

UNIwersytet IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU
WYDZIAŁ NAUK GEOGRAFICZNYCH I GEOLOGICZNYCH
INSTYTUT GEOEKOLOGII I GEOINFORMACJI

Paweł Matulewski

**Wpływ denudacji antropogenicznej
na przyrosty radialne i anatomię drewna
korzeni sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.).
Studium przypadku z Pojezierza Brodnickiego**

Praca doktorska
napisana pod kierunkiem
Prof. UAM dr hab. Mirosława Makohonienko
oraz dr Agaty Buchwał
w Zakładzie Geologii i Paleogeografii
Czwartorzędu



UNIwersytet
IM. ADAMA MICKIEWICZA
W POZNANIU

POZNAŃ 2018

„Pomóż mi zamienić słowa w barwne nici. Na krosnach czasu będę tkłał nasz brodnicki dom.”
Ryszard Przybylski

*Pracę tę dedykuję swoim wspaniałym rodzicom,
za trud wychowania i bezgraniczną pomoc.*

*Składam serdeczne podziękowania
Panu Profesorowi Mirosławowi Makohonienko
za okazaną życzliwość, zrozumienie, pomoc oraz cenne uwagi
przekazywane w trakcie przygotowania niniejszej pracy.*

*oraz Pani Doktor Agacie Buchwał
za ogrom inspiracji, naukę dendrochronologii i bezgraniczne wsparcie.*

*Podziękowania za bezcenne dyskusję i pomoc przy realizacji doktoratu składam:
mgr Anni Zielonce, dr Dominice Wrońskiej-Wałach z Uniwersytetu Jagiellońskiego*

*Składam wyrazy szczególnego uznania dla
Dr Holgera Gärtnera z Dendro Sciencec Unit Swiss Federal Institute WSL
Prof. Katarinie Čufar z Department of Wood Science and Technology
Osobom z Pracowni Dendrochronologicznej z Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w
Toruniu*

*Serdecznie dziękuje również: mgr Mirosławie Malinowskiej-Limanówce
i mgr Przemysławowi Szymurze z Zakładu Geomorfologii UAM Poznań.*

*Chciałbym podziękować za pomoc, wszystkim moim przyjaciołom z Brodnicy, którzy
wielokrotnie poświęcili swój czas w trakcie badań terenowych, a w szczególności:
Hani Bielickiej, Bartkowi Troczyńskiemu, Pawłowi Staniszewskiemu,
Danielowi Wasilewskiemu, Rafałowi Rolińskiemu.*

*Dziękuję Dyrekcji Nadleśnictwa Brodnica, Dyrekcji Brodnickiego Park Krajobrazowego,
za umożliwienie przeprowadzenia badań, dostarczone informacje
oraz materiały kartograficzne.*

*Dziękują bliskim mi osobom za wsparcie i dobre słowo, w szczególności Mamie
Krystynie, Babci Jance, Danielowi, bratu Michałowi, Goście, Gosi S., Ani, Osce, Pawłowi,
Gosi O i Mikołajowi.*

*Specjalne podziękowania kieruję pod adresem mojego Taty Marka,
za nieocenioną pomoc i wsparcie w realizacji prac terenowych.*

Spis treści

1. Wprowadzenie.....	6
2. Problem i cele pracy	8
5. Stan badań.....	11
5.1. Wpływ antropopresji turystycznej na środowisko geograficzne	11
5.2. Wpływ antropopresji turystycznej na szatę roślinną	16
5.3. Metody badań wpływu antropopresji turystycznej na szatę roślinną	18
5.4. Zastosowanie analiz dendrochronologicznych w badaniach procesów geomorfologicznych ze szczególnym uwzględnieniem wpływu turystyki.....	19
5.5. Zastosowanie metody dendrochronologicznej do ilościowej oceny procesów geomorfologicznych.....	25
6. Materiał i metody badań.....	29
6.1. Kartowanie terenowe szlaków turystycznych	29
6.2. Analiza dendrochronologiczna.....	30
6.2.1. Analiza dendrochronologiczna pni.....	30
6.2.2. Analiza dendrochronologiczna korzeni.....	33
6.2.3. Analiza tempa denudacji antropogenicznej na podstawie odśnieżeń korzeni	41
6.3. Analiza właściwości fizycznych pokrywy glebowej szlaku turystycznego	41
6.4. Monitoring ruchu turystycznego.....	43
6.5. Metody inwentaryzacyjne	44
6.6. Materiały archiwalne.....	44
7. Słownik pojęć i terminów dendrochronologicznych.....	46
8. Obszar badań. Pojezierze Brodnickie	48
8.1. Położenie fizyczno-geograficzne	49
8.2. Budowa geologiczna.....	50
8.3. Rzeźba terenu.....	50
8.4. Klimat	53
8.5. Wody	53
8.6. Gleby	54
8.7. Szata roślinna	55
8.8. Stanowisko Bachotek.....	57
9. Turystyka na Pojezierzu Brodnickim	62
9.1. Historia turystyki na terenie Pojezierza Brodnickiego	62
9.2. Wpływ antropopresji turystycznej na środowisko geograficzne Pojezierza Brodnickiego	64
9.3. Wielkość i sezonowość ruchu turystycznego na stanowisku Bachotek w okresie 2014-2016	67

9.4.	Dyskusja. Ruch turystyczny na Pojezierze Brodnickim.....	70
10.	Analiza dendrochronologiczna pni sosny zwyczajnej (<i>Pinus sylvestris</i> L.) poddanej i niepoddanej presji turystycznej na stanowisku Bachotek.....	71
10.1.	Analiza wzoru przyrostowego sosny zwyczajnej dla dwóch stanowisk.....	71
10.2.	Analiza dendroklimatologiczna	72
10.3.	Analiza lat wskaźnikowych	74
10.4.	Dyskusja wyników analizy dendrochronologicznej pni sosny zwyczajnej (<i>Pinus sylvestris</i> L.) poddanej i niepoddanej presji turystycznej na stanowisku Bachotek	78
11.	Charakterystyka korzeni odstłoniętych sosny zwyczajnej (<i>Pinus sylvestris</i> L.) ze szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek	81
11.1.	Cechy zewnętrzne korzeni odstłoniętych	81
11.2.	Typologia drzew z odstłonięciami korzeni ze szlaku turystycznego	82
12.	Analiza zmian przyrostowych i anatomicznych korzeni odstłoniętych sosny zwyczajnej (<i>Pinus sylvestris</i> L.) ze szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek	85
12.1.	Analiza przyrostowa korzeni odstłoniętych	85
12.2.	Lata odstłonięć korzeni	85
12.3.	Charakter i kierunkowość odstłonięć korzeni.....	87
12.4.	Uszkodzenia mechaniczne w drewnie korzeni odstłoniętych.....	89
12.5.	Wpływ warunków termiczno-pluwialnych na odstłonięcia i uszkodzenia mechaniczne korzeni sosny zwyczajnej	92
12.6.	Dyskusja wyników dotyczących zmian przyrostowych i anatomicznych korzeni odstłoniętych sosny zwyczajnej poddanych denudacji antropogenicznej.....	94
13.	Datowanie w wysokiej rozdzielczości zmian przyrostowych korzeni sosny zwyczajnej (<i>Pinus sylvestris</i> L.) ze szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek	100
13.1.	Analiza zmian przyrostowych wybranych korzeni odstłoniętych i zastłoniętych poddanych presji turystycznej	102
13.2.	Dyskusja wyników datowania w wysokiej rozdzielczości zmian przyrostowych korzeni sosny zwyczajnej poddanych denudacji antropogenicznej.....	120
14.	Datowanie w wysokiej rozdzielczości zmian przyrostowych i anatomicznych korzenia sosny zwyczajnej (<i>Pinus sylvestris</i> L.) z pojedynczym odstłonięciem wraz z analizą sąsiedniego korzenia zastłoniętego.....	124
14.1.	Analiza zmian przyrostowych korzenia odstłoniętego i zastłoniętego	124
14.2.	Analiza zmian anatomicznych korzenia odstłoniętego i zastłoniętego.....	133
14.3.	Dyskusja wyników datowania w wysokiej rozdzielczości zmian przyrostowych i anatomicznych korzenia sosny zwyczajnej z pojedynczym odstłonięciem wraz z analizą sąsiedniego korzenia zastłoniętego	135
15.	Dendrogeomorfologiczny zapis tempa denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym stanowiska Bachotek.....	137

15.1. Wybór metody kalkulacji tempa denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym przy użyciu korzeni odsłoniętych.....	137
15.2. Wielkość tempa denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym stanowiska Bachotek.....	145
15.3. Uwarunkowania tempa denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym stanowiska Bachotek	149
15.4. Dyskusja wyników dotyczących wielkości i uwarunkowań tempa denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym	152
16. Etapy oddziaływania denudacji antropogenicznej na korzenie i pnie drzew sosny zwyczajnej (<i>Pinus sylvestris</i> L.) w obrębie szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek	156
17. Zastosowanie metody dendrogeomorfologicznej w badaniach denudacji antropogenicznej na szlakach turystycznych- wskazówki metodyczne	163
18. Podsumowanie.....	165
Literatura	170
Spis rycin	197
Spis tabel	202
Załączniki.....	202

1. Wprowadzenie

Współcześnie rzeźba obszarów młodoglacjalnych jest kształtowana przez naturalne procesy morfogenetyczne, modyfikowane w znacznym stopniu wskutek działalności człowieka w tym rolnictwo, gospodarkę leśną oraz turystykę. Na obszarach użytkowanych przez człowieka widoczne jest znaczne zwiększenie intensywności naturalnych procesów, do których należą między innymi: splukiwanie liniowe, deflacja, powierzchniowe ruchy masowe, sufozja oraz denudacja chemiczna. Całokształt różnych procesów stokowych wywołanych i przyspieszonych przez działalność człowieka określany jest denudacją antropogeniczną (Sinkiewicz 1998). W wyniku jej działania dochodzi do przekształceń rzeźby terenu, pokrywy glebowej oraz szaty roślinnej. Jedną z form działalności człowieka powodującą przyspieszenie denudacji antropogenicznej jest szeroko pojęta turystyka.

Problem wpływu turystyki szczególnie dotyczy obszarów cennych przyrodniczo, które ze względu na swoją atrakcyjność turystyczną poddawane są presji turystycznej (Kozuchowski 2005). Stale zwiększający się ruch turystyczny (Mika 2000) wywiera wpływ na środowisko geograficzne, zmieniając je w niekorzystnym kierunku, poprzez niszczenie lub pomniejszenie wartości jego zasobów. Na stopień degradacji zasobów wpływa charakter i intensywność użytkowania turystycznego (Pstrocka-Rak 2017). Różnicuje się ono pod kątem zasięgu przestrzennego oraz rozkładu w czasie, modyfikując przy tym procesy morfogenetyczne zachodzące w środowisku geograficznym. Współdziałanie presji turystycznej i procesów naturalnych określone mianem denudacji antropogenicznej zwiększa stopień przekształcenia komponentów środowiska geograficznego, wyróżniających się z reguły znaczną wrażliwością i podatnością na degradację.

Wpływ denudacji antropogenicznej widoczny jest najsilniej wzdłuż szlaków turystycznych (Styperek 2001; Kasprzak 2005), gdzie powstały powierzchnie o zdegradowanej pokrywie roślinnej i glebowej (Róg 1985; Gorczyca 2000; Mika 2000; Myga-Piątek, Jankowski 2009). Szlaki turystyczne stanowią formy antropogeniczne o przebiegu liniowym, gdzie uszkodzona i wydeptana roślinność odsłania wierzchnie warstwy gleby. W wyniku pozbawienia pokrywy roślinnej dochodzi do wzmożonej denudacji na stokach wzniesień oraz na zboczach rynien użytkowanych turystycznie. Zmiany w środowisku szlaku powstałe w wyniku jego użytkowania zaznaczają się przyspieszonym odpływem wody, licznymi rozcięciami na jego powierzchni, utwardzaniem podłoża czy intensywną ekspozycją korzeni drzew. Podobnie sytuacja wygląda na drogach i ścieżkach w parkach miejskich, cmentarzach czy zieleńcach osiedlowych gdzie silne i ciągłe wydeptywanie pokrywy glebowej powoduje powszechne odstonięcie korzeni obniżając tym samym kondycję zdrowotną drzew.

Poznanie skutków oddziaływania denudacji antropogenicznej jest konieczne w kontekście stałego monitorowania i zapobiegania degradacji komponentów środowiska geograficznego szlaków turystycznych (Rączkowska, Kozłowska 2010). Szczególną uwagę zwrócono na ten problem przy okazji prowadzenia badań w obszarach górskich (Jahn 1958; Gerlach 1959, Kotarba 1976, 1983; Kłapa 1980, Izmailow 1986, Krzemień 1991; Skawiński 1993; Krusiec 1996; Gorczyca, Krzemień 2002, 2010; Prędkie 2004; Fidelus 2008). W pracach tych podkreślona została zwiększona aktywność naturalnych procesów morfogenetycznych na skutek turystycznego użytkowania górskich szlaków. Działalność człowieka, w tym turystyka piesza, poprzez zniszczenie lub uszkodzenie pokrywy glebowej i korzeni spowodowała w tych miejscach nasilenie erozji oraz powstanie nowych, licznych form rzeźby. Wciąż jednak niewiele jest wiadomo na temat przebiegu i wpływu denudacji antropogenicznej na komponenty środowiska

geograficznego szlaków w tym szatę roślinną, w strefie niżowej. W tym zakresie brakuje opracowań ilościowych i jakościowych, charakteryzujących czynniki i skutki jej oddziaływania na drzewostan. Z tego względu poszukuje się zapisu zmian środowiskowych próbując określić czasowe i przestrzenne natężenie oddziaływania denudacji antropogenicznej. Ponadto istnieje potrzeba rozszerzenia badań z zakresu degradacji szlaków turystycznych i rosnących wzdłuż nich drzew, które wykorzystywałyby nowoczesny warsztat badawczy i dostarczyłyby kompleksowych danych pozwalających na sprawniejsze zarządzanie obszarami chronionymi.

Dotychczas identyfikacja wpływu denudacji antropogenicznej na drzewa rosnące na szlakach ograniczała się do jakościowego opisu zniszczeń pni i korzeni (Okolów 1978). W tym kontekście szczegółowa analiza reakcji anatomicznych i przyrostowych drzewostanu, stanowi skuteczne narzędzie do datowania zdarzeń środowiskowych w regionach pozbawionych ilościowych informacji o szczegółowych zapisach historycznych (Lopez Saez i in. 2011). Bioindykatorem jakimi są pnie i korzenie drzew, mogą stanowić alternatywną metodę określania wpływu denudacji antropogenicznej na środowisko geograficzne w krótkich i średniookresowych odstępach czasowych (Stoffel i in. 2010; Stoffel i in. 2013), zwłaszcza na obszarze bez ciągłości monitoringu środowiskowego. Korzenie i pnie są szczególnie cennym źródłem informacji geograficznej rejestrując corocznie w stojach zmiany środowiskowe. Wobec tego drzewostan porastający tereny wzdłuż szlaków turystycznych pozwala na zastosowanie metody dendrochronologicznej w czasowej i przestrzennej rekonstrukcji etapów denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym.

2. Problem i cele pracy

Najważniejsze motywacje, które skłoniły autora do realizacji niniejszego opracowania to:

Niewielki udział prac o charakterze ilościowym dotyczących wpływu ruchu turystycznego na środowisko geograficzne na obszarze Polski, zwłaszcza strefy niżowej. Współcześnie brakuje prac z zakresu degradacji szlaków turystycznych, które wykorzystywałyby nowoczesny warsztat badawczy. Dostępne metody nie zawsze pozwalają na bogatą rekonstrukcję środowiska zwłaszcza, że obszary leśne strefy niżowej pozbawione są ciągłego monitoringu zmian środowiska geograficznego. Dla tych obszarów możliwe staje się wykorzystanie zapisu biotycznego, jakimi są korzeni i pnie drzew.

Brak szerszego zastosowania metody dendrochronologicznej w kontekście badań wpływu denudacji antropogenicznej na drzewostany w strefie niżowej. W tym zakresie brakuje opracowań o charakterze ilościowym, charakteryzujących czynniki oraz skutki denudacji antropogenicznej. Metoda dendrochronologiczna korzeni pozwala na szersze prześledzenie czasowej i przestrzennej zmienności oddziaływania denudacji antropogenicznej.

*Brak badań nad relacjami zachodzącymi między intensywnością ruchu turystycznego a zmianami radialnymi i anatomicznymi drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.)* (zob. Rozdział 4). Wpływ ruchu turystycznego na środowisko przyrodnicze w strefie niżowej jest tematem aktualnym i szeroko dyskutowanym zarówno w literaturze krajowej jak i zagranicznej. Wciąż brakuje szczegółowych informacji o charakterze ilościowym i jakościowym na temat zmian przyrostowych i anatomicznych korzeni i pni pod wpływem silnej presji wydeptywania.

Nieścisłości interpretacyjne dotyczące chronologii korzeni w literaturze przedmiotu. Dotychczas przeprowadzone analizy dendrochronologiczne z zastosowaniem korzeni wskazały na szereg problemów metodycznych, związanych z brakiem niektórych słoików lub występowaniem przyrostów wyklinowujących oraz fałszywych. Z tego względu badania makroskopowe, jak i mikroskopowe jedynie na wybranych fragmentach korzeni poddanych działaniu procesów geomorfologicznych prowadzą do przeszacowania lub niedoszacowania wieku korzenia. Znaczne rozbieżności w liczbie i szerokości słoików rocznych na przekroju poprzecznym wskazały na konieczność poszukiwań nowych sposobów datowania korzeni.

Brak rozpoznania zmian przyrostowych i anatomicznych w profilu podłużnym korzenia. Większość prac badawczych prezentowała dane na podstawie zmian przyrostowych i anatomicznych pojedynczych części korzeni drzew dla wybranych lokalizacji głównie z obszarów górskich. W tym zakresie istotne jest poznanie jak reagują korzenie na zmienne w czasie bodźce środowiskowe wzdłuż profilu podłużnego uwzględniając przy tym strefę odśloniętą i zasłoniętą korzenia.

Brak ciągłego monitoringu ruchu turystycznego na szlakach turystycznych Pojezierza Brodnickiego. Określenie liczby turystów odwiedzających obszary cenne przyrodniczo ma zasadnicze znaczenie w kwestii podejmowanych zadań związanych z zarządzaniem turystyką oraz określenia wpływu ruchu turystycznego na poszczególne komponenty środowiska przyrodniczego, w tym korzenie drzew. W pasie pojezierzy brak danych ilościowych na temat wielkości, natężenia i sezonowości ruchu turystycznego na szlakach turystycznych.

Przedstawione powyższe przesłanki skłoniły autora do podjęcia problemu badawczego, którym jest rozpoznanie wpływu denudacji antropogenicznej na korzenie sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w obrębie szlaku turystycznego z Pojezierza Brodnickiego. Przedmiotem niniejszego opracowania są drzewa sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) ze szczególnym uwzględnieniem systemów korzeniowych i pni. W związku z tak zaprezentowanym problemem badawczym w pracy postawiono następującą hipotezę:

Denudacja antropogeniczna powoduje trwałe zmiany przyrostowe i anatomiczne w korzeniach sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w obrębie szlaku turystycznego, które mogą stanowić ilościowy wskaźnik antropopresji.

W ramach tak sformułowanej hipotezy badawczej określono cele badawcze wraz z przyporządkowanymi im zadaniami:

1. Rozpoznanie zmian przyrostowych i anatomicznych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z obszaru Pojezierza Brodnickiego ze szczególnym uwzględnieniem systemów korzeniowych poddanych denudacji antropogenicznej:

- a. inwentaryzacja szlaków turystycznych i wybór stanowiska badawczego,
- b. opracowanie chronologii sosny zwyczajnej dla drzew niepoddanych oddziaływaniu denudacji antropogenicznej, rosnących na stanowisku referencyjnym,
- c. opracowanie chronologii sosny zwyczajnej dla drzew poddanych denudacji antropogenicznej, rosnących wzdłuż szlaku turystycznego,
- d. przeprowadzenie analizy relacji klimat-wzrost dla obu chronologii, w tym określenie wpływu warunków opadowych i termicznych na przyrost radialny sosny,
- e. wyznaczenie pozytywnych i negatywnych lat wskaźnikowych dla obu chronologii sosny zwyczajnej,
- f. rozpoznanie zmian przyrostowych i anatomicznych w systemie korzeniowym sosny zwyczajnej w obrębie szlaku turystycznego i poza szlakiem,
- g. określenie wieku i charakteru odstonięć korzeni sosny zwyczajnej.

3. Rozpoznanie tempa denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym z obszaru Pojezierza Brodnickiego na podstawie zapisu przyrostowego odstonięć korzeni:

- a. wybór metody kalkulacji tempa denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym przy użyciu korzeni odstoniętych,
- b. rozpoznanie wielkości tempa denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym,
- c. określenie związku właściwości fizycznych pokrywy glebowej, morfologii korzenia oraz morfometrii szlaku turystycznego z tempem denudacji.

4. Uszczegółowienie metody dendrogeomorfologicznej w aspekcie badań geomorfologicznych:

- a) datowanie w wysokiej rozdzielczości zmian przyrostowych wzdłuż profilu podłużnego korzenia,
- b) opracowanie krzywych wzrostu z wybranych stref korzeni (części poddanej presji i naturalnie przyrastające) na podstawie badania pomostowego pomiędzy różnymi częściami systemu korzeniowego, krzywej wzrostu z pnia oraz chronologią stanowiska.

W przyjętym podejściu badawczym założono ciągłe współdziałanie czynników naturalnych, jak i antropogenicznych w kształtowaniu wzrostu korzeni i rzeźby szlaku turystycznego, poddanych użytkowaniu turystycznemu. Niemniej jednak w pracy podjęto próbę wskazania czynnika środowiskowego, którego rola w zmianach przyrostów radialnych i anatomii drewna korzeni jest dominująca.

Głównymi naturalnymi procesami morfogenetycznymi oddziałującymi na rzeźbę terenu obszarów leśnych w obrębie zboczy rynny jeziora Bachotek (Pojezierze Brodnickie) uznaje się procesy erozyjno-denudacyjne obejmujące splukiwanie linijne i powierzchniowe. W niniejszym opracowaniu za denudację antropogeniczną (DrA) uznaje się całokształt naturalnych procesów morfogenetycznych modyfikowanych i przyspieszonych przez ruch turystyczny prowadzących do degradacji lub rozcinania, wyrównywania i stopniowego obniżania powierzchni terenu na szlaku turystycznym.

Za ruch turystyczny na badanym obszarze określa się jedynie turystykę pieszą i rowerową, mierzoną liczbą turystów użytkujących odcinek znakowanego szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek (opis wyznaczenia stanowiska do badań na terenie Pojezierza Brodnickiego znajduje się w Podrozdziale 8.8). W pracy ruch turystyczny traktowany jest, jako czynnik inicjujący, którego skutkiem jest rozwój tzw. denudacji antropogenicznej (DrA). Tym samym, wpływ ruchu turystycznego na mikrorzeźbę szlaku i korzenie drzew jest rozumiany jako mechaniczne oddziaływanie wydeptywania, którego efektem jest degradacja powierzchniowej warstwy gleby oraz powszechne odślonięcia i niszczenie korzeni w jego obrębie. W pracy przyjęto jako synonim denudacji antropogenicznej wyrażenie antropopresji turystycznej, mimo, iż jest to pojęcie prezentujące faktycznie nieco szerszy zakres znaczeniowy i obejmujące całokształt stosunków i zjawisk związanych z ruchem turystycznym.

5. Stan badań

5.1. Wpływ antropopresji turystycznej na środowisko geograficzne

Ze środowiskiem geograficznym nierozzerwalnie związana jest turystyka. W szczególności dotyczy to obszarów cennych przyrodniczo stanowiących cel podróży turystów. Uprawiając turystykę, ludzie zaspokajają wiele potrzeb, korzystając z zasobów rekreacyjnych środowiska przyrodniczego (Kurek 2008). Jednak nadmierny i niekontrolowany jej rozwój jest jednym z najważniejszych współczesnych czynników zagrażających środowisku przyrodniczemu. Stale zwiększający się ruch turystyczny wywiera wpływ na komponenty środowiska (Mika 2000), zmieniając je w niekorzystnym kierunku, poprzez niszczenie lub pomniejszenie wartości jego zasobów.

W użytkowaniu terenów rekreacyjnych dochodzi do oddziaływania różnych form aktywności turystyczno-rekreacyjnych na elementy środowiska (Krzymowska-Kostrowicka 1999). Negatywny wpływ ruchu turystycznego należy rozumieć jako zespół czynników wywołanych działalnością człowieka, oddziałujących bezpośrednio (m.in. wydeptywanie, wyrwanie, karczowanie czy synantropizacja szaty roślinnej) oraz pośrednio zanieczyszczających środowisko (m.in. zmiana stosunków hydrologicznych, jakości powietrza, eutrofizacja gleb i wód) (Cohen 1978). W identyfikacji negatywnych skutków rozwoju użytkowania turystycznego w środowisku istotne jest określenie pojemności i chłonności przestrzeni turystycznych (Regel 1975; Owsiak 1975). Analizując zagrożenia dla środowiska przyrodniczego płynące z użytkowania turystycznego, należy uwzględnić bezpośrednie zmiany w obrębie gleb, wód, roślinności i świata zwierzęcego (Krzymowska-Kostrowicka, Kostrowicki 1985). Za słuszne należy uznać stwierdzenie jak wskazuje D. Sołowiej (1977) konieczność badań zagrożenia sfer środowiska (biosfery, pedosfery, litosfery, hydrosfery i atmosfery), z uwzględnieniem charakteru przestrzennego zniszczeń (powierzchniowe, liniowe) oraz ich natężenia (zmiany odwracalne, nieodwracalne). W podejściu badawczym ważne jest określenie stopnia odporności różnych komponentów środowiska przyrodniczego na zmiany wywołane działalnością człowieka (Regel i in. 1972). Dla przedmiotu badań istotne jest rozpoznanie natężenia i zakresu zniszczeń zachowań turystyczno-rekreacyjnych (Krzymowska-Kostrowicka 1999), które różnicują się pod kątem zasięgu przestrzennego, typologii oraz rozkładu w czasie.

Początek badań nad negatywnymi skutkami turystycznej antropopresji związany jest z rekreacyjnym użytkowaniem środowiska przyrodniczego, w kontekście bezpośredniego kontaktu człowieka z naturą. Przedmiotem wielu dyscyplin naukowych stało się oddziaływanie różnych form aktywności turystycznej m.in. pieszych wędrówek czy obozowania (Speight 1973; Wilkinson 1978). Jednym z pierwszych badaczy wpływu turystycznej antropopresji na środowisko przyrodnicze był E.P. Meincke (1928), który obserwował zmiany ubicia gleby oraz szaty leśnej w wyniku wydeptywania. W późniejszych latach ilościowe badania nad właściwościami fizycznymi gleb na obszarach eksploatacji turystycznej prowadzili M. Düggeli (1937), H. Burger (1940) oraz H.J. Lutz (1945).

Gwałtowny rozwój badań nad negatywnym wpływem turystycznej antropopresji na wybrane komponenty środowiska geograficznego został zapoczątkowany w latach 70. XX wieku. Okres ten przyczynił się do usystematyzowania przedmiotu badań i klasyfikacji skutków turystycznej antropopresji. Prace odnosiły się zasadniczo do oceny zmian w obrębie pokrywy glebowej, wód i roślinności (Wall 1977; Wall, Wright 1977). Rządziej badania dotyczyły bezpośredniego wpływu rekreacji na środowisko geologiczne i jakość powietrza (Cohen 1978). Ponadto przeprowadzono badania w odniesieniu do świata fauny, gdzie negatywne skutki rekreacji powiązywano z polowaniem, łowiectwem i hałasowaniem, co przyczyniało się często

do zmiany warunków siedliskowych zwierząt (Speight 1973; Wilkinson 1978; Hammitt, Cole 1987). Problem skażenia i zanieczyszczenia wód dostrzeżono w trakcie użytkowania szlaków wodnych przez łodzie motorowe (Liddle, Scorgie 1980; Seabroke, Marsh 1981).

W latach 80. XX wieku zaczęły ukazywać się opracowania regionalne, w których syntetycznie starano się przedstawić problem oddziaływania turystycznej antropopresji. Większość prac dotyczyła badań z obszarów nadmorskich, gór, regionu uzdrowisk czy obszarów chronionych. Z przeglądu literatury naukowej wynika, że wzrost niekontrolowanego i nadmiernego użytkowania turystycznego zaznaczał się w różnych regionach świata. Znaczna część badań to przykłady rejestru zmian środowiska w tym rzeźby terenu i szaty roślinnej z obszarów górskich m.in. z Alp (Bätzing 1991; Price 1992; Ashworth, Dietvorst 1995; Herbin 1995; Lennartz, Taxacher 1995), Himalajów (Cater 1987; Singh 1989; Gartner 1996), Gór Skalistych (Wilard, Marr 1970), gór północnej Szkocji (Watson 1985; Dickinson 1996), Apeninów (Pignatti 1993), gór Min w Chinach (Wenjun i in. 2005), w Szwecji (Bryan 1977) czy obszarów wysokogórskich w Ameryki Północnej (Gartner 1996).

W literaturze światowej wieloaspektowo poruszony został również problem wpływu antropopresji turystycznej na wybrzeża nadmorskie oraz wyspy (Theoblad 1994; Mieczkowski 1995). Na terenach nadmorskich rozpoznano negatywne zmiany w środowisku geograficznym związane z wydeptywaniem i niszczeniem roślinności wydmowej, rafy koralowej czy zbieractwem ziół i chronionych gatunków roślin. Liczne problemowe przykłady oddziaływania turystyki na wybrzeża morskie dotyczą Cypru (Andronikou 1987), hiszpańskich Balearów (Pacione 1977), wybrzeża Adriatyku (Bywater 1991; Zanetto, Soriani 1996; Becheri 1996; Carić 2011), Francji (Prayag, Brittnacher 2014), Hiszpanii (Barke 1996), Portugalii (Cunha 1997), wybrzeża Morza Czarnego w Rosji (Lukashina i in. 1996), Karaibów (Henry 1988; Holder 1988), Meksyku (Gormsen 1997), Wysp Galapagos (De Groot 1993), Australii (Hawkins, Roberts 1992; Roupael, Inglis 1997) oraz północnej Afryki (Swearingen, Bencherifa 1996).

W Polsce szybkie tempo wzrostu ruchu turystycznego zarejestrowano od lat 60. XX wieku (Ostrowski 1976), co wiązało się z poważnym wzrostem znaczenia zasobów rekreacyjnych (Kostrowicki 1970; Kozłowski 1972). Wraz z rozwojem funkcji turystycznych obszarów cennych przyrodniczo istotne było racjonalne gospodarowanie zasobami przyrodniczymi (Leszczycki 1977). Poznanie skutków oddziaływania samej turystyki było konieczne w kontekście stałego monitorowania i zapobiegania degradacji komponentów środowiska geograficznego.

Sygnalizacja negatywnego wpływu turystycznej antropopresji na środowisko w szerszym kontekście pojawiła się w polskiej literaturze naukowej w drugiej połowie lat 60. XX wieku (Łuczyńska-Bruzda 1966, 1969; Bogacz 1974; Ptaszycka-Jackowska 1979; Dysarz 1980). Najbardziej problem ten wystąpił na obszarach o największej unikatowości przyrodniczej, a więc w parkach narodowych i rezerwach przyrody (Gózdź, Kapuściński 1975; Waksmundzki 1976). Ponadto na niszczenie struktury siedlisk przez ruch turystyczny narażone były najbardziej interesujące partie lasów (Ważyński 1997). Jednym z miejsc, gdzie turystyka oddziałuje w znacznym stopniu na środowisko geograficzne są szlaki turystyczne (Kasprzak 2005; Matulewski 2016).

W polskiej literaturze poruszającej problem negatywnego wpływu turystyki na środowisko można wyodrębnić dwa rodzaje informacji naukowej. Pierwszy z nich sygnalizuje w ujęciu jakościowym pojawienie się zniszczeń w środowisku (Dysarz 1980). Informacje dotyczą tu poszczególnych rodzajów zniszczeń, a przede wszystkim: odprowadzania ścieków do jezior i rzek, niszczenia runa leśnego, łamania gałęzi, zaśmiecania, wydeptywania ścieżek, wyjeżdżania dróg w lasach, wzniesienia pożarów, niszczenia wartości fizjonomicznych krajobrazu (Michalik 1974; Gacki 1975; Zielski 1978). Drugi, analityczny rodzaj informacji naukowej cechuje

dążenie do określenia charakteru procesów niszczących, ich natężenia, kierunków rozwoju oraz skutków, jakie wywołują.

Na podstawie przeglądu literatury przedmiotu rozpoznano, że negatywny wpływ na stan przyrody w tym na szatę roślinną mają: obozowanie oraz kemping, wędrówki piesze, jazda rowerem, rajdy samochodowe, jazda konna oraz narciarstwo (Mika 2000; Krzymowska-Kostrowicka 1999; Kurek 2005). Jednym z komponentów najszybciej reagujących na zmiany warunków ekologicznych lub uszkodzenia mechaniczne wywołane denudacją antropogeniczną jest szata roślinna (Piękoś-Mirkowa, Mirek 1982; Kożuchowski 2005). Zmiany te powodują proces synantropizacji (Faliński 1965, 1973), przestrzenne zróżnicowanie występowania roślin oraz powszechne odstanianie korzeni drzew.

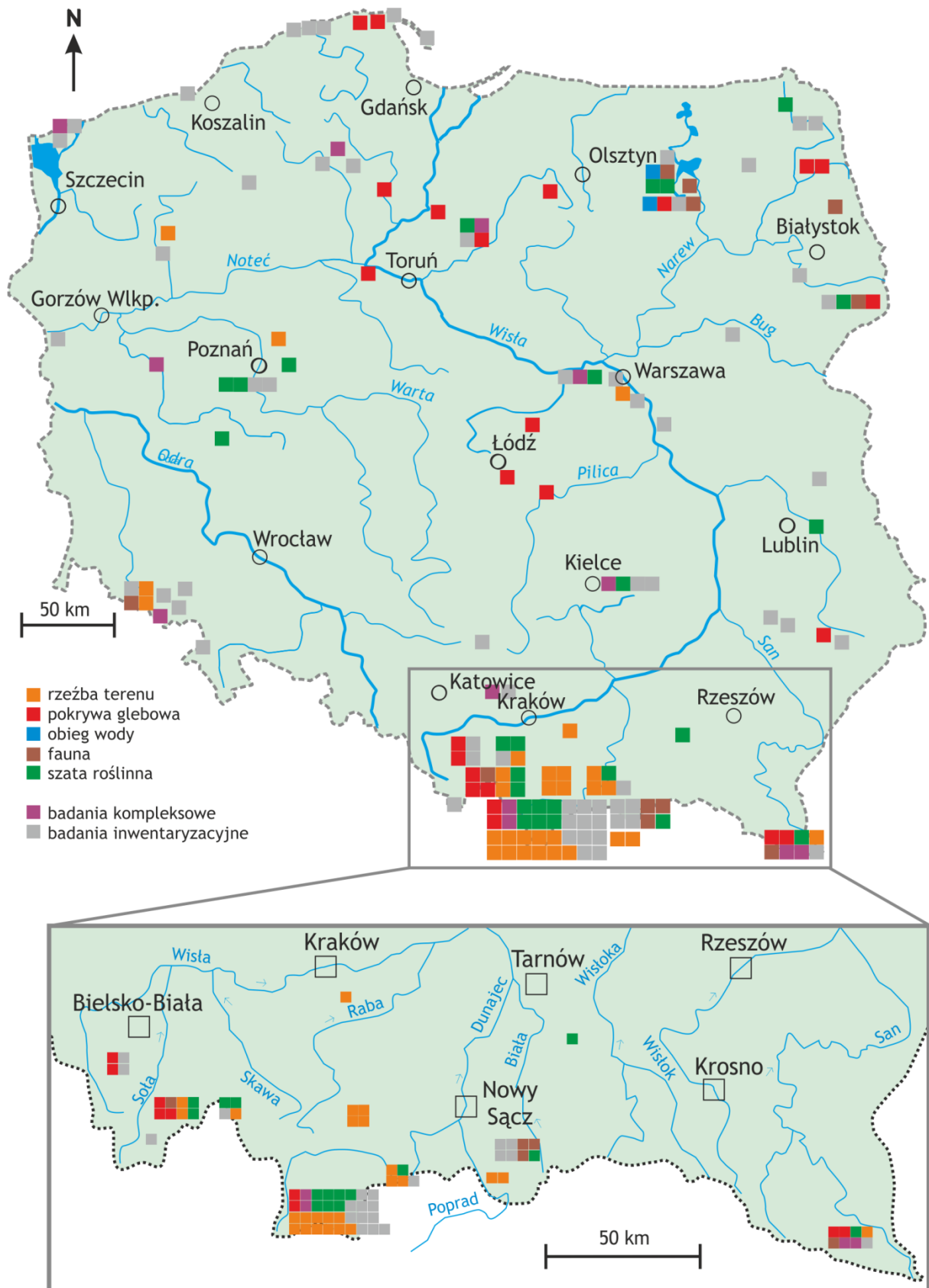
Rozwój zbiorowisk dywanowych, zadarnienie gleby, a przede wszystkim szereg negatywnych zmian w górnych poziomach profilu glebowego powoduje oddziaływanie wydeptywania (Róg 1985). W pokrywie glebowej zmiany te głównie dotyczą wzrostu jej zwięzłości, zmniejszenia pojemności wodnej, aeracji gleby, obniżanie się zwartości materii organicznej czy zmian temperatury gleby (Marsz 1972; Prędko 2002). Odbija się to niekorzystnie na zdrowotności krzewów i drzew (Mika 2004), na ich wzroście, a w krańcowych przypadkach może spowodować wypadanie, bądź obumieranie (Zielski i in. 1998).

W literaturze krajowej najwięcej przykładów badań nad wpływem turystyki na środowisko przyrodnicze pochodzi z obszarów górskich, będących jednym z najbardziej atrakcyjnych i wrażliwych terenów (Ryc.1). Wiele prac badawczych poświęcono polskiej części Tatr i dotyczyły przede wszystkim denudacji antropogenicznej w strefie szlaków turystycznych (m.in. Mirek, Piękoś-Mirkowa 1980; Czochański 1993; Czochański, Szydarowski 1996, Mirek 1996, Krusiec 1996, Gorczyca 2000, Kopeć, Głęb 2002, Krzemień, Gorczyca 2005, Dusza 2006, Tomczyk, Ewertowski 2007; Fidelus 2008a,b; Rączkowska, Kozłowska 2010, Gołaszewski i in. 2010, Cieszewska, Deptuła 2013), taternictwa (Balon 1982, Jodłowski 2003), jak również wpływu turystyki narciarskiej na środowisko przyrodnicze (Skawiński 1993; Skawiński, Krzan 2002; Guzik i in. 2002), w tym przekształcenia rzeźby Tatr. Poza Tatrami, prace nad wpływem ruchu turystycznego na przekształcenia środowiska przyrodniczego gór i wyżyn podejmowane były na terenie masywu Babiej Góry (Buchwał 2009a,b, 2010), masywu Pilska (Łajczak i in. 1996), Gorców (Wałdykowski 2006 a, b; Tomczyk 2011a, b, c; Tomczyk i in. 2012), Karkonoszy (Mazurski 1972; Jała, Cieślakiewicz 2004; Kasprzak 2005, 2006), Pogórza Ciężkowickiego (Fornal-Bieniak 2011), Bieszczadów (Skiba i in. 1995; Prędko 2000, 2001, 2002), Beskidów (Maciaszek, Zwydak 1992), Gór Świętokrzyskich (Sikorski 2009) i Roztocza (Dębicki i in 2015).

Badania nad skutkami oddziaływania turystycznej antropopresji były z powodzeniem prowadzone na obszarach nizinnych (Marsz 1972, Zielski 1978, Dysarz 1979, 1980; Kostrowicki 1981) i nadmorskich (Gacki 1975; Schwichtenberg 1976; Ciurzyński 1977) już w latach 70. XX wieku. W północnej i środkowej Polsce antropogeniczne przekształcenia pokrywy glebowej m.in. w obrębie szlaków wynikające z ruchu turystycznego szeroko opisał Róg (1985). Poznanie procesu degradacji gleb dróg i ścieżek leśnych ma szczególne znaczenie, ponieważ ulegają one w znacznie szybszym tempie destrukcji niż regeneracji, co odbija się na całym środowisku leśnym (Róg 1985; Tracz 2000; Wojda, Tracz 2003; Tracz 2003, 2004). Ponadto prace badawcze z północnej Polski poruszały tematykę wpływu budowy ośrodków wypoczynkowych (Dysarz 1979, 1993), turystyki wodnej (Lewandowski 2003), wędkarstwa (Skłodowski, Lipka 2011), zaśmiecania (Skłodowski 2011), wydeptywania oraz obozowania (Róg i in. 1980; Róg 1985; Zielski i in. 1998;

Skłodowski i in. 2009; Zdanowicz, Skłodowski 2012;) na wybrane komponenty środowiska geograficznego.

Literatura polska poświęcona badaniom oddziaływania antropopresji turystycznej na środowisko jest szeroko dyskutowana (Ryc.1). Niemniej jednak zauważono niewielki udział kompleksowych opracowań porównujących reakcje różnych komponentów na działanie denudacji antropogenicznej. Ponadto mała znana jest jej charakterystyka przestrzenna i czasowa. Poznanie zakresu zniszczeń w środowisku oraz przebiegu denudacji antropogenicznej jest niezbędne do określenia zasad racjonalnego użytkowania środowiska i jego ochrony (Mika 2000). Problematyka ta ma również podstawowe znaczenie dla określenia wartości normatywnych (wskaźników pojemności) przy planowaniu zagospodarowania turystycznego.



Ryc. 1. Wpływ antropopresji turystycznej na wybrane komponenty środowiska geograficznego. Stan badań w Polsce od lat 60. XX wieku. Opracowanie własne na podstawie przeglądu literatury (opis postępowania w podrozdziale 4.5)

5.2. Wpływ antropopresji turystycznej na szatę roślinną

W literaturze światowej pierwsze artykuły opisujące zmiany funkcjonalne roślin w okresie wegetacji rosnących wzdłuż dróg i ścieżek spacerowych pojawiły się w latach międzywojennych (Bates 1935). A. Klecka (1937) przedstawiła pionowe rozwarstwienie roślinności w sąsiedztwie szlaków turystycznych. Późniejsze badania wykazały inicjację procesów erozyjnych na szlakach turystycznych spowodowanych wydeptywaniem roślinności (Root, Kapnik 1972). W latach 70. XX wieku wśród licznych prowadzonych analiz środowiskowych wykazano, że obozowanie jest najpowszechniejszą formą zachowań rekreacyjnych wywołujących wyraźne zmiany w roślinności (Speight 1973; Naylor 1977; Bratton i in. 1978). Problem ten często dotyczył intensywnie użytkowanych turystycznie lasów, gdzie rozpoznano wyraźne zaburzenia struktury wiekowej drzew (Brown i in. 1977). Podobnych obserwacji dokonał D.N. Cole (1981, 1987, 1993), który wykazał zahamowanie wzrostu młodych pędów i silne uszkodzenia mechaniczne w drzewostanie. Ponadto na etapie inwestycyjnym turystyka zaznacza swoje negatywne piętno w krajobrazie górskim poprzez wylesianie (Price 1981, 1992; Absalon 1993) pod budowę szeroko pojętej infrastruktury narciarskiej (Baker 1982; Grotzbach 1985; Kariel, Draper 1992; Langer 1993). Co ważniejsze antropopresji towarzyszą negatywne zmiany w retencji wód, przyspieszona zostaje erozja gleb oraz procesy morfogenetyczne w tym lawiny oraz sływy gruzowe bezpośrednio zagrażające drzewom na stokach górskich (Tschurtschenthaler 1986; Messerli 1987; Romeril 1989). Zauważono, że problemem ekologicznym wynikającym z uprawiania narciarstwa są powszechne uszkodzenia powierzchni darni oraz systemów korzeniowych roślin i drzew, co silnie wzmaga intensyfikację procesów erozyjno-denudacyjnych na stokach (Pröbstl 1990; Brandner 1995; Bandała-Ciołczyk, Kurzyński 1996; Łajczak i in. 1996; Guzik i in. 2002; Kurek 2005).

Czynnikiem zwiększającym aktywność procesu denudacji antropogenicznej i zmiany w pokrywie roślinnej jest turystyka piesza (Krusiec 1996; Łajczak i in. 1996; Prędko 2000; Górczyca, Krzemień 2009; Rączkowska, Kozłowska 2010; Fidelus 2013). Zniszczone powierzchnie roślinne widoczne są wzdłuż szlaków turystycznych (Róg 1985; Górczyca 2000; Mika 2000; Myga-Piątek, Jankowski 2009). Szlaki turystyczne stanowią formy antropogeniczne o przebiegu liniowym (Styperek 2001), gdzie uszkodzona i wydeptana roślinność odsłania wierzchnie warstwy gleby. Zmiany w środowisku szlaku powstałe w wyniku jego użytkowania zaznaczają się głównie przyspieszonym odpływem wody, powstawaniem mikroform takich jak rozcięcia erozyjne, żłobiny, bruzdy erozyjne (Dysarz 1993) na powierzchni szlaku czy intensywną ekspozycją korzeni drzew (Okołów 1978; Witkowska-Żuk 2000). Podobnie sytuacja wygląda na drogach i ścieżkach w parkach miejskich, cmentarzach czy zieleńcach osiedlowych gdzie silne i ciągłe wydeptywanie pokrywy glebowej powoduje powszechne odstonięcie korzeni obniżając tym samym kondycje zdrowotną drzew.

Wiele początkowych prac z zakresu wpływu denudacji antropogenicznej na środowisko poświęcono badaniom zmian morfometrii oraz kierunku zniszczeń na szlakach turystycznych (Ketchledge, Leonard 1970; Leonard, Whitney 1977; Cole 1983). D.N. Cole (1989) przedstawił po raz pierwszy klasyfikację ogólnych zniszczeń na szlakach w aspekcie uszkodzeń pokrywy roślinnej oraz glebowej podając propozycję pięciostopniowej skali klas kondycji szlaków (ang. *trail condition classes*). Często skanalizowanie ruchu turystycznego na szlakach w miejscach atrakcyjnych i dostępnych turystycznie, sprawia, że są one bardziej podatne na degradację niż pozostałe tereny (Hammit, Cole 1998; Leung, Marion 2000; Olive, Marion 2009). Z użytkowaniem przestrzeni szlaków przez turystów związany jest konflikt zaznaczający się m.in. ubijaniem pokrywy roślinnej, procesem synantropizacji oraz powszechnym

odstąpieniem korzeni drzew (Sun, Walsh 1998; Liddle 1997). Co więcej ruch turystyczny przyczynia się do obniżenia kondycji i zdrowotności roślin, a często do zahamowania tempa wzrostu szaty roślinnej w obrębie szlaków turystycznych (Burden, Randerson 1972). Ponadto wraz z masowym ruchem turystycznym zainicjowane są procesy erozyjno-denudacyjne powodujące rozcięcia szlaku, przyspieszające odpływ wody i tym samym tworzenie się miejsc podmokłych (Cole 1993a; Marion, Olive 2006). Wydeptywanie i ubijanie przez turystów nawierzchni szlaku powoduje często największe zmiany w wierzchniej warstwie gleby zmieniając jej właściwości fizyczne i chemiczne (Liddle 1975; Cater 1987; Cole, Bayfield 1993; Godefroid, Koedam 2004).

Oceną uszkodzeń i zmian roślinności poddanych nadmiernej antropopresji turystycznej zajmował się A. S. Kostrowicki (1970, 1981), którego celem badań było ustalenie naturalnej chłonności terenu. Podobne zainteresowania podzielał A.A. Marsz (1972), który badał kwestie degradacji szaty roślinnej w tym wpływ wygniatania, wydeptywania, wypalania czy rozjeżdżania roślinności. W tej kwestii K.G. Meyer (2002) podkreślała istotny wpływ użytkowników zmotoryzowanych na roślinność i pokrywę glebową. Swoją aktywnością powodują zniszczenia naziemnej części roślin oraz korzeni, a także ścieranie i przemieszczanie materiału z pokrywy glebowej.

Duże znaczenie w badaniach geograficznych ma określenie odporności roślinności pod kątem użytkowania turystycznego (Matczak 1988). Tym samym poziom zniszczenia szlaku i jego otoczenia zależy od rodzaju i różnej odporności pokrywy roślinnej na wydeptywanie i rozjeżdżanie (Mirek, Piękoś-Mirek 1980). Morfologia roślin, ich forma życiowa i wysokość wpływa na stopień ich odporności oraz szybkość regeneracji (Whinam, Chilcott 2003). Regeneracja zbiorowisk roślinnych po silnym deptaniu jest procesem znacznie dłuższym niż samo ich wcześniejsze zniszczenie, co powoduje powstanie problemu ekologicznego w obrębie szlaku turystycznego (Guzikowa 1982). Badania prowadzone w obszarach górskich wykazały, że zbiorowiska runa leśnego i ziółorośli odznaczają się wyjątkową wrażliwością na deptanie, natomiast zbiorowiska polan są odporne na ten czynnik (Mirek, Piękoś-Mirek 1980; Krusiec 1996; Gorczyca 2000; Ewertowski, Tomczyk 2007, 2011c). Ponadto dużą odpornością odznaczają się zbiorowiska hal wysokogórskich oraz borówczysk na przeobrażenia w skutek presji mechanicznej (Mirek, Piękoś-Mirek 1980). Z kolei bardzo dużą wrażliwość wykazują murawy alpejskie po wiosennych roztopach (Krusiec 1996; Gorczyca 2000). Stwierdzono, że zwarta pokrywa roślinna na trasie turystycznej powoduje zmniejszenie oddziaływania procesów geomorfologicznych (Rączkowska, Kozłowska 2010). Faktem jest, że roślinność o znacznej gęstości i wysokości łądyg ogranicza zniszczenia w strefie szlaków tzn. zminimalizowana zostaje dostępność i rozszerzanie się strefy ruchu pieszego (Szydarowski 2000; Ewertowski, Tomczyk 2007, 2011c). Natomiast niejednoznaczne są zależności rozczłonkowania szlaku od rodzaju i charakteru pokrycia terenu. Badania z Tatr wskazały na obecność szlaków wielośladowych w piętrze leśnym (Gorczyca, Krzemień 2002). Z drugiej strony zdarza się, że wzrost szerokości szlaku oraz rozwój licznych ścieżek jest bardziej prawdopodobny na rozległych obszarach trawiastych (Nepal 2003).

Poszerzanie szlaku oraz tworzenie nieformalnych ścieżek często równolegle biegnących do głównego traktu skutkuje ubytkami roślinności (Marion, Olive 2006). Granica szlaku wyznaczana jest na podstawie szerokości powierzchni, na której przestaje być widoczne wydeptywanie roślinności (Monz 2000). Na trwałe zniszczenia pokrywy roślinnej w obrębie szlaków turystycznych w wyniku deptania ma wpływ nachylenie stoku. Szlaki o dużym nachyleniu są bardziej podatne na erozję (Coleman 1981; Cole 1993 a,b; Barczak i in., 2002; Farrell, Marion 2002; Nepal 2003; Dixon i in., 2004). Prędkość erozji wodnej jest tym większa, im bardziej

stromy szlak (Ewertowski, Tomczyk 2007). Przeobrażenia w szacie roślinnej zachodzą znacznie szybciej na szlakach o nachyleniu 12° niż na obszarach płaskich o podobnej odporności roślin na uszkodzenia mechaniczne (Marsz 1972). Stwierdzono, że wraz ze wzrostem nachylenia szlaku zwiększa się długość odcinków, wzdłuż których pokrywa roślinna w sąsiedztwie trasy została wydeptana (Ewertowski, Tomczyk 2007).

Badania dotyczące wpływu antropopresji turystycznej na komponenty środowiska przyrodniczego ścieżek turystycznych wskazują, że jest to zagadnienie ciągle aktualne w różnych obszarach świata. Wciąż jednak niewiele jest wiadomo na temat negatywnego oddziaływania ruchu turystycznego na drzewa rosnące wzdłuż szlaków turystycznych. W tym zakresie brakuje opracowań o charakterze ilościowym, charakteryzujących czynniki i skutki w reakcji przyrostowej i anatomicznej drzew poddanych silnej antropopresji turystycznej.

