, Niemcy. Opiekun naukowy: dr hab. Adam Izdebski



SPIS TREŚCI

Lista oryginalnych artykułów naukowych składających się na rozprawę.....	5
Streszczenie.....	6
Abstract.....	7
Wstęp.....	8
Cel badań.....	15
Metody badań.....	16
Wyniki badań.....	19
Podsumowanie.....	24
Literatura.....	27
Kopie artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej.....	35
Czerwiński, S., Marcisz, K., Wacnik, A., Lamentowicz, M., 2022. Synthesis of palaeoecological data from the Polish Lowlands suggests heterogeneous patterns of old-growth forest loss after the Migration Period. Scientific Reports, 12, 8559, https://doi.org/10.1038/s41598-022-12241-1.....	36
Czerwiński, S., Guzowski, P., Karpińska-Kołaczek, M., Lamentowicz, M., Gałka, M., Kołaczek, P., Izdebski, A., Poniat, R., 2020. Znaczenie wspólnych badań historycznych i paleoekologicznych nad wpływem człowieka na środowisko. Przykład ze stanowiska Kazanie we wschodniej Wielkopolsce. Studia Geohistorica 7, 56-74, https://doi.org/10.12775/SG.2019.04.....	52
Czerwiński, S., Guzowski, P., Lamentowicz, M., Gałka, M., Karpińska-Kołaczek, M., Poniat, R., Łokas, E., Diaconu, A.-C., Schwarzer, J., Miecznik, M., Kołaczek, P., 2021. Environmental implications of past socioeconomic events in Greater Poland during the last 1200 years. Synthesis of paleoecological and historical data. Quaternary Science Reviews, 259, https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106902.....	72
Deklaracje współautorów.....	93

LISTA ARTYKUŁÓW NAUKOWYCH SKŁADAJĄCYCH SIĘ NA ROZPRAWĘ DOKTORSKĄ

Rozprawa składa się z trzech artykułów naukowych, których wiodącym autorem jest doktorant. Jeden z artykułów został opublikowany w czasopiśmie polskim, natomiast dwa w międzynarodowych czasopismach posiadających Impact Factor (IF). Artykułom została przypisana numeracja, do której odnoszono się w dalszej części rozprawy doktorskiej.

1. **Czerwiński, S.**, Marcisz, K., Wacnik, A., Lamentowicz, M., 2022. Synthesis of palaeoecological data from the Polish Lowlands suggests heterogeneous patterns of old-growth forest loss after the Migration Period. *Scientific Reports* (IF 4.996), 12, 8559, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12241-1>
2. **Czerwiński, S.**, Guzowski, P., Karpińska-Kołaczek, M., Lamentowicz, M., Gałka, M., Kołaczek, P., Izdebski, A., Poniat, R., 2020. Znaczenie wspólnych badań historycznych i paleoekologicznych nad wpływem człowieka na środowisko. Przykład ze stanowiska Kazanie we wschodniej Wielkopolsce. *Studia Geohistorica* 7, 56-74, <https://doi.org/10.12775/SG.2019.04>
3. **Czerwiński, S.**, Guzowski, P., Lamentowicz, M., Gałka, M., Karpińska-Kołaczek, M., Poniat, R., Łokas, E., Diaconu, A.-C., Schwarzer, J., Miecznik, M., Kołaczek, P., 2021. Environmental implications of past socioeconomic events in Greater Poland during the last 1200 years. Synthesis of paleoecological and historical data. *Quaternary Science Reviews* (IF 4.456), 259, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106902>

STRESZCZENIE

Wysokorozdzielcze dane paleoekologiczne, uzyskane z osadów jezior bądź torfowisk mogą dostarczyć wiarygodnego określenia skali antropopresji na środowisko w przeszłości. Dane te dostarczają jednak informacji jedynie o reakcji środowiska na zaistniałe wydarzenia bezpośrednio warunkujące zmiany krajobrazu, które bez znajomości kontekstu archeologicznego czy historycznego ma mniejszą wartość informacyjną. W pracy tej skupiono się zatem na określeniu wpływu zmian demograficznych i wydarzeń społeczno-ekonomicznych (w skalach czasowych od dziesięcioleci po stulecia) na regenerację i degradację lasów w pasie pojezierzy w trakcie ostatnich 1500 lat. W tym celu dokonano syntezy opublikowanych danych palinologicznych opracowanych w wysokiej rozdzielcości z pasa pojezierzy, by określić przestrzenno-czasowe trendy wczesnośredniowiecznego odnawiania się lasów i późniejszego ich zanikania. Ponadto, na przykładzie studium przypadku z Wielkopolski wykorzystano wysokorozdzielcze dane paleoekologiczne (pyłek, fragmenty mikro-i makrowęgli o frakcjach 10-100 μm i powyżej 100 μm , makroszczątki roślinne). Zostały one wsparcie datowaniem radiowęglowym, które dodatkowo zostały uzupełnione o dane archeologiczne (Archeologiczne Zdjęcie Polski) i źródła pisane. W tym przypadku szczegółowo zrekonstruowano historię roślinności w relacji do osadnictwa i zmian demograficznych, a także gospodarczych. Wyniki syntezy badań palinologicznych udowadniają m. in. długotrwałą regenerację lasów z dominacją graba na obszarze pojeziernym trwającą od VI do VIII wieku na zachodzie i w środkowej części analizowanego obszaru. W tej części obszaru, początek zaniku lasów miał miejsce pomiędzy VIII a IX wiekiem n.e. wraz ze wzmożeniem osadnictwa. W późniejszym okresie, tj. pomiędzy XI a XVII wiekiem n.e., proces zaniku lasów odnotowano głównie w północno-wschodniej Polsce. W przypadku szczegółowych rekonstrukcji z torfowiska Kazanie w Wielkopolsce udowodniono, że głównym katalizatorem zmian roślinności, a także zmian użytkowania ziemi, były przełomy gospodarcze o krajowej skali oddziaływanego, takie jak np. proces formowania się państwa w X i XI wieku, czy kryzys XVII wieku związany m.in. z wojną polsko-szwedzką. Przełomy te warunkowały dynamikę demograficzną i wpływały m.in. na modernizację rolnictwa, czy większe zapotrzebowanie na surowce, których głównym „dostawcą” był las.

Słowa kluczowe:

Paleoekologia, wysokorozdzielcze analizy wielowskaźnikowe, wylesienia, palinologia, zmiany roślinności, zmiany użytkowania ziemi, wpływ człowieka

ABSTRACT

High-resolution multiproxy paleoecological data inferred from lake or peatland deposits can provide a reliable assessment of the past human impact on the environment. However, these data provide limited information on the response of the environment to events that directly affected landscape change, which are of less informative value without knowledge of the archaeological or historical context. Therefore, this work focuses on determining the impact of demographic changes and socioeconomic events (on time scales ranging from decades to centuries) on forest regeneration and degradation in the lake district belt during the past 1,500 years. Thus, published high-resolution palynological data from the Polish lake district belt were synthesized to determine spatial and temporal trends of early medieval forest regeneration and subsequent decline. Moreover, based on a case study from Greater Poland, high-resolution paleoecological analyses (pollen, micro and macrocharcoal fragments with fractions of 10-100 µm and above 100 µm, plant macrofossils) were used. These were supported by radiocarbon dating, archaeological data (Polish Archeological Record) as well as historical written sources. In this case, the vegetation history in relation to the settlement, demographic and economic changes was reconstructed in detail. The results of the synthesis of palynological studies prove, among other things, the long-term regeneration of forests with the dominance of hornbeam in the lake district belt, lasting from the 6th to 8th centuries CE in the west and central part of the analyzed area. Here, forest decline began between the 8th and 9th centuries CE along with the increase in settlement activity. Later, between the 11th and 17th centuries CE, the process of forest decline was recorded mainly in north-eastern Poland. Detailed reconstructions from the Kazanie fen in Greater Poland proved that the main catalysts behind the vegetation and land use changes were economic breakthroughs of national impacts, such as the process of state formation in the 10th and 11th centuries CE, or the crisis of the 17th century CE associated with the Polish-Swedish War, among others. These breakthroughs shaped demographic dynamics and influenced, for example, the modernization of agriculture, or greater demand for resources, the main "supplier" of which was the forest.

Keywords:

Paleoecology, high-resolution multiproxy analyses, deforestation, palynology, vegetation changes, land use changes, human impact

WSTĘP

Zaledwie w ciągu kilku tysiącleci, działalność człowieka doprowadziła do nieodwracalnych zmian roślinności w skali globalnej (Ellis i inni, 2021; Ellis i inni, 2013), wyraźnie zwiększając swoje tempo w ostatnich 10 wiekach (Ellis, 2015; Finsinger i inni, 2017; Giesecke i inni, 2017; Nielsen i inni, 2012; Stephens i inni, 2019). W przeważającej większości, działalność człowieka doprowadziła do bezpowrotnego zaniku naturalnych obszarów leśnych. Z kolei te, które przetrwały do dziś, były ekstensywnie zarządzane przez selektywną hodowlę lasu przez wiele wieków (Birks and Tinner, 2016).

Badania archiwów paleoekologicznych, m.in. z osadów jezior i torfów pozwalają na rekonstrukcje zmian środowiska przyrodniczego w przeszłości (Gaillard, 2013), w tym identyfikację antropogenicznych zmian środowiska (Edwards i inni, 2015; Gaillard, 2013; Wacnik i inni, 2016). Wśród najbardziej standardowych analiz pozwalających na identyfikację zmian roślinności należą: analiza palinologiczna, makroszczątków roślinnych, jak i analiza fragmentów węgla. Ta pierwsza umożliwia rekonstrukcję zmian roślinności wykorzystując udział poszczególnych taksonów pyłku roślin i zarodników roślin w analizowanych poziomach profilu osadów i torfów (Seppä, 2013). Wyniki uzyskane z analiz palinologicznych w badaniach paleoekologicznych są kluczowe w zidentyfikowaniu i oszacowaniu przeszłej aktywności gospodarczej człowieka (jak np. rozwój rolnictwa, wylesienia) w sąsiedztwie stanowiska badań oraz w bardziej regionalnym zakresie (Behre, 1986; Gaillard, 2013). Dodatkowo, oprócz pyłku i zarodników roślin możliwe jest zidentyfikowanie pozostałych mikrofosyliów, zwanych palinomorfami niepyłkowymi (Shumilovskikh i van Geel, 2020). Te z kolei mogą być wskaźnikiem m.in. lokalnej intensyfikacji działalności pasterskiej, jak w przypadku zwiększonej obecności zarodników grzybów koprofilnych (Cugny i inni, 2010). Wyniki uzyskane z analizy makroskopowych szczątków roślinnych są znacznie dokładniejsze niż dane pyłkowe jeśli chodzi o rozdzielcość taksonomiczną (Mauquoy i van Geel, 2007). W przypadku, gdy stan zachowania próbek jest dobry, mogą być identyfikowane do gatunku (Birks i Birks, 2000). Jej ograniczeniem jest użyteczność wyłącznie dla lokalnej rekonstrukcji rozwoju roślinności, z miejsca pobrania osadu po bezpośrednie sąsiedztwo stanowiska (Birks i Birks, 2000). Co więcej, coraz częściej stosowane datowanie osadów metodą radiowęglową w technice akceleratorowej spektrometrii masowej (AMS) z uwagi na możliwość datowania niewielkich ilości materii organicznej np. pojedynczych szczątków makroskopowych (Walanus i Goslar, 2009) zwiększa utylitarność analizy szczątków makroskopowych dla badań paleoekologicznych. Dzięki niej możemy uniknąć selekcji materiału potencjalnie obciążonego

efektem rezerwuarowym lub poprzerastanego przez korzenie młodszych roślin (Kołaczek i inni, 2019). Analiza fragmentów węgla znajdowanych w osadzie (fragmentów mikroskopijnych obejmująca frakcje od 10 do 100 mikrometrów i makroskopijnych, tj. powyżej 100 mikrometrów) pozwala ujawniać informacje temat przeszłych pożarów w skali lokalnej i regionalnej (Carcaillet i inni, 2001; Conedera i inni, 2009; Tinner i Hu, 2003). Należą do nich te związane z naturalnymi pożarami, wypalaniem lasów i/lub innych zbiorowisk roślinnych przez człowieka, czy będące efektem wypalania drewna w celach użytkowych (Whitlock i Larsen, 2001). Ta ostatnia z przyczyn pojawiania się węgli makroskopowych w osadach i torfach może służyć pośrednio do oceny aktywności gospodarczej lub zmian liczby ludności w pobliżu stanowiska badań (Conedera i inni, 2009).

Równolegle zastosowanie kilku analiz paleoekologicznych (z ang. multi-proxy) pozwala zawęzić interpretacje wynikające z pojedynczych analiz (Albert i inni, 2020; Kołaczek i inni, 2020; Lamentowicz i inni, 2020). W przypadku, gdy zastosowana jest wysoka rozdzielcość analizowanych prób (najlepiej ciągła tj. kiedy analizowane próbki przylegają do siebie) wsparte gęstym datowaniem radiowęglowym i/lub innym, takie analizy posiadają szczególny potencjał dla wiarygodnego określenia chronologii rekonstruowanych procesów związanych z aktywnością człowieka (Słowiński i inni, 2021; Wacnik i inni, 2016; Yeloff i van Geel, 2007). Tym samym, dane uzyskane z analiz paleoekologicznych stanowią uzupełnienie informacji o przeszłości, które mogą wspierać aktualny stan wiedzy archeologicznej/historycznej, a w szczególnych przypadkach go weryfikować (Dreibrodt i Wiethold, 2014; Izdebski i inni, 2022). Badania wysokorozdzielcze stosowane w paleoekologii to takie które minimalizują niepewność związaną z brakiem danych do poszczególnych interwałów czasowych. Wykorzystują więc możliwie jak najwyższą rozdzielcość analizowanych prób i zastosowanie wielu dat radiowęglowych i/lub innych na badany profil osadu (lub jego odcinek) (Marcisz i inni, 2015; Wacnik i inni, 2016). Dzięki temu, umożliwiają one dokładniejsze powiązania wyników badań paleoekologicznych, archeologicznych i/lub historycznych.

W ostatnich latach, szczególnie w drugiej dekadzie XXI wieku miał miejsce wyraźny wzrost znaczenia wysokorozdzielczych badań palinologicznych (np. Campbell i inni, 2017; Słowiński i inni, 2021). Świadczy o tym m.in. wyraźny trend wzrostowy publikacji naukowych w bazie danych SCOPUS (opcje wyszukiwania: „high resolution” i „pollen”) notowany od 2009 (515 rekordów do 2008 w stosunku do 1058 rekordów od 2009). Pomimo tego, z uwagi na kosztochlonność metod datowania jak i czasochlonność analiz palinologicznych, a niekiedy brak nadającego się do datowania techniką AMS materiału takie podejście jest wciąż (w relacji

do ogółu badań palinologicznych) stosunkowo rzadko stosowane. W literaturze zauważalny jest jednak brak jednoznacznie zdefiniowanych kryteriów wysokiej rozdzielczości. Prowadzi to do określenia różnych, często skrajnych od siebie rozdzielczości stosowanych w tych pracach „badaniami/analizami wysokorozdzielczymi” (por. Iriarte i inni, 2012; Słowiński i inni, 2021). Dla przykładu, badaniami wysokorozdzielczymi są nazywane analizy, w których zastosowano próbkowanie osadów/torfów co 5 lub więcej centymetrów w przekroju pionowym (Iriarte i inni, 2012). Skutkuje to rozdzielczością nawet powyżej 100 lat pomiędzy próbami. Nie występują zatem przedziały, które jasno definiują jaką rozdzielcość możemy określić jako wysoką. Dlatego też, by jak najdokładniej zrekonstruować sygnał aktywności człowieka w badaniach paleoekologicznych często niezbędne są analizy profilu w odległości między próbami co 2 lub 1 cm.

Analizy paleoekologiczne wykonane w opróbowaniu ciągłym (każda próba przylega do siebie w pionowym układzie) pozwalają na zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia błędu interpretacyjnego w typie „suck-in and smear” (Baille, 1991). Polega ono m.in. na zakładaniu powiązania między równolegle zachodzącymi zmianami (Baille, 1991; Blaauw i inni, 2007; Dumayne i inni, 1995). Przy większych odległościach między próbami wzrasta prawdopodobieństwo pominięcia krótkotrwałych zjawisk przyrodniczych rejestrowanych w wąskich warstwach osadów i torfów. To w połączeniu z zastosowaniem chronologii bazującej na niskiej rozdzielczości datowań może doprowadzić do błędnego przypisywania zmian przyrodniczych do wydarzeń historycznych. Stąd stosowanie wysokiej rozdzielczości zarówno dla analiz paleoekologicznych jak również datowań umożliwia wiarygodną interpretację i umiejscowienie na skali czasu wyników analiz paleoekologicznych. Niekwestionowanie od tego, w porównaniach wydarzeń paleośrodowiskowych ze sobą, a szczególnie z udokumentowanymi wydarzeniami historycznymi istotne jest uwzględnienie niepewności chronologicznej.

Wiele nowozdefiniowanych podejść badawczych dotyczących relacji człowieka i środowiska w przeszłości, jak konsiliencja (Izdebski i inni, 2016), czy archeoekologia (Crabtree i Dunne, 2022) podkreślają potrzebę badania przeszłego wpływu człowieka na środowisko w sposób zintegrowany. Polega on na łączeniu różnych metod badań w ramach współpracy ekspertów z różnych dziedzin takich jak: ekologia, paleoekologia, archeologia, czy też historia. Stąd też, w ostatnich czasach dane paleoekologiczne, wzbudzają szerokie zainteresowanie nie tylko archeologów, którzy mają długą tradycję współpracy z naukowcami zajmującymi się badaniami paleośrodowiskowymi (Bryant i Holloway, 1983; Gaillard, 2013), lecz także historyków (Haldon i inni, 2018; Izdebski i inni, 2022; Słowiński i inni, 2021). Takie podejście może dostarczyć solidnych i zróżnicowanych wyjaśnień dotyczących powiązań między

społecznościami ludzkimi a ich środowiskiem, przy jednoczesnym uwzględnieniu interakcji i mechanizmów zwrotnych między nimi (Haldon i inni, 2018).

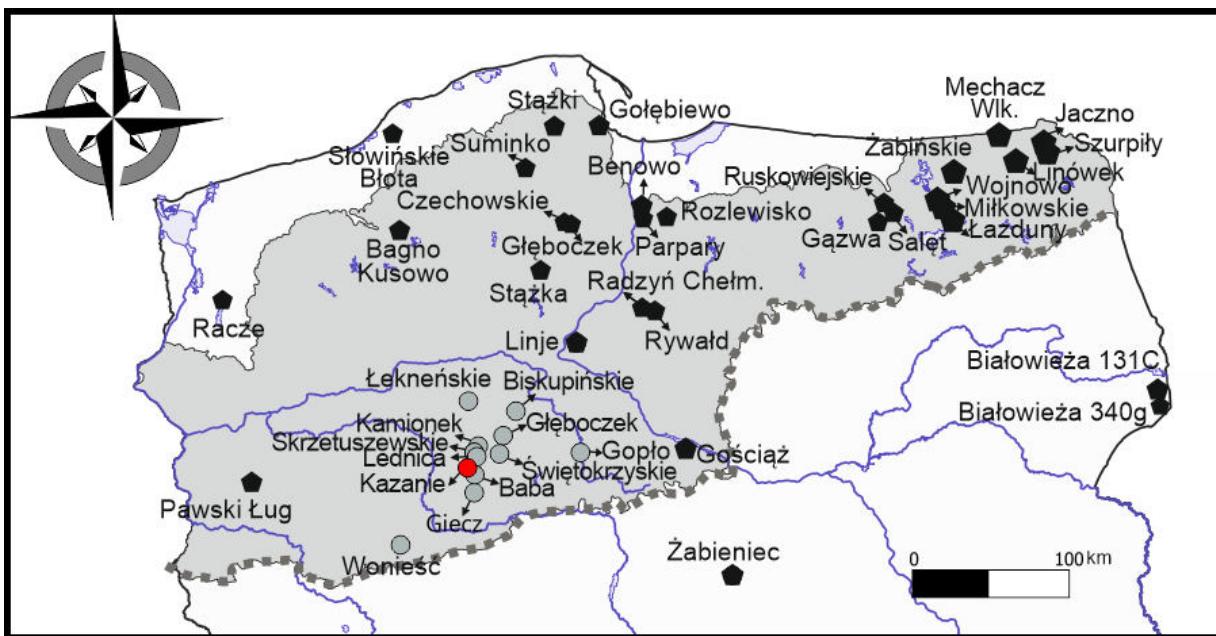
W Europie Środkowej działalność człowieka była głównym czynnikiem warunkującym strukturę ekosystemów leśnych w trakcie holocenu (Giesecke i inni, 2013; Marquer i inni, 2017; Nielsen i inni, 2012; Ralska-Jasiewiczowa i inni, 2003). Jednakże zróżnicowana przestrzennie intensyfikacja rolnictwa i wzrost liczby ludności w środkowej Europie, w tym także w pasie pojezierzy w Polsce doprowadziły do powstania krajobrazu kulturowego zwłaszcza w ostatnim 1000-leciu, który cechował się prawdopodobnie mozaiką lasów i pól uprawnych (Fyfe i inni, 2015; Nielsen i inni, 2012; Stephens i inni, 2019). Przed wyraźnym antropogenicznym wylesieniem roślinność środkowej Europy, w tym pasa pojezierzy na obszarze Polski była zdominowana przez lasy liściaste i mieszane. Głównymi taksonami lasotwórczymi były dąb (*Quercus*), lipa (*Tilia*), leszczyna pospolita (*Corylus avellana*), sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris*) oraz późnoholoceńscy migranci, tacy jak buk zwyczajny (*Fagus sylvatica*) i grab zwyczajny (*Carpinus betulus*) (Giesecke i inni, 2017; Ralska-Jasiewiczowa, 2004; Ralska-Jasiewiczowa i inni, 2003). Buk zwyczajny związany jest z obszarem północno-zachodniej Polski o przeważających wpływach klimatu oceanicznego (Latałowa i inni, 2004; Matuszkiewicz i inni, 1995). Klimat kontynentalny, charakteryzujący północno-wschodnią część faworyzował występowanie drzew iglastych, głównie sosny zwyczajnej i świerka wyniosłego (*Picea abies*) (Boratyńska, 2007; Obidowicz i inni, 2004). Środkowa, jak i zachodnia część obszaru była zdominowana przez lasy grabowo-dębowe (Matuszkiewicz i Solon, 2015; Milecka i inni, 2004; Ralska-Jasiewiczowa i inni, 2004). Okresy osłabienia działalności człowieka pozwalały na regeneracje tych typów lasów, niekiedy nawet na kilkaset lat (Makohonienko, 2000, 2004).

Lasy w Europie Środkowej stanowiły główny zasób społeczeństwa w epoce przedindustrialnej, znaczco przyczyniając się do rozwoju tych społeczeństw (Szabó, 2005). Lasy były wykorzystywane w celu pozyskania drewna jako budulca i źródła energii w celach opałowych (Broda, 2000; Haneca i inni, 2005; Stępnik, 1996). Gatunki wysokokaloryczne, jak grab zwyczajny i buk pospolity były wykorzystywane m.in. jako opał (Cywa, 2018; Kluk, 1805), natomiast dęby używane były do konstrukcji (Krąpiec, 1998; Stępnik, 1996), co sprzyjało selektywnej wycince tych drzew. Ponadto, z lasu uzyskiwano szereg surowców leśnych jak mi.in. potaż i dziegć, co także znaczco sprzyjało karczunkom (Związek, 2022). Jedną z ważniejszych form wykorzystania terenów leśnych była wycinka i wypalanie lasów w celu pozyskania i użyźnienia popiołem nowych obszarów rolnych (Fokt, 2012; Poklewski,

1975). Takie gleby, nie były jednak zbyt długo urodzajne i po wyjałowieniu wymuszały poszukiwanie nowych miejsc pod uprawę. Stopniowy postęp w modernizacji rolnictwa związany m.in. z wprowadzeniem nowych narzędzi i odłogowaniu ziemi na jakiś czas, a później także użycie zwierząt zaprzęgowych, hodowli, czy wprowadzeniu dwu- i trójpółówki sprawiły nieodwracalne zmiany w krajobrazie, w których las przestał pełnić dominującą rolę w krajobrazie (Broda, 2000). Pozostałości zbiorowisk leśnych zostały w znacznej mierze dostosowane do potrzeb człowieka i jego żywego inwentarza, a ich zanik był napędzany rozwojem ekonomicznym związанныm z rozwojem osadnictwa i rolnictwa, a co za tym idzie rozwojem krajobrazu kulturowego (Leuschner i Ellenberg, 2017). Jeszcze w połowie XIV wieku aż 75-95% ludności w Europie stanowiła ludność wiejska (Bulst, 1998), a więc bezpośrednio potrzebująca do przetrwania podstawowych zasobów środowiska, w tym lasów. W przypadku Polski w XIV było to nawet około 85% (Guzowski 2015). Zmiany demograficzne, na skutek wojen, epidemii, zmian klimatu miały potencjał do pozostawienia swojego śladu, odzwierciedlonego w regeneracji lasu, zapisanego w osadach jezior i torfowisk (Izdebski i inni, 2022). Tym większy potencjał do pozostawienia tego śladu w osadach mają okresy wzmożonego rozwoju gospodarczego następującego po fazie regeneracji lasu.

W niniejszej rozprawie doktorskiej skupiono się na rozwoju szaty roślinnej ostatnich 1500 lat na obszarze młodoglacjalnym w Polsce. Omawiany obszar badań cechuje duże nagromadzenie opracowanych stanowisk paleoekologicznych, szczególnie tych z opracowanymi profilami palinologicznymi. Większość omawianych w pracy stanowisk (27) znajduje się w granicach regionów Pojezierzy Południowobałtyckich i Pojezierza Wschodniobałtyckiego (por. Solon i inni, 2018). Pozostałe 5 stanowisk znajduje się poza tym obszarem, z czego 3 poza obszarem młodoglacjalnym (Ryc.1).

Szczególnym przypadkiem przeanalizowanym z większą szczegółowością w rozprawie doktorskiej była Wielkopolska. Na tle pojezierzy, wyróżniała się dominacją naturalnych lasów dębowo-grabowych, z dominacją graba nie mających analogów wśród obecnych lasów grądowych (*Querco-Carpinetum*) (Tobolski, 1991), których optimum, miało prawdopodobnie miejsce po okresie wędrówek ludów (około 360–510 n.e.) (Mączyńska, 2020). Świadczą o tym wysokie udziały pyłku graba w wielu profilach palinologicznych pobranych ze stanowisk z obszaru Wielkopolski, w szczególności pomiędzy Gnieznem a Poznaniem (Filbrandt, 1991; Litt i Tobolski, 1991; Makohonienko, 1991, 2000; Milecka, 1991, 1998; Tobolski, 1990, 1991).



Ryc. 1. Obszar badań. Na szaro zaznaczono pas pojezierzy. Czerwona kropka reprezentuje stanowisko Kazanie. Czarne pięciokąty i szare kropki (ważniejsze stanowiska z Wielkopolski) reprezentują stanowiska palinologiczne, które zostały zestawione w pracy nr 1. Szarą przerywaną linią zaznaczono maksymalny zasięg ostatniego zlodowacenia (Marks, 2012).

Wielkopolska to obszar charakteryzujący się dużym zagęszczeniem grodzisk, a więc pozostałości po wczesnośredniowiecznych grodach, których większość związana była z początkami państwa Piastów w X w. Obszar pomiędzy Gnieznem, Poznaniem a Gieczem, z istotną funkcją Ostrowa Lednickiego upatruje się jako centrum ich panowania. (Kara, 2009; Kara i Makohonienko, 2011). Jednakże, dotychczasowe badania palinologiczne (na których oparta jest większość interpretacji dotyczących antropogenicznej zmienności szaty roślinnej w tejże pracy doktorskiej) w Wielkopolsce obejmujące okres ostatnich 1500 lat, są jak dotąd opracowane z niewielką rozdzielcością czasową. Próbkowanie do analizy palinologicznej pobierane było w odległości nie mniejszej niż co 5 cm, co dawało często różnicę wyższą niż 70 lat pomiędzy próbami. Wynikało to z faktu, że badania te dotyczyły główne rekonstrukcji środowiska w skali holocenu. Ich celem była analiza profili o większej miąższości osadów i/lub torfów. Ponadto, chronologia opiera się na niewielkiej liczbie dat radiowęglowych i/lub palinostratygrafii (Filbrandt, 1991; Litt i Tobolski, 1991; Makohonienko, 1991, 2000; Milecka, 1991, 1998; Tobolski, 1991). Sprawia to, że analizy te nie mają wystarczającej rozdzielcości czasowej do bardziej szczegółowych interpretacji przeszego wpływu człowieka, w szczególności wpływu krótkoterminowych zmian aktywności człowieka na środowisko. Mogą

zatem być mniej użyteczne w porównaniach z najważniejszymi wydarzeniami historycznymi (bezpośrednio wpływającymi na sytuację społeczno-ekonomiczną przeszłych społeczeństw), które mają potencjał, by być zarejestrowane w archiwach natury. Stąd też w niniejszej rozprawie doktorskiej nowe wysokorozdzielcze analizy paleoekologiczne z obszaru Wielkopolski odgrywają główną rolę w interpretacjach zmian środowiska pod wpływem człowieka.

CEL BADAŃ

Główym celem rozprawy doktorskiej jest określenie:

- Jak zmiany demograficzne i wydarzenia społeczno-ekonomiczne (konflikty zbrojne, epidemie, migracje lub ich połączenie) wpłynęły na regenerację i degradację lasów w pasie pojezierzy w trakcie ostatnich 1500 lat w skalach czasowych od dziesięcioleci po stulecia.
- Identyfikacja zapisu paleokologicznego najważniejszych przełomów gospodarczych w trakcie ostatnich 1500 lat, które wpływały na zanik pokrywy leśnej i na analizowanym obszarze, w szczególności w Wielkopolsce.

W odniesieniu do artykułu numer 1, na podstawie zestawienia opublikowanych danych, głównym celem było określenie czaso-przestrzennych wzorców wczesnośredniowiecznego (i późniejszego) odnawiania się i zanikania lasów z obszaru pasa pojezierzy.

Dodatkowym celem było zidentyfikowanie warunków referencyjnych szaty roślinnej poprzedzającej formowanie się państwa Polskiego na części badanego obszaru.

Główym celem wysokorozdzielczych analiz paleoekologicznych ze stanowiska Kazanie (artykuł 2 i 3) zlokalizowanego 25 km na północny-wschód od Poznania była szczegółowa rekonstrukcja lokalnych zmian wpływu człowieka na środowisko. Ten z kolei, w otoczeniu stanowiska w dużym stopniu mógł być warunkowany przez najważniejsze przełomy społeczno-ekonomiczne w trakcie formowania się i dalszego rozwoju państwa polskiego.

Celem pracy była zatem rekonstrukcja historii roślinności, osadnictwa i aktywności pożarowej, ze szczególnym uwzględnieniem zmian demograficznych i gospodarczych, a także określenia czasu reakcji roślinności (głównie na przykładzie zmian lasu i użytkowania ziemi) na wpływ człowieka.

METODY BADAŃ

Artykuł nr 1

Artykuł nr 1 (Czerwiński i inni, 2022) jest przeglądowy i skupia się na wykorzystaniu opublikowanych badań palinologicznych opracowanych głównie w wysokiej rozdzielczości, w przeważającej większości z pasa pojezierzy. W tym celu przeanalizowano ogólne tendencje wpływu człowieka na ekosystemy leśne na przykładzie wybranych taksonów i określenia czaso-przestrzennych trendów wczesnośredniowiecznego odnawiania się lasów i późniejszego ich zanikania. Stąd też, bazuje on na wcześniej opublikowanych 36 profilach palinologicznych pobranych z 32 stanowisk. Stanowiska, w większości wytypowano z obszaru młodoglacjalnego (29 stanowisk) głównie pasa pojezierzy (27 stanowisk). Pozostałe 3 stanowiska zlokalizowane są w północnej strefie obszaru staroglacjalnego.

Rozpatrywano stanowiska, dla których różnica wieku między próbami palinologicznymi nie przekraczała uśrednionej wartości 70 lat, przypadającą na okres ostatnich około 1500 lat. Dane uzyskano z digitalizacji opublikowanych diagramów palinologicznych, a także danych pozyskanych przez współautorów artykułów. Głównym kryterium wyboru stanowisk palinologicznych była dostępność co najmniej dwóch dat radiowęglowych dla odcinka profilu reprezentującego ostatnie 1500 lat i/lub dostępność chronologii warwowej. Wyjątek stanowiło stanowisko Głęboczek (rozdzielcość czasowa 100 lat) ze względu na wiarygodną chronologię (Lamentowicz i inni, 2019). Chronologie dla wybranych fragmentów profili palinologicznych reprezentujących ostatnie 1500 lat były zgodne z oryginalnymi publikacjami. Czasoprzestrzenna zmienność początków antropogenicznych deforestacji po okresie wędrówek ludów została prześledzona zarówno na podstawie danych tabelarycznych, jeśli były dostępne, jak i diagramach.

Ustalenie ram czasowych początku deforestacji po okresie wędrówek ludów było możliwe dzięki określeniu ostatniej (najmłodszej) maksymalnej wartości procentowej pyłku graba i buka dla obszaru pasa pojezierzy. Dla tego obszaru zostały uwzględnione stanowiska, w których maksima procentowe pyłku przekraczały 5%, czyli wartości sugerujące lokalną obecność obu taksonów (Huntley i Birks, 1983). Spadki udziałów procentowych wyżej wymienionych taksonów były brane pod uwagę tylko wtedy, gdy zaobserwowano także spadek udziałów procentowych sumy pyłku drzew i krzewów (AP, z ang. Arboreal pollen). By przedstawić dokładny proces deforestacji, zestawiono także spadki udziałów procentowych głównych taksonów tworzących warstwę drzew, które towarzyszyły zanikowi udziałów buka i/lub graba.

W przypadku Wielkopolski zostały uwzględnione stanowiska, które nie spełniają wskazanych kryteriów dotyczących rozdzielczości czasowej jak i chronologicznej. W tym regionie wytypowano stanowiska palinologiczne, w których odnotowano najwyższe udziały procentowe pyłku *C. betulus* na obszarze Polski w okresie holocenu, który prawdopodobnie wskazuje na jego „ostatnie” wczesnośredniowieczne optimum. Brak jest natomiast chronologii pozwalających na określenie z dokładnością do dziesięcioleci (lub często nawet setek lat) w jakim czasie miało ono miejsce.

Pomimo tego, że tematyka regeneracji i zaniku lasu w pierwszym tysiącleciu pośrednio była już przedmiotem badań we wcześniejszych opracowaniach (Pędziżewska i inni, 2020), w pracy doktorskiej uszczegółowiono i rozszerzono ten proces o nowe stanowiska i okres czasu sięgający połowy drugiego tysiąclecia n.e.

Artykuł nr 2 i 3

Głównymi metodami badawczymi w artykule nr 2 i 3 były wysokorozdzielcze analizy paleoekologiczne rdzenia pobranego z torfowiska Kazanie (ok. 25 km na północny-wschód od Poznania). By uzyskać jak najlepszą rozdzielcość czasową badanych prób zastosowano ciągłe próbowanie z 1-centymetrowych przylegających do siebie fragmentów profili. Chronologię oparto o szczegółowe modele wiek-głębokość na podstawie datowania radiowęglowego metodą AMS (akceleratorowej spektroskopii masowej) oraz datowania metodą ołowiową (w przypadku artykułu nr 3). Oprócz analizy pyłkowej i wybranych palinomorf niepyłkowych, a także mikroskopijnych fragmentów węgli drzewnych (10-100 µm) wykonanych przez doktoranta i stanowiących podstawę rekonstrukcji paleosrodowiskowej, zastosowano analizę makroszczątków roślinnych i mikroskopijnych fragmentów węgli drzewnych o frakcji powyżej 100 µm.

Do analizy danych archeologicznych i historycznych wykorzystano materiały archeologiczne i źródła pisane. Te pierwsze pochodziły z arkuszy Archeologicznego Zdjęcia Polski (AZP) i zawierały informacje o śladach i punktach osadniczych, osadach i grodziskach w promieniu 5 km od torfowiska Kazanie. Źródła te zostały przeanalizowane w sposób agregatywny, tj. bez szczegółowej weryfikacji prawidłowości przeprowadzonej na kartach ewidencyjnych klasyfikacji. Uzyskanie informacji z AZP umożliwiło podstawową orientację w rozwoju wczesnośredniowiecznego osadnictwa w okolicach stanowiska badań.

Do analizy pisanych źródeł historycznych wykorzystano przede wszystkim dokumenty

pochodzące z inwentarzy dóbr koronnych Pobiedzisk oraz rękopisy rejestrów podatkowych z XVI-XVIII wieku. Na ich podstawie dokonano oszacowania powierzchni gruntów ornych i liczby ludności w późnym średniowieczu i czasach wczesno nowożytnych.

Stanowisko Kazanie, zostało wytypowane ze względu na bliskość obszaru będącego centrum wydarzeń historycznych państwa polskiego. Z uwagi na położenie ma potencjał, by zidentyfikować reakcje roślinności na dominujące zmiany demograficzne i społeczno-ekonomiczne na obszarze wiejskim, charakterystyczne dla całego kraju. By jak najdokładniej zrekonstruować wpływ człowieka, dane paleośrodowiskowe porównano z dostępymi danymi historycznymi (źródła pisane) i archeologicznymi. Warunkiem koniecznym było zatem zastosowanie odpowiedniej rozdzielczości próbkowania i chronologicznej umożliwiające ich wiarygodne odniesienie do wydarzeń historycznych.

Oba te artykuły powstały jako rozliczenie naukowe interdyscyplinarnego projektu „W poszukiwaniu transdyscyplinarnej synergii: przełomy gospodarcze Polski z perspektywy historyczno-przyrodniczej na tle europejskim”, Narodowy Program Rozwoju Humanistyki, nr, 2bH 15 0154 83, kierownik: dr hab. Piotr Guzowski. Doktorant prócz autorstwa wymienionych wcześniej analiz stworzył syntetyczny opis wyników analiz źródeł archeologicznych i historycznych, które zostały dostarczone przez historyków (z wyłączeniem rozdziału 6.5 w artykule nr. 3).

WYNIKI BADAŃ

Artykuł nr 1

Wyniki syntezy wskazują, że okresie wędrówek ludów prawdopodobna depopulacja umożliwiła długotrwałą regenerację roślinności. Ma to swoje odzwierciedlenie w sygnale palinologicznym zestawionych w tej pracy stanowisk. Te wskazują, że w północno-środkowej i północno-zachodniej części Polski w okresie VII-VIII w n.e., czyli nawet około sto lat po zakończeniu okresu wędrówek ludów zauważalna była regeneracja lasów z dominującym udziałem graba, a także buka. W tych regionach faza regeneracji trwała nawet kilkaset lat, co sugeruje znikomą presję człowieka na środowisko w tym czasie. Proces ten trwał jeszcze dłużej w obszarze Polski północno-wschodniej, bo nawet aż do przełomu XVI i XVII wieku n.e., co zanotowano w kilku stanowiskach tego regionu.

Analiza wzorców deforestacji zestawionych stanowisk wykazała, że w zdecydowanej większości stanowisk na analizowanym obszarze (30 z 32 badanych) po okresie wędrówek ludów (ok. 360-510 r. n.e.) nastąpił wyraźny początek zaniku lasu. Był on jednak niesynchroniczny i nastąpił nawet kilkaset lat po zakończeniu tego okresu. Istotny spadek udziałów procentowych pyłku *C. betulus* odnotowano w 30 z 32 analizowanych profili pyłkowych, *F. sylvatica* na 5 stanowiskach, a *P. abies* na 3. Natomiast spadek udziałów procentowych *Quercus* odnotowano na 8 stanowiskach, czemu towarzyszył również spadek udziału innych gatunków drzew. Zestawienie wyników badań wskazuje na wyraźną heterogoniczność początku procesu deforestacji na analizowanym obszarze. Proces ten był synchroniczny jedynie w Polsce północno-zachodniej (Pomorze Zachodnie), gdzie zachodził w VIII-IX wieku n.e. W Polsce zachodniej deforestacje po okresie wędrówek ludów miały miejsce pomiędzy XI a XIV wiekiem n.e. Dokumentowane są one jednak zaledwie przez dwa stanowiska o wysokiej rozdrobniołości (Czerwiński i inni, 2021; Lamentowicz i inni, 2020).

Stanowiska położone w bliskim sąsiedztwie torfowiska Kazanie (szczegółowo opracowanego w ramach badań do rozprawy doktorskiej) osiągają wartości większe o przynajmniej 10 %. Z kolei na tym stanowisku, selektywna wycinka graba miała miejsce na początku XI wieku n.e. Wnioskując na podstawie różnicy procentowej pomiędzy tym stanowiskiem a pozostałymi z Wielkopolski, jest prawdopodobne, że deforestacja miała prawdopodobnie miejsce wcześniej niż w XI wieku. Możliwe, że miało to miejsce przynajmniej wiek wcześniejszej w trakcie organizacji państwa Piastów. Stąd też, wysokorozdrobielcze dane palinologiczne z Wielkopolski, szczególnie z regionu pomiędzy Poznaniem a Gnieznem, są

wysoko pożądane ponieważ mogą pomóc w ustaleniu skali przemian środowiskowych związanych z tym procesem i jego ram czasowych.

W północno-środkowej Polsce początek zaniku lasów rozpoczął się w VII wieku n.e. Grab zwyczajny był taksonem, którego udziały wyraźnie spadły w związku ze zwiększeniem antropopresji między VIII i IX w. n.e. na wszystkich stanowiskach z tego regionu.

W północno-wschodniej Polsce widoczne są dwa regiony, w których stanowiska wykazują zróżnicowane czasowo wzorce deforestacji. Stanowiska zlokalizowane w północno-wschodnim krańcu Polski odnotowały spójny wzorzec zaniku lasu dopiero w trakcie XVI-XVII w. n.e. Z kolei pozostałe stanowiska, czyli te zlokalizowane w regionie Pojezierza Mazurskiego i Białowieży dokumentują go w okresie X-XVI w. n.e.

Nagle wylesienia (które dotyczyły głównie graba) w północno-zachodnich i północno-środkowych obszarach Polski można uznać za główny wskaźnik rozwoju i ekspansji przeszłych społeczności we wczesnym średniowieczu. Miały one miejsce głównie w IX-X w. n.e. Bezpowrotny zanik rozległych lasów o cechach naturalnych tym okresie może być uznany za początek kształtowania się ekosystemów zmienionych przez człowieka. Wylesienia te były jednak opóźnione na północno-wschodnim obszarze dzisiejszej Polski (dawniej Prusy), najprawdopodobniej ze względu na obecność na tym terenie odmiennego osadnictwa plemion pruskich, a następnie przez Zakon Krzyżacki i wprowadzenie litewskiego modelu gospodarczego.

Zestawione w artykule wyniki pochodzące z opublikowanych artykułów są zgodne z wcześniejszymi ustaleniami wskazującymi, że spadek udziału graba może być wczesnym wskaźnikiem lokalnych procesów osadniczych, poprzedzających intensywną deforestację, i intensyfikację rolnictwa. Na podstawie zaniku tego taksonu, w pracy tej pokazano, głównie początek procesu deforestacji na analizowanym obszarze. Możliwe to było dzięki informacjom uzyskanym z wysokorozdzielczych danych palinologicznych, które mogą stanowić uzupełnienie badań archeologicznych i historycznych w poszczególnych regionach.

Artykuł nr 2 i 3

W publikacjach tych przedstawiono lokalną historię zmian roślinności w otoczeniu i na torfowisku Kazanie. Artykuł nr 2 opublikowany w Studia Geohistorica zawiera ogólny opis wzajemnych oddziaływań między człowiekiem a środowiskiem zarejestrowanych w archiwach paleoekologicznych w zestawieniu z źródłami historycznymi i archeologicznymi. Artykuł ten prezentuje wstępne wyniki badań palinologicznych z torfowiska i jest przeznaczony

głównie dla odbiorców zajmujących się badaniami historycznymi oraz promuje możliwości badań paleoekologicznych w tej grupie naukowców. Artykuł nr 3, opublikowany w *Quaternary Science Reviews*, stanowi szeroki opis zmian szaty roślinnej w kontekście zmian demograficznych w oparciu o wyniki wielowskaźnikowych badań paleoekologicznych i źródeł historycznych. Ten z kolei przeznaczony jest dla wielu typów odbiorców zajmujących się odtwarzaniem zmian środowiska w oparciu o multidyscyplinarne podejście.

Badania wykazały, że:

- W trakcie IX-X wieku n.e., obszar w okolicy funkcjonującego wówczas jeziora cechował się niewielkim przekształceniem przez człowieka (kultura słowiańska), o czym świadczy wysoki udział gatunków tworzących grąd środkowoeuropejski, tj. *C. betulus*, *Quercus*, czy *Tilia cordata* w warstwie drzew, a także *Coryllus avellana* w warstwie podszytu i tym samym relatywnie niewielka obecność indyktorów człowieka (np. *Cerealia type*, *Plantago lanceolata*). Postulowany na drugą połowę X wieku n.e. niedobór drewna dębowego w regionie pomiędzy Gnieznem a Poznaniem (Krąpiec, 1998; Trzeciecki, 2016), które wykorzystane zostało do rozbudowy Ostrowa Lednickiego i grodów w okolicy nie ma odzwierciedlenia w danych pyłkowych. Wycinka dębów mogła ewentualnie wystąpić tylko w odniesieniu do drzew charakteryzujących się określonymi parametrami, jednak nie wpłynęła znacząco na lokalną populację dębu, a tym samym na sygnał pyłkowy.
- W sygnale paleoekologicznym najazd księcia czeskiego Brzetysława w 1039 roku na Wielkopolskę manifestuje się sukcesją wtórną z wiodącą rolą brzozy na opuszczonych terenach w ciągu kolejnych 80 lat. Z drugiej strony, zwiększona obecność tego taksonu mogła mieć związek z wypłycaniem jeziora i tworzeniem się torfowiska niskiego w strefie brzegowej i pojawianie się tych drzew na torfowisku. Zauważalny wzrost udziałów pyłku roślin uprawnych sugeruje, że presja osadnicza wokół stanowiska badań miała miejsce już około 1120 ± 25 (lata kalibrowane n.e.), czyli około 50 lat wcześniej niż dokumentują to źródła historyczne. Lokalna gospodarka powróciła zatem do poziomu sprzed kryzysu w ciągu około 80 lat.
- Rozbudowa sieci osadniczej nie pociągnęła za sobą przekształcenia lasu, co może sugerować, że miejscowa ludność zakładała osady prawdopodobnie na terenach wcześniej wylesionych, bez dalszego szybkiego wyrębu, przynajmniej do końca XIII wieku n.e. Wskazuje na to wysoki udział dębu i graba w spektrach pyłkowych.
- Rozwój terenów wykorzystywanych rolniczo doprowadził do silniejszego otwarcia krajobrazu w XV i XVI wieku n.e. Umożliwiło to rozprzestrzenienie się sosny, która mogła dominować w zaburzonych obszarach leśnych i/lub na nieurodzajnych glebach. Powstanie obiektów protoprzemysłowych w okolicy stanowiska mogło być związane z zauważalnym

wzrostem akumulacji mikroskopijnych węgli w tym okresie, jak i wykorzystaniem drewna opałowego w wyniku chłodniejszych zim w okresie małej epoki lodowej. Potwierdza to, że ten wskaźnik może być również traktowany jako miara aktywności gospodarczej.

- Okres gospodarczego rozwoju został zatrzymany przez kryzys związanego z epidemią i wojną polsko-szwedzką (potop szwedzki) w latach 1655-1660, a także innymi konfliktami zbrojnymi (m.in. III wojna północna) które doprowadziły do wyludnienia w okolicy stanowiska (aż o 67,5%) i ogromnej zapaści ekonomicznej. Skutkowało to porzuceniem ziemi uprawnej, jak dokumentują źródła podatkowe aż o około 35%. Odzwierciedleniem tych zmian w sygnale paleośrodowiskowym jest gwałtowny spadek udziałów wszystkich pyłkowych wskaźników działalności człowieka od 1620 ± 20 do 1800 ± 40 . Kryzys, który trwał około 200 lat zapisał się spadkiem aktywności pożarowej (mniejszy udział mikroskopijnych węgli). Przede wszystkim jednak, mniejsza aktywność człowieka na środowisko skutkowała rozprzestrzenianiem się sosny na opuszczonech polach i nieużytkach.
- Lata kryzysu społeczno-ekonomicznego pomiędzy 1810-1830 związanego z epidemią, recesją gospodarczą, wojnami napoleońskimi, a także nieurodzajem są zauważalne poprzez krótkotrwały spadek udziałów pyłkowych wskaźników taksonów uprawnych pomiędzy 1810 ± 35 - 1820 ± 35 . Późniejszy gwałtowny rozwój gospodarczy i wzrost demograficzny ludności wiejskiej, a także mechanizacja rolnictwa w Wielkopolsce odzwierciedlona jest przez wzrost wskaźników pyłkowych obecności pól uprawnych od 3,5% w 1810 ± 35 , poprzez 10,2% w 1865 ± 25 , aż do 29,5% w 1940 ± 10 roku.
- XIX wiek w Wielkopolsce charakteryzował się szybkim wzrostem liczby zwierząt gospodarskich, głównie koni i bydła (trzykrotny wzrost pogłowia w latach 1816-1913), a także owiec (wzrost pogłowia z 796 tys. w 1816 r. do 2,63 mln pomiędzy 1831-1873) i trzody chlewnej. Dane palinologiczne dokumentują w tym okresie zwiększoną obecność wskaźników obecności łąk i pastwisk (głównie Poaceae), a także grzybów koprofilnych, co sugeruje występowanie otwartego krajobrazu, w którym hodowla zwierząt i/lub wypas odbywały się w bardzo bliskim sąsiedztwie torfowiska (Cugny i inni., 2010).
- Gwałtowny spadek wskaźników pyłkowych działalności człowieka po roku 1940 ± 10 mógł wynikać z destrukcyjnego wpływu II wojny światowej na lokalne rolnictwo. Ponadto, charakterystyczny zanik wskaźników uprawnych obserwowany po roku 1960 ± 5 mógł być związany z wprowadzeniem roślin uprawnych produkujących mniej pyłku, (np. pszenica, czy rzepak) w pobliżu stanowiska. Szczególnie czułym taksonem na zmiany gospodarcze na wsi w XX wieku wywołane m.in. wojną (likwidacja olejarni, która przerwała rozwój uprawy rzepaku) okazała się obecność pyłku Brassicaceae, łączony w tym studium przypadku głównie z

uprawami rzepaku w XX wieku.

- Okres współczesny (zwłaszcza od 1950±10) cechował się regeneracją lasów w pobliżu torfowiska i intensyfikacją produkcji przemysłowej, i/lub kontrolowanym wypalaniem łąk. Badania przeprowadzone na torfowisku Kazanie wykazały, że istotne przełomy gospodarcze, a także wydarzenia polityczne i społeczno-ekonomiczne w przeszłości były głównymi czynnikami warunkującymi degradację lub regenerację roślinności w pobliżu badanego stanowiska.

PODSUMOWANIE

Przedstawione w niniejszej pracy doktorskiej rekonstrukcje paleośrodowiskowe opracowane w wysokiej rozdzielczości pozwoliły na wyciągnięcie generalnych wniosków dotyczących odmiennych reakcji roślinności na osłabienie i wzmożenie wpływu człowieka w ostatnich 1500 latach w pasie pojezierzy.

Praca ta wykazała, że:

- W zależności od stopnia przekształcenia krajobrazu i skali wyludnienia/opuszczenia terenu, proces sukcesji wtórnej (regeneracji roślinności) cechował się różnym okresem trwania:

1) w przypadku opuszczenia terenów uprawnych po okresie wędrówki ludów (ok. 510 rok n.e.), miał miejsce długotrwały rozwój lasów o cechach naturalnych na obszarze pojeziernym. Na większej części pasa pojezierzy szczególną rolę odgrywały grądy, co potwierdzają wysokie udziały pyłku graba w większości zestawionych stanowisk. Ten typ lasu miał swoje optimum pomiędzy VI a VIII wiekiem n.e. (w zachodniej i środkowej części analizowanego obszaru), tuż przed wczesnośredniowieczną „falą” intensyfikacji antropopresji.