5.3. Metody badań wpływu antropopresji turystycznej na szatę roślinną

Problem wpływu antropopresji turystycznej na szatę roślinną był rozwiązywany szeregiem metod badań. Ze względu na wyróżnienie bezpośrednich i pośrednich skutków antropopresji na szatę roślinną rozwinięto wiele jakościowych i ilościowych metod badań. Stosowane są narzędzia geoinformacyjne (Turkowiak 2009; 2011), modele statystyczne (Olive, Marion 2009), szczegółowa dokumentacja fotograficzna (Fornal-Pieniak 2011; Zdanowicz, Skłodowski 2013), pomiary geodezyjne (Buchwał 2010) oraz badania ankietowe (Kiryluk, Borkowska-Niszczoła 2009; Majer-Durman 2013). Prowadzono bezpośrednią inwentaryzację zmian jakościowych (Tracz, Pampuch 2009) i ilościowych roślinności (Sikorski 2009), obserwacje i pomiary w profilach poprzecznych (Skłodowski i in. 2009; Rączkowska, Kozłowska 2010) jak również eksperymenty terenowe (Lewandowski 2003).

Nie istnieje jednak w tej kwestii ogólnie przyjęty i akceptowany schemat postępowania badawczego. Zakres prowadzonych analiz zależy od przyjętego problemu badawczego, obszaru oraz przedmiotu badań. Na podstawie przeglądu badań problem wpływu turystyki na szatę roślinną podzielono na trzy główne grupy: monitoringowe, eksperymentalne i ankietowe. W poniższym przeglądzie oparto się na publikacji A. Tomczyk i M. Ewertowskiego (2008), uzupełnionej o aktualne prace.

Badania monitoringowe przyjmują charakter oceny przekształceń środowiska, monitorowania i prognozowania tych przemian oraz poszukiwania ich przyczyn. Ze względu na przedmiot badań oraz sposób zbierania danych, metody monitoringowe można sklasyfikować w kilka kategorii: rekonesansowe, segmentacyjne, inwentaryzacyjne oraz próbkowania. Stanowią przydatne narzędzie do określania jakościowych i ilościowych zmian w szacie roślinnej, jak również w ujęciu czasowo-przestrzennym. Z kolei badania eksperymentalne pozwalają na rozpoznanie zależności pomiędzy intensywnością deptania a reakcją roślinności oraz na określenie wrażliwości poszczególnych gatunków roślin na oddziaływanie mechaniczne. Analizy te, szczególnie długookresowe, mają duże znaczenie aplikacyjne, gdyż dostarczają licznych i użytecznych danych w celu określenia chłonności turystycznej oraz mogą wspierać zrównoważone zarządzanie obszarami rekreacyjnymi (Marsz, 1972; Leung, Marion 2000; Tomczyk 2011a). W badaniach, w których główny cel związany jest z poznaniem opinii wybranych grup społecznych na temat zmian w szacie roślinnej pod wpływem działalności turystycznej, wykorzystuje się metody ankietowe lub wywiad. Tego typu postępowanie oparte jest na założeniu, że respondenci dysponują pewną wiedzą na temat stanu środowiska.

Wiele metod ilościowych nie pozwala na znaczące rekonstrukcje środowiskowe, zwłaszcza w miejscach bez ciągłości monitoringowej. Dla tych obszarów szczególnie cenny jest zapis biotyczny. Pnie i korzenie drzew rosnące wzdłuż szlaków turystycznych pozwalają

na zastosowanie metody dendrochronologicznej w rekonstrukcji etapów presji turystycznej. Są szczególnie cennym źródłem informacji ze względu na rejestr zmian środowiskowych w przyrostach rocznych. Za największą zaletę stosowania metody dendrochronologicznej do badania wpływu denudacji antropogenicznej autor uznaje możliwość prześledzenia zmian zachodzących w czasie (z rozdzielczością sezonową) oraz zmian przestrzennych. Ponadto pozwala na ujęcie problemu presji mechanicznej w sposób ilościowy i jakościowy.

5.4. Zastosowanie analiz dendrochronologicznych w badaniach procesów geomorfologicznych ze szczególnym uwzględnieniem wpływu turystyki

Zaproponowana w pracy analiza dendrochronologiczna stanowi jedną z najbardziej dokładnych metod datowania procesów środowiskowych wykorzystującą sekwencję przyrostową drzew i korzeni (Schweingruber 1996; Zielski, Krapiec 2004; Pelfini, Santilli 2006; Schaub i in. 2005). Przyrosty roczne stanowią cenne źródło informacji o czynnikach modelujących przebieg wzrostu drzew i korzeni na grubość (Fritts 1976). O szerokości słoja rocznego decyduje w dużym stopniu zasobność siedliska glebowego (Wertz 2012), w tym jego warunki wilgotnościowe (Wilczyński, Wertz 2012). Dodatkowo rytm przyrostowy drzew modyfikowany jest przez różne czynniki o charakterze antropogenicznym (Wilczyński 2006). Wobec tego dynamika przyrostowa, będąca odzwierciedleniem siły, z jaką czynniki biotyczne i abiotyczne determinują szerokość słoja rocznego, stanowi unikalne źródło informacji o zmianach środowiska przyrodniczego.

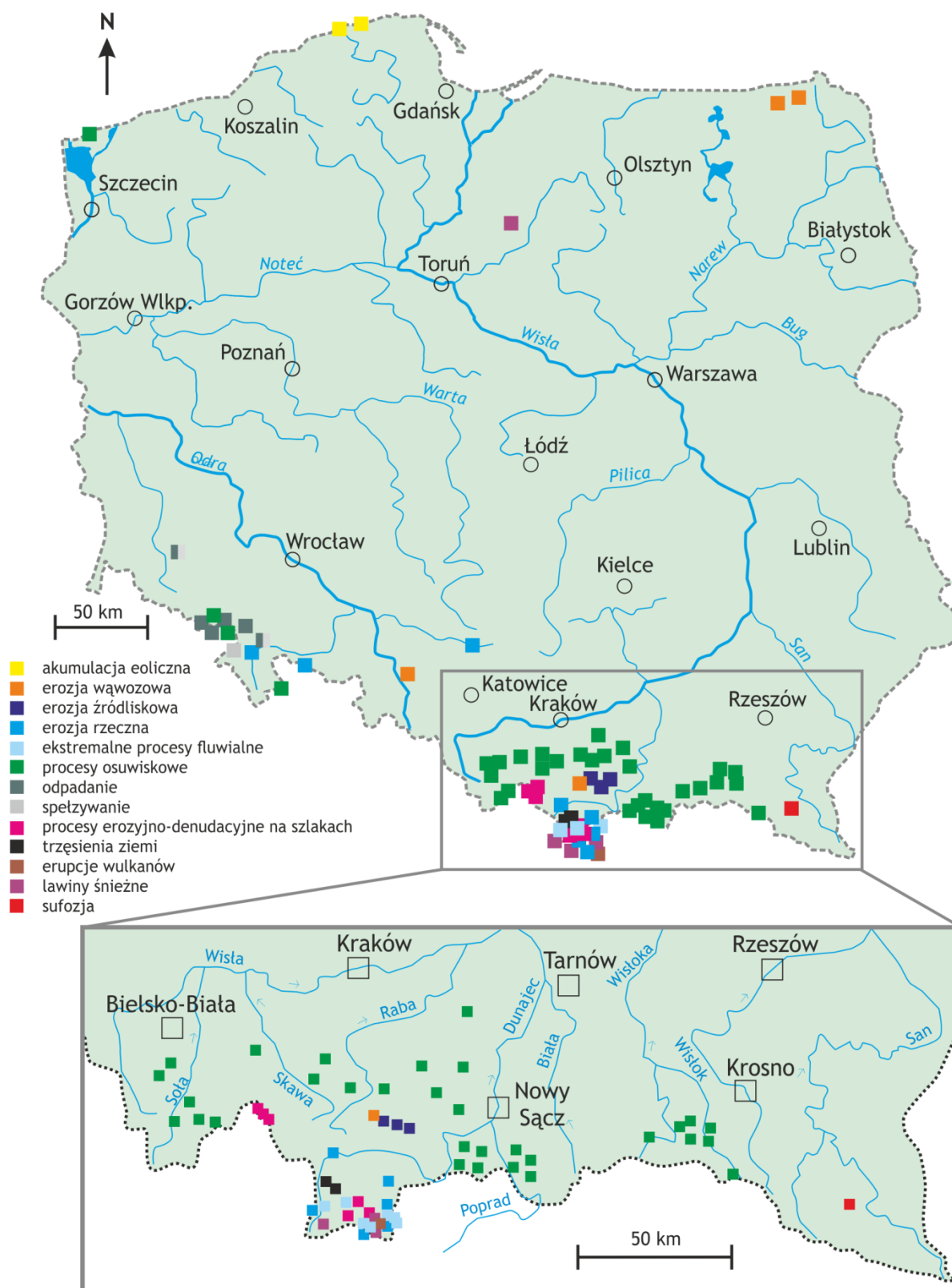
Drzewa, których wzrost promieniowy odzwierciedla zmiany w otoczeniu, są szeroko stosowane przez dendrochronologów, jako wskaźniki przyrodnicze do badania zmian klimatycznych, warunków środowiskowych i procesów morfogenetycznych (Shroder 1980, Wiles i in. 1996, Zielski, Krapiec 2004). Zmiany środowiskowe wywołane czynnikami naturalnymi lub antropogenicznymi zaznaczają się w reakcji przyrostowej pni i korzeni (Buchwał, Wrońska-Wałach 2008). Wyraźny wpływ na wzrost drzewa ma oddziaływanie procesów geomorfologicznych wywołujących stres mechaniczny lub uszkodzenia w drzewostanach (Schweingruber 1996). Zastosowanie metod dendrochronologicznych w rekonstrukcji procesów rzeźbotwórczych doprowadziło do rozwoju dendrogeomorfologii (Gärtner i in. 2001; Bodoque i in. 2005). Procesy morfotwórcze generują stres mechaniczny, który jest zapisywany w pniach drzew w postaci dekoncentrycznych przyrostów radialnych oraz reakcji anatomicznych polegających na wytworzeniu drewna reakcyjnego (Shroder 1980; Mattheck 1991; Kojs i in. 2012). Drewno reakcyjne powstaje również w korzeniach, ale mechanizm jego formowania i funkcjonowanie są inne (Timell 1986; Janecka, Kaczka 2016).

Pionierami badań dendrogeomorfologicznych są LaMarche (1961, 1963, 1968), Alestalo (1971), Shroder (1975, 1978, 1980) oraz Butler (1979). Metoda dendrogeomorfologiczna znajduje zastosowanie w badaniach różnych procesów morfogenetycznych, takich jak sptywy gruzowe (Bollschweiler i in. 2008; Ruiz-Villanueva i in. 2010), obrywanie (Schneuwly, Stoffel 2008; Schneuwly i in. 2008), lawiny śnieżne (Butler, Malanson 1985; Corona i in. 2013), erozja fluwialna (Malik, Ciszewski 2008), akumulacja eoliczna (Marin, Fillion 1992; den Ouden i in. 2007; Koprowski i in. 2010) czy erozja wąwozowa (Hupp 1986; Vanderkerckhove i in. 2001; Ballesteros-Cánovas 2017). Jest ona również wykorzystywana w analizach wieku i dynamiki osuwisk (Alestalo 1971; Shroder 1980; Krapiec, Margielewski 2000; Buchwał, Winowski 2009; Wistuba, Malik 2011; Zielonka i in. 2014; Lopez-Saez i in. 2012 a,b; Lopez-Saez i in. 2014).

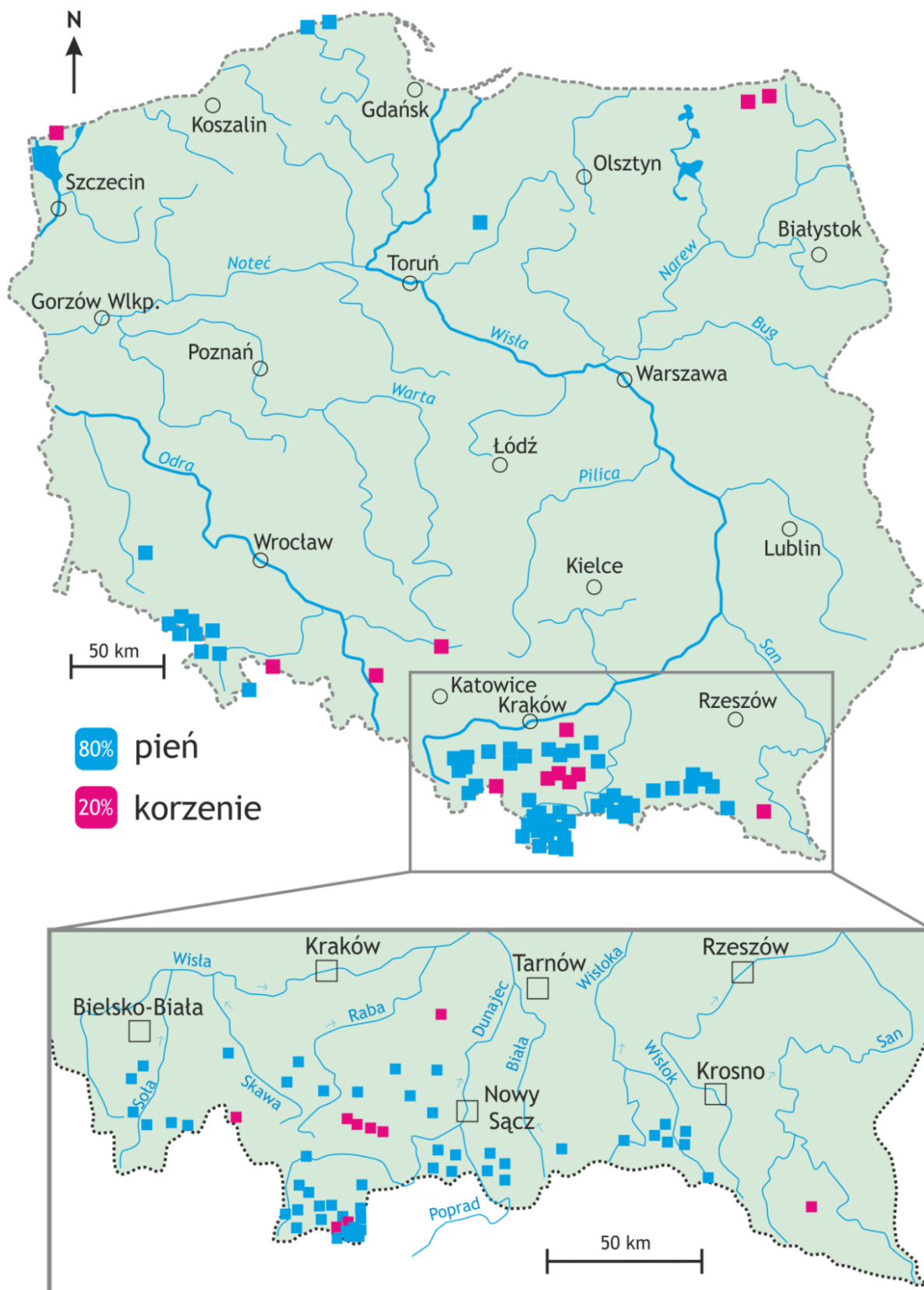
Badania dendrogeomorfologiczne głównie koncertują się na rozpoznaniu zmian przyrostowych i anatomicznych w obrębie pnia drzew (Ciszewski, Malik 2008). Z kolei ocena liczby i wielkości pierścieni w korzeniach drzew dostarcza dokładne wyniki o ekologicznych warunkach wzrostu drzew i działaniu procesów morfogenetycznych (Böhm 1979). Pierwsze próby badań korzeni przeprowadzili H. Vater (1928), A. Wagenhoff (1938), H.F. Joachim (1953) oraz B.F. Wilson (1964, 1975). Z kolei podstawy analizy mikroskopowej komórek drewna korzeni wypracowali D.C.F. Fayle (1968), H.C. Fritts (1976) i F. Schweingruber (1978). Korzenie drzew stanowią wiarygodne źródło informacji dotyczących przestrzennej i czasowej aktywności procesów geomorfologicznych (Krause, Eckstein 1993; Gärtner i in. 2001; Malik 2006, 2008a, b,; Gärtner 2007; Buchwał 2008; Wrońska-Wałach 2009). Na podstawie zmian anatomicznych w korzeniach możliwe jest datowanie zdarzeń i procesów o różnym natężeniu i częstotliwości występowania (Bodoque i in. 2005, 2011; Pelfini i Santilli 2006; Pérez-Rodríques i in. 2007; Buchwał 2009a,b; Rubiales i in. 2008; Corona i in. 2011; Loprez-Saez i in. 2011). W korzeniach eksponowanych wyraźnie zapisane uszkodzenia mechaniczne stanowią dowód na działanie bardzo silnego bodźca środowiskowego (Gärtner 2003, 2007). Ponadto możliwe jest wskazanie dokładnego momentu odstąpienia korzeni w skali sezonowej w ciągu roku oraz porównanie sekwencji przyrostowej do danych klimatycznych, glebowych czy hydrologicznych w celu wskazania mechanizmu współodpowiedzialnego za ekspozycję.

Od początku XXI wieku nad możliwością datowania procesów geomorfologicznych prowadzi się szczegółowe badania mikroskopowe bazujące na dokładnej analizie zmian anatomicznych i przyrostowych występujących w drewnie pni i korzeni drzew (Gärtner i in. 2001). W każdym przyroście rocznym wykształconym po ekspozycji korzenia komórki drewna są wyraźnie mniejsze i jest ich znacznie więcej. W drewnie korzeni w wyniku ekspozycji widoczna jest złożona zmiana kształtu komórek i grubości ich ścian, także pojawienie się traumatycznych kanałów żywicznych (ang. *traumatic resin ducts*). W obrębie drewna korzeni występują rany (ang. *injuries*) i blizny (ang. *scars*) oraz drewno reakcyjne (ang. *reaction wood*), będące efektem działania silnego bodźca środowiskowego (Schweingruber 1991). W niniejszym założeniu pracy są one skutkiem denudacji antropogenicznej wywołanej ciągłym wydeptywaniem. Korzenie rosnące w strefie intensywnego oddziaływania procesów rzeźbotwórczych wielokrotnie noszą znamiona takich zranień (Stoffel i in. 2005). Reakcją na różnorodne czynniki mechaniczne jest także pojawienie się redukcji przyrostów rocznych (Malik 2008a,b), a także występowania przyrostów wyklinowujących (ang. *wedgings rings*) i brakujących (ang. *missing rings*). Wówczas szerokość stojów rocznych korzeni jest okresowo mniejsza w porównaniu do poprzednich lat (Hupp, Carey 1990; Schweingruber 1996). Należy podkreślić, że wielkość przyrostów rocznych po ekspozycji korzenia zwiększa się i widoczny jest wyraźnie podział na drewno wczesne (ang. *earlywood*) i drewno późne (ang. *latewood*) (Mattheck, Breloer 1995). Pojawienie się zmian anatomicznych wynikających z odstąpienia wyznacza czas, który upłynął od zajścia procesu odpowiedzialnego za ekspozycję. Przyrost roczny wykazujący charakterystyczną redukcję wielkości światła komórek o 50-60% w porównaniu do poprzednich pierścieni liczonych od rdzenia korzenia stanowi pierwszy rok odstąpienia (Gärtner 2001, 2003; Hitz i in. 2008). Od tego momentu liczba przyrostów wyznacza czas, który upłynął od epizodu. Zmiany powierzchni światła komórek drewna wczesnego, procentowej zawartości drewna późnego oraz szerokości przyrostów rocznych w korzeniach odstąpionych na działanie czynników zewnętrznych są stosowane głównie w analizie procesów erozyjno-denudacyjnych na obszarach górskich (Corona i in. 2011; Lopez-Saez i in. 2011; Ballesteros-Cánovas i in. 2013; Wrońska-Wałach 2014).

Historię i rozwój metody dendrochronologicznej w Polsce syntetycznie przedstawiają A. Zielski i M. Krąpiec (2004). Studia nad wpływem procesów geomorfologicznych na przyrost radialny drzew leśnych jako pierwsi w Polsce omawiali Z. Bednarz (1986) oraz M. Krąpiec i W. Margielewski (1991). Zaobserwowano, że zdecydowana większość prowadzonych w Polsce badań dendrogeomorfologicznych koncentruje się na rozpoznaniu zmian przyrostowych i anatomicznych w obrębie pni drzew niż korzeni drzew. Na podstawie przeglądu literatury dendrogeomorfologicznej rozpoznano od 1986 roku do marca 2018 roku ponad 70 opracowań z tej tematyki (Ryc. 2), z czego ponad 80% z nich dotyczyła zmian przyrostowych pni drzew, z kolei niecałe 20% korzeni (Ryc. 3). Najwięcej przykładów badań dendrogeomorfologicznych pochodzi z obszarów górskich, będących jednym z najbardziej dynamicznych i wrażliwych terenów (Ryc. 2). W Polsce metoda dendrogeomorfologiczna znajduje zastosowanie w badaniach różnych procesów morfogenetycznych, takich jak: procesy osuwiskowe (Bednarz 1986; Krąpiec i in. 2004; Krąpiec i in. 2008, Krąpiec, Margielewski 2000; Buchwał, Winowski 2008; Malik, Wistuba 2012; Nawrocka 2013; Pawlik i in. 2013; Migoń i in. 2014; Remisz i in. 2014; Wistuba i in. 2013; Wistuba i in. 2014; Zielonka i in. 2014; Papciak i in. 2015; Kiszka 2016), spętywanie (Pawlik i in. 2013), erozja wąwozowa (Malik, Gerold 2006; Mailk 2005, 2006, 2008a, 2008b; Morawska 2012; Morawska, Wrońska-Wałach 2012; Poręba i in. 2014), erozja źródłiskowa (Wrońska-Wałach 2009, 2012; Buchwał, Wrońska-Wałach 2008), erozja rzeczna (Malik 2002, 2004a, 2004b, 2005, 2007; Ciszewski i in. 2004; Malik, Owczarek 2005; Kaczka i in. 2008; Zielonka i in. 2008; Rzepecka i in. 2012; Mikuś i in. 2013; Kaczka i in. 2014; Witek i in. 2014), lawiny śnieżne (Laska, Kaczka 2010; Czajka 2011; Czajka i in. 2012; Lempa i in. 2014, Lempa i in. 2015, 2016; Kaczka i in. 2015), odpadanie (Malik i in. 2009; Remisz i in. 2014; Remisz, Bijak 2011, 2012; Remisz 2012), akumulacja eoliczna (Koprowski in. 2010; Olesiak i in. 2014), sufozja (Bernatek-Jakiel, Wrońska-Wałach 2018), erozja i akumulacja fluwialna (Ballesteros i in. 2015), trzęsienia ziemi (Michałowicz i in. 2014) oraz erupcje wulkanu (Janecka, Kaczka 2014) (Załącznik.1).



Ryc. 2. Zastosowanie metody dendrochronologicznej w geomorfologii z podziałem na badany proces morfogenetyczny. Stan badań w Polsce w latach 1986-2018 (marzec). Opracowanie własne na podstawie przeglądu literatury (opis postępowania w podrzdziale 4.5). Lista pozycji naukowych Załącznik nr. 1.



Ryc. 3. Zastosowanie metody dendrochronologicznej w geomorfologii z podziałem na rodzaj materiału badawczego tj. pnie i korzenie drzew. Stan badań w Polsce w latach 1986-2018 (marzec). Opracowanie własne na podstawie przeglądu literatury (opis postępowania w podrozdziale 4.5)

Niewiele badań podejmuje tematykę wpływu ruchu turystycznego na przyrost radialny pni i korzeni drzew rosnących wzdłuż szlaków turystycznych. Z punktu widzenia podjętej problematyki pracy w polskiej literaturze dendrogeomorfologicznej pierwsze badania w strefie eksploatacji turystycznej przy wykorzystaniu pni drzew sosny zwyczajnej zaprezentował A. Zielski i in. (1998) z terenu Pojezierza Brodnickiego. W ostatnich latach problem zmian przyrostowych pni drzew rosnących wzdłuż szlaków turystycznych został rozpoznany również na obszarze polskich Tatr (Ciapała, Zielonka 2013; Ciapała i in. 2014). Wykazano efekty masowego ruchu turystycznego w postaci szybszej redukcji przyrostów w drzewach rosnących bezpośrednio wzdłuż szlaków. Zbita pokrywa glebowa i mechaniczne uszkodzenia korzeni niekorzystnie wpływały na zdrowotność drzew. Autorzy podkreślili praktyczny wymiar zastosowania metody dendrochronologicznej, jako alternatywy w badaniach oceny oddziaływania turystyki na środowisko geograficzne.

Z kolei podstawowe analizy makroskopowe korzeni drzew na szlakach turystycznych, zaprezentował P. Krusic (1990). Oszacował on średnie tempo ubytku materiału ze szlaków turystycznych położonych w Górach Białych (Stany Zjednoczone, New Hampshire). Do chwili obecnej szczegółowe rozpoznanie procesów kształtujących rzeźbę szlaków za pomocą odstłoniętych części korzeni przeprowadzono w trzech masywach górskich położonych w Europie oraz w górach Azji. Pierwsze z nich opierało się na analizie szerokości przyrostów rocznych i próbek z pni drzew dwóch gatunków sosny oraz modrzewia (*Pinus montana*, *Pinus cembra* oraz *Larix decidua*). Wyliczono średnie tempo ubytku materiału z powierzchni dwóch szlaków turystycznych z włoskiej części Alp (Pelifini, Santilli 2006). Drugi przykład dotyczył badań przeprowadzonych na obszarze Gór Kastylijskich na terenie Hiszpanii (Bodoque i in. 2005, Rubiales i in. 2008). Prace prezentowały analizę mikroanatomii drewna, w tym pomiary wielkości komórek drewna wczesnego oraz procentowy udział komórek drewna późnego w obrębie przyrostów rocznych korzeni sosny (*Pinus sylvestris*) oraz dębu (*Quercus ilex*). Trzeci przykład szczegółowo przedstawiał wyniki krajowych badań dendrogeomorfologicznych wykorzystujących odstłonięcia korzeni drzew z masywu Babiej Góry. Określono tempo denudacji w różnych częściach szlaku przy wykorzystaniu odstłanianych korzeni bocznych świerka (*Picea abies*) w wyniku wydeptywania. Odczyt zapisu procesów denudacyjnych opierał się na prześledzeniu zmian anatomicznych komórek drewna wczesnego i późnego w przyrostach rocznych drewna korzeni. Zaprezentowane analizy były pierwszym przykładem zastosowania tej metody w Karpatach (Buchwał, Wrońska-Wałach 2008; Buchwał 2010).

Badania dendrogeomorfologiczne przeprowadzono analizując korzenie odstłonięte świerka Wilsona (*Picea Wilsonii*) poddane ciągłemu stresowi mechanicznemu na drogach i ścieżkach w Tulugou National Forest Reserve we wschodniej części gór Qilian w Chinach (Zhou i in. 2013). Rozpoznano przesunięcia wzorów wzrostu pierścieni rocznych z koncentrycznych na ekscentryczne oraz zmiany cech anatomicznych drewna korzeni odstłoniętych. Określono, że kluczowym wskaźnikiem dla datowania pierwszego roku odstłonięcia jest redukcja światła komórek drewna wczesnego.

Najnowsza publikacja do oceny ilościowej procesów erozyjno-denudacyjnych na powierzchni szlaków wykorzystuje odstłonięte korzenie sosny hakowatej (*Pinus uncinata*) oraz buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica*) na obszarze Ordesa and Monte Perdido National Park (NE Hiszpania) (Bodoque i in. 2017). Wyniki tempa ubytku materiału otrzymane metodą dendrochronologiczną porównano z wartościami otrzymanymi przy użyciu skaningu laserowego i cyfrowych modeli terenu. Rozpoznano, że analiza mikroskopowa odstłoniętych korzeni z powodzeniem może stanowić alternatywną metodę do ilościowej oceny tempa ubytku materiału w ujęciu czasowym i przestrzennym.

Za wyjątkiem wspomnianych wyżej przykładów zastosowania dendrogeomorfologicznej analizy korzeni pobranych ze szlaków turystycznych z obszarów górskich Włoch, Hiszpanii, Chin oraz Polski, metoda ta nie była zaimplementowana na terenach nizinnych. Tym samym niniejsza praca stanowi pierwsze zastosowanie analizy dendrogeomorfologicznej szlaków turystycznych w strefie niżowej Europy. Jest to o tyle istotne, że współcześnie podkreślane jest znaczenie rozszerzania i weryfikacji metody dendrogeomorfologicznej w kontekście badań lokalnych. Praca stanowi rozszerzenie metod badawczych nad problemem wpływu antropopresji turystycznej na obszarach pojeziernych w Polsce. Ponadto weryfikuje stosowane dotychczas wskaźniki tempa denudacji antropogenicznej wykorzystujące odstonięcia korzeni drzew przy rekonstrukcji procesów kształtujących rzeźbę terenu.

5.5. Zastosowanie metody dendrochronologicznej do ilościowej oceny procesów geomorfologicznych

Współcześnie degradacja gleby jest jednym z głównych problemów środowiskowych podejmowanych przez badaczy w celu rozpoznania mechanizmu transformacji rzeźby (Stoffel, Huggel 2012; Stoffel, Wilford 2012). Współoddziaływanie czynników naturalnych i antropogenicznych odgrywa kluczową rolę w modyfikowaniu rzeźby terenu (Migoń 2009). Identyfikacja bodźców środowiskowych, jak i ich współzależności ze zmianami w terenie, pozwala na zrozumienie procesów geomorfologicznych. Ważnym procesem w transformacji rzeźby terenu i zniszczeniach szaty roślinnej na omawianym szlaku turystycznym jest wydeptywanie, które potęguje erozję wodną gleb. Jednym z efektów tego złożonego procesu jest wymywanie materiału z powierzchni gleby. O roli splukiwania w modyfikacji rzeźby terenu decydują przede wszystkim właściwości fizyko-chemiczne wierzchniej warstwy gleby oraz zmienne warunki meteorologiczne, w szczególności opady deszczu (Kostrzewski 2001, Święchowicz 2002).

Istnieją różne metody oceny dynamiki odprowadzenia materiału z powierzchni gruntu, począwszy od bezpośrednich pomiarów w terenie (Szpikowski 1998; Majewski 2014) do pośrednich analiz na materiale wtórnym. Stosowane są narzędzia geoinformacyjne, w tym fotogrametria (Kamiński 2012), szczegółowa dokumentacja fotograficzna (Tomczyk i in. 2008) oraz pomiary geodezyjne (Buchwał 2010). Prowadzi się bezpośredni pomiar przy użyciu rynien i łapaczy (Smolska 2002, 2008; Klima, Chowaniak 2009) oraz monitoring w profilach poprzecznych (Dixon i in. 2004; Hawes i in. 2006). Opracowanie metodyki ilościowego oszacowania tempa ubytku materiału nadal jest poważnym wyzwaniem naukowym w odniesieniu do zmienności czasowej i przestrzennej procesów morfogenetycznych (Poesen i in. 2003; Poesen 2011). W tym kontekście bioindykatory, jakimi są pnie i korzenie drzew mogą stanowić alternatywną metodę określania wielkości ubytku materiału w krótkich i średniookresowych odstępach czasu (Stoffel i in. 2013), zwłaszcza na obszarze bez ciągłości monitoringu środowiska. Zaproponowana metoda dendrogeomorfologiczna oparta w szczególności na badaniach odstoniętych korzeni daje możliwość oceny pod kątem ilościowym i jakościowym zmian w rzeźbie terenu (Stoffel, Bollschweiler 2008). Stanowi ona potężne narzędzie do datowania zdarzeń środowiskowych w regionach pozbawionych informacji o szczegółowych zapisach historycznych (Lopez Saez i in. 2011). Główną zaletą tej metody jest możliwość określenia z perspektywy przestrzennej i czasowej stopnia erozji i denudacji z dokładnością do jednego roku kalendarzowego (Bodoque i in. 2005).

W literaturze naukowej odsonięte części korzeni drzew zostały wykorzystane do rozpoznania tempa i przebiegu procesów erozyjno-denudacyjnych już w latach 60. XX wieku (Eardley, Viavant 1967; Fayle 1968). V.C. LaMarche (1961, 1963) jako jeden z pierwszych analizował zmiany w strukturze korzeni w celu dokumentowania procesów erozyjnych. Jego kwantyfikacja działania długoterminowych stresów, opierała się na obserwacji zmian koncentryczności wzrostu promieniowego oraz pomiarach odległości pomiędzy osią korzeniową a podłożem. Na podstawie badań zmian kształtu i nieciągłości wzrostu przyrostu rocznego przedstawił pierwsze wyniki oszacowania wieku korzenia w czasie początkowej redukcji kambium i pierwszy pomiar ilościowy współczynnika erozji. T. Dunne i in. (1978) badali ekstremalną erozję powierzchniową z wykorzystaniem odsoniętych korzeni młodych drzew na obszarze sawanny w Kenii. Z kolei P.E. Carrara i T.R. Carroll (1979) obserwowali pojawiające się zmiany przyrostowe w korzeniach, tak jak drewno kompresyjne oraz blizny, związane z początkowym zamieraniem tkanek kambialnych. Ponadto niniejsi autorzy za pierwszy rok ekspozycji korzenia, uznali sygnał reakcji drewna, w którym występuje ekscentryczny wzrost.

Większość początkowych badań koncentrowała się na wahaniach szerokości przyrostów rocznych lub zmianach strukturalnych korzeni na poziomie makroskopowym. Głównie sprowadzały się do pomiaru długości odsoniętej części korzenia i oznaczenia jego wieku, co umożliwiało oszacowanie wielkości ubytku materiału (Hupp, Carey 1990; Bodoque i in. 2005; Malik 2006; Pelfini, Santilli 2006; Perez-Rodriguez i in. 2007). Powszechnie stosowanym wzorem do oszacowania stopnia erozji określony mianem „klasycznego” był iloraz pionowej odległości między górną częścią korzenia a obecną powierzchnią gruntu, podzielony przez odstęp czasowy ekspozycji korzenia liczony w mm/rok (LaMarche, 1963, 1968; Eardley, Viavant 1967; Carrara, Carroll 1979; McCord 1987; Hupp, Carey 1990; Danzer 1996).

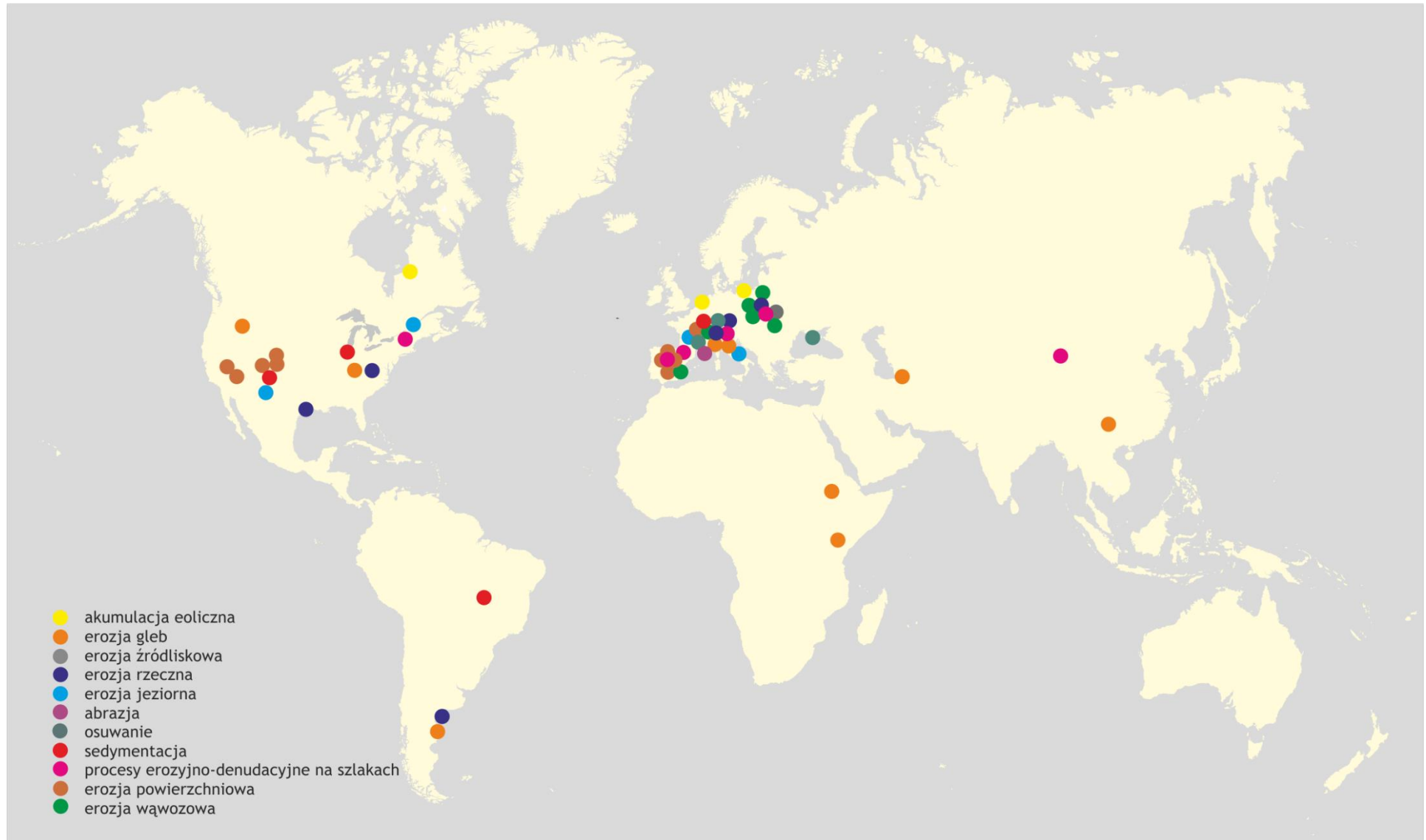
Od początku XXI wieku w rozwoju metody dendrogeomorfologicznej w znacznym stopniu przyczyniła się analiza mikroskopowa drewna korzeni. Rozpoznanie reakcji pni i korzeni na zmiany temperatury, wilgotności czy zwięzłości gleby pozwoliło na uszczegółowienie metody dendrochronologicznej, jako narzędzia wykorzystywanego w dziedzinie geomorfologii. Współcześnie stosuje się podejście uwzględniające zapis reakcji anatomicznych i przyrostowych odsoniętych korzeni poddanych procesom erozji i denudacji (Gärtner 2003, 2006, 2007; Corona i in. 2011; Lopez Saez i in. 2011). Szczegółowe pomiary dotyczą gęstości drewna oraz zmiany wielkości komórek drewna wczesnego w korzeniach drzew iglastych (Gärtner i in. 2001, 2007; Rubiales i in., 2008) czy naczyń w korzeniach drzew liściastych (Hitz i in. 2006, 2008). Nowe techniki obliczania tempa denudacji uwzględniają pomiar szerokości elementów strukturalnych korzenia z podziałem na okres przed i po odsonięciu. Tym samym istnieje możliwość określenia, czy korzeń był wystawiony na działanie procesów erozyjnych, czy też odsonięcie jest efektem wzrostu wtórnego (Gärtner 2007).

Z perspektywy metodyki znaczące niedawne postępy w dokładnym szacowaniu tempa ubytku materiału opartego na korzeniach drzew są związane z i) wysoką niezawodnością i dokładnością sygnałów ekspozycji oraz sposobów ich rozpoznania w oparciu o anatomiczne zmiany w korzeniach (Gärtner 2007; Rubiales i in. 2008; Corona i in. 2011; Zhou i in. 2013) oraz (ii) możliwością określenia wielkości zredukowanej warstwy gleby w wyniku presji mechanicznej (Gärtner 2007; Corona i in. 2011). Do tej pory badania głównie opierały się na odsoniętych korzeniach ułożonych równolegle względem przebiegu stoku, co znacznie zmniejszyło liczbę próbek dostępnych do analizy, a tym bardziej na stokach z silną erozją, w których liczba drzew była ograniczona (Bodoque i in. 2005, 2011; McAuliffe i in. 2006; Sun i in. 2014). W przeszłości często pomijano w badaniach korzenie ułożone prostopadle, ponieważ uważano, że powodują one nieścisłości i błędy pomiarowe. Wiązało się to z tworzeniem

w terenie układu kaskadowego korzeni i asymetrycznego profilu z widocznym wymywaniem i erozją materiału w kierunku spadku stoku i akumulacją materiału po drugiej stronie korzenia (Gärtner 2007; Bodoque i in. 2005, 2011; Corona i in. 2011; Lopez-Sáez i in. 2011; Sun i in. 2014). Współcześnie uszczegółowione badania dendrogeomorfologiczne przy użyciu narzędzi geoinformatycznych w tym TLS (ang. *Terrestrial Laser Scanner*) wykorzystuje się do prawidłowego odtworzenia i ilościowego oszacowania tempa denudacji uwzględniając korzenie ułożone prostopadle. Potwierdzeniem znaczenia i dokładności badań korzeni odsoniętych jest wysoka zgodność otrzymanych wyników w porównaniu do danych pochodzących z bezpośredniego krótkookresowego monitoringu przy użyciu narzędzi GIS w tym skaningu laserowego (Ballesteros-Cánovas i in. 2015; Bodoque i in. 2015; Bodoque i in. 2017).

Badania intensywności erozji na podstawie analizy narażonych na stres mechaniczny, odsoniętych części systemu korzeniowego są z powodzeniem wykorzystywane w różnych częściach świata (Ryc.4). Jak pokazuje przegląd literatury przedmiotu, wyliczenie tempa denudacji jest również możliwe przy wykorzystaniu gałęzi przewróconych drzew (Vandekerckhove 2001) oraz odsoniętych korzeni roślinności krzewinkowej (Brenot i in. 2008, Chartier i in. 2009; Chartier i in. 2016). Prace badawcze w większości są prowadzone w strefach erozji, transportu i depozycji, co pozwala prześledzić zasięg i intensywność oddziaływania pojedynczych epizodów kształtujących rzeźbę (Gartner 2007; Hitz i in. 2006, 2008; Malik 2008). Ilościowe oceny tempa ubytku materiału, znalazły zastosowanie w badaniach: erozji wąwozowej (Vandekerckhove 2001; Malik 2008; Morawska 2012; Šilhán i in. 2016b), splukiwania (Bodoque i in. 2005; Lopez Saez i in. 2011; Lucia i in. 2011), sptywów gruzowych (Šilhán i in. 2016a), erozji bocznej (Malik 2006; Hitz i in., 2008a; Stoffel i in. 2012), abrazji brzegów jeziora (Desrosiers 1992; Maleval, Astrade 2003; Fantucci 2007), abrazji wybrzeża klifowego (Rovéra 2013; Morel i in. 2017), procesów eolicznych (Koprowski i in. 2010) czy aktywność przestrzennej fauny (Boudreau i in. 2003). Ponadto badano tempo ubytku materiału z powierzchni szlaków turystycznych (Krusic 1990; Bodoque i in. 2005, Pelifini, Santilli 2006; Rubiales i in. 2008; Buchwał 2010; Zhou i in. 2013; Bodoque i in. 2017). Przegląd pozycji naukowych dotyczących obliczania tempa ubytku materiału opartych na analizie korzeni i pni drzew prezentuje Załącznik 2..

Wszystkie wyżej wymienione prace podkreślają przydatność i konieczność rozwoju badań dendrogeomorfologicznych pod kątem ich użyteczności w zrozumieniu działania procesów morfogenetycznych w różnych regionach świata.



Ryc. 4. Zastosowanie metody dendrochronologicznej do ilościowej oceny procesów geomorfologicznych z podziałem na badany proces morfogenetyczny. Stan badań na świecie od 1961 roku. Opracowanie własne na podstawie przeglądu literatury (opis postępowania w podrozdziale 4.5). Lista pozycji naukowych Załącznik nr 2.

6. Materiał i metody badań

Badania w ramach podjętego problemu badawczego wymagały zastosowania szeregu zróżnicowanych metod. Ocenę wpływu denudacji antropogenicznej (DrA) na przyrosty radialne i anatomię drewna korzeni sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) dokonano w oparciu o następujące metody:

- kartowanie terenowe szlaków turystycznych,
- analizy dendrochronologiczne,
- analiza właściwości fizycznych pokrywy glebowej,
- monitoring ruchu turystycznego.

Ponadto w pracy wykorzystano metody inwentaryzacyjne, materiały archiwalne i kartograficzne. Charakter metod badawczych opisano szczegółowo wraz z podaniem zakresu badań terenowych i materiału badawczego.

Procedura pomiarów terenowych jak i poboru korzeni została przeprowadzona w okresach wiosenno-letnich w latach 2013-2016. Dokonano szczegółowej dokumentacji fotograficznej oraz szkiców terenowych. Pomiarów dokonano przy użyciu taśmy mierniczej (dokładność ± 1 mm), suwmiarki elektronicznej (dokładność $\pm 0,02$ mm), elektronicznego kątomierza (dokładność $\pm 0,1^\circ / \pm 0,05^\circ$) oraz ręcznego dalmierza laserowego (dokładność 1,5 mm).

6.1. Kartowanie terenowe szlaków turystycznych

Wstępem do analiz dendrochronologicznych były prace terenowe, obejmujące kartowanie terenowe obszarów użytkowanych turystycznie w tym szczególnie szlaków turystycznych na terenie Pojezierza Brodnickiego. W związku z niedostatecznym rozpoznaniem reakcji przyrostowych i anatomicznych korzeni na oddziaływanie procesów morfogenetycznych modyfikowanych przez działalność człowieka cykl badawczy poprzedzono analizą i rzeźby badanego obszaru. W roku 2013 dokonano inwentaryzacji oznakowanych szlaków i ścieżek turystycznych na terenie Pojezierza Brodnickiego tj. ich morfometrii i otoczenia. Kryteria wyboru stanowiska badawczego, na którym zostały przeprowadzone szczegółowe analizy dendrochronologiczne dotyczyły:

- stopnia degradacji szlaku tj. jakościowa ocena występowania form erozyjno-denudacyjnych na szlaku,
- powszechności występowania odstojnięć korzeni z określeniem gatunku drzew,
- rodzaju użytkowania szlaku z rozpoznaniem czy szlak jest dostępny jedynie dla turystyki pieszej bądź rowerowej, czy również dozwolony jest ruch samochodowy w tym wpływ gospodarki leśnej,
- rodzaju powierzchni szlaku z określeniem stopnia naturalności szlaku uwzględniający ingerencję człowieka w rzeźbę szlaku (remonty, dodatkowe balustrady, kostki brukowe, mała architektura),
- zróżnicowania morfologicznego oraz przebiegu przez tereny leśne szlaku turystycznego.

Opis wybranego stanowiska badawczego prezentuje podrozdział 8.8.

Na stanowisku badawczym w dalszym etapie pracy dokonano obserwacji i pomiarów parametrów morfometrii szlaku. W zakresie prac terenowych prowadzonych w latach 2012-2016 wykonano pomiary charakteryzujące szlak turystyczny, takie jak:

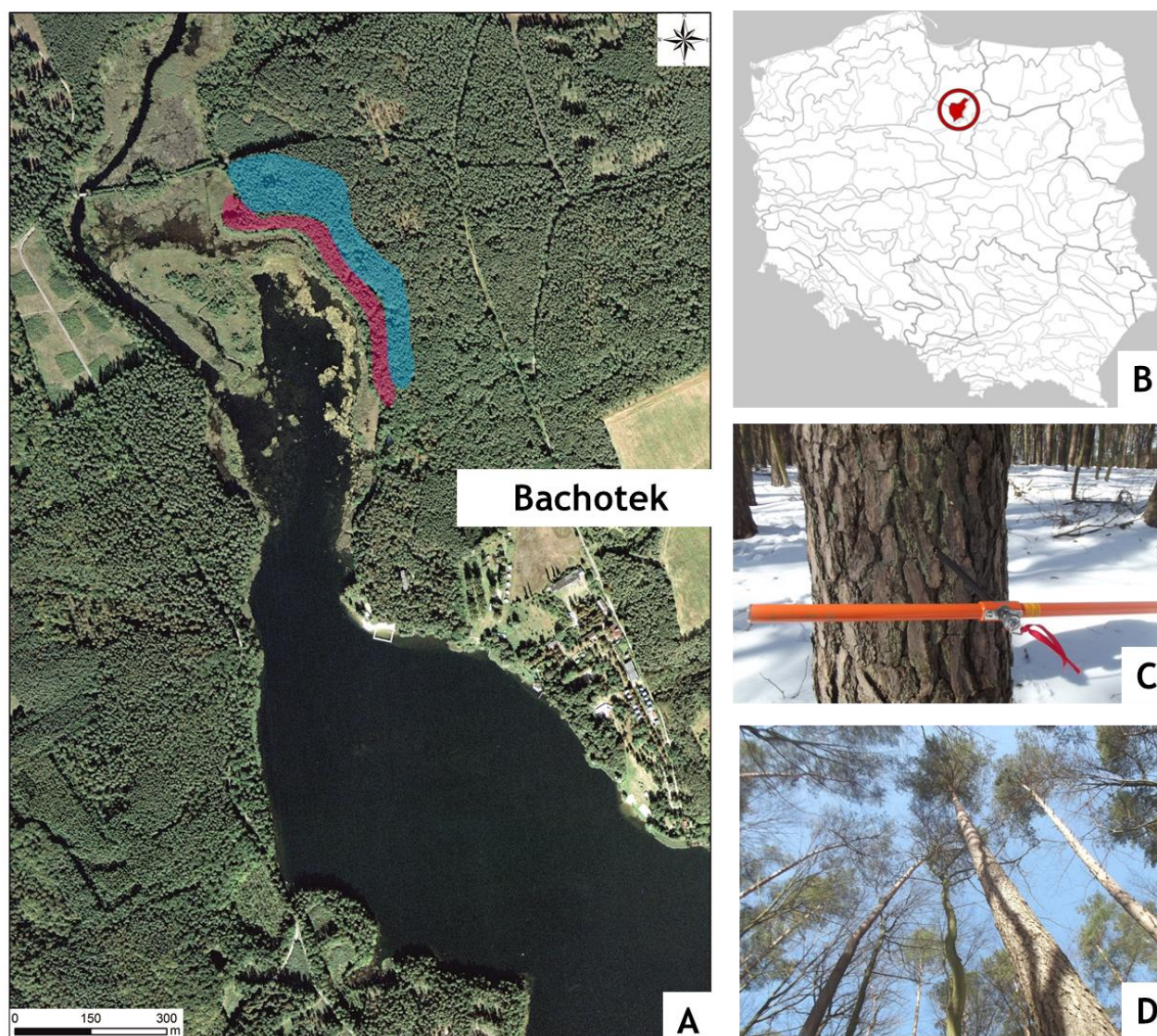
- długość badanego odcinka szlaku turystycznego,
- przebieg odcinka szlaku turystycznego (spadek terenu),
- szerokość szlaku turystycznego w miejscu poboru odstoniętych prób korzeni,
- spadek terenu w miejscu poboru odstoniętych prób korzeni,
- długość występującej przestrzenie roślinności, tj. warstwy runa leśnego w miejscu poboru odstoniętej części korzenia.

6.2. Analiza dendrochronologiczna

Analiza dendrochronologiczna drzew sosny zwyczajnej stanowi główną metodę badawczą zastosowaną w niniejszej pracy. Ze względu na rodzaj materiału badawczego dokonano podziału opisu metodyki na analizę dendrochronologiczną pni oraz analizę dendrochronologiczną korzeni.

6.2.1. Analiza dendrochronologiczna pni

Wzdłuż i w sąsiedztwie badanego szlaku turystycznego w latach 2013-2015 na stanowisku Bachotek pobrano wywierty z pni sosny zwyczajnej z dwóch powierzchni badawczych (Ryc. 5A). Pierwsza powierzchnia obejmowała drzewa sosny zwyczajnej rosnące wzdłuż szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek. Drzewa z tej powierzchni były poddawane bezpośredniemu wydeptywaniu w wyniku oddziaływania ruchu turystycznego (powierzchnie oznaczono skrótem PRES). Drzewa te posiadały liczne odstonięcia części systemu korzeniowego widoczne na powierzchni szlaku, które stanowiły główny przedmiot badań niniejszej pracy. Druga powierzchnia, tzw. powierzchnia referencyjna, obejmowała drzewa sosny zwyczajnej niepoddane presji turystycznej i rosnące średnio 30 m od analizowanego szlaku turystycznego (powierzchnie oznaczono skrótem REF). Drzewostan referencyjny stanowiły sosny zwyczajne o cechach siedliska naturalnego, z niezaburzoną strukturą warstwową i odpowiednio silnym zwarcie drzewostanu (Ryc. 5D). Do badań referencyjnych wybrano drzewa bez zewnętrznych oznak chorobowych i uszkodzeń (strategia EKO) (Zielski, Krapien 2004) rosnące średnio co 10 m od siebie. Łącznie do badań szczegółowych wytypowano 45 drzew niepoddanych presji turystycznej (z powierzchni referencyjnej) oraz 42 drzewa rosnące wzdłuż szlaku turystycznego. W każdym drzewie za pomocą świdra przyrostowego Presslera wykonano minimum po dwa wywierty (od strony wschodniej i zachodniej) na wysokości pierśnicy (1,3 m) (Ryc. 5C). Z drzew w obrębie szlaku turystycznego pobrano rdzenie przyrostowe dodatkowo od strony szlaku i zbocza rynny jeziora Bachotek. W sumie z 87 drzew sosny zwyczajnej pobrano 242 wywierty z pni.



Ryc. 5. Stanowisko Bachotek (północno-wschodnia część jeziora Bachotek) wraz z lokalizacją powierzchni badawczych: drzewa rosnące wzdłuż szlaku turystycznego, poddane presji turystycznej (PRES)- obszar zaznaczony kolorem czerwonym; drzewa na stanowisku referencyjnym, niepoddane presji turystycznej (REF)- obszar zaznaczony kolorem niebieskim (A). Prace terenowe przy pobieraniu wywiertów z pni drzew sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) przy pomocy świdra przyrostowym Presslera (C) na stanowisku Bachotek (D).

Pobrane wywierty z pni zostały poddane standardowej procedurze preparacji (Zielski, Krapiec 2004). Pierwszym etapem przygotowania wywiertów do analiz było ich wysuszenie, przyklejenie na specjalne listwy a następnie szlifowanie. Polerowanie drewna wykonano przy użyciu ręcznej szlifierki oscylacyjnej, używając papierów ściernych różnej granulometrii (od P60 do P240). Wyszlifowane próby podlegały następnie polerowaniu, w celu wyostrzenia odczytu zapisu przyrostów rocznych (używając papieru o ziarnie od P360 do P800). Tak przygotowane wywierty skanowano w rozdzielczości 1200 DPI (Epson Perfection V700 Photo - Epson). Pomiarów szerokości słoików rocznych na każdym wywiercie dokonywano z dokładnością do 0,01 mm za pomocą programu Coorecorder (www.cybis.se). Do wytypowania sekwencji osobniczych, które wykorzystano do konstrukcji chronologii stanowisk (dla drzew poddanych i niepoddanych presji turystycznej tzw. referencyjnej), posłużył program CDendro

(www.cybis.se). Poszczególne sekwencje wzrostu radialnego sosny porównano między sobą, a istotność korelacji sprawdzono przy pomocy testu t-Studenta (Baillie, Pilcher 1973). W kolejnym etapie przeprowadzono badania pomostowe (ang. *cross-dating*) a ich dokładność sprawdzono przy użyciu programu COFECHA (Grissino-Mayer 2001). Program COFECHA analizuje każdą serię pomiarową w stosunku do utworzonej chronologii wzorcowej i porównuje wartości uzyskanych współczynników korelacji pomiędzy seriami. Do dalszych analiz zastosowano tzw. chronologie indeksowane, tj. pozbawione długookresowych trendów przyrostowych i potencjalnych trendów biologicznych (Zielski, Krąpiec 2004). Detrendyzacje i indeksacje przeprowadzono według standardowych procedur opisanych przez E.R. Cooka i in. (1990). Standaryzacji danych dokonano używając pakietu 'dplR' (2016) wersja 1.6.4 w oprogramowaniu R wersja 3.2.5 (R Core Team 2016) używając metody 'Spline' (Cook i in. 1990) (ang. *cubic smoothing spline*) (Cook, Peters 1981). Długość krzywej 'Spline' została ustalona na 50 lat. Przy wykorzystaniu metody 'Spline', przypadkowa zmienność w sekwencji przyrostowej drzewa została usunięta. Konstrukcji chronologii surowej (ang. *raw chronology*) i indeksowanej dokonano w pakiecie 'dplR' (2016) wersja 1.6.4 używając funkcji 'chron' (Bunn 2008, 2010). Dla uzyskanych chronologii (tj. surowej i indeksowanej) obliczono wartości następujących statystyk opisowych: średnią korelację pomiędzy seriami (ang. *inter-series correlation*) (R_{bar}), wskaźnik GLK (*Gleichläufigkeit*; Eckstein, Bauch 1969) oraz EPS (ang. *express population signal*) (McCarroll, Loader 2004).

Analiza dendroklimatologiczna

Do określenia wpływu warunków klimatycznych na przyrost radialny sosny zwyczajnej użyto metody funkcji odpowiedzi (ang. *response function*) przy wykorzystaniu pakietu 'treeclim' wersja 2.0.0 i funkcji 'dcc' (Zang, Biondi 2015) w środowisku R. W pakiecie tym dodatkowo zastosowano metodę 'bootstrap' do testowania istotności i stabilności współczynnika determinacji (r^2) w okresie czasu (Guiot 1991). Do analizy klimat-wzrost wykorzystano następujące zmienne klimatyczne: średnia miesięczna temperatura (Temp), suma miesięcznych opadów atmosferycznych (Prec), miesięczna temperatura minimalna (Tmin) oraz miesięczna temperatura maksymalna (Tmax). Sumy miesięcznych opadów atmosferycznych oraz wartości średniej miesięcznej temperatury obejmowały okres 1951-2014, z kolei ekstremalnych warunków termicznych okres 1965-2014 (Klein Tank i in. 2002). Wykorzystane w analizie dane klimatyczne pochodzą ze stacji IMGW w Toruniu (53°04'N, 18°59'E). Decyzje o wykorzystaniu danych klimatycznych ze stacji toruńskiej, która jest oddalona od obszaru badań o około 65 km, podjęto z uwagi na brak bliższego punktu pomiarowego pożądanymi zmiennymi klimatycznymi obejmujący okres ostatnich 50 lat. Położona na obszarze Brodnickiego Parku Krajobrazowego stacja klimatyczna w Grzmięcy nie posiadała pełnej serii pomiarowej dla wybranego okresu badań.

Lata wskaźnikowe

Do wyznaczenia lat wskaźnikowych (Schweingruber i in. 1990; Zielski, Krąpiec 2004; Muter 2012) zastosowano algorytm Becker'a (Becker i in. 1994). Obliczeń dokonano w środowisku R (R Development Core Team 2016), z wykorzystaniem pakietu 'dplR' i funkcji 'pointer' (2016) (Bunn 2008, 2010). Lata wskaźnikowe zostały obliczone z regulowanymi progami względnej zmienności radialnego wzrostu sosny zwyczajnej obliczonymi w oknie 7 lat. Za kryterium wyznaczenia lat wskaźnikowych przyjęto występowanie jednokierunkowych zmian, (tj. spadek lub wzrost szerokości słoju rocznych) w minimum 80% badanych sekwencji przyrostów rocznych

pochodzących z drzew z danej powierzchni badawczej (tj. powierzchnia poddana i niepoddana presji turystycznej).

6.2.2. Analiza dendrochronologiczna korzeni

Pomiary terenowe

Wstępem do przeprowadzenia właściwej analizy dendrochronologicznej korzeni były prace terenowe. Procedura poboru próbek korzeni i pni sosny zwyczajnej w obrębie i poza szlakiem turystycznym została poprzedzona obserwacjami terenowymi i szczegółowym kartowaniem terenowym przeprowadzonym w latach 2013-2016. W terenie dokonano szczegółowego rejestru:

- wysokości podparcia korzeni odstłoniętych nad powierzchnią szlaku turystycznego, liczonej, jako odległość pomiędzy górnym wierzchołkiem korzenia odstłoniętego a aktualną pozycją powierzchni szlaku turystycznego;
- głębokości zalegania korzeni zasłoniętych w pokrywie glebowej, mierzonej, jako odległość pomiędzy górną częścią korzenia zasłoniętego a powierzchnią pokrywy glebowej;
- długości analizowanych korzeni, mierzonej od podstawy nasady korzeniowej pnia do najdalej położonej pobranej do analiz próby korzenia;
- odległości pobranych części korzenia od pnia, mierzonej, jako odległość pomiędzy podstawą nasady korzeniowej pnia a położeniem konkretnej pobranej próby względem pnia drzewa;
- pozycji osi korzenia, identyfikowanej, jako różnica w położeniu osi, tj. geometrycznego środka korzenia pomiędzy częścią odstłoniętą a zasłoniętą korzenia, położoną bliżej pnia drzewa;
- długości eksponowanej części korzenia, mierzonej pomiędzy początkiem a końcem odstłoniętej części korzenia na powierzchni szlaku turystycznego;
- jakościowego (prostokątne lub równoległe) i ilościowego (w stopniach azymutu) położenia korzeni odstłoniętych względem przebiegu szlaku turystycznego;
- rzędowości korzeni odstłoniętych na szlaku względem podstawy pnia drzewa.

Wysokość korzenia nad aktualną pokrywą glebową została zmierzona prostopadłe do powierzchni szlaku. Bieżąca pozycja powierzchni gleby ze szlaku została oznaczona na dysku korzenia częściowo odstłoniętego poprzez zaznaczenie na przekroju poprzecznym korzenia jego wierzchołka (tj. górnej części korzenia poddanej bezpośredniemu wydeptywaniu na szlaku) wraz z narysowaniem linii nawiązującej do poziomu gleby, w jakiej przyrastał korzeń.

Pobór korzeni

Na wybranym odcinku szlaku turystycznego z Pojezierza Brodnickiego w obrębie stanowiska Bachotek pobrano próby korzeni z możliwie najstarszym zapisem klimatycznym i środowiskowym. Liczba prób pobranych z korzeni zależała od intensywności ich odstania na powierzchni szlaku turystycznego. Do analiz dendrogeomorfologicznych pobierano wyłącznie żywe korzenie różnorako zlokalizowane względem przebiegu szlaku. Próby starano się pobrać możliwie gęsto w niewielkiej odległości między sobą. Takie podejście umożliwiło szczegółowe prześledzenie i odtworzenie intensywności denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym. Szczegółowy opis poboru prób korzeni został zaprezentowany również w dalszej części Podrozdziału (patrz str.36).

Szyja korzeniowa stanowi pod względem struktury strefę przejściową pomiędzy pniem a korzeniem. Pierścienie roczne są tu stosunkowo szerokie, przy czym znaczną ich część stanowi drewno późne. Cewki są krótkie i mają mniejszy przekrój poprzeczny niż cewki pnia i części korzeni oddalone od jego nasady. W miarę oddalania od nasady korzenia zmniejsza się udział drewna późnego w pierścieniu rocznym. Typowe drewno późne zanika i zacierają się granice pomiędzy pierścieniami (Fayle 1968). W celu uniknięcia błędów interpretacyjnych w rekonstrukcji zdarzeń środowiskowych, próbki korzeni zostały pobrane w minimalnej odległości, tj. od ok. 0,8 m do 1 m od podstawy nasady pnia drzewa. Zachowanie tej zasady było istotne z trzech powodów:

- stały wzrost pierwotny pnia powoduje podnoszenie korzeni w górę (LaMarche 1968; Stokes, Berthier 2000);
- korzenie położone bliżej pnia bardzo często wykazują asymetryczne struktury wzrostu w przekroju poprzecznym, co wiąże się bezpośrednio z naprężeniami stabilizacyjnymi pnia (Gärtner 2007; Scuderi 2017);
- możliwa obecność przyrostów fałszywych wykształconych w korzeniach położonych blisko nasady pnia (Fayle 1968, 1975; LaMarche 1968).

Pobrane korzenie odłonięte w obrębie szlaku turystycznego posiadały widoczne zniszczenia mechaniczne, które należy wiązać z ciągłym wydeptywaniem. Makroskopowym objawem dużego oddziaływania mechanicznego na korzeń było starcie warstwy kory oraz kambium, któremu towarzyszyło wykształcenie blizn i nadmierna produkcja żywicy. Ze względu na bardzo duże zniszczenia mechaniczne, tj. silne zdeformowanie rdzenia; czy udział drewna martwego lub próchniejącego dla wielu prób korzeni przeprowadzenie analiz dendrogeomorfologicznych było niemożliwe. Był to dowód na intensywny wpływ wydeptywania na systemy korzeniowe drzew oraz pokrywę glebową na szlaku.

Łącznie ze szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek pobrano 105 próbek korzeni odłoniętych, z czego po wstępnej analizie makroskopowej do dalszych analiz wytypowano 88 próbek korzeni pochodzących z 42 drzew sosny zwyczajnej. W sumie z 23 drzew ze szlaku turystycznego pobrano po jednym wyrzynku z odłoniętej części korzenia, natomiast z 19 drzew pobrano więcej niż jedną próbę z korzenia odłoniętego w wyniku wydeptywania. W tym drugim przypadku pobrano od dwóch do pięciu prób z jednego korzenia, tj. ze strefy początkowej odłonięcia korzenia, środkowej i końcowej w obrębie szlaku turystycznego (Ryc.6). Ilość prób uzależniona była od całkowitej długości korzenia odłoniętego w obrębie szlaku. Zabieg ten miał na celu porównanie wzrostu radialnego korzenia, wieku odłonięcia i zidentyfikowanie ewentualnych różnic w budowie anatomicznej w profilu podłużnym korzenia, wynikających z potencjalnie różnokierunkowego działania procesów erozyjno-denudacyjnych na szlaku. Średnia odległość pobranych dysków w obrębie odłoniętej części korzenia wyniosła 10 cm. Sekwencje przyrostowe wszystkich próbek korzeni odłoniętych zostały porównane z krzywymi wzrostu z pnia drzewa oraz chronologią referencyjną sosny zwyczajnej jeziora Bachotek utworzoną w pierwszym etapie badań dendrochronologicznych.



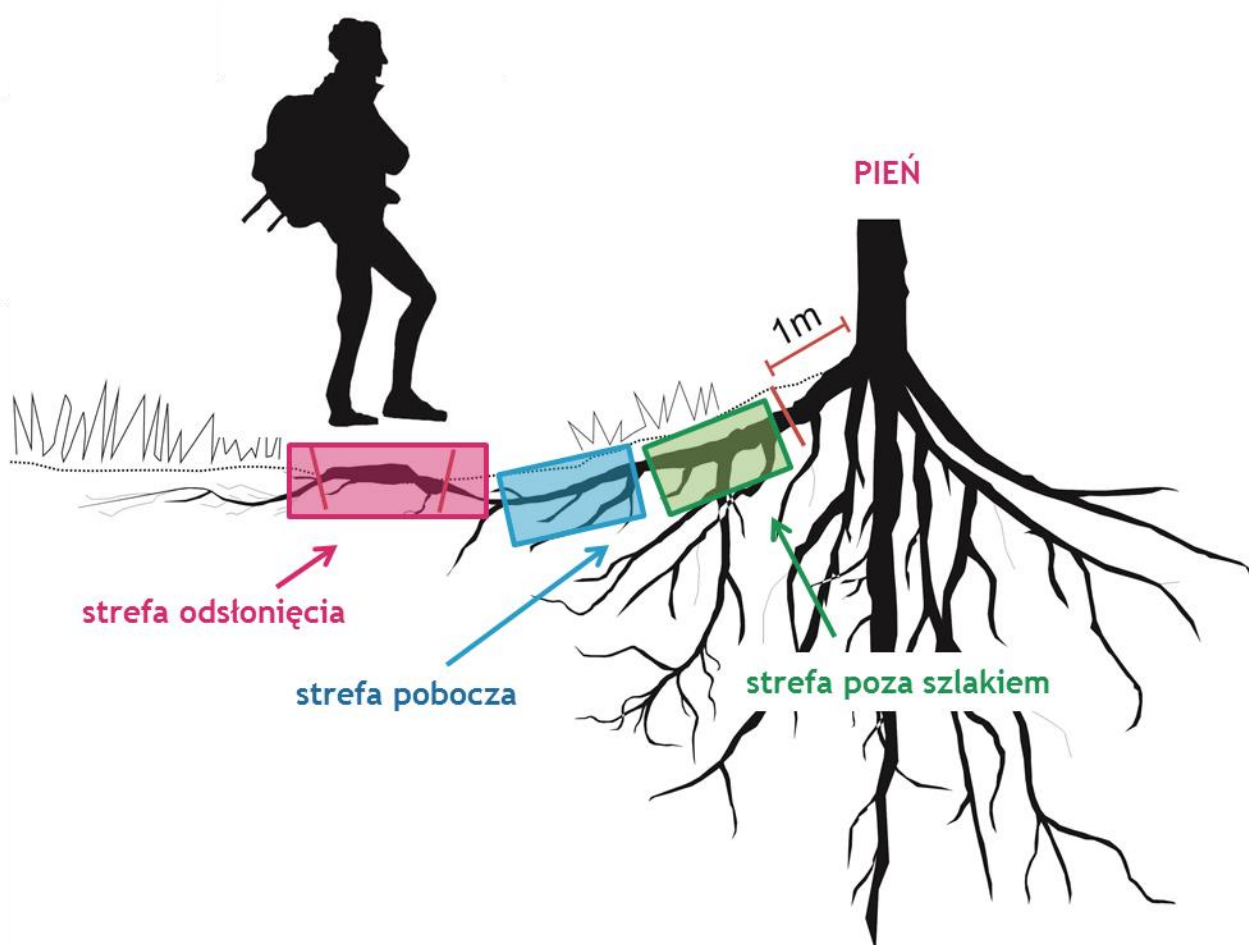
Ryc. 6. Przykład odśloniętego korzenia sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w obrębie szlaku turystycznego ze stanowiska Bachotek wraz z zaznaczonymi miejscami poboru prób do analiz mikroskopowych (białe prostokąty)

Spośród analizowanych 42 drzew sosny zwyczajnej, dla których zdiagnozowano wielkopowierzchniowe odślonięcia korzeni wybrano osiem systemów korzeniowych, reprezentujących pięć typów odślonień korzeni w obrębie szlaku turystycznego (opis typologii drzew z odślonieniami korzeni został zaprezentowany w Podrozdziale 9.2). Szczegółowe datowanie w wysokiej rozdzielczości zmian przyrostowych wzdłuż profilu podłużnego tych korzeni dotyczyło uszczegółowienia precyzji analiz dendrochronologicznych korzeni odśloniętych, jakiej podjęto się w niniejszej pracy. Wybór ośmiu korzeni nie był przypadkowy i został podyktowany czterema głównymi powodami. Po pierwsze, wybrane do analiz uszczegółowiających korzenie ze szlaku były położone z różnicowaniem względem przebiegu szlaku oraz znajdowały się w różnych miejscach wzdłuż profilu podłużnego szlaku turystycznego. Po drugie, wybór korzeni był ograniczony ze względu na: a) trudności w identyfikacji pnia drzewa, do jakiego przynależały fragmenty korzeni odślonięte na szlaku; b) rozbudowany zastłonięty system korzeniowy z licznymi odgałęzieniami i ich wysoką rzędowością; c) bliskość w pokrywie glebowej korzeni innych gatunków drzew, co uniemożliwiło staranny pobór i opis prób korzeni. Po trzecie, starano się unikać poboru korzeni z drzew, posiadających zewnętrzne oznaki chorobotwórcze, wewnątrz spróchniałe, tj. o niskiej kondycji zdrowotnej. Ponadto eliminowano pobór korzeni, które wykazywały liczne deformacje i zniszczenia rdzenia. Po czwarte, starano się pobrać korzenie odślonięte z silnie rozbudowanym systemem odgałęzień systemu korzeniowego. Miało to na celu rozpoznanie zmian przyrostowych i anatomicznych korzeni z uwzględnieniem ich rzędowości oraz lokalizacji względem przebiegu szlaku turystycznego.

Z wybranych ośmiu systemów korzeniowych pobrano przekroje poprzeczne korzeni zarówno odśloniętych jak i zastłoniętych, wzdłuż profilu podłużnego głównego korzenia. W zależności od długości, korzenie poddano seryjnemu próbkowaniu (ang. *serial sectioning*,

Kolishchuk 1990) pobierając od 8 do 15 próbek w obrębie jednego korzenia. Metodę seryjnego próbkowania zastosowano w celu porównania wzorca przyrostowego pomiędzy wybranymi częściami systemu korzeniowego, a finalnie, w celu uzyskania jak najpełniejszej serii przyrostowej korzeni.

Każdy z korzeni został podzielony na trzy strefy, ze względu na położenie w stosunku do szlaku turystycznego (Ryc. 7). Pierwsza strefa tzw. strefa poza szlakiem (C) obejmowała część zasłoniętą korzenia, położoną najbliżej podstawy pnia drzewa. Druga strefa tj. pobocza (B) obejmowała część korzenia, która poprzedzała część odsłoniętą korzenia. Z kolei trzecia strefa - strefa szlaku (A) dotyczyła odsłonięcia korzenia w obrębie szlaku turystycznego (szczegółowy opis procedury wyróżnienia stref korzeni znajduje się w Rozdziale 11 i 12).



Ryc. 7. Schemat systemu korzeniowego sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w obrębie szlaku turystycznego z Pojezierza Brodnickiego z podziałem na trzy strefy poboru korzeni wydzielone wzdłuż profilu podłużnego korzenia odsłoniętego na szlaku

W obrębie ośmiu systemów korzeniowych wytypowanych do analiz uszczegółwiających sekwencje przyrostowe części korzeni odsłoniętych w wyniku denudacji antropogenicznej (strefa szlaku) porównano do sekwencji przyrostowej:

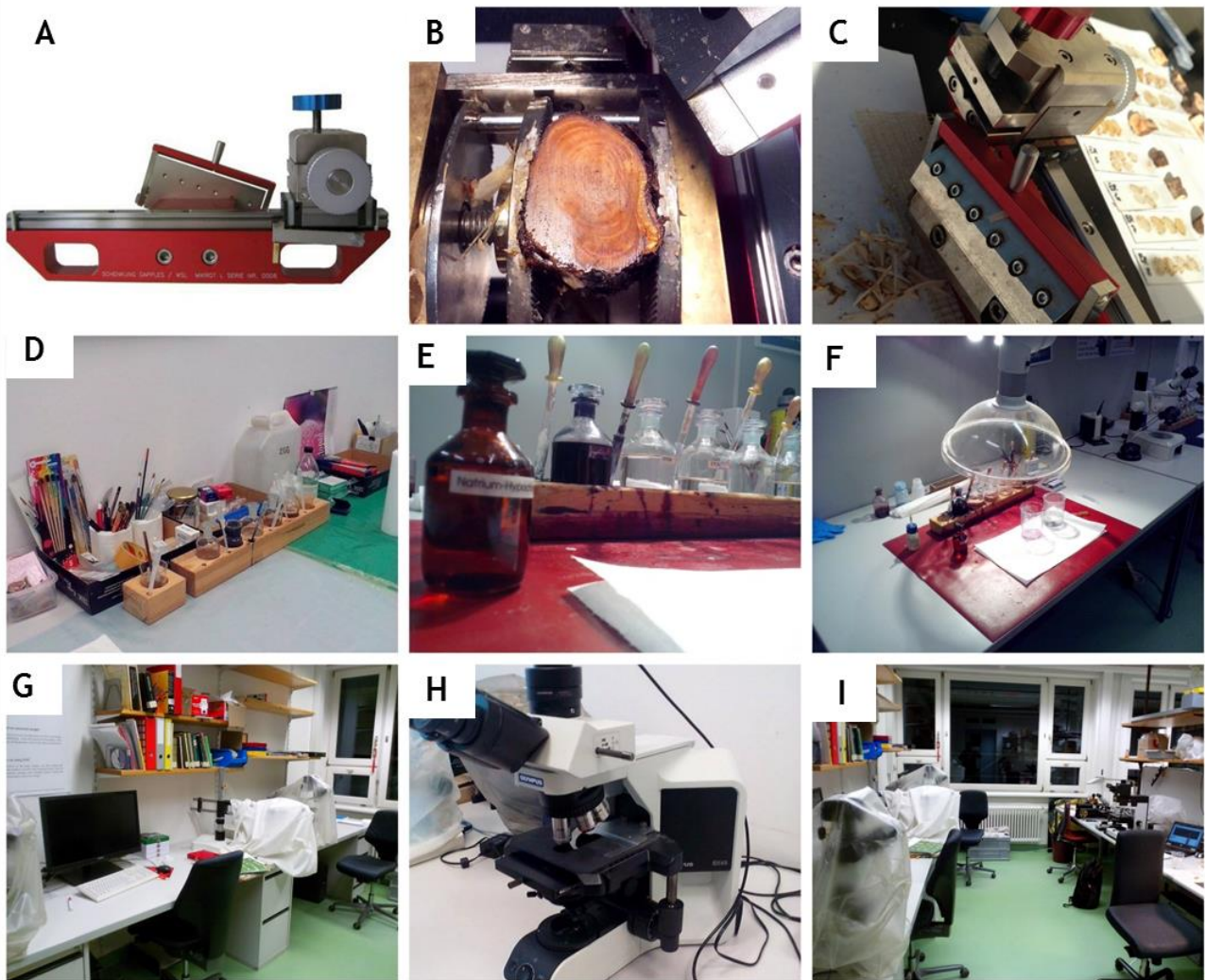
- części zasłoniętej tego samego systemu korzeniowego, tj. niepoddanej bezpośredniemu oddziaływaniu presji turystycznej, przyrastającej naturalnie w pokrywie glebowej w strefie pobocza lub poza szlakiem;
- pnia analizowanego drzewa;
- chronologii referencyjnej stanowiska Bachotek.

Tak rozbudowana analiza dendrochronologiczna miała na celu zwiększenie precyzji datowania wzorca przyrostowego korzeni odstłoniętych, poprzez rozpoznanie reakcji przyrostowej systemu korzeniowego sosny zwyczajnej na mechaniczne oddziaływanie ruchu turystycznego w profilu podłużnym, tj. w ujęciu przestrzennym.

Łącznie, w obrębie ośmiu systemów korzeniowych wybranych do badań uszczegółwiających, przeanalizowano 97 wyrzynków korzeni, pobranych wzdłuż profilu podłużnego głównego korzenia odstłoniętego w każdym systemie korzeniowym. Dla jednego systemu korzeniowego dokonano kompleksowych analiz zmian anatomicznych i przyrostowych wzdłuż profilu podłużnego dwóch korzeni, tj. jednego całkowicie zastłoniętego oraz drugiego z częścią odstłoniętą (szczegółowy opis wybranych systemów korzeniowych został zaprezentowany w Rozdziałach 11 i 12).

Wszystkie pobrane próby korzeni sosny zwyczajnej zostały poddane analizom laboratoryjnym (Ryc.8). Po wysuszeniu oraz wypolerowaniu powierzchni przekrojów poprzecznych pobranych fragmentów z korzenia, dokonywano ich wstępnej analizy oraz dokumentacji fotograficznej. Następnie przy użyciu mikrotomu saneczkowego GSL 1 oraz lab-microtome (Gärtner i in. 2014) dokonywano ścięcia próbek drewna, niezbędnych do wykonania preparatów mikroskopowych (Ryc. 8A, 8C). Przygotowania preparatów dokonano z całego przekroju poprzecznego korzenia, tj. pobrany dysk dzielono na mniejsze bloki mieszające się w mikrotomie (Ryc. 8B). Z całej powierzchni kawatka bloku przekroju poprzecznego korzenia uzyskiwano ścięcie o grubości ok. 15-20 μm . W celu uwydatnienia struktury drewna, próbkę barwiono mieszanką safraniny i barwnika Astra Blue, przemywano etanolem, a następnie zatapiano w balsamie kanadyjskim i pozostawiano do zastygnięcia w suszarce (60°C) na min. 24 godziny (Ryc.8D, 8E, 8F). Pełna procedura przygotowania preparatów mikroskopowych została zaadoptowana przez autora za F. Schweingruber'em (1991) oraz H. Gärtner'em i F. Schweingruber'em (2013). Przeźrocza mikroskopowe korzeni zostały wykonane w 1) Laboratorium Dendrochronologicznym na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, 2) Laboratorium Zakładu Geomorfologii Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie, oraz 3) *Wood Anatomy Lab* w Swiss Federal Research Institute WSL w Birmensdorf w Szwajcarii.

Dla wszystkich przeźroczy mikroskopowych wykonano zdjęcia cyfrowe w wysokiej rozdzielczości przy pomocy aparatu Color-View III Olympus stowarzyszonego z mikroskopem Olympus BX43 (Ryc. 8H). Pojedyncze zdjęcia wykonano przy powiększeniu od 40x do 100x. Zdjęcia z bloków przekrojów poprzecznych korzenia zostały złożone w oprogramowaniu Adobe Photoshop (Adobe Systems Incorporated) używając funkcji Photomerge. Na powstałych po łączeniu obrazach prezentujących pełne przekroje poprzeczne korzeni wykonano pomiary szerokości przyrostów rocznych oraz pomiarów wielkości komórek drewna wczesnego korzeni sosny zwyczajnej. Pomiarów dokonano przy użyciu programu WinCELL Pro 2009 (Regent Instruments, Canada) oraz ImageJ Fiji (Schindelin i in. 2012).

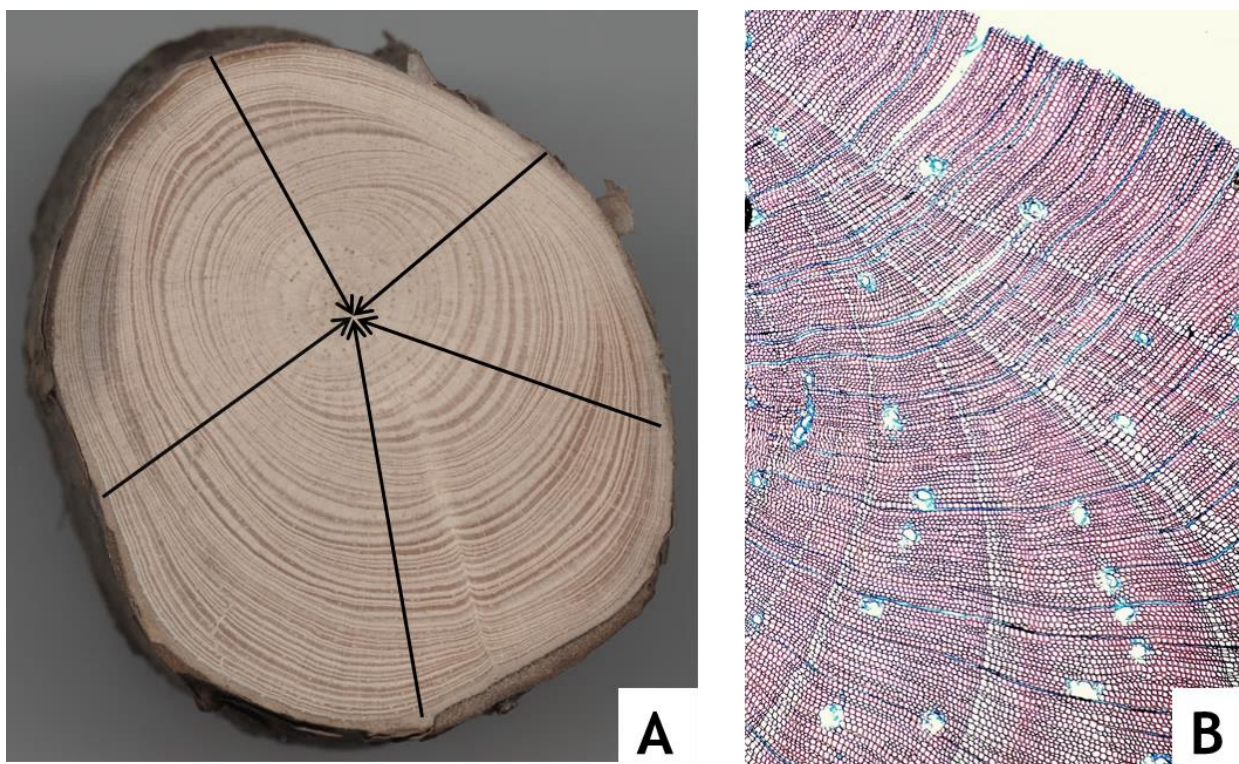


Ryc. 8. Etapy prac laboratoryjnych w celu przygotowania przezroczcy mikroskopowych korzeni sosny zwyczajnej wykonane w trzech laboratoriach dendrochronologicznych (patrz tekst).
Etapy: ścinanie (A-C), barwienie (D-F), wykonywanie zdjęć (G-I)

W obrębie każdego przekroju poprzecznego korzenia dokonano pomiarów szerokości przyrostów rocznych w trzech do pięciu promieniach (Ryc.9A), celem wykrycia przyrostów wyklinowujących i brakujących (Ryc.9B). W trakcie mierzenia szerokości przyrostów rocznych uwzględniano najkrótszy i najdłuższy promień oraz promienie pośrednie. W wyborze przebiegu promieni unikano blizn oraz nagromadzeń traumatycznych kanałów żywicznych. W obrębie każdego promienia badana była liczba, szerokość i koncentryczność przyrostów radialnych.

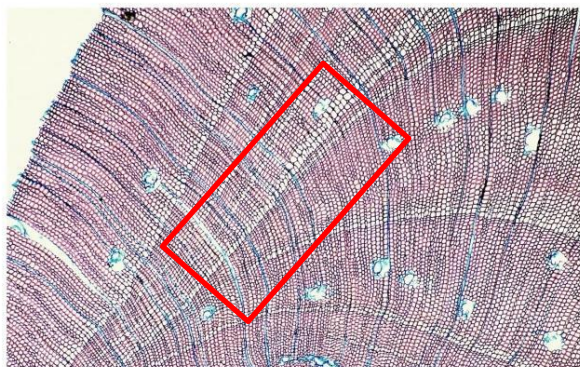
W zakresie metody dendrochronologicznej opartej na analizie struktury anatomicznej korzeni drzew sosny zwyczajnej w pracy określono:

- rok odstąpienia korzenia wraz ze wskazaniem momentu odstąpienia korzenia względem fazy okresu wegetacji;
- rodzaj procesu powodującego odstąpienie; w określeniu charakteru odstąpienia korzenia przyjęto terminy: nagłe-erozyjne, powolne- denudacyjne, wzrost wtórny, które powszechnie funkcjonują w literaturze dendrogeomorfologicznej (Gärtner 2007),
- zmiany przyrostowe drewna, tj. udział przyrostów brakujących i przyrostów wyklinowujących, wraz z identyfikacją ew. przyrostów fałszywych (Ryc. 10);
- wiek blizn oraz traumatycznych kanałów żywicznych (Ryc. 10);
- zmiany anatomiczne stowarzyszone z odstąpieniem korzenia, tj. pomiary wielkości komórek drewna wczesnego (Ryc.10);
- pozostałe zmian anatomicznych drewna, takie jak udział drewna reakcyjnego, udział drewna późnego czy zmiany gęstości drewna (Ryc. 10).

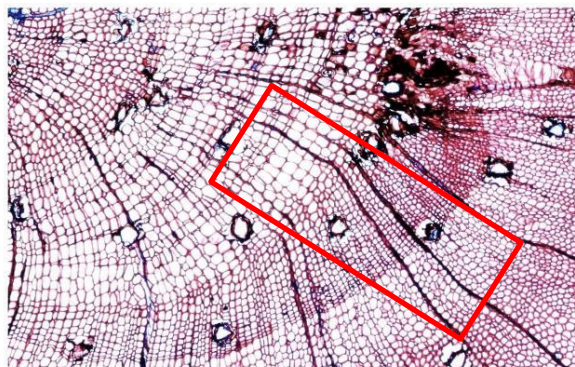


Ryc. 9. Przekrój poprzeczny korzenia sosny zwyczajnej z zaznaczonym przebiegiem pięciu promieni (A) wzdłuż których dokonano pomiarów liczby i szerokości przyrostów rocznych w korzeniu; wykrycie strefy przyrostów wyklinowujących w korzeniu (B).

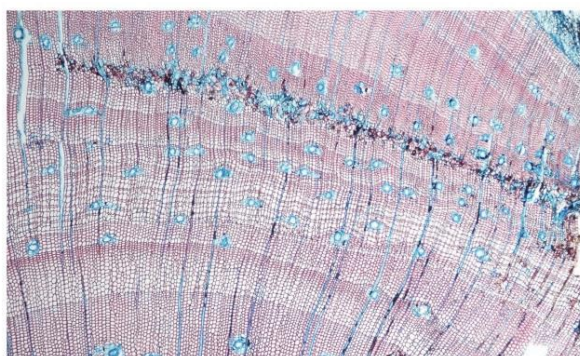
W celu ustalenia roku odstąpienia w każdym przekroju poprzecznym odstąpiętego na szlaku korzenia zmierzono 1) szerokości przyrostów rocznych; 2) wielkość komórek drewna wczesnego- biorąc pod uwagę średnio min. po 30 komórek drewna wczesnego z pierwszego bądź pierwszych czterech rzędów w zależności od szerokości przyrostu wzdłuż promienia, w którym rozpoznano pełną serię przyrostów bądź z najmniejszą liczbą przyrostów brakujących; 3) udział komórek drewna późnego w przyroście rocznym (Gartner 2003) (Ryc.10).



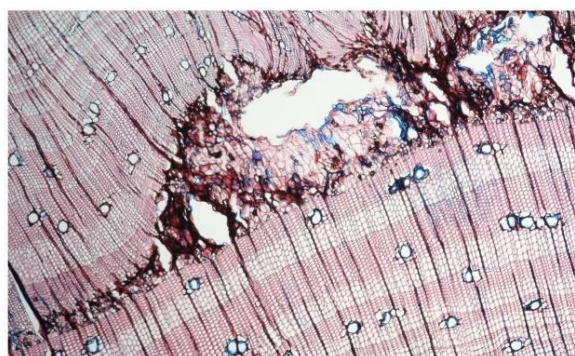
pryrosty wyklinowujące



zmiany wielkości komórek drewna wczesnego



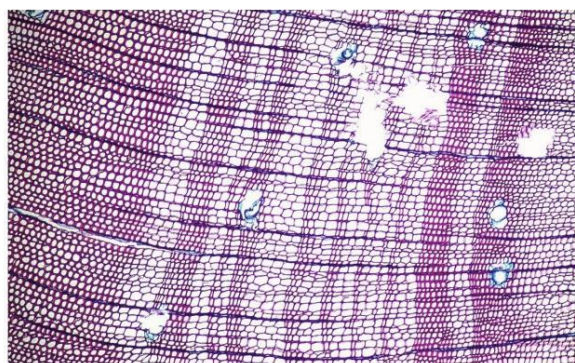
traumatyczne kanały żywiczne



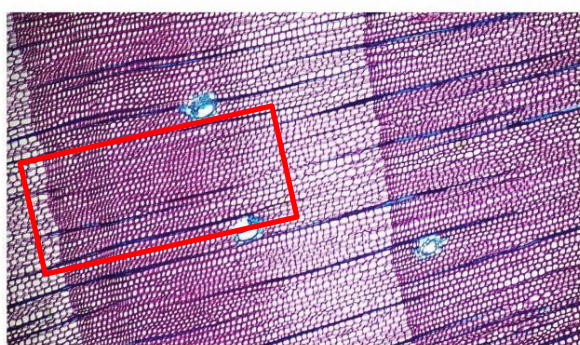
blizna



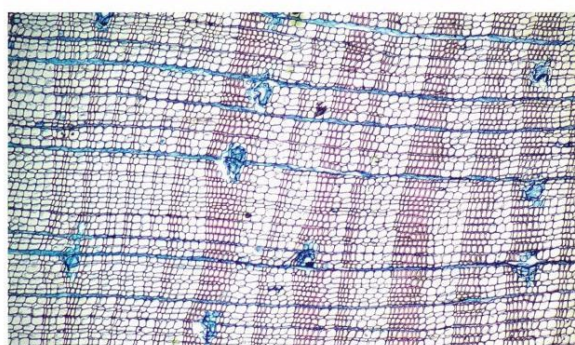
zmienny udział drewna późnego



charakter odstonięcia



występowanie drewna reakcyjnego



szerokość przyrostów rocznych przed odstonięciem

Ryc. 10. Badane elementy struktury przyrostowej i anatomicznej korzeni sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) pobranych ze stanowiska badawczego z Pojezierza Brodnickiego

Łącznie dla pobranych 185 wyrzynków korzeni (pojedynczych korzeni odstoniętych i systemów korzeniowych) odstoniętych i zastoniętych wykonano i poddano analizie 487 przeźroczy mikroskopowych. Pomiarów szerokości przyrostów rocznych wykonano łącznie w 752 promieniach. Każdy element drzewa pobrany w terenie i poddany preparatyce w laboratorium stanowił przedmiot analizy dendrochronologicznej i dalszego wnioskowania.

6.2.3. Analiza tempa denudacji antropogenicznej na podstawie odstonień korzeni

Zastosowanie analizy dendrochronologicznej umożliwiło wykazanie średniego tempa ubytku materiału na analizowanym szlaku, które z uwagi na założenie, że dominującą grupę procesów je modelujących stanowią powolne procesy denudacyjne modyfikowane przez ruch turystyczny, przyjęto określać, jako tempo denudacji antropogenicznej (DrA).

Ze względu na bardzo szczegółowy charakter badań i indywidualność analizowanego szlaku turystycznego poddano weryfikacji trzy używane wskaźniki obliczenia tempa ubytku materiału wykorzystujące odstonienia korzeni. Celem tego postępowania było sprawdzenie i wybór odpowiedniej metody, która najpełniej i w czytelny sposób opisywałaby wielkość tempa denudacji antropogenicznej na stanowisku Bachotek. Podkreślając przy tym indywidualności strefy korzeni odstoniętych ze szlaku turystycznego, które charakteryzowały się 1) względnym podniesieniem się osi korzeni, 2) stałym podparciem z powierzchnią gleby, 3) brakiem układu kaskadowego tworzonego przez korzenie na powierzchni szlaku oraz 4) występowaniem strefy zastoniętej poprzedzającej odstonienie, pomiędzy szlakiem turystycznym a pnem drzewa. Szczegółowy opis wyboru metody kalkulacji tempa denudacji antropogenicznej (DrA) zaprezentowano w podrozdziale 15.1.

Określenie tempa denudacji antropogenicznej (DrA) pozwala na obliczanie wielkości ubytku materiału punktowo, poniżej korzenia i wyraża średnie tempo denudacji na szlaku. Uzyskiwana wartość jest wartością szacunkową i zakłada stałą prędkość przebiegu procesów denudacyjnych. Założenie to jest bardzo dużym uproszczeniem, a jednocześnie zaprzecza z natury nieliniowemu przebiegowi procesów przyrodniczych, tym bardziej procesów inicjowanych lub przyspieszanych w wyniku działania ruchu turystycznego. Średnia wartość denudacji pozwala jednak na porównanie tempa denudacji między poszczególnymi stanowiskami, jak również umożliwia wykazanie związku ze zmiennymi wpływającymi na jego wielkość, takich jak wartości nachylenia danego odcinka szlaku, stopień kompaktacji gleby czy zawartości materii organicznej w pokrywie glebowej.

6.3. Analiza właściwości fizycznych pokrywy glebowej szlaku turystycznego

W celu prześledzenia wpływu czynników środowiskowych na korzenie sosny zwyczajnej oraz rzeźbę terenu szlaku turystycznego, wytypowano szereg zmiennych, które mogą warunkować tempo denudacji antropogenicznej (DrA) na badanym szlaku turystycznym. Z uwagi na dendrogeomorfologiczny charakter badań, szczególną uwagę poświęcono czynnikom związanym z przypowierzchniową warstwą gleby oraz kondycją i zdrowotnością korzeni. W tym zakresie rozpoznano wpływ wybranych cech fizycznych gleby na uzyskiwane tempo denudacji antropogenicznej (DrA), poprzez prześledzenie rozkładu ich wartości w obrębie lub w punkcie poboru części odstoniętych korzeni.

Badania glebowe przeprowadzono w okresie letnim 2013-2016 w obrębie szlaku turystycznego. Na podstawie pobranego materiału glebowego wykonano następujące oznaczenia:

- składu mechanicznego, badanego metodą sitową według Normy PTG 2008,
- zawartości substancji organicznej metodą strat prażenia, w tym celu z powierzchni szlaku pobrano materiał wraz z zawartą w nim próchnicą lub nierozłożonymi cząstkami organicznymi. Próbkę po wysuszeniu w laboratorium w temperaturze 105°C, były prażone w piecu muflowym w temperaturze 550°C przez 3,5 godz. w celu usunięcia materii organicznej,
- wilgotności gleby, w tym celu pobrano do szczelnych woreczków próbki naturalnie wilgotne z dwóch miejsc przy danym korzeniu odstąpionym w obrębie szlaku turystycznego tj. dla 42 korzeni odstąpionych. Próbkę analizowano metodą suszarkowo-wagową (Zawadzki 2006),
- stopień zwięzłości gleby (kompakcji) za pomocą ręcznego penetrometru glebowego, przyjmując za miarę średnią wartość z 2 pomiarów dla każdego poziomu powierzchniowego po obu stronach pobranej części korzenia odstąpionego, tj. dla 76 prób korzeni z powierzchni szlaku turystycznego,
- gęstość objętościową, wykorzystując metodę cylinderkową (Bouwer 1986).

Opisy wykonywanych analiz uzupełniono wstępnym rozpoznaniem litologicznym. Wykonano osiem profili glebowych w obrębie szlaku turystycznego. Z wybranych poziomów diagnostycznych badanych gleb przy odstąpieniach korzeni pobrano próbki do standardowych analiz gleboznawczych. Pobrano również próbki cylinderkowe (o pojemności 100 cm³), w kilku powtórzeniach dla każdego poziomu powierzchniowego tj. do oznaczenia właściwości powietrzno-wodnych (porowatość, gęstość objętościowa). Do analiz wybrano standardowe parametry badające procesy fizycznej, chemicznej i biologicznej degradacji gleb, opisywane w literaturze przedmiotu (Róg 1985; Maciaszek, Zwydak 1992b; Prędko 2002; Dębicki i in. 2015).

Analizę zależności pomiędzy wybraną zmienną opisującą a tempem denudacji na szlaku (tj. zmienną opisywaną) przeprowadzono z wykorzystaniem prostej regresji liniowej. W pierwszym etapie analiz wykonano testy diagnostyczne służące do weryfikacji poprawności założeń modelu regresji. Sprawdzone normalność rozkładu każdej ze zmiennych przy użyciu histogramu. Dla danych, które nie wykazały rozkładu normalnego przeprowadzono transformację logarytmiczną w celu zniwelowania skośności rozkładu. Dodatkowo, zależności pomiędzy tempem denudacji a wybraną zmienną opisującą rozpoznano przy wykorzystaniu korelacji Pearson'a i Spearman'a. Wszystkie analizy wykonano w środowisku R przy wykorzystaniu pakietów 'PerformanceAnalytics' (Peterson i in. 2015) i 'corrplot' (Wei i in. 2017).

6.4. Monitoring ruchu turystycznego

Turystyka na obszarze Pojezierza Brodnickiego jest jednym z czynników antropogenicznych, które znacząco oddziałuje na podłoże i szatę roślinną wzdłuż szlaków i ścieżek turystycznych na terenach leśnych. Określenie liczby turystów ma zasadnicze znaczenie w zarządzaniu turystyką i ochroną przyrody na obszarach atrakcyjnych przyrodniczo, a także w kwestii identyfikacji zmian jakościowych i ilościowych w komponentach środowiska przyrodniczego pod wpływem presji turystycznej.



Ryc. 11. Sposób montażu i zabezpieczenia czujników pyroelektrycznych typu Eco-Twin z logerem do automatycznego zliczania ruchu turystycznego na szlaku turystycznym na stanowisku Bachotek

Monitoringu ruchu turystycznego oraz pomiarów obciążenia turystycznego szlaku na stanowisku Bachotek dokonano przy użyciu czujników ruchu (Ryc.11C). W ramach monitoringu dokonano ciągłej rejestracji turystów na szlaku, z rozgraniczeniem na ruch wchodzący i wychodzący (Ryc.11H), zapisaną w interwale godzinowym przy pomocy logera (Ryc.11E, I). W tym celu wykorzystano czujniki pyroelektryczne (zwane migratorami bądź fotokomórkami) firmy EcoCounter. Urządzenia tego typu były wcześniej testowane w Babiogórskim i Tatrzańskim Parku Narodowym. Czujnik, działający na zasadzie fotokomórki, zamontowany został w drewnianym słupku (Ryc.11F,G), podtrzymującym balustradę, zlokalizowaną bezpośrednio przy szlaku turystycznym (Ryc.11D). Instalacja sprzętu odbyła się przy współpracy z Dyrekcją Brodnickiego Parku Krajobrazowego oraz Nadleśnictwa Brodnica.

Rejestrację ruchu turystycznego na szlaku przeprowadzono w trzech sezonach pomiarowych w 2014, 2015 i 2016 roku. Okresem pomiarowym był sezon ruchu turystycznego, tj. miesiące kwiecień-październik.

6.5. Metody inwentaryzacyjne

W ramach szczegółowego rozpoznania literatury naukowej bezpośrednio związanej z problematyką opracowania dokonano przeglądu dostępnych prac badawczych. W tej kwestii rozpoznano w ujęciu czasowym z podziałem na literaturę krajową oraz zagraniczną stan badań dotyczący czterech obszarów:

- wpływu turystyki na środowisko geograficzne,
- wpływu turystyki na szatę roślinną,
- zastosowania metody dendrochronologicznej w geomorfologii,
- zastosowania metody dendrochronologicznej do ilościowej analizy tempa ubytku materiału.

Przeglądu literatury dokonano w oparciu o zasoby internetowe oraz biblioteczne. Źródłem informacji były portale naukowe: ResearchGate, Academia.edu, Google Scholar, Web of Science, Polska Bibliografia Naukowa, Katalog Rozproszonych Bibliotek Polskich (KaRo) oraz Nukat (katalog centralny polskich bibliotek naukowych). Przy wyszukiwaniu artykułów w dostępnych zasobach wykorzystano słowa kluczowe, które nawiązywały do problemu, przedmiotu oraz metody badawczej.

6.6. Materiały archiwalne

W opracowaniu korzystano z wielu materiałów archiwalnych, takich jak:

1. Materiały kartograficzne:

- niemieckie mapy topograficzne Messtischblätter w skali 1:25 000 (2682 Pokrzydowo z 1911 i 1940 roku),
- mapy z Wojskowego Instytutu Geograficznego w skali 1:25 000 (P35-S29-G Brodnica z 1938 roku),
- Army Map Service w skali 1:25 000 (AMS_M851 Pokrzydowo 2682 z 1953 roku),
- Karte des Deutschen Reiches w skali 1:100 000 (197 Kauernik/Kurzętnik z 1893 roku, 35-29 Brodnica z 1940 roku),
- mapy topograficzne w skali 1:50 000 (arkusz Brodnica N-34-99-B)

Archiwalne mapy topograficzne wykorzystane były do prezentacji zmian pokrycia leśnego i rozwoju sieci dróg i ścieżek od końca XIX wieku w okolicach jeziora Bachotek.

2. Cyfrowy model wysokości uzyskany na podstawie danych LiDAR z Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej. Na podstawie otrzymanej chmury punktów o gęstości 4pkt/m² wykonano model terenu (DEM) o rozdzielczości przestrzennej 1 m z wykorzystaniem metody interpolacji *Cell Assignment Methods*. Dane te w dalszym etapie posłużyły do wykonania map przedstawiających dokładną lokalizację oraz rzeźbę terenu w obrębie badanej strefy krawędziowej rynny jeziora Bachotek. Policzone zostały parametry dotyczące wysokości oraz nachyleń w analizowanym obszarze badań. Obliczenia wykonano w oprogramowaniu ArcGIS 10.3 w wykorzystaniem gotowych algorytmów do analiz przestrzennych (*Spatial Analyst Tools*).

3. Materiały dokumentacyjne:

- materiały dokumentacyjne Oddziału 2 Polskiego Towarzystwa Turystyczno-Krajoznawczego z Brodnicy,
- materiały dokumentacyjne Oddziału Miejskiego im. Mariana Sydowa Polskiego Towarzystwa Turystyczno-Krajoznawczego z Torunia,
- materiały dokumentacyjne Miejskiej i Powiatowej Biblioteki Publicznej w Brodnicy,
- materiały dokumentacyjne Brodnickiego Parku Krajobrazowego,
- materiały dokumentacyjne Nadleśnictwa Brodnica,
- materiały dokumentacyjne zebrane w trakcie inwentaryzacji przyrodniczej Brodnickiego Parku Krajobrazowego.