2) w przypadku krótkookresowego osłabienia presji człowieka na środowisko, np. najazdu Brzetysława w XI wieku n.e., bądź kryzysu XVII wieku, sukcesja wtóra cechowała się ekspansją gatunków światłóżądłnych tj. brzoza i sosna zwyczajna.

- Deforestacja na obszarze pojezierzy charakteryzowała się wyraźną heterogenicznością. Różnice w datowaniach początku silnych deforestacji pomiędzy poszczególnymi regionami sięgały nawet około 900 lat. W północno-zachodniej i północno-środkowej Polsce ekspansja lasów przy znikomym udziale człowieka trwała do VIII-IX w. n.e., kiedy to rozwój osadnictwa (słownińskiego) spowodował zanik lasu na dużą skalę. W późniejszym okresie, tj. pomiędzy XI a XVII wiekiem n.e., proces zaniku lasów odnotowano głównie w północno-wschodniej Polsce i był on związany działalnością osadnictwa pruskiego, a następnie działalnością Zakonu Krzyżackiego i powstaniem nowych osad od XIV wieku.

- Działalność człowieka sprzyjała przede wszystkim wycince graba, o czym świadczy jego znaczny spadek udziałów procentowych zarejestrowanych w większości profili pyłkowych na obszarze pojezierzy.

- Lasy dębowo-grabowe, szczególnie te poza północno-wschodnią Polską, zostały zdegradowane na przestrzeni kilku wieków (głównie pomiędzy VIII-IX wiekiem n.e.) i bezpowrotnie straciły potencjał do regeneracji.

- Zmiany struktury lasu i użytkowania ziemi, zrekonstruowane na podstawie danych paleoekologicznych ze stanowiska Kazanie były wynikiem przełomów gospodarczych. Były to m.in.:

1) rozwój państwa piastowskiego na początku XI wieku n.e. i związane z nim wycinki grada widoczne w zapisie palinologicznym poprzez spadek jego udziałów procentowych,

2) kryzys wieku XI wieku n.e., którego skutki w sygnale paleoekologicznym widoczne są przez około 75 lat, co manifestuje się głównie sukcesją wtórną brzozy w okolicy stanowiska,

3) kolonizacja na prawie niemieckim pomiędzy XII a XIV wiekiem n.e., cechująca się stopniowym przekształceniem krajobrazu wokół stanowiska badań, odzwierciedlonym m.in. w niewielkim spadku udziałów procentowych pyłku grada i dębu,

4) rozwój gospodarczy pomiędzy XV a XVI wiekiem n.e., cechujący się wyraźnym wzrostem udziałów wskaźników antropogenicznych, szczególnie pyłku zbóż,

5) kryzys wieku XVII będący efektem nałożenia się kilku czynników, jak wojna polsko-szwedzka (1655-1660), zaraza w Wielkopolsce i zmiany klimatu w czasie małej epoki lodowej (1500–1850) oraz III wojna północna. Kryzys ten, jak pokazują dane palinologiczne swoje skutki środowiskowe miał aż około 200 lat,

6) okres dominacji pruskiej związany m.in. z reformami rolnictwa i wzrostem demograficznym, zapisał się w gwałtownym zwiększeniu się udziałów procentowych pyłku zbóż i zarodników grzybów koprofilnych,

7) Okres I i II Wojny Światowej, manifestował się m.in. gwałtownym spadkiem udziałów procentowych pyłku roślin charakterystycznych dla terenów uprawnych.

- Dzięki zastosowaniu wysokiej rozdzielczości, możliwe było uchwycenie reakcji na wyżej wymienione procesy co umożliwiło porównanie danych paleoekologicznych z dostępnym materiałem historycznym lub archeologicznym.

- Wysokorozdzielcze dane paleoekologiczne w pewnych przypadkach mają potencjał do weryfikacji ustaleń archeologów:

1) wbrew dotychczasowym opiniom o całkowitym wylesieniu Wielkopolski w XI wieku n.e. i jednaczesnym braku drewna dębowego w tym regionie, dane paleoekologiczne nie dostarczają informacji na ten temat,

2) dane palinologiczne wskazują, że po najeździe Brzetysława powrót działalności rolniczej do stanu przed najazdu trwał około 80 lat.

Jak wykazano w niniejszej pracy doktorskiej, dane palinologiczne przy zastosowaniu wiarygodnej chronologii i rozdzielczości były pomocne w uzyskaniu informacji nt. czasu i skali

przekształcenia przeszłego środowiska, w szczególności lasów na analizowanym obszarze. Stąd też, tak istotne jest łączenie różnych podejść badawczych i spojrzenie na procesy związane z przekształceniem środowiska w sposób zintegrowany. Zwiększa to wiarygodność rekonstrukcji paleośrodowiskowych i niekiedy pozwala na zrewidowanie ustaleń płynących z innych dyscyplin, jak historia, bądź może dostarczyć alternatywnych wyjaśnień na temat wpływu człowieka.

Szczególnie istotnych informacji z punktu widzenia historii mogą dostarczyć dalsze, dokładne wysokorozdzielcze analizy wielowskaźnikowe z obszarów kluczowych dla formowania się państwa polskiego. Dlatego też, ze względu na znaczenie Wielkopolski w dziejach Polski, jak i brak innych stanowisk w tym regionie opracowanych w wysokiej rozdzielcości i wiarygodnej chronologii, konieczne są analizy palinologiczne z innych stanowisk tego regionu, zwłaszcza tych odzwierciedlających regionalny sygnał rekonstrukcji paleośrodowiskowych.

LITERATURA

- Albert, B., Innes, J., Krementskiy, K., Millard, A.R., Gaydarska, B., Nebbia, M., Chapman, J., 2020. What was the ecological impact of a Trypillia megasite occupation? Multi-proxy palaeo-environmental investigations at Nebelivka, Ukraine. *Vegetation History and Archaeobotany* 29, 15-34.
- Baille, M.G.L., 1991. Suck-in and smear: two related chronological problems for the 90s. *J Theoretical Archaeol* 2, 12-16.
- Behre, K.E., 1986. Anthropogenic Indicators in Pollen Diagrams. Balkema, Rotterdam.
- Birks, H.H., Birks, H.J.B., 2000. Future uses of pollen analysis must include plant macrofossils. *Journal of Biogeography* 27, 31-35.
- Birks, H.J.B., Tinner, W., 2016. Past forests of Europe, [w]: Miguel-Ayanz, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (Edytorzy) European Atlas of Forest Tree Species. Publ. Off. EU, Luxembourg, 36-39.
- Blaauw, M., Christen, J.A., Mauquoy, D., van der Plicht, J., Bennett, K.D., 2007. Testing the timing of radiocarbon-dated events between proxy archives. *The Holocene* 17, 283-288.
- Boratyńska, K., 2007. Geographic Distribution, in: Tjoelker, M.G., Boratyński, A., Bugała, W. (Eds.), *Biology and Ecology of Norway Spruce*. Springer Netherlands, Dordrecht, 23-36.
- Broda, J., 2000. Historia leśnictwa w Polsce. Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego.
- Bryant, V.M., Holloway, R.G., 1983. 5 - The Role of Palynology in Archaeology, [w]: Schiffer, M.B. (Ed.), *Advances in Archaeological Method and Theory*. Academic Press, San Diego, 191-224.
- Bulst, N., 1998. L'essor (X^e-XIV^e), [w]: Bardet, J.-P., Dupâquier, J. (Edytorzy.), *Histoire des populations de l'Europe*, t. 1, Paris, 168–184.
- Campbell, J.F.E., Fletcher, W.J., Joannin, S., Hughes, P.D., Rhanem, M., Zielhofer, C., 2017. Environmental Drivers of Holocene Forest Development in the Middle Atlas, Morocco. *Frontiers in Ecology and Evolution* 5.
- Carcaillet, C., Bouvier, M., Fréchette, B., Larouche, A.C., Richard, P.J.H., 2001. Comparison of pollen-slide and sieving methods in lacustrine charcoal analyses for local and regional fire history. *The Holocene* 11, 467-476.
- Conedera, M., Tinner, W., Neff, C., Meurer, M., Dickens, A.F., Krebs, P., 2009. Reconstructing past fire regimes: methods, applications, and relevance to fire management and conservation. *Quaternary Science Reviews* 28, 555-576.
- Crabtree, S.A., Dunne, J.A., 2022. Towards a science of archaeoecology. *Trends in Ecology & Evolution* 37, 976-984.

Cugny, C., Mazier, F., Galop, D., 2010. Modern and fossil non-pollen palynomorphs from the Basque mountains (western Pyrenees, France): the use of coprophilous fungi to reconstruct pastoral activity. *Vegetation History and Archaeobotany* 19, 391-408.

Cywa, K., 2018. Trees and shrubs used in medieval Poland for making everyday objects. *Vegetation History and Archaeobotany* 27, 111-136.

Czerwiński, S., Guzowski, P., Lamentowicz, M., Gałka, M., Karpińska-Kołaczek, M., Poniat, R., Łokas, E., Diaconu, A.-C., Schwarzer, J., Miecznik, M., Kołaczek, P., 2021. Environmental implications of past socioeconomic events in Greater Poland during the last 1200 years. *Synthesis of paleoecological and historical data. Quaternary Science Reviews* 259.

Czerwiński, S., Marcisz, K., Wacnik, A., Lamentowicz, M., 2022. Synthesis of palaeoecological data from the Polish Lowlands suggests heterogeneous patterns of old-growth forest loss after the Migration Period. *Scientific Reports* 12, 8559.

Dreibrodt, S., Wiethold, J., 2014. Lake Belau and its catchment (northern Germany): A key archive of environmental history in northern central Europe since the onset of agriculture. *The Holocene* 25, 296-322.

Dumayne, L., Stoneman, R., Barber, K., Harkness, D., 1995. Problems associated with correlating calibrated radiocarbon-dated pollen diagrams with historical events. *The Holocene* 5, 118-123.

Edwards, K.J., Fyfe, R.M., Hunt, C.O., Schofield, J.E., 2015. Moving forwards? Palynology and the human dimension. *Journal of Archaeological Science* 56, 117-132.

Ellis, E.C., 2015. Ecology in an anthropogenic biosphere. *Ecological Monographs* 85, 287-331.

Ellis, E.C., Gauthier, N., Klein Goldewijk, K., Bliege Bird, R., Boivin, N., Diaz, S., Fuller, D.Q., Gill, J.L., Kaplan, J.O., Kingston, N., Locke, H., McMichael, C.N.H., Ranco, D., Rick, T.C., Shaw, M.R., Stephens, L., Svenning, J.C., Watson, J.E.M., 2021. People have shaped most of terrestrial nature for at least 12,000 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118 (17) e2023483118.

Ellis, E.C., Kaplan, J.O., Fuller, D.Q., Vavrus, S., Klein Goldewijk, K., Verburg, P.H., 2013. Used planet: A global history. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, 7978-7985.

Filbrandt, A., 1991. Badania palinologiczne osadów limnicznych jeziora Kamionek, [w]: Tobolski, K. (Edytor), *Wstęp do paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego*. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań.

Finsinger, W., Giesecke, T., Brewer, S., Leydet, M., 2017. Emergence patterns of novelty in European vegetation assemblages over the past 15 000 years. *Ecol Lett* 20, 336-346.

Fokt, K., 2012. Późnośredniowieczne osadnictwo wiejskie na Dolnym Śląsku w świetle badań archeologicznych. Księgarnia Akademicka, Kraków.

Fyfe, R.M., Woodbridge, J., Roberts, N., 2015. From forest to farmland: pollen-inferred land cover change across Europe using the pseudobiomization approach. *Glob Chang Biol* 21, 1197-1212.

Gaillard, M.J., 2013. Pollen Methods and studies, Archaeological Applications, [w]: Elias, S.A., Mock, C.J. (Edytorzy.), Encyclopedia of Quaternary Science (Second Edition). Elsevier, Amsterdam, 880-904.

Giesecke, T., Brewer, S., Finsinger, W., Leydet, M., Bradshaw, R.H.W., 2017. Patterns and dynamics of European vegetation change over the last 15,000 years. *Journal of Biogeography* 44, 1441-1456.

Giesecke, T., Davis, B., Brewer, S., Finsinger, W., Wolters, S., Blaauw, M., de Beaulieu, J.-L., Binney, H., Fyfe, R.M., Gaillard, M.-J., Gil-Romera, G., van der Knaap, W.O., Kuneš, P., Kühl, N., van Leeuwen, J.F.N., Leydet, M., Lotter, A.F., Ortú, E., Semmler, M., Bradshaw, R.H.W., 2013. Towards mapping the late Quaternary vegetation change of Europe. *Vegetation History and Archaeobotany* 23, 75-86.

Guzowski, P., 2015. Stan i perspektywy badań nad liczbą ludności Polski w późnym średniowieczu i w początkach epoki wczesnonowożytej. *Przeszłość Demograficzna Polski* 37, 7-26.

Haldon, J., Mordechai, L., Newfield, T.P., Chase, A.F., Izdebski, A., Guzowski, P., Labuhn, I., Roberts, N., 2018. History meets palaeoscience: Consilience and collaboration in studying past societal responses to environmental change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115, 3210-3218.

Haneca, K., Wazny, T., Van Acker, J., Beeckman, H., 2005. Provenancing Baltic timber from art historical objects: success and limitations. *Journal of Archaeological Science* 32, 261-271.

Huntley, B., Birks, H.J.B., 1983. An Atlas of past and present pollen maps for Europe: 0–13000 years ago. Cambridge University Press, Cambridge.

Iriarte, J., Power, M.J., Rostain, S., Mayle, F.E., Jones, H., Watling, J., Whitney, B.S., McKey, D.B., 2012. Fire-free land use in pre-1492 Amazonian savannas. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, 6473-6478.

Izdebski, A., Guzowski, P., Poniat, R., Masci, L., Palli, J., Vignola, C., Bauch, M., Cocozza, C., Fernandes, R., Ljungqvist, F.C., Newfield, T., Seim, A., Abel-Schaad, D., Alba-Sanchez, F., Bjorkman, L., Brauer, A., Brown, A., Czerwiński, S., Ejarque, A., Filoc, M., Florenzano, A., Fredh, E.D., Fyfe, R., Jasiunas, N., Kolaczek, P., Kouli, K., Kozakova, R., Kupryjanowicz, M., Lageras, P., Lamentowicz, M., Lindbladh, M., Lopez-Saez, J.A., Luelmo-Lautenschlaeger, R., Marcisz, K., Mazier, F., Mensing, S., Mercuri, A.M., Milecka, K., Miras, Y., Noryskiewicz, A.M., Novenko, E., Obremska, M., Panajiotidis, S., Papadopoulou, M.L., Pedziszewska, A., Perez-Diaz, S., Piovesan, G., Pluskowski, A., Pokorny, P., Poska, A., Reitalu, T., Rosch, M., Sadori, L., Sa Ferreira, C., Sebag, D., Slowinski, M., Stancikaite, M., Stivrins, N., Tunno, I., Veski, S., Wacnik, A., Masi, A., 2022. Palaeoecological data indicates land-use changes across Europe linked to spatial heterogeneity in mortality during the Black Death pandemic. *Nat Ecol Evol* 6(3):297-306.

Izdebski, A., Holmgren, K., Weiberg, E., Stocker, S.R., Büntgen, U., Florenzano, A., Gogou, A., Leroy, S.A.G., Luterbacher, J., Martrat, B., Masi, A., Mercuri, A.M., Montagna, P., Sadori, L., Schneider, A., Sicre, M.A., Triantaphyllou, M., Xoplaki, E., 2016. Realising consilience: How better communication between archaeologists, historians and natural scientists can transform the study of past climate change in the Mediterranean. *Quaternary Science Reviews* 136, 5-22.

Kara, M., 2009. Najstarsze państwo Piastów - rezultat przełomu czy kontynuacji?: studium archeologiczne. Instytut Archeologii i Etnologii Polskiej Akademii Nauk.

Kara, M., Makohonienko, M., 2011. Wielkopolska krainą grodów – krajobraz kulturowy kolejki państwa polskiego w świetle nowych ustaleń chronologicznych. *Landform Analysis* 16, 20–25.

Kluk, K., 1805. Dykcionarz roslinny, w którym podług układu Linneusza są opisane rosliny nie tylko kraiove, dzikie, pozyteczne albo szkodliwe: na roli, w ogrodach, oranżeryach utrzymywane: ale oraz y cudzoziemskie, ktoreby w kraiu pozyteczne bydz mogły: albo z których mamy lekarstwa, korzenie, farby, etc albo ktore jakową nadzwyczajność w sobie mają: ich zdatności lekarskie, ekonomiczne, dla ludzi, koni, bydła, owiec, pszczoł, etc utrzymywanie, etc Z poprzedzającym wykładem słów Botanicznych i kilkorakim na końcu Reiestrem. Drukarnia Xięży Piarów, Warszawa.

Kołaczek, P., Gałka, M., Lamentowicz, M., Marcisz, K., Kajukało-Drygalska, K., Karpińska-Kołaczek, M., 2019. Increased radiocarbon dating resolution of ombrotrophic peat profiles reveals periods of disturbance which were previously undetected. *Quaternary Geochronology* 52, 21-28.

Kołaczek, P., Margielewski, W., Gałka, M., Karpińska-Kołaczek, M., Buczek, K., Lamentowicz, M., Borek, A., Zernitskaya, V., Marcisz, K., 2020. Towards the understanding the impact of fire on the lower montane forest in the Polish Western Carpathians during the Holocene. *Quaternary Science Reviews* 229, 106137.

Kräpiec, M., 1998. Oak dendrochronology of the Neoholocene in Poland. *Folia Quaternaria* 69, 5-133.

Lamentowicz, M., Kołaczek, P., Mauquoy, D., Kittel, P., Łokas, E., Słowiński, M., Jassey, V.E.J., Niedziółka, K., Kajukało-Drygalska, K., Marcisz, K., 2019. Always on the tipping point – A search for signals of past societies and related peatland ecosystem critical transitions during the last 6500 years in N Poland. *Quaternary Science Reviews* 225, 105954.

Lamentowicz, M., Marcisz, K., Guzowski, P., Galka, M., Diaconu, A.C., Kolaczek, P., 2020. How Joannites' economy eradicated primeval forest and created anthroecosystems in medieval Central Europe. *Scientific Reports* 10, 18775.

Latałowa, M., Ralska-Jasiewiczowa, M., Miotk-Szpiganowicz, G., Zachowicz, J., Nalepka, D., 2004. *Fagus sylvatica* L. - Beech. [w]: Ralska-Jasiewiczowa, M., Latałowa, M., Wasylkowa, K., Tobolski, K., Madeyska, E., Wright Jr., H. E., Turner, C. (Edytorzy), Late Glacial and Holocene history of vegetation in Poland based on isopollen maps. W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Kraków, 95-104.

Leuschner, C., Ellenberg, H., 2017. The Central European Vegetation as the Result of Millennia of Human Activity, [w]: Leuschner, C., Ellenberg, H. (Edytorzy.), Ecology of Central European Forests: Vegetation Ecology of Central Europe, Volume I. Springer International Publishing, Cham, 31-116.

Litt, T., Tobolski, K., 1991. Materiały do postglacialnej historii roślinności okolic Lednicy. Część I. Badania palinologiczne osadów Jeziora Lednickiego - rdzeń V/86, [w]: Tobolski, K. (Edytor), Wstęp do paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego, Poznań.

Makohonienko, M., 1991. Materiały do postglacialnej historii roślinności okolic Lednicy. Część II. Badania palinologiczne osadów Jeziora Lednickiego - rdzeń I/86 i Wal/87, [w]: Tobolski, K. (Edytor), Wstęp do paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań.

Makohonienko, M., 2000. Przyrodnicza historia Gniezna. Homini, Poznań–Bydgoszcz.

Makohonienko, M., 2004. Late Holocene period of increasing human impact, [w]: Ralska-Jasiewiczowa, M., Latałowa, M., Wasylkowa, K., Tobolski, K., Madeyska, E., Wright Jr., H. E., Turner, C. (Edytorzy), Late Glacial and Holocene history of vegetation in Poland based on isopollen maps. W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Kraków, 411-416.

Marcisz, K., Tinner, W., Colombaroli, D., Kołaczek, P., Słowiński, M., Fiałkiewicz-Koziel, B., Łokas, E., Lamentowicz, M., 2015. Long-term hydrological dynamics and fire history over the last 2000 years in CE Europe reconstructed from a high-resolution peat archive. Quaternary Science Reviews 112, 138-152.

Marks, L., 2012. Timing of the Late Vistulian (Weichselian) glacial phases in Poland. Quaternary Science Reviews 44, 81-88.

Marquer, L., Gaillard, M.-J., Sugita, S., Poska, A., Trondman, A.-K., Mazier, F., Nielsen, A.B., Fyfe, R.M., Jönsson, A.M., Smith, B., Kaplan, J.O., Alenius, T., Birks, H.J.B., Bjune, A.E., Christiansen, J., Dodson, J., Edwards, K.J., Giesecke, T., Herzschuh, U., Kangur, M., Koff, T., Latałowa, M., Lechterbeck, J., Olofsson, J., Seppä, H., 2017. Quantifying the effects of land use and climate on Holocene vegetation in Europe. Quaternary Science Reviews 171, 20-37.

Matuszkiewicz, J.M., Solon, J., 2015. Przestrzenne zróżnicowanie i cechy charakterystyczne krajobrazów Polski w ujęciu geobotanicznym. Problemy Ekologii Krajobrazu XL, 85-101.

Matuszkiewicz, W., Faliński, J.B., Kostrowicki, A.S., Matuszkiewicz, J.M., Olaczek, R., Wojterski, T., 1995. Potential natural vegetation of Poland. General map 1:300 000. IGiPZ PAN, Warszawa.

Mauquoy, D., & Van Geel, B. (2007). Plant macrofossil methods and studies: Mire and Peat Macros [w] S. A. Elias (Edytor), Encyclopedia of Quaternary Science. Elsevier Science, 2315-2336

Mączyńska, M., 2020. The Chronology, [w]: Bursche, A., John, H., Zapolska, A. (Edytorzy), The Migration Period between the Oder and the Vistula (2 vols). Brill, Leiden, The Netherlands, 201-224.

Milecka, K., 1991. Analiza pyłkowa osadów jeziornych w Gieczu - stan badań, [w]: Tobolski, K. (Edytor), Wstęp do paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań.

Milecka, K., 1998. Historia działalności człowieka w okolicach Giecza i Wagowa w świetle analizy pyłkowej, Poznań–Lednica.

Milecka, K., Kupryjanowicz, M., Makohonienko, M., Okuniewska-Nowaczyk, I., Nalepka, D., 2004. *Quercus* L. - Oak. [w]: Ralska-Jasiewiczowa, M., Latałowa, M., Wasylkowa, K., Tobolski, K., Madeyska, E., Wright Jr., H. E., Turner, C. (Edytorzy), Late Glacial and Holocene history of vegetation in Poland based on isopollen maps. W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Kraków, 189-198

Nielsen, A.B., Giesecke, T., Theuerkauf, M., Feeser, I., Behre, K.-E., Beug, H.-J., Chen, S.-H., Christiansen, J., Dörfler, W., Endtmann, E., Jahns, S., de Klerk, P., Kühl, N., Latałowa, M., Odgaard, B.V., Rasmussen, P., Stockholm, J.R., Voigt, R., Wiethold, J., Wolters, S., 2012. Quantitative reconstructions of changes in regional openness in north-central Europe reveal new insights into old questions. Quaternary Science Reviews 47, 131-149.

Obidowicz, A., Ralska-Jasiewiczowa, M., Kupryjanowicz, M., Szczepanek, K., Latałowa, M., Nalepka, D., 2004. *Picea abies* (L.) H. Karst. - Spruce [w]: Ralska-Jasiewiczowa, M., Latałowa, M., Wasylkowa, K., Tobolski, K., Madeyska, E., Wright Jr., H. E., Turner, C. (Edytorzy), Late Glacial and Holocene history of vegetation in Poland based on isopollen maps. W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Kraków, 147-159.

Pędziżewska, A., Latałowa, M., Święta-Musznicka, J., Zimny, M., Kupryjanowicz, M., Noryśkiewicz, A.M., Bloom, K., 2020. Pollen Evidence of Change in Environment and Settlement during the 1st Millennium AD, [w]: Bursche, A., Hines, J., Zapolska, A. (Edsytorzy), The Migration Period between the Oder and the Vistula. Brill, Leiden, The Netherlands, 137-198.

Poklewski, T., 1975. Spicymierska włośc grodowa w średniowieczu: obraz gospodarczy. Acta Archaeologica Lodzienia 24, 7-139.

Ralska-Jasiewiczowa, M., 2004. Late Holocene. [w]: Ralska-Jasiewiczowa, M., Latałowa, M., Wasylkowa, K., Tobolski, K., Madeyska, E., Wright Jr., H. E., Turner, C. (Edytorzy), Late Glacial and Holocene history of vegetation in Poland based on isopollen maps. W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Kraków.

Ralska-Jasiewiczowa, M., Miotk-Szpiganowicz, G., Zachowicz, J., Latałowa, M., Nalepka, D., 2004. *Carpinus betulus* L. – Hornbeam [w]: Ralska-Jasiewiczowa, M., Latałowa, M., Wasylkowa, K., Tobolski, K., Madeyska, Wright Jr., H. E., Turner, C (Edytorzy), Late Glacial and Holocene history of vegetation in Poland based on isopollen maps. W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Kraków, 405-410.

Ralska-Jasiewiczowa, M., Nalepka, D., Goslar, T., 2003. Some problems of forest transformation at the transition to the oligocratic/Homo sapiens phase of the Holocene interglacial in northern lowlands of central Europe. Vegetation History and Archaeobotany 12, 233-247.

Seppä, H., 2013. Pollen Analysis, Principles, [w]: Elias, S.A., Mock, C.J. (Edytorzy), Encyclopedia of Quaternary Science (Second Edition). Elsevier, Amsterdam, 794-804.

Shumilovskikh, L.S., van Geel, B., 2020. Non-Pollen Palynomorphs, [w] Henry, A.G. (Edytor), Handbook for the Analysis of Micro-Particles in Archaeological Samples. Springer International Publishing, Cham, 65-94.

Słowiński, M., Brauer, A., Guzowski, P., Związek, T., Obremska, M., Theuerkauf, M., Dietze, E., Schwab, M., Tjallingii, R., Czaja, R., Ott, F., Błaszkiewicz, M., 2021. The role of Medieval road operation on cultural landscape transformation. *Scientific Reports* 11, 20876.

Solon, J., Borzyszkowski, J., Bidłasik, M., Richling, A., Badura, K., Balon, J., Brzezińska-Wójcik, T., Chabudziński, Ł., Dobrowolski, R., Grzegorczyk, I., Jodłowski, M., Kistowski, M., Kot, R., Krąż, P., Lechnio, J., Macias, A., Majchrowska, A., Malinowska, E., Migoń, P., Myga-Piątek, U., Nita, J., Papińska, E., Rodzik, J., Strzyż, M., Terpiłowski, S., Ziaja, W., 2018. Physico-geographical mesoregions of poland: Verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data. *Geographia Polonica* 91, 143-170.

Stephens, L., Fuller, D., Boivin, N., Rick, T., Gauthier, N., Kay, A., Marwick, B., Armstrong, C.G., Barton, C.M., Denham, T., Douglass, K., Driver, J., Janz, L., Roberts, P., Rogers, J.D., Thakar, H., Altaweelel, M., Johnson, A.L., Sampietro Vattuone, M.M., Aldenderfer, M., Archila, S., Artioli, G., Bale, M.T., Beach, T., Borrell, F., Braje, T., Buckland, P.I., Jiménez Cano, N.G., Capriles, J.M., Diez Castillo, A., Çilingiroğlu, Ç., Negus Cleary, M., Conolly, J., Coutros, P.R., Covey, R.A., Cremaschi, M., Crowther, A., Der, L., di Lernia, S., Doershuk, J.F., Doolittle, W.E., Edwards, K.J., Erlandson, J.M., Evans, D., Fairbairn, A., Faulkner, P., Feinman, G., Fernandes, R., Fitzpatrick, S.M., Fyfe, R., Garcea, E., Goldstein, S., Goodman, R.C., Dalpoim Guedes, J., Herrmann, J., Hiscock, P., Hommel, P., Horsburgh, K.A., Hritz, C., Ives, J.W., Junno, A., Kahn, J.G., Kaufman, B., Kearns, C., Kidder, T.R., Lanoë, F., Lawrence, D., Lee, G.-A., Levin, M.J., Lindskaug, H.B., López-Sáez, J.A., Macrae, S., Marchant, R., Marston, J.M., McClure, S., McCoy, M.D., Miller, A.V., Morrison, M., Motuzaitė Matuzeviciute, G., Müller, J., Nayak, A., Noerwidi, S., Peres, T.M., Peterson, C.E., Proctor, L., Randall, A.R., Renette, S., Robbins Schug, G., Ryzewski, K., Saini, R., Scheinsohn, V., Schmidt, P., Sebillaud, P., Seitsonen, O., Simpson, I.A., Sołtysiak, A., Speakman, R.J., Spengler, R.N., Steffen, M.L., Storozum, M.J., Strickland, K.M., Thompson, J., Thurston, T.L., Ulm, S., Ustunkaya, M.C., Welker, M.H., West, C., Williams, P.R., Wright, D.K., Wright, N., Zahir, M., Zerboni, A., Beaudoin, E., Munevar Garcia, S., Powell, J., Thornton, A., Kaplan, J.O., Gaillard, M.-J., Klein Goldewijk, K., Ellis, E., 2019. Archaeological assessment reveals Earth's early transformation through land use. *Science* 365, 897.

Stępnik, T., 1996. Średniowieczne wyroby drewniane z Ostrowa Lednickiego - analiza surowcowa. *Studia Lednickie* 4, 261-296.

Szabó, P., 2005. Woodland and forests in medieval Hungary. Archaeopress, Oxford, 2005.
Tinner, W., Hu, F.S., 2003. Size parameters, size-class distribution and area-number relationship of microscopic charcoal: relevance for fire reconstruction. *The Holocene* 13, 499-505.

Tobolski, K., 1990. Paläökologische Untersuchungen des Siedlungsgebietes im Lednica Landschaftspark (Nordwestpolen). *Offa* 47, 109–131.

Tobolski, K., 1991. Dotychczasowy stan badań paleobotanicznych i biostratigraficznych Lednickiego Parku Krajobrazowego, [w] Tobolski, K. (Edytor), Wstęp do paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań.

Trzeciecki, M., 2016. The emergence of the territorial state, [w] Urbańczyk, P., Trzeciecki, M. (Edytor), The Past Societies. Polish lands from the first evidence of human presence to the Early Middle Ages. The Institute of Archaeology and Ethnology, Polish Academy of Sciences, Warsaw, 277-341.

Wacnik, A., Tylmann, W., Bonk, A., Goslar, T., Enters, D., Meyer-Jacob, C., Grosjean, M., 2016. Determining the responses of vegetation to natural processes and human impacts in north-eastern Poland during the last millennium: combined pollen, geochemical and historical data. *Vegetation History and Archaeobotany* 25, 479-498.

Walanus, A., Goslar, T., 2009. Datowanie Radiowęglowe. Wydawnictwo AGH.

Whitlock, C., Larsen, C., 2001. Charcoal as a Fire Proxy, [w] Smol, J.P., Birks, H.J.B., Last, W.M., Bradley, R.S., Alverson, K. (Edytor), Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators. Springer Netherlands, Dordrecht, 75-97.

Yeloff, D., van Geel, B., 2007. Abandonment of farmland and vegetation succession following the Eurasian plague pandemic of ad 1347?52. *Journal of Biogeography* 34, 575-582.

Związek, T., 2022. Las, Krajobrazy szesnastowiecznej Polski, las – ziemia – woda – ruda darniowa Powiat kaliski i Wielkopolska w tle. Instytut Historii PAN, Warszawa, 27-70.

**KOPIE ARTYKUŁÓW NAUKOWYCH WCHODZĄCYCH
W SKŁAD ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

PIERWSZY ARTYKUŁ

Czerwiński, S., Marcisz, K., Wacnik, A., Lamentowicz, M., 2022. Synthesis of palaeoecological data from the Polish Lowlands suggests heterogeneous patterns of old-growth forest loss after the Migration Period. *Scientific Reports*, 12, 8559, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12241-1>



OPEN

Synthesis of palaeoecological data from the Polish Lowlands suggests heterogeneous patterns of old-growth forest loss after the Migration Period

Sambor Czerwiński^{1,2}✉, Katarzyna Marcisz¹, Agnieszka Wacnik³ & Mariusz Lamentowicz¹

Human impact on Central European forests dates back thousands of years. In this study we reanalyzed 36 published pollen data sets with robust chronologies from Polish Lowlands to determine the patterns of large-scale forest decline after the Migration Period (fourth to sixth century CE). The study revealed substantial heterogeneity in the old-growth forest decline patterns. Using new high-resolution studies, we could better understand the timing of this transition related to increasing economic development. After the Migration Period, forest expansion continued until the seventh to ninth centuries cal. CE, when the dawn of Slavic culture resulted in large-scale forest decline, especially in north-western and north-central Poland. Later, forest decline was recorded mainly in north-eastern Poland and was related to Prussian settlements, including activities associated with the Teutonic Order, as well as with new settlements from the fourteenth century. The composite picture shows a varied spatio-temporal forest loss and transition towards the present-day, human activity dominated landscapes. However, some sites, such as in north-eastern Poland, are characterized by a less abrupt critical transition. The pristine nature of the oak-hornbeam forest had already been destroyed in Early Medieval times (eighth to ninth centuries cal. CE) and the potential for recovery was largely lost. Our study has confirmed previous assumptions that the decline of hornbeam across the Polish Lowlands may be an early indicator of local settlement processes, preceding severe forest loss, and establishment of permanent agriculture.

Human impact has been identified as one of the primary drivers of changes in temperate forest cover in Central Europe during the Holocene^{1–8}. In general, the greater the human pressure in the temperate forest zone, the smaller the forest area^{5,9,10}. However, in some instances, sudden events associated with climate and socioeconomic transitions, often caused by warfare and/or epidemics, have resulted in restricted impact of human activity on vegetation^{11–14}. The Migration Period (MP) was, without a doubt, the last such large-scale event in Central Europe¹¹. In addition to political and ethnic transformations in Europe^{11,15,16}, it was a period of brief respite for the vegetation, especially in Central Europe^{17–20}. Within Poland, this period is assumed to have lasted from the second half of the fourth century until the beginning of the sixth century CE (from this moment, CE should be assumed where the era is not indicated). Still, its range and chronology are inferred from limited archaeological finds²¹. Palynological data revealed that the forest started to grow on fallow and abandoned pastures across the Polish Lowlands during the MP cf.^{22–24}. This forest regeneration was characterized by a spread of European hornbeam (*Carpinus betulus*) and common beech (*Fagus sylvatica*, mainly in NW Poland). The regenerated forest was then probably gradually exploited by new Slavic societies from the east, western Ukraine and southern Belarus. They started to colonize the ‘empty’ landscape and thus renewed forest clearances^{25,26}. However, until ca. fifteenth century, the north-eastern part of the Polish Lowlands was occupied by diverse Baltic tribes (mostly Old Prussians, Galindians, and Yotvingians), who slowly moved eastwards mainly under the pressure of the Teutonic State and were finally conquered^{27–30}. To trace the changes in vegetation cover and the process of forest

¹Climate Change Ecology Research Unit, Faculty of Geographical and Geological Sciences, Adam Mickiewicz University, Bogumiła Krygowskiego 10, 61-680 Poznań, Poland. ²Max Planck Institute for the Science of Human History, Kahlaische Strasse 10, 07745 Jena, Germany. ³W. Szafer Institute of Botany Polish Academy of Sciences, Lubicz 46, 31-512 Kraków, Poland. ✉email: sambor.czerwinski@amu.edu.pl

exploitation in time and space, connected with human settlement, across the Polish Lowlands during the last 1500 years, it is now opportune to complement the existing knowledge with novel high-resolution palaeoecological studies that have recently become available.

Ralska-Jasiewiczowa³¹ pointed out that the presence and retreat of hornbeam forests were linked to intensive farming. Later, it was noticed that the local history of human settlement and the associated economy were the main reasons for the persistence of hornbeam across northern and central Poland²⁴. Although previous studies have indicated the issue of hornbeam expansion during the MP, these did not focus on the precise duration of the process and the subsequent decline of certain species^{24,32}. Noryśkiewicz³² reported that hornbeam-dominated forests in Chełmno Land (central-northern Poland) developed between the phases of increased human activity, namely between the Roman and Early Medieval periods. According to Makohonienko²³, the hornbeam can be regarded as a species that accurately represents the scale of human-made clearings and transformation of Polish forests during the last 2500 years.

As pointed out above, hornbeam, as reflected in pollen diagrams, can be a most helpful indicator for tracking forest transformation, especially during the Early Medieval period due to its sensitivity to human impact. Since the influential work by Ralska-Jasiewiczowa et al.³³, who described plant migration patterns in Poland based on isopollen maps, many records from Polish Lowlands supported by reliable chronologies, have been published. Isopollen maps, despite including many sites were designed in 500-years intervals, which is an insufficient resolution to precisely estimate the timing of regeneration and decline of the natural (or quasi-natural) forests during the Early Medieval and later times. Although several publications which describe the anthropogenic transformation of forests is available^{5,8,33}, a concise regional summary of the spatial distribution pattern of the Early Medieval forest decline in the Polish Lowlands is lacking²⁰.

To fill this gap, we summarized 36 pollen profiles with reliable chronologies based on radiocarbon dating and spanning the period of regeneration of oak-hornbeam (and beech) forest during the MP and its further retreat. We hypothesize that the diverse development of past societies after the MP on the Polish Lowlands was the main driver of asynchronous forest loss. Such deforestations are distinctly recorded in the pollen records of oak (*Quercus*), beech (*Fagus sylvatica*) and especially hornbeam (*Carpinus betulus*) in the central and north-western Poland as well as spruce (*Picea abies*) in north-eastern Poland^{22,24,34–38}. As clearly as the available data permit, we aim to delineate the spatio-temporal trends of Early Medieval forest regeneration and subsequent decline on the Polish Lowlands where the availability of many records enables these trends to be investigated.

Study area

The studied area, i.e. the Polish Lowlands, refers to the Polish part of the central European plain, which extends from central Poland to the Baltic coast (Fig. 1). Most of the area was glaciated during the last glaciation (late Weichselian), ca. 24,000 years ago³⁹. However, three sites, i.e., Białowieża 131C and 340G, and Żabieniec are located shortly to the south of the Last Glacial Maximum (LGM) limits. The Polish Lowlands include many lakes and wetlands, making possible the construction of high-resolution palynological records in this part of Poland.

The climate is transitional between oceanic and continental influences⁴⁰. A continental climate characterizes the north-eastern part. Accordingly, it has a greater abundance of coniferous tree species, including *Pinus sylvestris* and *Picea abies*, while the north-western part is characterized by oceanic air masses favouring *Fagus sylvatica*^{41,42}. The western and north-central areas are dominated mainly by oak-hornbeam forests⁴³. The present vegetation cover is a result of previous transformations; forestry practices played a significant role and promoted the planting of *P. sylvestris*, which is now the most abundant species across the Polish Lowlands^{44,45}.

Results and discussion

Spatial and temporal distribution of large-scale forest decline across the Polish Lowlands after the Migration Period. The overwhelming majority of the sites across the Polish Lowlands (30 out of 32 studied sites, 34 out of 36 pollen profiles) experienced forest decline after the MP (ca. 360–510). A decline of *C. betulus* percentages was recorded in 34 of the 36 analyzed profiles, while *F. sylvatica* declined at five sites and *P. abies* at three sites (Figs. 2 and 3). On the other hand, the decline of *Quercus* was recorded at eighth sites, which was also accompanied by the decline in other tree species (Fig. 3).

The forest decline was time-consistent in north-western Poland (western Pomerania), where the process took place in the eight to ninth centuries (Figs. 1 and 2)^{20,22,46}.

In contrast, western Poland revealed asynchronous decline ranging from the eleventh and fourteenth centuries^{47,48}. However, only a few high-resolution studies covering the last 1500 years are available in this region (Fig. 1).

Forest loss started in the seventh century in north-central Poland (Figs. 1, 2 and 3). In this region, in the 16 sites hornbeam was the tree taxon representing the first phase of deforestation (Figs. 1 and 3). Pollen data from the Żabieniec peatland and Lake Gościąż show that, in central Poland, anthropogenic deforestation began as early as the eighth-ninth century^{24,49,50}. Data from other parts of this region further to the north, where several fine-resolution profiles are available, show a consistent palynological signature of forest decline, recorded mainly from the seventh to ninth centuries (Figs. 1, 2, and 3). Late local settlement intensification was probably the reason why the two of the sites from north-central Poland recorded a decline during the 13th–14th centuries and do not follow the regional pattern^{34,37} (Figs. 1, 2 and 3). As documented by the data from the Polish Lowlands, the beech optimum occurs mainly after the human-induced hornbeam deforestation^{36,46,51,52}, which appears to be related to the selective logging of hornbeam and oak and which facilitated the expansion of beech. During these times in Poland *Quercus* was widely favored for various constructions^{53–55}, whereas *C. betulus* was used mainly as firewood⁵³.

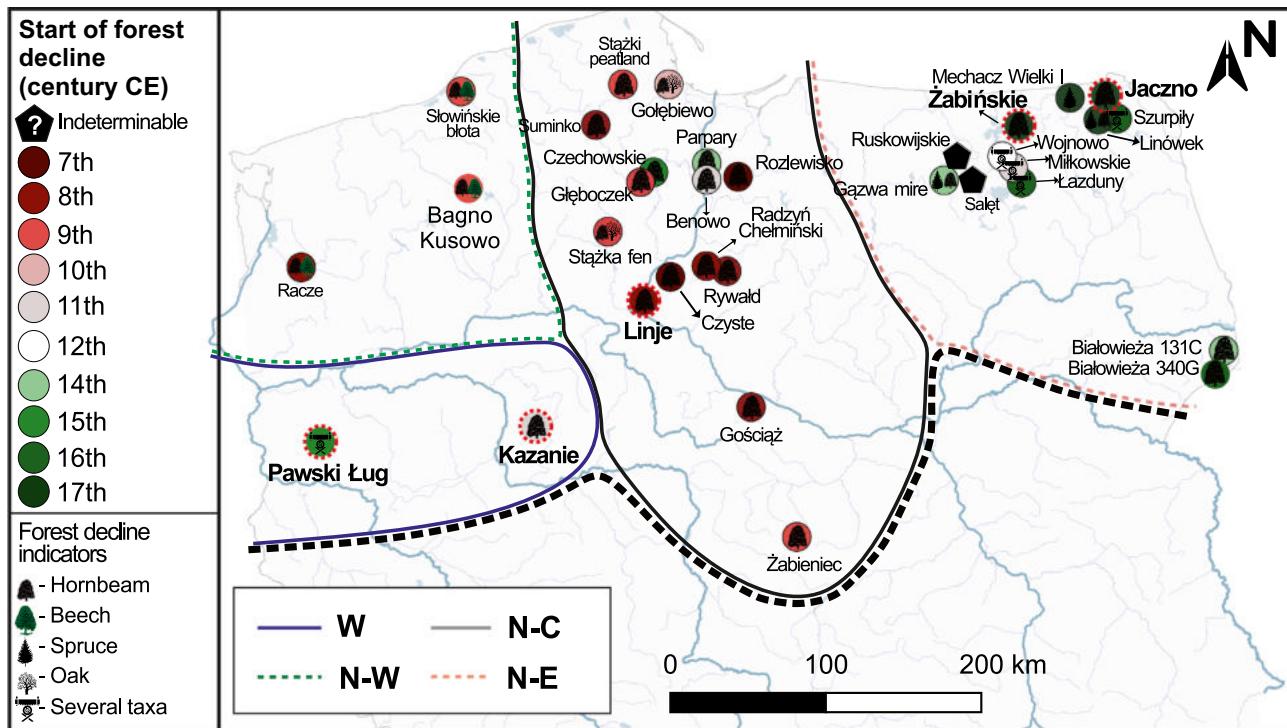


Figure 1. Geographical distribution of sites from the Polish Lowlands representing the beginning of forest decline after ca. 500 cal. CE and indicators of decline. The relevant publications are listed in Table 1. High-resolution data from the sites marked with red dashed circles are presented in Fig. 4. Abbreviations for simplified names of geographic regions used in the text: W—western, N-W—north-western, N-C—north-central, N-E—north-eastern. A black broken line indicates the southern limit of the study area. Map constructed by SC with QGIS 3.16.0 'Hannover' (<https://qgis.org/en/site/index.html>) and Corel Draw x8 (<https://www.coreldraw.com/en/>).

In north-eastern Poland, two clusters of sites show diverse temporal patterns of forest eradication. *P. abies* showed signs of forest decline at three sites (Figs. 1 and 3). The sites at the north-eastern border of Poland recorded a surprisingly consistent decline pattern during the 16th–17th centuries^{38,55–59}. In contrast the remaining sites document pollen-inferred forest decline during (at least) the 10th–16th centuries (Figs. 1 and 3). For the Ruskowijskie site, the timing of the decline of the various tree species is unknown as there are no pollen data available older than ca. 1000⁶⁰. Only Lake Sałt provides a record of continuous impact by human activity, dating from ca. 2500 years and extending to at least the end of the eight century, which was probably related to favorable local settlement conditions^{60,61}. Human transformations and clearance of local woodlands were registered from the 11th/12th century in lakes Miłkowskie and Wojnowo located in one of the settlement microregions. These changes can be related to the activities of the Prussian Galinditae people³⁵. The sites in Białowieża Forest recorded a forest decline during the 14th–16th centuries (Figs. 1 and 3).

Diverse spatiotemporal features of human-induced old-growth forest decline deduced from pollen profiles. The summary of pollen records reveals that the north-central and north-western parts of Poland in particular, experienced the widespread expansion of forests dominated by hornbeam and sometimes beech between 600 and 800, i.e. at least a hundred years after the end of the MP (ca. 360–510) in Poland (Supplementary Information, Fig. S1). This expansion ends mainly during the interval 800–1000 (Fig. 2). The forests at the time of human interference soon after the MP could be considered at least as old-growth forests⁷³. Kołaczek et al.⁷⁶ showed that the hornbeam optimum was reached ca. 300 years after the decrease of agricultural activity, which points to low a level or indeed lack of human activity that facilitated the expansion of the natural forest. In these regions, the regeneration phase lasted up to several hundred years. This also implies that the scale of human abandonment was of long duration.

The subsequent decline in most of the Polish Lowlands corresponds with the dawn of new societies that gave rise to an early Slavic culture²⁵. The few available historical documents indicate that Slavic settlement on Polish lands began as early as the fifth-sixth centuries⁷⁷. This impact has likely gone unrecorded by the high-resolution palynological data due to the dispersed nature of settlement or absence of settlement. According to archaeological data, the settlement of the early Slavic tribal structures expanded several hundred years later, probably in the eighth-ninth centuries⁷⁵. From the eighth to early tenth centuries, Early Medieval strongholds were rapidly established in the western region of the Slavic domain^{25,76,77}. This is in line with both the time of the hornbeam and beech expansion after the MP and its abrupt decline during the eighth-tenth centuries (Figs. 1, 2 and 3). Since the beginning of the Medieval Period in Poland (early Slavic phase), there had been a gradual increase in

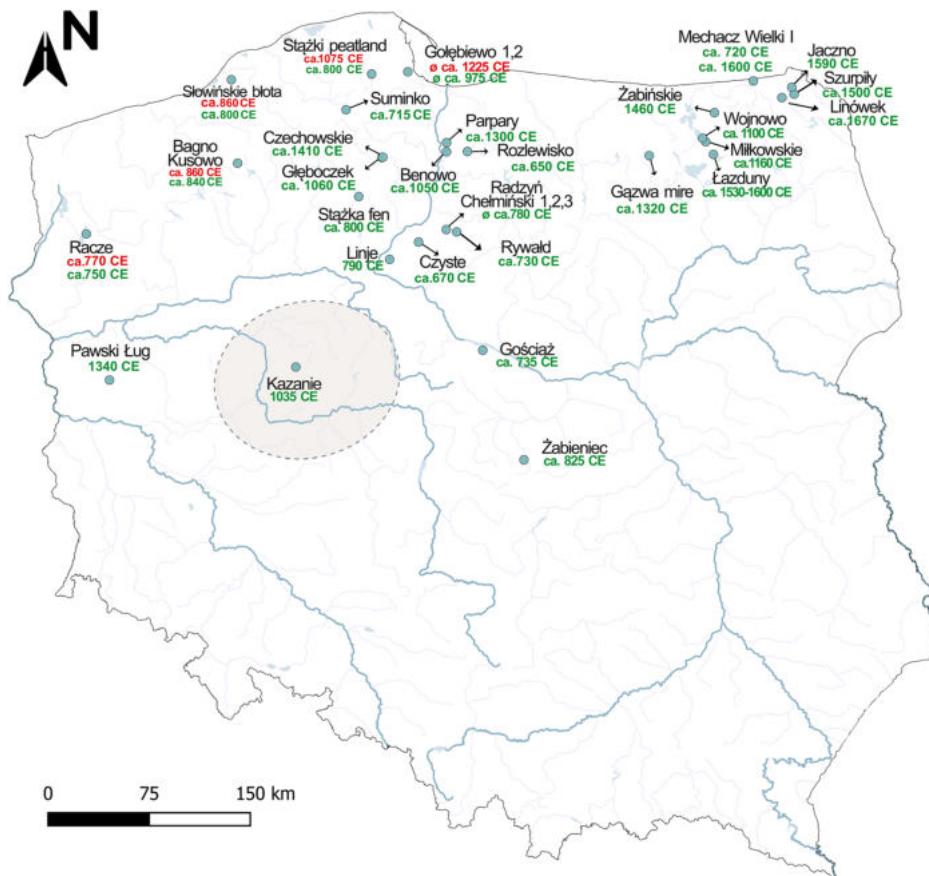


Figure 2. Geographical distribution of sites from the date at which *Carpinus betulus* (green) and *Fagus sylvatica* (red) peaked before decline commenced during the last 1500 years. The area enclosed by a dashed circles indicates the Greater Poland region. Map constructed by SC with QGIS 3.16.0 'Hannover' (<https://qgis.org/en/site/index.html>) and Corel Draw x8 (<https://www.coreldraw.com/en/>).

human activity in north-central and north-western Poland. The decline of hornbeam mostly coincided with the rise in agricultural and pastoral activity^{22,24,34,37,51,64}.

Due to its high calorific value, low utility value for tool production or construction⁵³, and occurrence on fertile habitats preferred for cultivation^{78,79}, hornbeam was probably the main tree cut by past societies inhabiting the Polish Lowlands (Figs. 1, 2 and 3). The sites that had the highest abundance of hornbeam experienced its fastest decline (mostly during the seventh–eighth centuries), e.g.: Gościąż, Rywałd, Radzyń Chełmiński, Benowo or Rozlewisko. (Figs. 2 and 3). Moreover, the hornbeam forest decline in north-central Poland was not accompanied by a corresponding decline in other main forest-forming taxa (Fig. 3). This supports the idea that the hornbeam-dominated forests that now occupied the most fertile soils were deforested first because they provided readily accessible material for heating and were highly suitable for farming^{34,67}.

Timber was the primary material used in the construction of Early Medieval strongholds in Poland⁷⁷. Due to its mechanical properties, oak was mainly used for this purpose^{56,57}. In this context, it is worth noting that the abrupt decline of *Quercus* before the eleventh century is recorded in only three sites (Fig. 3). This may signify that, in contrast to hornbeam, oak was conserved as a valuable source of timber. This is supported by pollen data collected from Pawska Ług, Kazanie, and Linje (Fig. 4). In these sites, a rapid decrease of the *Quercus* curve occurs after the sixteenth century, which is several hundred years later than the decrease in the *C. betulus* pollen curve. Livestock grazing, especially pigs in oak and beech woodlands, was common in Poland during the Middle Ages up to early 19th century^{44,80}.

In contrast to *C. betulus*, *Quercus* pollen representation remains steady until the end of early modern times (18th century). It may imply that these woodlands (mainly oak; possibly woodland pastures) continued to function despite the increasing economic activity, manifested by the increases of human impact curves in these sites, especially from the 13th–14th centuries onwards (Fig. 4). Pollen curves for *Quercus* (in these three sites) and *F. sylvatica* (in Kazanie mire) do not appear to respond to livestock grazing in woodland pastures, which was widely practiced during the Medieval times throughout Europe^{81–83}, including Poland⁸⁴ because woodland pasture did not impinge on overall pollen production by these trees.