7. Słownik pojęć i terminów dendrochronologicznych

Dla jednoznacznego odbioru i odpowiedniego zrozumienia pracy zaprezentowano ważniejsze pojęcia i terminy dendrochronologiczne bezpośrednio dotyczące wykonanych analiz zmian w przyrostach radialnych i anatomii drewna pnia i korzeni sosny zwyczajnej.

- Blizny (ang. *scars*) uszkodzenia mechaniczne tkanki kambialnej powstałe w wyniku oddziaływania silnego bodźca środowiskowego (ognia, kry lodowej, lawiny śnieżnej, sptywów gruzowych, wydeptywania, wezbrań) (Guyette, Cutter 1991).
- Brakujący przyrost (ang. *missing ring*) przyrost roczny niewykształcony w obrębie przekroju poprzecznego próby korzenia lub pnia (Novak i in. 2011).
- Chronologia indeksowana (ang. *tree ring index chronology*) chronologia, która uwypukla wspólne cechy charakterystyczne dla przyrostów radialnych poszczególnych osobników danej populacji. Osłabia ona jednocześnie ich osobniczą zmienność, spowodowaną głównie przez czynniki niemeteorologiczne. Indeksacja eliminuje natomiast trendy i długookresowe fluktuacje chronologii, eksponując ich zmienność krótkookresową (roczną), powodowaną głównie przez czynnik meteorologiczny. (Zielski, Krąpiec 2004).
- Chronologia rezydualna (ang. *residual chronology*) wersja chronologii indeksowanej pozbawiona autokorelacji. Wykorzystywana w analizach zależności pomiędzy przyrostem radialnym drzew a warunkami klimatycznymi. Niweluje skutek składania wieloletniej średniej z próbek pochodzących z drzew w różnych stadiach rozwoju osobniczego (Zielski, Krąpiec 2004).
- Chronologia rzeczywista (ang. *tree ring width chronology, raw chronology*) chronologia, którą uzyskuje się w wyniku uśredniania sekwencji przyrostowych występujących w próbkach drewna pochodzących z drzew, które rosły w tym samym okresie. W praktyce jest to najczęściej sekwencja średnich arytmetycznych liczb uzyskanych z pomiarów szerokości przyrostów rocznych, obliczona dla skorelowanej grupy prób (Zielski, Krąpiec 2004).
- Datowanie pomostowe (ang. *cross-dating*) procedura pozwalająca na porównanie sekwencji przyrostowej zbioru badanych próbek. Analizy porównawczej można dokonać na pojedynczej próbce, pomiędzy próbkami korzenia oraz między serią przyrostów rocznych z krzywą wzrostu z pnia oraz chronologią stanowiska. Celem datowania pomostowego jest precyzyjne wydatowanie zachodzących w czasie procesów zewnętrznych odpowiedzialnych za odstąpienia korzeni i postępującą reakcję anatomiczną w pniach drzew (Wigley i in. 1987).
- Dekoncentryczny przyrost roczny (ang. *eccentric growth of tree*) przyrost roczny, który z jednej strony przekroju poprzecznego pnia bądź korzenia jest węższy, a z drugiej szerszy (Malik 2008).
- Drewno późne (ang. *latewood*) drewno kształtowane przez drzewo w późnym okresie wegetacyjnym. Charakteryzuje się małymi grubościennymi cewkami w sośnie zwyczajnej (Denne 1988; Kokociński 2002).

- Drewno reakcyjne (ang. *reaction wood*) anomalia ksylemu pojawiająca się w strukturze drewna w wyniku oddziaływania siły grawitacji. Grawitacja wpływa na rozwój pni i korzeni przez hormonalny system regulacji oraz w wyniku napreżeń mechanicznych. Dla sosny zwyczajnie występuje drewno kompresyjne. Tworzy się po stronie dolnej w wygiętych pniach i gałęziach. Przyrosty roczne, w obrębie, których występuje drewno kompresyjne, mają osobliwe ciemniejsze zabarwienie i charakteryzuje się grubościennymi, gęsto osadzonymi cewkami o kolistym kształcie (Timell 1986).
- Drewno wczesne (ang. *earlywood*) drewno kształtowane przez drzewo we wczesnej fazie okresu wegetacyjnego. Charakteryzuje się szerokim światłem komórkowym, dużymi cienkościennymi cewkami o znacznej średnicy (Kokociński 2002).
- EPS (ang. *expressed population signal*) wartość EPS, mówi o tym, jak ograniczona liczba prób w chronologii ma się do teoretycznej chronologii reprezentującej populację o nieskończonej liczbie drzew. Wartość EPS większa niż 0,85 wskazuje na to, że chronologia złożona z wytypowanych prób może być wykorzystana do badań dendroklimatologicznych, gdyż reprezentuje jednorodny sygnał (Wigley i in. 1984; McCarroll, Loader 2004; Koprowski i in. 2011).
- Fałszywy przyrost (ang. *false ring*) dodatkowy przyrost z wyraźnie zaznaczoną granicą, występujący w obrębie danego przyrostu rocznego (Fritts 1976).
- Kanaly żywiczne (ang. *resin ducts*) kanały wypełnione żywicą, występujące w drewnie sosny zwyczajnej. Działanie silnego czynnika mechanicznego powoduje powstanie zmian anatomicznych w drewnie w tym zagęszczenie kanałów żywicznych w przyroście rocznym i formowanie się w ksylemie traumatycznych kanałów żywicznych (*traumatic resin ducts*) (Werker, Fahn 1969).
- Procentowy współczynnik zgodności Hubera (niem. *gleichläufigkeit*, ang. *percentige consistent coefficient*) obliczany w wyniku pomiaru, rok po roku, zgodności pomiędzy przebiegiem krzywych przyrostów rocznych (Buras, Wilmking 2014).
- Rok wskaźnikowy (ang. *pointer year*) za „wskaźnikowy” przyjmuje się rok, w którym większość drzew wytworzyła słoje o pewnych charakterystycznych cechach budowy. Mogą to być słoje wybitnie wąskie lub szerokie, słoje o odmiennym zabarwieniu, gęstości, o małym lub dużym udziale drewna późnego, albo inaczej niż zwykle zaznaczonej granicy między słojami (Kaennel, Schweingruber 1995; Schweingruber i in. 1990).
- Wtórny wzrost (przyrost) (ang. *secondary growth*) przyrost pnia i korzeni drzew na grubość. Zachodzi w wyniku podziałów komórek merystemów bocznych: kambium (miazgi) i fellogenu (miazgi korkotwórczej) (Kokociński 2002; Hejnowicz 2012).
- Wyklinowujący przyrost (ang. *wedging ring*) pierścień roczny drewna, który w wyniku zmian aktywności kambialnej wykształcony został jedynie w konkretnej części przekroju poprzecznego pnia lub korzenia drzewa (Worbes 1995).

8. Obszar badań. Pojezierze Brodnickie

Pojezierze Brodnickie, jako obszar bardzo atrakcyjny przyrodniczo, było i jest przedmiotem zainteresowania wielu dyscyplin nauki, takich m.in. jak: geografia, biologia, archeologia i historia. Za sprawą prowadzonych badań głównie przez naukowców z Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, stało się możliwe utworzenie Brodnickiego Parku Krajobrazowego i ochrona jego osobliwości przyrodniczych.

Badania przyrodnicze w strefie jezior brodnickich prowadzone są już od ponad 100 lat, początkowo przez botaników niemieckich (Hielscher 1879; Klinggraeff 1880, za: Zielski 1978), a w latach międzywojennych przez miejscowych przyrodników oraz profesorów: A. Wodzickę (1929) oraz Z. Czubińskiego (1937, 1938, 1948) z Uniwersytetu Poznańskiego. Pionierskie badania geomorfologiczne na tym obszarze prowadził profesor R. Galon (1931, 1972), a kontynuował je i rozwinął profesor W. Niewiarowski (1968, 1973, 1986, 1989, 1995). Jako pierwszy genezą jezior, w tym jeziora Bachotek na obszarze Pojezierza Brodnickiego zajmował się Z. Churski (1973, 1988). W kwestii batymetrii i danych ilościowych, duże znaczenie miały prace prowadzone przez Instytut Rybactwa Śródlądowego w Olsztynie.

Współcześnie Pojezierze Brodnickie stało się terenowym laboratorium badawczym dla naukowców z Uniwersytetu Toruńskiego. Badano florę (Kępczyński 1973; Kępczyński, Zielski 1974) oraz zbiorowiska roślinne lasów (Ceynowa-Giedon 1971; Kępczyński, Zielski 1974; Zielski 1978). Prowadzono studia dendrochronologiczne (Zielski 1993, 1996, 1997, Zielski i in. 1998), hydrobiologiczne (Churski 1983), a także palinologiczne (Noryśkiewicz 1987a,b, 2012). Podejmowano problem zagłębień bezodpływowych (Karasiiewicz i in. 2011; Karasiiewicz i in. 2013), gleb (Bednarek i in. 2007; Świtoniak 2007; Jankowski 2014), morfogenezy rzeźby terenu (Niewiarowski, Wysota 1986) oraz denudacji antropogenicznej (Świtoniak 2011; Świtoniak i in. 2014). Badano wody podziemne (Krawiec 2007) oraz hydrografię (Letkewicz, Zakrzewski 2007). Oceniano teren pod kątem jego atrakcyjności turystycznej (Czuba 1969; Iwicki 1976; Owsiak, Piskorski 1990; Brudnicki 2007), a zarazem analizowano wpływ turystyki na lasy (Zielski 1978; Dysarz 1993; Zielski i in. 1998). W kwestii geografii społeczno-ekonomicznej realizowano badania przestrzenno-strukturalne (Matczak, Szymańska 1997) oraz demograficzne (Grzelak-Kostulska, Hołowiecka 2007).

Do badań nad przyrodą dołączają prace archeologiczne (Grążawski, Ziomko 2014), mające na celu rozpoznanie i zbadanie walorów kulturowych Pojezierza. Warto także wspomnieć o roli, jaką w popularyzacji Pojezierza Brodnickiego odegrali autorzy licznych przewodników: Janusz Krippendorf, Józef Kołodziejczyk, Henryk Szram, Stefan Bilski, Janusz Umiński, Jan Mełnicki oraz Czesław Woźny. Pojezierze Brodnickie swoją popularność zawdzięcza również działaczom, towarzystwom oraz organizacjom związanych z turystyką i ochroną przyrody.

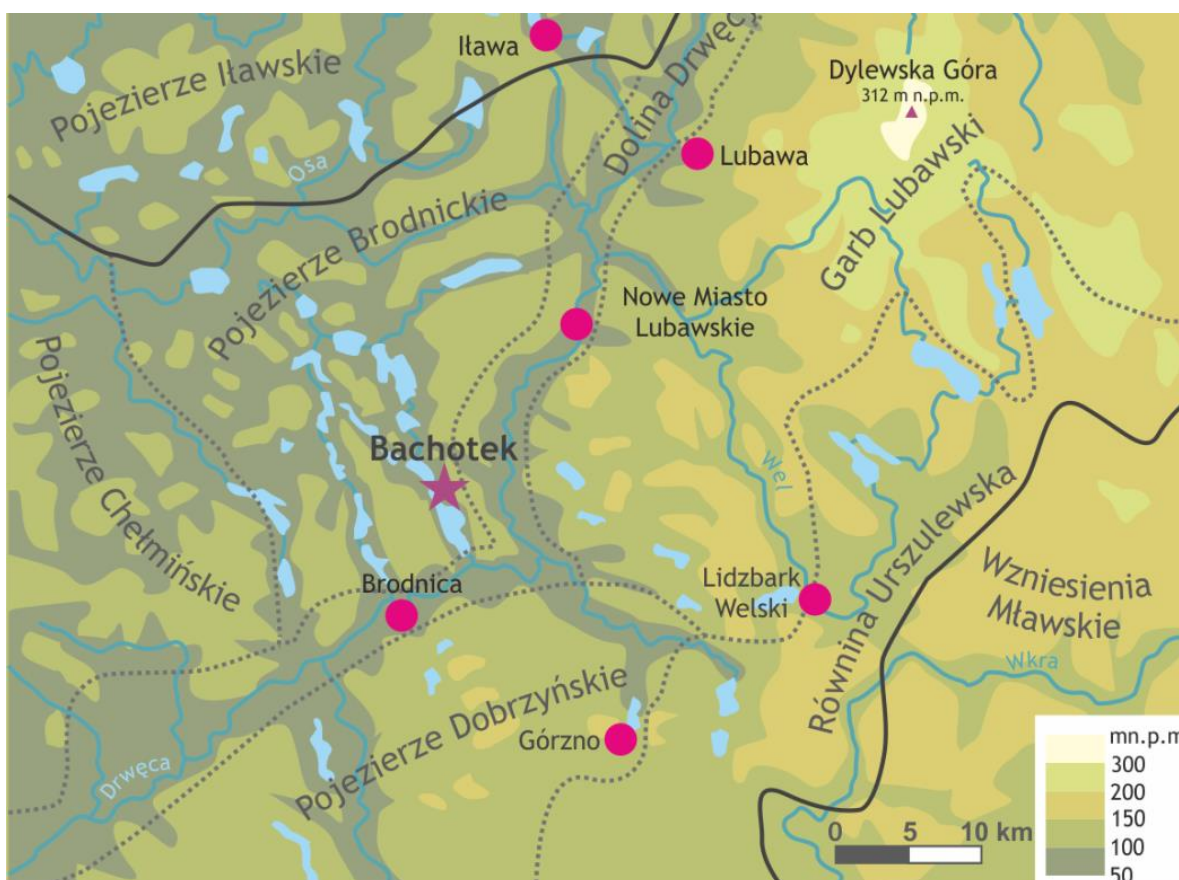
Zaprezentowane niniejsze opracowanie dendrochronologiczne stanowi dodatkowy element poznawczy i uzupełniający w literaturze naukowej dotyczącej środowiska przyrodniczego Pojezierza Brodnickiego. Ze względu na dendrogeomorfologiczny charakter pracy dokonano szczegółowej charakterystyki opisu rzeźby terenu oraz szaty roślinnej na obszarze Pojezierza Brodnickiego z wyróżnieniem opisu stanowiska Bachotek.

8.1. Położenie fizyczno-geograficzne

Pojezierze Brodnickie znajduje się w północno-środkowej Polsce w dorzeczu rzeki Drwęcy. Według podziału Polski na jednostki fizycznogeograficzne (Kondracki 2000) obszar badań znajduje się w zasięgu megaregionu Pozaalpejska Europa Środkowa (3) w prowincji: Niż Środkowoeuropejski (31), Podprowincji: Pojezierza Południowobałtyckie (314-316) w makroregionie Pojezierze Chetmińsko-Dobrzyńskie (315.1). W zasięgu tego makroregionu zlokalizowany jest mezoregion Pojezierze Brodnickie (315.12).

Pojezierze Brodnickie znajduje się w obrębie jednego z trzech głównych równoleżnikowych pasów obszaru młodoglacjalnego, a mianowicie wysoczyzn jeziornych, które rozciągają się od granicy ostatniego zlodowacenia na południu do garbu pojeziernego na północy (Gilewska 1999). Granice Pojezierza Brodnickiego stanowią: Dolina Drwęcy na południu i wschodzie, Rynna Jabłonowska na zachodzie, a rzeki Osa i Gać na północy (Ryc.12).

Obszar badań to przeważnie równina sandrowa z licznymi jeziorami rynnowymi, zgrupowanymi w cztery łańcuchy. Sandr brodnicki połączony jest z sandrem iławski od północy, oddzielając wysoką kępę moreny dennej. Pojezierze Brodnickie ma 630 km² powierzchni i wznosi się od około 100 m n.p.m. w części zachodniej do około 120 m n.p.m. w części wschodniej, osiągając maksymalnie 164 m n.p.m. (okolice Marzęcic). Dzięki lesistości, urozmaiconej rzeźbie terenu (deniwelacje do 45 m) oraz malowniczym jeziorom i rzekom jest bardzo atrakcyjne pod względem wizualno-krajobrazowym i turystycznym, czego przejawem jest utworzenie w 1985 roku Brodnickiego Parku Krajobrazowego i licznych rezerwatów przyrody (Matulewski 2014b).



Ryc. 12. Lokalizacja Pojezierza Brodnickiego ze stanowiskiem badawczym Bachotek na tle podziału fizycznogeograficznego wg Kondrackiego (2000) i opisem sąsiednich mezoregionów. Granica makroregionu- czarna linia ciągła; granica mezoregionu- szara linia przerywana

8.2. Budowa geologiczna

Pojezierze Brodnickie leży pomiędzy dwoma dużymi stopniami, którymi platforma prekambryjska opada w kierunku SW, gdzie występują struktury fałdowe z różnych okresów (Galon i in. 1979). Starsze osady Pojezierza Brodnickiego zostały zaburzone w czasie fałdowań alpejskich, kiedy powstawał wał kujawsko-pomorski. Wydźwignięciu wału towarzyszyło powstanie nieckowatych zagłębień. Na obszarze takiego zagłębienia, zw. niecką brzezną lub synklinorium brzeżnym, położone jest Pojezierze Brodnickie (Iwicki, Zielski 1990). Jest to długie zagłębienie o osi ukierunkowanej z NW na SE wypełnione utworami kredowymi. Powierzchnie podczwartorzędową tworzą mioceńskie piaski kwarcowe z przewarstwieniami mułków, ilów i węgla brunatnego (Karasiewicz, Juśkiewicz 2012). Młodsze osady plioceńskie zachowały się jedynie w niewielkich płatach a ich charakterystyczne ily, znajdują się w dolinie Drwęcy. Rzeźba podczwartorzędowa charakteryzuje się znacznym zróżnicowaniem, co spowodowało, że miąższość osadów czwartorzędowych, powstałych głównie w wyniku działalności lądolodu skandynawskiego, na obszarze Pojezierza Brodnickiego waha się od 20 do 190 m (Lichwa, Wetniak 2003).

8.3. Rzeźba terenu

Rzeźba Pojezierza Brodnickiego kształtowana była w czasie zlodowacenia Wisły, szczególnie w czasie recesji lądolodu subfazy kujawskiej oraz postojów lądolodu subfazy krajeńsko - wąbrzeskiej (Niewiarowski 1983). W trakcie subfazy kujawskiej obszar Pojezierza Brodnickiego pokrywała warstwa lodu, pod którym tworzyły się rynny subglacjalne o genezie glacyjofluwialnej, wypełnione obecnie jeziorami, takie jak: rynna Lutryny, rynna Strugi Brodnickiej, rynna Skarlanki z jeziorem Bachotek oraz liczne mniejsze skierowane w różnych kierunkach. W czasie wytapiania się lodu powstały również kemy i ozy występujące w okolicy Pokrzydowa na wschód od jeziora Bachotek (Burak i in. 2016). Kolejny okres modyfikacji rzeźby Pojezierza Brodnickiego nastąpił w czasie subfazy krajeńsko-wąbrzeskiej. Postoje lądolodu zaznaczyły się ciągami moren czołowych powstałych wzdłuż krawędzi rozdzielonych strefami wysoczyznowymi z formami po stagnującym lodzie (Niewiarowski, Wysota 1986). Powstały też dalsze rynny subglacjalne oraz wytopiska.

W krajobrazie Pojezierza charakterystyczne są ciągi moren czołowych stanowiące przedłużenie pasm wzgórz występujących na Wysoczyźnie Chełmińskiej. Południowy ciąg wzniesień, odpowiadający morenom południowowąbrzeskim, przebiega na linii Wichulec-Zbiczno-Czyste Błota. Na zapleczu moren utworzył się zespół kemów z wyraźnie zaznaczający się ozem w okolicy Tomków, szereg drobnych rynien oraz oczek wytopiskowych w okolicach Gaj-Grzmięcy. Drugi ciąg moren czołowych o charakterze akumulacyjnym przebiega na linii Konojady- jezioro Głowińskie- jezioro Łąkorz- Wawrowice i odpowiada morenom południowowąbrzeskim na Wysoczyźnie Chełmińskiej. Z postojem lądolodu związane jest powstanie sandru zachodnio-brodnickiego, który w północnej części Pojezierza tworzą połączone ze sobą stożki utworów piaszczysto-żwirowych łączące się w części proksymalnej. Dalej na południe odpływy wód sandrowych odbywały się wzdłuż rynien, gdzie sphywały do Drwęcy (Galon 1931), która w tym czasie stanowiła przedłużenie pradoliny Noteci-Warty (Niewiarowski 1986).

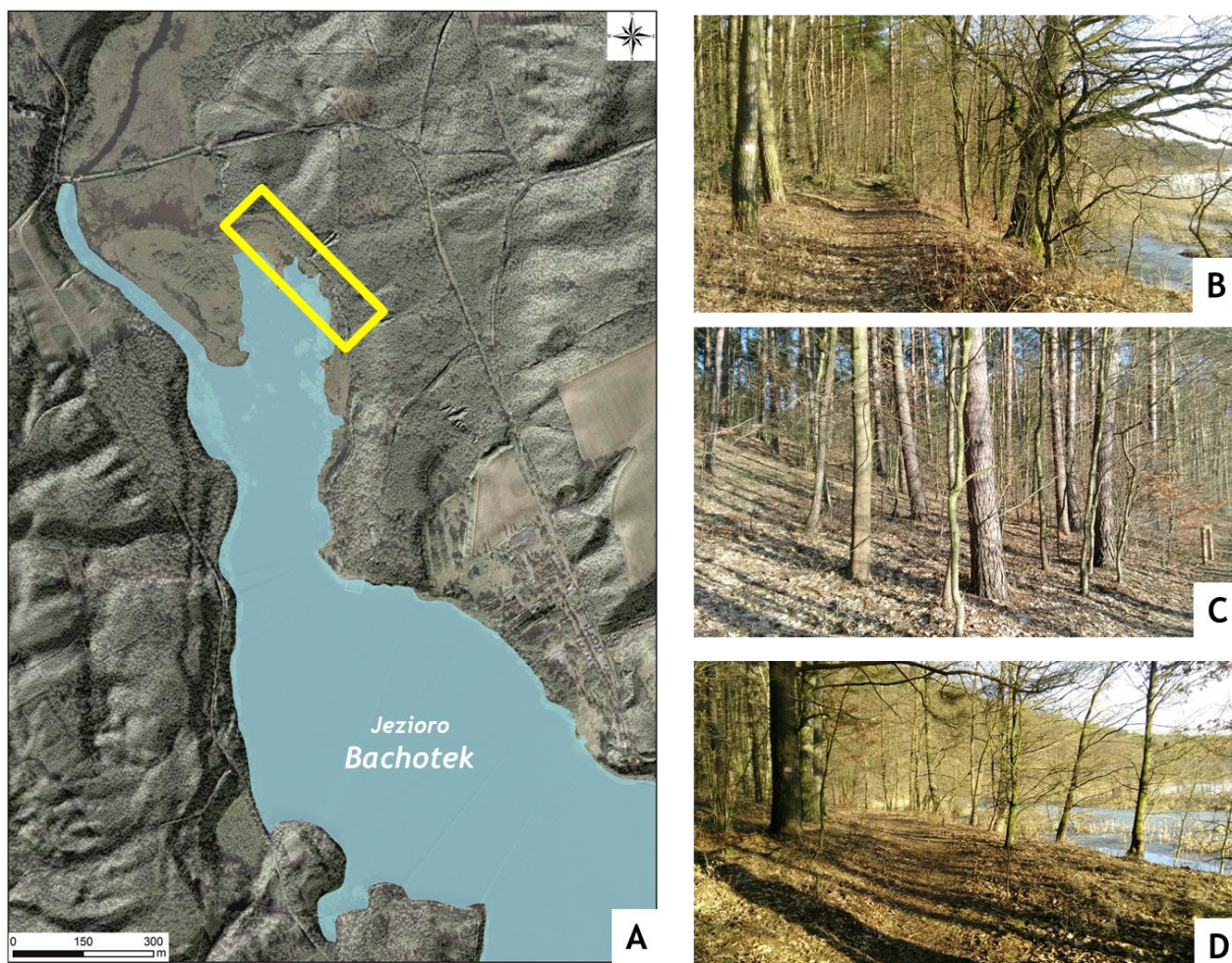
Z ostatnim na Pojezierzu Brodnickim postojem krawędzi lodowej związana jest geneza sandru wschodniobrodnickiego oraz moren czołowych okolic jeziora Płowęż, Rywałdzika oraz Lipinek. Wyptyw wód roztopowych kształtujących sandr znajdował się w miejscu dzisiejszych jezior Trupel i Karaś.

W czasie fazy pomorskiej oraz chłodnych okresów późnego glacjału panowały warunki peryglacjalne, które potęgowały proces denudacji. Następowo tworzenie się licznych dolin denudacyjnych i rozcinanie stoków wysoczyzny (Niewiarowski 1995). Z kolei proces wytapiania się płytko pogrzebanych brył martwego lodu został zainicjowany w cieplejszej części najstarszego dryasu. Powstały w tym czasie jeziora starszej generacji, których śladem są współczesne najwyższe terasy jeziorne (Niewiarowski 1989, 1999). Intensywne wytapianie się pogrzebanego lodu zachodziło w böllingu i allerödzie. Proces ten przyczynił się do powstania licznych jezior młodszej generacji, z których część funkcjonuje do chwili obecnej (Niewiarowski 1987, 1995).

Sandr brodnicki w obrębie, którego występuje znaczna liczba rynien oraz zagłębień wytopiskowych określany jest mianem tzw. „dziurawego sandru” (Niewiarowski 1983). Podobnie urozmaicone są obszary wysoczyzny morenowej, utworzonej z różnorodnego, przeważnie gliniastego materiału, wytapiającego się z lodowca (Iwicki, Zielski 1990).

Na Pojezierzu Brodnickim główne ciągi rynien glacialnych biegną z NW na SE, dochodząc do doliny Drwęcy (Niewiarowski 1973). Szerokość rynien na ogół nie przekracza 600 m, są głęboko wcięte, miejscami wysokość zboczy dochodzi do 50 m. Do charakterystycznych należą: rynna Strugi Brodnickiej (od jeziora Mielwo po jeziora Niskie Brodno) oraz nieregularna rynna Cichówki (z jeziorem Ciche oraz jeziorem Zbicžno) z przedłużeniem w kierunku jeziora Głowińskiego i jeziora Ostrowite. W terenie wyraźnie zaznacza się należąca do najszerszych i zarazem najbardziej nieregularnych rynna Skarlanki z jeziorami: Łąkorz, Wielkie Partęczyny, Robotno, Dębno, Kurzyny, Strażym oraz Bachotek. Ukształtowanie powierzchni tej rynny wskazuje na bardzo złożoną genezę całej formy i pozwala przypuszczać, że to potężne obniżenie tworzyło się w wyniku wielorazowych przepływów wód roztopowych około 16-18 tysięcy lat temu (Sobiech 2014).

W obrębie dolnej części rynny Skarlanki znajduje się jezioro Bachotek, nad którym zlokalizowane jest stanowisko badawcze. W centralnej części tego jeziora znajduje się wyspa, na którą składają się obecnie dwie osobne wysepki rozdzielone płytkimi, zarośniętymi roślinnością, wodami. Przebieg i wydłużony charakter wskazują, że może być to przypuszczalnie wał ozu w obrębie obniżenia rynnowego. Po ustąpieniu lądolodu, gdy wycięte przez wody polodowcowe obniżenie zostało wypełnione wielkimi bryłami i resztkami lodu, po ich powierzchni odbywał się przepływ wód roztopowych płynących z obszarów położonych dalej na północ. Wody te deponowały osady wodnolodowcowe, a ślady tych przepływów widoczne są na powierzchni terenu wzdłuż jego południowego brzegu. Zbocza rynny w okresie peryglacjalnym zostały porozcinane przez głębokie doliny erozyjne, które dziś mają już nieco bardziej łagodne rysy (Ryc. 13A, Ryc. 13C). Aktywne procesy erozyjne obserwować można na wschodnim i zachodnim brzegu jeziora Bachotek, gdzie w obrębie zbocza wyraźnie zaznaczają się wąskie i głębokie rozcięcia (Ryc. 13A).



Ryc. 13. Mapa morfologiczna północnej części rynny jeziora Bachotek (A) oraz przebieg szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek w obrębie strefy krawędziowej (B-D) (zdjęcia wykonano z obszaru zaznaczonego żółtym prostokątem)

W rzeźbie terenu Pojezierza Brodnickiego występują również inne jednostki geomorfologiczne, które sprawiają, że ukształtowanie terenu na obszarze Pojezierza Brodnickiego cechuje tak duża atrakcyjność. Są to przede wszystkim kemy i ozy w okolicach miejscowości Tomki, wznórza i wały czołowo-morenowe oraz zagłębienia wytopiskowe. Ponadto występują licznie równiny akumulacji biogenicznej w dnach rynien bądź zagłębieniach bezodpływowych (Niewiarowski 1995).

Aktualnie obserwuje się dalszy proces zanikania jezior (Marszelewski, Adamczyk 2004), procesy stokowe i powstawanie rozległych torfowych równin, które na obszarze Pojezierza Brodnickiego są bardzo powszechne (Iwicki, Zielski 1990). Współcześnie znaczne zwiększenie intensywności naturalnych procesów morfogenetycznych na Pojezierzu Brodnickim, do których należą sputkiwanie, deflacja, oraz powierzchniowe ruchy masowe ściśle wiążę się z działalnością człowieka (Świtoniak i in. 2014) w tym z rolnictwem, gospodarką leśną i turystyką.

8.4. Klimat

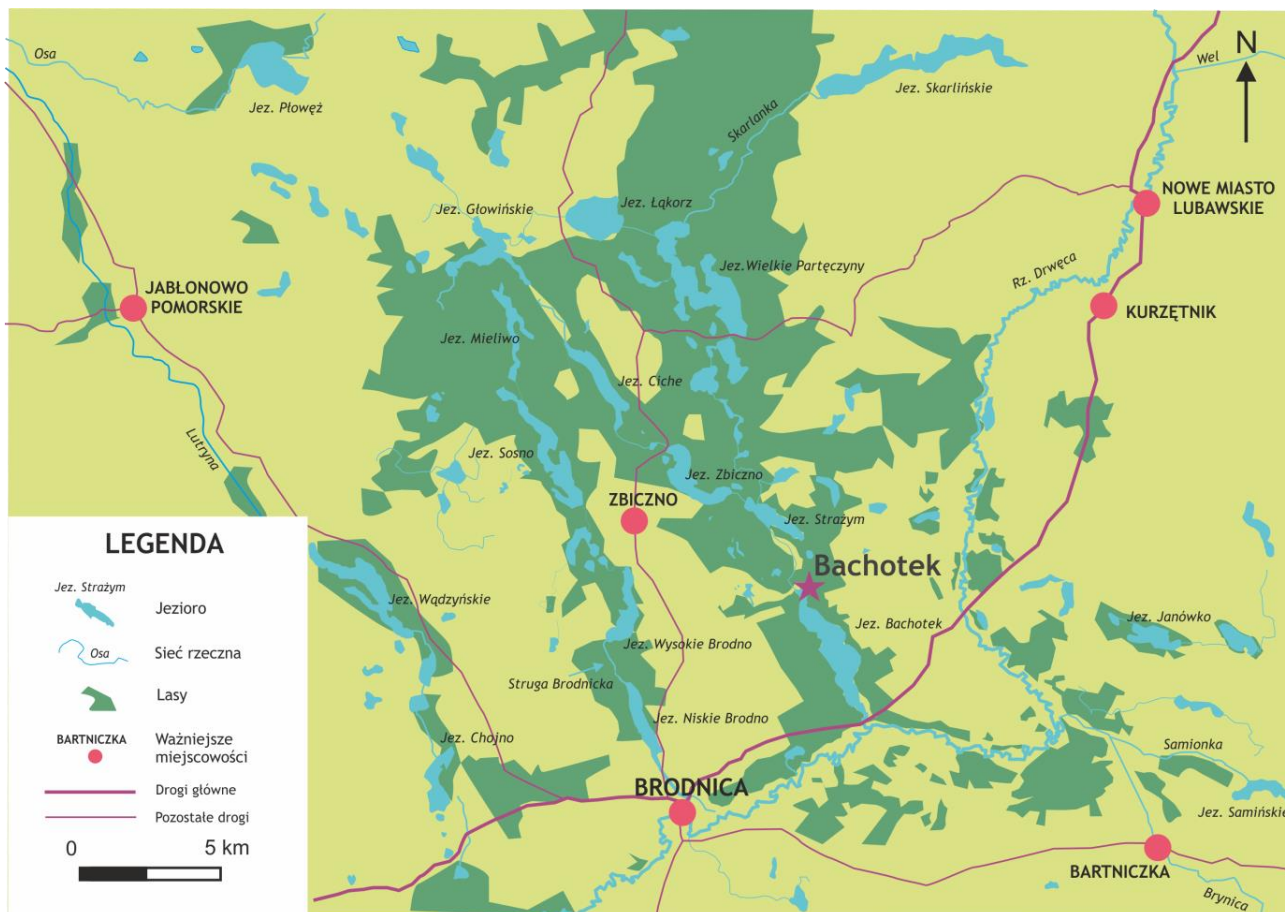
Pojezierze Brodnickie zlokalizowane jest w północno-wschodniej Polsce (Kondracki 2000). Klimat tego regionu wykazuje duże zróżnicowanie w zależności od ukształtowania powierzchni, sąsiedztwa jezior i terenów leśnych (Wójcik, Wójcikowa 1973). Według Wosia (1999) Pojezierze Brodnickie znajduje się w regionie klimatycznym Mazurskim Zachodnim (region nr 9 klasyfikacji). Średnia roczna temperatura powietrza na obszarze Pojezierza Brodnickiego wynosi $7,7^{\circ}\text{C}$, a najcieplejszym miesiącem jest lipiec, ze średnią temperaturą oscylującą w okolicy 18°C , a najzimniejszym luty ($-4,1^{\circ}\text{C}$). Czas trwania termicznej zimy jest około dwa razy dłuższy od termicznego lata (odpowiednio: 139 i 65 dni). Długość okresu wegetacyjnego (średnia temperatura dobowa $\geq 5^{\circ}\text{C}$) wynosi 172 dni, a okres intensywnej wegetacji (średnia temperatura dobowa $\geq 10^{\circ}\text{C}$) 107 dni. Roczna suma opadów atmosferycznych wynosi 550 mm, a liczba dni z opadem wynosi od 150 do 160 w roku. Miesiącem najbardziej deszczowym jest lipiec (Puwalski 2007). Warunki cyrkulacyjne ze względu na niewielką odległość w skali synoptycznej są bardzo zbliżone do tych panujących w regionie Bydgosko-Toruńskim (Przybylak, Maszewski 2009).

Na podstawie badań dotyczących rocznego rozkładu różnych zjawisk klimatycznych za sezon turystyczny na Pojezierzu Brodnickim uznano okres od 3 czerwca do 6 września (96 dni). Analizy warunków pogodowych wskazują, że jednym z najkorzystniejszych dla wędrówek krajoznawczych miesięcy jest czerwiec (Iwicki, Zielski 1990).

8.5. Wody

Pojezierze Brodnickie posiada bardzo rozbudowaną sieć hydrograficzną, na którą składają się połączone ze sobą liczne jeziora oraz rzeki. W granicach Pojezierza znajduje się prawie 60 jezior powyżej 10 ha powierzchni (Marszelewski, Szczepaniak 1991; Burak i in. 2016). Należą do nich największe i najbardziej znane jeziora: Wielkie Partęczyny, Skarlińskie, Bachotek, Sosno, Płowęż, Wądryńskie, Łąkorz, Głowińskie, Zbiczno oraz Ciche (Ryc. 14). W głównej mierze są to długie jeziora rynnowe o urozmaiconej linii brzegowej, wysokich brzegach oraz znacznej głębokości (jezioro Zbiczno: głęb. 41,6 m). Poza jeziorami rynnowymi na terenie Pojezierza Brodnickiego występują inne w tym wytopiskowe, morenowe, starorzecza oraz odwadniane, lecz nie zawsze bezpośrednio związane z rynnami.

Jeziora rynnowe połączone są ze sobą i poprzez Skarlankę oraz Strugę Brodnicką łączą się także z Drwęcą (Lityński, Goleń 2003). Struga Brodnicka odwadnia jeziora z jednej tylko rynny, położonej w zachodniej części Parku. Bardziej rozbudowane dorzecze ma Skarlanka, odprowadzająca wody ze środkowej, wschodniej i północnej części Pojezierza Brodnickiego. Stanowi ona największy ciek Pojezierza Brodnickiego, płynąc z jeziora Skarlińskiego przez największe jeziora uchodzi za jeziorem Bachotek do Drwęcy. Wraz z licznymi dopływami stanowi malowniczy szlak kajakowy (Rusiecki 1981).



Ryc. 14. Pojezierze Brodnickie z zaznaczonymi obszarami leśnymi oraz siecią hydrograficzną z lokalizacją stanowiska badawczego Bachotek (fioletowa gwiazdka)

8.6. Gleby

Gleby Pojezierza Brodnickiego wykazują wyraźny związek z geomorfologią tego obszaru (Iwicki, Zielski 1990). Jest to między innymi wynikiem występowania wielu wspomnianych wcześniej form rzeźby. Typ struktury pokrywy glebowej jest charakterystyczny dla pojezierzy, czyli o nieregularnych płatach z udziałem struktur pasowo uporządkowanych (Bednarek, Prusinkiewicz 1999). Na terenach wysoczyzny morenowej falistej głównie w środkowej części Pojezierza, wytworzyły się gleby brunatne, powstałe z częściowo spiaszczonych i powierzchniowo odwapnionych glin morenowych. W części zachodniej również wysoczyznowej, przeważają gleby płowe, spiaszczone w warstwie powierzchniowej, lecz o dość żyznym podłożu. Zaliczane były dawniej do gleb bielcowych, te ostatnie jednak tworzą się przede wszystkim na przepuszczalnych, ubogich w składniki pokarmowe utworów piaszczystych. Na obszarze Pojezierza Brodnickiego wytworzyły się przede wszystkim na wysoczyznach, z kolei gleby rdzawe w obszarach sandrowych (Mendyk 2013). Oprócz tych gleb, zajmujących większość obszaru Pojezierza, wstępują tu także gleby semihydrogeniczne, takie jak: czarne ziemie w obszarach wysoczyznowych oraz gleby z oglejeniem gruntowo-wodnym i opadowym. W rynnach glacialnych i innych obniżeniach terenowych występują gleby hydrogeniczne reprezentowane przez gleby mułowe i torfowe oraz murszowe i murszowate.

8.7. Szata roślinna

Flora Pojezierza Brodnickiego jest bogata i zróżnicowana w liczbę gatunków roślin naczyniowych wynoszącą tu ok. 950 (Andrzejewski i in. 1996). W granicach Pojezierza znalazły się stanowiska wielu gatunków roślin objętych ochroną całkowitą lub podlegających ochronie częściowej. Należą do nich gatunki reliktowe, stepowe oraz gatunki górskie (Burak i in. 2016).

W szacie roślinnej Pojezierza Brodnickiego dominują przede wszystkim zbiorowiska leśne. Porastają one, rozwinięte na naniesionych w trakcie ostatniego zlodowacenia glinach, gleby brunatne i płowe oraz gleby bielicoziemne, występujące wzdłuż rynien jeziornych i na sandrze. Tereny leśne zajmują również siedliska stale podtopione i okresowo zalewane w sąsiedztwie jezior i cieków. Obecnie głównym gatunkiem zbiorowisk leśnych jest sosna zwyczajna. Występują również licznie: dąb szypułkowy, dąb bezszypułkowy, olsza oraz jesion (Nadleśnictwo Brodnica 2018). W domieszce spotyka się również inne gatunki drzew: brzozę brodawkowatą, brzozę omszoną, grab, lipę drobnolistną, klon zwyczajny, wiąz górski, wiąz limak, topolę czarną, osikę, wierzbę kruchą oraz wierzbę szarą.

Na obszarze Pojezierza Brodnickiego można wydzielić wiele naturalnych zespołów borowych, utworzonych przez sosnę (Zielski 1978). Na polach sandrowych w NE części Pojezierza Brodnickiego występują płaty suchego boru chrobotkowego, na umiarkowanie wilgotnych glebach piaszczystych wydzielić można różne postacie boru świeżego (okolice wsi Ciche oraz Górale), a na torfowiskach śródleśnych i w rynnach jeziornych płaty boru bagiennego (w dolinie Skarlanki). Sosna wchodzi również w skład zbiorowisk leśnych, zaliczanych do borów mieszanych, porastających gleby w obrębie równin sandrowych (m.in. pomiędzy wsią Górale oraz jeziorem Mielwiwo). Mniejsze jego fragmenty spotyka się w strefie powierzchniowo silnie spiaszczonych moren i na wierzchołkach rozcięć erozyjnych przy jeziorach. Jest to jeden z najbogatszych florystycznych zbiorowisk Pojezierza Brodnickiego. Zdecydowanie największy odsetek powierzchni leśnych zajmują na terenie Pojezierza Brodnickiego jednogatunkowe, sztucznie posadzone monokultury sosnowe niższych i średnich klas wiekowych (Nadleśnictwo Brodnica 2018).

Lasy liściaste Pojezierza Brodnickiego porastają gleby znacznie żyzniejsze niż zbiorowiska borowe. Urodzajne gleby wytworzyły się głównie pod lasami liściastymi, tzw. grądami w strefie glin morenowych. W obrębie Pojezierza Brodnickiego fragmenty lasów grądowych, które noszą cechy zespołów naturalnych, zachowały się głównie w strefie krawędziowej rynien jeziornych, niektórych wyspach oraz fragmentarycznie w zasięgu moreny dennej falistej na całym obszarze. Grądy wysokie, czyli lasy liściaste dębowo-grabowe świeże, są najbardziej rozpowszechnionymi typami lasów w obrębie Pojezierza Brodnickiego. Rozwijają się one w zasięgu falistej moreny dennej i wzniesieniach morenowych oraz na krawędziach rynien subglacjalnych. Wyraźne zróżnicowanie siedliskowe i florystyczne oraz wpływ człowieka na środowisko spowodowały powstanie odmian lasów liściastych świeżych, w tym charakterystyczna odmiana lasu z bukiem, najlepiej wykształcona nad jeziorem Mielwiwo. Lasy grądowe świeże z panującą sosną w drzewostanie są zbiorowiskami wybitnie antropogenicznymi (Zielski 1978). W okolicach jeziora Bachotek na południowych stokach wzniesień morenowych w Tamie Brodzkiej zidentyfikowano dąbrowę świetlistą (Iwicki, Zielski 1990).

Na żyznych i wilgotnych siedliskach okresowo zalewanych, rozwijają się lasy łąkowe. Dobrze wykształcone łągi olszowe można spotkać nad jeziorami Wielkie Partęczyny, Dębno, Retno, Ciche, Zbiczno oraz na rozlewiskach wzdłuż Skarlanki, w tym w północnej części jeziora Bachotek. Do często spotykanych bagiennych lasów liściastych na obszarze Pojezierza Brodnickiego należy ols. Zbiorowisko to rozwija się na glebach torfiastych z wodą stagnującą.

Większe skupiska olsu występują nad Skarlanką, w okolicach jeziora Bachotka, w rejonie jezior: Robotno i Dębno oraz jeziora Mieliwo. W sąsiedztwie olsów, na podłożu najczęściej torfowym, rozwijają się niekiedy zarośla łozowe. Z kolei zbiorowisko z dereniem świdwą mające charakter przejściowy znajduje się na po zachodniej stronie jeziora Mieliwo oraz na wyspie tzw. Wielką Syberią nad jeziorem Wielkie Partęczyny.

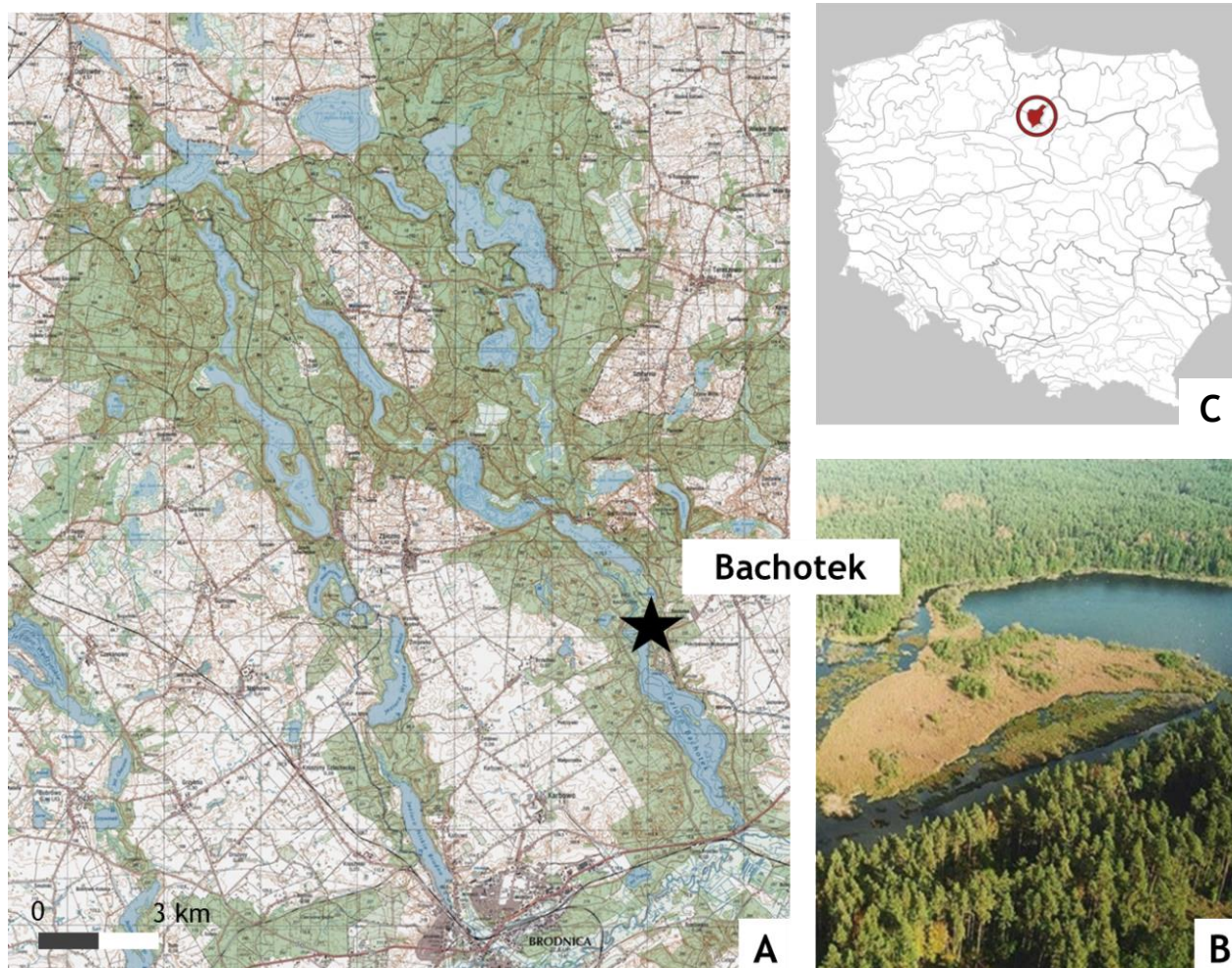
Na obszarze Pojezierza Brodnickiego wyróżnić można świeże murawy łąkowe, porastające najczęściej tereny zajęte kiedyś przez las oraz wilgotne łąki spotykane na rozlewiskach w dolinie Skarlanki. Oprócz wyżej wymienionych, spotykamy również łąki kwaśne, na których panują turzyce. W pasie szuwarów, na bagnistych brzegach jezior, rozwijają się często duże, z przewagą jednego gatunku, zbiorowiska turzyc wysokich (m.in. nad jeziorem Mieliwo, Okonek i Stręszek). Na torfowiskach niskich i przejściowych położonych w rynnach jeziornych znajdują się kwaśne murawy torfowiskowe z turzycami niskimi. Nad jeziorami: Mieliwo, Ciche oraz Bachotek występują dość rzadkie w Polsce pła mszarne z turzycami. Torfowiska przejściowe, rozwijają się w bezodpływowych nieckach, rozlokowanych w rynnach Skarlanki i na brzegach jezior dystroficznych (m.in. Żurawie Bagno).

W krajobrazie jezior i rzek wyraźnie rozwinięta jest roślinność wodna. Obok nielicznych, bezodpływowych- jezior dystroficznych, w obrębie Pojezierza Brodnickiego występują głównie jeziora średniożyzne (mezotroficzne) oraz żyzne (eutroficzne). Strefa brzegowa jezior odznacza się silnym zróżnicowaniem warunków życiowych, co związane jest z wykształceniem charakterystycznych pasów roślinności. Po stronie wewnętrznej jezior Pojezierza Brodnickiego rozwija się pas rdestnic i innych roślin tworzących tzw. podwodne łąki. Następnie zaznacza się pas roślinności o liściach pływających na powierzchni wody (m. in. nad Skarlanką czy Strugą Brodnicką). Kolejną strefę stanowi pobrzeże jezior i cieków, które zajmuje pas trzciny i oczeretów. Z kolei bezpośrednio z nimi od strony lądu zwykle znajduje się pas turzyc wysokich.

W szacie roślinnej Pojezierza Brodnickiego wyróżnić można roślinność synantropijną rozwijającą się w postaci tzw. zbiorowisk segetalnych, czyli przywiązanych do pól uprawnych i zbiorowisk roślin ruderalnych towarzyszących osiedlom ludzkim, obszarom eksploatacji turystycznej, szlakom turystycznym oraz komunikacyjnym. Tereny leśne Pojezierza Brodnickiego przecinają liczne drogi, ścieżki i szlaki turystyczne stanowiące otwartą bramę wkraczania obcych gatunków w zbiorowiska leśne. Rośliny synantropijne wnikają niekiedy do runa zbiorowisk leśnych w wyniku jego przerzedzenia, spowodowanego wydeptywaniem czy zaśmiecaniem związanym z ruchem turystycznym. W pobliżu kempingów i ośrodków wczasowych oraz wzdłuż szlaków turystycznych znajdują się dość rozległe zbiorowiska chwastów ruderalnych, w szczególności nad jeziorami: Zbiczno, Bachotek, Niskie Brodno, Wielkie Partęczyny, Dębno oraz Sosno.

8.8. Stanowisko Bachotek

W obrębie Pojezierza Brodnickiego na podstawie inwentaryzacji szlaków turystycznych i uwzględnieniu kryteriów wytypowano stanowisko do badań wpływu denudacji antropogenicznej na korzenie i pnie drzew. Jest to obszar eksploatowany turystycznie w szczególności przez turystykę pieszą oraz rowerową, na którym zaobserwowano liczne odstonięcia korzeni drzew. Do szczegółowych analiz dendrochronologicznych wytypowano odcinek szlaku turystycznego w okolicach jeziora Bachotek znajdujący się południowo-wschodniej części Pojezierza Brodnickiego (Ryc.15A).



Ryc. 15. Mapa topograficzna Pojezierza Brodnickiego na tle Polski (C), z lokalizacją stanowiska Bachotek (A) oraz widok na północno-wschodnią krawędź rynny jeziora Bachotek, wzdłuż której został poprowadzony badany szlak turystyczny (B).

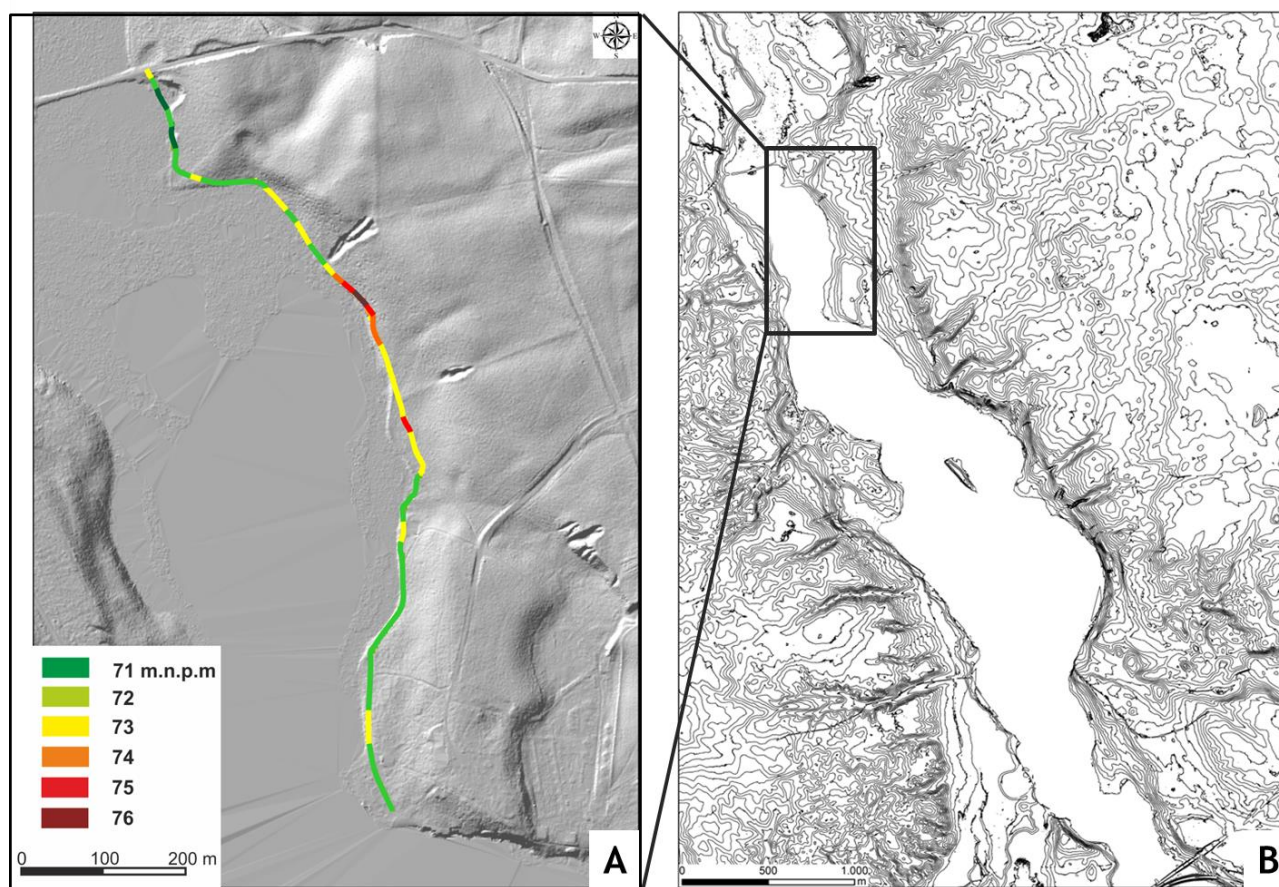
Badany odcinek szlaku przebiega wzdłuż jego północno-wschodniego brzegu na długości około 380 m i charakteryzuje się podobnymi warunkami topograficznymi (Ryc.15B). Na jego powierzchni odłanianie korzeni jest najbardziej powszechne (Ryc.16) i stanowi jeden z najczęściej uczęszczanych szlaków na terenie Pojezierza Brodnickiego (Matulewski 2014a). Występowanie większej liczby odłaniętych korzeni w obrębie szlaku umożliwiło odpowiedni pobór próbek do badań dendrochronologicznych oraz zapewniło reprezentatywność uzyskanych wyników. Do analiz pobrano wyłącznie próby sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) ze względu na jej dominację w drzewostanie i masowe występowanie odłanięć korzeni wzdłuż szlaku turystycznego. Z uwagi na ciągle słabe rozpoznanie reakcji anatomicznych odłanianych korzeni drzew liściastych (Heinrich, Gärtner 2008; Hitz i in. 2008), szczególnie tych poddawanych powolnemu odłanianiu, zrezygnowano z poboru korzeni brzozy brodawkowatej (*Betula pendula* Roth), klonu zwyczajnego (*Acer platanoides* L.), jesionu (*Fraxinus excelsior* L.) oraz dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) występujących w domieszce na badanym terenie.



Ryc. 16. Przebieg badanego szlaku turystycznego poprowadzonego wzdłuż krawędzi rynny jeziora Bachotek wraz z widocznymi na jego powierzchni odstąpieniami korzeni sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.)

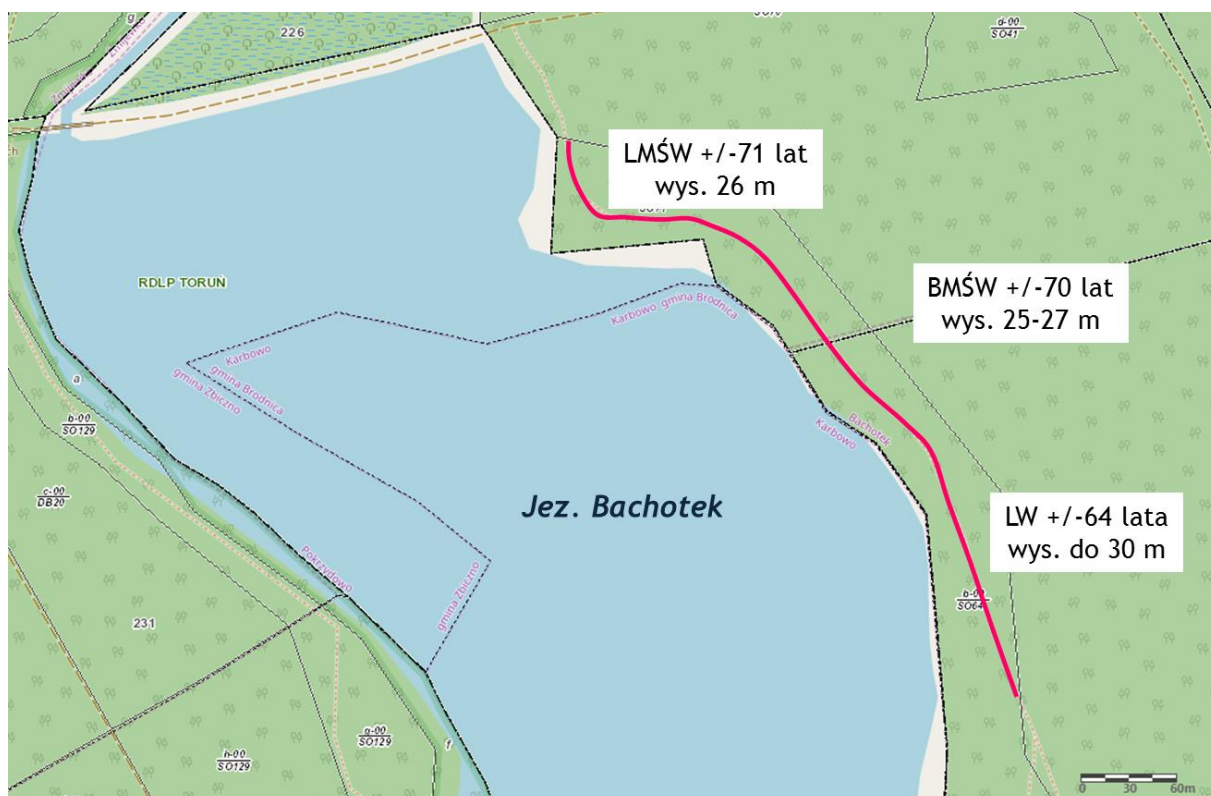
Analizowana część szlaku turystycznego została poprowadzona wzdłuż północno-wschodniego brzegu jeziora Bachotek ze Stacji Wodnej PTTK Bachotek w kierunku miejscowości Zbiczno i jeziora Strażym na północy. Badany odcinek żółtego pieszego szlaku turystycznego im. Franciszka Łęgowskiego (numer szlaku: KP-231-y E-11) został oficjalnie wyznaczony w 1977 roku przez Oddział Miejski PTTK w Toruniu (Miłoszewski 2011). W jego pobliżu znajduje się rezerwat florystyczny Bachotek, mostek Jadwigi nad Skarlanką oraz miejsce upamiętnienia pomordowanych przez hitlerowców w czasie II wojny światowej. Ze względu na wartości przyrodnicze, historyczne i krajobrazowe jest to obszar atrakcyjny turystycznie. Miejsce stanowi obszar spacerów turystów wypoczywających w Stacji Wodnej PTTK Bachotek. Od 2005 roku badana część szlaku znajduje się w granicach Brodnickiego Parku Krajobrazowego.

Pod względem geomorfologicznym szlak został poprowadzony w strefie krawędziowej rynny subglacjalnej jeziora Bachotek (Ryc. 17). Jezioro wypełnia dno rynny Skarlanki, jednej z trzech południkowo przebiegających rynien glacialnych Pojezierza Brodnickiego (Niewiarowski 1968; Roszko 1972). Wzdłuż omawianego wschodniego brzegu jeziora Bachotek, zaznaczają się procesy erozyjne, gdzie w obrębie zboczy wyraźnie widoczne są wąskie i głębokie rozcięcia oraz suche i okresowo suche dolinki denudacyjne. Na badanych 380 metrach (całkowita długość szlaku poprowadzonego krawędzią wynosi ponad 800 m), szlak przecina prostopadłe zbocza rynny na wysokości w przedziale 71,2 - 76,3 m n.p.m. (Ryc. 17). W jego otoczeniu wysokości względne nie przekraczają 20 m, nachylenia zboczy przeciętnie wahają się w granicach 7-20°. Maksymalnie wynoszą 39° w rozcięciach erozyjnych. W budowie geologicznej szlaku poprowadzonego w strefie krawędziowej przeważają piaski.



Ryc. 17. Lokalizacja badanego odcinka szlaku turystycznego poprowadzonego wzdłuż północno-wschodniej części rynny jeziora Bachotek na numerycznym modelu rzeźby terenu (A) oraz mapie poziomicowej (B)

Szlak przebiega przez urozmaicony teren ze zróżnicowanymi gatunkowo drzewostanami (wiek drzew znajduje się w przedziale 57-71 lat). Na podstawie opisu taksacyjnego drzewostanu (Bank Danych o Lasach 2018) w strefie krawędziowej rynny Bachotek badany odcinek szlaku przebiega przez dwa typy siedliskowe: las mieszany świeży (w północnej części) oraz las wilgotny (w pozostałej części odcinka). W otoczeniu szlaku turystycznego znajduje się bór mieszany świeży (Ryc.18). Z punktu widzenia zespołów leśnych dla północnej części jeziora Bachotek w niektórych miejscach na krawędziach rynny rozpoznano występowanie grądu wysokiego z panującą sosną w drzewostanie (*Tilio-Carpinetum typicum* wariant z *Pinus sylvestris*), który stanowi zespół wybitnie antropogeniczny (Zielski 1978).



Ryc. 18. Mapa obszarów leśnych w północno-wschodniej części jeziora Bachotek z przebiegiem badanego szlaku turystycznego (różowy kolor). Objasnienia skrótów: LMŚW (las mieszany świeży), BMŚW (bór mieszany świeży), LW (las wilgotny). Charakterystyka średniego wieku oraz średniej wysokości sosny zwyczajnej w obrębie danej powierzchni na podstawie opisu taksacyjnego drzewostanu (opracowanie własne na podstawie Bank Danych o Lasach 2018)

9. Turystyka na Pojezierzu Brodnickim

9.1. Historia turystyki na terenie Pojezierza Brodnickiego

Osobliwości przyrodnicze Pojezierza Brodnickiego obejmujące najcenniejsze obszary przyrody i krajobrazu stanowią od wielu lat jedno z najważniejszych obiektów turystycznych w północnej Polsce (Jarosz 1951). Bogate wartości środowiska przyrodniczego oraz możliwość organizowania wędrówek pieszych, rowerowych i wodnych, przyczyniły się do szerokiego rozwoju funkcji rekreacyjnych i wypoczynkowych na obszarze Pojezierza Brodnickiego (Iwicki 1976). Najstarsze zapisy ruchu turystycznego datuje się na lata dwudziestolecia międzywojennego i związane były z przyjazdem letników nad okoliczne jeziora i lasy brodnickie (Kołodziejczyk 1930, 1955). Określany mianem „Szwajcarii Brodnickiej” teren położony na północ od Brodnicy odwiedzano ze względu na urokliwe i malownicze krajobrazy jezior i lasów (Krippendorf 1958). W tym czasie odnotowano istnienie gościńców i oberż obsługujących turystów m.in. w Cichym i Zbicznie (Orłowicz 1924). Był to także początek organizowania tradycyjnych obozów harcerskich na Pojezierzu Brodnickim (Iwicki, Zielski 1990). Do najczęściej opisywanych miejsc turystycznych w tym okresie zaliczyć należy jezioro Ciche, uważane za jedno z najpiękniejszych w pasie polskich pojezierzy oraz rozczłonkowane jezioro Wielkie Partęczyny (Leliwa-Piotrowicz 1935-2016). Przed II wojną światową ruch turystyczny na całym Pomorzu był uwarunkowany rozwojem infrastruktury transportowej, w szczególności kolejnictwa. Wędrówki piesze czy rowerowe w głąb Pojezierza Brodnickiego odbywały się, przyjmując za punkty wyjścia stacje kolejowe w Tamie Brodzkiej, Brodnicy, Kałudze, Klonowie i Ostrowitem Lubawskim. W okresie międzywojennym mimo bezpośredniego sąsiedztwa głównych linii kolejowych i dogodnej komunikacji we wszystkich kierunkach ruch turystyczny w okolicach Brodnicy był niewielki (Orłowicz 1924).

Przed II wojną światową miejsc rekreacyjnych i wypoczynkowych nie brakowało w samej Brodnicy. Drogi spacerowe i strzeżone kąpieliska znajdowały się w Księżym Lesie nad jeziorem Niskie Brodno, posiadające tradycję jeszcze sprzed I wojny światowej. W tym czasie jednak największą popularnością mieszkańców Brodnicy i okolic cieszyła się pływalnia na Drwęcy w dzisiejszym Parku Jana Pawła II. Ponadto na rzece Drwęcy istniało wiele „dzikich” kąpielisk (Bukowski, Ziemia 2005).

Po II wojnie światowej zagospodarowywanie turystyczne Pojezierza Brodnickiego rozpoczęto w 1951 roku i związane było z powstaniem z inicjatywy Marii Okołów-Podhorskiej Stanica Wodna PTTK w Bachotku (Kołodziejczyk 1955; Krippendorf 1958). Z tego okresu podchodzą również stacje na szlaku Brdy, Drawy, jeziora Beldan, Czarnej Hańczy oraz kanale Augustowskim. Stanica w Bachotku funkcjonuje od 1952 roku do dziś, choć w zmienionej, znacznie rozbudowanej formie przyciąga turystów z całej Polski. Po jej utworzeniu powstały kolejno ośrodki wypoczynkowe w Zbicznie i Górznie, a następnie liczne inne, przeważnie zakładowe ośrodki wczasowe w okolicach jeziora Wielkie Partęczyny i jeziora Strażym (Iwicki, Zielski 1990). W 1952 roku w Brodnicy w związku z propagowaniem idei krajoznawstwa przez lokalnych działaczy, jako jeden z pierwszych po II wojnie światowej na Pomorzu powstał Oddział Polskiego Towarzystwa Turystyczno-Krajoznawczego. W 1956 roku w Bachotku odbyła się krajowa narada turystyczno-kajakowa (Krippendorf 1958). Od lat 60. XX wieku widoczny był szybki i masowy rozwój funkcji turystycznych i wypoczynkowych w regionie Brodnicy. Od tego czasu organizowane były liczne kolonie i wczasy zakładowe dla pracowników i ich rodzin.

Dowodem na wysokie wartości krajoznawcze Pojezierza Brodnickiego było powstanie w 1959 roku Powiatowego Przedsiębiorstwa Turystycznego w Brodnicy oraz założenie w 1960

roku Punktu Informacji Turystycznej dla obsługi krajowego ruchu turystycznego. W 1965 roku Brodnica w konkursie na najpiękniejszą miejscowość sezonu turystycznego zdobyła I miejsce w województwie bydgoskim i III miejsce w kraju (Dygda red. 1998). Warto także wspomnieć o roli, jaką o popularyzacji Pojezierza Brodnickiego odegrali po II wojnie światowej autorzy licznych publikacji krajoznawczych: Kołodziejczyk (1955), Krippendorf (1958), Umiński (1970), Sperski (1974), Iwicki (1976), Zielski (1978), Rusiecki (1981) oraz Bilski (1978, 1989, 1991).

Istotną rolę w kształtowaniu ruchu turystycznego na terenie Pojezierza Brodnickiego odgrywają szlaki i ścieżki turystyczne (Owsiak, Sewerniak 1995). Do najciekawszych miejsc Pojezierza prowadzą piesze szlaki turystyczne, które znajdowały się pod opieką utworzonego w 1921 roku toruńskiego oddziału Polskiego Towarzystwa Krajoznawczego (Miłoszewski 2011). Przełomowym rokiem w historii znakowania szlaków turystyki pieszej na tym terenie był rok 1976, kiedy zorganizowano obóz wędrowny po Pojezierzu Brodnickim. Celem spotkania było rozpoznanie obszaru pod kątem zaprojektowania nowych szlaków turystycznych oraz walorów krajoznawczo-turystycznych. Na koniec lipca 1977 roku dla turystów wyznaczono szereg odcinków szlaków pieszych wokół Brodnicy (Miłoszewski 2011).

W czasach Polski Ludowej najbardziej powszechną formą spędzania wolnego czasu na terenie Pojezierza Brodnickiego był wypoczynek w jednym z licznych zakładowych ośrodków wczasowych położonych nad jeziorami Wielkie Partęczyny, Bachotek, Zbiczo, Strażym, Głowińskie oraz Łąkorz (PTTK Brodnica).

Efektom działań naukowców, leśników, pracowników administracji państwowej a przede wszystkim towarzystw i organizacji związanych z turystyką i ochroną przyrody, jest powstanie dnia 29 marca 1985 roku Brodnickiego Parku Krajobrazowego. Orędownikiem utworzenia parku był prof. Z. Czubiński, który już przed II wojną światową postulował stworzenie terenów ochronnych na Pojezierzu. Obszar Parku skupia w sobie w sposób niezwykle atrakcyjny elementy środowiska kulturowego i przyrodniczego, które decydują o walorach krajobrazowych rejonów pojeziernych. Konflikty pomiędzy rozwojem turystyki i ochroną przyrody znalazły początkowo swoje odbicie w przebiegu granic Brodnickiego Parku Krajobrazowego. Do obszaru Parku nie włączono wówczas zagospodarowanego turystycznie jeziora Bachotek oraz jeziora Wielkie Partęczyny (Iwicki, Zielski 1990). W 2005 roku doszło do powiększenia Parku o jezioro Bachotek i tzw. Bagienną Dolinę Drwęcy.

Omawiając tematykę turystyki należy podkreślić ścisłe powiązania turystyki kajakowej z Pojezierzem Brodnickim. Na jeziorach odbywają się od wielu lat sptywy kajakowe, a w wyposażeniu wielu ośrodków wypoczynkowych znajduje się sprzęt pływający. Jeziora brodnickie należą do najbardziej atrakcyjnych szlaków kajakowych, określonych mianem „atrakcji międzynarodowej” (Klimaszewski 1973). Trasy nieoznakowanych szlaków wodnych prowadzą po popularnej rzece Drwęcy i jej dopływach Skarlance i Brynicy (Sperski 1974). Prawdopodobnie w pierwszej połowie 1960 roku odwiedził Pojezierze Brodnickie, poeta i publicysta R. Kapuściński. Opis szlaków wodnych m.in. okolic Bachotka i pracę flisaków umieścił w zbiorze reportaży „Busz po Polsku” (Kapuściński 1962). Ważną datą w historii turystyki jest rok 1978, wówczas chełmińscy wodniacy przenoszą swój sptyw z Wdy na Pojezierze Brodnickie i Drwęce, współcześnie będąc jedną z największych imprez kajakowych Europy (Matulewski 2011). Na początku XXI wieku wielkość ruchu turystycznego na szlaku Drwęcy oceniana była na 1000-1100 osób rocznie (Owsiak, Sewerniak 2004). Z kolei na wodach jeziora Bachotek liczba pływających kajakiem przekracza ponad 4000 osób rocznie (Matulewski 2011).

Zagadnienie ruchu turystycznego na terenie Pojezierza Brodnickiego i związane z nim problemy środowiskowe, w tym zniszczenia nawierzchni szlaków spowodowane nadmiernym ruchem turystycznym sięga historią do lat 70. XX wieku (Zielski 1978; Dysarz 1993).

Charakteryzuje się on bowiem jednym z największych w północno-środkowej Polsce zagęszczeniem szlaków turystycznych, a ich układ jest zdeterminowany przez silnie rozwiniętą sieć hydrograficzną oraz duże kompleksy leśne (Matulewski 2013 a, b). Pojezierze Brodnickie należy do atrakcyjnych i chłonnych turystycznie terenów ziemi chełmińskiej (Czuba 1969 za: Zielski 1978).

Problem wpływu ruchu turystycznego na środowisko przyrodnicze badanego terenu sprowadza się głównie do mechanicznego niszczenia runa, synantropizacji i dewastacji (Zielski 1978). Tereny leśne Pojezierza Brodnickiego zostały poprzecinane licznymi drogami, ścieżkami i szlakami turystycznymi w obrębie, których zauważono wyraźne zmiany w komponentach środowiska przyrodniczego w tym liczne odstonięcia korzeni drzew. Na niszczenie struktury siedlisk przez człowieka narażone są najbardziej interesujące partie Pojezierza Brodnickiego, często o charakterze naturalnym nad jeziorami. Wokół jezior poprowadzono szlaki lub wydeptano ścieżki, co przy znacznym w wielu wypadkach nachyleniu zboczy zostały zainicjowane procesy erozyjno-denudacyjne. Przy jednoczesnym utrzymaniu korzystnych warunków dla celów turystyki należałoby odpowiednio zabezpieczyć fragmenty Pojezierza o znaczeniu naukowym, dydaktycznym i krajobrazowym.

9.2. Wpływ antropopresji turystycznej na środowisko geograficzne Pojezierza Brodnickiego

Zagadnienie wpływu ruchu turystycznego na lasy Pojezierza Brodnickiego po raz pierwszy został omówiony w latach 70. XX wieku (Zielski 1976; Dysarz 1980). Pierwsze wyniki negatywnego oddziaływania turystyki na środowisko geograficzne dostarczyły badania przeprowadzone przez A. Zielskiego (1976, 1978, 1998). Głównym celem jego pionierskich badań była ocena stopnia synantropizacji lasów z uwzględnieniem zarówno turystyki, jak również gospodarki leśnej. Badania wykazały, że na skutek działalności człowieka, zwiększeniu uległo znaczenie jednostek fitosocjologicznych o charakterze antropogenicznym, będących efektem uprawy sosny na siedliskach grądowych. W swojej pracy zaobserwował znaczną atrakcyjność pod względem turystycznym i rekreacyjnym borów mieszanych. W tym zbiorowisku położone są ośrodki wczasowe nad jeziorem Wielkie Partęczyny, które znacząco przyczyniają się do przekształceń zbiorowisk roślinnych (Zielski 1978). Użytkowanie turystyczne na Pojezierzu Brodnickim wpływa na stopień zdrowotności i kondycji sosny zwyczajnej. W badaniach z lat 90. XX wieku zidentyfikowano dużą wrażliwość sosny zwyczajnej z terenów intensywnego użytkowania turystycznego na zmiany warunków środowiskowych, w tym opady w sezonie letnim. Drzewa rosnące wzdłuż ścieżek na terenie ośrodków oraz na polach namiotowych wykazały redukcję szerokości przyrostów, co wiązało się z ich osłabieniem i obumieraniem. Ponadto, miejsca wydeptywania charakteryzowała wysoka związłość i gęstość gleby (Zielski i in. 1998)

Na terenie lasów Pojezierza Brodnickiego wyraźne zmiany w środowisku przyrodniczym jak mechaniczne niszczenie runa wywołane są przez wydeptywanie. Masowy ruch turystyczny przyczynia się do synantropizacji i zanikania w runie wielu gatunków grądowych kosztem borowych, a więc do borowienia grądów (Iwicki, Zielski 1990). Presja turystyczna przyczynia się do zanikania zarówno gatunków charakterystycznych jak i towarzyszących w siedliskach na terenie Pojezierza Brodnickiego (Zielski 1978).

Komponentem najszybciej reagującym na uszkodzenia mechaniczne i zmiany warunków ekologicznych na terenie Pojezierza Brodnickiego jest roślinność (Dysarz 1993). Zmiany te powodują procesy synantropizacji i dewastacji roślinności. Występowanie obcych gatunków w zbiorowisku dowodzi oddziaływań antropogenicznych, między innymi ruchu turystycznego

(Faliński 1965). Na obszarze Pojezierza Brodnickiego w szczególności na niszczenie narażone są najbardziej atrakcyjne części lasów, położone nad jeziorami. Wokół wielu jezior rozciąga się szereg ścieżek i dróg, które stale są wydeptywane i poszerzane kosztem roślinności. Ich przebieg na zróżnicowanym terenie powoduje dodatkowe straty, przede wszystkim zadarnienie gleby oraz rozwój procesów erozyjno-denudacyjnych. Często przy znacznym nachyleniu zboczy (m.in. w strefie brzegowej jezior) dochodzi od osuwania materiału. Liczne drogi, ścieżki i szlaki turystyczne przecinają tereny leśne Pojezierza Brodnickiego, stanowiąc potencjalne korytarze wkraczania obcych gatunków w zbiorowiska leśne. Wzdłuż ciągów komunikacyjnych i na skrajach lasów najczęściej pojawia się roślinność synantropijna. Ich rozwój w fitocenozach leśnych zależy od stopnia zmian struktur warstwowej zbiorowiska, warunków fizycznych gleby i presji mechanicznej (Zielski 1978). Na obszarach intensywnego użytkowania rekreacyjnego, jak ośrodki wypoczynkowe, pola namiotowe i kempingi pojawiają się zbiorowiska ruderalne. Zaśmiecone miejsca w lasach i w pobliżu szlaków turystycznych, gdzie podłoże jest zmienione przez człowieka, zasiedlane są przez liczne gatunki synantropijne, często rośliny lubiące gleby bogate w sole mineralne i związki azotowe. Zasięg przestrzenny występowania zbiorowisk ruderalnych pokrywa się z obszarami intensywnego użytkowania rekreacyjnego oraz masowego ruchu turystycznego. Wiele takich miejsc znajduje się w okolicach jeziora Bachotek, Zbiczo, Wielkie Partęczyny oraz Strażym (Matulewski 2011).

W kontekście stałego wzrostu antropopresji turystycznej oraz konieczności poznania reakcji środowiska na zmiany środowiskowe istotne było ilościowe i jakościowe określenie charakteru procesów niszczących, ich natężenia, kierunków rozwoju oraz skutków, jakie wywołują. Podejście analityczne pozwoliło na powiązanie stopnia przekształcenia oraz dynamiki procesów z typem środowiska. Na Pojezierzu Brodnickim licznych danych o zmianach w środowisku leśnym dostarczył R. Dysarz (1980, 1993). Badania prowadzone były w latach 1974-1977, a zasięg przestrzenny dotyczył ośrodków wypoczynkowych i pól namiotowych Pojezierza Brodnickiego i okolic Górzna. Spora część badań dotyczyła stref wypoczynkowych znajdujących się nad jeziorem Bachotek. Prace koncentrowały się na obserwacji przestrzennych zmian w szacie roślinnej, w rzeźbie terenu oraz właściwościach fizycznych gleby. Zakres badań obejmował analizę przekształceń środowiska na etapie inwestycyjnym oraz na poziomie właściwego użytkowania rekreacyjnego. Jego obserwacje dostarczyły informacji o zaburzeniach i zniszczeniach w środowisku, związanych z przystosowaniem i użytkowaniem terenu dla potrzeb turystów. Wyniki opracowania przedstawia Tabela 1.

Tab. 1. Negatywne skutki ruchu turystycznego na wybrane komponenty środowiska geograficznego na Pojezierzu Brodnickim (opracowanie własne na podstawie Dysarz 1993)

Czynnik antropogeniczny	Rodzaj przekształceń	Skutki przyrodnicze
Formy ruchu turystycznego: -wydeptywanie, -rozjeżdżanie, -obozowanie	Zniszczenie roślinności niskiej, Zmiany właściwości fizycznych podłoża	Zmniejszenie pojemności wodnej gleby, Zmniejszenie szybkości infiltracji wód opadowych
	Rozwój procesów splukiwania rozproszonego i skoncentrowanego oraz procesów eolicznych	Tworzenie form mikrorzeźby erozyjnej i akumulacyjnej Odstonięcia korzeni drzew
	Zmiany warunków siedliskowych oraz zasięgu zbiorowisk roślinnych	Pojawienie się roślinności synantropijnej
	Zmiany w powierzchniowych warstwach gleby i rzeźby terenu	Wzrost zwięzłości i przemieszczenia materiału

Analiza przekształceń środowiska na obszarze Pojezierza Brodnickiego przedstawia różny stopień reakcji komponentów środowiska przyrodniczego. Ze szczególną wrażliwością reaguje roślinność na antropopresję turystyczną. Zmiany właściwości fizycznych gleby, a przede wszystkim bilans wodny w glebie, negatywnie oddziałują na rozwój pni i korzeni drzew.

Do pozostałych negatywnych skutków oddziaływania antropopresji turystycznej, powodującej zniszczenia i obciążenie środowiska geograficznego na Pojezierzu Brodnickim zaliczono:

- zadarnianie gleby i zmiany właściwości fizycznych, chemicznych i wodnych w przypowierzchniowych warstwach gleby,
- przyspieszenie odpływu wody i tworzenie się miejsc podmokłych,
- obniżanie zdrowotności i kondycji pni drzew,
- odłanianie i niszczenie korzeni drzew,
- niszczenie runa podczas grzybobrań,
- niszczenie roślinności przywodnej przez wędkarzy,
- nacinanie kory drzew i wrywanie krzewinek owoców leśnych,
- wycinanie drzew i łamanie gałęzi na opał i ogniska,
- wrywanie i niszczenie runa pod teren pól namiotowych,
- zaśmiecanie szlaków turystycznych i miejsc biwakowych,
- odprowadzanie ścieków i nieczystości do jezior i rzek z domów wczasowych,
- wyjeżdżanie dróg w lasach.

W zbiorze prac poświęconych wpływowi antropopresji turystycznej na środowisko Pojezierza Brodnickiego brakuje jednak opracowań z zakresu dendrochronologii, które w sposób ilościowy i jakościowy prezentowałyby wyniki analiz zmian anatomicznych i przyrostowych korzeni drzew poddanych silnej presji mechanicznej. W pasie pojezierzy nie przeprowadzono jak dotąd również analiz stricte dendrogeomorfologicznych, wyłączając pracę M. Morawskiej (2012) badającej erozję wąwozową na Pojezierzu Suwalskim. Z drugiej strony, regionalna literatura z zakresu leśnictwa i dendrologii, w tym dotycząca struktury i dynamiki drzewostanu, jest bardzo rozbudowana, co daje możliwości porównania wyników i szerokie spektrum wnioskowania w ujęciu czasowym i przestrzennym.

9.3. Wielkość i sezonowość ruchu turystycznego na stanowisku Bachotek w okresie 2014-2016

Niezbędnym elementem szacowania wpływu antropopresji turystycznej na komponenty środowiska Pojezierza Brodnickiego, jest poznanie rzeczywistej liczby turystów odwiedzających wybrane jego miejsca. Przeprowadzony monitoring na szlaku turystycznym wykorzystany został w wyliczeniach obciążenia ruchem turystycznym. Znaczna liczba i rozproszenie ścieżek, dróg i szlaków turystycznych poprowadzonych na obszarze Pojezierza Brodnickiego powoduje trudności dla pełnego określenia liczby turystów odwiedzających ten teren. W zależności od zakresu badań czy zastosowanej metodyki wyniki pomiarów ruchu turystycznego mogą dotyczyć wyłącznie wybranych fragmentów.

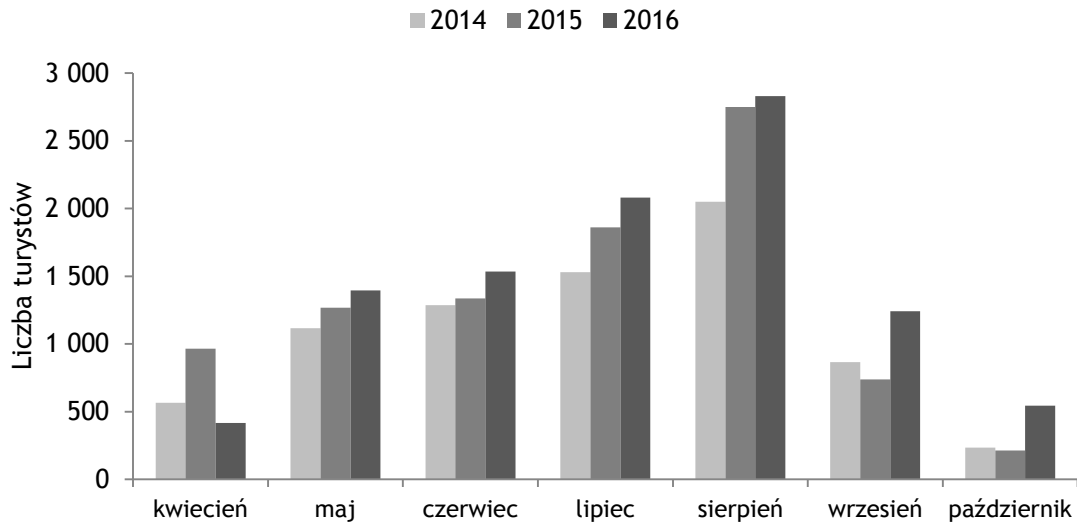
Jednym z najbardziej obciążonych ruchem turystycznym szlaków na Pojezierzu Brodnickim jest fragment szlaku oznaczonego kolorem żółtym prowadzący od Stacji Wodnej PTTK w Bachotku do rezerwatu Bachotek. Jest to w sumie prawie 800 m (w jego obrębie na odcinku 380 m badano korzenie sosny) część szlaku biegnąca krawędzią rynny subglacjalnej, wzdłuż północno-wschodniej części jeziora Bachotek o wysokich walorach krajobrazowych. Szlak ten łączy trasy rowerowe ze Zbiczna i Brodnicy do Bachotka oraz stanowi popularne miejsce spacerów osób wypoczywających w okolicznych ośrodkach.

Ruch turystyczny na odcinku szlaku turystycznego badano przy wykorzystaniu czujników pyroelektrycznych. Z uwagi na wyłącznie ruch pieszy i rowerowy trasy oraz widoczne liczne odstąpienia korzeni na jego powierzchni zdecydowano o lokalizacji czujników w jego najwęższej części. W ten sposób uzyskane wyniki można jednoznacznie interpretować, jako dokładne wartości obciążenia szlaku, eliminując możliwość podwójnych zliczeń.

Tab. 2. Łączna liczba turystów zarejestrowana na szlaku turystycznym na stanowisku Bachotek dla okresu pomiarowego 2014-2016

ROK	LICZBA OSÓB WCHODZĄCYCH OD STRONY STANICY WODNEJ	LICZBA OSÓB WCHODZĄCYCH OD STRONY MOSTU	ŁĄCZNE OBCIĄŻENIE SZLAKU
2014	2390	5262	7652
2015	2624	6513	9137
2016	3406	6641	10047

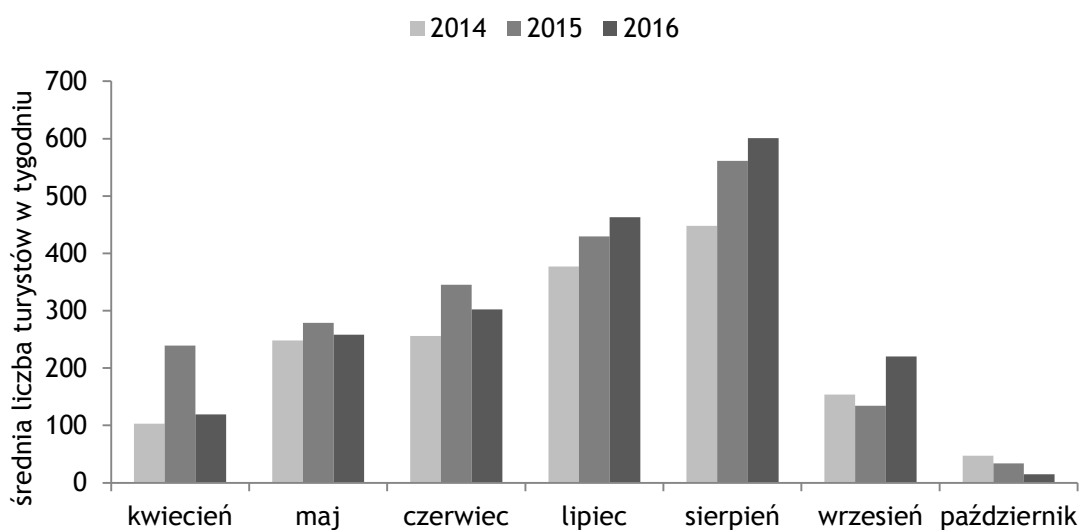
W trakcie prowadzenia monitoringu ruchu turystycznego dla okresu 2014-2016 na badanym szlaku liczba osób wchodzących od strony mostu na Skarlance, tj. od drogi leśnej łączącej Zbiczno, Brodnicę z Bachotkiem mieściła się w przedziale 5200-6700. Z kolei liczba osób wchodzących od strony Stacji Wodnej PTTK Bachotek była mniejsza i zaznaczyła się w przedziale 2400-3500. Łączne obciążenie szlaku w roku 2014 wyniosło 7652 osób, w 2015 roku 9137 osób a w 2016 roku przekroczyła liczbę 10000 osób (Tab. 2). Na podstawie analizy porównawczej rejestru danych uzyskanych z monitoringu ruchu turystycznego, jednoznacznie wynika, że z roku na rok liczba odwiedzających szlak na stanowisku w Bachotku rośnie i w roku 2016 wzrosła o 31% w stosunku do roku 2014.



Ryc. 19. Łączne miesięczne obciążenie turystyczne analizowanego szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek dla sezonu kwiecień-październik dla okresu pomiarowego 2014-2016

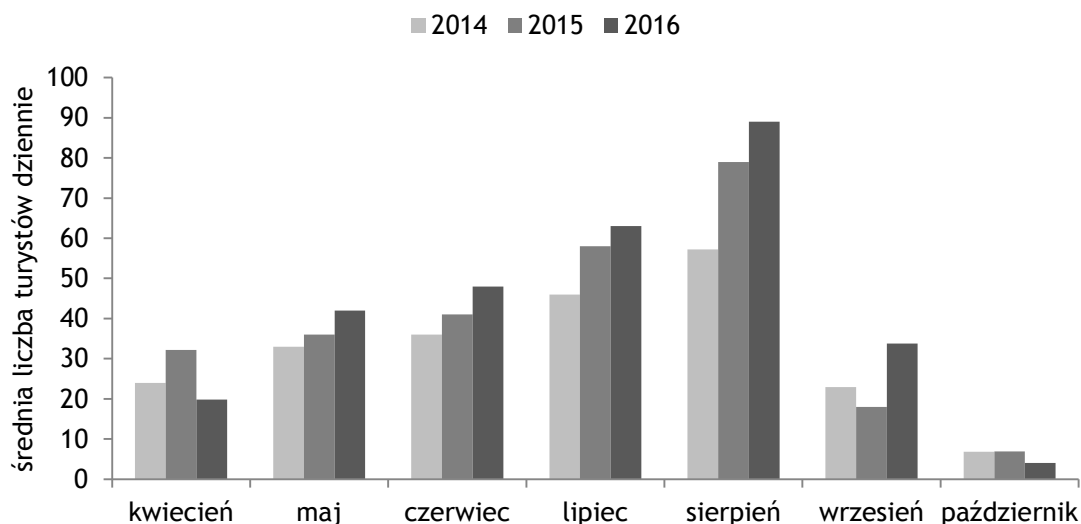
Analizując uzyskane dane dotyczące wielkości ruchu turystycznego przedstawiono je dla poszczególnych miesięcy. Z uwagi, iż monitoring ruchu turystycznego na szlaku w badanym okresie rozpoczęto z pominięciem okresu styczeń-marzec, analizy miesięcznych sum obciążenia szlaku przedstawiono dla pełnych miesięcy, począwszy od kwietnia do października danego roku (Ryc.19).

Porównując sumę turystów odnotowanych na szlaku w poszczególnych miesiącach stwierdzić należy, iż zdecydowanie największa frekwencja turystyczna w okresie 2014-2016 na stanowisku Bachotek, charakteryzowała miesiąc sierpień. Wartości te stanowiły 27-30% całego ruchu turystycznego dla okresu kwiecień-październik. Ponadto znaczne obciążenie turystyczne odnotowano dla miesiąca lipca (20-23% udział w całkowitym obciążeniu szlaku). W czerwcu i lipcu również stwierdzono znaczny ruch wynoszący powyżej 1100 osób na miesiąc.



Ryc. 20. Średnia liczba turystów na tydzień na szlaku turystycznym na stanowisku Bachotek dla sezonu kwiecień - październik dla okresu pomiarowego 2014-2016

Analizując tygodniowe obciążenia szlaków objętych monitoringiem dla okresu 2014-2016 jednoznacznie można stwierdzić, iż największy ruch turystyczny na szlakach przypada na miesiąc sierpień (Ryc.20). Zauważalna jest również tendencja wydłużenia sezonu turystycznego do połowy września podczas którego zanotowano znaczne wartości obciążenia szlaku. W 2014 roku najbardziej obciążonym tygodniem był okres 11-18 sierpnia, w którym zarejestrowano 513 osób. W 2015 roku był to tydzień 24-31 sierpnia, w którym odnotowano 744 osoby. Z kolei dla roku 2016 największy tygodniowy ruch turystyczny zidentyfikowano dla okresu 22-29 sierpnia, który wyniósł 829 osób. Dla całego badanego okresu znaczny ruch turystyczny powyżej 250 osób tygodniowo zidentyfikowano od początku maja do połowy września.



Ryc. 21. Średnie dzienne obciążenie szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek w sezonie kwiecień- październik dla okresu pomiarowego 2014-2016

Średnie dzienne obciążenie szlaków w sezonie pomiarowym było bardzo zróżnicowane i zależało od szeregu zmiennych, wśród których wymienić należy:

- przynależność do głównego sezonu turystycznego,
- dzień tygodnia (ruch weekendowy oraz w dni powszednie),
- warunki pogodowe, w tym wystąpienie opadów deszczu oraz silny wiatr,
- święta i inne dni wolne od pracy.

Najwyższe średnie dzienne obciążenie szlaku zanotowano dla sierpnia, a w roku 2016 wyniosło ono 89 osób (Ryc.21). Dla okresu pomiarowego w 2014 średnie dzienne obciążenie szlaku wyniosło 32 osoby, w roku 2015 39 osób a dla 2016 roku 43 osoby. W 2014 roku maksymalne dzienne obciążenie ruchem turystycznym na stanowisku w Bachotku odnotowano 15 sierpnia (173 osoby), w 2015 roku był to 23 maja (244 osoby) a w 2016 roku 25 sierpnia (203 osoby). Należy podkreślić, że najbardziej obciążony w trakcie całego okresu pomiarowego 2014-2016 był weekend majowy w 2015 roku (1-3 maja), w którym zarejestrowano w ciągu trzech dni łącznie 520 osób.

9.4. Dyskusja. Ruch turystyczny na Pojezierze Brodnickim.

Na terenie Pojezierza Brodnickiego nie prowadzono dotąd kompleksowych badań natężenia ruchu turystycznego. Przez wiele lat frekwencję odwiedzających poszczególne miejsca w regionie Brodnicy wyliczano szacunkowo w oparciu o dane ośrodków wypoczynkowych, pól namiotowych czy kempingów. W latach 1961-1965 wielkość ruchu turystycznego na Pojezierzu Brodnickim wahała się rocznie do 16 tysięcy osób (Rdesińska 1968). W latach 80. XX wieku sama baza turystyczna nad jeziorem Wielkie Partęczyny zapewniała 1200 miejsc noclegowych (Zielski i in. 1998) a kompleks ośrodków nad jeziorem Bachotek mógł pomieścić ponad 900 osób (Iwicki, Zielski 1990). W latach 90. XX wieku liczba osób wypoczywających na Pojezierzu Brodnickim wyniosła 40 tysięcy (Sewerniak 1998). W tym czasie wielkość ruchu turystycznego przybywającego w samej Brodnicy w ciągu roku oszacowano na 15 tysięcy osób (Szymańska, Matczak 1997).

W ostatnim dziesięcioleciu analizę ruchu turystycznego na terenie Pojezierza Brodnickiego dokonano w oparciu o liczbę wypożyczonego sprzętu pływającego w Stacji Wodnej PTTK w Bachotku oraz na plaży miejskiej w Górznie (Matulewski 2011, 2013 c, d). Analizując dane rejestru z ewidencji wypożyczeń, wodny ruch turystyczny nad jeziorem Bachotek dla okresu 2009-2011 wyniósł średnio 4000 osób. Współcześnie na badanym terenie nie są prowadzone badania monitoringu ruchu turystycznego. Jedyną mierzoną wartością w tym zakresie jest liczba odwiedzających miejskie muzea w Brodnicy, która w roku 2016 wyniosła ponad 43 tysiące osób (Bank Danych Lokalnych 2018). Uzyskane wyniki w tej pracy monitoringu ruchu turystycznego stanowią pierwsze szczegółowe pomiary dotyczące rzeczywistego obciążenia szlaków turystycznych na Pojezierzu Brodnickim.

W okresie pomiarowym 2014-2016 ruchu turystycznego średnie obciążenie szlaku wyniosło 8950 osób. Zauważono w kolejnych latach wzrost liczby osób użytkujących szlak turystyczny w okolicach jeziora Bachotek. Największą frekwencją turystyczną charakteryzował się sierpień oraz okres maj-lipiec. Okres ten pozostawał w ścisłym związku z panującymi warunkami do uprawiania turystyki pieszej i rowerowej, w tym z wystąpieniem dni z opadem atmosferycznym. Na tle całego okresu pomiarowego wyraźną dominację wykazuje ruch weekendowy, którego wartości są w sezonie (lipiec - sierpień) średnio dwa do trzech razy wyższe niż w dni powszednie. Na tak wysokie obciążenie szlaków wpłynęła niewątpliwie bardzo dobra pogoda oraz wystąpienie okresu urlopowego. Poza sezonem turystycznym ruch na szlakach koncentruje się również głównie podczas dni weekendowych.

Na podstawie uzyskanych danych widoczne jest, że szlak traktowany jest przez turystów, jako trasa wejścia w kierunku Stacji Wodnej PTTK Bachotek z plażą i kąpieliskiem. Zwiększoną frekwencją turystyczną na badanym szlaku wykazano dla okresu od początku maja do połowy września. Obciążenie szlaków w tym okresie stanowi średnio 88% całkowitego ruchu turystycznego na szlaku w ciągu całego okresu pomiarowego 2014-2016. Jest to, więc okres największej frekwencji turystycznej na stanowisku Bachotek, w którym z uwagi na największe użytkowanie szlaku, należałoby się spodziewać najbardziej wzmożonego tempa przekształcania rzeźby i negatywnego wpływu na drzewa na skutek denudacji antropogenicznej.

10. Analiza dendrochronologiczna pni sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) poddanej i niepoddanej presji turystycznej na stanowisku Bachotek

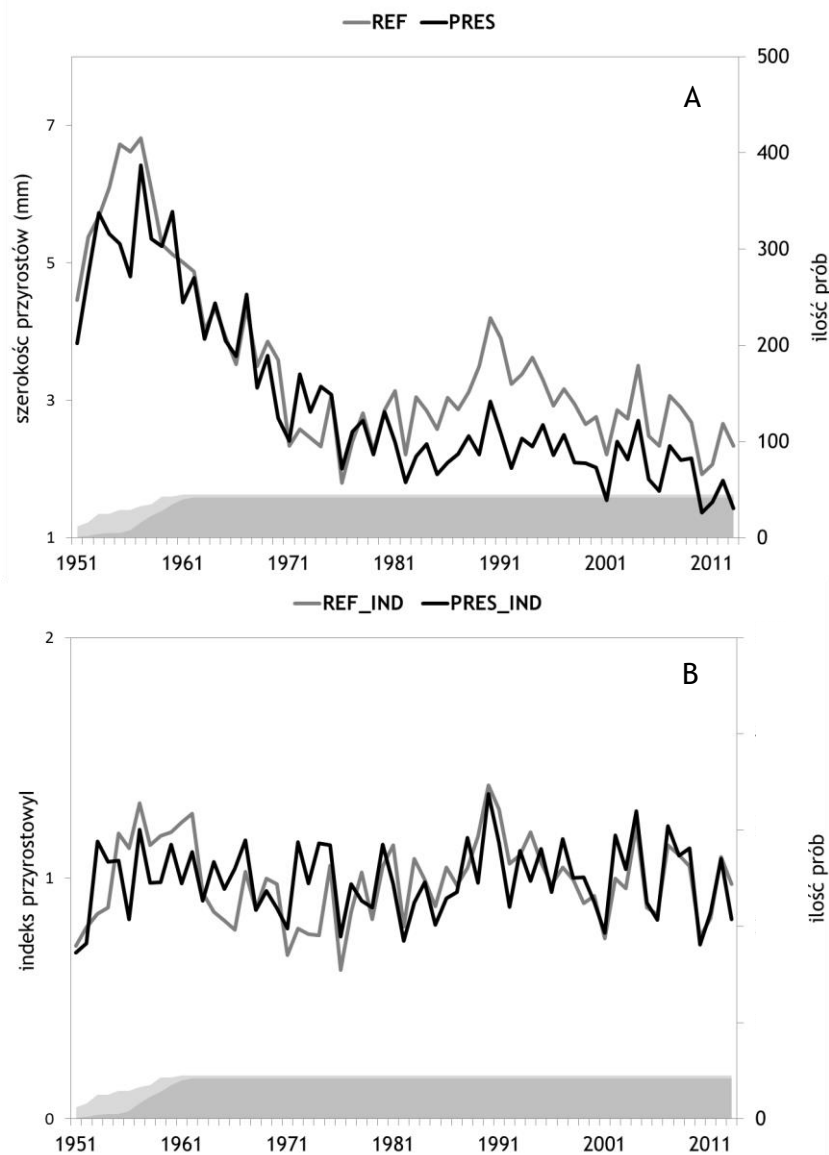
10.1. Analiza wzoru przyrostowego sosny zwyczajnej dla dwóch stanowisk

Sekwencje przyrostów rocznych sosny zwyczajnej dla drzew niepoddanych presji turystycznej opracowano dla okresu 1942-2014, z kolei dla drzew poddanych presji opracowano dla okresu 1951-2014 (Ryc. 22; wykresy prezentują wspólny zakres czasowy obu chronologii; należy zaznaczyć, iż tylko jedno drzewo w chronologii niepoddanej presji pokrywało najstarszy okres, tj. 1942-1951). Do połowy lat 70. XX wieku rozpoznano wyraźne podobieństwo we wzorze przyrostowym obu chronologii. Najbardziej zauważalna różnica w przyroście radialnym drzew rosnących wzdłuż szlaku turystycznego była widoczna od końca lat 70. ubiegłego wieku w postaci stłumienia szerokości przyrostów rocznych w pniu. Od tego momentu do lat współczesnych drzewa poddane presji (PRES) wykazują niższe średnie szerokości przyrostów rocznych w porównaniu do wzorca przyrostowego drzew rosnących na stanowisku kontrolnym (REF), tj. niepoddanych presji turystycznej (Ryc. 22A).

Współczynnik korelacji (r) dla okresu 1951-2014 między dwiema chronologiami rzeczywistymi wyniósł $R=0,85$ ($p<0,001$), z kolei dla chronologii indeksowanych $R=0,64$ ($p<0,001$). Wartość współczynnika zbieżności wzorca przyrostowego (niem. *Gleichläufigkeit*; GLK) wyniosła $GLK=83,9\%$. Średnia korelacja pomiędzy seriami ($Rbar$) wyniosła odpowiednio $Rbar= 0,50$ (REF) oraz $Rbar= 0,56$ (PRES). Wartości wskaźnika EPS wyniosły odpowiednio $0,97$ (REF) oraz $0,98$ (PRES), co wskazuje na wysoką reprezentatywność zestawionych chronologii. Wartości zestawionych statystyk opisowych (Tab. 3) informują, że wzorzec przyrostowy w obu chronologiach jak i pomiędzy nimi, był wysoce zbliżony.