Based on a comparison of modern pollen spectra with fossil pollen data, Tobolski⁸⁷ concluded that the old-growth hornbeam forests had no analogues in the present-day oak-hornbeam forests (*Querco-Carpinetum*). In

Site name	Type	Forest decline indicators	Chronological distribution [centuries, CE]										
			7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Salęt	Lake	Continuous human impact from ca. 500 BCE											
Radzyń Chełmiński III	Lake	<i>C. betulus</i> decline in the period of ca. 650-750 CE											
Rozlewisko	Lake	<i>C. betulus</i> decline in the period of ca. 650-800 CE											
Czyste	Lake	<i>C. betulus</i> decline in the period of ca. 670-900 CE											
Radzyń Chełmiński II	Lake	<i>C. betulus</i> decline in the period of ca. 700-800 CE											
Radzyn Chełmiński I	Lake	<i>C. betulus</i> decline in the period of ca. 700-850 CE											
Suminko	Lake	<i>C. betulus</i> decline after the ca. 715 CE followed by <i>F. sylvatica</i> spread											
Rywąd	Lake	<i>C. betulus</i> decline in the period of ca. 730-850 CE											
Gościąż G1/87	Lake	<i>C. betulus</i> decline in the period of ca. 735-800 CE											
Racze	Lake	<i>C. betulus</i> and <i>F. sylvatica</i> decline in the period of ca. 750-800 CE											
Linje	Peatland	<i>C. betulus</i> decline in the ca. 790 CE											
Stążki mire 1	Peatland	<i>C. betulus</i> decline after the ca. 800 CE followed by <i>F. sylvatica</i> spread											
Stążka fen	Peatland	<i>C. betulus</i> and <i>Quercus</i> decline in the period of ca. 800-880 CE											
Słowińskie błota	Peatland	<i>Alnus</i> , <i>C. betulus</i> and <i>F. sylvatica</i> decline in the period of ca. 800-890 CE											
Żabieniec	Peatland	<i>C. betulus</i> decline in the ca. 825-900 CE											
Bagni Kusowo	Peatland	<i>C. betulus</i> and <i>F. sylvatica</i> decline in the ca. 840-880 CE											
Głęboczek	Peatland	<i>C. betulus</i> decline in the ca. 890 CE											
Golebiewo II	Peatland	<i>C. betulus</i> and <i>Quercus</i> decline in the period of ca. 975-1050 CE											
Golebiewo I	Peatland	followed by <i>F. sylvatica</i> spread											?
Ruskowiejskie	Lake	Deforestation before 1000 CE											?
Kazanie	Peatland	<i>C. betulus</i> decline in the ca. 1035 CE											
Benowo	Lake	<i>Alnus</i> , <i>C. betulus</i> decline in the period of ca. 1050-1150 CE											
Miłkowskie	Lake	Decline of <i>Alnus</i> , <i>Betula</i> , <i>Larix</i> , <i>Quercus</i> and <i>C. betulus</i> decline in the period of ca. 1060-1200 CE											
Wojnowo	Lake	Decline of <i>Pinus</i> , <i>Betula</i> , <i>Quercus</i> and <i>C. betulus</i> decline in the period of ca. 1100-1200 CE											
Parparty	Peatland	<i>C. betulus</i> decline in the period of ca. 1300-1370 CE											
Gązwa	Peatland	<i>P. abies</i> and <i>C. betulus</i> decline in the period of ca. 1300-1400 CE											
Białowieża 131C	Peatland	<i>C. betulus</i> decline after ca. 1330 CE											
Czechowskie	Lake	<i>C. betulus</i> decline in the ca. 1410 CE											
Pawski Ług	Peatland	<i>Alnus</i> , <i>Betula</i> , <i>Quercus</i> and <i>C. betulus</i> decline in the ca. 1410 CE											
Szurpity	Lake	<i>Quercus</i> and <i>C. betulus</i> decline in the period of ca. 1500-1600 CE											
Łazduny	Lake	<i>Pinus</i> , <i>Alnus</i> , <i>Betula</i> , <i>Quercus</i> and <i>C. betulus</i> decline in the period of ca. 1530-1600 CE											
Białowieża 340G	Peatland	<i>C. betulus</i> decline after ca. 1560 CE											?
Mechacz Wielki	Peatland	<i>P. abies</i> and <i>C. betulus</i> decline in the period of ca. 1600-1700 CE											
Żabińskie	Lake	<i>Alnus</i> , <i>Betula</i> , <i>C. betulus</i> and <i>Quercus</i> decline in the period of ca. 1600-1640 CE											
Jaczno	Peatland	<i>C. betulus</i> decline in the ca. 1620 CE											
Linówka II	Lake	<i>P. abies</i> and <i>C. betulus</i> decline in the period of ca. 1600-1700 CE											

Figure 3. Beginning of forest decline after the Migration Period as recorded at selected sites in the Polish Lowlands during the last 1500 years. Centuries are indicated as i.e. 801–900 CE. For details regarding the sites see Table 1.

Greater Poland, very high values of hornbeam pollen (including the last optimum phase attributed to MP) were recorded in several sites^{87–90}, reaching even as much as 50%⁸⁹. This indicates that the canopy layer of the regenerated forests was dominated by hornbeam. Modern pollen data collected from a small area (32.3 ha) in Greater Poland, which is dominated by oak-hornbeam forest give *Carpinus* values of only 11%⁸⁵. Similar results were obtained from trapping sites (a 12-year pollen monitoring program, Roztocze, south-eastern Poland) located 1–25 m from hornbeam trees. The average percentage values in the two sites were recorded at 11.7% and 2.8%, respectively⁹⁰. Tobolski⁸⁵ also compiled the percentage maxima of *C. betulus* in north-western Poland during the Holocene and selected two clusters of sites in central Greater Poland and Pomerania, respectively, characterized by the highest values. However, the chronology in these sites was based mainly on the palynology; e.g. peaks and declines of hornbeam. According to historical and archaeological data, the first structures of the Polish state were established in Greater Poland. However, except for the Kazanie site (which records the last ca. 1200 years)⁴⁸, high-resolution palynological data covering the last 1500 years are lacking in this region (Fig. 3). Such data are expected to reveal new insights into the environmental history of the beginnings of the Polish State, and so are highly desirable.

The data discussed above suggest that the key indicator/proxy of early Slavic expansion and economic growth is the phase of rapid deforestation (which mainly affected hornbeam) in Poland's north-western and north-central

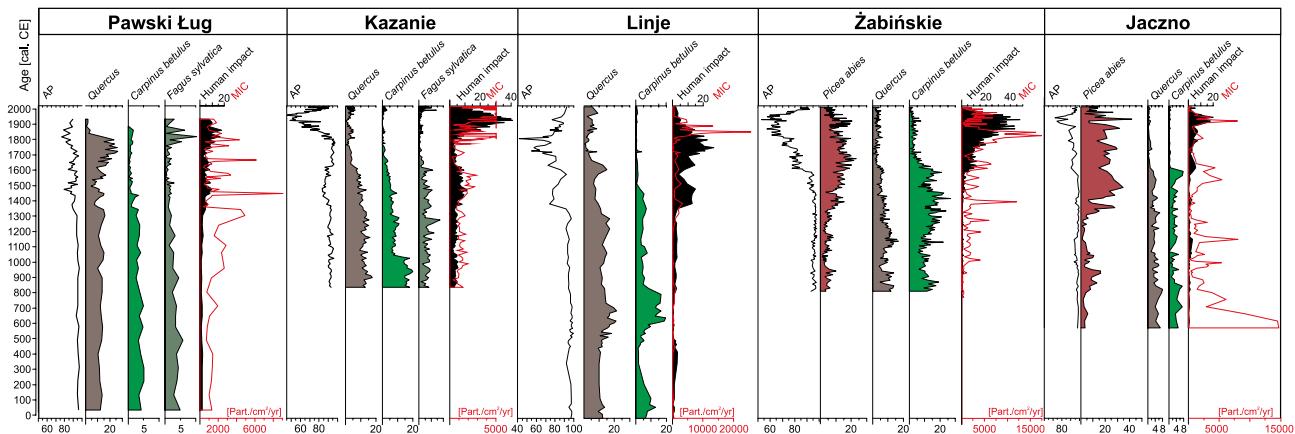


Figure 4. Simplified percentage pollen diagrams from five sites (with secure dating and high-resolution pollen data) located along north-western to north-eastern direction. Selected pollen taxa, composite pollen curves (AP and anthropogenic pollen indicators) and micro-charcoal influx (MIC) are shown.

areas that occurred between 800–1000. The loss of extensive natural forest areas during the Slavic expansion can be considered the beginning of the formation of anthroecosystems⁹, and involved processes that significantly accelerated with further development of state structures^{47,48}. This pattern, however, was delayed in the north-eastern area of modern-day Poland (formerly Prussia), most likely due to the presence of different types of settlements in the area, which points to a much later forest decline caused by Prussian tribes and, subsequently, by the Teutonic Order^{29,91–93}. Due to the generally weaker human influence in this region, the hornbeam optimum was also much later than in the area settled by the Slavs.

In the Polish Lowlands the disappearance of natural forests can also be attributed to influences other than the Slavic migration and expansion. One such area is the north-eastern region, in the Baltic settlement zone. Before the impact of the Teutonic Order, this territory was occupied by several tribes⁶⁰. Though many palynological records exist in these former Prussian lands, radiocarbon-dated profiles were only available from 12 sites until recently³⁵. Rapid progress in recent years has resulted in several fine-resolution pollen data sets based on robust chronology from this region (Fig. 2, Table 1). These studies shed light on the various deforestation processes during the last 1500 years. Some areas of the north-eastern region had already been cleared before the influence of the Teutonic Order. Substantial forest decline is recorded in lakes Ruskowijskie and Salęt before the tenth century, as well as in lakes Miltowskie and Wojnowo before the 11th/12th century (Figs. 1 and 3). These sites reflect the activity of the Prussian Galinditae tribe in two settlement micro-regions, as indicated by archaeological data^{27,60}. The subsequent, large-scale forest clearings in the Great Masurian Lake District, which were attributed to the economic activity and intensive colonization of the Prussian territory by the Teutonic Order, is recorded as late as the 17th century in Lake Łazduny and slightly later (since 1610) in Lake Żabińskie (Figs. 1 and 3). According to pollen data, the north-eastern edge of the former Prussian land (Suwalki Lake District) was the last to escape the effects of what was to become sustained economic expansion (Figs. 1 and 3). This region, which was primarily colonized by the Jotvingian Baltic tribe, was largely depopulated in the 13th century, due to the military campaign/crusade of the Teutonic Knights^{91–93}. Despite pollen data suggesting a minor impact of the Baltic tribes on the environment since the ninth century onward^{56,58}, the forest composition seems to be modulated by climatic factors, which is indirectly confirmed by the microcharcoal curves in the north-eastern edge of Poland (Fig. 4) as well as the simultaneous low representation of anthropogenic taxa. On the other hand, fires could have been caused by human activity, for example, to facilitate capturing animals. Microcharcoal data from Jaczno and Mechacz Wielki bogs, as well as Lake Żabińskie^{56,72,94,95}, suggest that during the Medieval Warm period (800–1300) higher fire frequency was probably one of the causes of the retreat of *P. abies* at the limit of its Polish Holocene distribution range⁹⁶. The most severe changes in this region were recorded as late as the 16th and 17th centuries and are reflected mainly in the decline of *C. betulus* and *P. abies*. The demise of these forests took place later because, for various reasons, they escaped excessive timber harvesting for long periods^{58,91}.

Although distinct traces of human activity were recorded by pollen data and attested to by archaeological data in the Białowieża Forest, which is considered the last primeval forest in Poland and one of the few such in Europe, human impact does not appear to have caused a break in forest cover continuity; indeed, the forest seems never to have been entirely cut^{70,97,98}. Forest clearances occurred in the fourteenth (site BIA/131C) and post-sixteenth centuries (site BIA/340G). However, determination of the spatial extent and duration is challenging due to the small size of the basins that were sampled so that their local pollen source areas are local, and the small number of radiocarbon dates, especially in the interval ca. 500–1500.

The problem of data aggregation. Specifics of the site versus general patterns. The temporal variations of pollen-inferred forest decline are determined by the degree of landscape transformations at local and also regional levels brought about by human activity and do not always display a uniform signal even among neighboring sites. For example, the sites located close to each other (those within a few square kilometers, such as Lake Salęt, Ruskowijskie, and Gązwa) exhibit completely different palaeoecological signals and hence different

Site name	Year of first publication	Resolution (years) ^a	Altitude (m a.s.l.)	Length of record (cm)		Radiocarbon dates (no. and type)	Other dating
				Complete profile	Last 1.5 ka years		
Salęć ^{60,61}	2014	ca. 24	129	430	ca. 195	6 (0, 2, 2), AMS	²¹⁰ Pb
Radzyń Chełmiński III ³⁴	2019	ca. 21	79	ca. 100	ca. 100	12 (1, 6, 5), bulk	
Rozlewisko ³⁴	2019	ca. 26	42	ca. 57	ca. 57	6 (0, 4, 2), bulk	
Czyste ^{20,32}	2013	ca. 40	73	ca. 260	ca. 140	6 (0, 1, 2), bulk	
Radzyń Chełmiński II ³⁴	2019	ca. 27	79	ca. 80	ca. 55	8 (0, 5, 1), bulk	
Radzyń Chełmiński I ^{34,62}	2019	ca. 20	79	104	104	11 (0, 7, 4), bulk	
Suminko ³⁶	2015	ca. 39	163	1050	ca. 230	13 (0,1,1), AMS	¹³⁷ Cs
Rywald ³⁴	2019	ca. 28	90	ca. 110	ca. 95	10 (1, 6, 2), bulk	
Gościaż G1/87 ^{24,49,63}	1998	ca. 55	64	1700	ca. 470	16 (0, 0, 0), bulk	Varvochronology
Racze ²⁰	2020	ca. 19	23	144	144	8 (0,3,1), AMS	
Linje ⁶⁴	2015	19	91	210	172	20 (9, 4, 5), AMS	²¹⁰ Pb
Stążki mire 1 ⁵²	2011	ca. 55	215	110	110	5 (2, 2, 1), AMS	
Stążka fen ^{65,66}	2012	ca. 14	100	110	110	8 (4, 1, 3), AMS	
Słowiańskie błota ⁴⁶	2009	12	29	100	100	10 (3, 2, 5),AMS	
Żabieniec ⁵⁰	2009	ca. 62	180	180	ca. 120	3 (0, 2, 1), AMS	
Bagno Kusowo ²²	2015	ca. 50	145	800	290	9 (0, 2, 1), AMS	
Głęboczek ⁶⁷	2019	100	137	400	ca. 110	44 (3, 2, 4), AMS	²¹⁰ Pb
Gołębiewo II ⁵¹	2016	ca. 62	125	235	ca. 127	7 (2, 1, 0), AMS	
Gołębiewo I ³⁶	2016	ca. 29	125	355	ca. 120	12 (1, 2, 0), AMS	
Ruskowijskie ⁶⁰	2016	ca. 27	142	40	40	3 (0, 1, 1), AMS	
Kazanie ⁴⁸	2021	7	100	171	171	18 (13, 4,1), AMS	²¹⁰ Pb
Benowo ³⁴	2019	ca. 20	52	ca. 90	ca. 90	14 (7, 4, 3), bulk	
Miłkowskie ³⁵	2012	ca. 65	125	ca. 1400	ca. 490	15 (0, 1, 2), AMS	
Wojnowo ^{35,68}	2012	ca. 40	115	ca. 1050	ca. 260	7 (0,1,1), AMS	
Parparzy ³⁴	2019	ca. 20	58	ca. 50	ca. 50	12 (3, 7, 1), bulk	
Gązwa ⁶⁹	2017	ca. 32	155	900	ca. 245	9 (1,1,1), AMS	
Białowieża 131C ⁷⁰	2015	ca. 26	164	ca. 73	ca. 72	5 (1, 1, 2), AMS	²¹⁰ Pb
Czechowskie ^{37,71}	2019	5	108	No data		21 (8, 6,4), AMS	Varvochronology, 1875 Askja tephra, ¹³⁷ Cs
Pawski Ług ⁴⁷	2020	24	122	400	330	39 (19, 7, 3), AMS	
Szurpily ⁵⁷	2019	48	183	ca.780	ca. 260	14 (2, 2, 1), AMS	Varvochronology, ²¹⁰ Pb, ¹³⁷ Cs
Łazduny ³⁵	2012	ca. 56	129	350	ca. 200	7 (2, 1, 0), AMS	
Białowieża 340G ⁷⁰	2015	ca. 31	156	ca. 74	ca. 47	4 (2, 0, 1), AMS	²¹⁰ Pb
Mechacz Wielki ⁵⁶	2017	ca. 18	190	550	ca. 420	9 (2, 2, 3), AMS	
Żabińskie ^{59,72}	2016	6	117	595	ca. 430	29 (12, 9, 2) AMS	Varvochronology
Jaczno ⁵⁸	2020	15	177	396	396	21 (8, 8, 5), AMS	
Linówka ³⁸	2014	ca. 32	200	700	ca. 240	2 (1,1,0), AMS	

Table 1. List of sites from the Polish Lowlands with pollen profiles used in this study. Sites are listed according to the chronology of forest decline. No. of ¹⁴C dates listed as follows; all dates in profile; dates (in parentheses) relating to intervals (CE timescale): 2–1.5 ka, 1.5–1 ka and 1–0.5 ka; and type of date, i.e. AMS or bulk sediment-derived. ^aResolution refers to the average temporal resolution samples from ca. 500 cal. CE.

times of forest decline (Figs. 1 and 3). A similar phenomenon is also observed at lakes Miłkowskie, Wojnowo and Łazduny (separated by up to several kilometres), where the beginning of permanent deforestation differs by several hundred years (Fig. 1). On the other hand, the local impact recorded in palaeoenvironmental reconstructions at Głęboczek peatland⁶⁷ and Lake Czechowskie³⁷ (5 km apart) may explain why two closely located sites in north-central Poland have a different pattern of forest decline. In the Głęboczek site, the decline of hornbeam-marked forest occurred in the early eleventh century and is probably associated with local Slavic society. At the same time, in Lake Czechowskie, which reflects the regional signal, the decline is recorded ca. 400 years later and is related to the economic intensification of the Teutonic Order linked with the development of towns in this area since the fourteenth century^{37,71}. The activity of the Teutonic Order is also associated with late forest eradication near the Parparzy site³⁴, which was recorded as late as the beginning of fourteenth century (Figs. 1 and 3). The

late pattern of forest decline observed at the other sites in this region may have resulted from differences in settlement history at the particular sites.

These considerations derived, simplistically, from differences between the sites (e.g. type of site, size, proximity to the settlements, orography and catchment) must be considered when formulating general findings on patterns of old-growth forest loss after the MP and should be brought to bear when interpreting palaeoecological record. Nevertheless, despite intrinsic differences between the sites, forest decline after the MP seems to be influenced mainly by the settlement processes of varying intensities. Taken together, it points to well defined patterns, such as hornbeam-marked deforestation and similar timing of forest decline in particular regions.

Methods

We selected 36 pollen profiles for our study from the Polish Lowlands. Mostly, we retrieved data from the authors and original publications. Only one of these sites was used in the history of vegetation in Poland based on isopollen maps³³. In the case of pollen diagrams for which numerical data are not available, the forest decline patterns were reconstructed based on careful visual study of published pollen diagrams (Table 1). Moreover, we also used a few sites from the Neotoma database⁶⁵ (Table 1, Supplementary Information; Table S1). The main criteria for palynological site selection were the availability of at least two ¹⁴C dates for the profile sections representing the last 1500 years or a varve-based chronology. In most of the sites (84.6% of the selected group) a minimum of two dates per millennium for Bayesian age-depth models, was fulfilled as recommended by Blaauw et al.⁹⁹. The chronologies for the selected parts of profiles followed original works. We chose sites where the temporal resolution of sampling is no higher than 70 years. However, we included the Głęboczek site (temporal resolution 100 years) because of its reliable chronology. In the case of Greater Poland, however, we include sites that do not fulfil the chronological criteria indicated above, because in this region the highest *Carpinus* pollen representation in the Polish Lowlands has been recorded⁸⁷ (Fig. 2, Supplementary Information; Fig. S1 and Table S1). Most of the sites used in this synthesis have records that extend back to before the MP but there are eight sites with records that do not go back more than 1500 years. Ages are cited in this paper as a calibrated year or century CE. Furthermore, we show a general pattern of forest expansion and its subsequent decline based on the location of sites along the west–east gradient.

Because of the different interpretations of percentage threshold values of regional importance¹⁰⁰, which is aim-dependent and/or related to site-specific features, we focused on the last pollen percentage maximum value (during the past 1500 years) of hornbeam and beech optimum to approximate the start of the forest decline (Supplementary Information; Fig. S2). We took into account sites where pollen percentage maxima exceeded 5%, i.e. values that suggesting the local presence of both taxa^{33,101}. The declines of the taxa mentioned above were considered only when a decrease of arboreal pollen (AP) was observed, so that bias arising solely from the compositional change of tree taxa is avoided. To provide a more comprehensive account of forest decline we have supplemented our descriptions with accounts of other arboreal taxa that revealed significant site-specific declines.

Conclusions

As far as we are aware, this is the first work that summarizes the spatio-temporal variation in post-Migration Period forest decline based on recent, mostly high-resolution palynological data in Central Europe. With reliable age-depth models, these records can be expected to add to our understanding of the specific details of the anthropogenic old-growth forest loss and its spatiotemporal patterns.

We show that human activity favoured the clearance of hornbeam in the first place, which is evidenced by its significant decline in most pollen profiles across the Polish Lowlands. This decline can be considered not only as a local marker for the beginning of a new settlement but also as indicative of an irreversible loss of natural forest. In most of the sites, particularly those in north-western and north-central Poland, the forest decline was probably related to the emergence of new early Slavic culture and Baltic tribes in its northeastern part.

Slavic culture is often described as primitive by academics⁷⁵. Nevertheless, the expeditious deforestation, which occurred mainly within as little as two centuries (800–1000) in north-western and north-central Poland might suggest rapid demographic and economic growth of societies that inhabited this area before establishing the earliest state structures dating to the tenth century.

The most recent human-made degradation of forests was recorded in north-eastern Poland, where the remnants of extensive old-growth forests now serve as poor but essential reminders of their former extent. Because of their uniqueness, resulting, among other things, from their longevity which gives unique insights into long-term ecological processes, we should make every possible effort to preserve them. However, there are no analogues of the pristine hornbeam-dominated forest in Poland, which underwent significant change as a result of widespread and severe deforestation in the Medieval period.

These massive deforestations in north-eastern Poland occurred in most sites no earlier than the fourteenth century. This implies that the time of forest clearance in individual sites varied by up to 900 years. This, in turn, is related to the settlement processes of varying intensities in different parts of the Polish Lowlands.

This work offers a promising application of palynological data, especially as it complements the limited archaeological knowledge of the early Medieval Period in the Polish Lowlands. For example, these data can be used to estimate the interval between the first evidence of newcomers, and the development and expansion of economic activities that led to abrupt and often major deforestations.

Received: 28 December 2021; Accepted: 4 May 2022

Published online: 20 May 2022

References

- Giesecke, T. *et al.* Towards mapping the late Quaternary vegetation change of Europe. *Veg. Hist. Archaeobot.* **23**, 75–86. <https://doi.org/10.1007/s00334-012-0390-y> (2013).
- Fyfe, R. M., Woodbridge, J. & Roberts, N. From forest to farmland: pollen-inferred land cover change across Europe using the pseudobiomization approach. *Glob. Chang. Biol.* **21**, 1197–1212. <https://doi.org/10.1111/gcb.12776> (2015).
- Gilliam, F. S. Forest ecosystems of temperate climatic regions: From ancient use to climate change. *New Phytol.* **212**, 871–887. <https://doi.org/10.1111/nph.14255> (2016).
- Jamrichová, E. *et al.* Human impact on open temperate woodlands during the middle Holocene in Central Europe. *Rev. Palaeobot. Palynol.* **245**, 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2017.06.002> (2017).
- Kaplan, J. O., Krumhardt, K. M. & Zimmermann, N. The prehistoric and preindustrial deforestation of Europe. *Quatern. Sci. Rev.* **28**, 3016–3034. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.09.028> (2009).
- Kalis, A. J., Merkt, J. & Wunderlich, J. Environmental changes during the Holocene climatic optimum in central Europe—human impact and natural causes. *Quatern. Sci. Rev.* **22**, 33–79. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(02\)00181-6](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(02)00181-6) (2003).
- Molinari, C. *et al.* Exploring potential drivers of European biomass burning over the Holocene: A data-model analysis. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **22**, 1248–1260. <https://doi.org/10.1111/geb.12090> (2013).
- Roberts, N. *et al.* Europe's lost forests: A pollen-based synthesis for the last 11,000 years. *Sci. Rep.* **8**, 716. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18646-7> (2018).
- Ellis, E. C. *et al.* People have shaped most of terrestrial nature for at least 12,000 years. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **118**. <https://doi.org/10.1073/pnas.2023483118> (2021).
- Ellis, E. C. Anthropogenic transformation of the terrestrial biosphere. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* **369**, 1010–1035. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0331> (2011).
- Drake, B. L. Changes in North Atlantic Oscillation drove Population Migrations and the Collapse of the Western Roman Empire. *Sci. Rep.* **7**, 1227. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01289-z> (2017).
- Enters, D., Dörfler, W. & Zolitschka, B. Historical soil erosion and land-use change during the last two millennia recorded in lake sediments of Frickenhauser See, northern Bavaria, central Germany. *The Holocene* **18**, 243–254. <https://doi.org/10.1177/0959683607086762> (2008).
- Haldon, J. *et al.* History meets palaeoscience: Consilience and collaboration in studying past societal responses to environmental change. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **115**, 3210–3218. <https://doi.org/10.1073/pnas.1716912115> (2018).
- Yeloff, D. & van Geel, B. Abandonment of farmland and vegetation succession following the Eurasian plague pandemic of ad 1347?52. *J. Biogeogr.* **34**, 575–582. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01674.x> (2007).
- Alt, K. W. *et al.* Lombards on the Move—An Integrative Study of the Migration Period Cemetery at Szólád Hungary. *PLoS ONE* **9**, e110793. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0110793> (2014).
- Pohl, W. in *Ethnicity as a Political Resource Conceptualizations across Disciplines, Regions, and Periods* (ed Resource« University of Cologne Forum »Ethnicity as a Political) 201–208 (Transcript Verlag, 2015).
- Dreibrodt, S. & Wiethold, J. Lake Belau and its catchment (northern Germany): A key archive of environmental history in northern central Europe since the onset of agriculture. *The Holocene* **25**, 296–322. <https://doi.org/10.1177/0959683614558648> (2014).
- Dreßler, M. *et al.* Environmental changes and the Migration Period in northern Germany as reflected in the sediments of Lake Dudinghausen. *Quatern. Res.* **66**, 25–37. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2006.02.007> (2017).
- Leuschner, C. & Ellenberg, H. in *Ecology of Central European Forests: Vegetation Ecology of Central Europe, Volume I* (eds Christoph Leuschner & Heinz Ellenberg) 31–116 (Springer International Publishing, 2017).
- Pędziszewska, A. *et al.* in *The Migration Period between the Oder and the Vistula (2 vols)* (eds A. Bursche, H. John, & A. Zapolska) 137–198 (Brill, 2020).
- Mączyńska, M. in *The Migration Period between the Oder and the Vistula (2 vols)* (eds A. Bursche, H. John, & A. Zapolska) 201–224 (Brill, 2020).
- Lamentowicz, M. *et al.* Reconstructing climate change and ombrotrophic bog development during the last 4000years in northern Poland using biotic proxies, stable isotopes and trait-based approach. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **418**, 261–277. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.11.015> (2015).
- Makohonienko, M. in *Late Glacial and Holocene history of vegetation in Poland based on isopollen maps* (eds M. Ralska-Jasiewiczowa *et al.*) 411–416 (W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, 2004).
- Ralska-Jasiewiczowa, M., Nalepka, D. & Goslar, T. Some problems of forest transformation at the transition to the oligocratic/ Homo sapiens phase of the Holocene interglacial in northern lowlands of central Europe. *Veg. Hist. Archaeobot.* **12**, 233–247. <https://doi.org/10.1007/s00334-003-0021-8> (2003).
- Moździoch, M. in *The Past Societies. Polish lands from the first evidence of human presence to the Early Middle Ages Vol. 5: 500–1000 AD* (eds P. Urbańczyk & M. Trzeciecki) 123–167 (The Institute of Archaeology and Ethnology, Polish Academy of Sciences, 2016).
- Wołoszyn, M. in *The Migration Period between the Oder and the Vistula (2 vols)* (eds A. Bursche, H. John, & A. Zapolska) 84–136 (Brill, 2020).
- Karczewski, M. *Archeologia środowiska zachodniobaltyjskiego kręgu kulturowego na pojezierzach*. (Bogucki Wydawnictwo Naukowe, 2011).
- Nowakiewicz, T. in *The Past Societies. Polish lands from the first evidence of human presence to the Early Middle Ages* (eds P. Urbańczyk & M. Trzeciecki) 170–217 (The Institute of Archaeology and Ethnology, Polish Academy of Sciences, 2016).
- Okulicz-Kozaryn, Ł. *Dzieje Prusów* (Wydawnictwo Monografie FNP, 1997).
- Okulicz, J. *Osadnictwo ziem pruskich od czasów najdawniejszych do XIII wieku. Dzieje Warmii i Mazur w zarysie* (Polskie Wydawnictwo Naukowe, 1981).
- Ralska-Jasiewiczowa, M. Correlation between the Holocene history of the Carpinus betulus and prehistoric settlement in North Poland. *Acta Soc. Bot. Pol.* **33**, 461–468 (1964).
- Noryśkiewicz, A. M. *Historia roślinności i osadnictwa ziemi chełmińskiej w późnym holocenie. Studium palinologiczne*. (Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, 2013).
- Ralska-Jasiewiczowa, M. L., M. M. *et al.* *Late Glacial and Holocene history of vegetation in Poland based on isopollen maps*. (W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, 2004).
- Brown, A., Poska, A. & Pluskowski, A. The environmental impact of cultural change: Palynological and quantitative land cover reconstructions for the last two millennia in northern Poland. *Quatern. Int.* **522**, 38–54. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.05.014> (2019).
- Waćnik, A., Goslar, T. & Czernik, J. Vegetation changes caused by agricultural societies in the Great Mazurian Lake District. *Acta Palaeobotanica* **52**, 59–104 (2012).
- Pędziszewska, A. *et al.* Holocene environmental changes reflected by pollen, diatoms, and geochemistry of annually laminated sediments of Lake Suminko in the Kashubian Lake District (N Poland). *Rev. Palaeobot. Palynol.* **216**, 55–75. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2015.01.008> (2015).

37. Słowiński, M. *et al.* The role of Medieval road operation on cultural landscape transformation. *Sci. Rep.* **11**, 20876. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00090-3> (2021).
38. Gałka, M., Tobolski, K., Zawisza, E. & Goslar, T. Postglacial history of vegetation, human activity and lake-level changes at Jezioro Linówka in northeast Poland, based on multi-proxy data. *Veg. Hist. Archaeobotany* **23**, 123–152. <https://doi.org/10.1007/s00334-013-0401-7> (2013).
39. Marks, L. Timing of the Late Vistulian (Weichselian) glacial phases in Poland. *Quatern. Sci. Rev.* **44**, 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.08.008> (2012).
40. Woś, A. *Klimat Polski*. (Wydawnictwo Naukowe PWN, 1999).
41. Matuszkiewicz, W. *et al.* *Potential natural vegetation of Poland. General map 1:300 000*. (IGiPZ PAN, 1995).
42. Zając, A. & Zając, M. *Atlas rozmieszczenia roślin naczyniowych w Polsce. Distribution Atlas of Vascular Plants in Poland*. (Nakładem Pracowni Chorologii Komputerowej Instytutu Botaniki UJ, 2001).
43. Matuszkiewicz, J. M. & Solon, J. Przestrzenne zróżnicowanie i cechy charakterystyczne krajobrazów Polski w ujęciu geobotanicznym. *Problemy Ekologii Krajobrazu XL*, 85–101 (2015).
44. Broda, J. *Historia leśnictwa w Polsce*. (Wydaw. Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego, 2000).
45. Rozkrut, D. *et al.* *Statistical Yearbook of Forestry*. (Główny Urząd Statystyczny, 2020).
46. Lamentowicz, M. *et al.* Climate and human induced hydrological change since AD 800 in an ombrotrophic mire in Pomerania (N Poland) tracked by testate amoebae, macro-fossils, pollen and tree rings of pine. *Boreas* **38**, 214–229. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2008.00047.x> (2009).
47. Lamentowicz, M. *et al.* How Joannites' economy eradicated primeval forest and created anthroecosystems in medieval Central Europe. *Sci. Rep.* **10**, 18775. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75692-4> (2020).
48. Czerwiński, S. *et al.* Environmental implications of past socioeconomic events in Greater Poland during the last 1200 years. Synthesis of paleoecological and historical data. *Quatern. Sci. Rev.* **259**. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106902> (2021).
49. Ralska-Jasiewiczowa, M., van Geel, B. & Demsk, D. in *Lake Gościąż, central Poland: a monographic study. Part 1* (eds M. Ralska-Jasiewiczowa, T. Goslar, T. Madeyska, & L. Starkel) (W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, 1998).
50. Lamentowicz, M. *et al.* Multiproxy study of anthropogenic and climatic changes in the last two millennia from a small mire in central Poland. *Hydrobiologia* **631**, 213–230. <https://doi.org/10.1007/s10750-009-9812-y> (2009).
51. Pędziszewska, A. & Latalowa, M. Stand-scale reconstruction of late Holocene forest succession on the Gdańsk Upland (N. Poland) based on integrated palynological and macrofossil data from paired sites. *Veget. History Archaeobot.* **25**, 239–254. <https://doi.org/10.1007/s00334-015-0546-7> (2016).
52. Lamentowicz, M., Gałka, M., Pawlyta, J., Lamentowicz, Ł. G., Tomasz & Miotk-Szpiganiowicz, G. Climate change and human impact in the southern Baltic during the last millennium reconstructed from an ombrotrophic bog archive. *Studia Quaternaria* **28**, 3–16 (2011).
53. Cywa, K. Trees and shrubs used in medieval Poland for making everyday objects. *Veg. Hist. Archaeobotany* **27**, 111–136. <https://doi.org/10.1007/s00334-017-0644-9> (2018).
54. Dzieduszycki, W. Wykorzystywanie surowca drzewnego we wczesnośredniowiecznej i średniowiecznej Kruszwicy. *Kwartalnik Historii Kultury Materialnej*, 35–54 (1976).
55. Kara, M. & Przybył, M. Wczesnośredniowieczne grodzisko wkleśte w Bninie koło Poznania w świetle dotychczasowych ustaleń dendrochronologicznych. *Folia Praehistorica Posnaniensis* **10**, 255–268 (2003).
56. Gałka, M. *et al.* Unveiling exceptional Baltic bog ecohydrology, autogenic succession and climate change during the last 2000 years in CE Europe using replicate cores, multi-proxy data and functional traits of testate amoebae. *Quatern. Sci. Rev.* **156**, 90–106. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.11.034> (2017).
57. Kinder, M. *et al.* Holocene history of human impacts inferred from annually laminated sediments in Lake Szurpily, northeast Poland. *J. Paleolimnol.* **61**, 419–435. <https://doi.org/10.1007/s10933-019-00068-2> (2019).
58. Marcisz, K., Kofaczek, P., Gałka, M., Diaconu, A.-C. & Lamentowicz, M. Exceptional hydrological stability of a Sphagnum-dominated peatland over the late Holocene. *Quatern. Sci. Rev.* **231**, 106180. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106180> (2020).
59. Wacnik, A. *et al.* Determining the responses of vegetation to natural processes and human impacts in north-eastern Poland during the last millennium: Combined pollen, geochemical and historical data. *Veg. Hist. Archaeobotany* **25**, 479–498. <https://doi.org/10.1007/s00334-016-0565-z> (2016).
60. Szal, M., Kupryjanowicz, M., Tylmann, W. & Piotrowska, N. Was it 'terra desolata'? Conquering and colonizing the medieval Prussian wilderness in the context of climate change. *The Holocene* **27**, 465–480. <https://doi.org/10.1177/0959683616660167> (2016).
61. Szal, M., Kupryjanowicz, M., Wyczółkowski, M. & Tylmann, W. The Iron Age in the Mrągowo Lake District, Masuria, NE Poland: the Sałt settlement microregion as an example of long-lasting human impact on vegetation. *Veg. Hist. Archaeobotany* **23**, 419–437. <https://doi.org/10.1007/s00334-014-0465-z> (2014).
62. Brown, A. *et al.* The ecological impact of conquest and colonization on a medieval frontier landscape: Combined Palynological and geochemical analysis of lake sediments from Radzyń Chełmiński Northern Poland. *Geoarchaeology* **30**, 511–527. <https://doi.org/10.1002/gea.21525> (2015).
63. Williams, J. W. *et al.* The Neotoma Paleoecology Database, a multiproxy, international, community-curated data resource. *Quatern. Res.* **89**, 156–177. <https://doi.org/10.1017/qua.2017.105> (2018).
64. Marcisz, K. *et al.* Long-term hydrological dynamics and fire history over the last 2000 years in CE Europe reconstructed from a high-resolution peat archive. *Quatern. Sci. Rev.* **112**, 138–152. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.01.019> (2015).
65. Milecka, K., Gałka, M. & Lamentowicz, M. Regionalna i lokalna sukcesja roślinności w Dolinie Stążki na podstawie analizy pyłkowej. *Stud. Limnol. Telmatol.* **6**, 61–69 (2012).
66. Lamentowicz, M. *et al.* A 1300-year multi-proxy, high-resolution record from a rich fen in northern Poland: reconstructing hydrology, land use and climate change. *J. Quat. Sci.* **28**, 582–594. <https://doi.org/10.1002/jqs.2650> (2013).
67. Lamentowicz, M. *et al.* Always on the tipping point—A search for signals of past societies and related peatland ecosystem critical transitions during the last 6500 years in N Poland. *Quat. Sci. Rev.* **225**. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.105954> (2019).
68. Wacnik, A., Kupryjanowicz, M., Mueller-Bieniek, A., Karczewski, M. & Cywa, K. The environmental and cultural contexts of the late Iron Age and medieval settlement in the Mazurian Lake District, NE Poland: combined palaeobotanical and archaeological data. *Veg. Hist. Archaeobotany* **23**, 439–459. <https://doi.org/10.1007/s00334-014-0458-y> (2014).
69. Gałka, M. *et al.* Palaeoenvironmental changes in Central Europe (NE Poland) during the last 6200 years reconstructed from a high-resolution multi-proxy peat archive. *The Holocene* **25**, 421–434. <https://doi.org/10.1177/0959683614561887> (2014).
70. Latalowa, M., Zimny, M., Jędrzejewska, B. & Samoilik, T. in *Europe's Changing Woods and Forests: From Wildwood to Managed Landscapes* (eds K.J. Kirby & C. Watkins) Ch. 17, 243–263 (CAB International, 2015).
71. Słowiński, M. *et al.* Paleoeological and historical data as an important tool in ecosystem management. *J. Environ. Manage.* **236**, 755–768. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.002> (2019).
72. Żarczyński, M., Wacnik, A. & Tylmann, W. Tracing lake mixing and oxygenation regime using the Fe/Mn ratio in varved sediments: 2000 year-long record of human-induced changes from Lake Żabińskie (NE Poland). *Sci. Total Environ.* **657**, 585–596. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.078> (2019).

73. Wirth, C., Messier, C., Bergeron, Y., Frank, D. & Fankhänel, A. *Old-Growth Forest Definitions: a Pragmatic View*. 11–33 (Springer Berlin Heidelberg, 2009).
74. Kołaczek, P. M., K. et al. in *20th Congress of the International Union for Quaternary Research (INQUA)* (Dublin, Ireland, 2019).
75. Szmoniewski, B. S. in *The Past Societies. Polish lands from the first evidence of human presence to the Early Middle Ages*. Vol. 5: 500–1000 AD (eds P. Urbańczyk & M. Trzeciecki) 21–74 (The Institute of Archaeology and Ethnology, Polish Academy of Sciences, 2016).
76. Moździech, M., Chudziak, W. & Poleski, J. *Atlas grodzisk wczesnośredniowiecznych z obszaru Polski*, 2015.
77. Trzeciecki, M. in *The Past Societies. Polish lands from the first evidence of human presence to the Early Middle Ages*. Vol. 5: 500–1000 AD (eds P. Urbańczyk & M. Trzeciecki) 277–341 (The Institute of Archaeology and Ethnology, Polish Academy of Sciences, 2016).
78. Faliński, J. B. & Pawłaczyk, P. in *Grab zwyczajny – Carpinus betulus L. Nasze drzewa leśne, monografie popularnonaukowe* Vol. 9 (ed W. Bugała) 157–264 (Polska Akademia Nauk, Instytut Dendrologii, „Sorus”, 1993).
79. Sikkema, R., Caudullo, G. & de Rigo, D. in *European Atlas of Forest Tree Species* (eds J. San-Miguel-Ayanz et al.) (Publ. Off. EU, 2016).
80. Hensel, W. *Słowiańska Wczesnośredniowieczna. Zarys kultury materialnej*. (Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1987).
81. Jørgensen, D. Pigs and Pollards: Medieval insights for UK wood pasture restoration. *Sustainability* **5**, 387–399. <https://doi.org/10.3390/su5020387> (2013).
82. Plieninger, T. et al. Wood-pastures of Europe: Geographic coverage, social–ecological values, conservation management, and policy implications. *Biol. Cons.* **190**, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.05.014> (2015).
83. Watkins, A. Cattle grazing in the forest of arden in the later middle ages. *Agric. Hist. Rev.* **37**, 12–25 (1989).
84. Ładowski, S. *Dykcyonarz służący do poznania historyi naturalnej y różnych osobliwościach starożytności, które ciekawi w gabinetach znayduią* Vol. 2 (1783).
85. Tobolski, K. in *Wstęp do paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego* (ed K. Tobolski) (Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, 1991).
86. Litt, T. & Tobolski, K. in *Wstęp do paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego* (ed K. Tobolski) (1991).
87. Makohonenko, M. *Przyrodnicza historia Gniezna*. (Homini, 2000).
88. Makohonenko, M. in *Wstęp do paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego* (ed K. Tobolski) (Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, 1991).
89. Filbrandt, A. in *Wstęp do paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego* (ed K. Tobolski) (Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, 1991).
90. Pidek, I. A. *Carpinus betulus* pollen accumulation rates in Roztocze (SE Poland) in relation to presence of *Carpinus* in Ferdynandovian pollen diagrams. *Ecol. Quest.* **26**, 95–101 (2017).
91. Wiśniewski, J. in *Studia I Materiały Do Dziejów Suwalszczyzny* (ed J. Antoniewicz) 51–138 (Prace Białostockiego Towarzystwa Naukowego Nr 4, Białostockie Towarzystwo Naukowe, 1965).
92. Biskup, M. et al. *Państwo zakonu krzyżackiego w Prusach. Władza i społeczeństwo*. (Państwowe Wydawnictwo Naukowe PWN, 2008).
93. Pluskowski, A. *The archaeology of the Prussian Crusade: Holy War and colonisation*. (2012).
94. Marcisz, K. et al. Seasonal changes in Sphagnum peatland testate amoeba communities along a hydrological gradient. *Eur. J. Protistol.* **50**, 445–455. <https://doi.org/10.1016/j.ejop.2014.07.001> (2014).
95. Marcisz, K. et al. Fire activity and hydrological dynamics in the past 5700 years reconstructed from Sphagnum peatlands along the oceanic–continental climatic gradient in northern Poland. *Quatern. Sci. Rev.* **177**, 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.10.018> (2017).
96. Boratyńska, K. in *Biology and Ecology of Norway Spruce* (eds Mark G. Tjoelker, Adam Boratyński, & Włodzisław Bugała) 23–36 (Springer Netherlands, 2007).
97. Jaroszewicz, B. et al. Białowieża forest—a relic of the high naturalness of European forests. *Forests* **10**, 849. <https://doi.org/10.3390/f10100849> (2019).
98. Zimny, M., Latalowa, M. & Pędziżewska, A. *The Late-Holocene history of forests in the Strict Reserve of Białowieża National Park*. 29–59 (Białowieski Park Narodowy, 2017).
99. Blaauw, M., Christen, J. A., Bennett, K. D. & Reimer, P. J. Double the dates and go for Bayes—Impacts of model choice, dating density and quality on chronologies. *Quatern. Sci. Rev.* **188**, 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.03.032> (2018).
100. Lisitsyna, O. V., Giesecke, T. & Hicks, S. Exploring pollen percentage threshold values as an indication for the regional presence of major European trees. *Rev. Palaeobot. Palynol.* **166**, 311–324. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2011.06.004> (2011).
101. Huntley, B. & Birks, H. J. B. *An Atlas of past and present pollen maps for Europe: 0–13000 years ago*. (Cambridge University Press, 1983).

Acknowledgements

This study contributes to “The high quality doctoral program realized at the Faculty of Geographical and Geological Sciences of Adam Mickiewicz University in Poznań (No. POWR.03.02.00–00-I039/16)”. We would like to thank Piotr Kołaczek and Monika Karpińska-Kołaczek for the valuable comments which enabled us to improve the manuscript as well as Maurycy Żarczyński for sharing microcharcoal data from Lake Żabińskie.

Author contributions

S.C. designed the research. S.C. synthesized the pollen data, wrote the manuscript, and prepared all figures. M.L., K.M. and A.W. provided scientific mentorship. K.M., M.L. and A.W. provided data. All authors contributed to the writing with discussions and text corrections.

Funding

Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL. This work was realized in the framework of the National Program of Development of Humanities project (No. 2bH15015483). This research was supported by grant PSPB-013/2010 from Switzerland through the Swiss Contribution to the enlarged European Union, by the Scientific Exchange Programme from the Swiss Contribution to the New Member States of the European Union (Sciex-NMSch)—SCIEX Scholarship Found, project RE-FIRE 12.286, and by National Science Centre (Poland), grant 2015/17/B/ST10/01656. The cost of manuscript proofreading was covered thanks to the financial support received by the authors (Application no. 012/08/POB1/0024) from the Initiative of Excellence – Research University at Adam Mickiewicz University, Poznań, Poland. Research by A.W. was financially supported by the W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences as part of its statutory funds.

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Additional information

Supplementary Information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12241-1>.

Correspondence and requests for materials should be addressed to S.C.

Reprints and permissions information is available at www.nature.com/reprints.

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© The Author(s) 2022

Supplementary Information

Synthesis of palaeoecological data from the Polish Lowlands suggests heterogeneous patterns of old-growth forest loss after the Migration Period

Czerwiński et al.

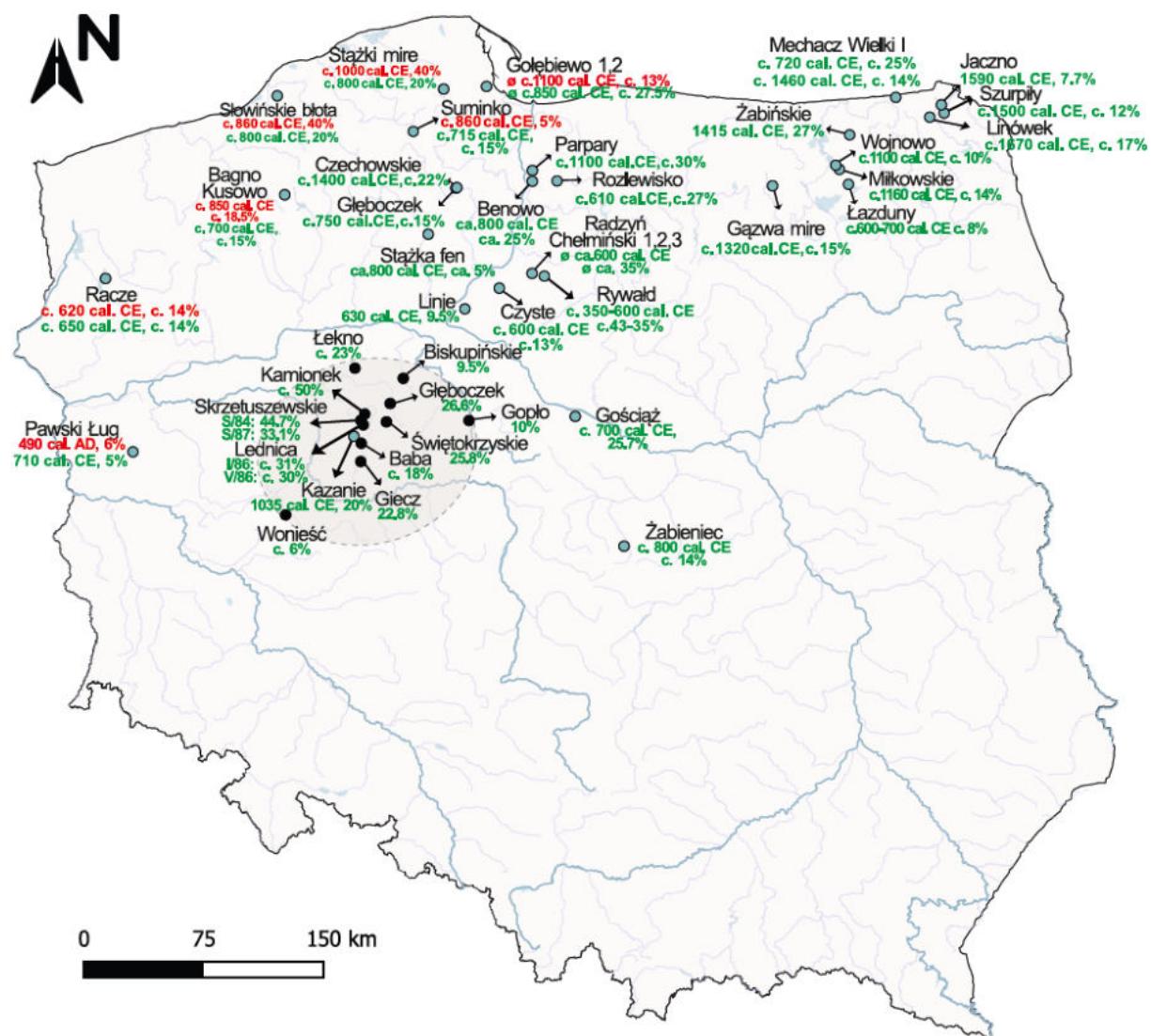


Fig. S1 Geographical distribution of sites from the Polish Lowlands showing the highest peak of *Carpinus betulus* (green) and *Fagus sylvatica* (red) pollen during the last 1500 years. The dashed circle indicates the sites from the Greater Poland region listed in Table S2. Map constructed by SC with QGIS 3.16.0 'Hannover' (<https://qgis.org/en/site/index.html>) and Corel Draw x8 (<https://www.coreldraw.com/en/>)

Table S1 References to sites from the Greater Poland region showing the highest peak of *Carpinus betulus* pollen during the last 1500 years

Site name	Citation
Kamionek	Filbrandt ¹
Lednica I/86	Makohonienko ² , Neotoma database
Lednica V/86	Litt and Tobolski ³ , Neotoma database
Głęboczek	Makohonienko ⁴ , Neotoma database
Świętokerzyskie	Makohonienko ⁴ , Neotoma database
Biskupińskie Lake	Noryśkiewicz ⁵ , Neotoma database
Skrzetuszewskie S/84	Tobolski ⁶ , Neotoma database
Skrzetuszewskie S/87	Tobolski ⁷ , Neotoma database
Baba	Milecka ⁸ , Neotoma database
Giecz 2/90	Milecka ⁹ , Neotoma database
Łekno	Milecka ¹⁰
Wonieść	Dörfler, et al. ¹¹

References:

- 1 Filbrandt, A. in *Wstęp do paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego* (ed K. Tobolski) (Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, 1991).
- 2 Makohonienko, M. in *Wstęp do paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego* (ed K. Tobolski) (Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, 1991).
- 3 Litt, T. & Tobolski, K. in *Wstęp do paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego* (ed K. Tobolski) (1991).
- 4 Makohonienko, M. *Przyrodnicza historia Gniezna*. (Homini, 2000).
- 5 Noryśkiewicz, B. in *Zarys zmian środowiska geograficznego okolic Biskupina pod wpływem czynników naturalnych i antropogenicznych w późnym glaciale i holocenie* (ed W. Niewiarowski) 147-179 (1995).
- 6 Tobolski, K. in *Wstęp do paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego* (ed K. Tobolski) (Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, 1991).
- 7 Tobolski, K. Paläökologische Untersuchungen des Siedlungsgebietes im Lednica Landschaftspark (Nordwestpolen). *Offa* **47**, 109–131 (1990).
- 8 Milecka, K. *Historia działalności człowieka w okolicach Gieczu i Wagowa w świetle analizy pyłkowej*. 43-95 (1998).
- 9 Milecka, K. in *Wstęp do paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego* (ed K. Tobolski) (Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, 1991).
- 10 Milecka, K. in *Mechanisms of anthropogenic changes of the plant cover* (eds B. Jackowiak & W. Żurkowski) (Bogucki - Wydaw. Naukowe, 2000).
- 11 Dörfler, W., Hildebrandt-Radke, I., Spychalski, W. & Lutyńska, M. *Zapis palinologiczny, litologiczny, geochemiczny i diatomologiczny regionalnych zmian*

użytkowania terenu w osadach jeziora Wonieś (Pojezierze Wielkopolskie). Vol. Tom V (Wydawnictwo Naukowe UAM, 2009).