Tab. 3. Statystyki opisowe chronologii indeksowanej drzew sosny zwyczajnej poddanych (PRES) i niepoddanych (REF) presji turystycznej na stanowisku Bachotek.

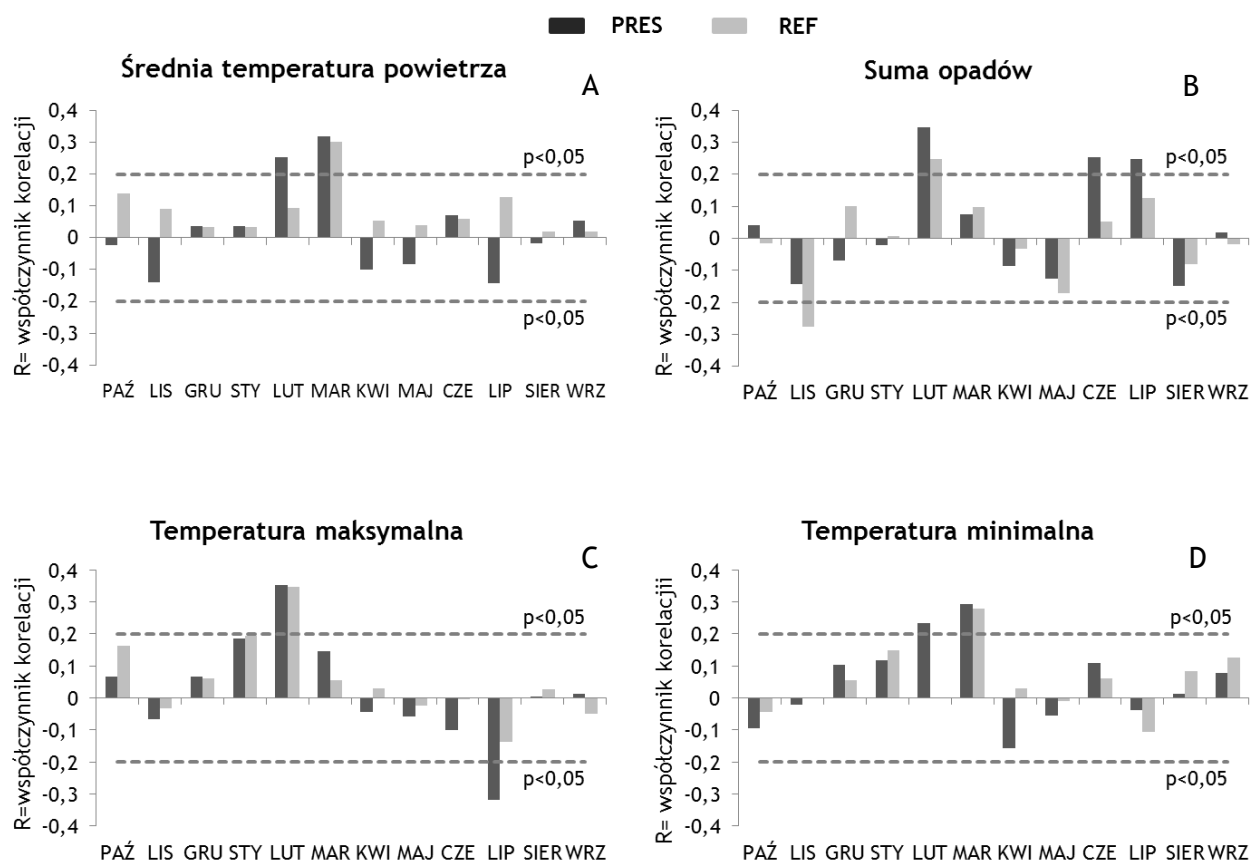
ID CHRONOLOGII	POWIERZCHNIA BADAWCZA	
	REF	PRES
OPIS STANOWISKA	REFERENCYJNE	W OBRĘBIE SZLAKU
ZAKRES CHRONOLOGII	1951-2014	1951-2014
LICZBA DRZEW	45	42
IŁOŚĆ WYWIERTÓW	104	138
SERIAL CORRELATION	0.703	0.747
INTER SERIES CORRELATION (Rbar)	0.501	0.565
EXPRESSED POPULATION SIGNAL (EPS)	0.967	0.977
STANDARD DEVIATION (SD)	0.242	0.191
MEAN SENSITIVITY (MS)	0.212	0.208
SIGNAL TO NOISE RATIO (SNR)	5.345	6.332
FIRST-ORDER AUTOCORRELATION (AC1)	0.369	0.103



Ryc. 22. Chronologia rzeczywista (A) oraz chronologia indeksowana (B) sosny zwyczajnej poddanej presji turystycznej (PRES; linia czarna) i niepoddanej presji (REF; linia szara) ze stanowiska Bachotek dla okresu 1951-2014. Obszary zacienione określają liczbę drzew użytych do konstrukcji obu chronologii poddanej presji (szraf jasnoszary) i chronologii niepoddanej presji (szraf ciemnoszary)

10.2. Analiza dendroklimatologiczna

Obie chronologie sosny zwyczajnej cechowały się zbliżoną odpowiedzią przyrostu rocznego na ekstremalne warunki temperatury powietrza i opady (Ryc.23). Należy jednak zauważyć, że drzewa rosnące wzdłuż szlaku turystycznego (PRES) charakteryzowała większa wrażliwość klimatyczna, co wykazano w postaci i) wyższych współczynników korelacji uzyskanych dla chronologii PRES w analizie klimat-wzrost oraz ii) większej ilości zmiennych klimatycznych posiadających istotny statystycznie związek z chronologią PRES (Ryc.23).



Ryc. 23. Wartości współczynnika korelacji Pearson'a między średnią miesięczną temperaturą (A), sumą opadów (B); temperaturą maksymalną (C), temperaturą minimalną (D), a chronologią indeksowaną sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris*) poddanej presji turystycznej (PRES; czarny słupek) oraz ze stanowiska referencyjnego (REF; szary słupek); linia przerywana oznaczona poziom istotności statystycznej $p < 0,05$. Wartości miesięczne poszczególnych zmiennych klimatycznych zostały zaszeregowane od października roku poprzedzającego do września roku aktualnego, tj., dla którego był mierzony wzrost radialny. Źródło danych klimatycznych: stacja meteorologiczna IMGW Toruń.

W badanym okresie 1951-2014 reakcja przyrostowa sosny w obrębie obu stanowisk była w większym stopniu kształtowana przez warunki termiczne niż opadowe (Ryc.23). W odniesieniu do obu chronologii stwierdzono istotną statystycznie zależność pomiędzy temperaturą miesięcy zimowych (styczeń, luty) i wiosennych (marzec) a przyrostem sosny (Ryc.23). Wzrost drzew na obu stanowiskach był bardziej zależny od temperatury maksymalnej niż minimalnej. Największy wpływ na wzrost drzew poddanych presji turystycznej (PRES) oraz drzewa ze stanowiska referencyjnego (REF) miała temperatura maksymalna lutego (PRES: $R=0,36$; $p < 0,001$; REF: $R=0,35$, $p < 0,001$). Ponadto dla drzew PRES wykazano istotną negatywną zależność pomiędzy przyrostem radialnym a maksymalną temperaturą lipca ($R=-0,32$; $p < 0,001$) (Ryc.23C).

Największy pozytywny wpływ opadów w procesie budowy słoja przyrostu rocznego sosny na obu stanowiskach wykazano dla lutego (REF: $R=0,25$; $p<0,01$; PRES: $R=0,35$, $p<0,001$), czyli okresu przed fazą inicjowania aktywności kambium. Rozpoznano negatywne powiązanie pomiędzy sumą opadów listopada roku poprzedzającego formowanie słoja a przyrostem drewna ze stanowiska referencyjnego (REF: $R=-0,28$; $p<0,01$). Ponadto dla drzew poddanych presji turystycznej (PRES) zauważono silne zależności pomiędzy indeksem przyrostowym sosny a wysokością opadu w czerwcu ($R=0,23$; $p<0,05$) oraz w lipcu ($R=0,22$; $p<0,05$) (Ryc.23B).

10.3. Analiza lat wskaźnikowych

Reakcja przyrostowa sosny poddanej presji turystycznej (PRES) przejawiała się częstszymi zmianami szerokości słoja rocznego, którą odzwierciedla większa liczba lat wskaźnikowych wykazana dla chronologii drzew poddanych presji turystycznej. W okresie 1951-2014 dla drzew rosnących na stanowisku referencyjnym (REF) wyróżniono 6 pozytywnych i 7 negatywnych lat wskaźnikowych, natomiast dla sosen poddanych wydeptywaniu w obrębie szlaku turystycznego (PRES) 18 lat pozytywnych i 14 lat negatywnych. Z pośród wyznaczonych lat wskaźnikowych 13 lat było wspólnych dla obu stanowisk. Wszystkich 13 lat wskaźnikowych, tj. 6 pozytywnych oraz 7 negatywnych rozpoznanych dla stanowiska referencyjnego (REF) było wykazanych dla stanowiska poddanego presji turystycznej (PRES).

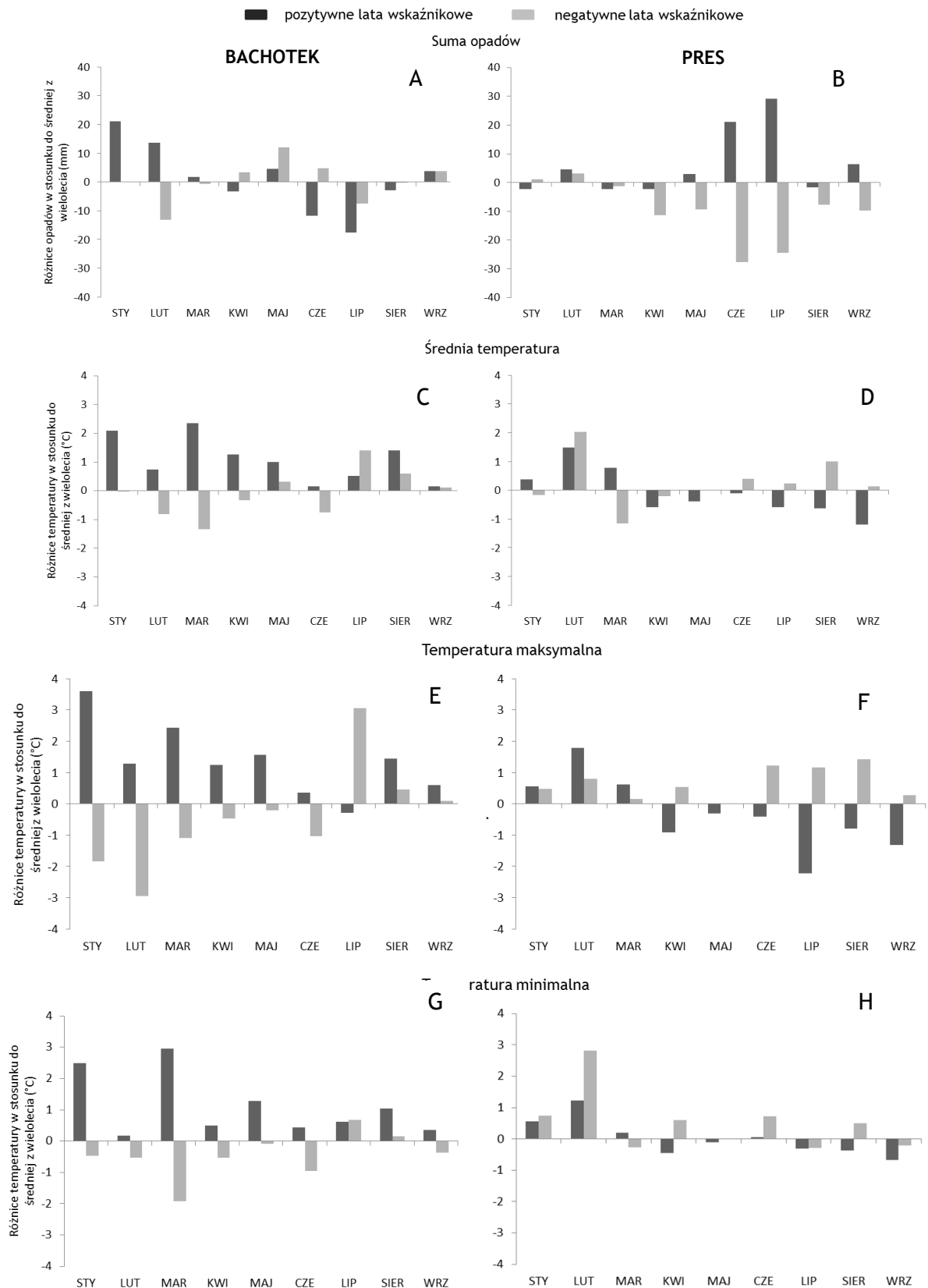
Pozytywnymi latami wskaźnikowymi w obrębie obu stanowisk były lata 1952, 1983, 2002, 2004, 2007 oraz 2012. Natomiast negatywnymi latami wskaźnikowymi dla dwóch chronologii były lata 1963, 1971, 1976, 1982, 2001, 2005 oraz 2010. Pozostałych 19 (tj. 60%) zaobserwowanych lat wskaźnikowych związanych było ze swoistą reakcją przyrostową wykazaną dla drzew ze stanowiska poddanego presji turystycznej (PRES). Wyznaczone lata wskaźnikowe dla sosen rosnących na szlaku turystycznym (PRES) tworzyły w 11 przypadkach sygnatury. Były to lata 1951-1953, 1957-1958, 1971-1972, 1976-1977, 1982-1983, 1985-1986, 1988-1990, 1992-1993, 2001-2002, 2004-2005, 2012-2014. W 80% sygnatur zauważyć można prawidłowość, że po wyraźnej redukcji przyrostu następował wzrost szerokości słoju. W Tabeli 4 zestawiono rozpoznane lata wskaźnikowe dla sosen z obu stanowisk z podaniem krótkiej charakterystyki warunków termiczno-pluwialnych w tych latach.

Tab. 4. Charakterystyka pozytywnych (kolor jasny czerwony) oraz negatywnych (jasny niebieski) lat wskaźnikowych sosny zwyczajnej poddanej (PRES) i niepoddanej (REF) presji turystycznej na stanowisku Bachotek wraz z potwierdzeniem ich wystąpienia w publikacjach naukowych dotyczących sosny zwyczajnej na terenie Polski północnej; kolorem ciemno szary zaznaczono pozytywne wspólne lata wskaźnikowe dla obu chronologii; kolorem jasno szarym zaznaczono negatywne wspólne lata wskaźnikowe gwiazdką oznaczono: *Zielski 1993 (1911-1991) **Zielski i in.1998 (1942-1995) *** Zielski, Barankiewicz 2000 (1951-1997). Rozpoznania warunków termiczno-pluwialnych dokonano na podstawie analizy danych klimatycznych ze stacji meteorologicznej IMGW Toruń

REF			PRES			ROZPOZNANE WARUNKI TERMICZNO-PLUWIALNE	
ROK		% prób	ROK		% prób		
POZ [+]	NEG [-]		POZ [+]	NEG [-]			
				1951	100	suchy rok	*.***.***
1952		100	1952		100	ciepła. ale sucha zima	*.***
			1953		100		
			1957		100		
				1958	81.3		
	1963	88.9		1963	80.6	mroźna zima. suche i upalne lato	*.***
				1968	92.3		
	1971	95.6		1971	82.4	ostra zima	
				1972	97.7	?	
				1974	83.8	ciepłe i deszczowe lato	
	1976	95.6		1976	97.7	bardzo mroźny luty	*.***
				1977	88.1	ciepłe i deszczowe lato	
				1980	95.2	bardzo wilgotny rok	**.***
	1982	97.8		1982	92.3	suche i upalne lato	**
1983		88.9	1983		83.3	ciepła zima	
				1985	92.3	?	**
				1986	86.7	?	*
				1988	90.5	?	
				1989	88.6	suchy i ciepły rok	***
				1990	95.2	ciepła zima	*.***
				1992	83.3	?	**.***
				1993	81.0	?	
				1997	85.7	duża liczba opadów. ciepłe lato	***
	2001	85.5		2001	89.5	mroźna zima	
2002		80.0	2002		100	ciepła zima duże opady w lutym	
2004		80.0	2004		81.0	ciepły luty i marzec	
	2005	86.7		2005	92.3	suche lato	
2007		88.9	2007		97.6	ciepły marzec i duże opady latem	
	2010	91.1		2010	97.6	mroźny styczeń	
2012		93.3	2012		85.7	ciepły rok	
				2013	97.6	mroźny marzec	
				2014	92.1	?	

Pozytywne lata wskaźnikowe rozpoznane dla obu chronologii sosny zwyczajnej (zwanymi dalej BACHOTEK; nazwa ta odnosi się do lat wskaźnikowych, które rozpoznano dla obu chronologii, tj. chronologii poddanej presji turystycznej (PRES) i chronologii referencyjnej (REF), Ryc. 24) związane były z niższą sumą opadów dla czerwca i lipca oraz wyższą sumą opadów dla stycznia i lutego wykazanych na tle wielolecia (Ryc.24). Ponadto dla pozytywnych lat wskaźnikowych w obu chronologiach (BACHOTEK; Ryc. 24) rozpoznano wyższe wartości ekstremalnej średnich miesięcznych wartości temperatury powietrza na tle wielolecia (Ryc. 24). W negatywnych latach wskaźnikowych wykazanych dla obu stanowisk (BACHOTEK) występowały niedobory opadów w lutym i lipcu oraz ich nadmiar w maju i czerwcu (Ryc. 24). Ponadto negatywne lata wskaźnikowe cechowały wyższe wartości ekstremalnej temperatury powietrza w lipcu oraz sierpniu (Ryc. 24).

Dla stanowiska poddanego presji turystycznej (PRES) zaobserwowano silniejsze zależności pomiędzy występowaniem zarówno negatywnych jak i pozytywnych lat wskaźnikowych a czynnikiem klimatycznym. Pozytywne lata wskaźnikowe w chronologii sosny poddanej presji turystycznej (PRES) związane były z wyższymi wartościami opadów dla czerwca i lipca w stosunku do średniej z wielolecia. Z kolei dla negatywnych lat wskaźnikowych, wykazanych dla chronologii (PRES), wykazano niższe sumy opadów (Ryc.24). W pozytywnych latach wskaźnikowych chronologii (PRES) stwierdzono wyższą temperaturę maksymalną w początkowych miesiącach roku oraz znacznie niższą temperaturę w okresie letnim (Ryc.24). Z kolei negatywne lata wskaźnikowe dla chronologii (PRES) cechowały wyższe wartości temperatury maksymalnej w tym okresie (Ryc.24).



Ryc. 24. Porównanie różnic średniej sumy opadów, średniej temperatury, temperatury maksymalnej oraz temperatury minimalnej, danego miesiąca ze średnią z wielolecia dla pozytywnych i negatywnych lat wskaźnikowych wyznaczonych dla obu chronologii (BACHOTEK: A, C, E, G; tj. chronologii poddanej presji turystycznej (PRES) i chronologii referencyjnej (REF) łącznie) oraz wyłącznie dla stanowiska drzew poddanych presji turystycznej (PRES: B, D, F, H)

10.4. Dyskusja wyników analizy dendrochronologicznej pni sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) poddanej i niepoddanej presji turystycznej na stanowisku Bachotek

Analiza dendroklimatologiczna

Sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris* L.) charakteryzuje się dużą zmiennością cech morfologicznych, anatomicznych, fizjologicznych (Białobok 1967, 1970; Antonova, Stasova 1993), w przystosowaniu do edaficznego zróżnicowania siedlisk i do rozmaitych warunków orograficznych. Okres aktywności kambium sosny zwyczajnej rozpoczyna się w Polsce w maju i trwa do końca września, po czym drzewa gromadzą substancje zapasowe (Ermich 1959; Obmiński 1970; Zielski 1997). Wcześniejsze badania wykazały, że wpływ temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w okresie spoczynkowym sosny mają istotny wpływ na szerokość słoja rocznego w nadchodzącym sezonie wegetacyjnym (Zielski, Sygit 1998). W pracy potwierdzono silny udział warunków termiczno-pluwialnych okresu poprzedzającego kształtowanie się przyrostu rocznego, w tym szczególnie temperatury maksymalnej lutego i minimalnej lutego i marca. Sosny z obu badanych powierzchni (PRES i REF) cechowały się zbliżoną odpowiedzią przyrostu radialnego na ekstremalne warunki klimatyczne tj. temperaturę maksymalną i minimalną, przy czym obserwowane zależności były silniejsze w przypadku sosen podanych presji turystycznej (PRES) (Ryc. 23). Scharakteryzowane reakcje przyrostowe sosen na parametry klimatyczne w obrębie obu stanowisk można uznać za typowe. Rola temperatury lutego i marca dla wzrostu sosny zwyczajnej z obszaru północnej Polski była podkreślana przez wielu autorów (Zielski 1996; Zielski, Sygit 1998; Cedro 2001a,b ; Feliksik, Wilczyński 2009; Zielski i in. 2010; Koprowski i in. 2011; Koprowski i in. 2012). Dodatkowo niniejsze badania wykazały, iż większy wpływ na przyrost roczny sosny miała temperatura maksymalna niż minimalna (Ryc. 23).

Kolejnym czynnikiem wpływającym na rytm przyrostowy sosny były warunki pluwialne lutego. Taki charakter powiązań między wzrostem sosny zwyczajnej a opadami lutego stwierdziła również A. Cedro (2001a,b), M. Koprowski i in. (2011) oraz E. Feliksik, S. Wilczyński (2009) w pasie Pomorza. Przetom lutego i marca to okres kiedy woda jest niezbędna dla drzew z uwagi na inicjację procesów biochemicznych (Przybylski 1993). Dodatkowo na uwagę zasługuje wykazanie negatywnej zależności rytmu przyrostowego sosny niepoddanej presji turystycznej (REF) z opadami atmosferycznymi listopada poprzedzającego rok odłożenia przyrostu rocznego. Fakt ten nie był rozpoznany we wcześniejszych pracach. Negatywny wpływ sumy opadów listopada na wzrost sosny na stanowisku referencyjnym należy potencjalnie wiązać z podwyższonym poziomem wód gruntowych, co nie sprzyja kondycji drzew podczas nadchodzącej zimy. Z uwagi na wysoką kompakcję pokrywy glebowej na szlaku należy oczekiwać, iż drzewa rosnące w jego otoczenia nie są narażone na nadmiar wody w gruncie. Mimo, że w literaturze podkreślana jest wysoka tolerancja sosny w zakresie stosunków wodnych i opadów atmosferycznych (Przybylski 1993), nadmiar wody w glebie wpływa niekorzystnie na rozwój systemu korzeniowego (Jasnowska 1977).

W literaturze silniejszą zależność przyrostu rocznego sosny od opadów wykazano w okresie wiosenno-letnim tzn. od kwietnia do lipca (Zielski 1996; Zielski, Sygit 1998; Cedro 2001a,b). Uzyskana odpowiedź przyrostowa na letnie opady drzew poddanych presji turystycznej (PRES) znacznie odbiega od wartości uzyskanych dla drzew ze stanowiska referencyjnego (REF). Statystycznie istotne zależności wzrostu radialnego sosny od opadów w czerwcu i lipcu wykazano jedynie dla drzew rosnących wzdłuż szlaku turystycznego (PRES). Tym samym pozytywne powiązanie między przyrostem drzew poddanych presji turystycznej (PRES) a opadami w lipcu oraz ich negatywna zależność od temperatury maksymalnej lipca definiują odmienną, od wykazywanej w literaturze, wrażliwość klimatyczną sosny zwyczajnej z Polski północno-

środkowej. Podobny przykład rozpoznano dla sosny w Dębicach koto Włocławka (Zielski, Barankiewicz 2000), gdzie wzrost sosny zagrożony był deficytem wody w sezonie letnim. Zwiększone zapotrzebowanie sosny na wodę przypada na czerwiec i lipiec, które są miesiącami najintensywniejszego wzrostu (Obmiński 1970). Jednocześnie są to miesiące, w których ruch turystyczny w obrębie analizowanego stanowiska Bachotek jest nasilony (Ryc. 19). W okresie letnim presja ruchu turystycznego powoduje pogorszenie powietrznych i wodnych właściwości gleb na szlakach (Pstrocka-Rak 2017). Mechaniczne oddziaływanie ruchu turystycznego poprzez wydeptywanie powoduje degradację wierzchniej warstwy gleby oraz większą kompakcję gleby na szlakach, co skutkuje obniżeniem zdolności retencyjnej gleby (Prędko 2002). Proces ten powoduje zmniejszenie wilgotności oraz pojemności wodnej gleby na szlakach i w ich otoczeniu (Dębicki i in. 2015). Potwierdzeniem tego są przeprowadzone badania glebowe w obszarze badań w okresie letnim, na podstawie których określono, iż wilgotność gleby w strefie szlaku jest średnio o 43% niższa w porównaniu do powierzchni na stanowisku referencyjnym (Matulewski i in. 2015). Wszystkie te czynniki mogą wskazywać, na potencjalny deficyt wody i stres hydrologiczny sosen rosnących na stanowisku poddanym presji turystycznej (PRES).

Lata wskaźnikowe

Rozpoznane lata wskaźnikowe w dużej mierze znajdują potwierdzenie we wcześniejszych pracach badawczych przeprowadzonych nad sosną zwyczajną w środkowej Polsce dla okresu 1951-1997 (Zielski 1993; Zielski i in. 1998; Zielski, Barankiewicz 2000) (Tab.4). Analiza lat wskaźnikowych potwierdziła silną wrażliwość drzew poddanych presji turystycznej (PRES) na zmienność czynników klimatycznych. Dla sosny ze stanowiska (PRES) wykazano większą liczbę lat wskaźnikowych, niż dla sosny rosnącej na stanowisku referencyjnym (REF). Kluczowe znaczenie dla lat wskaźnikowych sosny rosnącej wzdłuż szlaku (PRES) miała maksymalna temperatura powietrza oraz opady w okresie letnim.

Wpływ czynników klimatycznych na występowanie zwiększonej ilości lat wskaźnikowych w chronologii sosny poddanej presji turystycznej (PRES) nie jest jednoznaczny. Rozpoznany wysoce heterogeniczny udział czynników klimatycznych na wykształcenie lat wskaźnikowych dla chronologii (PRES) może świadczyć o współdziałaniu innego, pozaklimatycznego czynnika. Występowanie lat wskaźnikowych w chronologii sosny ze szlaku turystycznego (PRES) i jej silną reakcję na warunki termiczno-pluwalne czerwca można pośrednio wiązać z rosnącym natężeniem ruchu turystycznego, jaki notowany jest w tym okresie w obszarze badań. Wzrost liczby lat wskaźnikowych dla sosen poddanych presji turystycznej (PRES) zaobserwowano od początku lat 70. XX wieku. Były to jednocześnie okres w którym stwierdzono intensyfikację funkcji turystycznych Pojezierza Brodnickiego (Zielski 1978; Zielski i in. 1998). W tym okresie oznakowano wcześniej istniejący szlak turystyczny w obszarze badań (1977) oraz rozbudowano ośrodki wypoczynkowe znajdujące się nad jeziorem Bachotek (Miłoszewski 2011). Przeprowadzone badania pni, jak i korzeni (dalsza część pracy) wykazały, iż w tym okresie istotny wpływ denudacji antropogenicznej na przyrost radialny sosny zwyczajnej wzdłuż szlaku turystycznego stanowiska Bachotek został zainicjowany.

Od lat 70. XX wieku udokumentowano wyraźny negatywny wpływ turystyki na przyrosty radialne sosny zwyczajnej rosnącej w okolicach jeziora Wielkie Partęczyny (Zielski i in. 1998) położonego ok. 20 km od obszaru badań. Na siedliskach wydeptywanych zauważono nagłe oraz bardzo silne zahamowanie przyrostów rocznych sosen. Wyraźny związek pomiędzy natężeniem ruchu turystycznego a kondycją drzew rozpoznano również na terenie polskich Tatr (Ciapała i in. 2014), gdzie dla świerków zwyczajnych rosnących w obrębie szlaków wykazano redukcję wzrostu. W niniejszej pracy sosny poddane presji turystycznej reagowały podobnie,

tj. zmniejszeniem szerokości przyrostów rocznych zaobserwowanym na przełomie lat 70. i 80. XX wieku (Ryc. 22) w czasie, w którym zaznaczył się silny rozwój ruchu turystycznego nad jeziorem Bachotek (Dysarz 1993).

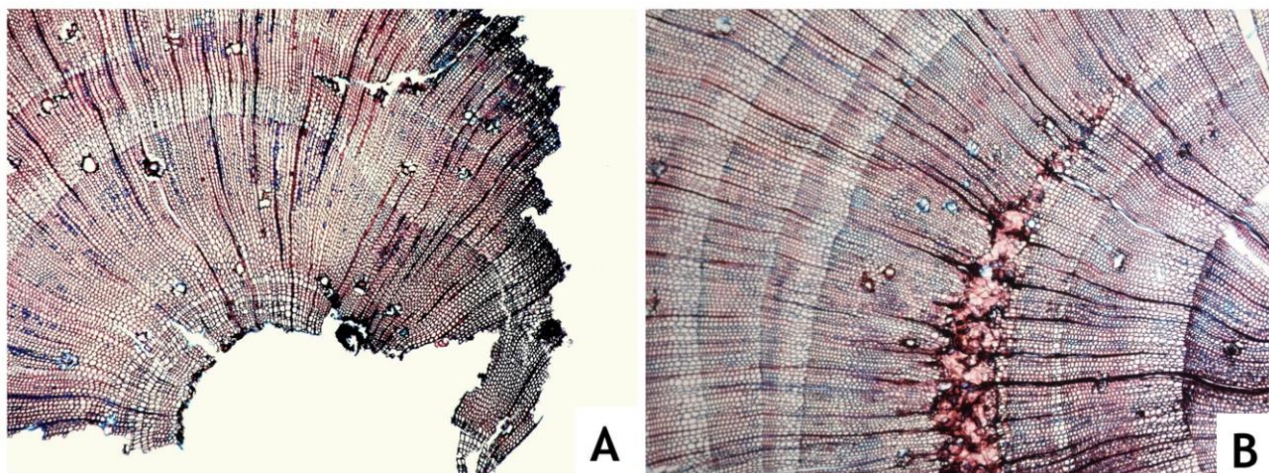
Do pełnej charakterystyki warunków w latach wskaźnikowych niewątpliwie przydatne byłoby porównanie wartości natężenia ruchu turystycznego z przyrostem drzew. Jednakże dla analizowanego obszaru badań statystyki natężenia ruchu turystycznego są niedostępne. Istotne byłoby również uzupełnienie analiz o stały monitoring warunków glebowych wzrostu drzew na stanowiskach badawczych, aby móc skutecznie formułować zależności klimat-wzrost oraz antropopresja-wzrost.

Powyższe rozważania wskazują, iż ruch turystyczny modyfikuje warunki wzrostu drzew, co widoczne jest w ich reakcji przyrostowej. Metoda dendrochronologiczna pni stanowić może użyteczne narzędzie w badaniach nad wpływem denudacji antropogenicznej na drzewostany, będąc cennym uzupełnieniem badań wpływu antropopresji turystycznej na stan ekosystemów leśnych w strefie niżowej.

11. Charakterystyka korzeni odsłoniętych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) ze szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek

11.1. Cechy zewnętrzne korzeni odsłoniętych

Do przeprowadzenia szczegółowych badań dendrogeomorfologicznych wytypowano odcinek szlaku turystycznego nad jeziorem Bachotek stanowiący jeden z najczęściej uczęszczanych szlaków na terenie Pojezierza Brodnickiego. Pobrano 105 próbek korzenia odsłoniętego, z czego po analizie makroskopowej do dalszych analiz wytypowano 88 próbek z 42 drzew sosny zwyczajnej rosnących wzdłuż szlaku turystycznego. Ze względu na efekt bardzo dużej presji turystycznej dla 17 prób korzeni nie było możliwości przeprowadzenia analiz dendrogeomorfologicznych z uwagi na silne zdeformowanie rdzenia, próchniejące drewno lub obecność korzenia martwego. Cechy te są dowodem na intensywne oddziaływanie wydeptywania na systemy korzeniowe drzew, a tym samym pokrywą glebową szlaku. Wszystkie pobrane korzenie posiadały widoczne zniszczenia mechaniczne, które w przypadku korzeni pobranych ze szlaku należy wiązać z ciągłym wydeptywaniem. Najczęściej spotykanym objawem dużego oddziaływania mechanicznego na korzeń było starcie warstwy kory oraz kambium (Ryc.25A), któremu towarzyszyło wykształcenie blizn (Ryc. 25B) i nadmierna produkcja żywicy. Łącznie z 23 drzew rosnących w obrębie szlaku turystycznego pobrano po jednym wyrzynku z odsłoniętej części korzenia sosny zwyczajnej, natomiast z 19 drzew pobrano więcej niż jedną próbę z korzenia.



Ryc. 25. Zmiany strukturalne i anatomiczne odsłoniętych korzeni sosny zwyczajnej ze szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek z widocznym starciem kambium rdzenia (A) oraz wykształceniem blizny (B)

Wszystkie pobrane korzenie w obrębie szlaku turystycznego były podparte z powierzchnią gleby i nie tworzyły układu kaskadowego, tj. naturalnych stopni związanych ze spadkiem terenu. Stwierdzono, że po odsłonięciu korzeni ich późniejszy wzrost po obu stronach osi spowodował zmianę pozycję i względne podniesienie się osi korzenia średnio o 5 cm (Załącznik 3). Najczęściej spotykanym objawem dużego oddziaływania mechanicznego na korzeń było wykształcenie koncentrycznych przyrostów rocznych, deformacja ich kształtu oraz nadmierna produkcja żywicy. Korzenie eksponowane wyróżniały się znacznie większą powierzchnią i średnicą w stosunku do pozostałych części podziemnych korzeni. Dla badanego szlaku turystycznego rozpoznano charakterystyczny układ systemu korzeni drzew sosny zwyczajnej z wyraźnym podziałem na strefy zastonięte (strefa poza szlakiem, strefa szlaku) i odsłonięcia

(strefa szlaku) (Ryc. 7). Strefa odstłonięta (szlaku) stanowi dowód na działanie procesów erozyjno-denudacyjnych, modyfikowanych i inicjowanych w dużym stopniu przez ruch turystyczny, w tym turystykę pieszą i rowerową.

Maksymalna średnica korzenia odstłoniętego wyniosła 56,3 mm (B15A1), a minimalna 8,2 mm (B43A), przy średniej wynoszącej 24 mm. Maksymalna wysokość podparcia korzenia nad aktualną powierzchnią gleby wyniosła 51,2 mm (B02A), a minimalna 5,1 mm (B22C), przy średniej wynoszącej 18,8 mm. Największa wartość powierzchni korzenia wyniosła 21,4 cm² (B01A1C), a najmniejsza 0,6 cm² (B43C) i stanowiła jedynie 3% powierzchni największego badanego korzenia. Średnią wielkość korzeni odstłoniętych ze szlaku wyliczono na 5,8 cm². Maksymalna wartość współczynnika kolistości korzenia wyniosła 0,96 (B22A), a minimalna 0,66 (B33A). Średnia dla wszystkich odstłoniętych korzeni wyniosła 0,85. Cecha ta była ujemnie skorelowana z powierzchnią korzenia. Zaobserwowano, iż wraz ze wzrostem powierzchni korzenia malała wartość współczynnika kolistości ($r=-0,25$, $p<0,05$).

Spśród 42 analizowanych drzew ze szlaku turystycznego najdłuższą pojedynczą część odstłoniętą o długości 103 cm posiadało drzewo B02, a najkrótszą B45 o długości 16 cm. Średnia długość pojedynczej eksponowanej części korzenia na powierzchni szlaku wyniosła 42 cm. Z kolei najbardziej rozbudowaną część odstłoniętą posiadało drzewo B01, którego całkowita długość części odstłoniętej wyniosła 187 cm. Najdalej oddaloną część odstłoniętą korzeni od pnia posiadało drzewo B15 wynoszącą 4,80 m oraz drzewo B09-4,55 m. Najbliżej pnia była zlokalizowana część odstłonięta z drzewa B35-1,65 m. Średnia odległość części eksponowanej korzenia od pnia wyniosła 2,98 m. 67% analizowanych korzeni położonych było prostopadle względem przebiegu szlaku, z kolei 33% próbek korzeni wykazało równoległe ułożenie. Średnia szerokość szlaku turystycznego w miejscu odstłonięcia korzenia wyniosła 144 cm (Załącznik 3).

11.2. Typologia drzew z odstłonięciami korzeni ze szlaku turystycznego

Podstawą wyznaczenia typów drzew z odstłonięciami korzeni sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) ze szlaku turystycznego był przebieg systemu korzeniowego drzewa uwzględniający rzędowość korzeni oraz liczbę ich odstłonieć. Analizowane drzewa sosny zwyczajnej rosnące wzdłuż szlaku turystycznego zostały przyporządkowane do następujących grup:

- drzewa z pojedynczym odstłonięciem (I),
- drzewo z odstłonięciem korzenia przybyszowego (II),
- drzewa z odstłonięciem strefowym (III),
- drzewo z odstłonięciem strefowym z korzeniem przybyszowym (IV),
- drzewo z pojedynczym odstłonięciem wraz z analizą sąsiedniego korzenia zastłoniętego (V).

Drzewa przyporządkowane do pierwszego typu (I) posiadały pojedyncze odstłonięcie korzenia bocznego zlokalizowane w strefie szlaku turystycznego. Na powierzchni szlaku widoczny był pojedynczy korzeń z częścią odstłoniętą o różnej długości, nieposiadający sąsiednich rozgałęzień. Był to częstszy i najprostszy do wyodrębnienia typ odstłonięcia korzeni sosny zwyczajnej w strefie analizowanego szlaku turystycznego (Ryc.26A).

Drugi typ drzewa (II) posiadał w strefie szlaku turystycznego wyłącznie odstłonięcie korzenia przybyszowego będącego odgałęzieniem głównego korzenia nieodstłoniętego mającego bezpośrednie połączenie z podstawą pnia (Ryc.26B).

Typ drzewa z odstłonięciem strefowym (III) nawiązuje do rzędowości korzeni. W tym przypadku drzewo posiadało więcej niż jedno odstłonięcie równorzędnych względem siebie

korzeni tworzących układ strefowy. W granicach szlaku turystycznego pojedynczy korzeń rozgałęział się na kilka równoległe rosnących części, która każda była eksponowana na powierzchni szlaku (Ryc.26C).

Czwarty typ, tj. drzewo z odstonięciem strefowym z korzeniem przybyszowym (IV), prezentował bardziej rozbudowany układ systemu korzeniowego. W porównaniu do typu drzewa z pojedynczym korzeniem odstoniętym, niniejszy przykład posiadał dodatkowo eksponowane na powierzchni szlaku odgałęzienie korzenia przybyszowego (Ryc.26D).

Wyodrębnienia ostatniego typu drzewa (V) sosny zwyczajnej z odstoniętym korzeniem dokonano z uwagi na położenie drzewa w bliskiej odległości od szlaku turystycznego oraz interesujący układ systemu korzeniowego z pojedynczym odstonięciem i równoległe biegnącą częścią zastoniętą korzenia (tj. częścią nieeksponowaną, naturalnie przyrastającą w glebie) (Ryc.26E). Był to najrzadszy i trudny do wyodrębnienia typ drzewa z odstonięciem korzenia. Na analizowanym szlaku rozpoznano wyłącznie jeden taki przypadek.

Z spośród 42 drzew sosny zwyczajnej z odstonieniami korzeni najwięcej z nich, tj. 38% reprezentowało pierwszy typ tzw. drzewo z pojedynczym odstonieniem głównego korzenia przybyszowego. Do drugiego typu przyporządkowano 24% drzew, do trzeciego 10%, do czwartego 26% a do piątego jedynie jedno drzewo z odstonieniem (2%) (Załącznik 3).



A (I)



B (II)



C (III)



D (IV)



E (V)

Ryc. 26. Wyróżnione typy drzew sosny zwyczajnej z odsłonięciami korzeni w obrębie szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek. Wyjaśnienie typów drzew (I-V) w tekście

12. Analiza zmian przyrostowych i anatomicznych korzeni odsłoniętych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) ze szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek

12.1. Analiza przyrostowa korzeni odsłoniętych

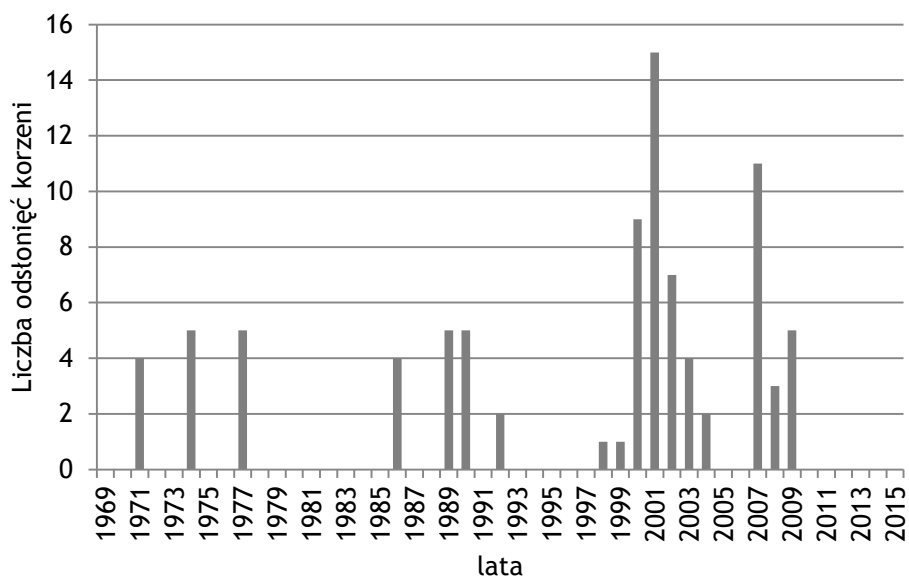
Badane próby korzeni odsłoniętych sosny zwyczajnej znacznie różniły się wiekiem. Początek wzrostu najstarszej części korzenia odsłoniętego ze szlaku został rozpoznany na rok 1963 (próbka B05A4), z kolei najmłodszy na rok 2004 (próbka B43). Ponad 50% analizowanych prób odsłoniętych korzeni została wydatowana na rok 1991 (tj. najstarszy przyrost korzenia). Najstarsza próba z części odsłoniętej korzeni sosny zwyczajnej miała 52 lata, a najmłodsza 11 lat. Średni wiek korzeni z części odsłoniętej wyniósł 28 lat (Załącznik 3).

Analizowane korzenie odsłonięte charakteryzowała wysoka zmienność występowania przyrostów wyklinowujących i brakujących. Stwierdzono, iż 33% wszystkich wybranych do analiz prób korzeni odsłoniętych nie prezentowało pełnej sekwencji przyrostów rocznych. Największy udział przyrostów brakujących wyniósł 38% (próbka B27). Średni udział przyrostów brakujących dla wszystkich przekrojów liczył 18%. Średni udział przyrostów wyklinowujących w obrębie pojedynczego przekroju poprzecznego korzenia wyniósł 64%, co w rzeczywistości dało średnio 20 przyrostów wyklinowujących na przekrój. Dla 11 (tj. 13%) prób korzeni odsłoniętych udział przyrostów wyklinowujących wyniósł 100%.

Wykonanie czterech etapów datowania pomostowego pozwoliło uzyskać sekwencję przyrostową korzeni o średniej korelacji z pniem wynoszącą $r=0,56$ ($p<0,001$) i maksymalnej $r=0,88$ ($p<0,001$) (B15A1). Dla 33% korzeni odsłoniętych nie wykazano istotnej statystycznie korelacji z krzywą wzrostu z pnia. Najwyższe wartości korelacji między sekwencją przyrostową korzenia z pniem uzyskano dla przekrojów poprzecznych głównego korzenia (od $r=0,64$ do $r=0,88$; $p<0,001$), który miał bezpośrednie połączenie z podstawą pnia. Z kolei stosunkowo niską lub nieistotną statystycznie korelację wykazano dla prób z bocznych odsłoniętych odgałęzień korzeni przybyszowych.

12.2. Lata odsłonień korzeni

Analiza odsłonień korzeni sosny zwyczajnej pozwoliła uchwycić okresy wzmożonej intensywności denudacji antropogenicznej (DrA) na odcinku badanego szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek na przestrzeni prawie 50 lat. Uzyskane daty odsłonień korzeni wykazały, iż wśród pobranych próbek dominują odsłonięcia nie starsze niż 17 lat. Najstarsze odsłonięcie korzeni wydatowano na rok 1971 tj. w czasie, kiedy intensywnie rozbudowywano infrastrukturę turystyczną nad jeziorem Bachotek, a najmłodsze na rok 2009. W okres 1971-2016 zidentyfikowano łącznie 17 horyzontów czasowych odsłonień korzeni (Ryc. 27).



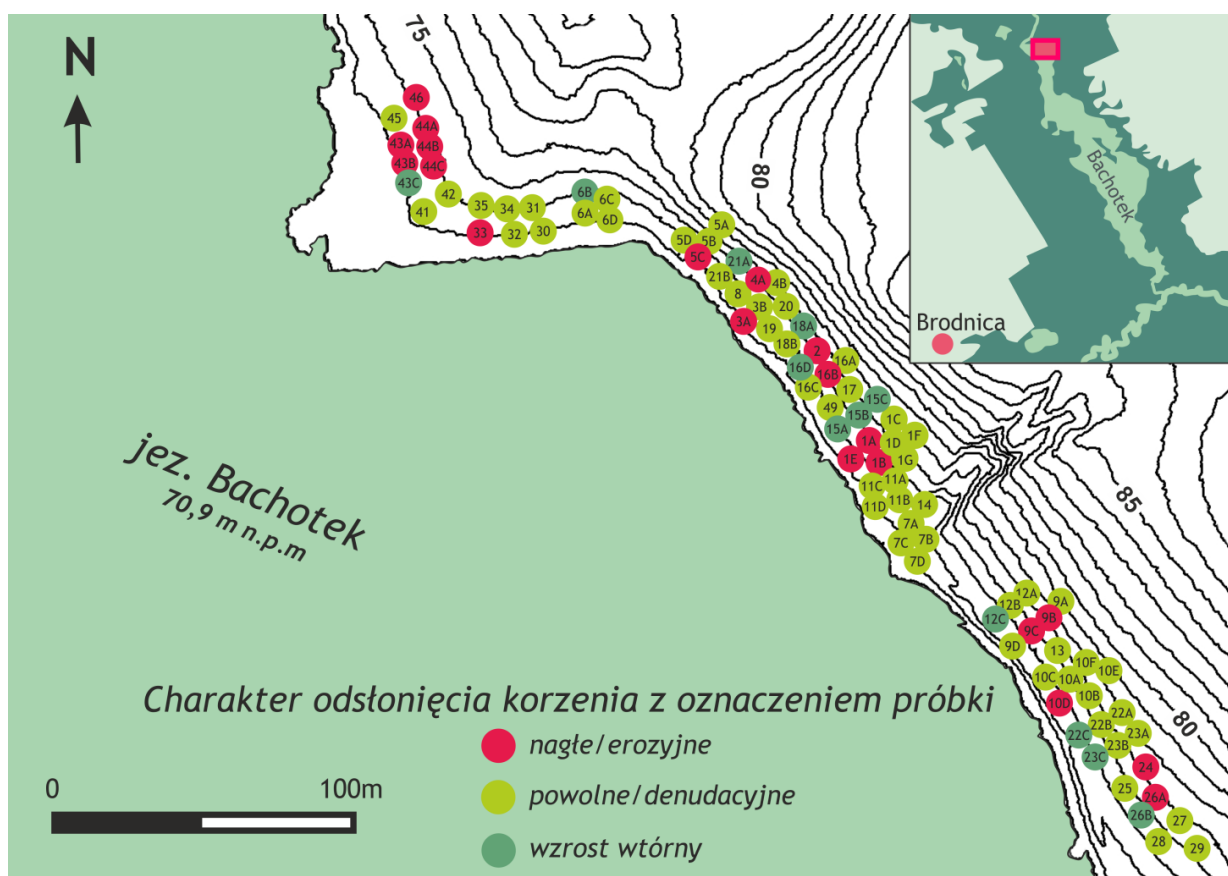
Ryc. 27. Wyniki datowań dendrochronologicznych odstąpień korzeni sosny zwyczajnej w obrębie szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek

Analizując uzyskane daty odstąpień korzeni, należy zwrócić uwagę, że największa liczba odstąpień korzeni wystąpiła w okresie 2000-2003 oraz 2007-2009. Największą liczbę odstąpień korzeni, tj. aż 15 zanotowano w roku 2001. Równie silnie zaznaczył się rok 2007 (11 odstąpień) oraz rok 2000 (9 odstąpień). W układzie dziesięcioletnim najwięcej odstąpień zanotowano dla okresu 2001-2010 gdzie wydatowano 49 korzeni, co stanowi aż 56% wszystkich odstąpień korzeni sosny zwyczajnej przeanalizowanych na szlaku turystycznym ze stanowiska Bachotek (Ryc. 27). W dekadzie 2001-2010 nie zanotowano żadnych odstąpień jedynie dla roku 2005 i 2006. Na podstawie analizy zmian anatomicznych drewna wczesnego oraz późnego zaobserwowano, że dla 84% analizowanych korzeni ze szlaku turystycznego odstąpienie nastąpiło w okresie wegetacyjnym, czyli w sezonie ruchu turystycznego (maj-wrzesień).

12.3. Charakter i kierunkowość odśnieżeń korzeni

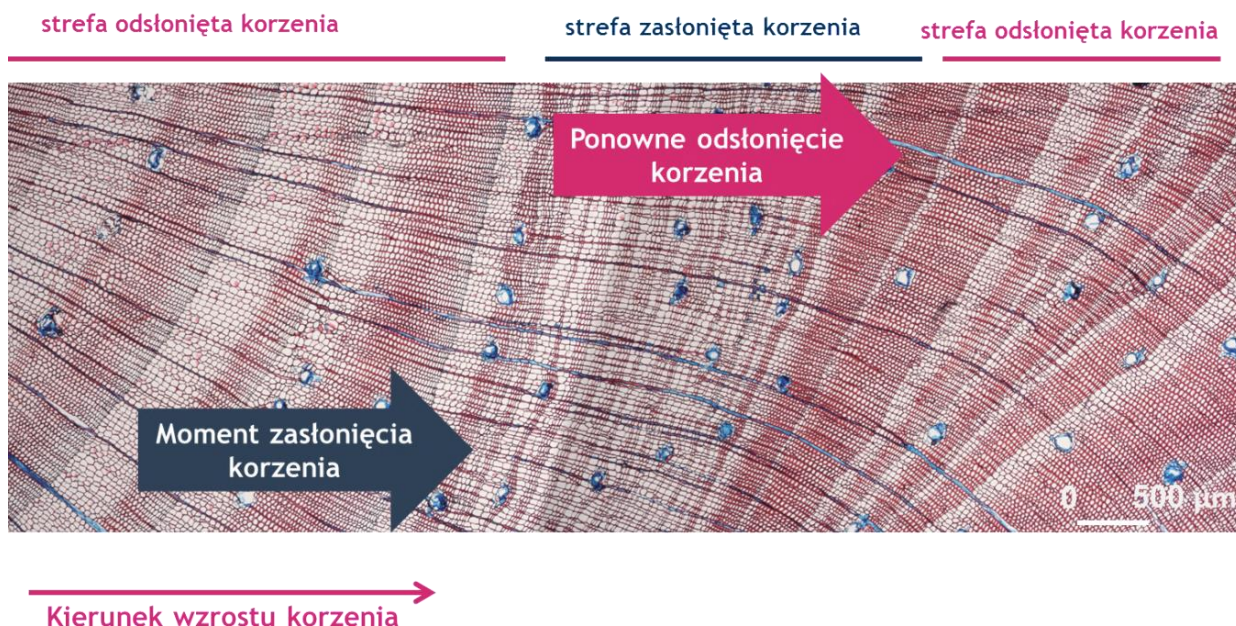
W odniesieniu do charakteru odśnieżeń korzeni sosny zwyczajnej w obrębie stanowiska Bachotek zapis anatomiczny jednoznacznie dowodzi, że w 12 (tj. 14% korzeni) przypadkach korzenie zostały odśnieżone naturalnie w wyniku wzrostu wtórnego- bez udziału człowieka (patrz podrozdział 15.1). Zdecydowana większość, bo aż 57 korzeni (tj. 64% pobranych prób) była odśnieżana stopniowo, przy udziale powolnych procesów denudacyjnych. Wystąpienie silnego odśnieżającego procesu erozyjnego potwierdził zapis anatomiczny 19 korzeni, co stanowi 22% ogółu analizowanych prób korzeni.

Nie zaobserwowano przestrzennych zależności, co do charakteru odśnieżeń korzeni. Rozmieszczenie korzeni ze względu na charakter odśnieżeń wzdłuż badanego szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek prezentuje Ryc. 28.



Ryc. 28. Przestrzenne rozmieszczenie korzeni sosny zwyczajnej według charakteru odśnieżeń wraz z podaniem ID próby wzdłuż badanego szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek.

Spśród badanych korzeni rozpoznano również zapisy świadczące o ich wtórnym zasypywaniu (Ryc.29). Na stanowisku Bachotek wystąpiło 13 przypadków wtórnego odstonięcia korzenia, co stanowi 15% wszystkich analizowanych odstoniętych korzeni sosny zwyczajnej.



Ryc. 29. Zmiana wielkości drewna wczesnego (DW) i szerokości przyrostów rocznych (TRW) korzenia sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.), interpretowane, jako efekt wtórnego zasłonięcia korzenia (granatowa strzałka) wcześniej odsłoniętego na szlaku turystycznym w obrębie stanowiska Bachotek.

W analizowanym materiale wydzielono korzenie, które zostały odstonięte jednorazowo bądź w kilku etapach w różnych latach (Załącznik 3). Spśród 19 korzeni, z których pobrano więcej niż jedną odsłoniętą próbę korzenia, rozpoznano:

- 8 przypadków jednorazowego odstonięcia (w jednym roku),
- 3 przypadki rocznej różnicy odstonięcia (w dwóch kolejnych latach),
- 8 przypadków kilkuletnich różnic odstonięcia (w trzech i więcej latach).

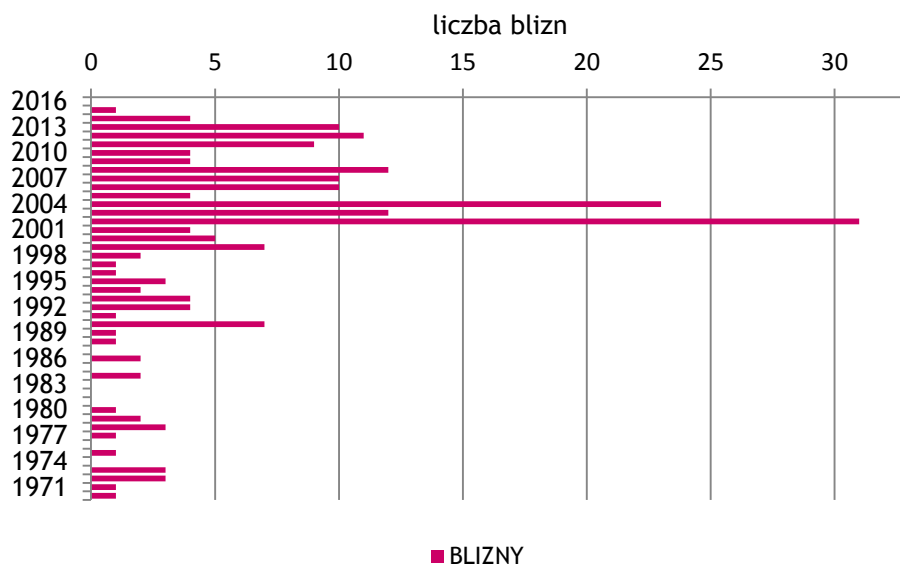
Rozbieżne daty odstonień korzeni stwierdzono dla odstonień strefowych, tj. dla korzeni posiadających więcej niż jedną odsłoniętą część. Dla przykładu z korzenia B10, z którego pobrano 6 wyrzynków, rozpoznano trzy daty odstonień. Korzeń ten w głównej mierze był odstaniany stopniowo przez powolne procesy denudacyjne, a finalnie jego ekspozycja została wydatowana na rok 2001. Dodatkowo analiza przyrostowa i anatomiczna korzenia B10 wykazała, że dwie próby położone na początku eksponowanej części korzenia (tj. części położonej najbliżej pnia) zostały odstonięte w 2000 roku, a końcowa próba, tj. położona w strefie krawędziowej szlaku, została odstonięta przez nagły proces erozyjny w 2002 roku.

Wpływ na różnice w odstonieniach korzeni może mieć położenie korzenia względem szlaku, tj. korzenie położone równolegle, zgodnie z kierunkiem przebiegu szlaku są odstaniane stopniowo. Jednak na badanym szlaku nie wykazano istotnych w tym względzie zależności.

12.4. Uszkodzenia mechaniczne w drewnie korzeni odstoniętych

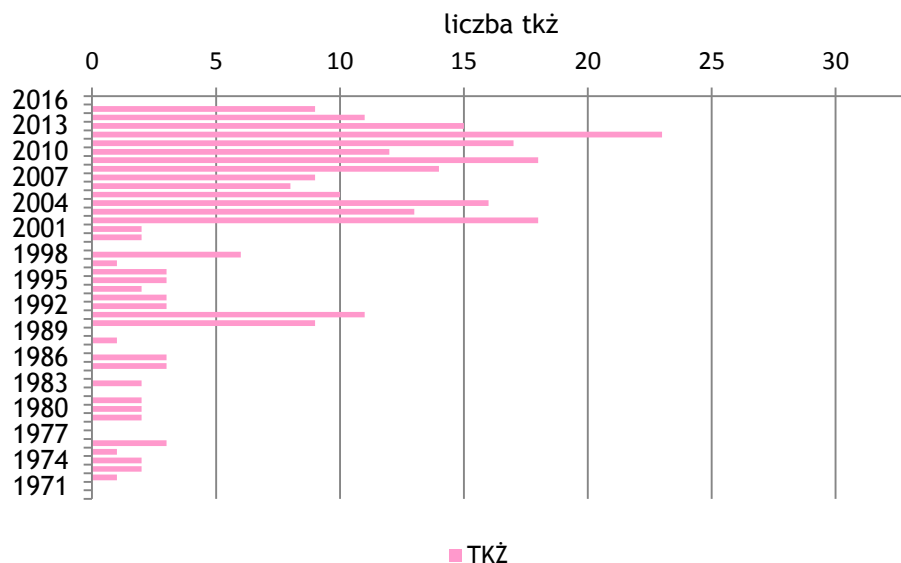
Korzenie sosny zwyczajnej poddane presji turystycznej wykazały zmiany strukturalne, widoczne zarówno w morfologii jak i anatomii korzeni. Szczególnie wyraźnie widoczne makroskopowo były wszelkie uszkodzenia mechaniczne (Załącznik. 6), takie jak blizny, stowarzyszone w ujęciu anatomicznym z traumatycznymi kanałami żywicznymi i wykształceniem tkanki kalusowej.

W przypadku stanowiska Bachotek należy stwierdzić, iż 42% wszystkich pobranych prób korzeni sosny zwyczajnej została odstonięta przy jednoczesnej obecności blizny, co świadczy o działaniu silnego stresu mechanicznego. Najwięcej blizn rozpoznano dla odstoniętych prób korzeni: B01, B09 i B10- maksymalnie sześć blizn na pojedynczym przekrój poprzeczny. Średnia liczba blizn w obrębie przekroju poprzecznego dla wszystkich korzeni odstoniętych wyniosła trzy. Ogółem w obrębie stanowiska Bachotek dla 88 korzeni zanotowano aż 208 blizn. Ich wystąpienia zawierały się w przedziale 1971-2015 (Ryc. 30). Najliczniejsze nagromadzenie blizn w korzeniach pobranych ze szlaku turystycznego wykazano dla roku 2002 (tj. 31 blizn) oraz roku 2004 (tj. 23 blizn). W sumie w okresie 2001-2010 zidentyfikowano 55% wszystkich rozpoznanych blizn w korzeniach odstoniętych na stanowisku Bachotek (Ryc. 30).



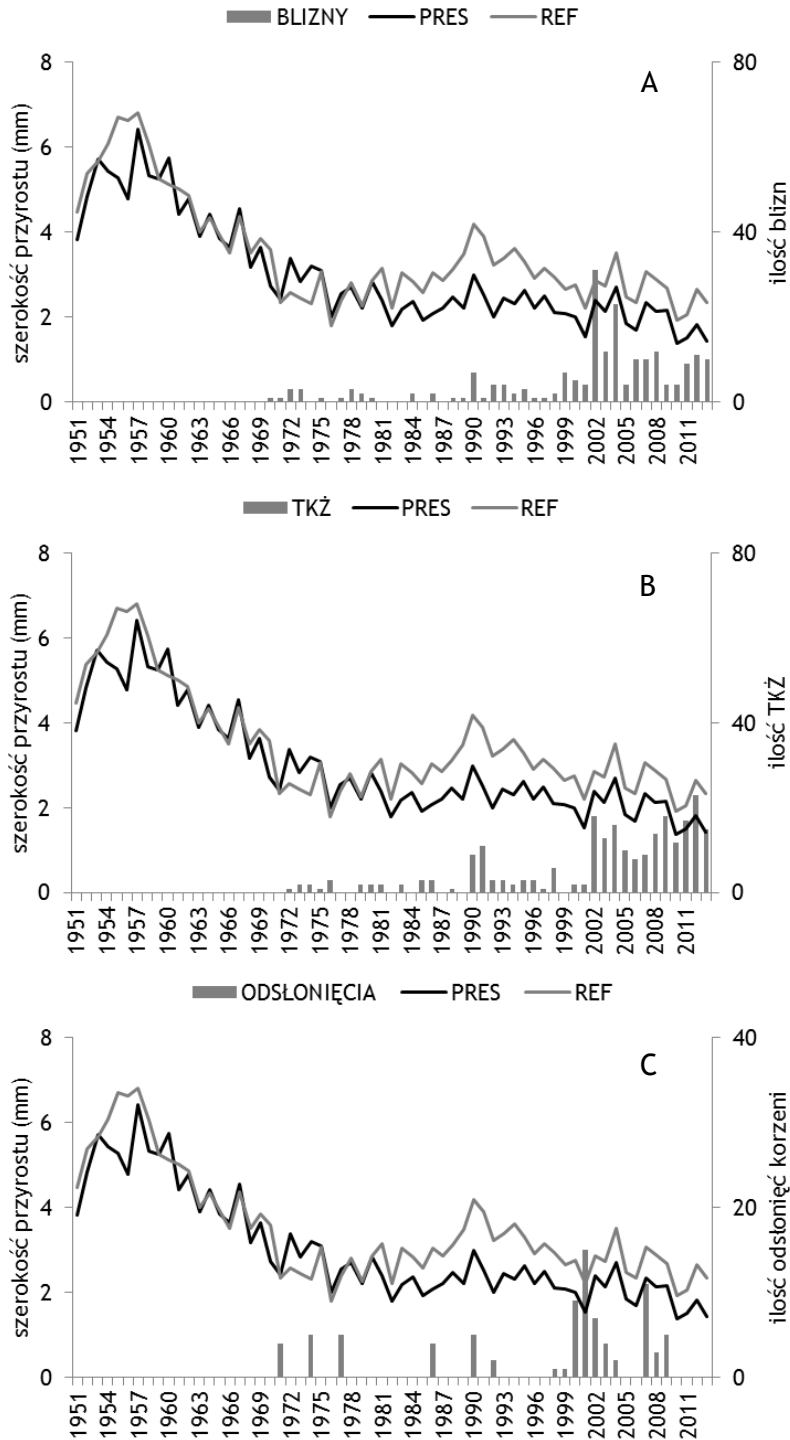
Ryc. 30. Wyniki datowań dendrochronologicznych blizn w korzeniach sosny zwyczajnej pobranych ze szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek

Badanym wskaźnikiem anatomicznym w drewnie korzeni odstoniętych były wystąpienia traumatycznych kanałów żywicznych (TKŻ) świadczące o bardzo silnym stresie środowiskowym. Dla wszystkich korzeni stwierdzono łącznie 262 przyrostów z TKŻ wykształconymi w okresie 1974-2015. Największą liczbę przyrostów z traumatycznymi kanałami żywicznymi odnotowano dla roku 2012 (tj. 23 TKŻ) oraz 2009 (tj. 18 TKŻ) (Ryc. 31). Podobnie, jak w przypadku blizn w okresie 2001-2010 zidentyfikowano znaczny ich udział, tj. 46% wszystkich wystąpień traumatycznych kanałów żywicznych. Najwięcej traumatycznych kanałów żywicznych rozpoznano dla odstoniętych prób korzeni B07 i B35, tj. maksymalnie po siedem TKŻ na przekrój poprzeczny. Średnia liczba TKŻ w obrębie przekroju poprzecznego wszystkich korzeni odstoniętych wyniosła trzy wystąpienia.



Ryc. 31. Wyniki datowań dendrochronologicznych traumatycznych kanałów żywicznych (TKŻ) w korzeniach sosny zwyczajnej pobranych ze szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek

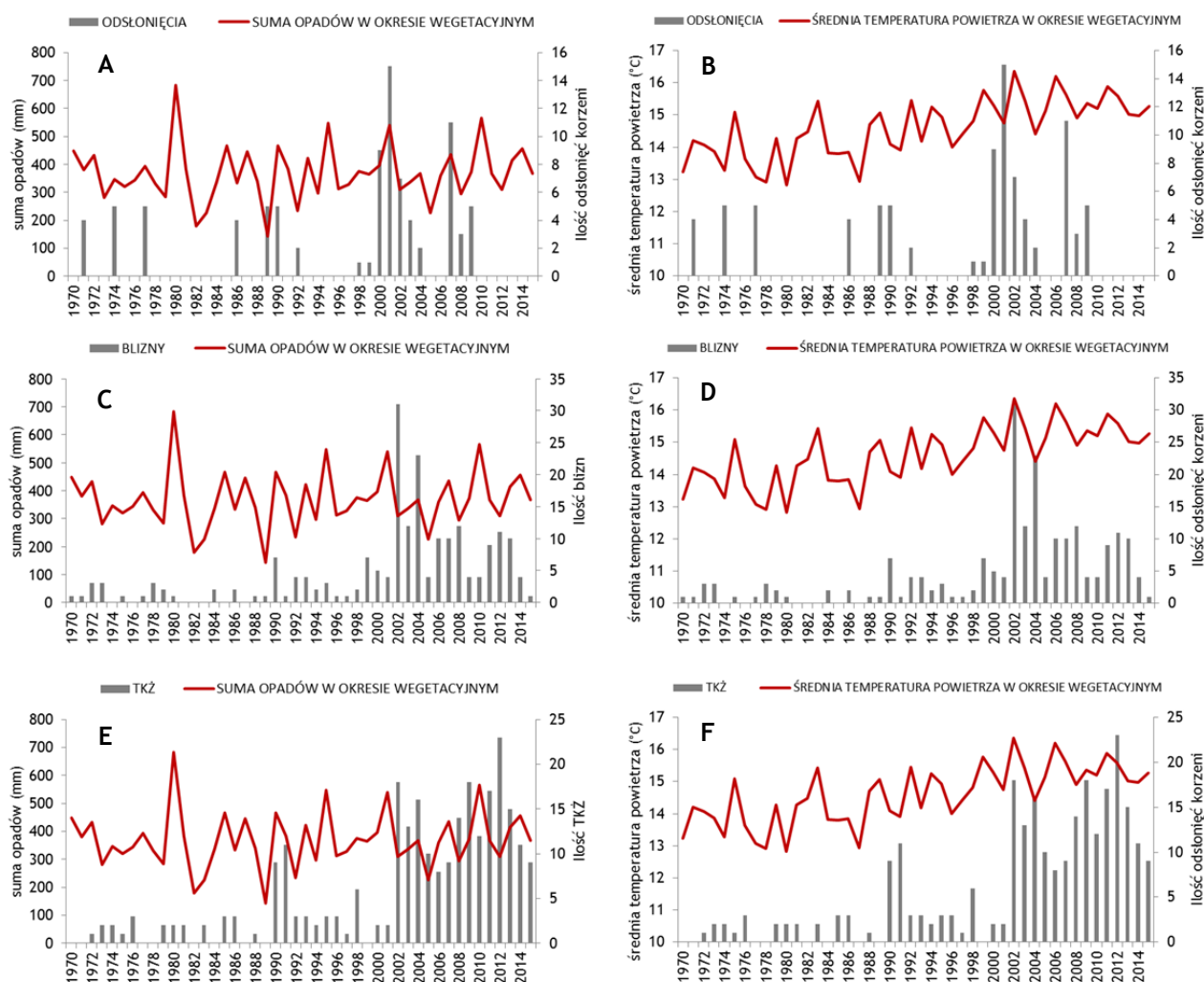
W pracy dokonano porównania frekwencji występowania uszkodzeń mechanicznych, tj. blizn i traumatycznych kanałów żywicznych (TKŻ) oraz wieku odstonień korzeni z chronologią rzeczywistą sosny zwyczajnej poddanej i niepoddanej i presji turystycznej. Zauważono prawidłowość występowania zwiększonej liczby blizn (Ryc. 32A), traumatycznych kanałów żywicznych (Ryc. 32B) oraz odstonień korzeni (Ryc. 32C) w okresie stłumienia przyrostu w drzewach poddanych presji turystycznej, tj. zapoczątkowanej na przełomie lat 70. i 80. XX wieku. Okres ten charakteryzował się z silnym rozwojem funkcji turystycznych obszaru badań, w tym potencjalnie zwiększonym użytkowaniem szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek. Tym samym zaobserwowane zahamowanie przyrostu w pniach drzew rosnących wzdłuż szlaku turystycznego (PRES), stowarzyszone z licznymi uszkodzeniami mechanicznymi zdiagnozowanymi dla korzeni sosny zwyczajnej na szlaku, stanowi trwałą reakcję przyrostową pni sosny zwyczajnej na postępującą denudację antropogeniczną.



Ryc. 32. Porównanie frekwencji występowania blizn (A), traumatycznych kanałów żywicznych (TKŻ) (B) oraz liczby odsłonięć korzeni sosny (C) na szlaku turystycznym ze stanowiska Bachotek z chronologiami rzeczywistymi i) drzew sosny zwyczajnej poddanych (PRES- czarna linia) oraz ii) niepoddanych presji turystycznej (REF- szara linia)

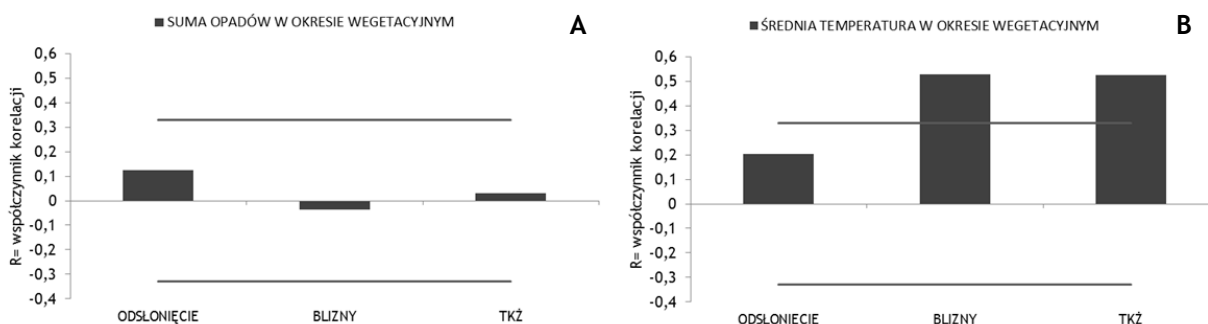
12.5. Wpływ warunków termiczno-pluwialnych na odślonięcia i uszkodzenia mechaniczne korzeni sosny zwyczajnej

W celu określenia wpływu warunków termiczno-pluwialnych na częstotliwość odślaniania korzeni sosny zwyczajnej oraz występowania uszkodzeń mechanicznych tj. blizn i traumatycznych kanałów żywicznych (TKŻ) w korzeniach odśloniętych w obrębie szlaku turystycznego prześledzono zależności pomiędzy ich występowaniem a klimatem. W tym celu w pracy przeprowadzono korelacje pomiędzy datami odślonień korzeni oraz latami powstania blizn i TKŻ w korzeniach odśloniętych na szlaku ze średnią temperaturą powietrza w okresie wegetacyjnym (tj. od kwietnia do września), sumą opadów w okresie wegetacyjnym oraz sumą miesięcznych opadów w roku bieżącym (tj. od stycznia do sierpnia) i sumą miesięczną opadów dla miesięcy poprzedzających rok formowania przyrostu (tj. od września do grudnia) w okresie 1970-2015, tj. od pierwszego momentu pojawienia się zmian anatomicznych w korzeniach odśloniętych (Ryc. 33).



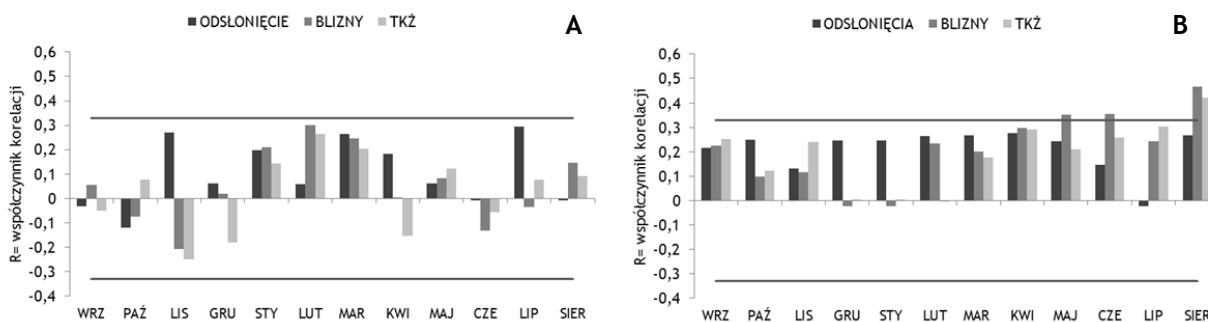
Ryc. 33. Porównanie liczby odślonień korzeni (A i B), występowania blizn (C i D) i traumatycznych kanałów żywicznych (E i F) wykazanych dla korzeni sosny zwyczajnej pobranych ze szlaku turystycznego stanowiska Bachotek z sumą opadów w okresie wegetacyjnym (A, C, E) oraz ze średnią temperaturą powietrza w sezonie wegetacyjnym (B, D, F) w okresie 1970-2015.

Jedyną istotną korelację uzyskano pomiędzy rokiem występowania uszkodzeń mechanicznych w korzeniach odsloniętych, zarówno blizn jak i TKŻ, a średnią temperaturą w okresie wegetacyjnym (Ryc. 34B). Wartość współczynnika korelacji dla blizn wyniósł $R=0,53$ ($p=0,001$) z kolei dla traumatycznych kanałów żywicznych $R=0,52$ ($p=0,001$). Wartości współczynnika korelacji wyliczone pomiędzy datami odslonieć korzeni, wystąpieniem uszkodzeń mechanicznych (blizny i TKŻ) a sumą opadów dla okresu wegetacyjnego były nieistotne statystycznie (Ryc. 34A). Mimo braku istotnej zależności na uwagę zasługuje rok 2001 i 2007, w których miały miejsce wysokie opady w lipcu, co z kolei nałożyło się na zwiększoną liczbą odslonieć korzeni na szlaku (Ryc. 33A).



Ryc. 34. Wartości współczynnika korelacji Pearson'a między sumą opadów w okresie wegetacyjnym (A), średnią temperatura powietrza w okresie wegetacyjnym (B) a liczbą odslonieć, blizn i traumatycznych kanałów żywicznych wykazanych dla korzeni sosny zwyczajnej pobranych ze szlaku turystycznego stanowiska Bachotek dla okresu 1970-2015; linią oznaczono poziom istotności statystycznej $p < 0,05$

Nie wykazano żadnej istotnej zależności pomiędzy rokiem odslonienia korzenia oraz ilością uszkodzeń mechanicznych (blizny i TKŻ) a sumą miesięczną opadów (Ryc.35).



Ryc. 35. Wartości współczynnika korelacji między miesięczną sumą opadów (A), średnią miesięczną temperaturą powietrza (B) a liczbą odslonieć, blizn i traumatycznych kanałów żywicznych wykazanych dla korzeni sosny zwyczajnej pobranych ze szlaku turystycznego stanowiska Bachotek w okresie 1970-2015; linią oznaczono poziom istotności statystycznej $p < 0,05$

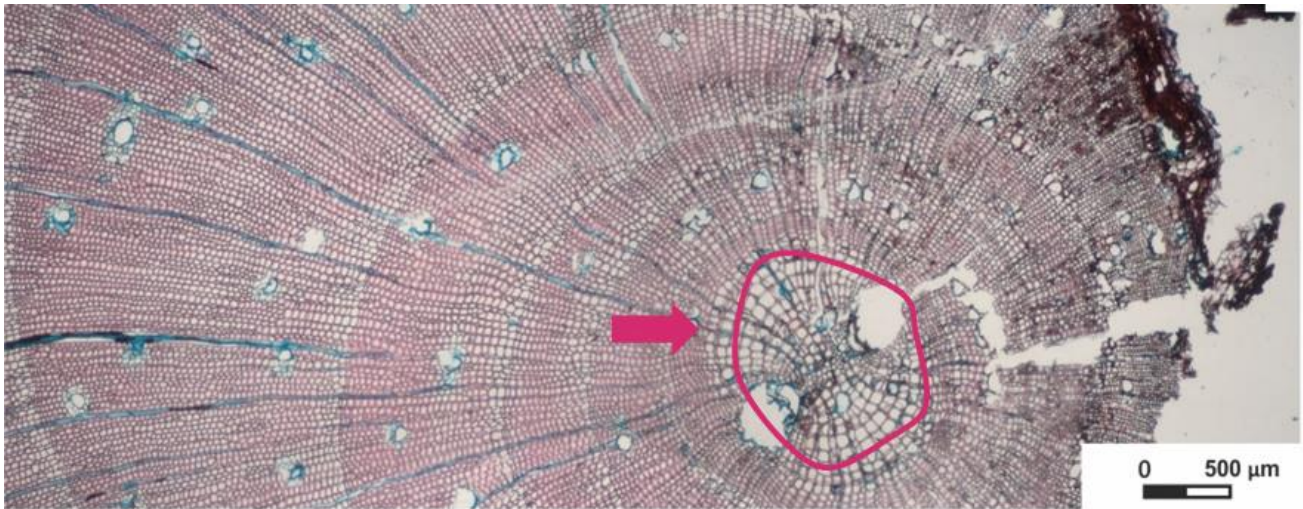
Najsilniejszą istotną zależność wykazano pomiędzy średnią temperaturą powietrza w sierpniu a frekwencją występowania blizn ($R=0,47$, $p < 0,01$) oraz traumatycznych kanałów żywicznych ($R=0,42$, $p < 0,01$) w korzeniach korzeni odsloniętych na szlaku turystycznym (Ryc.35).

12.6. Dyskusja wyników dotyczących zmian przyrostowych i anatomicznych korzeni odsłoniętych sosny zwyczajnej poddanych denudacji antropogenicznej

W pobranych fragmentach korzeni sosny zwyczajnej rozpoznano anatomiczne i przyrostowe dowody odsłoneń korzeni świadczące o wystąpieniu epizodów erozyjnych bądź denudacyjnych w obrębie szlaków turystycznych inicjowanych i/lub modyfikowanych przez ruch turystyczny. Należy podkreślić, iż bez wnikliwych analiz struktury anatomicznej korzeni, w tym zmiany wielkości drewna wczesnego, określenie roku ekspozycji korzeni nie byłoby możliwe. Metoda zaproponowana przez H. Gärtner'a (2007) pozwoliła na ilościowe i przestrzenne rozpoznanie rodzaju odsłoneń korzeni w obrębie szlaku turystycznego na Pojezierzu Brodnickim.

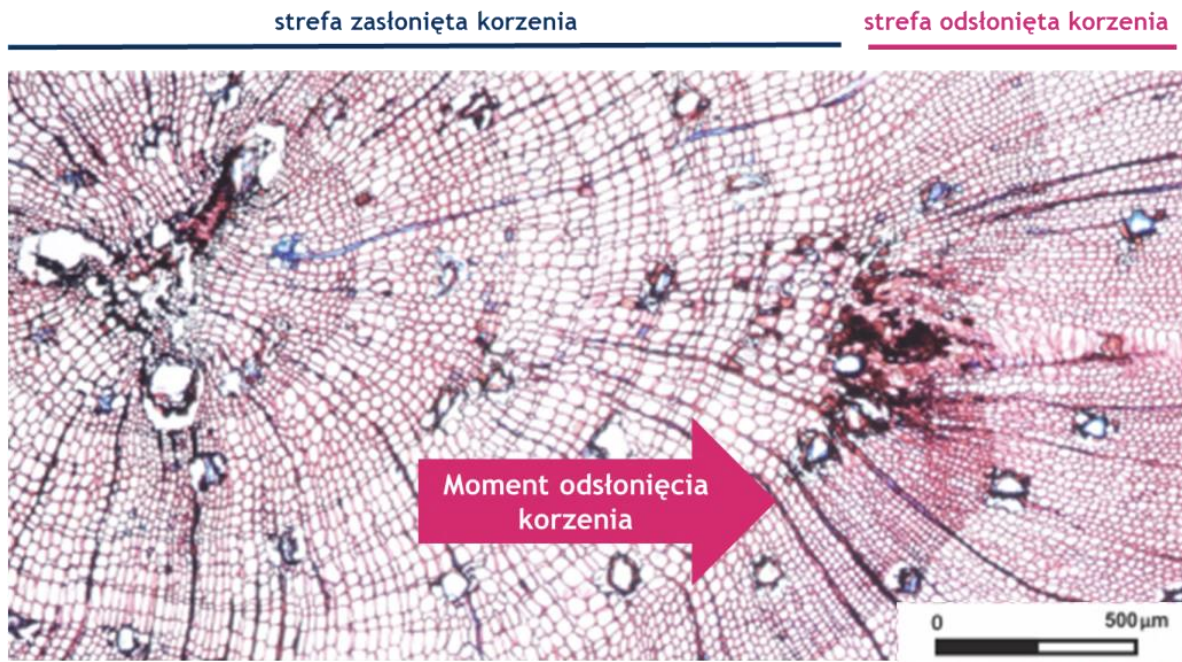
Wiek najstarszych drzew sosny zwyczajnej i ich korzeni pobranych wzdłuż szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek określił ramy czasowe analizy wpływu ruchu turystycznego i aktywności procesów erozyjno-denudacyjnych w obszarze badań. Na podstawie krzywych przyrostowych korzeni okres ten obejmował 52 lata (1963-2015). W najstarszym korzeniu pobranym ze stanowiska Bachotek na całym profilu poprzecznym rozpoznano duży udział drewna późnego i kompresyjnego, świadczącym o mechanicznym oddziaływaniu sił zewnętrznych na korzeń. W roku 1971 zanotowano pierwsze objawy anatomiczne odstawiania korzeni, które widoczne były w spadku wielkości komórek drewna wczesnego o ok. 50-60% w porównaniu z latami poprzednimi (Gärtner i in. 2001; Gärtner 2003, 2007). Zmiany anatomiczne pochodzące z najstarszego korzenia w postaci zmian komórek drewna wczesnego i zwiększenia ilości komórek drewna późnego wskazują na intensywne oddziaływanie ruchu turystycznego w obszarze badań od lat 70. XX wieku. Należy jednak wskazać, iż większość analizowanych korzeni została odsłonięta w późniejszym czasie (Ryc. 27). Najwięcej odsłoneń rozpoznano dla okresu 2001-2010 dla którego wydatowano ponad połowę wszystkich odsłoneń korzeni sosny zwyczajnej na stanowisku Bachotek. Na tej podstawie można wnioskować, iż po 2000 roku doszło do największej intensyfikacji presji ruchu turystycznego w obszarze badań, który był odpowiedzialny za przekształcenia rzeźby w obrębie badanego szlaku turystycznego.

Dla 14% korzeni zapis anatomiczny wykazał, że zostały one odsłonięte w wyniku wzrostu wtórnego, tzn. od najmłodszych lat korzenie te rosły blisko powierzchni gleby i poprzez cyklicznie postępujący wzrost wtórny korzenia były odstawiane bez udziału bodźców zewnętrznych. Na przekroju poprzecznym korzeni odsłoniętych w wyniku wzrostu wtórnego widoczny był pojedynczy bądź kilkuletni udział przyrostów rocznych blisko rdzenia korzenia, ze słabo zaznaczonymi granicami przyrostów (Ryc. 36).

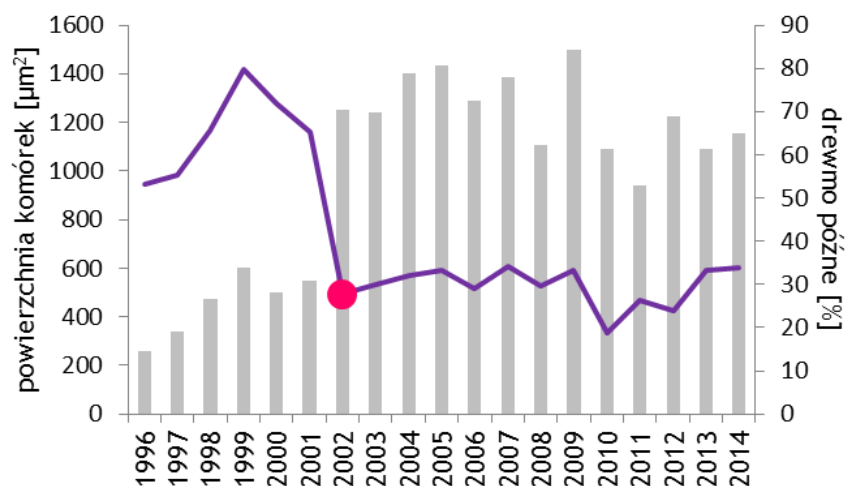


Ryc. 36. Przykład korzenia odstłoniętego w wyniku przyrostu wtórnego (B43C)

Dowodem na erozyjne odstąpienie korzeni sosny zwyczajnej była nagła reakcja przyrostowa i anatomiczna (Ryc. 37) przejawiająca się wzrostem wielkości przyrostu rocznego, znacznym spadkiem wielkości komórek drewna wczesnego i jednocześnie wzrostem udziału drewna późnego (Ryc. 38). Należy wskazać, iż jedynie co piąty korzeń ze stanowiska Bachotek został odstłonięty w wyniku procesu erozyjnego. W odróżnieniu do analizowanego obszaru nizinnego Pojezierza Brodnickiego na dominację procesów erozyjnych w kształtowaniu rzeźby szlaków turystycznych wskazano dla obszarów górskich, w tym gór Hiszpanii (Bodoque i in. 2005; Rubiales i in. 2008), włoskiej części Alp (Pelifini, Santilli 2006) czy w masywie Babiej Góry (Buchwał 2010).



Ryc. 37. Przykład nagłego odstąpienia korzenia z widocznym wzrostem produkcji drewna późnego, wyraźnie zmniejszoną powierzchnią komórek drewna wczesnego w kolejnym przyroście i zwiększoną szerokością kolejnych przyrostów rocznych (B01A1A). Strzałką zaznaczono moment odstąpienia korzenia

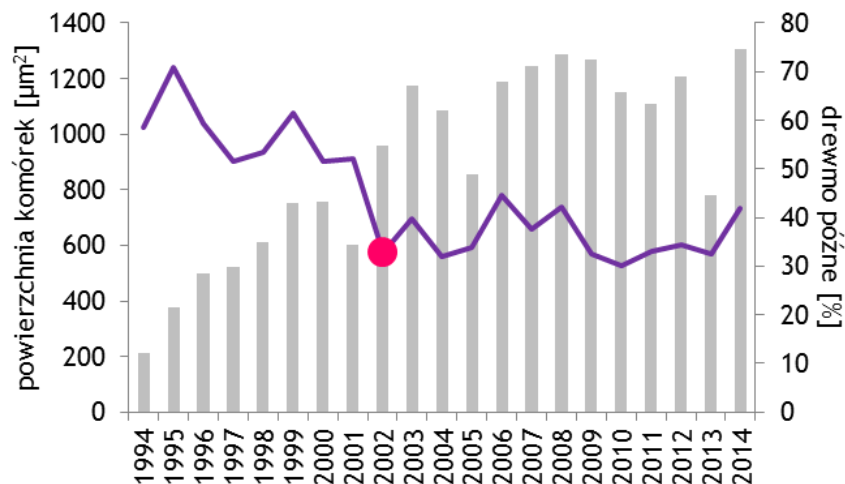


Ryc. 38. Zmiany powierzchni komórek drewna wczesnego (EW) na tle zmian udziału drewna późnego (LW) w korzeniu odstłoniętym erozyjnie

Niewielki spadek wielkości komórek drewna wczesnego, któremu towarzyszył wzrost zawartości drewna późnego w przyrostach rocznych korzeni sosny zwyczajnej ze stanowiska Bachotek był zapisem powolnego odstanięcia korzeni, który dominował w obszarze badań (Ryc. 39). Zdecydowana większość korzeni ze stanowiska Bachotek przyrastała blisko powierzchni gleby i została odstłonięta w wyniku powolnych procesów denudacyjnych. Zmiany w ilości komórek drewna późnego i pojawienie się drewna kompresyjnego poprzedzały zmiany w wielkości komórek drewna wczesnego i pojawiały się na kilka lat (tj. od 4 do 12 lat) przed finalnym odstłonięciem korzenia (Ryc. 40). Takie przesunięcie w czasie reakcji korzeni innych gatunków drzew iglastych - świerka pospolitego i jodły zwyczajnej na różne bodźce zewnętrzne zostało zaobserwowane przez A. Buchwał (2010), A. Zielonkę i in. (2014) oraz D. Wrońską-Wałach i in. (2014). Opisane zmiany anatomiczne korzeni związane są z powolnymi zmianami warunków środowiskowych otoczenia korzenia, tj. bliskością światła, zmianami wilgotności czy termiki gruntu w przypowierzchniowej warstwie gleby (Fayle 1968). W przypadku korzeni rosnących w obrębie szlaku turystycznego zmiany warunków wzrostu korzeni należy upatrywać w jego użytkowaniu, tj. postępującym poszerzaniu i pogłębianiu w wyniku mechanicznego oddziaływaniu ruchu turystycznego. Powszechne wykształcenie postępujących zmian anatomicznych wykazane dla badanych korzeni sosny zwyczajnej jest jednoznacznym dowodem silnej aktywności procesów denudacyjnych w modelowaniu szlaku turystycznego.



Ryc. 39. Przykład korzenia odstaniawanego powoli (w przeciągu kilku lat) (B08A)



Ryc. 40. Zmiany powierzchni komórek drewna wczesnego (EW) na tle zmian udziału drewna późnego (LW) w korzeniu odstłoniętym denudacyjnie

Dla większości, tj. dla 84% korzeni sosny zwyczajnej pobranych ze stanowiska Bachotek wykazano, iż moment odstąpienia korzenia wystąpił podczas okresu wegetacyjnego, a dokładniej w jego zaawansowanej fazie, którą należy wiązać z okresem letnim. Odstąpienie takie zaznaczało się wzrostem zawartości komórek drewna późnego w strukturze wewnętrznej przyrostu rocznego, któremu nie towarzyszył spadek wielkości drewna wczesnego. Wyraźny spadek wielkości komórek drewna wczesnego zauważono dopiero w kolejnym przyroście rocznym. Podobne prawidłowości zostały zaobserwowane dla korzeni w obrębie lejów źródłowych Gorców (Buchwał, Wrońska-Wałach 2008), ścieżek turystycznych masywu Babiej Góry (Buchwał 2010) czy osuwiska z Pogórza Karpackiego (Zielonka i in. 2014). Korzeniom odstłoniętym podczas trwania okresu wegetacyjnego często towarzyszyło wykształcenie blizn (42% korzeni zostało odstłoniętych przy jednoczesnej obecności blizny) (Ryc. 37).

Analizy anatomiczne korzeni sosny zwyczajnej ze stanowiska Bachotek wykazały, iż jedynie 16% korzeni zostało odstłoniętych poza sezonem wegetacyjnym. Dowodem na odstąpienie korzenia poza sezonem wzrostu był nagły spadek wielkości komórek drewna wczesnego oraz stowarzyszona z tą zmianą wyraźnie zwiększona produkcja drewna późnego w tym samym przyroście rocznym. W przypadku działania presji turystycznej na początku sezonu wegetacyjnego powodującego odstąpienie korzenia zmiany drewna późnego zachodzą w tym samym roku i są widoczne w tożsamym przyroście rocznym. W sytuacji, gdy intensywne wydeptywanie powodujące odstąpienie korzenia występują w drugiej połowie okresu wegetacyjnego (np. w sierpniu), wówczas zmiany anatomiczne i reakcja przyrostowa korzenia związana z jego odstaniem widoczna jest w następującym po zdarzeniu opadowym roku kalendarzowym.

Analizy próbek korzeni sosny zwyczajnej pobranych z różnych odcinków tego samego korzenia nie zawsze potwierdzały jednoczesne odstąpienie systemu korzeniowego. Badania zmian przyrostowych i anatomicznych w obrębie jednego korzenia wykazały różnice w czasie jego odstąpienia oraz w charakterze procesu odpowiedzialnego za odstąpienie jego poszczególnych części, tj. zlokalizowanych w różnej odległości od pnia. Niejednorodna reakcja przyrostowa i anatomiczna wykazana w profilu podłużnym większości korzeni, dowodzi etapowemu i różnokierunkowemu wpływowi denudacji antropogenicznej na odstąpienia korzeni. Otrzymane

wyniki wskazują na czasowe różnice w reakcji korzenia wzdłuż profilu podłużnego w części odsłoniętej na działanie czynników środowiskowych, tj. stopniowa ekspozycja korzenia. Ponadto rozpoznano w zapisie anatomicznym i przyrostowym korzenia na oddziaływanie różnych procesów, tj. nagłych bądź powolnych procesów odpowiedzialnych za odsłonięcie. W związku z tym wiedza na temat niejednoczesnej reakcji i działania zróżnicowanych procesów na pojedyncze odsłonięcie korzenia powinna być brana pod uwagę w postępowaniu badawczym przyszłych analiz dendrochronologicznych na szlakach turystycznych już na etapie terenowym.

Analiza makroskopowa korzeni sosny zwyczajnej ze szlaku turystycznego ze stanowiska Bachotek wykazała liczne uszkodzenia mechaniczne, w tym towarzyszące odstanianiu korzeni powstawanie blizn i wykształcenie tkanki kalusowej, których wyraźna produkcja zaznaczyła się dla okresu letniego, tj. podczas trwania wakacyjnego sezonu turystycznego. W przekrojach poprzecznych zaobserwowano również powszechnie występowanie licznych kanałów żywicznych i zwiększony udział drewna kompresyjnego, będących dowodem na postępujące oddziaływanie mechaniczne na korzeń. W przypadku korzeni pobranych z nawierzchni ścieżki turystycznej genezy blizn oraz uszkodzeń kambium, należy upatrywać w ciągłym deptaniu odstanianych lub już odsłoniętych korzeni. Jednocześnie zbieżne występowanie uszkodzeń mechanicznych korzenia, przy jednoczesnym ich odstanianiu pozwoliło na wskazanie lat oddziaływania największej presji turystycznej, a tym samym lat dominacji ruchu turystycznego w modelowaniu szlaku. Porównując wiek odsłonień korzeni i występowanie uszkodzeń mechanicznych okresem największej presji turystycznej był okres 2001-2010, a w szczególności rok: 2002, 2007 oraz 2009. Podobne zależności występowania licznych uszkodzeń mechanicznych rozpoznano dla korzeni badanych m.in. w obrębie szlaków turystycznych masywu Babiej Góry (Buchwał 2010) oraz włoskich Alp (Pelfini, Santilli 2006), lejów źródłowych Gorców (Buchwał, Wrońska-Wałach 2008; Wrońska-Wałach 2014), doliny Małej Panwi (Malik 2008) oraz obszarów leśnych w północnej Kanadzie (Morneau, Payette 1998).

Wyniki analiz dendrogeomorfologicznych jednoznacznie potwierdziły, iż opady atmosferyczne pełnią mało istotną rolę w procesie odstaniania korzeni i występowania uszkodzeń mechanicznych w korzeniach w obrębie szlaków turystycznych. Mechaniczne starcie kambium, nadmierna produkcja blizn oraz zmiany anatomii drewna towarzyszące odstanianiu potwierdziły dominujący udział denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym.

Na podstawie przeprowadzonych analiz dendroklimatycznych zauważono tendencję generowania zwiększonej ilości występowania blizn i traumatycznych kanałów żywicznych w okresach ciepłych z najwyższą średnią temperaturą powietrza, czyli latem w szczególności w sierpniu oraz czerwcu. Jest to sezon wzmożonej presji turystycznej, co potwierdzają również wyniki z rejestru czujników, gdzie miesiącem największego obciążenia szlaku był sierpień oraz okres maj-lipiec. Mimo wysokiej średniej temperatury w lipcu nie wykazano istotnej zależności z występowaniem uszkodzeń mechanicznych, co pośrednio wiąże się z faktem, że jest to miesiąc z największą sumą opadów. Przyznać należy zatem, iż analizowana część szlaku została poddana silnej presji mechanicznej w sezonach sprzyjających do uprawiania turystyki pieszej (wysoka temperatura powietrza i brak opadów) i w tym procesie należy upatrywać genezę odsłonień korzeni, a tym samym dominujący wpływ na ich przyrost radialny i anatomię drewna.

Lata, w których zanotowano najwyższe sumy opadów nie zapisują się znaczną liczbą odsłonień korzeni. Mimo braku istotnej korelacji między sumą opadów a wiekiem odsłonień korzeni zauważono, że w roku 2001 i 2007, zidentyfikowano największą liczbę odsłonień korzeni sosny zwyczajnej. Lata te charakteryzowały się bardzo wysoką sumą opadów w okresie wegetacyjnym (539,5 mm w 2001 roku oraz 434,6 mm w 2007 roku). Być może za odsłonięcie

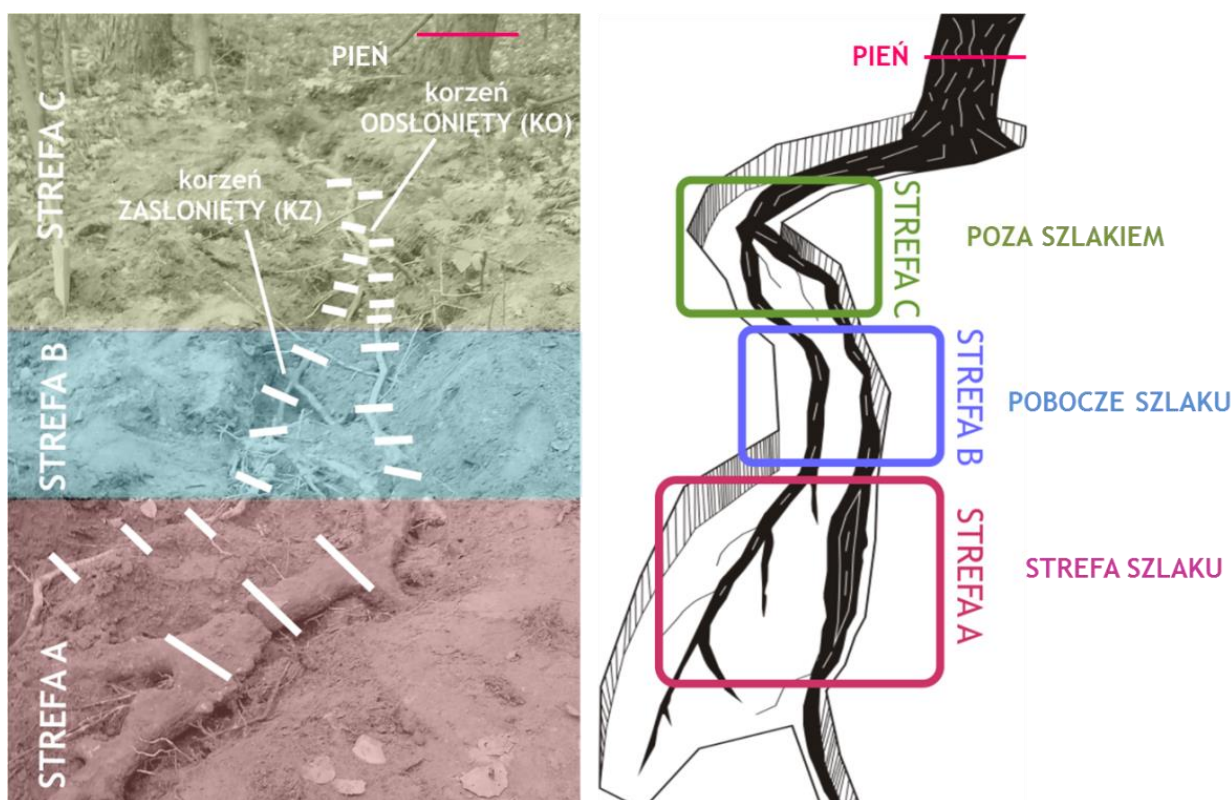
korzeni odpowiedzialny był wówczas lokalny, gwałtowny i krótkotrwały opad. Jednak w tym przypadku korzenie informowałyby o zadziałaniu nagłego procesu, podczas gdy w 2001 roku jedynie 18%, a w 2007 roku 27% korzeni zostało odstąpionych w sposób erozyjny. Powyższa sytuacja może wskazywać o współdziałaniu czynnika naturalnego w odstąpieniu korzeni na szlakach turystycznych. Zapis dendrochronologiczny nie wyklucza, iż do stopniowego eksponowania korzeni przyczyniają się naturalne procesy morfogenetyczne, w tym szczególnie słuwanie, które w przypadku przeanalizowanych korzeni ze stanowiska Bachotek należy traktować jedynie, jako proces przygotowawczy do ostatecznego eksponowania korzeni w wyniku oddziaływania ruchu turystycznego. Należy wziąć pod uwagę fakt, że sezon turystyczny, trwający od maja do września, w tych konkretnych latach, tj. 2001 i 2007 był bardzo ciepły, a zanotowana temperatura maksymalna lipca była znacznie wyższa od wielolecia (27,5°C w 2001 roku oraz 30,1°C). Można przypuszczać, że ruch turystyczny generowany w sezonie letnim w tych latach mógł zainicjować proces odstąpienia korzeni, a ich całkowita ekspozycja nastąpiła po ulewnych opadach deszczu w lipcu.

W przyszłym badaniach nad wpływem warunków termiczno-pluwialnych na częstotliwość odstąpienia oraz występowanie uszkodzeń mechanicznych należałoby uwzględnić inne czynniki w tym m.in. maksymalną sumę dobową, ekstremalne zdarzenia opadowe czy liczbę dni bez opadu.

Podsumowując należy wskazać, iż na podstawie analizy odstąpienia korzeni i uszkodzeń mechanicznych drewna sosny zwyczajnej, badany odcinek szlaku był poddawany silnej presji mechanicznej w sezonach letnich preferowanych do uprawiania turystyki pieszej. W postępującym ruchu turystycznym należy, zatem upatrywać genezę odstąpienia korzeni sosny zwyczajnej w obrębie stanowiska Bachotek. Przeprowadzone analizy dendrogeomorfologiczne korzeni sosny zwyczajnej ze szlaku wskazują na dominujący wpływ ruchu turystycznego na współczesną morfologię szlaku.

13. Datowanie w wysokiej rozdzielczości zmian przyrostowych korzeni sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) ze szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek

Do analiz w wysokiej rozdzielczości zmian przyrostowych korzeni sosny zwyczajnej ze stanowiska Bachotek wybrano osiem drzew (spośród 42 analizowanych w pracy) reprezentujących pięć typów odśnieżeń korzeni w obrębie szlaku turystycznego (Ryc. 26). Do pierwszego typu (I) zaszeregowano drzewo z pojedynczym odśnieżeniem korzenia (korzeń B10). Drugi typ (II) stanowiło drzewo z odśnieżeniem korzenia przybyszowego (korzeń B09). Do trzeciego typu (III) zaliczono drzewa z odśnieżeniem strefowym korzeni (korzeń B07 i korzeń B11). Z kolei do czwartego typu (IV) zaszeregowano drzewa z odśnieżeniem strefowym korzenia wraz odśnieżonym korzeniem przybyszowym (korzeń B01, B05 i B06). Piąty typ (V) stanowiło drzewo z pojedynczym odśnieżeniem korzenia poszerzone o analizę sąsiedniego korzenia zastoniętego (korzeń B15). Datowanie w wysokiej rozdzielczości zmian przyrostowych i anatomicznych odśnieżenia korzenia typu V (korzeń B15) zaprezentowano w osobnym Rozdziale 12.