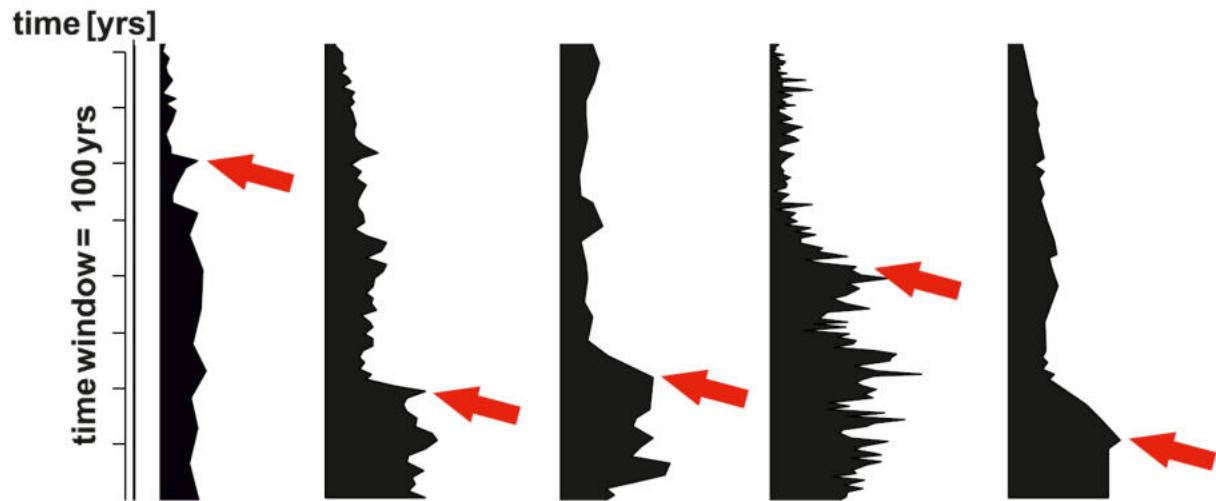


Fig. S2 Schematic examples of the most recent pollen percentage maximum value (red arrow), which were interpreted as forest decline. Minimum value before decline is 5%.

Table S2. List of taxa used for anthropogenic pollen indicators in Figure 4

<i>Agrostemma githago</i> , <i>Ambrosia</i> t., <i>Artemisia</i> , <i>Avena</i> t., <i>Brassicaceae</i> undiff., <i>Chenopodiaceae</i> , <i>Centaurea cyanus</i> , <i>Cerealia</i> undiff., <i>Convolvulus arvensis</i> , <i>Fagopyrum</i> , <i>Hordeum</i> t., <i>Linum usitatissimum</i> , <i>Phacelia tanacetifolia</i> , <i>Plantago major/major</i> , <i>Polygonum aviculare</i> t., <i>Rumex acetosa</i> t., <i>Rumex acetosella</i> t., <i>Rumex cf. obtusifolius</i> , <i>Plantago lanceolata</i> , <i>Triticum</i> t., <i>Secale cereale</i> , <i>Scleranthus annuus</i> , <i>Scleranthus perennis</i>
t. = type

DRUGI ARTYKUŁ

Czerwiński, S., Guzowski, P., Karpińska-Kołaczek, M., Lamentowicz, M., Gałka, M., Kołaczek, P., Izdebski, A., Poniat, R., 2020. Znaczenie wspólnych badań historycznych i paleoekologicznych nad wpływem człowieka na środowisko. Przykład ze stanowiska Kazanie we wschodniej Wielkopolsce. *Studia Geohistorica* 7, 56-74,
<https://doi.org/10.12775/SG.2019.04>

Znaczenie wspólnych badań historycznych i paleoekologicznych nad wpływem człowieka na środowisko. Przykład ze stanowiska Kazanie we wschodniej Wielkopolsce*

Sambor Czerwiński

<https://orcid.org/0000-0003-3422-040X>

Laboratorium Ekologii i Monitoringu Mokradel, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza; Zakład Biogeografii i Paleoekologii, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza

Piotr Guzowski

<https://orcid.org/0000-0002-6494-4217>

Instytut Historii i Nauk Politycznych, Uniwersytet w Białymostku

Monika Karpińska-Kołaczek

<https://orcid.org/0000-0002-3249-7408>

Laboratorium Ekologii i Monitoringu Mokradel, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza; Zakład Biogeografii i Paleoekologii, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza; Instytut Historii i Nauk Politycznych, Uniwersytet w Białymostku

Mariusz Lamentowicz

<https://orcid.org/0000-0003-0429-15301>

Laboratorium Ekologii i Monitoringu Mokradel, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza; Zakład Biogeografii i Paleoekologii, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza

Mariusz Gałka

<https://orcid.org/0000-0001-8906-944X>

Katedra Geobotaniki i Ekologii Roślin, Wydział Biologii i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Łódzki

Piotr Kołaczek

<https://orcid.org/0000-0003-2552-8269>

Zakład Biogeografii i Paleoekologii, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza

Adam Izdebski

<https://orcid.org/0000-0002-3456-54784>

Max Planck Institute for the Science of Human History; Instytut Historii, Uniwersytet Jagielloński

Radosław Poniat

<https://orcid.org/0000-0001-7384-3920>

Instytut Historii i Nauk Politycznych, Uniwersytet w Białymostku

* Publikacja finansowana ze środków Narodowego Programu Rozwoju Humanistyki za lata 2016–2019.

Zarys treści: Celem artykułu jest przedstawienie potencjału interdyscyplinarnych badań nad wpływem człowieka na środowisko w przeszłości na przykładzie Wielkopolski. Zostaną w nim wykorzystane wysokorozdzielcze analizy paleoekologiczne źródeł przyrodniczych wydobytych z torfowiska Kazanie oraz materiały archeologiczne i historyczne obrazujące osadnictwo i aktywność gospodarczą mieszkańców Pobiedzisk i okolicznych wsi w ciągu ostatnich 1200 lat.

Słowa kluczowe: analiza paleoekologiczna, torfowisko, historyczny wpływ człowieka, pyłek, historyczne zmiany środowiska, przełomy gospodarcze

Abstract: The aim of the article is to present the potential of interdisciplinary research on the human impact on the environment in the past on the example of a site in Greater Poland (Wielkopolska). It uses high-resolution palaeoecological analyses of peat archives from the Kazanie peat bog as well as archaeological and historical materials reflecting the settlement and economic activity of the inhabitants of Pobiedziska and surrounding villages throughout last 1200 years.

Keywords: palaeoecological analysis, peat bog, historical influence of man, pollen, historical changes of environment, turning points in economic history

Wstęp

W ostatnich latach możemy zaobserwować coraz większą liczbę interdyscyplinarnych badań łączących podejście paleoekologiczne i historyczne¹. Wspólna praca nie jest jednak standardem – w badaniach

paleoekologicznych dotyczących wpływu człowieka na środowisko rzadko wykorzystuje się wiedzę historyków, a i historiografia nieczęsto korzysta z dorobku nauk przyrodniczych². Tymczasem zestaw tradycyjnych źródeł historycznych, zwłaszcza związanych z dziejami gospodarczymi – jak różnego rodzaju inwentarze dóbr, rejestry podatkowe, księgi rachunkowe czy nawet źródła sądowe, dostarczające podstawowych informacji o aktywności ekonomicznej człowieka, która w okresie preindustrialnym musiała być przecież ściśle związana z przyrodą – może zostać uzupełniony i rozszerzony o dane przyrodnicze³. W przypadku epok starszych (jak starożytność i średniowiecze), które były ubogie w masowe świadectwa pisane, jest

¹ S. Veski, K. Koppel, A. Poska, *Integrated palaeoecological and historical data in the service of fine-resolution land use and ecological change assessment during the last 1000 years in Rõuge, southern Estonia. Land use and ecological change assessment in southern Estonia*, „Journal of Biogeography”, 32 (8), 2005, s. 1473–1488; M.C. Bal i in., *Fire history and human activities during the last 3300 calyr BP in Spain's Central Pyrenees. The case of the Estany de Bur*, „Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology”, 300 (1–4), 2011, s. 179–190; Q.Y. Cui i in., *Historical land-use and landscape change in southern Sweden and implications for present and future biodiversity*, „Ecology and Evolution”, 4 (18), 2014, s. 3555–3570; I. Mazzini i in., *Holocene evolution of Lake Shkodra. Multidisciplinary evidence for diachronic landscape change in northern Albania*, „Quaternary Science Reviews”, 136, 2016, s. 85–95; A. Wacnik i in., *Determining the responses of vegetation to natural processes and human impacts in north-eastern Poland during the last millennium. Combined pollen, geochemical and historical data*, „Vegetation History and Archaeobotany”, 25 (5), 2016, s. 479–498; P. Bitušík, *Tracking human impact in a mining landscape using lake sediments. A multi-proxy palaeolimnological study*, „Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology”, 504, 2018, s. 23–33; R.M. Fyfe, J. Woodbridge, C.N. Roberts, *Trajectories of change in Mediterranean Holocene vegetation through classification of pollen data*, „Vegetation History and Archaeobotany”, 27 (2), 2018, s. 351–364; G. Hörnberg i in., *Anthropogenic use of fire led to degraded Scots pine-lichen forest in northern Sweden*, „Anthropocene”, 24, 2018, s. 14–29; A. Poska i in., *Reading past landscapes. Combining modern and historical records, maps, pollen-based vegetation reconstructions, and the socioeconomic background*, „Landscape Ecology”, 33 (4), 2018, s. 529–546; S. Riddell i in., *Cereal cultivation as a correlate of high social status in medieval Iceland*, „Vegetation History and Archaeobotany”, 27 (5), 2018, s. 679–696; M. Trapote i in., *High-resolution (sub-decadal) pollen analysis of varved sediments from Lake Montcortès (southern Pyrenean flank). A fine-tuned record of landscape dynamics and human impact during the last 500 years*, „Review of Palaeobotany and Palynology”, 259, 2018, s. 207–222.

² Interdyscyplinarne spojrzenie na wzajemne relacje człowieka i przyrody widoczne jest w pracach Jana Tyszkiewicza: J. Tyszkiewicz, *Środowisko naturalne i antropoprejony dorzecza Narwi przed 1000 lat*, Wrocław 1975; tenże, *Ludzie i przyroda w Polsce Średniowiecznej*, Warszawa 1983. Zwrócił on również uwagę na możliwości wykorzystania dorobku nauk przyrodniczych w badaniach humanistycznych: tenże, *Człowiek Średniowiecza w przyrodzie: jako jej element i moderator*, w: *Człowiek w Średniowieczu. Między biologią a historią*, red. A. Szymczakowa, Łódź 2009, s. 15–24; tenże, *Geografia historyczna. Zarys problematyki*, Warszawa 2013, s. 240–325.

³ A. Izdebski i in., *On the use of palynological data in economic history. New methods and an application to agricultural output in Central Europe, 0–2000 AD*, „Explorations in Economic History”, 59, 2016, s. 17–39; A. Izdebski i in., *Realising consilience. How better communication between archaeologists, historians and natural scientists can transform the study of past climate change in the Mediterranean*, „Quaternary Science Reviews”, 136, 2016, s. 5–22; A. Izdebski, *Średniowieczni Rzymianie i przyroda. Interdyscyplinarna historia środowiskowa*, Kraków 2018.

to wręcz konieczne. Połączenie warsztatów historycznego, archeologicznego i przyrodniczego otwiera przed nauką nową perspektywę wspólnych badań nad rolą i oddziaływaniem człowieka w środowisku w ciągu setek lub nawet tysięcy lat⁴. Próba wykorzystania jej potencjału podjęta w projekcie „W poszukiwaniu transdyscyplinarnej synergii: przełominy gospodarcze Polski z perspektywy historyczno-przyrodniczej na tle europejskim”, którego efektem jest prezentowany artykuł.

Historia badań paleoekologicznych nie-rozerwalnie wiąże się z analizą pyłkową⁵. Dzięki ziarnom pyłku roślin nagromadzonych w archiwach paleoekologicznych, jak torfy czy osady jeziorne, możliwa jest rekonstrukcja roślinności i zidentyfikowanie faz aktywności gospodarczej człowieka⁶. Informacje o przekształceniach środowiska zachowane w źródłach przyrodniczych możliwe są do odczytania m.in. dzięki udziałom procentowym antropogenicznych taksonów pyłku, np. bylicy (*Artemisia*), babki lancetowej (*Plantago lanceolata*), komosowatych (*Chenopodiaceae*), albo pyłków związanych z działalnością rolniczą, np. zboż (*Cerealia*) i chabra bławatka (*Centaurea cyanus*)⁷. Wzrost antropogenicznych udziałów procentowych taksonów pyłku oznacza zatem większy wpływ człowieka na przekształcenia środowiska w otoczeniu danego stanowiska badań. Dla przykładu jednocoszny nagły

spadek udziału procentowego taksonów pyłku drzew liściastych (buka, dębu czy grąbu) i wzrost udziału procentowego taksonów pyłku zboż może stanowić istotną informację o wylesieniu danego obszaru pod uprawy w danym okresie historycznym. W przypadku badań prezentowanych w niniejszym artykule informacje pozyskiwane są z osadów torfowiska Kazanie, położonego 25 km na północny wschód od Poznania, niedaleko Pobiedzisk (diagram 1)⁸. Wybór stanowiska podyktowany został jego wyjątkowym położeniem w sercu Wielkopolski i rodzącą się państwa, a jednocześnie możliwościami, jakie daje w zakresie analizy przyrodniczej, ponieważ torfowisko dokumentuje dwanaście ostatnich wieków bez przerw sedymentacyjnych, które mogłyby zakłócić bądź uniemożliwić interpretację paleoekologiczną. Niezbędnym etapem badań paleoekologicznych jest ustalenie wiarygodnej chronologii dla badanych osadów. Bazuje ona na koncentracjach radioaktywnych izotopów węgla czy ołowiu. Niestety, wysoka kosztowność technik datowania materiałów organicznych sprawia, że w wielu pracach naukowych chronologie oparte są o niedostateczną rozdrobniołość datowań. Brak dokładnej chronologii i ciągłego próbkiowania do analiz paleoekologicznych prowadzi do większej niepewności podczas interpretacji wyników badań⁹. Stąd też z jednej strony pewne przyrodnicze odzwierciedlenia wydarzeń historycznych mogą zostać pominięte, a przy niedokładnych chronologiach bezwzględnych – przesunięte w zapisie paleoekologicznym, co z kolei sprawia, że ich przydatność do porównań z danymi historycznymi jest mocno ograniczona. Odpowiedią na wyzwania wynikające

⁴ J. Haldon i in., *History meets palaeoscience. Consilience and collaboration in studying past societal responses to environmental change*, „Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America”, 115 (13), 2018, s. 3210–3218.

⁵ Przypiętnych informacji na temat analizy palinologicznej oraz technik obróbki osadów jeziornych i torfowych z punktu widzenia nauk historycznych dostarcza artykuł: A. Izdebski i in., *Historia przyrodniczo-gospodarcza Polski w świetle analizy ilościowej danych palinologicznych*, „Historyka. Studia Metodologiczne”, 45, 2015, s. 127–160.

⁶ K.E. Behre, *The interpretation of anthropogenic indicators in pollen diagrams*, „*Pollen et Spores*”, 23, 1981, s. 225–245; B.E. Berglund, M. Ralska-Jasiewiczowa, *Pollen analysis*, w: *Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology*, ed. B.E. Berglund, Chichester–New York–Brisbane–Toronto–Singapore 1986, s. 455–484; M.J. Gaillard, *Archaeological applications*, w: *History of Quaternary science*, ed. S.E. Elias, Egham 2013, s. 880–903.

⁷ Tamże.

⁸ Szerzej o metodologii badań przyrodniczych zastosowanych w artykule zob. M. Lamentowicz i in., *Znaczenie wysokorozdroblczych wielowskaźnikowych (multi-proxy) badań paleoekologicznych dla geografii historycznej i historii gospodarczej w niniejszym tomie*.

⁹ P. Kołaczek i in., *Increased radiocarbon dating resolution of ombrotrophic peat profiles reveals periods of disturbance which were previously undetected*, „*Quaternary Geochronology*”, 52, 2019, s. 21–28.

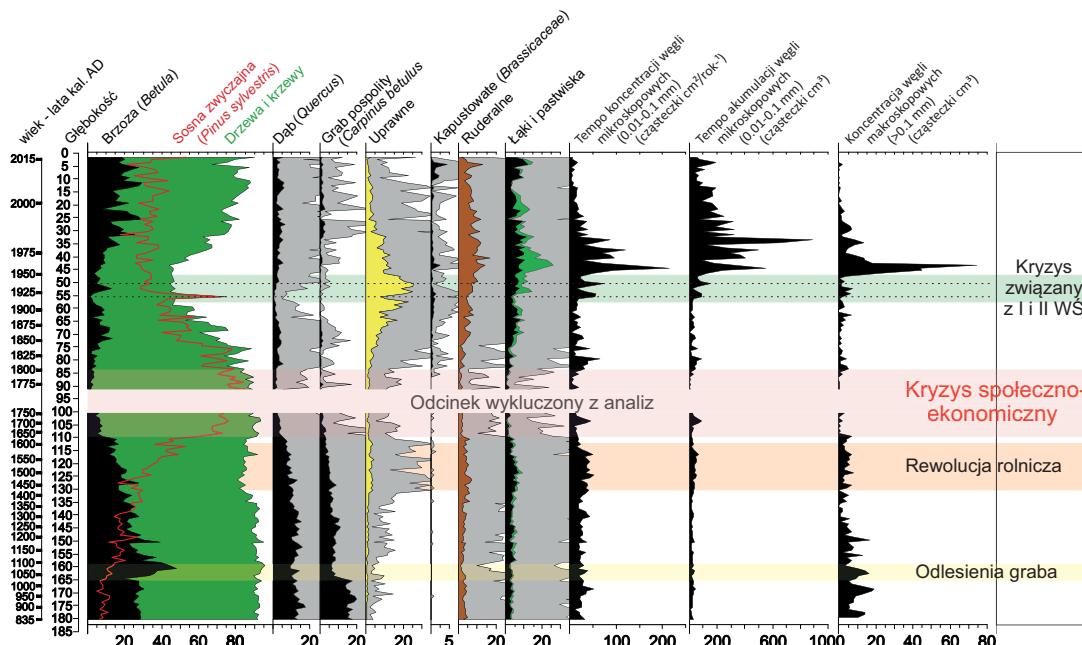


Diagram 1. Uproszczony diagram pyłkowy dla stanowiska Kazanie. Krzywe reprezentują wybrane taksony pyłku drzew i krzewów, a także zgrupowania (wskaźników) pyłku roślin charakterystycznych dla działalności człowieka. Przedstawiono je w skali procentowej, a szare tło oznacza ich dziesięciokrotne powiększenie (%). Zmiany głębokości w sekwencji pionowej osadów (po wcześniejszym ich datowaniu) pozwalają na odczytywanie struktury roślinności w czasie, a więc pośrednie wnioskowanie o działalności człowieka w ostatnich dwunastu stuleciach (w tym przypadku). Krzywa akumulacji i koncentracji węgla mikroskopijnych przedstawiona jest w tysiącach

z ograniczeń obu analiz (braku źródeł historycznych czy niedokładności chro-nologicznej) jest zatem wspólny wysiłek historyków i przyrodników. Ma on na celu wypracowanie nowego podejścia w rów-noległy badaniu źródeł historycznych i danych przyrodniczych, czego efektem są wyniki badań przedstawione w niniejszej pracy.

Analiza osadów pobranych z torfowiska Kazanie metodą paleoekologiczną – bazująca głównie na danych palinologicznych (pyłkowych) i mikrowęglowych, wsparta precyzyjnym datowaniem radiowęglowym ^{14}C za pomocą metody AMS¹⁰ – jest próba określenia wpływu człowieka na środowisko w ostatnich dwunastu wiekach.

Jej dopełnieniem stanowi wnikliwa analiza źródeł typowych dla warsztatu historycznego. W przypadku wczesnego średniowiecza niezbędne jest wykorzystanie dokumentacji i opracowań archeologicznych oraz źródeł historiograficznych (np. kronik), a od okresu kolonizacji późnego średniowiecza – zazwyczaj także źródeł masowych, począwszy od przywilejów loka-cyjnych, do rejestrów podatkowych czy inwentarzy dóbr. W analizie ostatnich stuleci niezwykle przydatne okazują się także źródła kartograficzne¹¹.

W niniejszej pracy przedstawiona została lokalna historia zmian krajobrazu w okolicach stanowiska Kazanie. Zawiera ona opis ogólnych schematów wzajemnego oddziaływanego między człowiekiem

¹⁰ AMS (accelerator mass spectrometry) – szybsza, bardziej nowoczesna i dokładniejsza metoda datowania oznaczająca spektrometrię mas z użyciem akceleratora. Bazuje na odróżnieniu izotopów węgla ^{14}C od ^{13}C i ^{12}C .

¹¹ B. Szady, Dawa mapa jako źródło w badaniach geograficzno-historycznych w Polsce, „Kwartalnik Historii Kultury Materialnej”, 66 (2), 2018, s. 129–140.

i środowiskiem; szczegółowa rekonstrukcja przyrodnicza przedstawiona zostanie natomiast w osobnej publikacji. Skupiono się tu zatem na najważniejszych wydarzeniach z punktu widzenia odpowiedzi środowiska na wydarzenia społeczno-ekonomiczne (możliwych do interpretacji głównie na podstawie danych pyłkowych). Nadzrędnym celem pracy jest przedstawienie komplementarności danych paleoekologicznych i historycznych oraz możliwości wykorzystania danych paleoekologicznych w historycznych studiach porównawczych. Ponadto celem artykułu jest wskazanie możliwości współpracy między badaczami przeszłości człowieka i przyrody oraz zaprezentowanie interdyscyplinarnego standaru badawczego w zakresie klasycznych pytań historycznych o przełomy gospodarcze.

Początki państwa piastowskiego

Wyniki analizy palinologicznej oraz datowań radiowęglowych wskazały, że w latach 835 (+/-40 lat) – 1025 (+/-21) na badanym terenie dominowały lasy zbliżone do pierwotnych, a więc składające się z gatunków rodzimych, które odnawiają się w sposób naturalny i nie noszą wyraźnych śladów działalności człowieka, a zachodzące w nich procesy ekologiczne nie są zaburzone¹². Tereny otwarte stanowiły zdecydowaną mniejszość, o czym świadczy wysoki udział pyłku drzew i krzewów w analizowanych próbkach. Przeważającym typem lasu w okolicy stanowiska (w północno-zachodniej części Równiny Wrzesińskiej) i Wysoczyzny Gnieźnieńskiej był w tym okresie grąd środkowoeuropejski, składający się głównie z drzew liściastych, jak grab pospolity (*Carpinus betulus*) i dąb (*Quercus*).

Powstanie państwa wczesnopiastowskiego przyniosło budowę sieci grodów stanowiących podstawę jego organizacji polityczno-militarnej¹³. W Wielkopolsce,

w tym na badanym terenie, osiedla obronne zbudowano w X i XI w. Archeolodzy odkryli pozostałości grodów w takich miejscach jak Góra, Kociałkowa Góra, Moraczewo czy Pobiedziska. W ramach naszych badań przeanalizowana została dokumentacja badań powierzchniowych przeprowadzonych w ramach projektu Archeologiczne Zdjęcie Polski¹⁴. Choć spotyka się ona z surowymi ocenami samych archeologów¹⁵ (zwracają uwagę na błędy w ewidencji, gdzie m.in. rejestrano ślady i punkty osadnicze na podstawie ceramiki znajdowanej na polach w pobliżu historycznych wsi, a jednocześnie zdarzały się pominięcia samych stref habitacji), to jednak umożliwia podstawową orientację w rozwoju wczesnośredniowiecznego osadnictwa. Dlatego podchodząc do zarejestrowanych zabytków agregatywnie (a więc bez szczegółowej weryfikacji prawidłowości przeprowadzonej na kartach ewidencyjnych klasyfikacji), trzeba przyjąć znaczny wzrost zarejestrowanych śladów, punktów i osad funkcjonujących od końca X stulecia (wykres 1).

Rozwój demograficzny musiał pociągnąć za sobą wzrost wykorzystania zasobów leśnych, a także wpływać na ich strukturę. Dzięki analizie palinologicznej możemy zaobserwować gwałtowny spadek udziału procentowego graba między rokiem 1025 (+/-21) a 1090 (+/-26) – z 17,5 do 6 proc., co może świadczyć o celowym karczowaniu lasu przez lokalną społeczność. Jak podaje Katarzyna Cywa, we wczesnym średniowieczu chętnie używano graba w celach opałowych¹⁶. Niemniej jednak spadek udziału procentowego graba pospolitego tylko w niewielkim stopniu koresponduje

¹² F.M. Sabatini i in., *Where are Europe's last primary forests?*, „Diversity and Distributions”, 24 (12), 2018, s. 1890–1892.

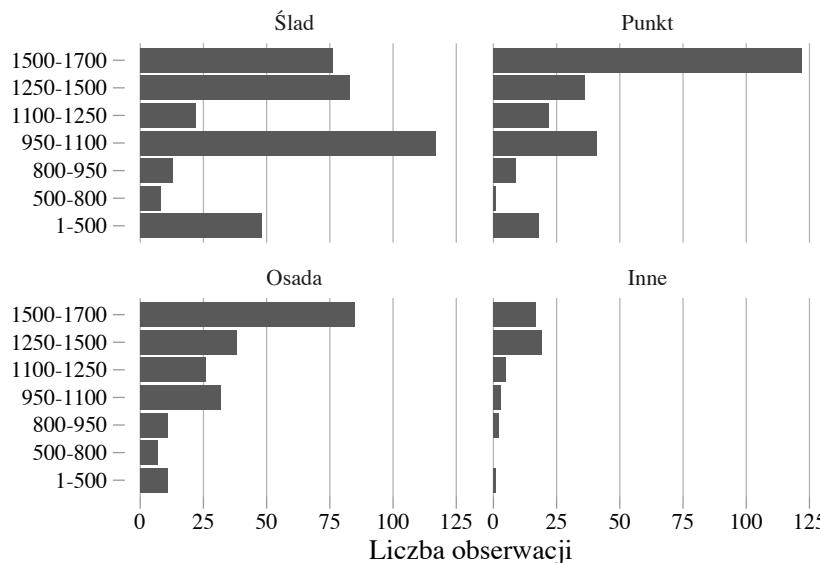
¹³ M. Kara, *Najstarsze państwo Piastów – rezultat przełomu czy kontynuacji?* *Studium archeologiczne*, Poznań 2009, s. 253–321; M. Kara,

M. Makohonenko, *Wielkopolska kraina grodów – krajobraz kulturowy kolejki państwa polskiego w świetle nowych ustaleń chronologicznych*, „Landform Analysis”, 16, 2011, s. 20–25.

¹⁴ *Zdjęcie archeologiczne Polski*, red. M. Konopka, Warszawa 1981.

¹⁵ *Archeologiczne Zdjęcie Polski – metoda i doświadczenie. Próba oceny*, red. D. Jaskaniś, Warszawa 1996.

¹⁶ K. Cywa, *Trees and shrubs used in medieval Poland for making everyday objects*, „Vegetation History and Archaeobotany”, 27 (1), 2018, s. 111–136.



Wykres 1. Rejestracja osad, punktów i śladów z okolicy torfowiska Kazanie w materiałach Archeologicznego Zdjęcia Polski.
 Źródło: oprac. własne na podstawie AZP

ze wzrostem udziału węgli mikroskopowych (frakcja >0,1 mm) notowanym w tym okresie – z ok. 2 tys. fragmentów węgla na centymetr kwadratowy rocznie w 1045 r. (+/-25) do 4 tys. w 1090 (+/-26). W przeciwieństwie do gruba udział dębu w lasach utrzymywał się w tym okresie na podobnym poziomie, mimo że jego drewno często stanowiło główny materiał do budowy grodów¹⁷. Można więc mówić o selektywnym karczowaniu lasu. Ze względu na obfite występowanie na Wysoczyźnie Gnieźnieńskiej i w okolicy stanowiska gruba¹⁸ to prawdopodobnie właśnie ten

gatunek wykorzystywano w celach opałowych, co pośrednio sugerują także wyniki naszych analiz. Z drugiej strony obszary z dominacją gruba, które występowały na żyznych ziemiach, mogły być zajmowane i przekształcane w tereny uprawowe.

Opisywane przez nas zjawisko odpowiada z wynikami innych badań palinologicznych. Opublikowane do tej pory diagramy pyłkowe z Wielkopolski, a w szczególności Wysoczyzny Gnieźnieńskiej, również pokazują wyraźny spadek udziału procentowego pyłku gruba, który łączono z końcem kryzysu demograficznego po wędrówce ludów¹⁹. Brak precyzyjnie opracowanej chronologii nie pozwala jednak na ustalenie dokładnych ram czasowych tego zjawiska. Daty konwencjonalne ze stanowiska Jezioro Skrzetuszewskie każą natomiast łączyć spadek udziału procentowego pyłku gruba z nasileniem presji człowieka już po 400 r. (+/-100)²⁰.

¹⁷ W. Dzieduszycki, Wykorzystanie surowca drzewnego we wczesnośredniowiecznej i średniowiecznej Kruszwicy, „Kwartalnik Historii Kultury Materialnej”, 24 (1), 1976, s. 35–54.

¹⁸ B. Jankowska, Szata roślinna okolic Gopla w późnym glaciale i holocene oraz wpływ osadnictwa na jej rozwój w świetle badań paleobotanicznych, „Przegląd Archeologiczny”, 27, 1980, s. 5–41; A. Filbrandt, Badania palinologiczne osadów limnicznych jeziora Kamionek, w: Wstęp do paleoekologii Lębodzkiego Parku Krajobrazowego, red. K. Tobolski, Poznań 1991, s. 81–86; K. Tobolski, Dotychczasowy stan badań paleobotanicznych i biostratigraficznych Lębodzkiego Parku Krajobrazowego, w: Wstęp do paleoekologii, s. 11–34; M. Makohonienko, Przyrodnicza historia Gniezna, Poznań–Bydgoszcz 2000 (Prace Zaktułu Biogeografii i Paleoekologii); tenże, Materiały do postglacialnej historii roślinności okolic Lębodzicy. Część II: Badania palinologiczne osadów Jeziora Lębodzkiego – rdzeń 1/86 i Wal/87, w: Wstęp do

paleoekologii, s. 63–70; M. Makohonienko, M. Makowiecki, Rozwój krajobrazu kulturowego w otoczeniu jeziora Lębodzica na Wysoczyźnie Gnieźnieńskiej, „Landform Analysis”, 16, 2011, s. 32–38.

¹⁹ Tamże.

²⁰ K. Tobolski, Dotychczasowy stan, s. 11–34.

Prezentowane przez nas wyniki wskażają precyjniej, że w okolicy stanowiska Kazanie gwałtowne odlesienia zachodziły od 1025 r. (+/-21), co świadczy, że nastąpił wówczas na tym obszarze początek intensyfikacji presji osadniczej we wcześniejszym państwie piastowskim. Mając na uwadze, że ówczesne lasy miały charakter puszczy, należy to uznać za zjawisko charakterystyczne dla całego regionu. Podobne dane z położonych niedaleko Jeziora Skrzetuszewskiego (11 km w linii prostej) i Ostrowa Lednickiego (9 km w linii prostej), który miał wówczas status nadzędnego ośrodka obronnego i administracyjnego, każą przyjąć, że obszary te prezentowały zbliżoną odpowiedź na zaburzenia przyrodnicze związane z działalnością człowieka.

Choć trzebież grądów niewątpliwie została udokumentowana w źródłach paleoekologicznych, to obraz tego procesu został prawdopodobnie zmodyfikowany przez lokalną sukcesję roślinności na torfowisku (rozprzestrzenienie się w jego otoczeniu sosny). Odlesienia te mogły więc nastęować stopniowo, a nie gwałtownie, jak sugerują dane pyłkowe.

Widoczny spadek udziału procentowego roślin uprawnych i chwastów w latach 1025 (+/-21) – 1060 (+/-24) może być łączony z wydarzeniami natury politycznej. Zgodnie z przekazem Galla Anonima i źródeł z krajów sąsiednich za panowania Mieszka II nastąpił kryzys państwa. Jednym z jego objawów było tymczasowe objęcie władzy przez Mieszkowatego brata – Bezpryma, wprowadzonego w 1031 r. na tron dzięki militarnemu wsparciu ze strony Jarosława Mądrego. Zajął on m.in. Gniezno i mimo stosunkowo szybkiego powrotu Mieszka II Wielkopolska była przez dwie dekady areną wojen i niepokojów społecznych. Najpierw w 1039 r. najechała ją czeski książę Brzetysław, po czym krajem wstrząsnęło tajemnicze powstanie. W wyniku tych wydarzeń zniszczeniu uległy siedziby biskupie w Gnieźnie

i Poznaniu²¹, a stanowisko, z którego zaczerpnęliśmy materiał do analiz, znajduje się w pobliżu drogi łączącej obie najważniejsze siedziby książęce i biskupie, nazywanej w późnym średniowieczu *magna via*²². Inne, przyrodnicze wyjaśnienie spadku udziału procentowego roślin uprawnych i chwastów mówi owiększej produkcji pyłku przez brzozę (rodzaj produkujący ogromne ilości pyłku²³), która rozprzestrzeniła się na skutek zarastania jeziora. Jest to takson pionierski, światłolubny i wysoko tolerancyjny na czynniki klimatyczne i glebowe, wobec czego często stanowi pierwsze stadium sukcesji²⁴. Analiza makroszczątków²⁵ pokazuje, że w latach 990 (+/-24) – 1120 (+/-27) notowana była w osadach także zwiększoną obecność owoców brzóz (*Betula pubescens* i *Betula pendula*), co informuje, że prawdopodobnie występowały lokalnie przy krawędzi jeziora, z uwagi na bezpośrednie sąsiedztwo zbiornika²⁶.

Intensyfikacja rolnictwa

Podstawowa struktura osadnicza w promieniu 5 km od badanego stanowiska ukształtowała się w późnym średniowieczu. Stanowiło ją 21 miejscowości wchodzących w skład późniejszego powiatu gnieźnieńskiego (18 osad) i poznańskiego (3). Pierwsze pisane wzmianki dotyczą wsi Górk i Jagodna i pochodzą już z 1170 r.²⁷, a pozostałe odnotowano w źródłach

²¹ Anonima tzw. *Galla Kronika*, czyli *Dzieje książąt i władców polskich*, wyd. K. Maleczyński, Kraków 1952, s. 4.

²² T. Wiązek, *Drogi*, w: *Wielkopolska w drugiej połowie XVI wieku*, cz. 2: *Komentarz, indeksy*, red. K. Chłapowski, M. Słoń, Warszawa 2017 (Atlas historyczny Polski. Mapy szczegółowe XVI wieku), 4), s. 272.

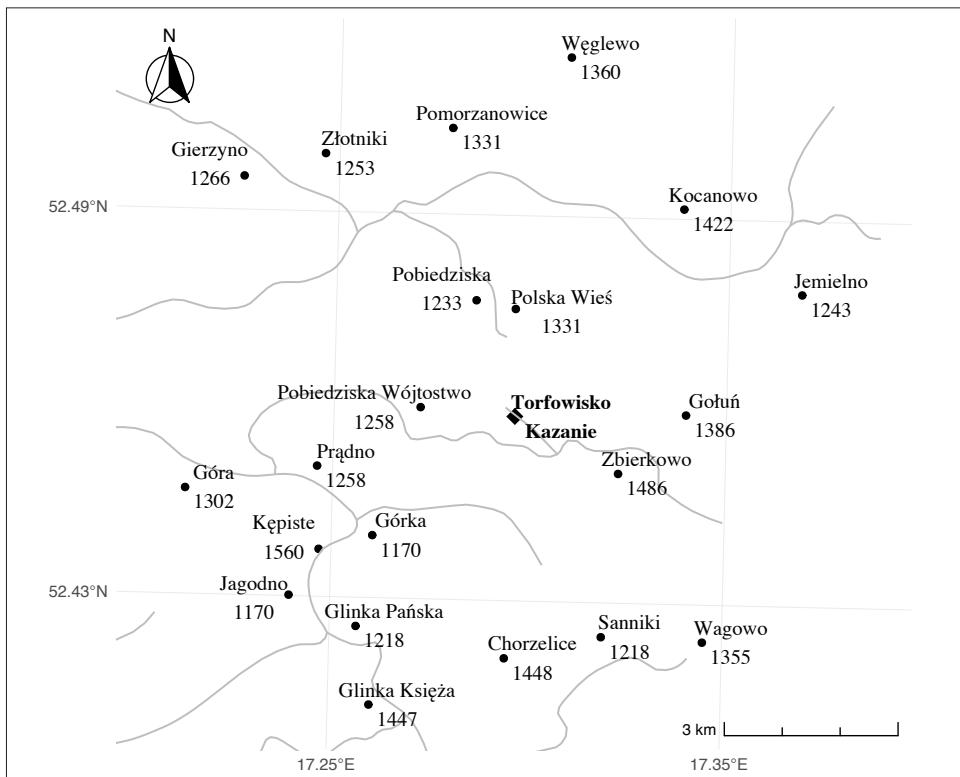
²³ M. Ralska-Jasiewiczowa i in., *Betula L. – Birch*, w: *Late Glacial and Holocene history of vegetation in Poland based on isopollen maps*, ed. M. Ralska-Jasiewiczowa i in., Kraków 2004, s. 57–68.

²⁴ J.B. Faliński, *Pioneer woody species and their role in the regeneration and secondary succession*, w: *Dynamics and conservation of the Pomeranian vegetation*, ed. W. Fiątynowicz, M. Łatałowa, J. Szmeja, Gdańsk–Poznań 1997, s. 33–54.

²⁵ Wyniki analiz nie zostały zamieszczone w artykule.

²⁶ H.H. Birks, *Plant macrofossil introduction*, w: *Encyclopedia of Quaternary science*, ed. S.A. Elias, Amsterdam 2007, s. 2266–2288.

²⁷ Joannis Dlugossi *Annales seu Cronicae incliti Regni Poloniae*, lib. 5–6, Warszawa 1975, s. 94. Pod datą 1170 Długosz podaje informację o ufundowaniu w Poznaniu szpitala joannitów, uposażonego m.in. we wsi Jagodno i Górką. Szerzej na ten temat: A. Gaśiorowski, *Najstarsze*



Mapa 1. Daty pierwszych pisemnych wzmianek o miejscowościach w pobliżu torfowiska Kazanie.
 Źródło: oprac. własne na podstawie słownika historyczno-geograficznego Wielkopolski

historycznych z XIII–XV w. (mapa 1). Większość z nich została zapewne założona na prawie polskim, a czasem przeorganizowano je w myśl prawa niemieckiego²⁸. Same Pobiedziska lokowano na prawie niemieckim ok. 1258 r.²⁹ Wdrażanie nowych

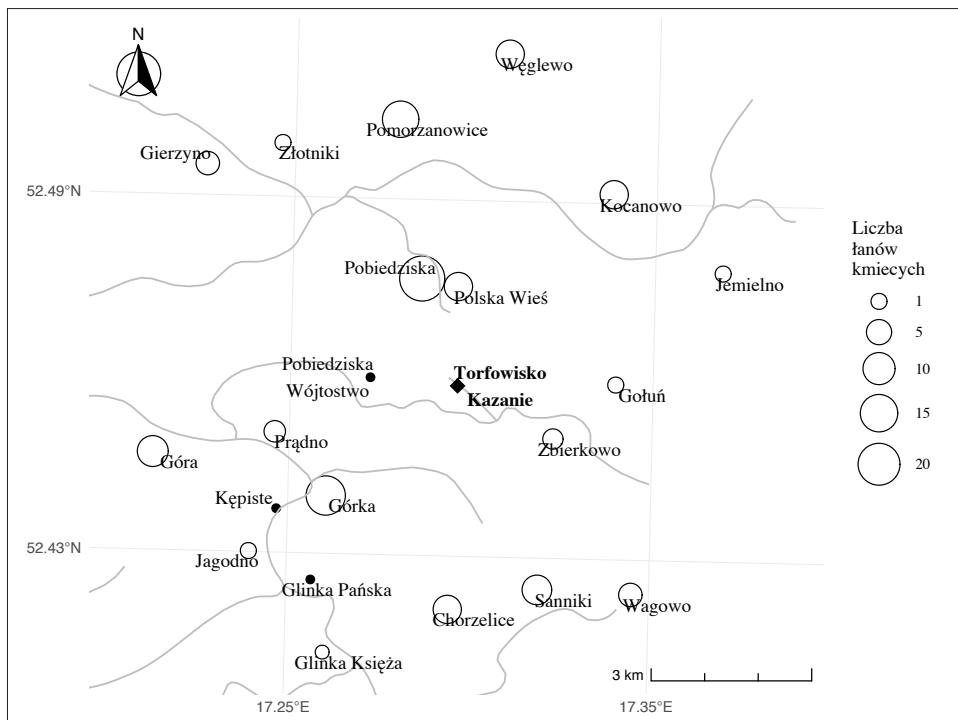
zasad wiązało się z oczyszczaniem gospodarstw chłopskich i zestandardyzowaniem ich wielkości, a także z rozwojem elementów samorządu wiejskiego. Modernizacja na poziomie organizacyjno-technicznym: regulacja pól, wprowadzenie trójpolówki, szersze użycie ciężkiego płyga i żelaznej brony, a także konieczność urynkowania gospodarki chłopskiej, prowadziła z kolei do zwiększenia produkcji rolniczej i hodowli. Możemy przyjąć, że intensyfikacja tych procesów nastąpiła po najeździe krzyżackim z 1331 r., w wyniku którego zniszczone zostały miasto Pobiedziska i okoliczne wsie (m.in. Polska Wieś i Pomorzanowice), o czym wiemy z zeznań świadków z Pobiedzisk na procesie polsko-krzyżackim w 1339 r.³⁰

²⁸ dokumenty poznańskiego domu joannitów, „*Studia Źródłoznawcze*”, 8, 1963, s. 83–95; tenże, *Najstarsze dokumenty poznańskiego domu joannitów. Dokonanie*, „*Studia Źródłoznawcze*”, 9, 1964, s. 47–60.

²⁹ K. Stefański, *Wsie na „prawie niemieckim” w Wielkopolsce w latach 1333–1370*, „*Roczniki Historyczne*”, 37, 1971, s. 1–36.

³⁰ Kodeks dyplomatyczny Wielkopolski, t. 1, wyd. F. Piekoski, Poznań 1877, nr 346. Dokument Przemysła I potwierdzający sprzedaż wójtostwa w Pobiedziskach uznany został przez Franciszka Sikorę za falsyfikat, ale zarówno w literaturze regionalnej, jak i opracowaniach historii miast ich lokację datuje się ok. 1258 r. Zob. F. Sikora, *Dokumenty i kancelaria Przemysła I oraz Bolesława Pobożnego 1239–1270 na tle współczesnej dyplomatiki wielkopolskiej*, Wrocław 1969, s. 186; B. Frankiewicz, *Z dziejów ziemi pobiedziskiej*, Pobiedziska 1990, s. 18; M. Kustra, *Pobiedziska wraz z okolicą w średniowieczu i u progu nowożytności*, Poznań–Pobiedziska–Gniezno 2013, s. 179; M. Bogucka, H. Samsonowicz, *Dzieje miast i mieszkańców w Polsce przedrozbiorowej*, Wrocław 1986, s. 63.

³⁰ *Lites ac Res gestae inter Polonus ordinemque Cruciferorum*, t. 1, wyd. 2, Poznań 1890, s. 362–363.



Mapa 2. Liczba łanów osadzonych w miejscowościach sąsiadujących z torfowiskiem Kazanie w latach 1563–1567.
 Źródło: oprac. własne

Jak pokazują dane pyłkowe, gwałtowny rozwój rolnictwa rozpoczął się w roku 1420 (+/-18) i trwał aż do 1600 (+/-19). Zwłaszcza w odniesieniu do drugiej połowy XVI i początku XVII w. dysponujemy szeregiem źródeł dokumentujących aktywność gospodarczą w postaci rejestrów podatku łanowego i lustracji dóbr królewskich³¹. Można dzięki nim określić

areał uprawianej ziemi i dokonać kalkulacji liczby ludności. W latach 1563–1567 chłopi z 21 miejscowości w pobliżu torfowiska Kazanie uprawiali 118 łanów ziemi (1 lan – ok. 17 ha). Należy do tego doliczyć grunty w dyspozycji folwarków, ale w związku z nierejestrowaniem ziemi folwarcznej w źródłach podatkowych nie wiemy, ile ich było. Lustracja dóbr królewskich wymienia tylko 4 większe gospodarstwa tego typu, należące do starostwa pobiedziskiego: w Pobiedziskach, Pobiedziskach-Wójtostwie, Polskiej Wsi

³¹ Rejestr poborowy województwa kaliskiego 1618–1620, wyd. A.J. Parczewski, Warszawa 1879; M. Gochna, M. Słoń, U. Zachara-Związek, *Rejestr poborowy powiatu gnieźnieńskiego 1564 r.*, w: *Atlas historyczny Polski. Rejestry poborowe województwa kaliskiego w XVI w.*, red. M. Słoń, 2015 (Atlas Źródeł i Materiałów do Dziejów Dawnej Polski, 2, http://atlasfontium.pl/index.php?article=gniezno_1564, dostęp: 15 lipca 2019); K. Chłapowski, M. Słoń, U. Zachara-Związek, *Rejestr poborowy powiatu gnieźnieńskiego 1565 r.*, w: *Atlas historyczny Polski. Rejestry poborowe województwa kaliskiego w XVI w.*, red. M. Słoń, 2015 (Atlas Źródeł i Materiałów do Dziejów Dawnej Polski, 2, http://atlasfontium.pl/index.php?article=gniezno_1565, dostęp: 15 lipca 2019); A. Dunin-Wąsowicz, U. Zachara-Związek, T. Związek, *Rejestr poborowy powiatu poznańskiego 1563 r.*, w: *Atlas historyczny Polski. Rejestry poborowe województwa poznańskiego w XVI w.*, red. M. Słoń, 2015 (Atlas Źródeł i Materiałów do Dziejów Dawnej Polski, 3, http://atlasfontium.pl/index.php?article=poznan_1563, dostęp:

15 lipca 2019); K. Chłapowski, M. Słoń, U. Zachara-Związek, *Rejestr poborowy powiatu poznańskiego 1567 r.*, w: *Atlas historyczny Polski. Rejestry poborowe województwa poznańskiego w XVI w.*, red. M. Słoń, 2015 (Atlas Źródeł i Materiałów do Dziejów Dawnej Polski, 3, http://atlasfontium.pl/index.php?article=poznan_1567, dostęp 15 lipca 2019); *Lustracja województw wielkopolskich i kujawskich 1564–1565*, cz. 1, wyd. A. Tomczak, C. Ohryzko-Włodarska, J. Włodarczyk, Bydgoszcz 1961; *Lustracja województw wielkopolskich i kujawskich 1569–1665*, cz. 1: *Województwa poznańskie i kaliskie*, wyd. C. Ohryzko-Włodarska, Wrocław–Warszawa–Kraków–Gdańsk 1978.

i Węglewie, jednak możemy być pewni, że we wsiah należących do szlachty było ich więcej.

Przyjmując przeliczniki ustalone w literaturze z zakresu demografii historycznej, możemy skalkulować liczbę ludności 20 wsi na około 950 osób³², do których należałoby doliczyć mieszkańców miasteczka Pobiedziska w liczbie 1000–1100, żyjących w 187 domach³³. Populacja ta musiała być wówczas dominującą siłą kształtującą środowisko. Świadczy o tym wyraźny wzrost udziału wskaźników antropogenicznych, np. pyłku roślin uprawnych i chwastów czy pyłku roślin siedlisk ruderalnych, notowanych szczególnie w latach 1420 (+/-18) – 1600 (+/-19). Oprócz wyrębywania lasów liściastych występujących na żyznych ziemiach i zastępowania ich uprawami widoczny był trend zwiększenia powierzchni łąk i pastwisk, a także towarzyszących im siedlisk antropogenicznych. Dla tego okresu, a szczególnie lat 1480 (+/-19) – 1580 (+/-19), odnotowany został wzrost udziału węgli mikroskopowych, co pośrednio sugeruje wzmożoną aktywność człowieka, np. wykorzystanie zasobów lasu jako materiału opałowego nie tylko w domach, ale również w urządzeniach preindustrialnych, jak browary, huty i kuźnice³⁴. Z danych

pyłkowych wynika, że pod koniec XVI w. silnie wytrzebione lasy, które przez setki lat zmagaly się z presją człowieka i w pewien sposób były przez niego umiejętnie zarządzane, zostały ostatecznie kompletnie przekształcone. Kilkusetletnia presja gospodarcza człowieka doprowadziła zatem do prawie całkowitego zaniku wielogatunkowych lasów liściastych, które zostały zastąpione głównie przez lasy sosnowe.

Kryzys społeczno-ekonomiczny

Analiza źródeł przyrodniczych wskazuje, że między 1620 (+/-20) a 1800 r. (+/-40) doszło do regresu osadnictwa. Stopniowa wycinka, której nasilenie przypadło na przełom XVI i XVII w., przyczyniła się do otwarcia krajobrazu, co ułatwiało wkroczenie na porolne ziemie leżące odlegiem sośnie. Można by zatem przypuszczać, że z uwagi na nadprodukcję pyłku sosny początkowy sygnał o regresie osadnictwa mógł być nieco zniekształcony i zaczęło się ono kilkadziesiąt lat później, tj. w drugiej połowie XVII w. Widoczny jest też jednak znaczny spadek udziału pyłku roślin uprawnych i chwastów w ciągu zaledwie dwudziestu lat (z 4 proc. w roku 1600 (+/-18) do 1,5 proc. w 1620 (+/-20), co niewątpliwie musiało być wywołane spadkiem ogólnej powierzchni areałów uprawnych, i dopiero po tym okresie następuje gwałtowny wzrost udziału pyłku sosny. Zgadza się to z danymi historycznymi, które przekonują, że początki kryzysu widać już u zarania trzeciej dekady XVII w. W porównaniu do opisanego wyżej wcześniejszego okresu rejestry podatkowe z 1618 r. notują w 16 wsiah (o których mamy dane) spadek areału upraw chłopskich ze 102 łanów do 67,5³⁵. Zmniejszenie powierzchni ziemi uprawnej w rękach chłopskich o ponad 30 proc. mogło być co prawda zrekompensowane rozrostem folwarków, które powstawały i rozwijały się w Wielkopolsce najczęściej na łanach

³² K. Boroda, P. Guzowski, *Przeliczniki demograficzne w szacunkach zaludnienia terenów wiejskich w Królestwie Polskim w drugiej połowie XVI wieku*, „Przeszłość Demograficzna Polski”, 37 (2), 2015, s. 53–75.

³³ Lustracja województw wielkopolskich i kujawskich 1564–1565, s. 278; P. Guzowski, R. Poniat, *Przeliczniki demograficzne w szacunkach zaludnienia miast w Królestwie Polskim w drugiej połowie XVI wieku*, „Przeszłość Demograficzna Polski”, 37 (2), 2015, s. 77–93.

³⁴ C. Whitlock, C. Larsen, *Charcoal as a fire proxy*, w: *Tracking environmental change using lake sediments*, ed. J.P. Smol, H.J.B. Birks, W.M. Last, Dordrecht 2001, s. 75–97; W. Tinner, F.S. Hu, *Size parameters, size-class distribution and area-number relationship of microscopic charcoal. Relevance for fire reconstruction*, „The Holocene”, 13 (4), 2003, s. 499–505; C. Whitlock i in., *Paleoecological perspectives on fire ecology. Revisiting the fire-regime concept*, „The Open Ecology Journal”, 3, 2010, s. 6–23; K. Marcisz i in., *Long-term hydrological dynamics and fire history over the last 2000 years in CE Europe reconstructed from a high-resolution peat archive*, „Quaternary Science Reviews”, 112, 2015, s. 138–152; E. Dietze i in., *Holocene fire activity during low-natural flammability periods reveals scale-dependent cultural human-fire relationships in Europe*, „Quaternary Science Reviews”, 201, 2018, s. 44–56.

³⁵ Rejestr poberowy województwa kaliskiego, s. 182–237.

pustych³⁶, ale zarówno gospodarka chłopska, jak folwarczna mocno ucierpiały w wyniku zniszczeń wojennych, epidemii i kryzysu gospodarczego związanych z potopem szwedzkim na początku drugiej połowy XVII w. Władysław Rusiński szacował na podstawie danych z lustracji spadek liczby ludności rolnej w województwie poznańskim o 46,1 proc., a w kaliskim – aż o 62,6 proc.³⁷ W przypadku miejscowości w pobliżu naszego stanowiska był on jeszcze większy. Na podstawie rejestru pogłówego z 1673 r. liczbę mieszkańców powyżej dziesiętego roku życia można ustalić na 460³⁸. Gdy doszacujemy brakujące dzieci, które stanowiły ok. 30 proc. ówczesnego społeczeństwa³⁹, stan populacji 21 najbliższych stanowisku miejscowości w drugiej połowie XVII w. możemy określić na ok. 650 osób. W stosunku do okresu sto lat wcześniejszego mamy więc do czynienia ze spadkiem liczby ludności o 67,5 proc. Lustratorzy opisujący w tym czasie Pobiedziska i zlokalizowane wokół nich dobra królewskie stwierdzili: „To starostwo, tak miasteczko, jako i wsi, iż na wielkim gościńcu zostają, tedy przez częste przechodenie nieprzyjaciela, ogień, wojska cesarza JM, ale osobliwie przez codzienne przechodzącego żołnierza naszego i nieznośne chleba zimowego po kilkakroć wyciąganie, tak jako się opisało, popustoszone są”⁴⁰. Mimo że ostatnie dekady XVII w. były w Wielkopolsce stosunkowo spokojne, to początek następnego stulecia przyniósł zmagania trzeciej wojny północnej oraz kolejne zniszczenia nieodbudowanej

gospodarki i społeczeństwa przez wojska saskie, szwedzkie, moskiewskie i koronne. Podejmowano co prawda próby sprowadzenia w okolice Pobiedzisk osadników holenderskich, śląskich i niemieckich oraz przeorganizowania gospodarki i zastąpienia pańszczyzny czynszami⁴¹, ale nie przyniosły one przełomu gospodarczego, o czym świadczą także źródła przyrodnicze. Dla całego okresu opisywanego kryzysu społeczno-ekonomicznego utrzymuje się w próbkach niski udział pyłku roślin uprawnych i chwastów. Podczas gdy jeszcze w 1600 r. (+/-18), przed widocznym załamaniem, udział ten wynosił aż 4 proc., to w 1715 (+/-40) już zaledwie 0,5 proc., by w 1800 (+/-40) sięgnąć 1,3 proc. Widoczny jest także niższy udział pyłku roślin ruderalnych, traw oraz wskaźnika łąk i pastwisk. Co więcej, spadek udziału węgli mikroskopijnych notowany był mniej więcej od 1640 r. (+/-23) i trwał aż do końca 1800 (+/-40). Krótkotrwący wzrost krzywej węgli mikroskopijnych widoczny był natomiast w 1715 r. (+/-40), niewykluczone że w związku z pożarami wywołanymi przez działania wojenne lub inne nieszczęścia, jak odnotowany w 1735 r. wielki pożar trzech browarów w Pobiedziskach, w którym spłonęły też domy mieszkalne⁴². W końcowym okresie wieku XVIII widoczna jest regeneracja lasów z dominacją sosny, która szybko zadomowiła się na obszarach porolnych. Manifestuje to wysoki udział pyłku sosny, który w 1770 r. (+/-40) wzrósł do 85,5 proc., osiągając swoje maksimum.

³⁶ J. Topolski, *Przyczyny powstania i rozwój folwarku pańszczyźniańskiego, w: Dzieje Wielkopolski*, t. 1: Do roku 1793, red. J. Topolski, Poznań 1969, s. 452.

³⁷ W. Rusiński, *Straty i zniszczenia w czasie wojny szwedzkiej (1655–60) oraz jej skutki na obszarze Wielkopolski, w: Polska w okresie drugiej wojny północnej*, t. 2, red. K. Lepszy i in., Warszawa 1957, s. 276.

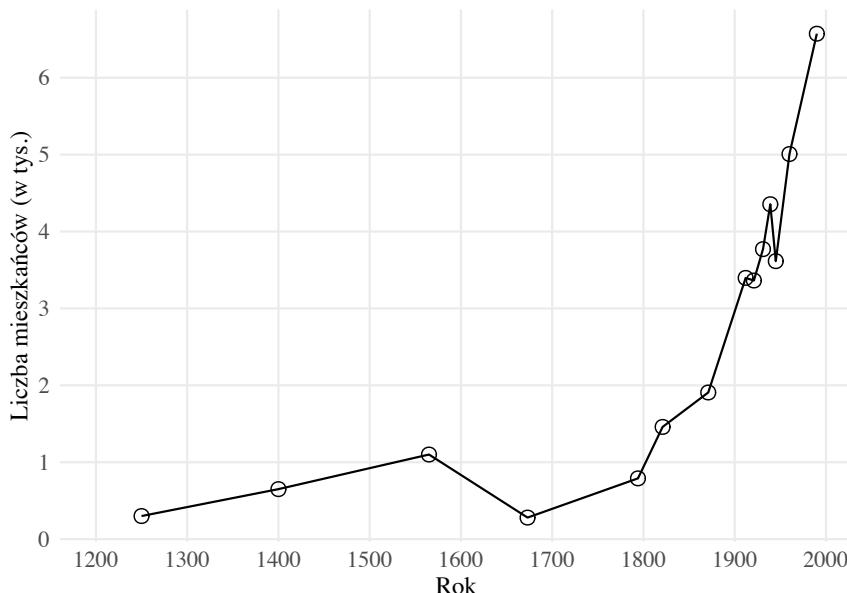
³⁸ Archiwum Główne Akt Dawnych, Archiwum Skarbu Koronnego I, 68 (rejestr województwa poznańskiego) i ASK I, 74 (rejestr województwa kaliskiego).

³⁹ I. Gięysztorowa, *Wstęp do demografii staropolskiej*, Warszawa 1976, s. 196.

⁴⁰ Lustracja województw wielkopolskich i kujawskich 1659–1665, cz. 1, s. 138.

⁴¹ K.J. Hładylowicz, *Zmiany krajobrazu i rozwój osadnictwa w Wielkopolsce*, Lwów 1932, s. 122–124. Szerzej o osadnictwie olęderskim w Polsce: J.T. Baranowski, *Wsie holenderskie na ziemiach polskich, „Przegląd Historyczny”*, 19, 1915, s. 65–82; W. Rusiński, *Osady tzw. Olędrów w dawnym województwie poznańskim*, Poznań–Kraków 1947; Z. Chodyła, *Zarys dziejów osadnictwa olęderskiego w Polsce 1547–1864, w: Olędry. Przestrzenie wokół nas*, Poznań 2006, s. 32–71; M. Targowski, *Osadnictwo olęderskie w Polsce – jego rozwój i specyfika, w: Olędrzy – osadnicy nad Wisłą. Sąsiedzi bliscy i obcy*, red. A. Pabian, M. Targowski, Toruń 2016, s. 11–26.

⁴² Archiwum Państwowe w Poznaniu, Komisja Skarbową Poznańską 44, k. 56–56v.



Wykres 2. Liczba mieszkańców Pobiedzisk w XIII–XX w.

Źródło: oprac. własne

Dzieje najnowsze

Uwłaszczenie, napływ osadników niemieckich i zmiany organizacyjne w handlu (giełdy towarowe i spółdzielnicie) następujące w ciągu XIX i na początku XX w. przyczyniły się do wzrostu lokalnej produkcji rolniczej i zwiększenia populacji (wykres 2)⁴³. Gwałtowny spadek krzywej udziału pyłku roślin uprawnych oraz łąk i pastwisk przypada na okres pierwszej wojny światowej. W tej fazie widoczny jest również nieznaczny spadek udziału procentowego pyłku *Brassicaceae*, emitowanego m.in. przez rzepak (*Brassicanapus*), a także kapustę warzywną (*Brassicaoleracea*), której odmiany mogły być wykorzystywane jako rośliny pastewne, być może wprowadzane wcześniej stopniowo jako nowe uprawy⁴⁴. Po opisany spadku następuje ponowny szybki wzrost udziału pyłku

roślin uprawnych i chwastów, a także łąk i pastwisk. Krzywa udziałów wskaźników roślin uprawnych i chwastów osiąga swoje apogeum (26 proc.) w 1939 r. (+/-8), po czym zaczyna gwałtownie spadać, do jedynie 9 proc. w 1955 r. (+/-7). Zasadne jest zatem stwierdzenie, że to działania wojenne destrukcyjnie wpłynęły na sytuację miejscowej gospodarki rolnej podczas pierwszej wojny światowej, a w przypadku drugiej należy dodać straty populacji związane z zagładą ludności żydowskiej, eksterminacją oraz masowym wywożeniem na roboty do Niemiec polskiej ludności Pobiedzisk i okolic⁴⁵.

Dominacja zbóż mogła być stopniowo zastępowana przez zwiększający się areał upraw rzepaku, co szczególnie widać w latach 1955 (+/-7) – 1990 (+/-3), gdy stanowił on min. 0,5 proc., a maks. 4,7 proc., a także w kilkunastu ostatnich latach, gdy dochodził do 4,3 proc. Dane te tłumaczą częściowo spadek wskaźników pyłku

⁴³ B. Frankiewicz, *Z dziejów*, s. 51.

⁴⁴ M. Theuerkauf i in., *Effects of changes in land management practices on pollen productivity of open vegetation during the last century derived from varved lake sediments*, „The Holocene”, 25 (5), 2015, s. 733–744.

⁴⁵ B. Frankiewicz, *Z dziejów*, s. 106–124.

roślin uprawnych i potwierdzają ogólne krajowe trendy związane z uprawą rzepaku⁴⁶. Wobec minionego stulecia można też mówić o znaczych uprawach roślin owadopójnych z rodziny kapustowatych, o czym świadczy udział ich pyłku w ogólnym obrazie sięgającym kilku procent.

Od 1952 r. (+/-7) poza wymienionymi zmianami dostrzegalna jest jeszcze większa presja człowieka, objawiająca się, jak można odczytać z diagramu pyłkowego, zwiększoną powierzchnią łąk i pastwisk, szczególnie do roku 1985 (+/-2), czy zwiększoną aktywnością pożarową osiągającą maksimum w 1959 (+/-3), co lokalnie mogło być też związane z wypalaniem traw. Postępujący spadek udziału pyłku roślin uprawnych i chwastów (głównie zbóż) w ostatnich latach koresponduje z większym, także planowanym zalesieniem obszaru, a prawdopodobnie i rosnącą rolą rzepaku.

Podsumowanie

Wyniki analiz pyłkowej oraz węgli mikroskopijnych poza możliwością klasycznej rekonstrukcji roślinności oraz identyfikacji pożarów i aktywności osadniczej dostarczają precyzyjnych danych o przekształceniach środowiska, w którym człowiek odgrywał główną rolę. Głównym czynnikiem wpływającym na lokalne środowisko były zatem historyczne zmiany społeczno-gospodarcze, których ślady możemy odnaleźć w źródłach kopalnych. Jak pokazują analizy paleośrodowiskowe ze stanowiska Kazanie wsparcie źródłami historycznymi, zmiany te stanowią istotny przykład wzajemnego oddziaływania między środowiskiem i człowiekiem, który od tysiącleci przekształcał je dla swoich potrzeb. Opracowanie dla danych paleoekologicznych stanowiska wysokiej jakości chronologii bezwzględnej rzuca na nie nowe światło zarówno w kontekście przyrodniczym, jak i historycznym; umożliwia także uszczegółowienie i korektę

opublikowanych dotychczas wyników prac sondażowych w mikroskali⁴⁷. W pracy tej wykazano, że:

- do gwałtownych odlesień doszło w latach 1025 (+/-21) – 1090 (+/-26), co dokumentuje gwałtowny spadek udziału pyłku graba (może to świadczyć o celowym karczowaniu lasu przez lokalną społeczność w okresie kształtowania się monarchii wczesnopiastowskiej);

- nasilona presja na środowisko związana z rewolucją gospodarczą trwała od początku XV do początku XVII w. i to wówczas ukształtowała się zasadnicza sieć osadnicza i nastąpił rozwój miejscowej populacji;

- ograniczenie presji człowieka na skutek gwałtownego kryzysu społeczno-ekonomicznego związanego z działaniami wojskowymi i epidemiami od połowy XVII w. doprowadziło do rozwoju lasów z dominacją sosny. Jak pokazuje analiza pyłkowa, przy niewielkiej presji człowieka rozwijały się one ok. 100–150 lat;

- podczas pierwszej i drugiej wojny światowej doszło do gwałtownego spadku udziału pyłku roślin uprawnych, co ma związek m.in. z załamaniem się w tych okresach miejscowej gospodarki rolnej;

- okres powojenny cechował się intensywnym użytkowaniem ziemi, m.in. wprowadzeniem nowych odmian upraw czy zwiększeniem powierzchni przeznaczonej pod pastwiska.

* * *

Wyniki przedstawione w artykule stanowią dowód, że analizy paleoekologiczne i dane historyczne wzajemnie się uzupełniają. W związku z tym, że zmiany społeczno-gospodarcze mają swoje odzwierciedlenie w środowisku (np. zmiany systemu użytkowania ziemi), współpraca historyków, archeologów i paleoekologów

⁴⁶ E. Arseniuk, T. Oleksiak, *Polski rzepak. Dorobek badawczy i hodowlany*, Radzików 2004.

⁴⁷ A. Izdebski i in., *On the use of palynological data*; A. Izdebski i in., *Historia*.

dostarcza nowej generacji danych dotyczących działalności człowieka. Ograniczenia danych paleoekologicznych mogą być częściowo eliminowane przez zastosowanie źródeł historycznych. Interpretacja wpływu człowieka na środowisko i jego aktywności gospodarczej czy osadniczej sięga zatem tak daleko, jak początki akumulacji osadów biogenicznych. Jej wiarygodność wzrasta wraz z dostępem do źródeł historycznych

(i archeologicznych) dla danego obszaru, co daje szansę skonfrontowania danych. Z tego powodu okres ostatniego tysiąclecia (a zwłaszcza 600–700 lat) stanowi w przypadku Wielkopolski doskonałe pole do wspólnego prowadzenia badań nad przełomami gospodarczymi przez historyków i paleoekologów, a przynosząca obiecujące efekty współpraca interdyscyplinarna kontynuowana będzie w przyszłości. ■

Bibliografia

źródła publikowane

- Anonima tzw. *Galla Kronika, czili Dzieje książąt i władców polskich*, wyd. K. Maleczyński, Kraków 1952.
- Chłapowski K., Słoń M., Zachara-Związek U., *Rejestr poborowy powiatu gnieźnieńskiego 1565 r.*, w: *Atlas historyczny Polski. Rejestry poborowe województwa kaliskiego w XVI w.*, red. M. Słoń, 2015 (Atlas Źródeł i Materiałów do Dziejów Dawnej Polski, 2, http://atlasfontium.pl/index.php?article=gniezno_1565, dostęp: 15 lipca 2019).
- Chłapowski K., Słoń M., Zachara-Związek U., *Rejestr poborowy powiatu poznańskiego 1567 r.*, w: *Atlas historyczny Polski. Rejestry poborowe województwa poznańskiego w XVI w.*, red. M. Słoń, 2015 (Atlas Źródeł i Materiałów do Dziejów Dawnej Polski, 3, http://atlasfontium.pl/index.php?article=poznan_1567, dostęp 15 lipca 2019).
- Dunin-Wąsowicz A., Zachara-Związek U., Związek T., *Rejestr poborowy powiatu poznańskiego 1563 r.*, w: *Atlas historyczny Polski. Rejestry poborowe województwa poznańskiego w XVI w.*, red. M. Słoń, 2015 (Atlas Źródeł i Materiałów do Dziejów Dawnej Polski, 3, http://atlasfontium.pl/index.php?article=poznan_1563, dostęp: 15 lipca 2019).

- Gochna M., Słoń M., Zachara-Związek U., *Rejestr poborowy powiatu gnieźnieńskiego 1564 r.*, w: *Atlas historyczny Polski. Rejestry poborowe województwa kaliskiego w XVI w.*, red. M. Słoń, 2015 (Atlas Źródeł i Materiałów do Dziejów Dawnej Polski, 2, http://atlasfontium.pl/index.php?article=gniezno_1564, dostęp: 15 lipca 2019).
- Joannis Dlugossi Annales seu Cronicae incliti Regni Poloniae*, lib. 5–6, Warszawa 1975.
- Kodeks dyplomatyczny Wielkopolski*, t. 1, wyd. F. Piekosiński, Poznań 1877.
- Lites ac Res gestae inter Polons ordinemque Cruciferorum*, t. 1, wyd. 2, Poznań 1890.
- Lustracja województw wielkopolskich i kujawskich 1564–1565*, cz. 1, wyd. A. Tomczak, C. Ohryzko-Włodarska, J. Włodarczyk, Bydgoszcz 1961.
- Lustracja województw wielkopolskich i kujawskich 1659–1665*, cz. 1: *Województwa poznańskie i kaliskie*, wyd. C. Ohryzko-Włodarska, Wrocław–Warszawa–Kraków–Gdańsk 1978.
- Rejestr poborowy województwa kaliskiego 1618–1620*, wyd. A.J. Parczewski, Warszawa 1879.

Literatura

- Archeologiczne Zdjęcie Polski – metoda i doświadczenia. Próba oceny*, red. D. Jaskanis, Warszawa 1996.
- Arseniuk E., Oleksiak T., *Polski rzepak. Dorobek badawczy i hodowlany*, Radzików 2004.
- Bal M.C., Pelachs A., Perez-Obiol R., Julia R., Curnill R., *Fire history and human activities during the last 3300 calyr BP in Spain's Central Pyrenees. The case of the Estany de Burg*, „*Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*”, 300 (1–4), 2011, s. 179–190.
- Baranowski J.T., *Wsie holenderskie na ziemiach polskich*, „*Przegląd Historyczny*”, 19, 1915, s. 65–82.

- Behre K.E., *The interpretation of anthropogenic indicators in pollen diagrams*, „*Pollen et Spores*”, 23, 1981, s. 225–245.
- Berglund B.E., Ralska-Jasiewiczowa M., *Pollen analysis*, w: *Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology*, ed. B.E. Berglund, Chichester–New York–Brisbane–Toronto–Singapore 1986, s. 455–484.
- Birks H.H., *Plant macrofossil introduction*, w: *Encyclopedia of Quaternary science*, ed. S.A. Elias, Amsterdam 2007, s. 2266–2288.
- Bitúšik P., Trnková K., Chamutiová T., Sochuliaková L., Stoklasa J., Pipík R., Szarlówicz K.,

- Szaciłowski G., Thomková K., Šporka F., Starek D., Šurka J., Milovský R., Hamerlík L., *Tracking human impact in a mining landscape using lake sediments. A multi-proxy palaeolimnological study*, „Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology”, 504, 2018, s. 23–33.
- Bogucka M., Samsonowicz H., *Dzieje miast i mieszkańców w Polsce przedrozbiorowej*, Wrocław 1986.
- Boroda K., Guzowski P., *Przeliczniki demograficzne w szacunkach zaludnienia terenów wiejskich w Królestwie Polskim w drugiej połowie XVI wieku*, „Przeszłość Demograficzna Polski”, 37 (2), 2015, s. 53–75.
- Chodyła Z., *Zarys dziejów osadnictwa olęderskiego w Polsce 1547–1864*, w: *Olędry. Przestrzenie wokół nas*, Poznań 2006, s. 32–71.
- Cui Q.Y., Gaillard M.J., Lemdahl G., Stenberg L., Sigit S., Zernova G., *Historical land-use and landscape change in southern Sweden and implications for present and future biodiversity*, „Ecology and Evolution”, 4 (18), 2014, s. 3555–3570.
- Cywa K., *Trees and shrubs used in medieval Poland for making everyday objects*, „Vegetation History and Archaeobotany”, 27 (1), 2018, s. 111–136.
- Człowiek w średniowieczu. Między biologią a historią*, red. A. Szymczakowa, Łódź 2009.
- Dietze E., Theuerkauf M., Bloom K., Brauer A., Dörfler W., Feeser I., Feurdean A., Gedminienė L., Giesecke T., Jahns S., Karpińska-Kołaczek M., Kołaczek P., Lamentowicz M., Latałowa M., Marcisz K., Obremska M., Pędziżewska A., Poska A., Rehfeld K., Stančikaitė M., Stivrins N., Święta-Musznicka J., Szal M., Vassiljev J., Veski S., Wacnik A., Weisbrodt D., Wiethold J., Vannière B., Słowiński M., *Holocene fire activity during low-natural flammability periods reveals scale-dependent cultural human-fire relationships in Europe*, „Quaternary Science Reviews”, 201, 2018, s. 44–56.
- Dynamics and conservation of the Pomeranian vegetation*, ed. W. Fałtynowicz, M. Latałowa, J. Szmeja, Gdańsk–Poznań 1997.
- Dzieduszyczyk W., *Wykorzystanie surowca drzewnego we wczesnośredniowiecznej i średniowiecznej Kruszwicy, „Kwartalnik Historii Kultury Materialnej”*, 24 (1), 1976, s. 35–54.
- Dzieje Wielkopolski*, t. 1: *Do roku 1793*, red. J. Topolski, Poznań 1969.
- Encyclopedia of Quaternary science*, ed. S.A. Elias, Amsterdam 2007.
- Faliński J.B., *Pioneer woody species and their role in the regeneration and secondary succession*, w: *Dynamics and conservation of the Pomeranian vegetation*, ed. W. Fałtynowicz, M. Latałowa, J. Szmeja, Gdańsk–Poznań 1997, s. 33–54.
- Filbrandt A., *Badania palinologiczne osadów limnicznych jeziora Kamionek*, w: *Wstęp do paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego*, red. K. Tobolski, Poznań 1991, s. 81–86.
- Frankiewicz B., *Z dziejów ziemi pobiedziskiej*, Pobiedziska 1990.
- Fyfe R.M., Woodbridge J., Roberts C.N., *Trajectories of change in Mediterranean Holocene vegetation through classification of pollen data*, „Vegetation History and Archaeobotany”, 27 (2), 2018, s. 351–364.
- Gaillard M.J., *Archaeological applications*, w: *History of Quaternary science*, ed. S.E. Elias, Egham 2013, s. 880–903.
- Gąsiorowski A., *Najstarsze dokumenty poznańskiego domu joannitów*, „*Studia Źródłoznawcze*”, 8, 1963, s. 83–95.
- Gąsiorowski A., *Najstarsze dokumenty poznańskiego domu joannitów. Dokończenie*, „*Studia Źródłoznawcze*”, 9, 1964, s. 47–60.
- Gięsztorowa I., *Wstęp do demografii staropolskiej*, Warszawa 1976.
- Guzowski P., Poniat R., *Przeliczniki demograficzne w szacunkach zaludnienia miast w Królestwie Polskim w drugiej połowie XVI wieku*, „Przeszłość Demograficzna Polski”, 37 (2), 2015, s. 77–93.
- Haldon J., Mordechai L., Newfield T.P., Chase A.F., Izdebski A., Guzowski P., Labuhn I., Roberts N., *History meets palaeoscience. Consilience and collaboration in studying past societal responses to environmental change*, „Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America”, 115 (13), 2018, s. 3210–3218.
- Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology*, ed. B.E. Berglund, Chichester–New York–Brisbane–Toronto–Singapore 1986.
- History of Quaternary science*, ed. S.E. Elias, Egham 2013.
- Hładyłowicz K.J., *Zmiany krajobrazu i rozwój osadnictwa w Wielkopolsce*, Lwów 1932.
- Hörnberg G., Josefsson T., DeLuca T.H., Higuera P.E., Liedgren L., Östlund L., Bergman I., *Anthropogenic use of fire led to degraded Scots pine-lichen forest in northern Sweden*, „*Anthropocene*”, 24, 2018, s. 14–29.
- Izdebski A., *Średniowieczni Rzymianie i przyroda. Interdyscyplinarna historia środowiska*, Kraków 2018.
- Izdebski A., Holmgren K., Weiberg E., Stocker S., Büntgen U., Florenzano A., Gogou A., Leroy S.A.G., Luterbacher J., Martrat B., Masi A., Mercuri A.M., Montanga P., Sadori L., Schneider A., Sicre M.A., Triantaphyllou M., Xoplaki E., *Realising consilience. How better communication between archaeologists, historians and natural scientists can transform the study of past climate change in the Mediterranean*, „*Quaternary Science Reviews*”, 136, 2016, s. 5–22.
- Izdebski A., Koloch G., Słoczyński T., Tycner M., *Historia przyrodniczo-gospodarcza Polski w świetle*

- analizy ilościowej danych palinologicznych, „Historyka. Studia Metodologiczne”, 45, 2015, s. 127–160.
- Izdebski A., Koloch G., Słoczyński T., Tycner M., *On the use of palynological data in economic history. New methods and an application to agricultural output in Central Europe, 0–2000 AD*, „Explorations in Economic History”, 59, 2016, s. 17–39.
- Jankowska B., Szata roślinna okolic Gopla w późnym glaciale i holocene oraz wpływ osadnictwa na jej rozwój w świetle badań paleobotanicznych, „Przegląd Archeologiczny”, 27, 1980, s. 5–41.
- Kara M., Najstarsze państwo Piastów – rezultat przełomu czy kontynuacji? *Studium archeologiczne*, Poznań 2009.
- Kara M., Makohonenko M., Wielkopolska krainą grodu – krajobraz kulturowy kolejki państwa polskiego w świetle nowych ustaleń chronologicznych, „Landform Analysis”, 16, 2011, s. 20–25.
- Kołaczek P., Galka M., Lamentowicz M., Marcisz K., Kajukało-Drygalska K., Karpińska-Kołaczek M., *Increased radiocarbon dating resolution of ombrotrophic peat profiles reveals periods of disturbance which were previously undetected*, „Quaternary Geochronology”, 52, 2019, s. 21–28.
- Kustra M., *Pobiedziska wraz z okolicą w średniowieczu i u progu nowożytności*, Poznań–Pobiedziska–Gniezno 2013.
- Late Glacial and Holocene history of vegetation in Poland based on isopollen maps*, ed. M. Ralska-Jasiewiczowa, M. Latalowa, K. Wasylkowa, K. Tobolski, E. Madeyska, H.E. Wright Jr, C. Turner, W. Szafer, Kraków 2004.
- Makohonenko M., *Materiały do postglacialnej historii roślinności okolic Lednicy. Część II: Badania palinologiczne osadów Jeziora Lednickiego – rdzeń 1/86 i Wall87*, w: *Wstęp do paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego*, red. K. Tobolski, Poznań 1991, s. 63–70.
- Makohonenko M., *Przyrodnicza historia Gniezna*, Poznań–Bydgoszcz 2000 (Prace Zakładu Biogeografii i Paleoekologii).
- Makohonenko M., Makowiecki D., *Rozwój krajobrazu kulturowego w otoczeniu jeziora Lednica na Wysoczyźnie Gnieźnieńskiej*, „Landform Analysis”, 16, 2011, s. 32–38.
- Marcisz K., Tinner W., Colombaroli D., Kołaczek P., Słowiński M., Fiałkiewicz-Koziel B., Łokas E., Lamentowicz M., *Long-term hydrological dynamics and fire history over the last 2000 years in CE Europe reconstructed from a high-resolution peat archive*, „Quaternary Science Reviews”, 112, 2015, s. 138–152.
- Mazzini I., Gliozi E., Galaty M., Bejko L., Sadri L., Soulie-Marsche I., Kochi R., Van Welden A., Bushati S., *Holocene evolution of Lake Shkodra. Multidisciplinary evidence for diachronic landscape change in northern Albania*, „Quaternary Science Reviews”, 136, 2016, s. 85–95.
- Oledrzy. *Przestrzenie wokół nas*, Poznań 2006.
- Oledrzy – osadnicy nad Wisłą. *Sąsiedzi bliscy i obcy*, red. A. Pabian, M. Targowski, Toruń 2016.
- Poska A., Väli V., Tomson P., Vassilje J., Kihno K., Allikasaar T., Villoslada M., Saarse L., Sepp K., *Reading past landscapes. Combining modern and historical records, maps, pollen-based vegetation reconstructions, and the socioeconomic background*, „Landscape Ecology”, 33 (4), 2018, s. 529–546.
- Ralska-Jasiewiczowa M., Wacnik A., Mamakowa K., Nalepka D., *Betula L. – Birch*, w: *Late Glacial and Holocene history of vegetation in Poland based on isopollen maps*, ed. M. Ralska-Jasiewiczowa, M. Latalowa, K. Wasylkowa, K. Tobolski, E. Madeyska, H.E. Wright Jr, C. Turner, W. Szafer, Kraków 2004, s. 57–68.
- Riddell S., Erlendsson E., Gísladóttir G., Edwards K.J., Byock J., Zori D., *Cereal cultivation as a correlate of high social status in medieval Iceland*, „Vegetation History and Archaeobotany”, 27 (5), 2018, s. 679–696.
- Rusiński W., *Osady tzw. Oledrów w dawnym województwie poznańskim*, Poznań–Kraków 1947.
- Rusiński W., *Straty i zniszczenia w czasie wojny szwedzkiej (1655–60) oraz jej skutki na obszarze Wielkopolski*, w: *Polska w okresie drugiej wojny północnej*, t. 2, red. K. Lepšy i in., Warszawa 1957, s. 261–306.
- Sabatini F.M., Burrascano S., Keeton W.S., Levers C., Lindner M., Pötzschner F., Verkerk P.J., Bauhus J., Buchwald E., Chaskovsky O., Debaive N., Horváth F., Garbarino M., Grigoriadis N., Lombardi F., Duarte I.M., Meyer P., Midteng R., Mikac S., Mikolás M., Motta R., Mozgeris G., Nunes L., Panayotov M., Odor P., Ruete A., Simovski B., Stillhard J., Svoboda M., Szwagrzyk J., Tikkannen O.-P., Volosyanchuk R., Vrška T., Zlatanov T., Kuemmerle T., *Where are Europe's last primary forests?*, „Diversity and Distributions”, 24 (12), 2018, s. 1890–1892.
- Sikora F., *Dokumenty i kancelaria Przemyśla I oraz Bolesława Pobożnego 1239–1270 na tle współczesnej dyplomatiki wielkopolskiej*, Wrocław 1969.
- Stefaniński K., *Wsie na „prawie niemieckim” w Wielkopolsce w latach 1333–1370*, „Roczniki Historyczne”, 37, 1971, s. 1–36.
- Szady B., *Dawna mapa jako źródło w badaniach geograficzno-historycznych w Polsce*, „Kwartalnik Historii Kultury Materiałowej”, 66 (2), 2018, s. 129–140.
- Targowski M., *Osadnictwo olederskie w Polsce – jego rozwój i specyfika*, w: *Oledrzy – osadnicy nad Wisłą. Sąsiedzi bliscy i obcy*, red. A. Pabian, M. Targowski, Toruń 2016, s. 11–26.
- Theuerkauf M., Dräger N., Kienel U., Kuparinen A., Brauer A., *Effects of changes in land management practices on pollen productivity of open vegetation*

- during the last century derived from varved lake sediments, „The Holocene”, 25 (5), 2015, s. 733–744.
- Tinner W., Hu E.S., Size parameters, size-class distribution and area-number relationship of microscopic charcoal. Relevance for fire reconstruction, „The Holocene”, 13 (4), 2003, s. 499–505.
- Tobolski K., Dotychczasowy stan badań paleobotanicznych i biostratygraficznych Lednickiego Parku Krajobrazowego, w: *Wstęp do paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego*, red. K. Tobolski, Poznań 1991, s. 11–34.
- Topolski J., Przyczyny powstania i rozwój folwarku pańskioczyźniańskiego, w: *Dzieje Wielkopolski*, t. 1: Do roku 1793, red. J. Topolski, Poznań 1969, s. 443–458.
- Tracking environmental change using lake sediments*, ed. J.P. Smol, H.J.B. Birks, W.M. Last, Dordrecht 2001.
- Trapote M.C., Rull V., Giralt S., Corella J.P., Montoya E., Vegas-Vilarrubia T., High-resolution (sub-decadal) pollen analysis of varved sediments from Lake Montcortès (southern Pyrenean flank). A fine-tuned record of landscape dynamics and human impact during the last 500 years, „Review of Palaeobotany and Palynology”, 259, 2018, s. 207–222.
- Tyszkiewicz J., *Człowiek średniowiecza w przyrodzie: jako jej element i moderator*, w: *Człowiek w średniowieczu. Między biologią a historią*, red. A. Szymczakowa, Łódź 2009, s. 15–24.
- Tyszkiewicz J., *Geografia historyczna. Zarys problematyki*, Warszawa 2013.
- Tyszkiewicz J., *Ludzie i przyroda w Polsce średniowiecznej*, Warszawa 1983.
- Tyszkiewicz J., *Środowisko naturalne i antroporegiony dorzecza Narwi przed 1000 lat*, Wrocław 1975.
- Veski S., Koppel K., Poska A., Integrated palaeoecological and historical data in the service of fine-resolution land use and ecological change assessment during the last 1000 years in Rõuge, southern Estonia. Land use and ecological change assessment in southern Estonia, „Journal of Biogeography”, 32 (8), 2005, s. 1473–1488.
- Wacnik A., Tylmann W., Bonk A., Goslar T., Enters D., Meyer-Jacob C., Grosjean M., Determining the responses of vegetation to natural processes and human impacts in north-eastern Poland during the last millennium. Combined pollen, geochemical and historical data, „Vegetation History and Archaeobotany”, 25 (5), 2016, s. 479–498.
- Whitlock C., Higuera P.E., McWethy D.B., Briles C.E., Paleoecological perspectives on fire ecology. Revisiting the fire-regime concept, „The Open Ecology Journal”, 3, 2010, s. 6–23.
- Whitlock C., Larsen C., Charcoal as a fire proxy, w: *Tracking environmental change using lake sediments*, ed. J.P. Smol, H.J.B. Birks, W.M. Last, Dordrecht 2001, s. 75–97.
- Wielkopolska w drugiej połowie XVI wieku, cz. 2: Komentarz, indeksy, red. K. Chłapowski, M. Słoń, Warszawa 2017 (Atlas historyczny Polski. Mapy szczegółowe XVI wieku, 4).
- Wstęp do paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego, red. K. Tobolski, Poznań 1991.
- Zdjęcie archeologiczne Polski, red. M. Konopka, Warszawa 1981.
- Związek T., Drogi, w: *Wielkopolska w drugiej połowie XVI wieku*, cz. 2: Komentarz, indeksy, red. K. Chłapowski, M. Słoń, Warszawa 2017 (Atlas historyczny Polski. Mapy szczegółowe XVI wieku, 4), s. 268–290.

The Importance of Collaborative Historical and Palaeoecological Research on Human Impact on the Environment: The Case of the Kazanie Site in Eastern Greater Poland (Eastern Wielkopolska)

Summary

The article presents an interdisciplinary approach to the research on the human impact on the environment in the past on the example of the Kazanie peat bog in Greater Poland (Wielkopolska) in the last 1200 years. Independent research was conducted using traditional archaeological sources (The Archaeological Survey of Poland) and historical sources related to economic history (charters, inventories of estates, tax registers) as well as paleoecological data (analyses of pollen

and microscopic charcoal). The analyses of all types of sources provided consistent results indicating human economic activity as the main factor of changes in the local environment. It has also been confirmed that the integration of different approaches, from traditional historical analysis to high-resolution palaeoecological analyses, provide a broader view of the landscape transformations effected by human beings in the past. ■

mgr Sambor Czerwiński – doktorant w Pracowni Ekologii i Monitoringu Mokradel na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM. Jego zainteresowania naukowe obejmują paleoekologię, w szczególności rekonstrukcję roślinności i wpływ człowieka w czasie holocenu
(sambor.czerwinski@amu.edu.pl)

dr Piotr Guzowski – pracownik Centrum Badań Struktur Demograficznych i Gospodarczych Przednowoczesnej Europy Środkowo-Wschodniej Uniwersytetu w Białymostku. Jego zainteresowania badawcze obejmują historię gospodarczą i demografię historyczną okresu preindustrialnego
(guzowski@uwb.edu.pl)

dr Monika Karpińska-Kołaczek – współpracuje z Pracownią Ekologii i Monitoringu Mokradel na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM. Jej zainteresowania badawcze obejmują zmiany zespołów palinomorf niepylkowych i ameb skorupkowych w ciągu ostatnich 10 tys. lat
(monika_kk@interia.eu)

prof. dr hab. Mariusz Lamentowicz – kierownik Pracowni Ekologii i Monitoringu Mokradel na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM. Jego zainteresowania badawcze obejmują paleoekologię i ekologię mokradel, zmiany klimatu oraz ochronę przyrody
(mariuszl@amu.edu.pl)

dr hab. Mariusz Gałka – prof. Uniwersytetu Łódzkiego, zatrudniony w Katedrze Geobotaniki i Ekologii Roślin na Wydziale Biologii i Ochrony Środowiska. Jego zainteresowania badawcze obejmują rekonstrukcje paleoekologiczne, m.in. rozwoju roślinności obszarów mokradłowych (torfowisk, jezior, rzek) pod wpływem zmian klimatu, działalności człowieka i działalności wulkanicznej na terenie Europy, Azji, Ameryki Północnej, Ameryki Południowej oraz Afryki
(mariusz.galka@biol.uni.lodz.pl)

dr Piotr Kołaczek – pracownik Wydziału Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM, specjalizujący się w analizie palinologicznej. Jego zainteresowania badawcze obejmują przemiany szaty roślinnej w kontekście zmian klimatycznych i działalności człowieka w ostatnich 120 tys. lat
(pkolacz@amu.edu.pl)

dr Adam Izdebski – adiunkt w Instytucie Historii Uniwersytetu Jagiellońskiego, kierownik „Palaeo-Science & History” Independent Research Group Max Planck Institute for the Science of Human History w Jenie. Jego zainteresowania badawcze koncentrują się wokół historii środowiskowej Bizancjum
(bydgostiensis@gmail.com)

dr Radosław Poniat – pracownik Centrum Badań Struktur Demograficznych i Gospodarczych Przednowoczesnej Europy Środkowo-Wschodniej Uniwersytetu w Białymostku. Jego zainteresowania badawcze obejmują historię społeczną okresu wczesnonowozytnego
(r.poniat@gmail.com)

Sambor Czerwiński – PhD student at the Laboratory of Wetland Ecology and Monitoring at the Faculty of Geographical and Geological Sciences, Adam Mickiewicz University in Poznań. His scholarly interests include palaeoecology, in particular vegetation reconstruction and human influence during the Holocene
(sambor.czerwinski@amu.edu.pl)

Piotr Guzowski, PhD – employed at the Centre for the Study of Demographic and Economic Structures in Preindustrial Central and Eastern Europe, University of Białystok. His scholarly key interests include economic history and historical demography of preindustrial societies
(guzowski@uwb.edu.pl)

Monika Karpińska-Kołaczek, PhD – she collaborates with the Laboratory of Wetland Ecology and Monitoring at the Faculty of Geographical and Geological Sciences, Adam Mickiewicz University in Poznań. Her research interests include changes in non-pollen palynomorphs and testate amoebae throughout last 10,000 years (monika_kk@interia.eu)

Mariusz Lamentowicz, Prof. Dr. hab. – head of the Laboratory of Wetland Ecology and Monitoring at the Faculty of Geographical and Geological Sciences, Adam Mickiewicz University in Poznań. His scholarly research interests cover palaeoecology and ecology of wetlands, climate changes and protection of nature (mariuszl@amu.edu.pl)

Mariusz Gałka, Dr. hab. – associate professor of the University of Łódź, employed at the Department of Geobotany and Plant Ecology, Faculty of Biology and Environmental Protection, University of Łódź. His research interests focus on palaeoecologic reconstructions, i.a. vegetation succession in wetlands (bogs, lakes, rivers) vs climate change, human activity, and volcanic activity in Europe, Asia, North America, South America, and Africa (mariusz.galka@biol.uni.lodz.pl)

Piotr Kołaczek, PhD – member of the Faculty of Geographical and Geological Sciences, Adam Mickiewicz University in Poznań, specialising in palynological analysis. His scholarly interests include changes in plant vegetation in the context of climate change and human activity throughout last 120,000 years (pkolacz@amu.edu.pl)

Adam Izdebski, PhD – assistant professor at the Institute of History, Jagiellonian University in Kraków, head of the “Paleo-Science & History” Independent Research Group Max Planck Institute for the Science of Human History in Jena. His research interests focus environmental history of Byzantium (bydgostiensis@gmail.com)

Radosław Poniat, PhD – employed at the Centre for the Study of Demographic and Economic Structures in Preindustrial Central and Eastern Europe, University of Białystok. His scholarly key interests include social history of the early modern period (r.poniat@gmail.com)

TRZECI ARTYKUŁ

Czerwiński, S., Guzowski, P., Lamentowicz, M., Gałka, M., Karpińska-Kołaczek, M., Poniat, R., Łokas, E., Diaconu, A.-C., Schwarzer, J., Miecznik, M., Kołaczek, P., 2021. Environmental implications of past socioeconomic events in Greater Poland during the last 1200 years. Synthesis of paleoecological and historical data. *Quaternary Science Reviews*, 259, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106902>



Environmental implications of past socioeconomic events in Greater Poland during the last 1200 years. Synthesis of paleoecological and historical data



Sambor Czerwiński ^{a,*}, Piotr Guzowski ^b, Mariusz Lamentowicz ^a, Mariusz Gałka ^c, Monika Karpińska-Kołaczek ^{a,b}, Radosław Poniat ^b, Edyta Łokas ^d, Andrei-Cosmin Diaconu ^e, Johanna Schwarzer ^f, Magdalena Miecznik ^g, Piotr Kołaczek ^a

^a Climate Change Ecology Research Unit, Adam Mickiewicz University, Bogumiła Krygowskiego 10, 61-680, Poznań, Poland

^b Center for the Study of Demographic and Economic Structures in Preindustrial Central and Eastern Europe University of Białystok, Plac NZS 1, 15-420, Białystok, Poland

^c Department of Biogeography, Paleoecology and Nature Protection, Faculty of Biology and Environment Protection, University of Łódź, 1/3 Banacha Str., 90-237, Łódź, Poland

^d Department of Mass Spectrometry, Institute of Nuclear Physics Polish Academy of Sciences, Radzikowskiego 152, 31-342, Kraków, Poland

^e Department of Geology, Babes-Bolyai University, Kogălniceanu 1, 400084, Cluj-Napoca, Romania

^f Institute of Landscape Ecology, University of Münster, Heisenbergstraße 2, 48149, Münster, Germany

^g Department of Nuclear Physical Chemistry, Institute of Nuclear Physics Polish Academy of Sciences, Radzikowskiego 152, 31-342, Kraków, Poland

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 November 2020

Received in revised form

9 March 2021

Accepted 10 March 2021

Available online 10 April 2021

Handling Editor: Dr P Rioual

Keywords:

Pollen

Human–environment interplay

Land use

Secondary succession

High resolution

Paleoecology

History

Demography

Crisis

Consilience

ABSTRACT

We explored the past environmental history inferred from a fen located in northwestern Poland, in a historically important location. Pollen, plant macrofossils, micro- and macrocharcoal particles, and non-pollen palynomorphs were analyzed continuously in a 1-cm resolution, supplemented with archeological data and historical written sources. The last 1200-year environmental history of the fen was supported with accelerator mass spectrometry (AMS) radiocarbon (¹⁴C) dating (19 dates per 172 cm of the profile) and validated by 59 ²¹⁰Pb dates. Our research showed that primeval oak–hornbeam forests near the Kazanie mire disappeared gradually, starting from 1035 ± 20 cal. yr CE, due to the economic development of the newly formed Polish (Piast) statehood. The pollen data revealed no shortage of oak timber during the 11th century, as recorded by previous studies in the area between Poznań and Gniezno. The Czech invasion in 1039 CE, which was associated with mass depopulation and domestic crisis, seemed to be manifested by the increase of pioneer *Betula* taking advantage of weaker human impact. Substantial land-use changes started with the further development of Polish statehood between the 15th and the 16th century CE, as reflected by cultivated land, ruderal, and meadow and pasture pollen indicators, as well as the rise of microcharcoal influx. The economy of Poland was disrupted by a noticeable socioeconomic collapse in the 17th century CE, which caused depopulation (by approximately 67.5%) and a decline in arable land (by 35%). Paleoecological data reflect this socio-environmental crisis with a decrease in all anthropogenic indicators, rapid forest regeneration, and secondary succession of pine on the abandoned land. According to palynological data, rapid landscape transformation due to agricultural reforms and industrialization commenced in the 19th century CE and was associated with the expansion of pastures, meadows, and arable lands. The following rapid decrease of cultivated land pollen indicators in 1940 ± 10 cal. yr CE is linked with the economic collapse after World War II and/or the implementation of new crops which produce less pollen.

© 2021 The Author(s). Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introduction

The past anthropogenic activity could be inferred from geological archives like peatlands and lakes. Their deposits are crucial to

* Corresponding author.

E-mail address: sambor.czerwinski@amu.edu.pl (S. Czerwiński).

reconstruct long-term human-induced environmental changes (e.g. Erlandson and Braje, 2013; Giesecke et al., 2019; Stephens et al., 2019). Past human impact on vegetation can be reconstructed using pollen, non-pollen palynomorphs (NPPs), and micro- and macrocharcoal particles deposited in such archives (e.g. Dietze et al., 2018; Gaillard, 2013; Gauthier et al., 2010; Sadori et al., 2016). When analyzed at high resolution, pollen and charcoal can be used to infer past demographic trends (Conedera et al., 2009; Woodbridge et al., 2019). To validate the interpretation of the past human impact, a synergy between paleoecological and historical approaches is crucial (e.g. Bitušík et al., 2018; Cui et al., 2014; Haldon et al., 2018; Hörnberg et al., 2018; Mazzini et al., 2016; Poska et al., 2018; Riddell et al., 2017). Izdebski et al. (2016) adopted the classic concept of consilience to study the past impact of societies on nature. The main emphasis of this "amended" approach is to explore past human–environment interplay through different disciplines. In this perspective, archeology, history, and paleoenvironmental sciences seem inseparable in reconstructing the past changes. During the last millennium, human activity was among the most important causes of vegetation changes in Central European Lowland (Finsinger et al., 2017; Kaplan et al., 2009; Pongratz et al., 2008; Roberts et al., 2018). Before human-induced deforestation, this vast area was mainly covered by temperate broadleaf and mixed forest consisting of *Quercus*, *Tilia*, *Corylus*, *Pinus sylvestris*, and late-succession species (from ca. 4000 cal. yr BP) such as *Carpinus betulus* and *Fagus sylvatica* (Feurdean et al., 2013; Giesecke et al., 2017; Ralska-Jasiewiczowa et al., 2003). The north-eastern part, dominated by continental climate, had a greater proportion of coniferous taxa, including *Pinus sylvestris* and *Picea abies* (Larsson et al., 2001). However, spatially diversified agricultural intensification and population growth in the Central Europe led to the establishment of the cultural landscape (Davis et al., 2015; Fyfe et al., 2015; Marquer et al., 2014; Shennan et al., 2013), especially in the last 1000 years (Nielsen et al., 2012; Stephens et al., 2019). This time interval includes the distinct climatic periods: the Medieval Warm Period (800–1300 CE) and the Little Ice Age (LIA; 1500–1850 CE) (Büntgen et al., 2011; Mann et al., 2009; Neukom et al., 2019). The focus of the present study, Greater Poland (Wielkopolska in Polish; north-western Poland), was initially covered by primeval oak–hornbeam forests that gradually declined, which was associated with the increasing impact of pre-Slavic and Slavic settlements (Makohonienko, 2000). Although numerous studies on the vegetation history in Greater Poland, spanning the last millennium, have been undertaken (Filbrandt, 1991; Litt and Tobolski, 1991; Makohonienko, 1991, 2000; Milecka, 2000; Niewiarowski et al., 1995; Tobolski, 1990, 1991), not many cores were dated and none of them used high temporal resolution of paleoecological data (ca. 10-year interval) and high-resolution accelerator mass spectrometry (AMS) ^{14}C dating (one date per 5–20 cm of the profile). The high-resolution AMS ^{14}C dating is essential for paleoecological–historical correlations to avoid inaccurate absolute chronologies (Kotaczek et al., 2019) and therefore the imprecise correlations of historical events. To fill the gap in the high-resolution records and better understand the relationship between the economy and human-induced environmental changes, we decided to explore the last 1200-year history of Greater Poland, especially that of the Poznań–Gniezno region, at the heart of the Polish state. This is the model area for studying the impact of economic breakthroughs on the environment during different stages of state development. We selected as lower time-boundary 800 CE to include the transition from tribal Slavic structures to the establishment of the Polish state in the 10th century CE. This socioeconomic transformation should have left traces on the

ecosystems; however, historical written sources, especially before the 16th century CE, are lacking from that area (Berend et al., 2013). Therefore, palynological and micro- and macrocharcoal data were considered.

In this study, we analyzed pollen, plant macrofossils, selected NPPs, and micro- and macrocharcoal particles (fractions: 10–100 and > 100 μm , respectively) from the peat/gyttja profile at 1-cm resolution (contiguous sampling). The resulting data were supplemented with absolute chronology based on 19 AMS ^{14}C dates per 172 cm. The site selected for this study is a small fen located near Pobiedziska (2 km from the main trade route between Poznań and Gniezno), in the vicinity of Ostrów Lednicki (9 km from the Kazanie mire)—the old centers of Polish statehood (Kóćka-Krenz, 2015, 2016; Kurnatowska, 1997; Trzeciecki, 2016). We chose this site because it is a key setting to study environmental stages of Polish state development.

We aimed to 1) reconstruct the history of vegetation, settlement, and fire, with special attention paid to demographic and economic changes; 2) identify the timing of the vegetation response to human impact; and 3) explore the impact of socio-economic processes (e.g. migrations, plagues, and warfare) on the short-term forest regeneration and degradation.

2. Study site

The Kazanie mire (approximately 3 ha) is located in Greater Poland (Wielkopolska region), 25 km north-east of Poznań City, on the Wrzesińska Plain (Fig. 1). Due to its small size, it reflects mostly local vegetation signals. It was formed during the Late Weichselian Glaciation (Poznań phase), ca. 19.000 years ago (Marks, 2012). The surrounding landform is dominated by rolling and hilly moraines, which include small depressions filled with water and peat (Laskowicz et al., 2015). The peat thickness ranges from 1 to 4 m, below which gyttja, sands, silts, and lacustrine clays are deposited (Miętkiewicz and Sydow, 1999). From the southwest, the area of the fen is covered by crops, fallow fields, and woodlands, while from the northeast, in depressions (at the border), it meets with the riparian forest comprising black (*Alnus glutinosa*) and gray alder (*Alnus incana*), as well as white willow (*Salix alba*). The area surrounding the site is dominated by mixed forests, the main components of which are Scots pine (*P. sylvestris*) and deciduous trees such as pedunculate oak (*Quercus robur*), hornbeam (*C. betulus*), and silver birch (*Betula pendula*) (Forest Data Bank: <https://www.bdl.lasy.gov.pl/portal/>, access October 06, 2020). Since 2011, the site is part of the Natura 2000 network, thus protected by law. However, human activities as well as drought(s) in recent years led to the degradation of the Kazanie mire. Currently, the peatland is dominated by *Phragmites australis*, whereas just a few years ago the vegetation consisted of a mosaic of rich fen species, such as *Cladium mariscus* and *Ranunculus lingua*, and poor fen species, e.g. *Carex limosa* and *Drosera rotundifolia*, in addition to various *Sphagnum* species. Some rare species were growing on the site in the past, including *Rhynchospora alba*, *Drosera anglica*, and *Liparis loeselii* (Michałowska and Rymon-Lipińska, 2008).

The climate in the area is temperate and is significantly influenced by the Atlantic air masses. It is characterized by low annual temperature amplitude, early spring, long summer, and mild and short winter. The average July temperature is 18 °C, while in January it is –2 °C. The average precipitation is 507 mm/yr, of which 60–65% occurs during summer. The length of the growing season varies between 215 and 227 days (Laskowicz et al., 2005; Pobiedziska: <https://pl.climate-data.org/location/10202>, temperature for the period 1982–2012, access October 06, 2020).

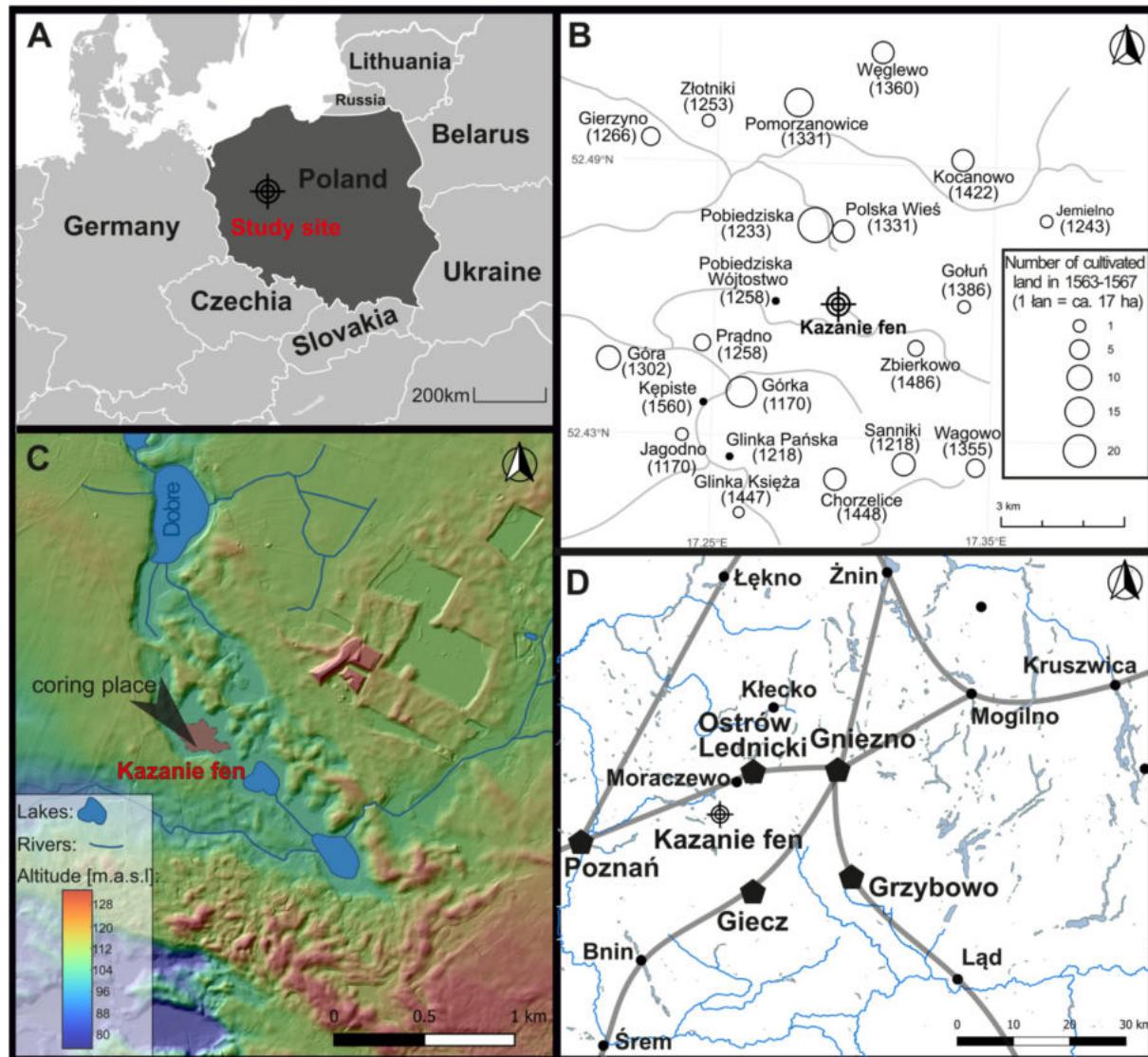


Fig. 1. (A) Location of the Kazanie fen in Central Europe. (B) Date of the first mention in the written sources of villages located near the fen. The year under the village name indicates the number of cultivated fields (expressed in lan, 1 lan ≈ 17 ha) in the villages situated in the vicinity of the site between 1563 and 1567. (C) Digital earth model (DEM) of the site's surroundings. (D) The major early Piast strongholds at the 10th/11th century in east Greater Poland. The hexagon represents the central headquarters at that time. The main communication routes are marked in gray. Source: Makohonienko et al. (2011b) and Trzeciecki (2016).

3. Historical background—most important milestones

Poznań and Gniezno in Greater Poland, between which Kazanie mire is situated, are two of the three most important centers of the emerging Polish state, together with Ostrów Lednicki. Greater Poland is known as the land of fortified settlements (Fig. 1) that was related to the Poland beginnings in the 10th century (here and hereafter, as the entire study period covers the last 2000 years, each date is implicitly CE – common era), under the rule of the Piast dynasty based in Gniezno (Kara, 2009). The studied region was also characterized by the presence of defensive settlements; for example, in the vicinity of the peatland, there were Moraczewo, Góra, Kociałkowa Górką, and Pobiedziska. The first one was established at the beginning of the 10th century and was already functioning during the first phase of state-building. However, it was abandoned around 940–960 and its functions were probably taken over by the nearby Ostrów Lednicki (Kurnatowska, 2008). In Kociałkowa Górką, the fortification dates to the second half of the

10th century (Kara and Makohonienko, 2011). The first historical ruler of Poland, Mieszko I, was baptized (966) at the time and came on the international scene. The territory he ruled expanded far beyond the borders of Greater Poland, but the heart of the state remained in the Gniezno region, which became the seat of the Polish archbishop in the year 1000. The establishment of the dynasty's power was confirmed in 1025 by the coronation of King Bolesław Chrobry and then his son Mieszko II in Gniezno. Later, the state suffered a deep crisis: Greater Poland was invaded by the Czech Duke Bretislav in 1039 and a popular uprising broke out. In the second half of the 11th century, the Piast dynasty rebuilt the country and there was an increase in settlement. After the post-invasion crisis, strongholds were established in Góra and Pobiedziska and the latter assumed town status in late medieval times (mid-13th century). Near Kazanie mire, 20 villages were then founded and some of them belonged to the king. Pobiedziska became a seat of starosta—a royal official standing at the head of the royal estate. In 1331, the area was invaded and destroyed by the

Teutonic Knights. This was the last time the region experienced war for around 300 years. In the 15th and 16th century, the economy and the inhabitants of the royal town and villages, as well as the whole country, enjoyed prosperity, as symbolized by the establishment of manors and development of the grain economy. It ended in the early 17th century with epidemics and the Polish–Swedish war of 1655–1660 that resulted in a deep economic and demographic crisis. The complete recovery of population and economy did not take place until the 19th century and almost the entire Greater Poland was incorporated into the Prussian state. The social and economic reforms carried out at that time contributed to the modernization of agriculture. Mechanization and alteration of crop structure resulted in response to the significant population growth and changes brought about by industrialization. Economic development was temporarily halted during World War I (1914–1918), when many men from the region were conscripted into the German army and the area remained agricultural until World War II (1939–1945). Since then, the shift toward slow urbanization and intensive agriculture in the area occurred.

4. Materials and methods

4.1. Coring and sampling strategy

The profile from the Kazanie mire, which consisted of peat (118.5–0 cm) and gytta (118.5–181.5 cm), was collected in June 2017 from the marginal part, in an area overgrown by *Sphagnum fallax*. A Wardenaar sampler (Wardenaar, 1987), with a dimension of $100 \times 10 \times 10$ cm, was used for the top section (92 cm), and a Russian-type peat corer (7 cm in diameter and 100 cm in length) was used for the 100–181-cm section. The gap between the sections can be attributed to mechanical peat compression during the core retrieval. The two parts were individually wrapped and stored at 4 °C until subsampling. Deposit layers of 1-cm thickness were sampled continuously for analyzing pollen, micro- and macro-charcoal particles, and plant macrofossils.

4.2. Chronology

A total of 19 plant macrofossil samples were dated by AMS ^{14}C method at Poznań Radiocarbon Laboratory (Poland, lab. code - Poz) to provide an absolute chronology (Fig. 2, Table 1). The absolute chronology was constructed using OxCal v. 4.2, by applying the *P_Sequence* function (Bronk Ramsey, 1995, 2008) and IntCal13 (Reimer et al., 2013) and post-bomb NH1 (Hua et al., 2013) atmospheric curves as the calibration set. As the top 1-m section of the peat was mechanically compressed (an artificial 9-cm gap of deposits appeared between the two core sections), we assumed continuous deposition prior to the modeling, in order to avoid inappropriate attribution of modeled age to the section with the gap. The most distinct changes in peat composition, which might indicate the changes in peat accumulation rate, were introduced to the models using the *Boundary* command. The boundaries were introduced to the model for the following depths: (i) 173 cm (181 cm in the profile)—the bottom of the profile, (ii) 111 cm (119 cm in the profile)—lake–peat boundary, (iii) 92 cm (100 cm in the profile)—the boundary between the cores, (iv) 35 cm rich fen—poor fen peat boundary, and (v) the top of the profile.

To improve the chronology, we also dated the topmost peat layers using the ^{210}Pb method. The activity of ^{210}Pb was determined as an activity of its daughter radionuclide ^{210}Po (half-life 138 days). 59 peat samples weighing 0.10–0.43 g were spiked with ^{208}Po as a

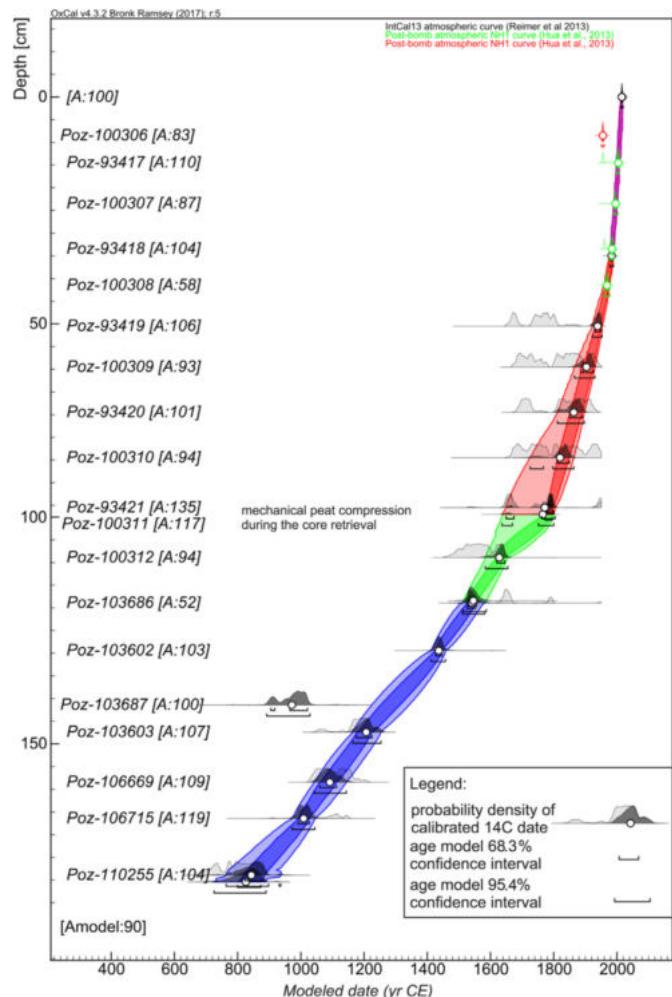


Fig. 2. Bayesian age–depth model for the Kazanie fen profile.

yield tracer and digested using a concentrated mixture of HNO_3 , HCl , and H_2O_2 . ^{210}Po was autoplated onto Ag disks after reduction of Fe^{3+} with ascorbic acid. The activities of ^{208}Po and ^{210}Po were counted using alpha particle spectrometers with semiconductor, passivated silicon detectors. Excess ^{210}Pb (unsupported) was calculated as the difference between the total ^{210}Pb activity and the supported ^{210}Pb activity. The supported level was calculated from the mean ^{210}Pb activity for the bottom layers (27 ± 2 Bq/kg). We applied two alternative dating models: CRS (Constant Rate of Supply) and CF/CS (Constant Flux Constant Sedimentation) to estimate the age–depth relationships in part of the peat core (Appleby, 2002; Sanchez-Cabeza and Ruiz-Fernandez 2012). The total ^{210}Pb unsupported inventory was calculated and was equal to 6038 ± 63 Bq/m². Next, we corrected this value based on the extrapolation of the exponential equation to eliminate a systematic deviation of CRS dates toward erroneously old ages, i.e. the so-called “old-date error” (Binford, 1990; Tylmann et al., 2016). For greater readability, the age is presented as a μ (mean) value of the modeled age, rounded to five. To give the reader possibility of a critical view of correlations between our data and historical events, the modeled age is expressed as a common era (CE) date with its uncertainty (calibrated year $\pm 1\sigma$ error) (cf. Baillie 1991; Blaauw et al., 2007; Dumayne et al., 1995).

Table 1
Radiocarbon dates from the Kazanie mire.

Depth [cm]	¹⁴ C date [BP] pMC – percentage of modern carbon	Laboratory code-number	Material subjected to dating; remarks	Calibrated age 2σ range [cal. yr CE]
8–9	104.28 ± 0.31 pMC	Poz-100306	<i>Betula pubescens</i> – 8 fruit scales +16 fruit scales; outlier excluded from the model	1956–1957 (36.6%)
				2008–2009 (58.9%)
14–15	107.46 ± 0.36 pMC	Poz-93417	<i>Betula pubescens</i> – 6 fruit scales, <i>Betula</i> sect. <i>Alba</i> – 2 fruits, undefined tree/shrub scales – 2	1956–1957 (2.7%)
23–24	111.31 ± 0.35 pMC	Poz-100307	<i>Sphagnum</i> stems	2002–2005 (92.7%)
33–34	123.28 ± 0.41 pMC	Poz-93418	<i>Thelypteris palustris</i> – leaves, <i>Carex paniculata</i> – 2 fruits, <i>Lycopus europaeus</i> – 1 seed	1956–1958 (6.5%)
41–42	148.51 ± 0.61 pMC	Poz-100308	<i>Comarum palustre</i> – 40 fruits, <i>Carex paniculata</i> – 10 fruits, <i>Carex nigra</i> – 1 fruit	1988 (88.9%)
50–51	185 ± 30	Poz-93419	<i>Carex lasiocarpa</i> – 2 fruits, <i>Carex flava</i> – 7 fruits Insect wings – 3	1957–1962 (27.4%)
				1978–1991 (68.1%)
				1962–1963 (2.3%)
				1967–1976 (87.9%)
				1650–1694 (20.2%)
				1726–1814 (52.5%)
				1838–1842 (0.5%)
				1852–1868 (1.5%)
				1917 (20.8%)
59–60	125 ± 30	Poz-100309	<i>Scorpidium cossonii</i> stems with leaves	1677–1766 (34.3%)
				1772–1776 (0.9%)
				1800–1895 (45.2%)
				1903–1940 (15.0%)
69–70	95 ± 30	Poz-93420	<i>Carex lasiocarpa</i> – 3 fruits, <i>Carex</i> – 1 fruit	1682–1735 (26.9%)
			Insect wings – 4	1805–1930 (68.5%)
79–80	145 ± 40	Poz-100310	<i>Cicuta virosa</i> – 1 fruit, <i>Carex paniculata</i> – 8 fruits, <i>Epilobium</i> sp. – 6 seeds, <i>Betula</i> sect. <i>Alba</i> – 1 fruit	1666–1784 (44.2%)
				1796–1893 (34.1%)
				1906 (17.1%)
90–91	215 ± 30	Poz-93421	<i>Pinus sylvestris</i> – 1 seed, <i>Menyanthes trifoliata</i> – 3 seeds, <i>Carex lasiocarpa</i> – 1 fruit	1644–1684 (33.0%)
				1735–1806 (46.7%)
				1931 (15.7%)
98–99	230 ± 30	Poz-100311	<i>Scorpidium cossonii</i> stems with leaves, <i>Carex lasiocarpa</i> – fruit, <i>Menyanthes trifoliata</i> – 2 seeds	1530–1538 (0.9%)
				1635–1684 (44.7%)
				1736–1805 (39.2%)
				1935 (10.6%)
109–110	320 ± 30	Poz-100312	<i>Scorpidium cossonii</i> stems with leaves, <i>Carex</i> sp. – 2 biconvex fruits, <i>Carex rostrata</i> – 2 fruits, <i>Meesia triquetra</i> – stems with leaves	1482–1646
119–120	260 ± 30	Poz-103686	<i>Carex rostrata</i> – 2 fruit, <i>Carex</i> sp. – fruits, <i>Menyanthes trifoliata</i> – 1 seed; 0.5 mg of carbon	1520–1593 (28.3%)
				1618–1670 (53.1%)
				1780–1800 (12.3%)
				1943 (1.6%)
129–131	460 ± 30	Poz-103602	<i>Carex rostrata</i> – 2 fruits, <i>Carex</i> sp. – fruits, <i>Menyanthes trifoliata</i> – 2 seeds	1412–1468
141–143	1060 ± 40	Poz-103687	<i>Betula pubescens</i> – 1 fruit scale +1 fruit, <i>Pinus sylvestris</i> – 1 bud scales, insect wing; 0.11 mg of carbon; outlier excluded from the model	892–1028
147–149	855 ± 30	Poz-103603	<i>Betula</i> sect. <i>albae</i> – 7 fruits and 3 fruits scales, <i>Pinus sylvestris</i> – periderm +5 bud scales	1050–1083 (7.4%)
				1126–1135 (1.1%)
				1150–1258 (86.8%)
158–160	920 ± 30	Poz-106669	<i>Betula</i> sect. <i>Alba</i> – 6 fruits and 4 fruits scale, <i>Pinus sylvestris</i> – 2 bud scales +1 seed	1050–1083 (7.4%)
				1126–1135 (1.1%)
				1150–1258 (86.8%)
166–168	1005 ± 35	Poz-106715	<i>Betula pubescens</i> – 3 fruit scales and 1 fruit, <i>Menyanthes trifoliata</i> – 1 seed, 0.55 mg of carbon	972–1054 (70.2%)
178–181	1220 ± 35	Poz-110255	<i>Betula pubescens</i> – 1 fruit scale and 1 fruit, <i>Betula</i> sect. <i>Alba</i> – 4 fruits, <i>Menyanthes trifoliata</i> – 1 seed, 0.15 mg of carbon	1077–1154 (25.2%)
				688–752 (23.6%)
				758–889 (71.8%)

4.3. Pollen, non-pollen palynomorphs, and micro- and macrocharcoal

A total of 171 samples with a volume of 2 cm³ were used for pollen analysis. The samples were treated with 10% HCl to dissolve carbonates, heated in 10% KOH to remove humic compounds, and soaked in 40% HF for at least 24 h to remove the mineral fraction, followed by acetolysis (Berglund and Ralska-Jasiewiczowa, 1986). Then, one *Lycopodium* tablet (9666 spores per tablet; produced by Lund University) was added to the treated samples (Stockmarr, 1971). The prepared pollen slides were examined using a Zeiss Axio Scope A1 upright microscope until a sum of at least 500 arboreal pollen (AP) grains was reached (except for samples at the depths of 15.5, 20.5, 25.5, 30.5, 52.5, 53.5, 56.5 and 61.5 cm, where pollen concentration was low, average 197 AP). Pollen taxa were identified using atlases (Beug, 2004; Moore et al., 1991) and the

reference slide collection of modern pollen grains, at the Institute of Geocology and Geoinformation, Adam Mickiewicz University, Poznań. The selected NPPs, e.g. coprophilous fungi (used to reconstruct local presence of herbivores and pastoral activities, summarized in Shumilovskikh and van Geel, 2020), and microscopic charcoal (size fractions: 10–100 µm) were counted on the same slides as pollen grains. Pollen percentages were calculated according to the formula: taxon percentages = (number of taxon grains/TPS) × 100%, where TPS indicates the total pollen sum including the AP and non-arboreal pollen (NAP) taxa, and excluding the local taxa (i.e. aquatic, wetland, and spore-producing plants and NPPs). Palynological indicators of human impact were classified according to Behre (1981), Gaillard (2013), and Poska et al. (2004) (Table 2). Microscopic charcoal particles (size: 10–100 µm) were counted together with *Lycopodium* spores until their number exceeded 200 (Finsinger and Tinner, 2005; Tinner and Hu, 2003).

Macroscopic charcoal analysis was carried out using the method described by [Whitlock and Larsen \(2001\)](#). The macroscopic charcoal particles (size: >100 µm) were counted under a stereoscope at a magnification of × 40. Microscopic and macroscopic charcoal influxes (MIC and MAC, respectively; expressed as particles/cm²/yr) were calculated using the charcoal concentrations and the peat accumulation rate obtained from the age–depth model.

4.4. Plant macrofossils

Plant macrofossils were analyzed at 1-cm intervals (if the peat was not utilized for other analyses). The sample volume was approximately 10 cm³, and a total of 167 samples were analyzed. The samples were washed and sieved under warm running water using 0.2-mm mesh screens. The carpological and vegetative remains (leaves, rootlets, and epidermis) were identified with a stereomicroscope using available keys ([Grosse-Brauckmann, 1972, 1974](#); [Mauquoy and Van Geel, 2007](#)). The volume percentages of the different vegetative remains, brown mosses, and *Sphagnum* taxa were estimated and rounded to the nearest 5%. The relative proportions of the taxonomic sections of *Sphagnum*, which is of key importance for the interpretation, were estimated under the microscope, based on branch leaves. Therefore, the identification of the *Sphagnum* to the species level was performed separately and was based on the stem leaves using appropriate guides for identification ([Hölzer, 2010](#); [Laine et al., 2009](#); [Lange, 1982](#)). The nomenclature of moss followed [Ochyra et al. \(2003\)](#), and that of the vascular plants followed [Mirek et al. \(2002\)](#).

4.5. Archeological and historical sources

Archeological and written sources were used for the analysis of historical data. The former were retrieved from the Polish Archeological Record (Archeologiczne Zdjęcie Polski in Polish; [Mazurowski, 1980](#)) and included information about inhabited zones (signs, points, and settlements) in the 5-km radius from the Kazanie mire. These sources were analyzed using quantitative methods (Supplementary Data 1). Among the written sources used, the most important were the manuscript and printed inventories of

the Pobiedziska crown estate and the manuscripts of tax registers from the 16th to 18th century. On their basis the arable land area and population in the late Middle Ages and early modern times were estimated.

4.6. Statistics and visualization

The results of each analysis were plotted in diagrams using the TILIA Graph program ([Grimm, 1987](#)). For better organization of the results' description, they were divided into phases based on pollen data. To aid this, we used the ConsLink method ([Gordon and Birks, 1972](#)), the results of which were drawn using the POLPAL software ([Nalepka and Walanus, 2003](#)). Statistical analysis was performed using the R environment (version 3.6.0; [R Core Team, 2018](#)). Nonmetric multidimensional scaling (NMDS) was used to determine the vegetation pattern (pollen and coprophilous fungi) with the package *vegan* ([Oksanen et al., 2017](#)). MIC and MAC were projected on the NMDS using the *envfit* function. NMDS was calculated using Bray–Curtis distances (see 5.2.2).

5. Results and interpretation

5.1. Chronology and peat accumulation rate

The results showed that ²¹⁰Pb and ¹⁴C chronologies were consistent after the employment of two models (Constant Flux Constant Sedimentation CF/CS and Constant Rate of Supply CRS) and correction for the lower part of the ²¹⁰Pb dated profile (Supplementary Data 2). ²¹⁰Pb dating revealed that the peat section 0–50 cm was accumulated in 73 years, which corresponds to an average linear accumulation rate of 0.79 ± 0.09 cm/yr and mean mass accumulation rates of 0.062 ± 0.007 g/cm²/yr. The mean annual flux obtained for this peat core was 169 ± 16 Bq/m²/yr and agreed well with ²¹⁰Pb flux reported by [Baskaran \(2011\)](#), who estimated the value 155 ± 75 Bq/m²/yr for the latitude belt 40–50 N. The lack of substantial differences between both methods of dating justified the application of absolute chronology based on the Bayesian age–depth model constructed from ¹⁴C AMS dates for further description and interpretation of results.

Table 2

Pollen and non-pollen palynomorph taxa used as land-use and habitat indicators presented in the palynological diagrams (a) and used in non-metric multidimensional scaling (NMDS) (b). The minor and major ruderals in the NMDS analysis were combined into ruderals. The classes of the land-use category were simplified, after [Behre \(1981\)](#), [Gaillard \(2013\)](#), and [Poska et al. \(2004\)](#).

Land use category	Indicator taxa
Meadows and pastures ^{a,b}	<i>Calluna vulgaris</i> , <i>Campanula</i> type, <i>Centaurea jacea</i> type, <i>Cirsium/Carduus</i> , <i>Dianthus</i> type, <i>Epilobium</i> type, <i>Filipendula</i> , <i>Hypericum perforatum</i> type, <i>Jasione</i> type, <i>Linum catharticum</i> type, <i>Lotus</i> type, <i>Lysimachia vulgaris</i> type, <i>Lythrum</i> , <i>Mentha</i> type, <i>Plantago lanceolata</i> , <i>Poaceae undiff.</i> , <i>Potentilla</i> type, <i>Ranunculus acris</i> type, <i>Ranunculaceae undiff.</i> , <i>Thalictrum</i> , <i>Trifolium pratense</i> type, <i>Trifolium repens</i> type, <i>Valeriana officinalis</i> type, <i>Veronica</i> type, <i>Vicia</i> type,
Ruderals (minor) ^{a,b}	<i>Agrimonia</i> , <i>Anthemis</i> type, <i>Brassicaceae</i> , <i>Euphorbia</i> , <i>Plantago major</i> , <i>Plantago media</i> , <i>Polygonum aviculare</i> type, <i>Polygonum persicaria</i> type, <i>Rumex acetosa</i> type, <i>Rumex cf. obtusifolius</i> , <i>Scleranthus perennis</i> , <i>Spergularia</i> , <i>Urtica</i> , <i>Verbascum</i> type,
Ruderals (major) ^{a,b}	<i>Artemisia</i> , <i>Ambrosia artemisiifolia</i> type, <i>Chenopodiaceae</i> ,
Cultivated land ^{a,b}	<i>Agrostemma githago</i> , <i>Avena</i> type, <i>Centaurea cyanus</i> , <i>Cerealia</i> type, <i>Fagopyrum esculentum</i> type, <i>Hordeum</i> type, <i>Papaver rhoeas</i> type, <i>Phacelia cf. tanacetifolia</i> , <i>Secale cereale</i> , <i>Spergula arvensis</i> type, <i>Triticum</i> type, <i>Zea mays</i> cf.,
Woody ^a	<i>Digitalis</i> , <i>Dryopteris filix-mas</i> , <i>Lysimachia nemorum</i> type, <i>Mercurialis perennis</i> , <i>Polypodium vulgare</i> , <i>Stellaria holostea</i> , <i>Hepatica</i> type,
Other open areas ^{a,b}	<i>Apiaceae</i> , <i>Aster</i> type, <i>Galium</i> type, <i>Caryophyllaceae</i> , <i>Cerastium</i> type, <i>Cichoriaceae</i> , <i>Pastinaca</i> type, <i>Rosaceae undiff.</i> , <i>Silene</i> type,
Wetland ^{a,b}	<i>Alisma</i> type, <i>Caltha</i> type, <i>Cyperaceae</i> , <i>Drosera rotundifolia</i> , <i>Lysimachia thyrsiflora</i> type, <i>Menyanthes trifoliata</i> , <i>Parnassia palustris</i> , <i>Scheuchzeria palustris</i> , <i>Sparganium</i> type, <i>Swertia perennis</i> type, <i>Thelypteris palustris</i> , <i>Typha angustifolia</i> , <i>Typha latifolia</i> ,
Coprophilous taxa ^{a,b}	<i>HdV-262 Arnium imitans</i> type, <i>HdV-261 Arnium</i> type, <i>HdV-112 Cercophora</i> type, <i>HdV-172 Coniochaeta lignaria</i> , <i>HdV-368 Podospora</i> type, <i>HdV-55 A Sordaria</i> type, <i>HdV-205 Sordariaceae</i> , <i>HdV-55 B Sordariaceae/Sordaria</i> , <i>HdV-113 Sporormiella</i> sp.,
Aquatic ^{a,b}	<i>Callitricha palustris</i> type, <i>Hottonia palustris</i> , <i>Lemna</i> type, <i>Nymphaea alba</i> , <i>Nuphar lutea</i> , <i>Pediastrum</i> , <i>Potamogeton</i> , <i>Spirogyra</i> , <i>Utricularia</i> ,
Ferns, bryophytes and hornworts ^a	<i>Anthoceros</i> , <i>Filicales monoletae</i> , <i>Ophioglossum</i> , <i>Sphagnum</i>

The investigated sequence spans ca. 1180 years between 835 ± 40 cal. yr and 2016 ± 1 cal. yr. The age–depth model revealed a reliable model agreement index (A_{model}) equal to 89.9% (Fig. 2). The average temporal resolution was 7 years per sample. The σ error of the modeled age ranged between ca. 1 and 45 years. The sediment accumulation rate (SAR) is 0.07–1.2 cm/yr, which indicates that the age of analyzed samples ranged from 0.8 to 14.5 years. The highest SAR was recorded at 34.5–1 cm (0.85–1.2 cm/yr), whereas in the other parts of the profile, the maximum SAR was 0.45 cm/yr.

5.2. Forest and peatland ecosystem changes

5.2.1. Synthesis of pollen, NPPs, plant macrofossils and charcoal data

Pollen, spores, NPPs, and micro- and macrocharcoal data are shown in Figs. 3 and 4, as well as in Supplementary Data 4. The vegetation changes were distinguished into six phases. Based on the macrofossils, the data were divided into three common phases of different ecosystem stages, representing a shift from a shallow lake to a poor fen habitat (Fig. 4).

Phase I, *Carpinus*–*Quercus*, 840 ± 40 – 1035 ± 20 cal. yr

During this stage, the local vegetation consisted mainly of temperate deciduous or mixed forest. This is indicated by a high relative abundance of *C. betulus* (14–20%) and *Quercus* pollen (10.6–17.5%, most likely *Q. robur*). The percentages of *Tilia cordata* (0.4–1.8%) and *F. sylvatica* (0.4–2.1%) suggest that they were also present in the local forests (cf. Huntley and Birks, 1983). *Corylus avellana* occurred (1.4–5.3%) in the understory. The low percentages of *P. sylvestris* in the pollen spectra (5–11.5%) suggest that pine was probably an admixture (Szczepanek et al., 2017). Birches (*B. pendula* and *Betula pubescens* macrofossils; pollen: 18.5–30.5%) were important constituents of the forest and probably occurred in the forest gaps and outskirts, and in wetlands. Inundated habitats were occupied by *A. glutinosa*/*A. incana* (14.5–21.5%). The other taxa, *Ulmus* and *Fraxinus excelsior*, might have been additional components of wet habitats. The continuous presence of agriculture is visible from the beginning, as indicated by the pollen of cultivated land taxa, mainly *Cerealia* type (0.2–1.1%) and *Secale cereale* (0.3%). The meadow and ruderal communities were important components in the vicinity of the lake, indicating the anthropogenic influence on vegetation. Fire activity recorded by MIC (an indicator of regional fires) and MAC (an indicator of local fires) remained low (797–1957 and 0–1.8 particles/cm²/yr, respectively). The presence of plant macrofossils of *Najas marina*, *Nymphaea alba*, and *Nuphar lutea* indicates that the water was shallow, eutrophic, and rich in calcium carbonate at that time (Gaika, 2014; Zarzycki et al., 2002).

Phase II, *Betula*–*Quercus*–*Carpinus*, 1035 ± 20 – 1380 ± 25 cal. yr

The most distinct decline in the relative abundance of *C. betulus* pollen (from 18% to 5.4%), as well as a lower decrease of *C. avellana* and *Ulmus*, at 1035 ± 20 cal. yr indicate selective logging. In the subsequent period (next 50 years after logging), a distinct spread of *Alnus* (up to 30%), followed by *Betula* (up to 48%), was recorded. Between 1035 ± 20 cal. yr and 1130 ± 25 cal. yr, higher pollen percentages and more abundant macrofossils of *Betula* were identified, which also points to the local succession of birches, possibly on previously deforested and abandoned land. Then, *Betula* gradually declined (to 19%) together with a gradual increase of *P. sylvestris* (to 31%). During this phase, there was a mixed forest with *C. betulus*, *Quercus*, *F. sylvatica*, and *C. avellana*, as well as *Alnus* in wetlands. The pollen percentages of main ruderal indicators (*Chenopodiaceae*, *Artemisia*, and *Rumex acetosa* type), as well as meadow and pasture indicators (*Poaceae* and *Plantago lanceolata*), remained at a similar level as in Phase I. A visible increase in the

proportion of cultivated land taxa was noted between 1130 ± 25 cal. yr and 1240 ± 25 cal. yr, which suggests the spread of agriculture in the lake vicinity (Fig. 3). This phase was also characterized by low fire activity (MIC: maximum 1780 particles/cm²/yr; Fig. 3), while the MAC values were similar to that of the previous phase.

Phase III, *Pinus*–*Betula*–*Quercus*, 1380 ± 25 – 1620 ± 20 cal. yr

During this phase, the landscape openness increased, as indicated by the decline of several deciduous taxa (*Betula*, *Alnus*, *C. betulus*, *Quercus*, *F. sylvatica*, *T. cordata* and *F. excelsior*), except for *C. avellana* and *Ulmus* (their percentages increased slightly or remained unchanged), and the increase in *Poaceae*, as well as anthropogenic indicators. The considerable increase in the percentages of cultivated land (1.4–4.2%) and ruderal taxa (2.7–7%) indicates agricultural and settlement transformations (Fig. 3). The oak–hornbeam forest was gradually replaced by *P. sylvestris* (maximum 63%) forest. From 1450 ± 15 cal. yr to 1580 ± 20 cal. yr, a noticeable increase in MIC was recorded, which reached a maximum of 2871 particles/cm²/yr in 1570 ± 20 cal. yr. Afterward, a sharp decline in MIC was observed, which lasted until the end of the phase. Contrary to MIC, no increase was observed in MAC, and it remained low (<1 particle/cm²/yr) throughout the phase. The appearance of *Carex rostrata*, followed by *Menyanthes trifoliata* remains (from 1400 ± 20 cal. yr and 1430 ± 15 cal. yr, respectively), suggests the shallowing of the water body and fen development. The transitional period between the shallow lake and rich fen lasted from 1520 ± 20 cal. yr to 1580 ± 20 cal. yr, as indicated by the presence of both aquatic species, such as *N. alba*, *Najas marina*, and *Characeae*, and rich fen species, such as *Scorpidium cossonii*, *Meesia triquetra*, and *Pseudocalliergon trifarium* (Fig. 4).

Probably, this transition was the result of progressing clearance recorded during this phase and the subsequent water table decrease. Deforestation and water table decline could contribute to a change in the size of the pollen source area that possibly reflected a regional signal from the mid-16th century. Due to the considerable landscape openness during this phase and the localization of the fen in depression (Fig. 1), the soil could erode and enter the lake/fen which was manifested by increase in percentages of unidentified corroded pollen grains (Supplementary Data 4).

Phase IV, *Pinus*, 1620 ± 20 – 1800 ± 40 cal. yr

This period was characterized by a rapid spread of Scots pine (pollen 44.5–92.5%), with a simultaneous decline of deciduous trees (Fig. 4). For the first time in the pollen spectra, *C. betulus* (0–3.7%) and *F. sylvatica* (0–0.7%) almost disappeared, while the values of *Quercus* (0.6–6.4%) distinctly decreased, which implies continuous degradation of the fertile oak–hornbeam forest. Moreover, the pollen of cultivated land, ruderal, and meadow, as well as pasture indicators (mostly *Poaceae*) rapidly declined, which points to weaker human impact. This is also evidenced by the simultaneous decline of MIC, which lasted until the end of the phase. However, high values of MIC were recorded in 1715 ± 40 cal. yr and 1770 ± 45 cal. yr. During this phase virtually no microcharcoal particles were recorded, which is reflected by the maximum values of 1 particle/cm²/yr.

The disappearance of aquatic pollen and increase of Cyperaceae, together with the rise in the Cyperaceae rootlets, indicate terrestrialization of the lake. The rapid spread of *S. cossonii* from the beginning of the phase was accompanied by the appearance of calcium carbonate-related rich fen vegetation (Štokmane and Cera, 2018). During this period, the remains of rich fen species, such as *M. triquetra*, *P. trifarium*, *Bryum pseudotriquetrum*, and *Calliergon cordifolium*, were identified.

Phase V, *Pinus*–NAP, 1800 ± 40 – 1910 ± 15 cal. yr

P. sylvestris considerably declined, with a simultaneous dynamic spread of cultivated land taxa (1.3–29%), ruderals (0.5–9.4%), and

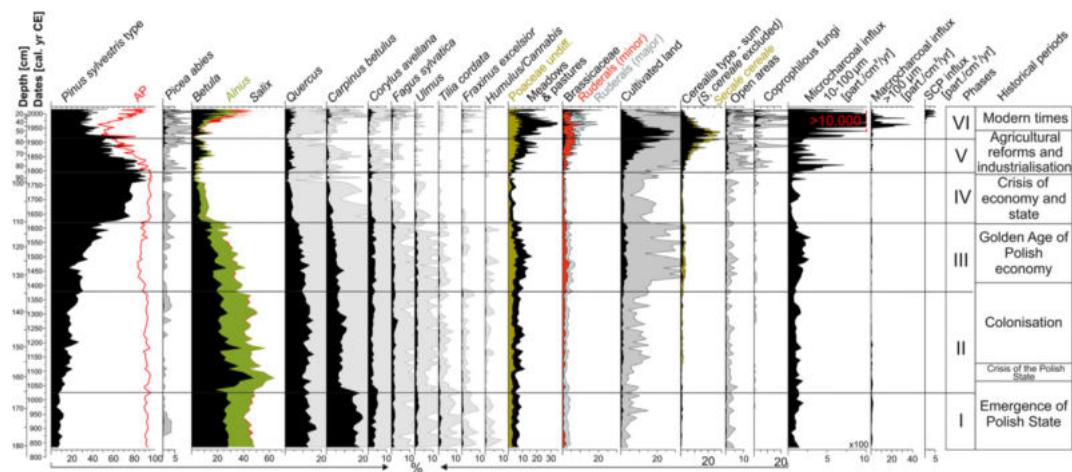


Fig. 3. Diagram of selected pollen taxa, NPPs, and microscopic and macroscopic charcoal influx (MIC and MAC, respectively).

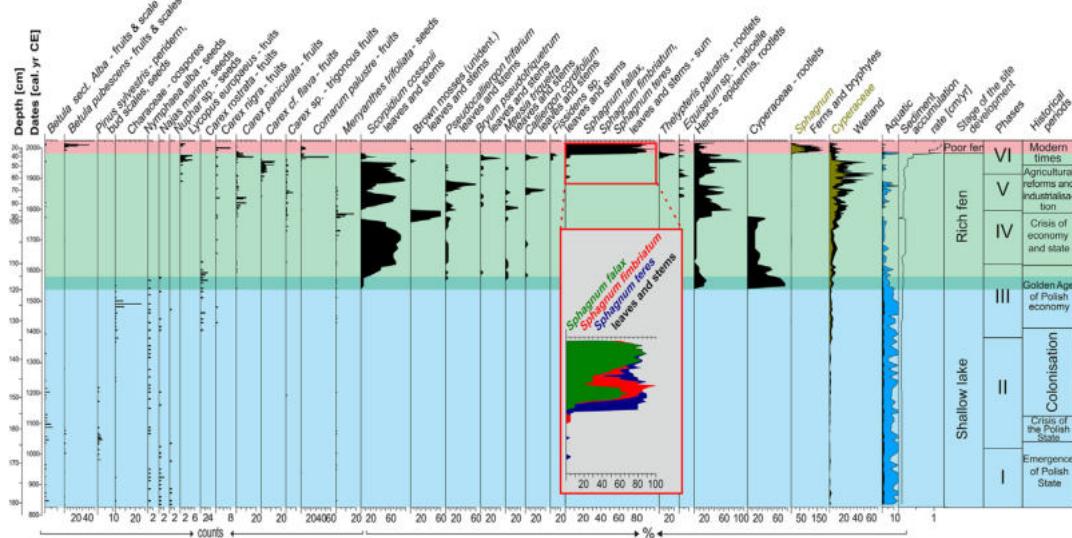


Fig. 4. Diagram of selected plant macrofossils and pollen.

other open area indicators. The short-term regeneration of *Betula* and *Quercus* was followed by their decline at the end of the phase. The more regular and frequent occurrence of coprophilous fungi spores and the increased values of the meadow, as well as pasture indicators (2–12%) suggest the alteration of pastoral and agricultural methods (Fig. 3). Since the beginning of the phase, the MIC increased rapidly, reaching the peak value ($7182 \text{ particles}/\text{cm}^2/\text{yr}$) in $1820 \pm 30 \text{ cal. yr}$. This was followed by a gradual drop in its value until the end of the phase. The MAC increased slightly to a maximum of $7 \text{ particles}/\text{cm}^2/\text{yr}$. During this phase, the increase of Cyperaceae continued, which suggests further terrestrialization of the lake. The presence of *N. alba* may indicate temporal inundations and/or proximity of the terrestrializing lake.

Phase VI, NAP–*Betula*, $1910 \pm 15–2016 \pm 1 \text{ cal. yr}$

This phase is characterized by forest regeneration, which is indicated by the rise of all tree taxa, except for *P. sylvestris*. An increase of *P. abies* at the beginning of the phase, and later of *C. betulus*, *Quercus*, and *F. sylvatica*, suggests forestry practices and/or forest regeneration. After the short-term decrease of cultivated land indicators during $1915 \pm 15–1920 \pm 15 \text{ cal. yr}$, then the sharp rise (0.6–29.5%) was recorded, which demonstrates extensive crop

cultivation. A later decrease in cultivated plants and meadow and pasture indicators (0–26.9%), as well as increase in coprophilous fungi (0–12%), points to more efficient methods of crop cultivation and animal husbandry. Moreover, within the ruderal communities, Brassicaceae became important (0–4.5%). A higher abundance of MAC (together with increased MIC) was recorded between $1950 \pm 5 \text{ cal. yr}$ and $1980 \pm 5 \text{ cal. yr}$ (maximum $37.5 \text{ particles}/\text{cm}^2/\text{yr}$), which suggests higher fire activity and/or wood utilization in the local and regional scale. After $1990 \pm 1 \text{ cal. yr}$, the MIC and MAC distinctly decreased, which signifies declined fire activity and/or decreased household emission. The occurrence of *Thelypteris palustris* and *Lycopus europaeus* from $1970 \pm 5 \text{ cal. yr}$, as well as the decrease of *S. cossonii*, could indicate the lowering of the fen water table (Fig. 4). From that time, a rapid spread of *Sphagnum* species (*S. fallax*, *S. centrale*, *S. teres*, and *S. fimbriatum*) near the coring area has been recorded.

5.2.2. Statistical data

The NMDS analysis showed low-stress values (0.126) for the two-dimensional solution and revealed the clusters of pollen taxa that closely resemble the natural oak–hornbeam forest and the

open landscape degraded by human impact (Fig. 5). A positive (weak) correlation was found between MIC, MAC, and human indicator (0.3051 and 0.1638, respectively; $p = 0.001$), which might suggest that the fires could be of anthropogenic origin.

6. Discussion: paleoecological data versus historical sources

6.1. Early medieval critical transition in greater Poland

The scarcity of cultivated and ruderal plants indicates that the forest was probably insignificantly affected by humans in the early phases of tribal Slavic occupation (up to the 10th century). A significant increase in the number of ceramic materials from the late 10th century, which were found near the studied fen, is attributed to intensifying settlement (Supplementary Data 1). Kurnatowska and Kurnatowski (1991) noted a threefold increase in the total number of sites and a fourfold increase in the number of settlement traces dated back to the beginning of Piast dynasty (10th–11th century) in the direct vicinity of Lake Lednickie, located 9 km from the Kazanie mire. The archeological findings agree well with the decline of *C. betulus*, *C. avellana*, and *Tilia* pollen at 1035 ± 20 cal. yr, indicating selective logging. The minimal proportion of the hornbeam timber within the analyzed group of medieval wooden artifacts found in Ostrów Lednicki (Stepniki, 1996), as well as the widespread use of hornbeam as a fuel in the Middle Ages in Poland (Cywa, 2017), could partly explain the selective logging of this species near the site in the 11th century. The rapid decline of hornbeam is associated with pronounced human impact and was recorded in Greater Poland (Makohonienko, 2000), Polish lowlands (Lamentowicz et al., 2019; Wacnik et al., 2016), and Central Europe (Ralska-Jasiewiczowa et al., 2003; Zolitschka et al., 2003). In the second half of the 10th century, the settlement range was probably concentrated only around Lake Lednickie and larger centers (Kurnatowska and Kurnatowski, 1991). Therefore, we can assume that the time of hornbeam and subsequent hazel declines is a feature of the economic expansion outside the main centers of statehood, such as Ostrów Lednicki, Poznań, and Gniezno. Furthermore, this date marks the degradation of the pristine oak–hornbeam forest, which probably occurred near the site from the end of the Migration Period (cf. Ralska-Jasiewiczowa et al., 2003).

The dendrochronological and archeological analyses revealed that the second half of the 10th century is marked by the development of Ostrów Lednicki and the surrounding gords (gród in Polish) (Kara and Makohonienko, 2011; Krąpiec, 1998; Schubert, 2003; Trzeciecki, 2016). Data from the Ostrów Lednicki island (one of the main defense and administrative centers of early medieval Poland) and other strongholds in Greater Poland revealed substantial utilization of oak woods in 950–1050 (Dzieduszycki, 1976; Krąpiec, 1998; Kurnatowska, 2011). Krąpiec (1998) indicated that this additional demand for oak forced its import from distant areas that are situated even >100 km away, due to the regional shortage. Trzeciecki (2016) even suggested that the entire belt between Poznań and Gniezno (approximately 45 km) was deforested. Our study revealed the local stable presence of oak in the forest in this area, at least in the vicinity of Pobiedziska, where it remained an important forest-forming taxon until the 16th century (Figs. 3 and 6). The relatively high pollen percentages of *Quercus* (approximately 10%) in the 10th–11th century were also recorded in Lake Lednicka and the surrounding sites (Makohonienko, 1991, 2000; Tobolski, 1990), which again contradicts the conclusion about complete deforestation in the Poznań–Gniezno region at that time. However, these studies lack a sufficient number of ^{14}C dates to precisely refer to their chronologies. Krąpiec (1998) also pointed out that wood used for constructing defensive structures

should be characterized by parameters such as straight trunks, appropriate length, and relatively narrow diameter. Therefore, selective oak deforestation could have possibly occurred in the region, but it did not significantly influence the local oak population and thus the pollen signal.

6.2. Bretislav's invasion of greater Poland (1039) and the following socioeconomic collapse

In 1039, Greater Poland was destroyed by the invasion commanded by the Czech Prince Bretislav, who made use of the anarchy prevailing in Poland at that time. As a result, the episcopal headquarters in Gniezno, Poznań, and Ostrów Lednicki were destroyed and “wild animals built their lairs in churches” (Anonymous, 1952). The political crisis in the mid-11th century probably accounts for the decrease in archeological findings near the Kazanie mire from the 12th and early 13th century (Supplementary Data 1). Simultaneously, a decline in ruderal and cultivated land taxa, as well as a rapid increase in the pollen percentages of *Betula* (to 48%), was recorded in the Kazanie profile from 1045 ± 25 cal. yr to 1120 ± 25 cal. yr (Fig. 3). The secondary succession, with the dominance of *Betula*, resulted from the increasing human impact that ceased after Bretislav's invasion, but the spread of *Betula* might have been caused by the abandonment of the open land for a period of ca. 75 years. According to Makohonienko et al. (2011a), the effect

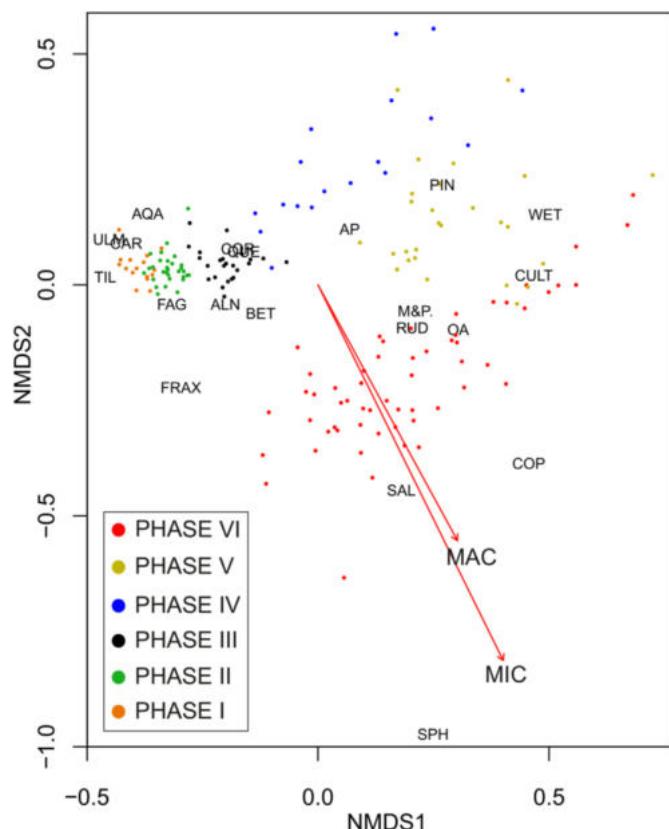


Fig. 5. Non-metric multidimensional scaling (NMDS) diagram for Kazanie fen. The results of the NMDS analysis are divided into six phases corresponding to LPAZ. Microcharcoal influx (MIC) and macrocharcoal influx (MAC) vector is projected on the ordination space. Abbreviations: TIL—*Tilia*, ULM—*Ulmus*, CAR—*Carpinus betulus*, AQA—aquatic, FAG—*Fagus sylvatica*, ALN—*Alnus*, FRAZ—*Fraxinus excelsior*, COR—*Corylus avellana*, QUE—*Quercus*, BET—*Betula*, AP—arboreal pollen, PIN—*Pinus sylvestris* type, WET—wetland, CULT—cultivated, M&P—meadows and pastures, RUD—ruderals, OA—open areas, SAL—*Salix*, COP—coprophilous fungi, and SPH—*Sphagnum*.

of the invasion, manifested as a decrease in anthropogenic indicators was also noticed in Gniezno. However, in that study, the lower sample resolution and the lack of ^{14}C dates make the precise assignment of environmental changes to specific palynological events speculative.

Historical sources indicate that the settlement network, within a radius of 5 km from the site, was formed after the Czech invasion and consisted of 21 settlements. In 1170, the first villages (Górki and Jagodna, located 3 and 5 km from the study site, respectively) were formed, but the rest of the settlements appeared later in the historical sources, from the 13th to 15th century (Fig. 1). Interestingly, this date (1170) coincides with the spread of *Betula*, probably at the expense of *Quercus* (Fig. 3). However, a noticeable increase in the proportions of cultivated land taxa pollen suggests that the settlement around the Kazanie mire was established earlier (1120 ± 25 cal. yr; Figs. 3 and 6). This shows that the local economy returned to the level from before Bretislav's raid in ca. 80 years. Most of the villages were probably founded under the Polish law, and with time, they were reorganized according to the German law. The new rules introduced were connected with e.g. new agricultural tools, such as heavy ploughs and iron harrows, and new organization of farming (i.e. three-field crop rotation) (Burszta, 1959; Gąsiorowski, 1969; Guzowski, 2014; Stefański, 1971). This increased agricultural productivity and contributed to population growth. The settlement under the German law in Greater Poland developed in the most populated areas in the 13th and 14th century (Hładyłowicz, 1932). At the same time, there was only a small decrease in deciduous oak–hornbeam forest taxa. This could possibly indicate that, despite the transformation of the forest into managed woodland, the local population was founding settlements in previously deforested areas, without further rapid logging, at least until the end of the 13th century. These processes probably intensified after the Teutonic Knights invasion in 1331, which was associated with the destruction of the Pobiedziska town and the surrounding villages (e.g. Polska Wieś, Pomorzan), as testified by the witnesses from Pobiedziska at the Polish–Teutonic Knights trial in 1339 (Lites, 1890), preceding the period of high economic development in the 15th and 16th century in Greater Poland.

6.3. Economic prosperity between the 15th and 16th century

The economic breakthrough is visible in both palynological data and historical sources. An increase in the pollen of cultivated plants indicates the rapid development of agriculture at 1420 ± 20 cal. yr, which lasted up to 1620 ± 20 cal. yr (Fig. 3). The spread of ruderal taxa was recorded even earlier, at ca. 1380 ± 25 cal. yr. The presence of microcharcoal during this period, especially in the 15th century, suggests fires could be an indirect indicator of the economic activity, as well as population growth in the nearby villages (Conedera et al., 2009). The intensification of agricultural processes led to a higher landscape openness in the 15th and 16th century. Scots pine took advantage of this transformation. It spread in the landscape, where it may have constituted an increasingly common regional component and occurred in the disturbed forest areas and/or on infertile soils (Houston Durrant et al., 2016). The above-described changes confirm that economic activity was the predominant driver of the environmental changes occurring then, which is also evident in the available historical sources. The tax records and descriptions of royal estates reveal that in the middle of the 16th century, when the settlement structure was already formed, there were 20 villages and one town (Pobiedziska) around the site, with about 950 and 1100 inhabitants, respectively. Peasants cultivated about 2000 ha of land, from the middle of the 15th century, while large agricultural and livestock farms developed in this area. On the other hand, the percentages of Poaceae pollen increased, which

may have been associated with greater role of open meadows and pastures outside the immediate catchment (Łatalowa et al., 2015).

The development of livestock farms is not confirmed by the presence of coprophilous fungi sporadically recorded in this period, but this may be related to taphonomical issues (Davies, 2019). Moreover, at least four royal and an unknown number of private manor farms were producing grain to meet the needs of the expanding market. Indirectly, the growing importance of the grain economy in Greater Poland is reflected by the export along the Warta River and Oder River to Frankfurt and Szczecin (Chojnicka, 2007), and the Vistula River to Gdańsk, which increased significantly in the second half of the 16th century (Samsonowicz, 1974, Fig. 6). The most important crops cultivated in the three-field system were rye and oats, as indicated by the dominance of *S. cereale* pollen type. Rye is always better represented due to the fact that it is the only wind-pollinated cereal (Okuniewska-Nowaczyk et al., 2004; Sillasoo et al., 2009). The first industrial facilities were also built in the area, which included breweries and smithies using local woodland resources for fuel, most probably hornbeam. This may be confirmed by a noticeable increase in MIC in that period. However, this increase could have also been enhanced by the intensified use of firewood as a result of colder winters during the LIA. According to Luterbacher et al. (2010), the following periods were significantly cooler in Poland during the LIA (with anomalies lower than or near 3°C , in regard to the 1901–1960 mean): 1541–1550, 1571–1580, 1591–1600, 1641–1650, and 1651–1660. This corresponds partly to the increased MIC at the Kazanie mire. On the other hand, Przybylak et al. (2020) reported more severe and extreme drought events in Greater Poland in 1551–1600, which points to a significant need for fuel. Moreover, historical sources report that in 1540, there was no rain until the beginning of winter in Greater Poland (Girguš et al., 1965). Brázdil et al. (2020) even suggest that 1531–1540 was the driest summer decade of the past five centuries in Central Europe. Furthermore, the demographic data, albeit limited, show that the population has not changed much in the 16th century.

6.4. Socioeconomic collapse during the 17th and 18th century

The period of prosperity ended in the 17th century due to epidemics that affected Greater Poland and the later crisis related to the devastating Polish–Swedish war (Swedish Deluge) in the years 1655–1660. According to the palynological data, the first signs of large-scale abandonment as a result of depopulation were already recorded at 1620 ± 20 cal. yr, which is mirrored by the rapid decrease in cultivation indicators (4% in 1600 ± 20 cal. yr and 1.6% in 1620 ± 20 cal. yr; Figs. 3 and 6). This early decline (even before the Polish–Swedish war) might be a signal of the epidemic that occurred in Greater Poland in 1624–1625. Using the data on royal estates' inventories, Rusiński (1957) estimated that the decrease in rural population in the Poznań and Kalisz voivodeships (both located in Greater Poland) by ca. 45% and 60%, respectively, in comparison with the prewar situation. In the vicinity of the Kazanie mire, this decrease was even greater. Based on the tax register from 1673, the total population of the 21 nearest villages in the second half of the 17th century can be estimated at 650 people, i.e. 67.5% in comparison to the period a hundred years earlier. The inventory and tax sources indicate that the amount of arable land decreased by 35% over the same period (Górski et al., 1996). The destructive effects of the Swedish–Polish war are well reflected by pollen data, showing a decline in the taxa mostly related to ruderal habitats, meadows, and pasturelands, which remained low for the whole 17th century. Similarly, the values of cereal pollen remained constantly low until the end of the 18th century. This economic crisis was experienced during the LIA when there were prolonged

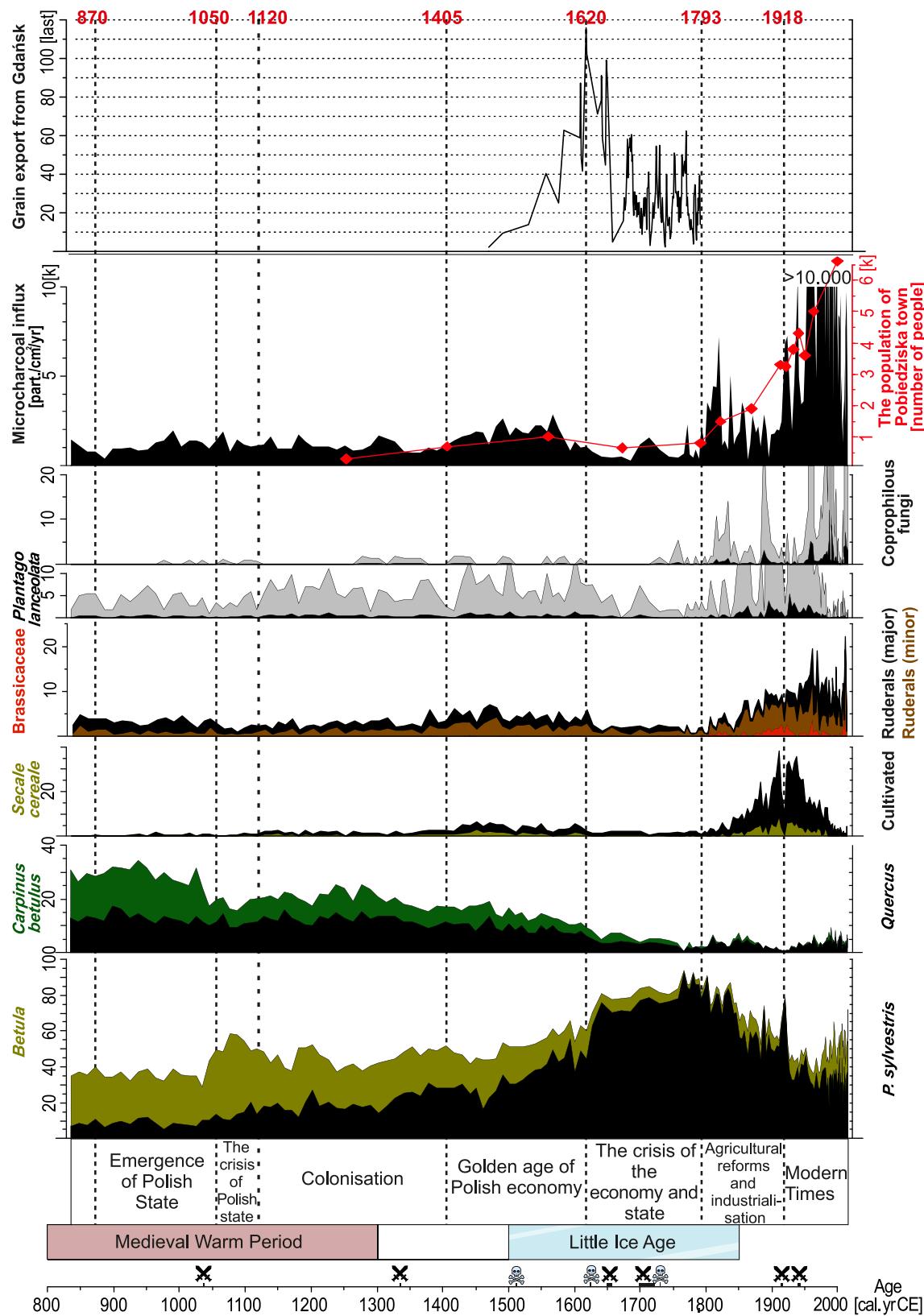


Fig. 6. Simplified human impact diagram from Kazanie and historical periodization in Greater Poland. The population was estimated based on historical sources. Medieval Warm Period (MWP) and Little Ice Ages (LIA) are after Büntgen et al. (2011), Mann et al. (2009), and Neukom et al. (2019). The icons on timescale show the most important historical events in Greater Poland influenced the socioeconomic conditions: 1039—the invasion of the Czech Prince Bretislav I, 1331—the invasion of the knights of Teutonic Order, 1508—the epidemic in Greater Poland, 1624–1625—the epidemic in Greater Poland, 1655–1660—"The Deluge"—Polish-Swedish War, 1700–1721—the Northern War, 1732—epidemic in Greater Poland, 1914–1918—World War I, and 1939–1945—World War II. Grain export statistics (in lasts; a last $\approx 3000\text{--}3840\text{ dm}^3$) from Gdańsk is based on Biernat (1962), Bogucka (1970), and Samsonowicz (1974).

cold winters in Central Europe (Luterbacher et al., 2010). According to Parker (2013), this was one of the crucial determinants of the crisis that occurred in the mid-17th century in Poland. As Haldon et al. (2018) showed, based on the analysis of population and grain export in Poland, the deterioration of the climate conditions during LIA exacerbated the already devastated state of the Polish economy at that time. As Greater Poland was also engaged in export of grain via sea vessels, the macroeconomic data from Gdańsk further revealed that exports fell drastically in the mid-17th century (Biernat 1962; Bogucka, 1970) (Fig. 6).

In contrast to the relatively peaceful last decades of the 17th century in Greater Poland, the beginning of the next century was the time of the Great Northern War and further destruction of the already weakened economy and society by the Saxon, Swedish, Russian, and Polish king troops. The attempts to bring in Silesian, Dutch, and German settlers failed to restore the local economy and population before the beginning of the 19th century (Hładyłowicz, 1932). The effects of these conflicts are revealed by the paleoecological data as well. Until 1800 ± 40 cal. yr, the values of cultivation indicators ranged from 0.6% to 2.1%. The settlement regression is also reflected by the retreat of ruderal taxa, as well as those related to meadows and pastures (Figs. 3 and 6). In addition, this 200-year long crisis seems to be indicated by a decrease in the MIC, resulting from lower fuel consumption by breweries and smithies, and smaller settlement in general. The cessation of human impact probably resulted in the rapid spread of pine on uncultivated fields and fallow land, even in the region. Pine pollen might be overrepresented due to high pollen productivity (Huntley and Birks, 1983), and thus, even small expansion in the vicinity of the site might have created an exaggerated pollen signal. Nonetheless, according to our knowledge, the Kazanie mire is the first to reflect the environmental response to the economic crisis prevailing during the 17th–18th century in Poland.

6.5. Great acceleration in the 19th and 20th century—agriculture regime shift

Abolition of serfdom, arrival of German settlers, and organizational changes in trade (commodity and cooperative exchanges), in the 19th century and at the beginning of the 20th century, contributed to the increase of local agricultural production and population (Frankiewicz, 1991) (Figs. 1 and 6), which is also indicated by the rising values of cultivated land, ruderal, and open area indicators, as well as the MIC. Historical sources point out that agricultural intensification in Greater Poland started most probably in the 1830s, after the series of unfortunate events. Between 1800 and 1808, in the Poznań Department (former administrative entity), the number of horses (which had a crucial importance for the size of cultivated areas) decreased by 41% and oxen by 36% (Borowski, 1963). In 1810 and 1811, the famine caused a surplus of deaths over births, which was associated with the economic recession of Greater Poland and the Napoleonic War (Borowski, 1963). Agrarian crisis related to crop failure and economic stagnation occurred in 1825 (Borowski, 1963). The palynological data indicate a short-term decline in cultivated indicators in ca. 1810 ± 35 – 1820 ± 35 cal. yr (Fig. 3). The later improvement of the economic situation shown by the palynological data is also confirmed by historical sources. In 1810, agricultural area in the Poznań Department comprised about 20% of the land, while in 1864 it was about 70% (Borowski, 1963). The rural population in Greater Poland also increased by as much as about 29% (Borowski, 1962). Compared to the previous years, the period from 1893 to 1913 was characterized by a high growth rate of average yield per hectare (Borowski, 1962), which was probably facilitated by the progressing agricultural mechanization in Greater Poland. This agriculture

development is also reflected by the increase in cultivation indicators from only 3.5% in 1810 ± 35 cal. yr, through 10.2% in 1865 ± 25 cal. yr, to 29.5% (maximum in the profile) in 1940 ± 10 cal. yr. In addition, this development is visible in the rapid increase in human impact indicators and deforestation (Fig. 3).

Deforestation could have been an effect of intensive forest transformations in Greater Poland, which was administrated by Prussians from 1793. Spruce was recorded in the pollen spectra from the beginning of the 19th century and in the early 20th century (Fig. 3), suggesting the planting of Norway spruce (*P. abies*), a common Prussian practice (Broda, 2000). Imprecise cartographic material shows a significant decline in the forest area and defragmentation in the immediate site location (up to about 5 km) between 1830 and 1890 (Macias and Skwarek, 2018). The simultaneous presence of meadow and pasture indicators (mostly Poaceae), as well as coprophilous fungi, suggests the occurrence of open landscape, where animal husbandry or/and grazing took place in very close proximity to the fen (Cugny et al., 2010). The 19th century in Greater Poland was characterized by a rapid increase in livestock. From 1816 to 1913, there was a threefold increase in the number of horses and cattle (Borowski, 1962). The rapid growth of the sheep population from 796,000 in 1816 to 2.63 million (1831–1873) undoubtedly caused an increase in the pasture area (Borowski, 1962). Afterward, the number of sheep decreased to about 250,000 in 1913. This decrease was compensated by a structural change in the livestock population, which was re-oriented toward cattle and pigs from the 1890s (Borowski, 1962). The rise in the number of livestock from 1816 corresponds to the increase in coprophilous fungi, lasting until now. However, the sharp increase in this proxy reflects only the local conditions, and therefore, it is difficult to identify the phases marked by increasing grazing activity on a larger spatial scale (Davies, 2019). The increase in Poaceae pollen percentages may, in turn, be due to progressive plant succession and colonization of peripheral fen fragments by, for example, *Phalaris arundinacea*, which dominates the eutrophic shallow shoreline (Kłosowski and Kłosowski, 2015), or cosmopolitan *P. australis* (Eller et al., 2017).

Our study revealed that World War I caused a short-term decrease in the area of agricultural land. It was the period of the Great Poland Uprising, associated with extensive military operations throughout the region. This period corresponds to the increase in the MIC (Fig. 3), whereas another considerable rise took place during World War II, in 1940 ± 10 cal. yr. Thus, the increase in MIC could be partly related to warfare. An intensification of fires was recorded in the peat layers corresponding to the military conflicts, including World War II and sociopolitical unrest in the Linje mire (Marcisz et al., 2015). A sharp decline in anthropogenic indicators in the Kazanie profile, recorded after 1940 ± 10 cal. yr, resulted from the destructive influence of World War II on the local agriculture. This included population losses related to the extermination of Jews, executions, and mass deportations of the Polish citizens from Pobiedziska, as well as its surroundings (Frankiewicz, 1991) to Germany.

The introduction of crops producing less pollen, such as wheat (*Triticum sp.*), rapeseed, cabbage (Brassicaceae), potatoes (*Solanum tuberosum*), or maize (*Zea mays*), in the vicinity of the site, may also explain the characteristic disappearance of cultivated indicators observed after 1960 ± 5 cal. yr (Fig. 3). Similar changes were recorded on other sites in Poland and associated with the mechanization of agriculture, as well as the spread of fertilizers, herbicides, and drainage (Wacnik et al., 2016). Theuerkauf et al. (2015) showed that in the last century, the NAP deposition (including grasses and herbs) sharply declined in northeast Germany. This was mainly attributed to earlier and more frequent mowing, as well as grass species composition.

The increase in the pollen values of Brassicaceae has been observed since 1820 ± 30 cal. yr, which is interpreted as rape (*Brassica napus*) cultivation. The intensification of rape cultivation in Poland has been recorded since the beginning of the 20th century, which corresponds well with the pollen patterns recorded at the Kazanie site. The rural industrial crisis associated with World War II, during which the German authorities liquidated 341 out of 350 oil mills in Greater Poland, interrupted the development of rape cultivation (Olszański, 1989). Rape gained importance in Poland in the 1960s again (Kapusta, 2015) and in recent years (<https://poznan.stat.gov.pl>, access October 10, 2020). The proportions of Brassicaceae pollen in the Kazanie deposits correspond well with the periods of agricultural intensification and the 1940s crisis related to World War II (Fig. 3). Weisbrodt et al. (2016) also linked a higher proportion of Brassicaceae pollen in other parts of Poland with the spread of rape cultivation in the 1960s. The period since the 1950s is characterized by an intensification of agricultural processes in Greater Poland. Pastures and meadows played a greater role in the landscape than before, and their pollen indicators, together with coprophilous fungi, increased rapidly, especially in the early 1960s. The higher abundance of coprophilous fungi (recorded from 1820 ± 30 cal. yr) could be an effect of intensive field fertilization (Doyen and Etienne, 2017; Graf and Chmura, 2006). An increase in the values of MIC and MAC was also recorded in the $1950s \pm 25$ cal. yr, reaching a maximum at 1985 ± 1 cal. yr. This can be related to industrial production, more so because during this period an increased number of SCPs (spheroidal carbonaceous particles) was recorded (Fig. 3; Swindles et al., 2015). On the other hand, this peak corresponds with the highest percentages of meadow and pasture indicators, which suggests controlled grass burning that were popular across the rural landscape in Poland and forbidden in 1991. During 1980s, the fen was most probably drained, as evidenced by the rapid transition to poor fen conditions with the dominance of *Sphagnum* mosses and the decline of brown mosses. This enabled the colonization of new areas around the site by *Salix*, *Betula*, and *Alnus*. However, the spontaneous reforestation near the site could have been possibly caused by the 1990s crisis, which is related to the change in the Polish economic system, leading to the collapse of the state farms in Greater Poland (Chmielewski, 1992).

7. Conclusions

Our study on the Kazanie fen revealed that the important past political and socioeconomic events were the main catalysts behind the degradation or recovery of vegetation near the study site. These events are reflected by the ecosystem's response to the cessation of man-made transformation. We have provided a new timescale and pieces of evidence for the past environmental landscape transformations in the historical region between Poznań and Gniezno. This is the first high-resolution multiproxy study of the long-term human–vegetation relationships, with the paleoecological inference of the Polish state history. We have showed that:

- The first traces of oak–hornbeam forest degradation occurred in 1035 ± 20 cal. yr and were related to the selective cutting of *C. betulus* and intensification of settlement processes in the Poznań–Gniezno region. Contrary to the previous opinions, we did not find oak clearances or a signal of the complete deforestation in Greater Poland in the 11th century. Moreover, the oak–hornbeam forest persisted near the study site, despite a considerable transformation of the landscape, until the beginning of the 17th century.

- The invasion of the Czech Duke Bretislav in 1039 on Greater Poland probably caused a secondary succession of *Betula* on the abandoned land during the next 80 years. However, the palynological data do not confirm the destruction of Greater Poland reported by the historical sources, but indicate only a short-term (ca. 75 years) crisis.
- The rapid economic development of the Polish state (from ca. 15th century to the beginning of the 17th century), as evidenced by the palynological data (increase of all human indicators) and MAC, led to the higher landscape openness and agricultural progress.
- The period of development was stopped by the epidemics and the Polish–Swedish war (Swedish Deluge) between 1655 and 1660, which led to enormous socioeconomic destruction, depopulation near the site (by 67.5%), and abandonment of arable land. This is manifested by the rapid decline of all human impact indicators, recorded in the pollen spectra from 1620 ± 20 cal. yr.
- The scale of the 17th- and 18th-century crisis is demonstrated by the fact that fields and pastures have been occupied by pioneer *P. sylvestris* forest for ca. 200 years.
- Socioeconomic changes taking place from the beginning of the 19th century have led to rapid agricultural development and population growth around the site in the last two centuries. This in turn forced landscape transformation recorded by, for example, cultivated land indicators, as well as increase in coprophilous fungi values.
- A sharp decline in the cultivated land indicators after 1940 ± 10 cal. yr is associated with the crisis related to World War II and implementation of new crops (e.g. oilseed rape, which is a weak pollen producer).
- The modern times (especially from 1950 ± 10 cal. yr) represent forest regeneration near the fen and intensified industrial production, and/or controlled burnings of meadows, recorded as the rapid increase of MIC.

Authors' contribution

SC analyzed the pollen, NPP, and microscopic charcoal, designed the figures, performed the statistical analysis, and wrote the manuscript. ML, PK, and MG did the fieldwork, and SC subsampled the core. SC, ML, and PK designed the research. PK and ML provided scientific mentorship. PG and RP collected and analyzed the historical data, except Section 6.5 for which the data were collected by SC. MG analyzed the plant macrofossils, and AD and JS analyzed the macroscopic charcoal. PK constructed the age–depth model. EŁ and MM performed ^{210}Pb dating. All authors contributed to writing with discussions and text corrections.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

This work was realized in the framework of the National Program of Development of Humanities project (No. 2bH15015483). This study is a contribution of "The high quality doctoral program realized at the Faculty of Geographical and Geological Sciences of Adam Mickiewicz University in Poznań (No. POWR.03.02.00–00-

I039/16)," which funded the proofreading. We are grateful to Dominika Łuców and Maciej Gabka for their help with drilling and Małgorzata Suchorska who prepared samples for palynological analysis. We would like to thank the two anonymous reviewers and Katarzyna Marcisz for the useful comments which enabled us to improve the manuscript.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106902>.

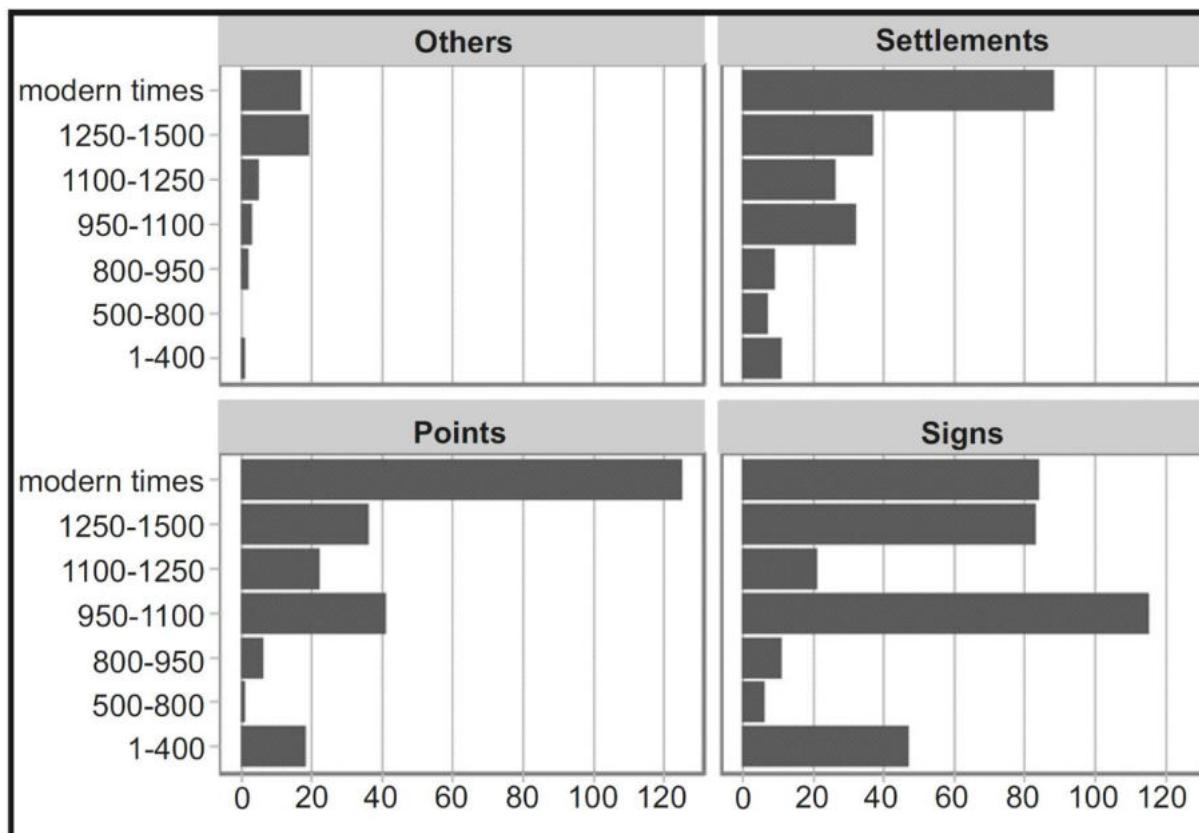
References

- Anonymous, 1952. *Galli Anonymi Cronica et Gesta ducum sive principum polonorum*. In: Maleczyński, K. (Ed.), Polska Akademia Umiejętności, Kraków.
- Appleby, P.G., 2002. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: Last, W.M., Smol, J.P. (Eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments*, ume 1. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 171–203. Basin Analysis, Coring, and Chronological Techniques.
- Baillie, M.G., 1991. Suck-in and smear: two related chronological problems for the 90s. *J Theoretical Archaeol* 2 (2), 12–16.
- Baskaran, M., 2011. Po-210 and Pb-210 as atmospheric tracers and global atmospheric Pb-210 fallout: a review. *J. Environ. Radioact.* 102, 500–513.
- Behre, K.E., 1981. The interpretation of anthropogenic indicators in pollen diagrams. *Pollen Spores* 23, 225–245.
- Berend, N., Urbańczyk, P., Wiszewski, P., 2013. *Central Europe in the High Middle Ages. Bohemia, Hungary and Poland*, C. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 900–1300.
- Berglund, B.E., Ralska-Jasiewiczowa, M., 1986. Pollen analysis and pollen diagrams. In: Berglund, B.E. (Ed.), *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 455–484.
- Beug, H.J., 2004. *Leitfaden der Pollenbestimmung für Mitteleuropa und angrenzende Gebiete*. Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München.
- Biernat, C., 1962. Statystyka obrotu towarowego Gdańska w latach 1651–1815. Warszawa.
- Binford, M.W., 1990. Calculation and uncertainty analysis of 210Pb dates for PIRLA project lake sediment cores. *J. Paleolimnol.* 3, 253–267.
- Bitušík, P., Trnková, K., Chamutiová, T., Sochuliaková, L., Stoklasa, J., Pipík, R., Szarłowicz, K., Szaciłowski, G., Thomková, K., Sporka, F., Starek, D., Surka, J., Milovský, R., Hamerlík, L., 2018. Tracking human impact in a mining landscape using lake sediments: a multi-proxy palaeolimnological study. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 504, 23–33.
- Blaauw, M., Christen, J.A., Mauquoy, D., van der Plicht, J., Bennett, K.D., 2007. Testing the timing of radiocarbon-dated events between proxy archives. *Holocene* 17, 283–288.
- Bogucka, M., 1970. *Handel zagraniczny Gdańska w pierwszej połowie XVII wieku*. Wrocław.
- Borowski, S., 1962. Rozwarstwienie wsi wielkopolskiej w latach 1807–1914: studium statystyczne nad społecznymi i ekonomicznymi następstwami włączenia wsi w orbitę rynku, Poznań.
- Borowski, S., 1963. Kształtowanie się rolniczego rynku pracy w Wielkopolsce w okresie wielkich reform agrarnych, pp. 1807–1860.
- Brázdil, R., Dobrovolný, P., Bauch, M., Camenisch, C., Kiss, A., Kotyza, O., Oliński, P., Rezníčková, L., 2020. Central Europe, 1531–1540 CE: the driest summer decade of the past five centuries? *Clim. Past Discuss* 2020, 1–44.
- Broda, J., 2000. *Historia leśnictwa w Polsce*. Wydaw. Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego.
- Bronk Ramsey, C., 1995. Radiocarbon calibration and analysis of stratigraphy: the OxCal program. *Radiocarbon* 37, 425–430.
- Bronk Ramsey, C., 2008. Deposition models for chronological records. *Quat. Sci. Rev.* 27, 46–60.
- Büntgen, U., Teigel, W., Nicolussi, K., McCormick, M., Frank, D., Trouet, V., Kaplan, J.O., Herzig, F., Heussner, K.-U., Wanner, H., Luterbacher, J., Esper, J., 2011. 2500 Years of European climate variability and human susceptibility. *Science* 331, 578.
- Burszt, J., 1959. W piastowskich czasach (Okres do roku 1454). In: Rusiński, W. (Ed.), *Dzieje Wsi Wielkopolskiej*. Wydawnictwo Poznańskie: Poznań, pp. 11–46.
- Chmielewski, R., 1992. Wielkopolska w warunkach transformacji – diagnoza istniejącego stanu gospodarki. *Ruch Prawniczy. Ekonomiczny i Socjologiczny* 54, 1–28.
- Chojnicka, K., 2007. *Handel na Warcie i Odrze w XVI i pierwszej połowie XVII wieku*. Wydawnictwo Poznańskie, Poznań.
- Conedera, M., Tinner, W., Neff, C., Meurer, M., Dickens, A.F., Krebs, P., 2009. Reconstructing past fire regimes: methods, applications, and relevance to fire management and conservation. *Quat. Sci. Rev.* 28, 555–576.
- Cugny, C., Mazier, F., Galop, D., 2010. Modern and fossil non-pollen palynomorphs from the Basque mountains (western Pyrenees, France): the use of coprophilous fungi to reconstruct pastoral activity. *Veg. Hist. Archaeobotany* 19, 391–408.
- Cui, Q.Y., Gaillard, M.J., Lemdahl, G., Stenberg, L., Sugita, S., Zernova, G., 2014. Historical land-use and landscape change in southern Sweden and implications for present and future biodiversity. *Ecol Evol* 4, 3555–3570.
- Cywa, K., 2017. Trees and shrubs used in medieval Poland for making everyday objects. *Veg. Hist. Archaeobotany* 27, 111–136.
- Davies, A.L., 2019. Dung fungi as an indicator of large herbivore dynamics in peatlands. *Rev. Palaeobot. Palynol.* 271, 104–108.
- Davis, B.A., Collins, P.M., Kaplan, J.O., 2015. The age and post-glacial development of the modern European vegetation: a plant functional approach based on pollen data. *Veg. Hist. Archaeobotany* 24, 303–317.
- Dietze, E., Theuerkauf, M., Bloom, K., Brauer, A., Dörfler, W., Feeser, I., Feurdean, A., Gedminienė, L., Giesecke, T., Jahns, S., Karpinska-Kolaczek, M., Kolaczek, P., Lamentowicz, M., Latalowa, M., Marcisz, K., Obremska, M., Pędziżewska, A., Poska, A., Rehfeld, K., Stančíkaité, M., Stivrins, N., Świąta-Musznicka, J., Szal, M., Vassiljev, J., Veski, S., Waćnik, A., Weisbrodt, D., Wiethold, J., Vannière, B., Słowiński, M., 2018. Holocene fire activity during low-natural flammability periods reveals scale-dependent cultural human-fire relationships in Europe. *Quat. Sci. Rev.* 201, 44–56.
- Doyen, E., Etienne, D., 2017. Ecological and human land-use indicator value of fungal spore morphotypes and assemblages. *Veg. Hist. Archaeobotany* 26, 357–367.
- Dumayne, L., Stoneman, R., Barber, K., Harkness, D., 1995. Problems associated with correlating calibrated radiocarbon-dated pollen diagrams with historical events. *Holocene* 5, 118–123.
- Dzieduszycki, W., 1976. Wykorzystywanie surowca drzewnego we wczesnośredniowiecznej i średniowiecznej Kruszwicy. *Kwartalnik Historii Kultury Materiałnej*, 35–54.
- Eller, F., Skalova, H., Caplan, J.S., Bhattacharai, G.P., Burger, M.K., Cronin, J.T., Guo, W.Y., Guo, X., Hazelton, E.L.G., Kettenring, K.M., Lambertini, C., McCormick, M.K., Meyerson, L.A., Mozdzer, T.J., Pysek, P., Sorrell, B.K., Whigham, D.F., Brix, H., 2017. Cosmopolitan species as models for ecophysiological responses to global change: the common reed *Phragmites australis*. *Front. Plant Sci.* 8, 1833.
- Erlandson, J.M., Braje, T.J., 2013. Archeology and the anthropocene. *Anthropocene* 4, 1–7.
- Feurdean, A., Bhagwat, S.A., Willis, K.J., Birks, H.J., Lischke, H., Hickler, T., 2013. Tree migration-rates: narrowing the gap between inferred post-glacial rates and projected rates. *PLoS One* 8, e71797.
- Filbrandt, A., 1991. Badania palinologiczne osadów limnicznych jeziora Kamionek. In: Tobolski, K. (Ed.), *Wstęp Do Paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego* (Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań).
- Finsinger, W., Tinner, W., 2005. Minimum count sums for charcoal concentration estimates in pollen slides: accuracy and potential errors. *Holocene* 15, 293–297.
- Finsinger, W., Giesecke, T., Brewer, S., Leydet, M., 2017. Emergence patterns of novelty in European vegetation assemblages over the past 15 000 years. *Ecol. Lett.* 20, 336–346.
- Frankiewicz, B., 1991. Z dziejów ziemi pobiedziskiej. *Rada Miasta i Gminy w Pobiedziskach, Pobiedziska*, p. 207.
- Fyfe, R.M., Woodbridge, J., Roberts, N., 2015. From forest to farmland: pollen-inferred land cover change across Europe using the pseudobiomization approach. *Global Change Biol.* 21, 1197–1212.
- Gaillard, M.J., 2013. Pollen methods and studies, archaeological applications. In: Elias, S.A., Mock, C.J. (Eds.), *Encyclopedia of Quaternary Science*, second ed. Elsevier, Amsterdam, pp. 880–904.
- Gauthier, E., Bichet, V., Massa, C., Petit, C., Vannière, B., Richard, H., 2010. Pollen and non-pollen palynomorph evidence of medieval farming activities in southwestern Greenland. *Veg. Hist. Archaeobotany* 19, 427–438.
- Gałka, M., 2014. Pattern of plant succession from eutrophic lake to ombrotrophic bog in NE Poland over the last 9400 Years based on high-resolution macrofossil analysis. *Ann. Bot. Fenn.* 51, 1–21.
- Giesecke, T., Brewer, S., Finsinger, W., Leydet, M., Bradshaw, R.H.W., 2017. Patterns and dynamics of European vegetation change over the last 15,000 years. *J. Biogeogr.* 44, 1441–1456.
- Giesecke, T., Wolters, S., van Leeuwen, J.F.N., van der Knaap, P.W.O., Leydet, M., Brewer, S., 2019. Postglacial change of the floristic diversity gradient in Europe. *Nat. Commun.* 10, 5422.
- Girguś, R., Strupczewski, W., Rojecki, A., 1965. Wyjątki ze źródła historycznych o nadzwyczajnych zjawiskach hydrologiczno-meteorologicznych na ziemiach polskich w wiekach od X do XVI. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Gordon, A.D., Birks, H.J.B., 1972. Numerical methods in Quaternary palaeoecology I. Zonation of pollen diagrams. *New Phytol.* 71, 961–979.
- Górski, Z., Pakulski, J., Tomczak, A., 1996. Lustracja województw wielkopolskich i kujawskich 1659–1665, cz. 1, Toruń.
- Graf, M.-T., Chmura, G.L., 2006. Development of modern analogues for natural, mowed and grazed grasslands using pollen assemblages and coprophilous fungi. *Rev. Palaeobot. Palynol.* 141, 139–149.
- Grimm, E.C., 1987. CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Comput. Geosci.* 13, 13–35.
- Grosse-Brauckmann, G., 1972. Über pflanzliche Makrofossilien mitteleuropäischer Torfe. I. Gewebereste krautiger Pflanzen und ihre Merkmale. *Telma* 2, 19–55.
- Grosse-Brauckmann, G., 1974. Über pflanzliche Makrofossilien mitteleuropäischer Torfe. II. Weitere Reste (Früchte und Samen, Moose u. a.) und ihre Bestimmungsmöglichkeiten. *Telma* 4, 51–117.
- Guzowski, P., 2014. Karolińska rewolucja gospodarcza na wschodzie Europy (do końca XII wieku). In: Dalewski, D. (Ed.), *Granica Wschodnia Cywilizacji*

- Zachodniej W Średniowieczu, pp. 115–169. Instytut Historii PAN, Warszawa.
- Gąsiorowski, A., 1969. Krajobraz naturalny i rozwój osadnictwa. Organizacja społeczna i rozwój gospodarstwa wiejskiego. In: Topolski, J. (Ed.), Dzieje Wielkopolski, vol. 1, pp. 254–261.
- Haldon, J., Mordechai, L., Newfield, T.P., Chase, A.F., Izdebski, A., Guzowski, P., Labuhn, I., Roberts, N., 2018. History meets palaeoscience: consilience and collaboration in studying past societal responses to environmental change. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 115, 3210–3218.
- Hölzer, A., 2010. Die Torfmooane Südwestdeutschlands und der Nachbargebiete. Weissdorn-Verlag Jena, Jena.
- Hörnberg, G., Josefsson, T., DeLuca, T.H., Higuera, P.E., Liedgren, L., Östlund, L., Bergman, I., 2018. Anthropogenic use of fire led to degraded Scots pine-lichen forest in northern Sweden. *Anthropocene* 24, 14–29.
- Houston Durrant, T., de Rigo, D., Caudullo, G., 2016. Pinus sylvestris in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (Eds.), European Atlas of Forest Tree Species. Publication Office of the European Union, pp. 132–133. Luxembourg.
- Hua, Q., Barbetti, M., Rakowski, A.Z., 2013. Atmospheric radiocarbon for the period 1950–2010. *Radiocarbon* 55, 2059–2072.
- Huntley, B., Birks, H.J.B., 1983. An Atlas of Past and Present Pollen Maps for Europe: Cambridge University Press, Cambridge.
- Hiadłykowicz, K.J., 1932. Zmiany krajobrazu i rozwój osadnictwa w Wielkopolsce od XIV do XIX wieku. Kasa im. Rektora J. Mianowskiego Lwów.
- Izdebski, A., Holmgren, K., Weiberg, E., Stocker, S.R., Büntgen, U., Florenzano, A., Gogou, A., Leroy, S.A.G., Luterbacher, J., Martrat, B., Masi, A., Mercuri, A.M., Montagna, P., Sadori, L., Schneide, A., Sicre, M.-A., Triantaphyllou, M., Xoplaki, E., 2016. Realising consilience: how better communication between archaeologists, historians and natural scientists can transform the study of past climate change in the Mediterranean. *Quat. Sci. Rev.* 136, 5–22.
- Kaplan, J.O., Krumhardt, K.M., Zimmermann, N., 2009. The prehistoric and pre-industrial deforestation of Europe. *Quat. Sci. Rev.* 28, 3016–3034.
- Kapusta, F., 2015. Ewolucja miejsca i roli rzepaku w rolnictwie oraz gospodarce Polski. Zeszyty Naukowe SGGW w Warszawie. Problemy Rolnictwa Światowego 15, 85–95.
- Kara, M., 2009. Najstarsze państwo Piastów – rezultat przejmu czy kontynuacji? Studium archeologiczne. Instytut Archeologii i Etnologii PAN, Oddział w Poznaniu, Poznań, p. 407.
- Kara, M., Makohonienko, M., 2011. Wielkopolska krainą grodów – krajobraz kulturowy kolejki państwa polskiego w świetle nowych ustaleń chronologicznych. *Landform Analysis* 16, 20–25.
- Kócka-Krenz, H., 2015. Poznań – od grodu do miasta. *Archaeologia Historica Polona* 23, 121–138.
- Kócka-Krenz, H., 2016. Poznań – miejsce centralne w średniowieczu. *Archaeologia Historica Polona* 24, 27–40.
- Kołaczek, P., Gałka, M., Lamentowicz, M., Marcisz, K., Kajukalo-Drygalska, K., Karpińska-Kołaczek, M., 2019. Increased radiocarbon dating resolution of ombrotrophic peat profiles reveals periods of disturbance which were previously undetected. *Quat. Geochronol.* 52, 21–28.
- Kräpicek, M., 1998. Oak dendrochronology of the neoholocene in Poland. *Folia Quat.* 69, 5–133.
- Kurnatowska, Z., 1997. Wczesnopiastowskie grody centralne. Podobieństwa i Różnice. In: Wójtowicz, A. (Ed.), Gniezno i Poznań W Państwie Pierwszych Piastów, pp. 19–23.
- Kurnatowska, Z., Początki i rozwój państw: Kobusiewicz, M., 2008. In: Pradzieje Wielkopolski. Od Epoki Kamienia Do Średniowiecza, pp. 297–396. Instytut Archeologii i Etnologii PAN, Poznań.
- Kurnatowska, Z., 2011. Grzybowo pod Wrześnią – potężny gród wczesnopiastowski. *Landform Analysis* 16, 56–58.
- Kurnatowska, Z., Kurnatowski, S., 1991. Zasiedlenie regionu Lednicy w pradziejach i średniowieczu w świetle dotychczasowych badań. In: Tobolski, K. (Ed.), Wstęp do paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego. Wydawnictwo Naukowe Uniwersetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań.
- Kłosowski, S., Kłosowski, G., 2015. Rośliny wodne i bagiennie. Oficyna Wdawnicza Multico.
- Laine, J., Harju, P., Timonen, T., Laine, A., Tuittila, E.-S., Minkkinen, K., Vasander, H., 2009. The intricate beauty of Sphagnum mosses: a Finnish guide to identification. In: Department of Forest Ecology. University of Helsinki.
- Lamentowicz, M., Kołaczek, P., Mauquoy, D., Kittel, P., Łokas, E., Słowiński, M., Jassey, V.E.J., Niedziółka, K., Kajukalo-Drygalska, K., Marcisz, K., 2019. Always on the tipping point – a search for signals of past societies and related peatland ecosystem critical transitions during the last 6500 years in N Poland. *Quat. Sci. Rev.* 225, 105954.
- Lange, B., 1982. Key to northern boreal and arctic species of Sphagnum, based on characteristics of the stem leaves. *Lindbergia* 8, 1–29.
- Larsson, T.-B., Angelstam, P., Balent, G., Barbat, A., Bijlsma, R.-J., Boncina, A., Bradshaw, R., Bücking, W., Ciancio, O., Corona, P., Diaci, J., Dias, S., Ellenberg, H., Fernandes, F.M., Fernández-González, F., Ferris, R., Frank, G., Möller, P.F., Giller, P.S., Gustafsson, L., Halbritter, K., Hall, S., Hansson, L., Innes, J., Jactel, H., Dobberstein, M.K., Klein, M., Marchetti, M., Mohren, F., Niemelä, P., O'Halloran, J., Rametsteiner, E., Rego, F., Scheidegger, C., Scotti, R., Sjöberg, K., Spanos, I., Spanos, K., Standová, T., Svensson, L., Tømmerås Å, B., Trakolis, D., Utterer, J., VanDenMeersschaut, D., Vandekerckhove, K., Walsh, P.M., Watt, A.D., 2001. Biodiversity evaluation tools for European forests. *Ecol. Bull.* 1–237.
- Laskowicz, I., Bąk, B., Pasieczna, A., Dusza, A., Bojakowska, I., Pająk, R., Tomassi-Morawiec, H., Sikorska-Maykowska, M., Radwanek-Bąk, B., Tarwid-
- Maciejowska, S., 2005. Objasnenia do mapy geośrodowiskowej Polski, 1, 50, 000. Arkusz Pobiedziska (473). Państwowy Instytut Geologiczny.
- Latałowa, M., Zimny, M., Jędrzejewska, B., Samoilik, T., 2015. Białowieża Primeval Forest: a 2000-year interplay of environmental and cultural forces in Europe's best preserved temperate woodland. In: Kirby, K.J., Watkins, C. (Eds.), Europe's Changing Woods and Forests: from Wildwood to Managed Landscapes. CABI, Mass, Wallingford; Boston.
- Lites, 1890. Lites ac res gestae inter polons ordinemque cruciferorum, Poznań.
- Litt, T., Tobolski, K., 1991. Materiały do postglacjalnej historii roślinności okolic Lednicy. Część I. Badania palinologiczne osadów Jeziora Lednickiego – rdzeń. In: Tobolski, K. (Ed.), Wstęp Do Paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego (Poznań).
- Luterbacher, J., Xoplaki, E., Küttel, M., Zorita, E., González-Rouco, J.F., Jones, P.D., Stössel, M., Rutishauser, T., Wanner, H., Wibig, J., Przybylak, R., 2010. Climate change in Poland in the past centuries and its relationship to European climate: evidence from reconstructions and coupled climate models. In: Przybylak, R. (Ed.), The Polish Climate in the European Context: an Historical Overview. Springer, Netherlands, Dordrecht, pp. 3–39.
- Macias, A., Skwarek, M., 2018. Zmiany powierzchni leśnych na terenie Parku Krajobrazowego Promno w ostatnich 200 latach w aspekcie krajobrazowym. *Badania Fizjograficzne*, R. IX – Seria A – Geografia Fizyczna 115–130.
- Makohonienko, M., 1991. Materiały do postglacjalnej historii roślinności okolic Lednicy. Część II. Badania palinologiczne osadów Jeziora Lednickiego – rdzeń I/ 86 i Wal/87. In: Tobolski, K. (Ed.), Wstęp Do Paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego.
- Makohonienko, M., 2000. Przyrodnicza historia gniezna. Homini, poznań – bydgoszcz.
- Makohonienko, M., Kara, M., Koszałka, J., 2011a. Przyrodnicza historia Gniezna – plemienny ośrodek kultu i centrum wczesnopiastowskiego państwa polskiego Civitas Schineshe. *Landform Analysis* 16, 33–45.
- Makohonienko, M., Makowiecki, D., Koszałka, J., Kara, M., 2011b. Ekologia historyczna miasta: uwzględnianie środowiskowe i podstawy gospodarcze wczesnomiejskiego zespołu osadniczego na Ostrowie Tumskim w Poznaniu. *Landform Analysis* 16, 6–31.
- Mann, M.E., Zhang, Z., Rutherford, S., Bradley, R.S., Hughes, M.K., Shindell, D., Ammann, C., Faluvegi, G., Ni, F., 2009. Global signatures and dynamical origins of the Little Ice age and medieval climate anomaly. *Science* 326, 1256.
- Marcisz, K., Tinner, W., Colombaroli, D., Kotaczek, P., Słowiński, M., Fialkiewicz-Koziel, B., Łokas, E., Lamentowicz, M., 2015. Long-term hydrological dynamics and fire history over the last 2000 years in CE Europe reconstructed from a high-resolution peat archive. *Quat. Sci. Rev.* 112, 138–152.
- Marks, L., 2012. Timing of the late vistulian (weichselian) glacial phases in Poland. *Quat. Sci. Rev.* 44, 81–88.
- Marquer, L., Gaillard, M.-J., Sugita, S., Trondman, A.-K., Mazier, F., Nielsen, A.B., Fyfe, R.M., Odgaard, B.V., Alenius, T., Birks, H.J.B., Bjune, A.E., Christiansen, J., Dodson, J., Edwards, K.J., Giesecke, T., Herzschnuh, U., Kangur, M., Lorenz, S., Poska, A., Schult, M., Seppä, H., 2014. Holocene changes in vegetation composition in northern Europe: why quantitative pollen-based vegetation reconstructions matter. *Quat. Sci. Rev.* 90, 199–216.
- Mauquoy, D., Van Geel, B., 2007. Plant macrofossil methods and studies | mire and peat macros. In: Elias, S.A. (Ed.), Encyclopedia of Quaternary Science. Elsevier, Oxford, pp. 2315–2336.
- Mazurowski, R., 1980. Metodyka archeologicznych badań powierzchniowych, Warszawa-Poznań.
- Mazzini, I., Gliozzi, E., Galaty, M., Bejko, L., Sadori, L., Soulié-Märsche, I., Koçi, R., Van Welden, A., Bushati, S., 2016. Holocene evolution of Lake Shkodra: multidisciplinary evidence for diachronic landscape change in northern Albania. *Quat. Sci. Rev.* 136, 85–95.
- Michałowska, A., Rymon-Lipińska, J., 2008. Plant cover of Kazanie lake and surrounding peat-bog in the 'prommo' landscape park. *Badania fizjograficzne nad polską zachodnią*. Ser. Bull. 57, 47–59.
- Miętkewicz, M., Sydow, S., 1999. Szczegółowa mapa geologiczna Polski, 1, 50000 (Arkusz Pobiedziska). Państwowy Instytut Geologiczny.
- Milecka, K., 2000. Anthropogenic changes in the vegetative cover of the past five thousand years in light of pollen analysis of the lake sediments in wielkopolska. In: Jackowiak, B., Żurkowski, W. (Eds.), Mechanisms of Anthropogenic Changes of the Plant Cover (Bogucki - Wydaw. Naukowe, Poznań).
- Mirek, Z., Pięknosz-Mirkowa, H., Zająć, A., Zająć, M., 2002. Flowering plants and pteridophytes of Poland. A checklist. IB PAN, Kraków.
- Moore, P.D., Webb, J.A., Collinson, M.E., 1991. Pollen Analysis. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Nalepká, D., Walanus, A., 2003. Data processing in pollen analysis. *Acta Palaeobot.* 43, 125–134.
- Neukom, R., Steiger, N., Gomez-Navarro, J.J., Wang, J., Werner, J.P., 2019. No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era. *Nature* 571, 550–554.
- Nielsen, A.B., Giesecke, T., Theuerkauf, M., Feeser, I., Behre, K.-E., Beug, H.-J., Chen, S.-H., Christiansen, J., Dörfler, W., Endtmann, E., Jahns, S., de Klerk, P., Kühl, N., Latałowa, M., Odgaard, B.V., Rasmussen, P., Stockholm, J.R., Voigt, R., Wiethold, J., Wolters, S., 2012. Quantitative reconstructions of changes in regional openness in north-central Europe reveal new insights into old questions. *Quat. Sci. Rev.* 47, 131–149.
- Niewiarowski, W., Noryśkiewicz, B., Piotrowski, W., Sinkiewicz, M., 1995. Outline of natural and anthropogenic changes of geographical environment in Biskupin area during the last 7000 years. Turpress, Toruń.

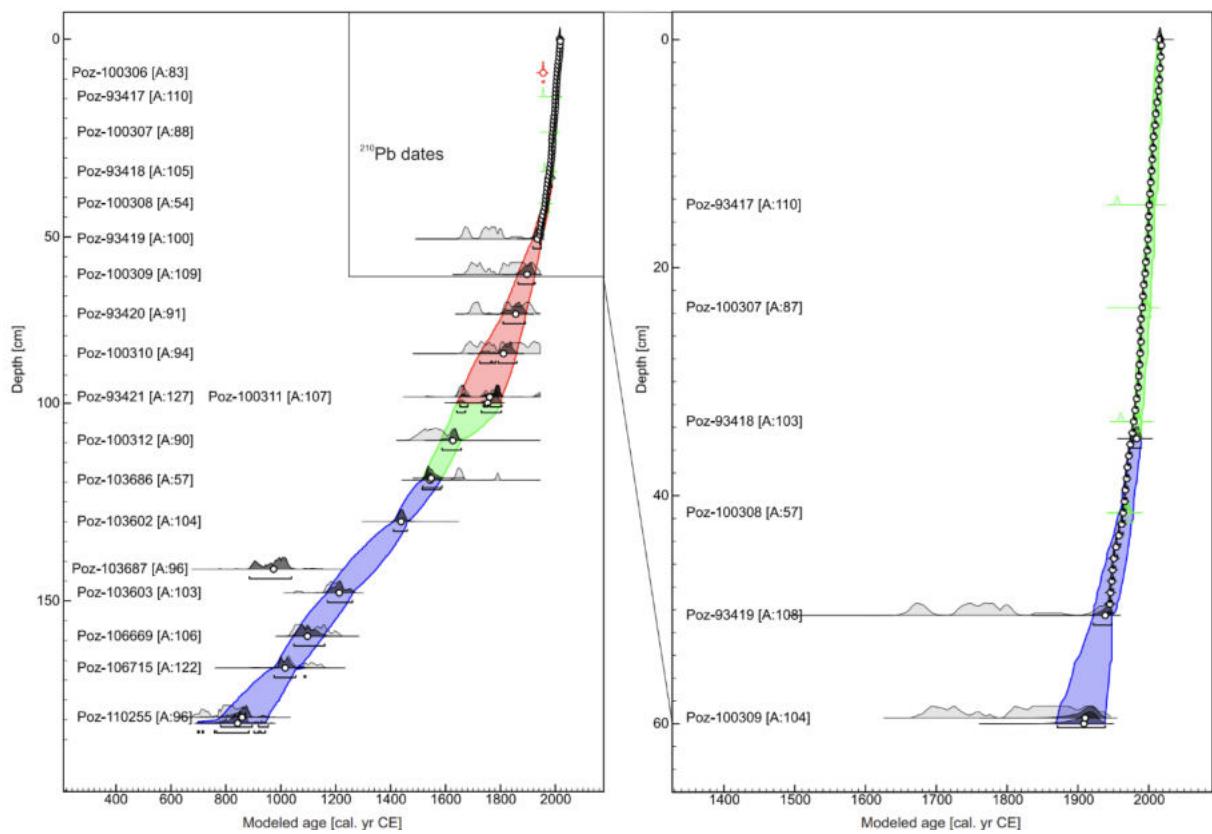
- Ochyra, R., Żarnowiec, J., Bednarek-Ochyra, H., 2003. Census catalogue of polish mosses. W. Szafer Institute of botany, polish academy of sciences.
- Oksanen, J., Blanchet, F.G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D., Minchin, P.R., O'hara, R.B., Simpson, G.L., Solymos, P., Stevens, M.H.H., Szoecs, E., Wagner, H., 2017. Vegan: community ecology package. R package version 2.4-2.
- Okuniewska-Nowaczyk, I., Milecka, K., Makohonienko, M., Harmata, K., Madeja, J., Nalepk, D., 2004. Secale cereale. In: Ralska-Jasiewiczowa, M., Latalowa, M., Wasylkowa, K., Tobolski, K., Madeyska, E., Wright, H.E., Turner, C. (Eds.), Late Glacial and Holocene History of Vegetation in Poland Based on Isopollen Maps. (W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Kraków).
- Olszański, H., 1989. Tradycyjne olejarstwo w polsce, sanok.
- Parker, G., 2013. Global Crisis: War, Climate Change and Catastrophe in the Seventeenth Century. Yale University Press.
- Pongratz, J., Reick, C., Raddatz, T., Claussen, M., 2008. A reconstruction of global agricultural areas and land cover for the last millennium. *Global Biogeochemical Cycles* 22.
- Poska, A., Saarse, L., Veski, S., 2004. Reflections of pre- and early-agrarian human impact in the pollen diagrams of Estonia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 209, 37–50.
- Poska, A., Väli, V., Tomson, P., Vassiljev, J., Kihno, K., Alliksaar, T., Villoslada, M., Saarse, L., Sepp, K., 2018. Reading past landscapes: combining modern and historical records, maps, pollen-based vegetation reconstructions, and the socioeconomic background. *Landsc. Ecol.* 33, 529–546.
- Przybyłak, R., Oliński, P., Koprowski, M., Filipiak, J., Pospieszyńska, A., Chorążyczewski, W., Puchałka, R., Dąbrowski, H.P., 2020. Droughts in the area of Poland in recent centuries in the light of multi-proxy data. *Clim. Past* 16, 627–661.
- R Core Team, 2018. A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing (Vienna).
- Ralska-Jasiewiczowa, M., Nalepk, D., Goslar, T., 2003. Some problems of forest transformation at the transition to the oligocratic/Homo sapiens phase of the Holocene interglacial in northern lowlands of central Europe. *Veg. Hist. Archaeobotany* 12, 233–247.
- Reimer, P.J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Ramsey, C.B., Buck, C.E., Cheng, H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Haflidason, H., Hajdas, I., Hatté, C., Heaton, T.J., Hoffmann, D.L., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., Manning, S.W., Niu, M., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Staff, R.A., Turney, C.S.M., van der Plicht, J., 2013. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 Years cal BP. *Radiocarbon* 55, 1869–1887.
- Riddell, S., Erlandsson, E., Gísladóttir, G., Edwards, K.J., Byock, J., Zori, D., 2017. Cereal cultivation as a correlate of high social status in medieval Iceland. *Veg. Hist. Archaeobotany* 27, 679–696.
- Roberts, N., Fyfe, R.M., Woodbridge, J., Gaillard, M.J., Davis, B.A.S., Kaplan, J.O., Marquer, L., Mazier, F., Nielsen, A.B., Sugita, S., Trondman, A.K., Leydet, M., 2018. Europe's lost forests: a pollen-based synthesis for the last 11,000 years. *Sci. Rep.* 8, 716.
- Rusiński, W., 1957. Straty i zniszczenia w czasie wojny szwedzkiej (1655–60) oraz jej skutki na obszarze Wielkopolski, Warszawa.
- Sadori, L., Giraudi, C., Masi, A., Magny, M., Ortù, E., Zanchetta, G., Izdebski, A., 2016. Climate, environment and society in southern Italy during the last 2000 years. A review of the environmental, historical and archaeological evidence. *Quat. Sci. Rev.* 136, 173–188.
- Samsonowicz, H., 1974. Le Commerce maritime de Gdańsk dans la première moitié du XVIe siècle. *Stud. Hist. Oecon.* 9, 47–65.
- Sanchez-Cabeza, J.A., Ruíz-Fernández, A.C., 2012. 210Pb sediment radiochronology: an integrated formulation and classification of dating models. *Geochem. Cosmochim. Acta* 82, 183–200.
- Schubert, T., 2003. Paleogeografia i paleoekologia ostrowa lednickiego. Bogucki wydawnictwo naukowe, Poznań.
- Shennan, S., Downey, S.S., Timson, A., Edinborough, K., Colledge, S., Kerig, T., Manning, K., Thomas, M.G., 2013. Regional population collapse followed initial agriculture booms in mid-Holocene Europe. *Nat. Commun.* 4, 2486.
- Shumilovskikh, L.S., van Geel, B., 2020. Non-pollen palynomorphs. In: Henry, A.G. (Ed.), Handbook for the Analysis of Micro-particles in Archaeological Samples. Springer International Publishing, pp. 65–94.
- Sillasoo, Ü., Poska, A., Seppä, H., Blaauw, M., Chambers, F.M., 2009. Linking past cultural developments to palaeoenvironmental changes in Estonia. *Veg. Hist. Archaeobotany* 18, 315–327.
- Stefaniński, K., 1971. Wsie na prawie niemieckim w Wielkopolsce w latach 1333–1370. *Roczniki Historyczne* 37, 1–38.
- Stephens, L., Fuller, D., Boivin, N., Rick, T., Gauthier, N., Kay, A., Marwick, B., Armstrong, C.G., Barton, C.M., Denham, T., Douglass, K., Driver, J., Janz, L., Roberts, P., Rogers, J.D., Thakar, H., Altaweel, M., Johnson, A.L., Sampietro Vattuone, M.M., Aldenderfer, M., Archila, S., Artioli, G., Bale, M.T., Beach, T.,
- Borrell, F., Braje, T., Buckland, P.I., Jiménez Cano, N.G., Capriles, J.M., Diez Castillo, A., Çilingiroğlu, Ç., Negus Cleary, M., Conolly, J., Coutros, P.R., Covey, R.A., Cremaschi, M., Crowther, A., Der, L., di Lernia, S., Doershuk, J.F., Doolittle, W.E., Edwards, K.J., Erlandson, J.M., Evans, D., Fairbairn, A., Faulkner, P., Feinman, G., Fernandes, R., Fitzpatrick, S.M., Fyfe, R., Garcea, E., Goldstein, S., Goodman, R.C., Macrae, S., Marchant, R., Marston, J.M., McClure, S., McCoy, M.D., Miller, A.V., Morrison, M., Motuzaite Matuzevičiute, G., Müller, J., Nayak, A., Noerwidi, S., Peres, T.M., Peterson, C.E., Proctor, L., Randall, A.R., Renette, S., Robbins Schug, G., Ryzewski, K., Saini, R., Scheinsohn, V., Schmidt, P., Sebillaud, P., Seitsonen, O., Simpson, I.A., Sołtysiak, A., Speakman, R.J., Spengler, R.N., Steffen, M.L., Storozum, M.J., Strickland, K.M., Thompson, J., Thurston, T.L., Ulm, S., Ustunkaya, M.C., Welker, M.H., West, C., Williams, P.R., Wright, D.K., Wright, N., Zahir, M., Zerboni, A., Beaudoin, E., Munevar Garcia, S., Powell, J., Thornton, A., Kaplan, J.O., Gaillard, M.J., Klein Goldewijk, K., Ellis, E., 2019. Archaeological assessment reveals Earth's early transformation through land use. *Science* 365, 897.
- Stępnik, T., 1996. Średnio wieczne wyroby drewniane z Ostrowa Lednickiego – analiza surowcową. *Studio Lednickie* 4, 261–296.
- Stockmarr, J., 1971. Tablets with spores used in absolute pollen analysis. *Pollen Spores* 13, 615–621.
- Stokmane, M., Cera, I., 2018. Revision of the calcareous fen arachnofauna: habitat affinities of the fen-inhabiting spiders. *ZooKeys* 67–108.
- Swindles, G.T., Watson, E., Turner, T.E., Galloway, J.M., Hadlari, T., Wheeler, J., Bacon, K.L., 2015. Spheroidal carbonaceous particles are a defining stratigraphic marker for the Anthropocene. *Sci. Rep.* 5, 10264.
- Szczepanek, K., Myszkowska, D., Worobiec, E., Piotrowicz, K., Ziemanin, M., Bielec-Bakowska, Z., 2017. The long-range transport of Pinaceae pollen: an example in Krakow (southern Poland). *Aerobiologia* 33, 109–125.
- Theuerkauf, M., Dräger, N., Kienel, U., Kuparinen, A., Brauer, A., 2015. Effects of changes in land management practices on pollen productivity of open vegetation during the last century derived from varved lake sediments. *Holocene* 25, 733–744.
- Tinner, W., Hu, F.S., 2003. Size parameters, size-class distribution and area-number relationship of microscopic charcoal: relevance for fire reconstruction. *Holocene* 13, 499–505.
- Tobolski, K., 1990. Paläökologische Untersuchungen des Siedlungsgebietes im Lednica Landschaftspark (Nordwestpolen). *Offa* 47, 109–131.
- Tobolski, K., 1991. Dotychczasowy stan badań paleobotanicznych i biostratigraficznych Lednickiego Parku Krajobrazowego. In: Tobolski, K. (Ed.), Wstęp do paleoekologii Lednickiego Parku Krajobrazowego. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań.
- Trzeciak, M., 2016. The emergence of the territorial state. In: Urbański, P., Trzeciak, M. (Eds.), The Past Societies. Polish Lands from the First Evidence of Human Presence to the Early Middle Ages. The Institute of Archaeology and Ethnology, Polish Academy of Sciences, pp. 277–341. Warsaw.
- Tylmann, W., Bonk, A., Goslar, T., Wulf, S., Grosjean, M., 2016. Calibrating 210Pb dating results with varve chronology and independent chronostratigraphic markers: problems and implications. *Quat. Geochronol.* 32, 1–10.
- Wacnik, A., Tylmann, W., Bonk, A., Goslar, T., Enters, D., Meyer-Jacob, C., Grosjean, M., 2016. Determining the responses of vegetation to natural processes and human impacts in north-eastern Poland during the last millennium: combined pollen, geochemical and historical data. *Veg. Hist. Archaeobotany* 25, 479–498.
- Wardenaar, E.C.P., 1987. A new hand tool for cutting peat profiles. *Can. J. Bot.* 65, 1772–1773.
- Weisbrodt, D., Enters, D., Żarczyński, M.J., Poraj-Górská, A.I., Tylmann, W., 2016. Contribution of non-pollen palynomorphs to reconstructions of land-use changes and lake eutrophication: case study from Lake Jaczno, northeastern Poland. *Limnological Review* 16, 247–256.
- Whitlock, C., Larsen, C., 2001. Charcoal as a fire proxy. In: Smol, J.P., Birks, H.J.B., Last, W.M., Bradley, R.S., Alverson, K. (Eds.), Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators. Springer, Netherlands, Dordrecht, pp. 75–97.
- Woodbridge, J., Roberts, C.N., Palmisano, A., Bevan, A., Shennan, S., Fyfe, R., Eastwood, W.J., Izdebski, A., Çakırlar, C., Wolrding, H., Broothaerts, N., Kaniewski, D., Finné, M., Labuhn, I., 2019. Pollen-inferred regional vegetation patterns and demographic change in Southern Anatolia through the Holocene. *Holocene* 29, 728–741.
- Zarzycki, K., Trzcińska-Tacik, H., Różański, W., Szeląg, Z., Wotek, J., Korzeniak, U., 2002. Ecological indicator values of vascular plants of Poland. W. Szafer Institute of botany, polish academy of sciences, kraków.
- Zolitschka, B., Behre, K.E., Schneider, J., 2003. Human and climatic impact on the environment as derived from colluvial, fluvial and lacustrine archives—examples from the Bronze Age to the Migration period, Germany. *Quat. Sci. Rev.* 22, 81–100.

Appendix A. Supplementary data



Multimedia component 1.

Supplementary Data 1. Registration of settlements, points, signs, and others within 5-km radius from the Kazanie fen in the National Record of Archeological Sites.



Multimedia component 2.

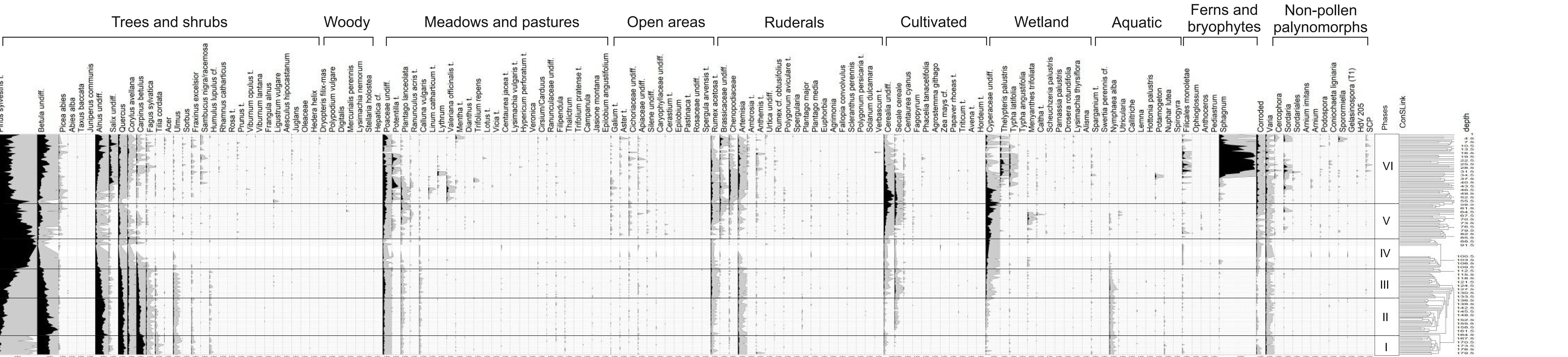
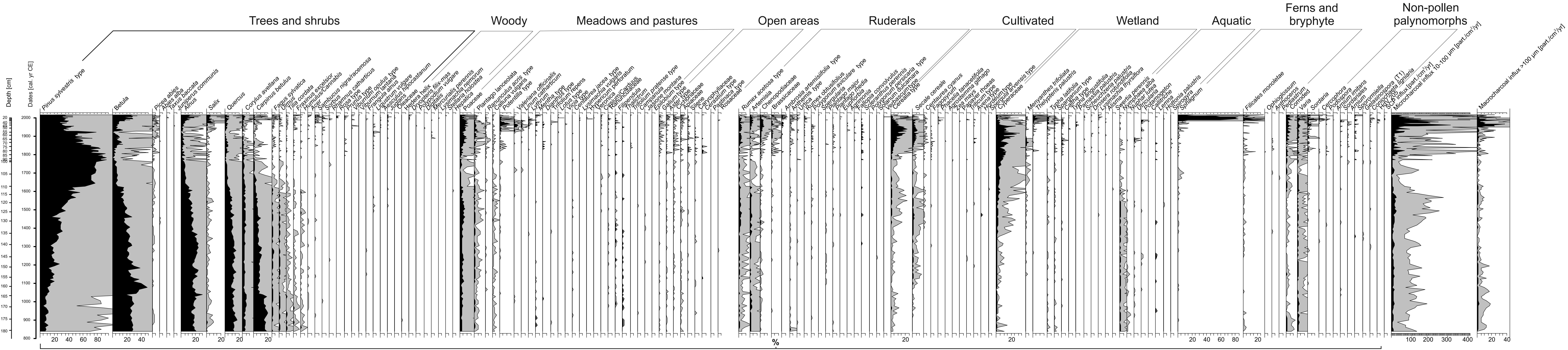
Supplementary Data 2. ^{210}Pb dates versus radiocarbon modeled age from the Kazanie fen.

Depth [cm]	Total ^{210}Pb (Bq/kg)	^{210}Pb age [yr CE]	^{210}Pb age uncertainty		14C modelled age [cal. CE]	1 sigma error [yrs]
			[yrs]			
0,5	220,2199892	2018	0,03		2015,5	0,3
1,5	203,3999229	2017	0,07		2015,3	0,9
2,5	218,0628718	2016	0,09		2014,8	1,7
3,5	257,2873478	2015	0,11		2013,9	2,3
4,5	251,6194956	2014	0,12		2012,8	2,5
5,5	324,5442761	2012	0,14		2011,7	2,3
6,5	302,9236288	2010	0,19		2010,9	2
7,5	262,2450101	2009	0,23		2010,2	2
8,5	216,9655025	2007	0,24		2009,4	2,2
9,5	156,6563967	2006	0,26		2008,6	2,5
10,5	144,0998903	2005	0,26		2007,6	2,5
11,5	150	2004	0,27		2006,7	2,3
12,5	144,5829598	2003	0,28		2006	1,9
13,5	183,0727816	2002	0,29		2005,3	1,8
14,5	184,2549526	2001	0,30		2004,5	2
15,5	195,3220858	2000	0,31		2003,5	2,5
16,5	126,5018292	2000	0,32		2002,4	2,5
17,5	182,1578304	1999	0,32		2001,4	2,2
18,5	198,3954378	1998	0,33		2000,6	2
19,5	191,7264822	1996	0,35		1999,9	2,1
20,5	134,7725581	1995	0,36		1998,9	2,4
21,5	160,4285771	1994	0,37		1997,8	2,5
22,5	130,9361043	1993	0,39		1996,7	2,2
23,5	120,0727895	1992	0,39		1995,8	1,6
24,5	203,9991741	1991	0,41		1995	1,9
25,5	109,1524412	1989	0,43		1993,8	2,4
26,5	111,394693	1988	0,44		1992,6	2,6
27,5	91,07113774	1988	0,44		1991,4	2,5
28,5	194,6190154	1987	0,45		1990,2	2,4
29,5	93,74012672	1986	0,47		1989,1	2,6
30,5	159,0890105	1985	0,48		1987,8	2,6
31,5	114,9813176	1983	0,50		1986,6	2,3
32,5	301,4562194	1981	0,52		1985,6	1,8
33,5	250	1979	0,56		1984,8	1,8
34,5	104,2920246	1977	0,59		1983,8	2,4
35,5	162,6234973	1974	0,62		1982	2,9
36,5	84,56873504	1972	0,66		1979,7	3,2
37,5	60,06780651	1970	0,68		1977,4	3,7
38,5	118,0285039	1969	0,70		1975,2	3,9
39,5	78,11001686	1967	0,72		1973	4,1
40,5	81,86848798	1966	0,73		1970,7	4,1
41,5	90,62771142	1964	0,76		1968,4	3,9
42,5	113,6572236	1962	0,80		1965,1	5,1
43,5	114,4443413	1958	0,87		1961,9	5,8
44,5	78,23152247	1954	0,93		1958,6	6,4
45,5	88,64101955	1951	0,99		1955,3	6,9
46,5	47,45886357	1949	1,02		1952,1	7,3
47,5	65,53965135	1948	1,04		1948,8	7,6
48,5	42,51482369	1946	1,05		1945,5	7,9
49,5	52,2892141	1945	1,05		1942,2	8,1
50,5	35,23393667					
51,5	28,17801757					
52,5	33,54412272					
53,5	37,07617404					
54,5	27,39616053					
55,5	25,00498134					
56,5	17,98296598					
57,5	19,1701183					
58,5	16,60642264					

Multimedia component 3.

Supplementary Data 3. Depth–age model of the Kazanie profile. Model A—model based on ^{14}C dating, Model B—model based on ^{210}Pb dating.

Supplementary Data 4. Palynological (all taxa) and micro- and macrocharcoal diagram with ConsLink analysis. ↓ (strona 92)



DEKLARACJE WSPÓŁAUTORÓW

PIERWSZY ARTYKUŁ

Czerwiński, S., Marcisz, K., Wacnik, A., Lamentowicz, M., 2022. Synthesis of palaeoecological data from the Polish Lowlands suggests heterogeneous patterns of old-growth forest loss after the Migration Period. *Scientific Reports*, 12, 8559, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12241-1>



UNIWERSYTET IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
Instytut Geoekologii i Geoinformacji

Poznań, 10.11.2022

Mgr Sambor Czerwiński

Pracownia Ekologii Zmian Klimatu
Instytut Geoekologii i Geoinformacji
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
ul. Bogumiła Krygowskiego 10
61-680 Poznań
sambor.czerwinski@amu.edu.pl

Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykule naukowym opublikowanym w czasopiśmie
Scientific Reports

Potwierdzam, że mój wkład w artykule:

Czerwiński, S., Marcisz, K., Wacnik, A., Lamentowicz, M., 2022. Synthesis of palaeoecological data from the Polish Lowlands suggests heterogeneous patterns of old-growth forest loss after the Migration Period. *Scientific Reports*, 12, 8559, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12241-1>

Był następujący:

- przegląd literatury i wybór stanowisk badawczych do pracy przeglądowej
- napisanie pierwszej wersji manuskryptu i dalszy proces edycji manuskryptu
- interpretacja i synteza danych
- wykonanie wszystkich rycin w artykule i załączniku (**Supplementary Information**)
- autor korespondencyjny

Z wyrazami szacunku,

(Handwritten signature of Sambor Czerwiński)

Sambor Czerwiński

ul. B. Krygowskiego 10 Collegium Geographicum, 61-680 Poznań
NIP 777 00 06 350, REGON 000001293
tel. +48 61 829 61 74, fax. +48 61 829 62 71

www.geoinfo.amu.edu.pl/igig



UNIWERSYTET IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU

Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
Instytut Geoekologii i Geoinformacji

Poznań, 10.11.2022

Prof. Mariusz Lamentowicz

Pracownia Ekologii Zmian Klimatu
Instytut Geoekologii i Geoinformacji
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
ul. Bogumiła Krygowskiego 10
61-680 Poznań
mariusz.lamentowicz@amu.edu.pl

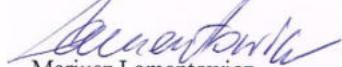
**Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykuł naukowy opublikowanym w czasopiśmie
Scientific Reports**

Potwierdzam, że mój wkład w artykule:

Czerwiński, S., Marcisz, K., Wacnik, A., **Lamentowicz, M.**, 2022. Synthesis of palaeoecological data from the Polish Lowlands suggests heterogeneous patterns of old-growth forest loss after the Migration Period. *Scientific Reports*, 12, 8559, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12241-1>

Był następujący: **dostarczenie części danych, interpretacja danych i pisanie manuskryptu**

Z wyrazami szacunku,



Mariusz Lamentowicz

ul. B. Krygowskiego 10 Collegium Geographicum, 61-680 Poznań
NIP 777 00 06 350, REGON 000001293
tel. +48 61 829 61 74, fax. +48 61 829 62 71

www.geoinfo.amu.edu.pl/igig



UNIWERSYTET IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANI

Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
Instytut Geoekologii i Geoinformacji

Poznań, 10.11.2022

Dr hab. Katarzyna Marcisz

Pracownia Ekologii Zmian Klimatu
Instytut Geoekologii i Geoinformacji
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
ul. Bogumiła Krygowskiego 10
61-680 Poznań
katarzyna.marcisz@amu.edu.pl

Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykule naukowym opublikowanym w czasopiśmie

Scientific Reports

Potwierdzam, że mój wkład w artykule:

Czerwiński, S., **Marcisz, K.**, Wacnik, A., Lamentowicz, M., 2022. Synthesis of palaeoecological data from the Polish Lowlands suggests heterogeneous patterns of old-growth forest loss after the Migration Period. *Scientific Reports*, 12, 8559, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12241-1>

Był następujący: dostarczenie części danych, interpretacja danych oraz przekazanie uwag i komentarzy do manuskryptu.

Z wyrazami szacunku,

Katarzyna Marcisz

Katarzyna Marcisz

ul. B. Krygowskiego 10 Collegium Geographicum, 61-680 Poznań
NIP 777 00 06 350, REGON 000001293
tel. +48 61 829 61 74, fax. +48 61 829 62 71

www.geoinfo.amu.edu.pl/igig

Kraków, 10.11.2022

Dr hab. Agnieszka Wacnik, prof. IB PAN

Grupa Paleobotaniki i Paleośrodowiska

Instytut Botaniki im. W. Szafera Polskiej Akademii Nauk

ul. Lubicz 46, 31-512 Kraków

a.wacnik@botany.pl

**Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykuł naukowy opublikowanym w
czasopiśmie Scientific Reports**

Potwierdzam, że mój wkład w artykule:

Czerwiński, S., Marcisz, K., **Wacnik, A.**, Lamentowicz, M., 2022. Synthesis of palaeoecological data from the Polish Lowlands suggests heterogeneous patterns of old-growth forest loss after the Migration Period. *Scientific Reports*, 12, 8559, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12241-1>

Był następujący: **dostarczenie części danych, interpretacja danych i pisanie manuskryptu**

Z wyrazami szacunku,

Agnieszka Wacnik
Agnieszka Wacnik

DRUGI ARTYKUŁ

Czerwiński, S., Guzowski, P., Karpińska-Kołaczek, M., Lamentowicz, M., Gałka, M., Kołaczek, P., Izdebski, A., Poniat, R., 2020. Znaczenie wspólnych badań historycznych i paleoekologicznych nad wpływem człowieka na środowisko. Przykład ze stanowiska Kazanie we wschodniej Wielkopolsce. Studia Geohistorica 7, 56-74,
<https://doi.org/10.12775/SG.2019.04>



Poznań, 10.11.2022

Mgr Sambor Czerwiński

Pracownia Ekologii Zmian Klimatu
Instytut Geoekologii i Geoinformacji
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
ul. Bogumiła Krygowskiego 10
61-680 Poznań
sambor.czerwinski@amu.edu.pl

**Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykule naukowym opublikowanym w czasopiśmie
Studia Geohistorica**

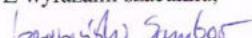
Potwierdzam, że mój wkład w artykule:

Czerwiński, S., Guzowski, P., Karpińska-Kołaczek, M., Lamentowicz, M., Gałka, M., Kołaczek, P., Izdebski, A., Poniat, R., 2020. Znaczenie wspólnych badań historycznych i paleoekologicznych nad wpływem człowieka na środowisko. Przykład ze stanowiska Kazanie we wschodniej Wielkopolsce. Studia Geohistorica 7, 56-74, <https://doi.org/10.12775/SG.2019.04>

Był następujący:

- obróbka laboratoryjna rdzenia
- analiza palinologiczna i mikroskopijnych fragmentów węgli drzewnych (frakcja 10-100 µm)
- napisanie pierwszej wersji manuskryptu i dalszy proces edycji manuskryptu
- interpretacja danych paleoekologicznych,
- synteza danych paleoekologicznych, archeologicznych i historycznych
- wykonanie rycin (Diagram nr 1)
- autor korespondencyjny

Z wyrazami szacunku,


Sambor Czerwiński

ul. B. Krygowskiego 10 Collegium Geographicum, 61-680 Poznań
NIP 777 00 06 350, REGON 000001293
tel. +48 61 829 61 74, fax. +48 61 829 62 71

Białystok, 10.11.2022

Dr hab. Piotr Guzowski, prof. UwB

Centrum Badań Struktur Społecznych i Gospodarczych
Przednowoczesnej Europy Środkowo-Wschodniej
Wydział Historii i Stosunków Międzynarodowych
Uniwersytet w Białymostku
Plac Niezależnego Zrzeszenia Studentów 1
15-420 Białystok
guzowski@uwb.edu.pl

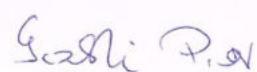
**Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykuł naukowy opublikowany w
czasopiśmie Studia Geohistorica**

Potwierdzam, że mój wkład w artykule:

Czerwiński, S., **Guzowski, P.**, Karpieńska-Kołaczek, M., Lamentowicz, M., Galka, M., Kołaczek, P., Izdebski, A., Poniat, R., 2020. Znaczenie wspólnych badań historycznych i paleoekologicznych nad wpływem człowieka na środowisko. Przykład ze stanowiska Kazanie we wschodniej Wielkopolsce. *Studia Geohistorica* 7, 56-74,
<https://doi.org/10.12775/SG.2019.04>

Był następujący: **zebranie i opracowanie danych historycznych i archeologicznych, interpretacja danych i pisanie manuskryptu, kierownik grantu Narodowego Programu Rozwoju Humanistyki, nr, 2bH 15 0154 83**

Z wyrazami szacunku,



Piotr Guzowski



UNIWERSYTET IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
Instytut Geoekologii i Geoinformacji

Poznań, 10.11.2022

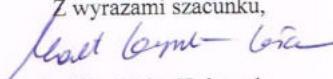
Dr Monika Karpińska-Kołaczek
Pracownia Ekologii Zmian Klimatu
Instytut Geoekologii i Geoinformacji
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
ul. Bogumiła Krygowskiego 10
61-680 Poznań
monkar2@amu.edu.pl

**Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykuł naukowy opublikowanym w czasopiśmie
Studia Geohistorica**

Potwierdzam, że mój wkład w artykule:

Czerwiński, S., Guzowski, P., **Karpińska-Kołaczek, M.**, Lamentowicz, M., Gałka, M., Kołaczek, P., Izdebski, A., Poniat, R., 2020. Znaczenie wspólnych badań historycznych i paleoekologicznych nad wpływem człowieka na środowisko. Przykład ze stanowiska Kazanie we wschodniej Wielkopolsce. Studia Geohistorica 7, 56-74, <https://doi.org/10.12775/SG.2019.04>

Był następujący: **interpretacja danych i pisanie manuskryptu**

Z wyrazami szacunku,

Monika Karpińska-Kołaczek

ul. B. Krygowskiego 10 Collegium Geographicum, 61-680 Poznań
NIP 777 00 06 350, REGON 000001293
tel. +48 61 829 61 74, fax. +48 61 829 62 71

www.geoinfo.amu.edu.pl/igig



UNIWERSYTET IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
Instytut Geoekologii i Geoinformacji

Poznań, 10.11.2022

Prof. Mariusz Lamentowicz

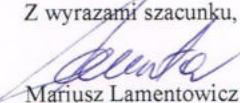
Pracownia Ekologii Zmian Klimatu
Instytut Geoekologii i Geoinformacji
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
ul. Bogumiła Krygowskiego 10
61-680 Poznań
mariusz.lamentowicz@amu.edu.pl

**Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykule naukowym opublikowanym w czasopiśmie
Studia Geohistorica**

Potwierdzam, że mój wkład w artykule:

Czerwiński, S., Guzowski, P., Karpińska-Kołaczek, M., **Lamentowicz, M.**, Gałka, M., Kołaczek, P., Izdebski, A., Poniat, R., 2020. Znaczenie wspólnych badań historycznych i paleoekologicznych nad wpływem człowieka na środowisko. Przykład ze stanowiska Kazanie we wschodniej Wielkopolsce. Studia Geohistorica 7, 56-74, <https://doi.org/10.12775/SG.2019.04>

Był następujący: **pobór rdzenia z torfowiska, interpretacja danych i pisanie manuskryptu**

Z wyrazami szacunku,

Mariusz Lamentowicz

ul. B. Krygowskiego 10 Collegium Geographicum, 61-680 Poznań
NIP 777 00 06 350, REGON 000001293
tel. +48 61 829 61 74, fax. +48 61 829 62 71

www.geoinfo.amu.edu.pl/igig

Łódź, 10.11.2022

Dr hab. Mariusz Gałka, prof. UŁ

Katedra Biogeografii, Paleoekologii i Ochrony Przyrody

Wydział Biologii i Ochrony Środowiska

Stefana Banacha 1/3

90-232 Łódź

mariusz.galka@biol.uni.lodz.pl

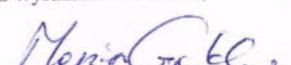
**Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykuł naukowy opublikowany w
czasopiśmie Studia Geohistorica**

Potwierdzam, że mój wkład w artykule:

Czerwiński, S., Guzowski, P., Karpińska-Kołaczek, M., Lamentowicz, M., **Gałka, M.**, Kołaczek, P., Izdebski, A., Poniat, R., 2020. Znaczenie wspólnych badań historycznych i paleoekologicznych nad wpływem człowieka na środowisko. Przykład ze stanowiska Kazanie we wschodniej Wielkopolsce. *Studia Geohistorica* 7, 56-74,
<https://doi.org/10.12775/SG.2019.04>

był następujący: pobór rdzenia z torfowiska, edytowanie napisanego manuskryptu

Z wyrazami szacunku,



Mariusz Gałka



UNIWERSYTET IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
Instytut Geoekologii i Geoinformacji

Poznań, 10.11.2022

Dr hab. Piotr Kołaczek, prof. UAM

Pracownia Ekologii Zmian Klimatu
Instytut Geoekologii i Geoinformacji
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
ul. Bogumiła Krygowskiego 10
61-680 Poznań
piotr.kolaczek@amu.edu.pl

Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykuł naukowy opublikowanym w czasopiśmie

Studia Geohistorica

Potwierdzam, że mój wkład w artykule:

Czerwiński, S., Guzowski, P., Karpińska-Kołaczek, M., Lamentowicz, M., Galka, M., **Kołaczek, P.**, Izdebski, A., Poniat, R., 2020. Znaczenie wspólnych badań historycznych i paleoekologicznych nad wpływem człowieka na środowisko. Przykład ze stanowiska Kazanie we wschodniej Wielkopolsce. Studia Geohistorica 7, 56-74, <https://doi.org/10.12775/SG.2019.04>

Był następujący: **pobór rdzenia z torfowiska, interpretacja danych i pisanie manuskryptu**

Z wyrazami szacunku,

Piotr Kołaczek

ul. B. Krygowskiego 10 Collegium Geographicum, 61-680 Poznań
NIP 777 00 06 350, REGON 000001293
tel. +48 61 829 61 74, fax. +48 61 829 62 71

www.geoinfo.amu.edu.pl/igig

Jena, 10.11.2022

Dr hab. Adam Izdebski

Max Planck Institute for the Geoanthropology

Dr hab. Adam Izdebski

Kahlaische Strasse 10

07745 Jena, Niemcy

izdebski@shh.mpg.de

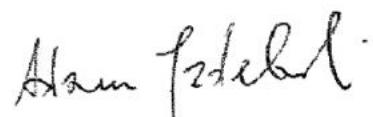
**Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykuł naukowy opublikowanym w
czasopiśmie Studia Geohistorica**

Potwierdzam, że mój wkład w artykule:

Czerwiński, S., Guzowski, P., Karpińska-Kołaczek, M., Lamentowicz, M., Gałka, M., Kołaczek, P., Izdebski, A., Poniat, R., 2020. Znaczenie wspólnych badań historycznych i paleoekologicznych nad wpływem człowieka na środowisko. Przykład ze stanowiska Kazanie we wschodniej Wielkopolsce. Studia Geohistorica 7, 56-74,
<https://doi.org/10.12775/SG.2019.04>

Był następujący: **pisanie manuskryptu**

Z wyrazami szacunku,



Białystok, 10.11.2022

Dr Radosław Poniat

Centrum Badań Struktur Społecznych i Gospodarczych
Przednowoczesnej Europy Środkowo-Wschodniej
Wydział Historii i Stosunków Międzynarodowych
Uniwersytet w Białymostku
Plac Niezależnego Zrzeszenia Studentów 1
15-420 Białystok
r.poniat@uwb.edu.pl

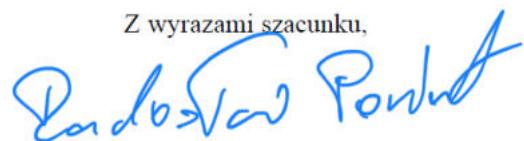
**Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykuł naukowy opublikowanym w
czasopiśmie *Studia Geohistorica***

Potwierdzam, że mój wkład w artykule:

Czerwiński, S., Guzowski, P., Karpińska-Kołaczek, M., Lamentowicz, M., Galka, M., Kołaczek, P., Izdebski, A., **Poniat, R.**, 2020. Znaczenie wspólnych badań historycznych i paleoekologicznych nad wpływem człowieka na środowisko. Przykład ze stanowiska Kazanie we wschodniej Wielkopolsce. *Studia Geohistorica* 7, 56-74,
<https://doi.org/10.12775/SG.2019.04>

Był następujący: **zebranie i opracowanie danych historycznych i archeologicznych, interpretacja danych i pisanie manuskryptu**

Z wyrazami szacunku,



TRZECI ARTYKUŁ

Czerwiński, S., Guzowski, P., Lamentowicz, M., Gałka, M., Karpińska-Kołaczek, M., Poniat, R., Łokas, E., Diaconu, A.-C., Schwarzer, J., Miecznik, M., Kołaczek, P., 2021. Environmental implications of past socioeconomic events in Greater Poland during the last 1200 years. Synthesis of paleoecological and historical data. Quaternary Science Reviews, 259, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106902>



Poznań, 10.11.2022

Mgr Sambor Czerwiński

Pracownia Ekologii Zmian Klimatu
Instytut Geoekologii i Geoinformacji
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
ul. Bogumiła Krygowskiego 10
61-680 Poznań
sambor.czerwinski@amu.edu.pl

**Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykuł naukowy opublikowanym w czasopiśmie
Quaternary Science Reviews**

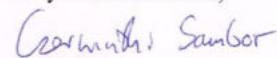
Potwierdzam, że mój wkład w artykule:

Czerwiński, S., Guzowski, P., Lamentowicz, M., Galka, M., Karpińska-Kołaczek, M., Poniat, R., Łokas, E., Diaconu, A.-C., Schwarzer, J., Miecznik, M., Kołaczek, P., 2021. Environmental implications of past socioeconomic events in Greater Poland during the last 1200 years. Synthesis of paleoecological and historical data. Quaternary Science Reviews, 259, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106902>

Był następujący:

- obróbka laboratoryjna rdzenia,
- analiza palinologiczna i mikroskopijnych fragmentów węgli drzewnych (frakcja 10-100 µm)
- napisanie pierwszej wersji manuskryptu i dalszy proces edycji manuskryptu
- interpretacja danych paleoekologicznych,
- synteza danych paleoekologicznych, archeologicznych i historycznych
- wykonanie wszystkich rycin w artykule za wyjątkiem ryciny nr 2 (Fig. 2)
- wykonanie wszystkich analiz statystycznych
- wykonanie rycin w załączniku (Supplementary data 4)
- zebranie danych historycznych zestawionych w rozdziale 6.5
- autor korespondencyjny

Z wyrazami szacunku,


Sambor Czerwiński

ul. B. Krygowskiego 10 Collegium Geographicum, 61-680 Poznań
NIP 777 00 06 350, REGON 000001293
tel. +48 61 829 61 74, fax. +48 61 829 62 71

Białystok, 10.11.2022

Dr hab. Piotr Guzowski, prof. UwB

Centrum Badań Struktur Społecznych i Gospodarczych
Przednowoczesnej Europy Środkowo-Wschodniej
Wydział Historii i Stosunków Międzynarodowych
Uniwersytet w Białymstoku
Plac Niezależnego Zrzeszenia Studentów 1
15-420 Białystok
guzowski@uwb.edu.pl

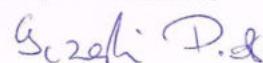
**Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykuł naukowy opublikowanym w
czasopiśmie Quaternary Science Reviews**

Potwierdzam, że mój wkład w artykule:

Czerwiński, S., **Guzowski, P.**, Lamentowicz, M., Galka, M., Karpińska-Kołaczek, M., Poniat, R., Łokas, E., Diaconu, A.-C., Schwarzer, J., Miecznik, M., Kołaczek, P., 2021. Environmental implications of past socioeconomic events in Greater Poland during the last 1200 years. Synthesis of paleoecological and historical data. *Quaternary Science Reviews*, 259, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106902>

Był następujący: **zebranie i opracowanie danych historycznych i archeologicznych, interpretacja danych i pisanie manuskryptu, kierownik grantu Narodowego Programu Rozwoju Humanistyki, nr, 2bH 15 0154 83**

Z wyrazami szacunku,



Piotr Guzowski



UNIWERSYTET IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNAN
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
Instytut Geoekologii i Geoinformacji

Poznań, 10.11.2022

Prof. Mariusz Lamentowicz

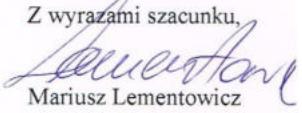
Pracownia Ekologii Zmian Klimatu
Instytut Geoekologii i Geoinformacji
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
ul. Bogumiła Krygowskiego 10
61-680 Poznań
mariusz.lamentowicz@amu.edu.pl

**Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykule naukowym opublikowanym w czasopiśmie
Quaternary Science Reviews**

Potwierdzam, że mój wkład w artykule:

Czerwiński, S., Guzowski, P., **Lamentowicz, M.**, Gaika, M., Karpińska-Kołaczek, M., Poniat, R., Lokas, E., Diaconu, A.-C., Schwarzer, J., Miecznik, M., Kołaczek, P., 2021. Environmental implications of past socioeconomic events in Greater Poland during the last 1200 years. Synthesis of paleoecological and historical data. Quaternary Science Reviews, 259,
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106902>

Był następujący: **pobór rdzenia z torfowiska, interpretacja danych i pisanie manuskryptu**

Z wyrazami szacunku,

Mariusz Lamentowicz

ul. B. Krygowskiego 10 Collegium Geographicum, 61-680 Poznań
NIP 777 00 06 350, REGON 000001293
tel. +48 61 829 61 74, fax. +48 61 829 62 71

www.geinfo.amu.edu.pl/igig

Łódź, 10.11.2022

Dr hab. Mariusz Galka, prof. UŁ

Katedra Biogeografii, Paleoekologii i Ochrony Przyrody
Wydział Biologii i Ochrony Środowiska
Stefana Banacha 1/3
90-232 Łódź
mariusz.galka@biol.uni.lodz.pl

**Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykuł naukowy opublikowanym w
czasopiśmie Quaternary Science Reviews**

Potwierdzam, że mój wkład w artykule:

Czerwiński, S., Guzowski, P., Lamentowicz, M., **Galka, M.**, Karpińska-Kołaczek, M., Poniat, R., Łokas, E., Diaconu, A.-C., Schwarzer, J., Miecznik, M., Kołaczek, P., 2021. Environmental implications of past socioeconomic events in Greater Poland during the last 1200 years. Synthesis of paleoecological and historical data. *Quaternary Science Reviews*, 259, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106902>

był następujący: pobór rdzenia z torfowiska, analiza makroszczątków roślinnych,
interpretacja danych i edytowanie manuskryptu

Z wyrazami szacunku,



Mariusz Galka



UNIWERSYTET IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNAN

Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
Instytut Geoekologii i Geoinformacji

Poznań, 10.11.2022

Dr Monika Karpińska-Kołaczek

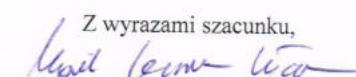
Pracownia Ekologii Zmian Klimatu
Instytut Geoekologii i Geoinformacji
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
ul. Bogumiła Krygowskiego 10
61-680 Poznań
monkar2@amu.edu.pl

**Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykule naukowym opublikowanym w czasopiśmie
Quaternary Science Reviews**

Potwierdzam, że mój wkład w artykule:

Czerwiński, S., Guzowski, P., Lamentowicz, M., Gałka, M., **Karpińska-Kołaczek, M.**, Poniat, R., Łokas, E., Diaconu, A.-C., Schwarzer, J., Miecznik, M., Kołaczek, P., 2021. Environmental implications of past socioeconomic events in Greater Poland during the last 1200 years. Synthesis of paleoecological and historical data. Quaternary Science Reviews, 259, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106902>

Był następujący: **interpretacja danych i pisanie manuskryptu**

Z wyrazami szacunku,

Monika Karpińska-Kołaczek

ul. B. Krygowskiego 10 Collegium Geographicum, 61-680 Poznań
NIP 777 00 06 350, REGON 000001293
tel. +48 61 829 61 74, fax. +48 61 829 62 71

www.geoinfo.amu.edu.pl/igig

Białystok, 10.11.2022

Dr Radosław Poniat

Centrum Badań Struktur Społecznych i Gospodarczych
Przednowoczesnej Europy Środkowo-Wschodniej
Wydział Historii i Stosunków Międzynarodowych
Uniwersytet w Białymostku
Plac Niezależnego Zrzeszenia Studentów 1
15-420 Białystok
r.poniat@uwb.edu.pl

**Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykuł naukowym opublikowanym w
czasopiśmie Quaternary Science Reviews**

Potwierdzam, że mój wkład w artykule:

Czerwiński, S., Guzowski, P., Lamentowicz, M., Galka, M., Karpińska-Kołaczek, M., **Poniat, R.**, Lokas, E., Diaconu, A.-C., Schwarzer, J., Miecznik, M., Kołaczek, P., 2021. Environmental implications of past socioeconomic events in Greater Poland during the last 1200 years. Synthesis of paleoecological and historical data. *Quaternary Science Reviews*, 259, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106902>

Był następujący: **zebranie i opracowanie danych historycznych i archeologicznych,
interpretacja danych i pisanie manuskryptu**

Z wyrazami szacunku,



Kraków, 10.11.2022

Dr hab. inż. Edyta Łokas

Zakład Spektrometrii Mas
Instytut Fizyki Jądrowej
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152
31-342 Kraków
edyta.lokas@ifj.edu.pl

**Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykuł naukowym opublikowanym w
czasopiśmie Quaternary Science Reviews**

Potwierdzam, że mój wkład w artykule:

Czerwiński, S., Guzowski, P., Lamentowicz, M., Gałka, M., Karpińska-Kołaczek, M., Poniat, R., **Łokas, E.**, Diaconu, A.-C., Schwarzer, J., Miecznik, M., Kołaczek, P., 2021. Environmental implications of past socioeconomic events in Greater Poland during the last 1200 years. Synthesis of paleoecological and historical data. Quaternary Science Reviews, 259, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106902>

Był następujący: **wykonanie datowania metodą ^{210}Pb , interpretacja uzyskanych danych
datowania metodą ^{210}Pb i pisanie manuskryptu**

Z wyrazami szacunku,



Edyta Łokas

Cluj-Napoca, 10.11.2022

Dr Andrei-Cosmin Diaconu

Babes-Bolyai University

str. Mihail Kogalniceanu, nr. 1, Cluj-Napoca, Cluj, Romania, 400347

andreicosmind@yahoo.com

Declaration of contribution to an article published in Quaternary Science Reviews

Hereby I confirm that my contribution to the article:

Czerwiński, S., Guzowski, P., Lamentowicz, M., Gałka, M., Karpińska-Kołaczek, M., Poniat, R., Łokas, E., **Diaconu, A.-C.**, Schwarzer, J., Miecznik, M., Kołaczek, P., 2021. Environmental implications of past socioeconomic events in Greater Poland during the last 1200 years. Synthesis of paleoecological and historical data. Quaternary Science Reviews, 259, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106902>

Was as follows: **macrocharcoal analysis and writing the manuscript**

With kind regards,

Andrei-Cosmin Diaconu



Potsdam, 10.11.2022

MSc Johanna Schwarzer, Freie Universität Berlin
johanna.schwarzer@fu-berlin.de

Declaration of contribution to an article published in Quaternary Science Reviews

Hereby I confirm that my contribution to the article:

Czerwiński, S., Guzowski, P., Lamentowicz, M., Gałka, M., Karpińska-Kołaczek, M., Poniat, R., Łokas, E., Diaconu, A.-C., **Schwarzer, J.**, Miecznik, M., Kołaczek, P., 2021. Environmental implications of past socioeconomic events in Greater Poland during the last 1200 years. Synthesis of paleoecological and historical data. Quaternary Science Reviews, 259, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106902>

Was as follows: **analysis of macrocharcoal and writing the manuscript**

With kind regards,



Johanna Schwarzer

Kraków, 10.11.2022

Dr inż. Magdalena Miecznik

Zakład Fizykochemii Jądrowej
Instytut Fizyki Jądrowej
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152
31-342 Kraków

**Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykuł naukowy opublikowany w
czasopiśmie Quaternary Science Reviews**

Potwierdzam, że wkład w artykule dr inż. Magdaleny Miecznik:

Czerwiński, S., Guzowski, P., Lamentowicz, M., Galka, M., Karpińska-Kołaczek, M., Poniat, R., Łokas, E., Diaconu, A.-C., Schwarzer, J., **Miecznik, M.**, Kołaczek, P., 2021. Environmental implications of past socioeconomic events in Greater Poland during the last 1200 years. Synthesis of paleoecological and historical data. Quaternary Science Reviews, 259, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106902>

Był następujący: wydzielenie i depozycja ^{210}Po z próbek torfów oraz pomiary alfa spektrometryczne.

Dr inż. Magdalena Miecznik wykonywała analizę pod opieką dr hab. inż. Edyty Łokas.

Z wyrazami szacunku,



Edyta Łokas



UNIWERSYTET IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
Instytut Geoekologii i Geoinformacji

Poznań, 10.11.2022

Dr hab. Piotr Kolaczek, prof. UAM

Pracownia Ekologii Zmian Klimatu
Instytut Geoekologii i Geoinformacji
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
ul. Bogumiła Krygowskiego 10
61-680 Poznań
piotr.kolaczek@amu.edu.pl

Oświadczenie o wkładzie autorskim w artykuł naukowy opublikowanym w czasopiśmie
Quaternary Science Reviews

Potwierdzam, że mój wkład w artykule:

Czerwiński, S., Guzowski, P., Lamentowicz, M., Gałka, M., Karpieńska-Kołaczek, M., Poniat, R., Lokas, E., Diaconu, A.-C., Schwarzer, J., Miecznik, M., **Kołaczek, P.**, 2021. Environmental implications of past socioeconomic events in Greater Poland during the last 1200 years. Synthesis of paleoecological and historical data. Quaternary Science Reviews, 259, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106902>

Był następujący: pobór rdzenia z torfowiska, modelowanie kalendarzowej skali czasu dla stanowiska badań, interpretacja danych i pisanie manuskryptu

Z wyrazami szacunku,

Piotr Kołaczek

ul. B. Krygowskiego 10 Collegium Geographicum, 61-680 Poznań
NIP 777 00 06 350, REGON 000001293
tel. +48 61 829 61 74, fax. +48 61 829 62 71

www.geoinfo.amu.edu.pl/igig