Ryc. 41. Szkic terenowy systemu korzeniowego sosny zwyczajnej z podziałem na strefy zastonięte: poza szlakiem (C), pobocze szlaku (B) oraz strefę szlaku z odśnieżeniem na jego powierzchni (A), który został poddany seryjnemu próbkowaniu (białe linie oznaczają miejsca poboru fragmentów korzenia do analiz mikroskopowych).

Każdy z korzeni został podzielony na trzy strefy ze względu na położenie w stosunku do szlaku turystycznego. Pierwsza strefa tzw. poza szlakiem (C) obejmowała część zastoniętą korzenia położonej najbliżej podstawy pnia drzewa. Druga strefa pobocza (B) obejmowała część korzenia, która poprzedzała część odśnieżoną korzenia. Z kolei trzecia strefa szlaku (A) dotyczyła odśnieżenia korzenia w obrębie szlaku turystycznego (Ryc.41).

Najdłuższy pobrany korzeń posiadał długość 550 cm (korzeń B15), a najkrótszy 320 cm (korzeń B07). Łączna długość wszystkich ośmiu analizowanych korzeni wyniosła prawie 40 m.

Tab. 5. Odległość od pnia oraz głębokość zalegania i wysokość podparcia nad powierzchnią szlaku turystycznego analizowanych prób korzeni sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z wybranych drzew rosnących w obrębie stanowiska Bachotek z podziałem na strefy korzenia: A - strefa szlaku, B - strefa pobocza, C -strefa poza szlakiem

ID KORZENIA		B01	B05	B06	B07	B09	B10	B11	B15
TYP KORZENIA		IV	IV	IV	III	II	I	III	V
STREFA POZA SZLAKIEM (C)	ODLEGŁOŚĆ OD PNIA (LICZBA PRÓB)	100-183 (3)	143-206 (2)	103-192 (4)	120-174 (2)	133-256 (3)	95-290 (4)	102-165 (3)	125-270 (5)
	ŚREDNIA GŁĘBOKOŚĆ ZALEGANIA KORZENI (CM)	12,39	12,61	16,27	12,40	13,80	11,50	19,12	14,08
STREFA POBOCZA (B)	ODLEGŁOŚĆ OD PNIA (LICZBA PRÓB)	213-232 (2)	270-323 (2)	218-321 (4)	210-225 (2)	310-389 (2)	301-346 (4)	192-238 (2)	310-437 (4)
	ŚREDNIA GŁĘBOKOŚĆ ZALEGANIA KORZENI (CM)	8,78	5,16	7,27	10,87	7,62	5,84	7,37	12,77
STREFA SZLAKU (A)	ODLEGŁOŚĆ OD PNIA (LICZBA PRÓB)	A1. 259 (1) A2. 270-329 (4) A3.284-319 (3)	A1. 368 (1) A2. 345-410 (3)	A1. 358-372 (2) A2. 368-385 (2)	A1. 253-267 (2) A2. 295-311 (2)	457-533 (4)	358-424 (6)	A1.281-313 (2) A2. 286-317(2)	484-536 (3)
	ŚREDNIA WYSOKOŚĆ PODPARCIA KORZENIA (CM)	A1.2,42 A2.2,30 A3.2,12	A1.2,61 A2.3,05	A1. 2,43 A2. 2,27	A1.2,41 A2.2,37	2,34	1,82	A1. 2,66 A2.3,07	1,66

Pierwsza strefa poza szlakiem (C) poddana badaniom dendrochronologicznym obejmowała części korzeni znajdujące się najbliżej pnia i nie była poddana bezpośredniemu wydeptywaniu (Ryc. 41). Średnio strefa ta znajdowała się w przedziale od 100 do 290 cm od pnia drzewa. W strefie C średnia głębokość zalegania korzeni w glebie wyniosła 14 cm, minimalna 11,5 cm (korzeń B10) a maksymalna 19,12 cm (korzeń B11) (Tab. 5). W strefie pobocza (B) znajdującej od 210 do 437 cm od pnia, średnia głębokość zalegania korzeni wyniosła 8,2 cm, minimalnie 5,16 cm (korzeń B05) i maksymalnie 12,77 cm (korzeń B15). Była to strefa przejściowa, znajdująca się pomiędzy strefą A i strefą C (Ryc. 41). Z kolei ostatnia analizowana strefa szlaku (A) korzeni była zlokalizowana w przedziale od 253 do 536 cm od pnia. Strefa ta zlokalizowana była w obrębie szlaku turystycznego i była poddana bezpośredniemu oddziaływaniu ruchu turystycznego. Wszystkie korzenie ze strefy szlaku (A) były korzeniami odstoniętymi w wyniku wydeptywania. Maksymalna wysokość podparcia, tj. wydeptanych korzeni ze strefy A, wyniosła 3,07 cm (korzeń B11), a minimalna 1,66 cm (korzeń B15). Średnia wysokość podparcia korzeni wyniosła 2,4 cm. Najdłuższą część odstoniętą w obrębie szlaku turystycznego (tj. strefę A) posiadał korzeń B07 o długości 98 cm, a najkrótszą korzeń B06 (tj. 68 cm). Łącznie przeanalizowano 85 wyrzynków korzeni z ośmiu systemów korzeniowych (tj. ośmiu drzew) wytypowanych do szczegółowych badań dendrochronologicznych korzeni. W zależności od długości korzenia przeanalizowano od 8 do 14 przekrojów poprzecznych korzeni z danego systemu korzeniowego. Pomiarzy przyrostów radialnych korzeni wykonano średnio w odstępach, co 27 cm, przy czym najmniejszy interwał poboru prób korzeni wyniósł 18 cm (korzeń B01), a największy 43 cm (korzeń B09).

13.1. Analiza zmian przyrostowych wybranych korzeni odsłoniętych i zastłoniętych poddanych presji turystycznej

Chronologia stanowiska dla sosny zwyczajnej skonstruowanej dla Bachotka obejmowała okres od 1942 do 2014 roku (Rozdział 8), a najdłuższa sekwencja przyrostów rocznych analizowanych pni drzew ze szlaku turystycznego wyniosła od 1951 do 2015 (korzeń B07). Najkrótsza sekwencja obejmowała natomiast lata 1961-2015 (korzeń B09). Najwyższa korelacja pomiędzy chronologią stanowiska a pniem drzewa ze szlaku turystycznego wyniosła $R=0,86$ ($p<0,001$; korzeń B07), a najniższa $R=0,67$ ($p<0,001$; korzeń B15). Maksymalny wiek korzeni wyniósł 54 lata (korzeń B15), a minimalny 28 lat (korzeń B09).

Strefa poza szlakiem (C)

W strefie C (oznaczona na rycinach kolorem zielonym) w zależności od całkowitej długości korzenia pobrano od dwóch (korzenie B05 i B07) do pięciu prób (korzeń B15). Badane przekroje poprzeczne korzeni sosny ze strefy poza szlakiem (C) posiadały najdłuższą sekwencję przyrostową. Najstarszy fragment korzeni był zlokalizowany zawsze najbliżej pnia i liczył w zależności od korzenia od 49 (korzeń B10) do 60 lat (korzeń B15). Minimalny wiek korzenia dla tej strefy wyniósł 41 lat (korzeń B10), a maksymalny 59 lat (korzeń B15).

Po zestawieniu krzywych wzrostu dla poszczególnych przekrojów poprzecznych korzeni stwierdzono znaczne przesunięcia w latach charakteryzujących się podobnymi szerokościami przyrostów rocznych. Zdecydowana większość analizowanych korzeni zastłoniętych nie posiadała kompletnej sekwencji przyrostów rocznych. Zaobserwowano, że w strefie poza szlakiem (C) najstarsza sekcja C1 (tj. j. położonej najbliżej pnia) dla korzeni B01, B07 i B15, posiadała jako jedyna ze wszystkich pełną serię przyrostową (Ryc. 42, 55, 70). Najniższy udział przyrostów brakujących w przekrojach poprzecznych korzeni z omawianej strefy C odnotowano dla prób oznaczonych jako C1, tj. położonych najbliżej pnia. Minimalny udział przyrostów brakujących mieścił się w przedziale od 6,9% (korzeń B05; przekrój B05C1) do 11,8% (korzeń B06; przekrój B06C1). Z kolei najwyższy udział przyrostów brakujących rozpoznano w próbach położonych w krańcowej części strefy C i wyniósł on od 5,9% (korzeń B07; przekrój B07C2) do 25,8% (korzeń B10; przekrój B10C4). Dla sekcji C1 udział przyrostów wyklinowujących był najniższy i wyniósł minimalnie 9,3% (korzeń B09; przekrój B09C1), a maksymalnie 38,7% (korzeń B10; przekrój B10C4). Dla wszystkich korzeni rozpoznano stopniowy wzrost liczby przyrostów wyklinowujących i brakujących w przekrojach poprzecznych wraz z rosnącą odległością od pnia.

Wykonane datowanie pomostowe pozwoliło uzyskać zróżnicowaną zgodność pomiędzy krzywą wzrostu z pnia a krzywymi wzrostu przekrojów poprzecznych korzeni ze strefy C (Ryc. 42, 47, 51, 55, 59, 62, 65, 70). Najwyższą średnią wartość współczynnika korelacji pomiędzy pniem a średnimi krzywymi wzrostu korzeni ze strefy C odnotowano dla korzenia B15 i wyniosła ona $r=0,66$ ($p<0,001$) (Ryc. 70). Maksymalną wartość korelacji ($r=0,83$; $p<0,001$) pomiędzy wzrostem pnia a korzeniami odnotowano dla korzenia B15 i sekcji C1 (Ryc.70) pobranej najbliżej pnia. Z kolei najniższą ($r=0,28$; $p<0,05$) zależność wykazano korzenia B10 (przekrój B10C1). Najniższą istotną statystycznie średnią wartość współczynnika korelacji rozpoznano dla korzenia B10 ($r=0,30$, $p<0,05$) (Ryc.62). Należy wskazać, iż w przypadku jednego korzenia (tj. korzeń B06) zgodność krzywych wzrostu korzeni z pniem nie była istotna statystycznie (Ryc.51).

Strefa pobocza (B)

W strefie pobocza B (oznaczonej na rycinach kolorem niebieskim) analizowano od dwóch (korzenie: B01, B05, B07, B09, B11) do czterech (korzenie B10 i B15) przekrojów poprzecznych korzeni na drzewo. Średni wiek dla poszczególnych korzeni w strefie pobocza (B) wyniósł od 27 lat (korzeń B10) do 54 lat (B15).

Strefę charakteryzowała największa zmienność występowania przyrostów wyklinowujących i brakujących (Ryc. 43, 48, 52, 56, 60, 63, 66, 72). Największy udział przyrostów brakujących wyniósł w tej strefie 26,7% (korzeń B10; przekrój B10B1) (Ryc.63), a najmniejszy 3,8% (korzeń B15; przekrój B15B4) (Ryc.72). Z kolei największy udział przyrostów wyklinowujących, tj. 82,6% rozpoznano dla korzenia B10, (przekrój B10B4) (Ryc.63), a najmniejszy (20,5%) dla przekroju korzenia B09 (przekrój B09B1)(Ryc.60). We wszystkich korzeniach strefy pobocza (B) zaznaczył się wyraźny i stopniowy wzrost występowania przyrostów wyklinowujących, postępujący wraz ze zwiększającą się odległością od pnia.

Pomiędzy krzywymi wzrostu korzeni ze strefy B, a krzywymi wzrostu z pnia dla pięciu korzeni (tj. korzenia B05, B07, B09, B11 i B15) rozpoznano niższą statystycznie korelację w porównaniu do strefy poza szlakiem (B). Z kolei dla korzenia B01, B06 i B10 wykazano wyższe wartości korelacji pomiędzy wzrostem korzeni w strefie B, a wzrostem odpowiedniego pnia. Najwyższą zgodność przyrostową z krzywą z pnia zaobserwowano dla korzenia B15 (przekrój B15B1; $r=0,58$; $p<0,001$)(Ryc. 72), a najniższą dla korzenia B05 (przekrój B05B2; $r=0,33$; $p<0,05$)(Ryc.48).

Strefa szlaku (A)

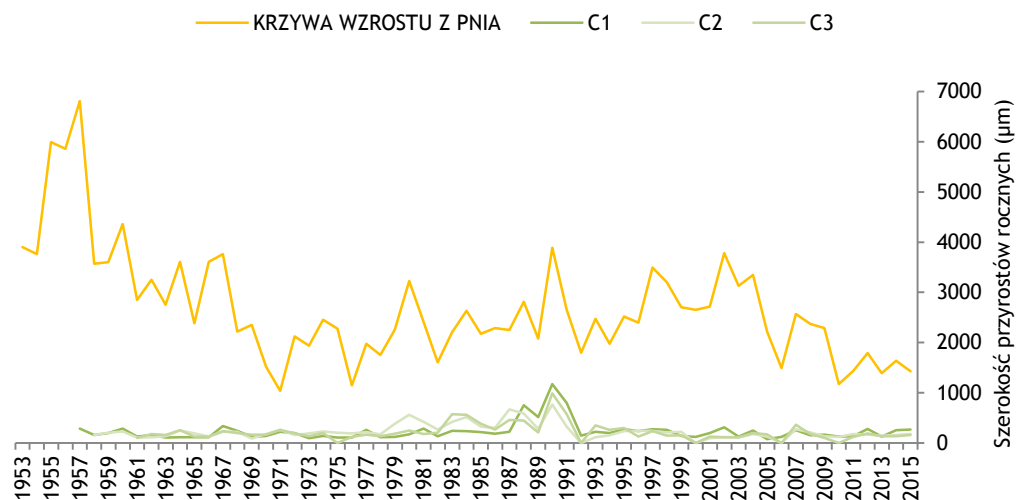
W strefie szlaku A (oznaczonej na rycinach kolorem czerwonym), tj. strefie poddanej bezpośredniemu oddziaływaniu ruchu turystycznego, rozpoznano najkrótsze serie przyrostów rocznych dla wszystkich korzeni. Najmłodsze przekroje poprzeczne z części odsłoniętej dotyczyły korzenia B10 (17 lat), a najstarsze korzenia B15 (47 lat). Najmłodszy przekrój poprzeczny datowano od roku 1998 (korzeń B10; przekrój B10A6) (Ryc.64), a najstarszy na rok 1965 (korzeń B15; przekrój B15A1) (Ryc. 74).

W strefie szlaku (A) nie zidentyfikowano przyrostów brakujących w częściach odsłoniętych głównych korzeni pobranych ze strefy szlaku turystycznego. Podobnie sytuacja dotyczyła korzeni, które w strefie szlaku rozgałęziały się na dwie odsłonięte, równoległe rosnące części (korzeń B07 i B11). Z kolei występowanie przyrostów brakujących zaobserwowano w częściach odsłoniętych korzeni przybyszowych, które stanowiły odgałęzienie niższego rzędu od części odsłoniętej głównego korzenia (korzeń B01, B05, B06) lub stanowiły jedyną część odsłoniętą korzenia w obrębie szlaku turystycznego (korzeń B09). W tym przypadku udział przyrostów brakujących w korzeniu wynosił od 9,1% (korzeń B09; przekrój B09A3) (Ryc. 61) do 21,4% (korzeń B01; przekrój B01A3) (Ryc. 46). Jednocześnie odsłonięte części głównego korzenia, tj. korzenie: B01, B05 i B06 wykazywały pełną sekwencję przyrostów radialnych.

We wszystkich analizowanych przekrojach poprzecznych odsłoniętych części korzeni zauważono brak wykształcania pełnych, koncentrycznych pierścieni rocznych oraz powszechne występowanie przyrostów wyklinowujących. W odsłoniętych częściach korzeni poddanych presji turystycznej odnotowano największą liczbę przyrostów wyklinowujących w porównaniu do pozostałych prób korzeni pochodzących ze wszystkich analizowanych stref. Średni udział przyrostów wyklinowujących w odsłoniętych częściach korzeni mieścił się w przedziale od 56,6% (korzeń B06) do 96,8% (korzeń B07). W niektórych przypadkach odgałęzienia odsłoniętej części

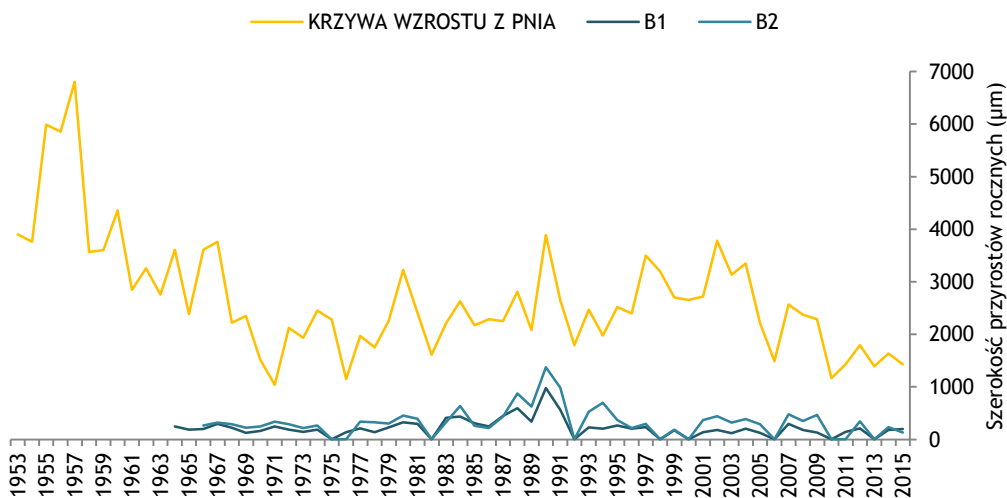
korzenia głównego B06 (przekroje B06A1 i B06A2) nie posiadały rdzenia i wszystkie przyrosty zidentyfikowano w tych próbkach były przyrostami wyklinowującymi. Taka sytuacja dotyczyła również przekrojów poprzecznych korzeni B01 i B07 (Ryc.42, 43, 44, 57, 58).

W strefie A zaznaczyły się największe rozbieżności pomiędzy sekwencjami przyrostowymi korzeni, a krzywą wzrostu odpowiadającego pnia. Najwyższe wskaźniki współczynnika korelacji z pniem wykazano dla przekrojów poprzecznych korzeni pobranych z korzeni głównych, tj. korzeni bezpośrednio połączonych z pniem drzewa i odstłoniętych w obrębie strefy A. Należy podkreślić, iż były to najwyższe wartości korelacji, jakie uzyskano dla przekrojów korzeni ze wszystkich analizowanych stref korzeni. Najwyższą zgodność przyrostową pomiędzy korzeniem ze strefy szlaku (A) z krzywą wzrostu z pnia wykazano dla korzenia B15 (przekrój B15A1; $r=0,88$; $p<0,001$) (Ryc.74). Podobnie wysoka zależność dotyczyła wszystkich odstłoniętych części głównych korzenia ze strefy szlaku (A) z pniem (Ryc. 44, 45). Z kolei zgodność przyrostowa korzenia przybyszowego, tj. stanowiącego odgałęzienie odstłoniętej części korzenia głównego, była bardzo niska i zazwyczaj nieistotna statycznie. Przekroje te charakteryzował wysoki udział przyrostów brakujących (do ponad 20%). Jediną istotną statystycznie korelację sekwencji przyrostowej korzenia przybyszowego z pniem wykazano dla korzenia B01 (przekrój B01A1; $r=0,42$; $p<0,05$) (Ryc. 46).



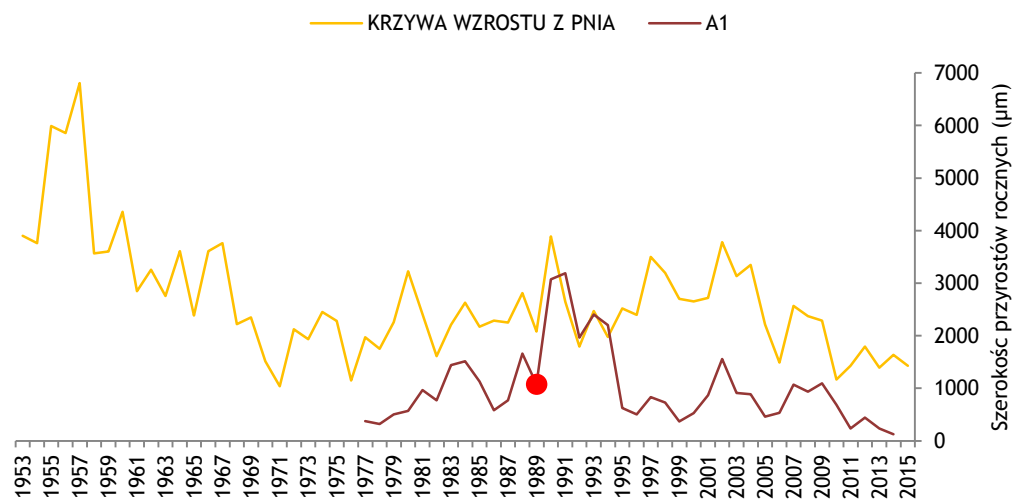
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEŃ ®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
B01C1 (100)	0,31 *	59	59	17,0	0,0
B01C2 (145)	0,21	55	58	20,7	5,17
B01C3 (183)	0,31 *	50	55	25,4	9,09

Ryc. 42. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zasłoniętymi próbkami korzenia B01 sosny zwyczajnej ze strefy poza szlakiem (C) (C1-C3) oraz krzywą wzrostu z pnia (B01), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)



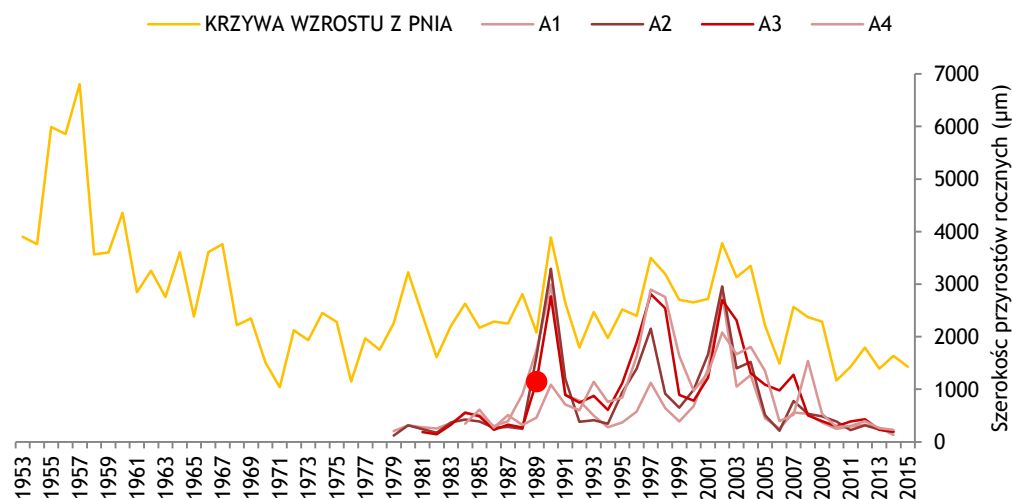
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEŃ ®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
B1 (213)	0,40 **	44	52	44,2	15,4
B2 (232)	0,46 ***	40	50	64,0	20,0

Ryc. 43. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zasłoniętymi próbkami korzenia B01 sosny zwyczajnej ze strefy pobocza (B) (B1-B2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B01), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)



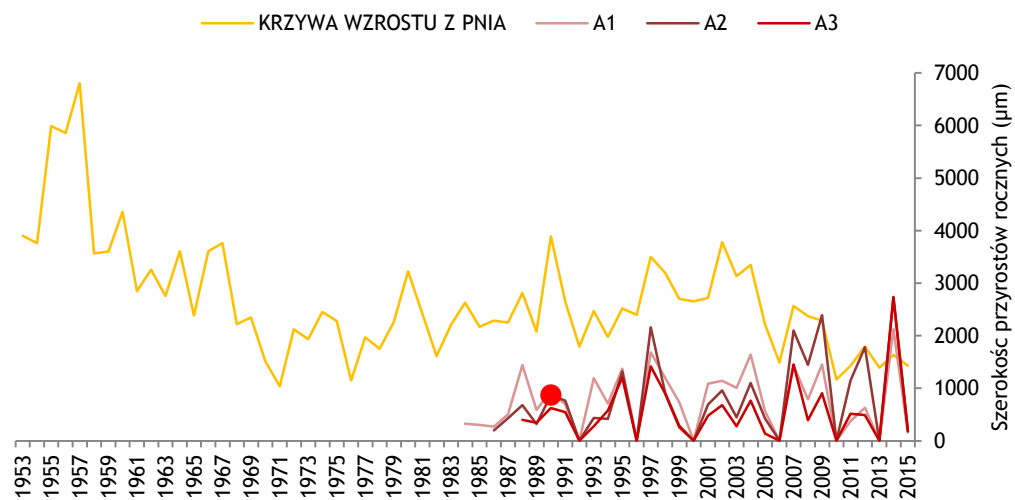
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEN ⑥	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
PIERWSZA GŁÓWNA CZĘŚĆ KORZENIA ODSŁONIĘTEGO					
A1 (259)	0,48**	38	38	68,4	0,0

Ryc. 44. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbą z pierwszej głównej części odsłoniętej korzenia B01 sosny zwyczajnej ze strefy szlaku (A) (A1) oraz krzywą wzrostu z pnia (B01), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)/ Moment odślonięcia-czerwony znacznik (daty odślonięć korzeni Załącznik 3)



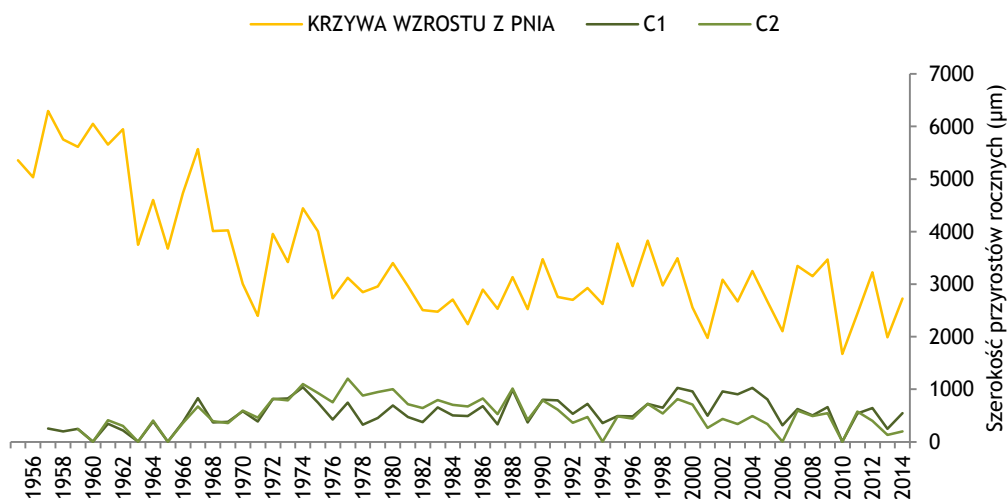
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEN ⑥	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
DRUGA GŁÓWNA CZĘŚĆ KORZENIA ODSŁONIĘTEGO					
A1 (265)	0,68***	36	36	61,1	0,0
A2 (286)	0,73***	36	36	72,2	0,0
A3 (303)	0,77***	34	34	64,7	0,0
A4 (329)	0,71***	31	31	48,4	-

Ryc. 45. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbami z drugiej głównej części odsłoniętej korzenia B01 sosny zwyczajnej ze strefy szlaku (A) (A1-A4) oraz krzywą wzrostu z pnia (B01), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odślonięcia-czerwony znacznik (daty odślonięć korzeni Załącznik 3)



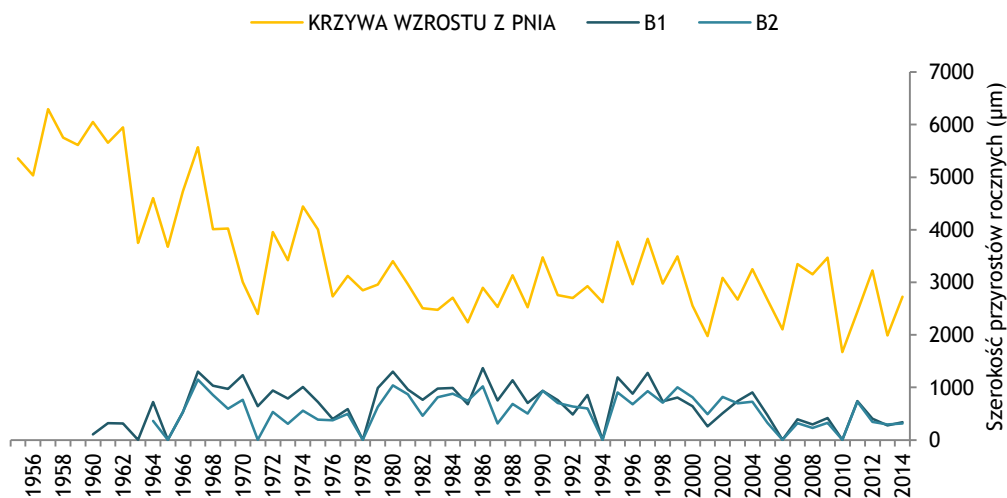
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEŃ ®	WIEK PRZED DAT. POM. (LATA)	WIEK PO DAT. POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
ODSŁONIĘTE ODGAŁĘZIENIE GŁÓWNEGO KORZENIA					
A1 (284)	0,42 *	26	32	99,9	18,8
A2 (305)	0,18	24	30	73,3	20,0
A3 (319)	0,19	22	28	25,0	21,4

Ryc. 46. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbami z odsłoniętego odgałęzienia (korzeń przybyszowy) głównego korzenia B01 sosny zwyczajnej ze strefy szlaku (A) (A1-A3) oraz krzywą wzrostu z pnia (B01), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odsłonięcia-czerwony znacznik (daty odsłonięć korzeni Załącznik 3)



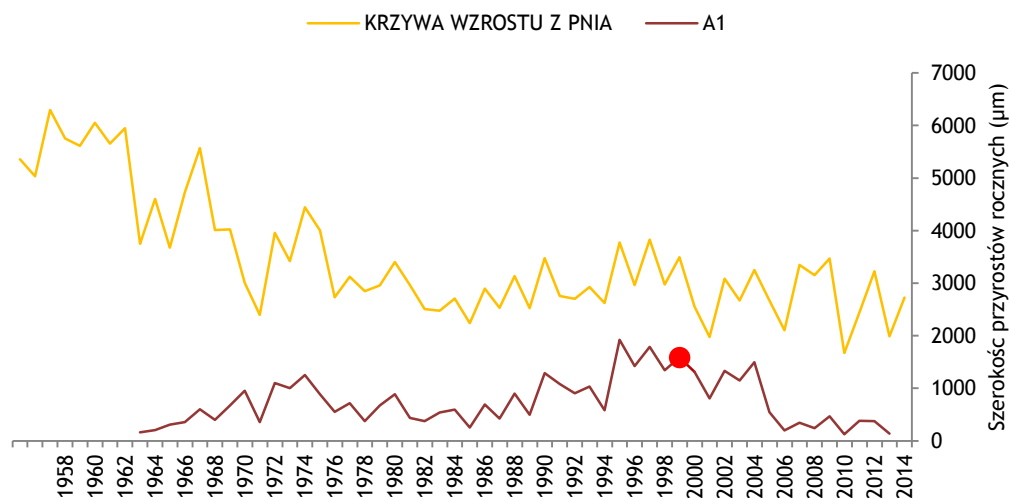
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEŃ ®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
C1 (143)	0,55 **	54	58	17,2	6,9
C2 (206)	0,53 **	50	56	21,4	10,7

Ryc. 47. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zastąpionymi próbkami korzenia B05 sosny zwyczajnej ze strefy poza szlakiem (C) (C1-C2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B05), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)



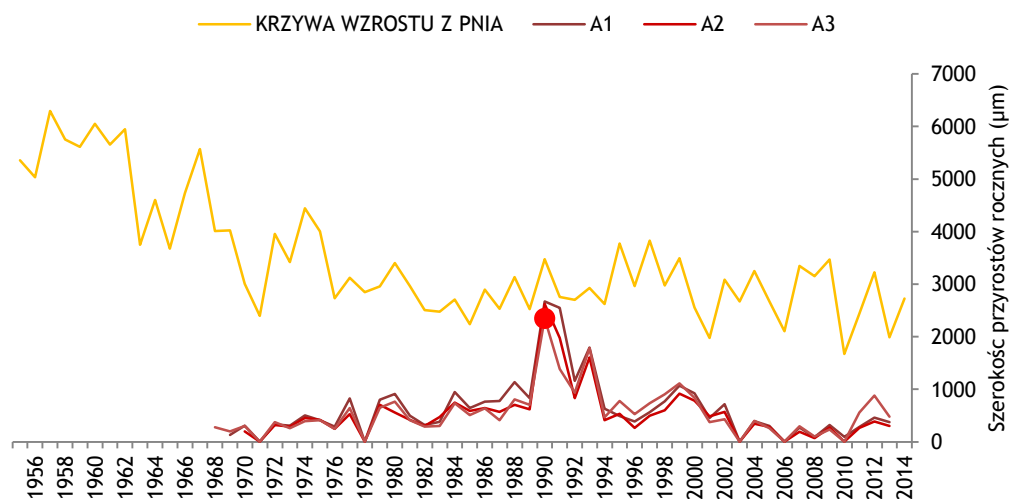
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEŃ ®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
B1 (270)	0,51 ***	49	55	25,4	10,9
B2 (323)	0,33 *	45	51	31,4	11,8

Ryc. 48. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zastąpionymi próbkami korzenia B05 sosny zwyczajnej ze strefy pobocza (B) (B1-B2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B05), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)



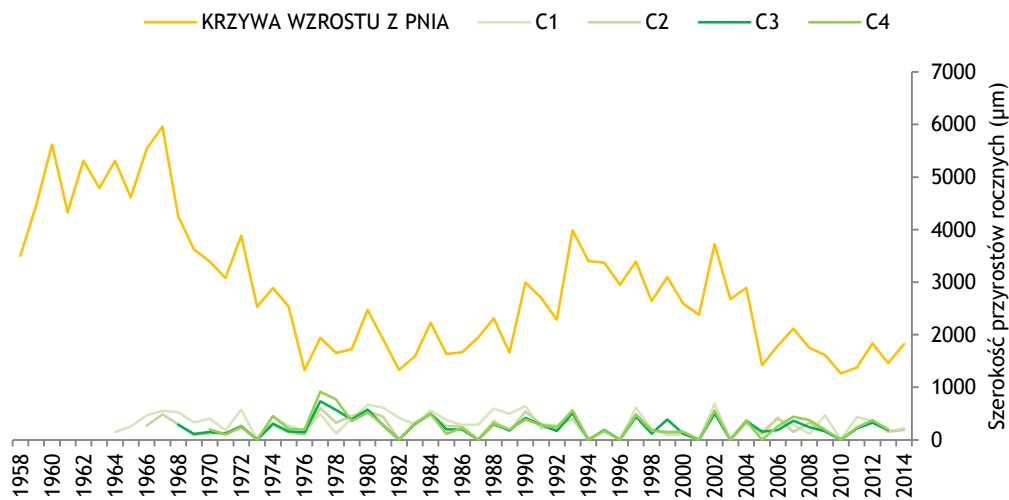
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEN [®]	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
GŁÓWNA CZĘŚĆ KORZENIA ODSŁONIĘTEGO					
A1 (368)	0,59 ***	51	51	84,3	-

Ryc. 49. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbą z głównej części odsłoniętej korzenia B05 sosny zwyczajnej ze strefy szlaku (A) (A1) oraz krzywą wzrostu z pnia (B05), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odsłonięcia-czerwony znacznik (daty odsłonięć korzeni Załącznik 3)



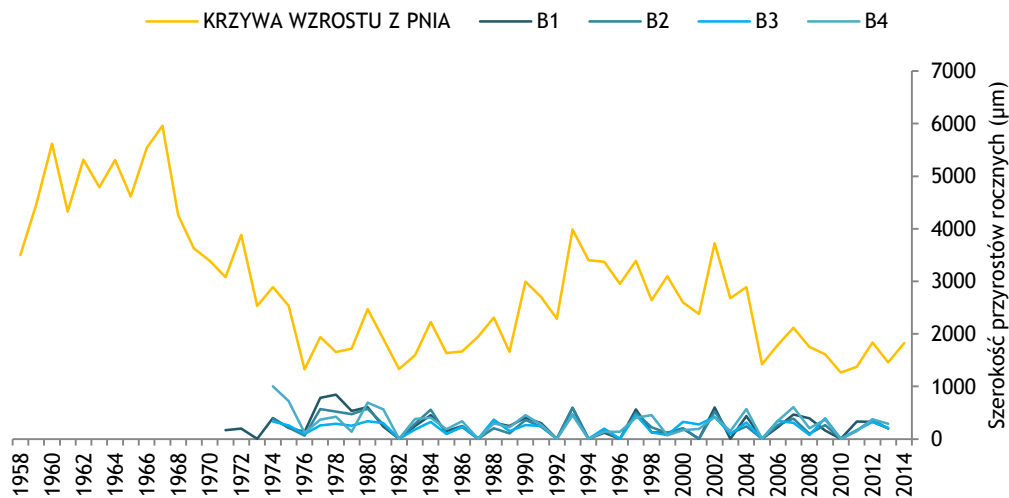
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEN [®]	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
ODSŁONIĘTE ODGAŁĘZIENIE GŁÓWNEGO KORZENIA					
A1 (345)	0,24 *	41	46	50,0	10,9
A2 (376)	0,26 *	40	45	75,6	11,1
A3 (410)	0,38 *	39	44	56,8	11,4

Ryc. 50. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami z odsłoniętego odgałęzienia (korzeń przybyszowy) głównego korzenia B05 sosny zwyczajnej ze strefy szlaku (A) (A1-A3) oraz krzywą wzrostu z pnia (B05), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odsłonięcia-czerwony znacznik (daty odsłonięć korzeni Załącznik 3)



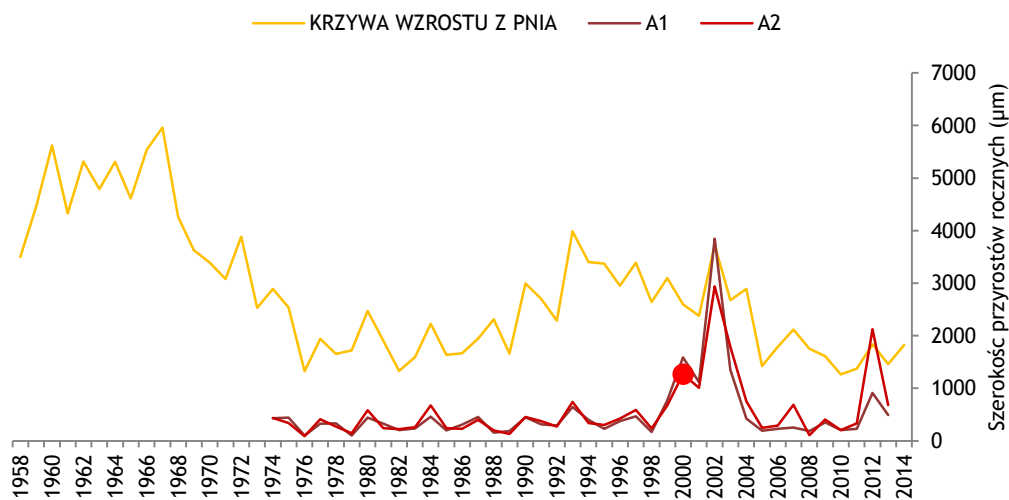
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEŃ ®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
C1 (103)	0,18	45	51	15,7	11,8
C2 (138)	0,24	41	49	18,4	16,3
C3 (167)	0,23	38	46	19,6	17,4
C4 (192)	0,18	35	44	22,7	20,5

Ryc. 51. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zastąpionymi próbkami korzenia B06 sosny zwyczajnej ze strefy poza szlakiem (C) (C1-C4) oraz krzywą wzrostu z pnia (B06), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)



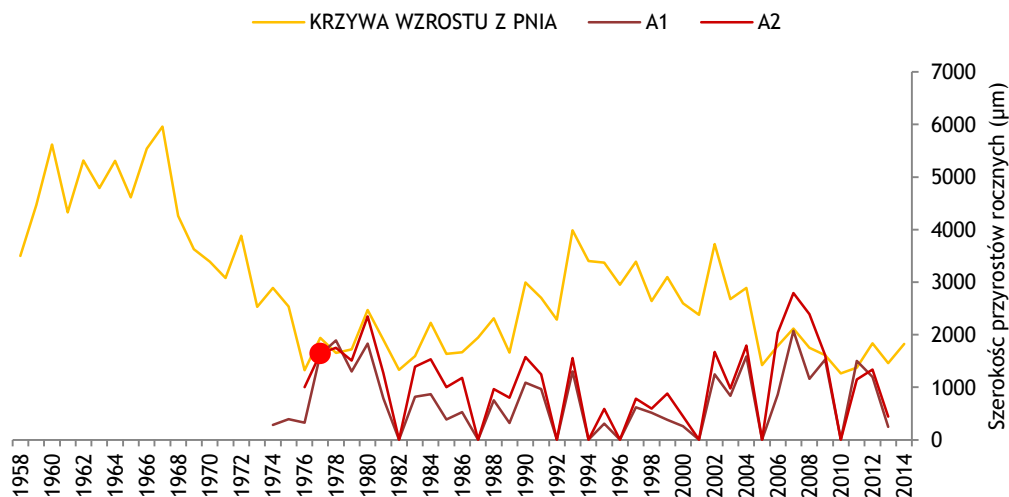
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEŃ ®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
B1 (218)	0,26	33	43	25,6	23,3
B2 (257)	0,28	32	40	32,5	20,0
B3 (295)	0,34 *	33	40	37,5	17,5
B4 (321)	0,25	34	40	42,5	15,0

Ryc. 52. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zastąpionymi próbkami korzenia B06 sosny zwyczajnej ze strefy pobocza (B) (B1-B4) oraz krzywą wzrostu z pnia (B06), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)



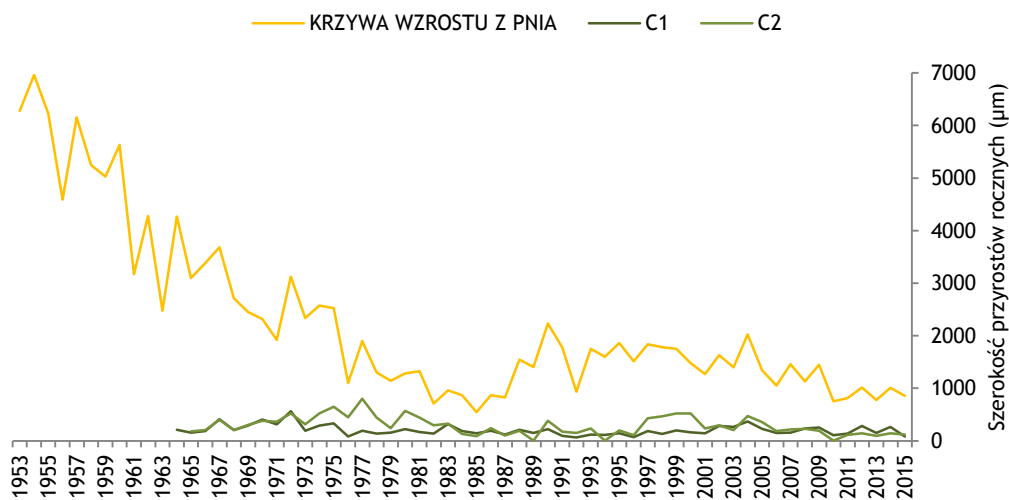
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIENŃ ®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
GŁÓWNA CZĘŚĆ KORZENIA ODSŁONIĘTEGO					
A1 (358)	0,45 **	40	40	62,5	-
A2 (372)	0,40 *	40	40	82,5	-

Ryc. 53. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami z głównej części odsłoniętej korzenia B06 sosny zwyczajnej ze strefy szlaku (A) (A1-A2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B06), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odsłonięcia- czerwony znacznik (daty odsłonięć korzeni Załącznik 3)



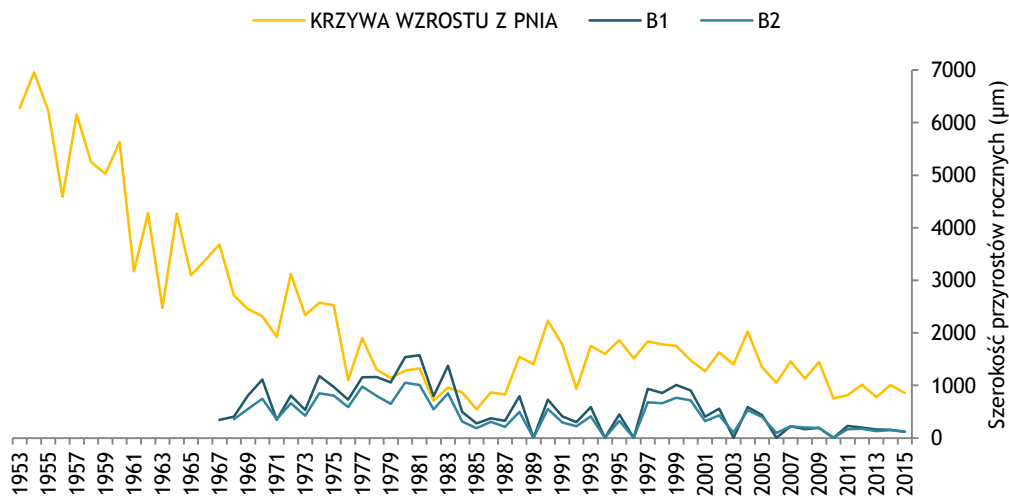
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIENŃ ®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
ODSŁONIĘTE ODGAŁĘZIENIE GŁÓWNEGO KORZENIA					
A1 (368)	0,04	32	40	99,9	20,0
A2 (385)	0,03	30	38	99,9	21,0

Ryc. 54. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami z odsłoniętego odgałęzienia głównego korzenia B06 sosny zwyczajnej ze strefy szlaku (A) (A1-A2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B06), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odsłonięcia- czerwony znacznik (daty odsłonięć korzeni Załącznik 3)



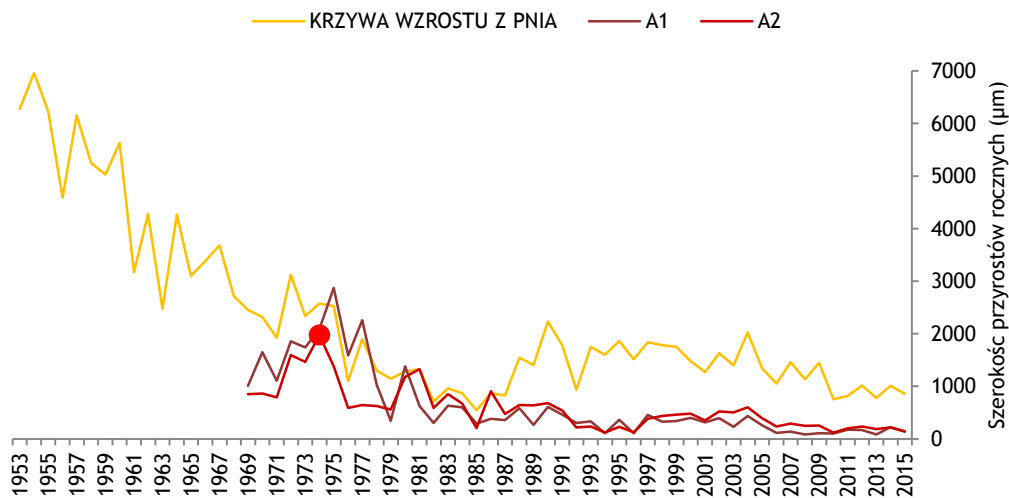
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIENI®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
C1 (120)	0,60 ***	52	52	13,5	-
C2 (174)	0,57 ***	48	51	17,7	5,9

Ryc. 55. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zastąpionymi próbkami korzenia B07 sosny zwyczajnej ze strefy poza szlakiem (C) (C1-C2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B07), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)



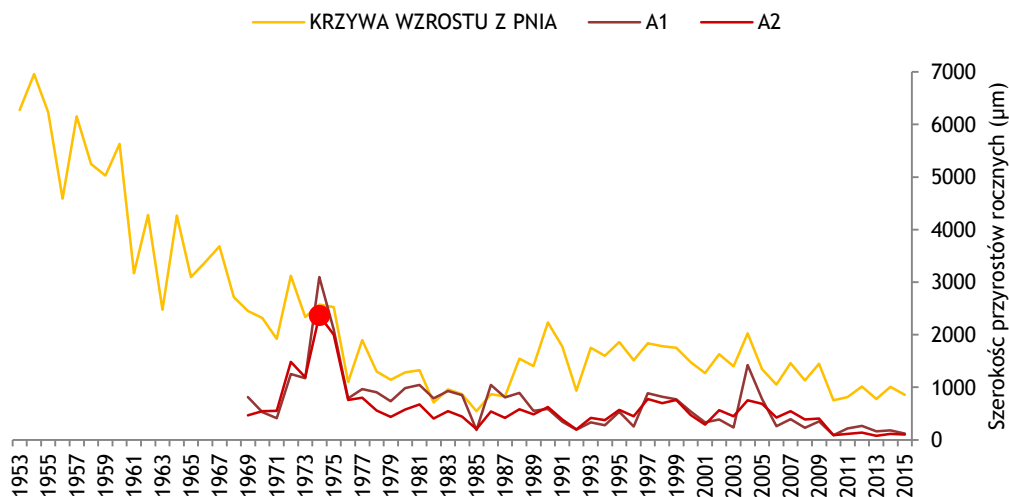
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIENI®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
B1 (210)	0,36 *	43	49	22,5	12,2
B2 (225)	0,44 **	44	48	31,2	8,3

Ryc. 56. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zastąpionymi próbkami korzenia B07 sosny zwyczajnej ze strefy pobocza (B) (B1-B2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B07), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)



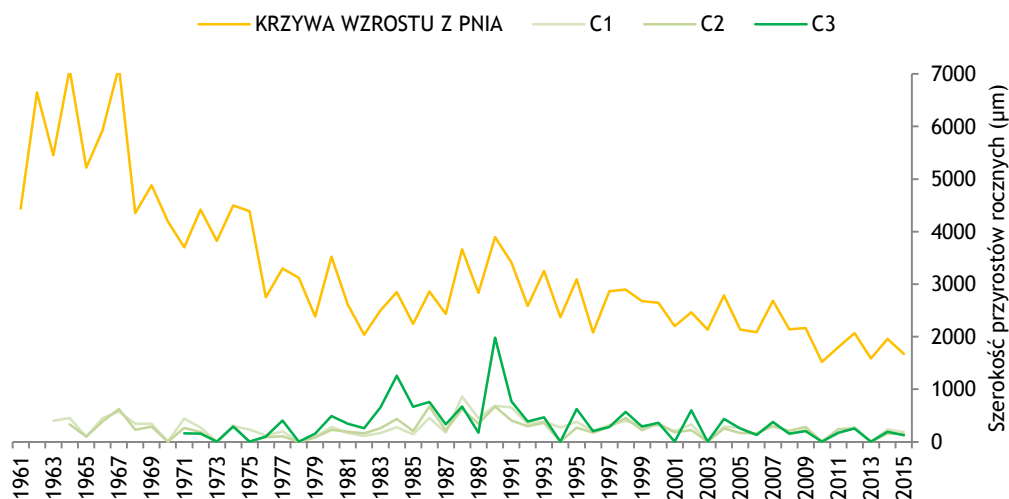
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEŃ ®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
PIERWSZA GŁÓWNA CZĘŚĆ KORZENIA ODSŁONIĘTEGO					
A1 (253)	0,64 ***	47	47	93,6	-
A2 (267)	0,61 ***	47	47	99,9	-

Ryc. 57. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami z pierwszej głównej części odsłoniętej korzeni B07 sosny zwyczajnej ze strefy szlaku (A) (A1-A2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B07), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odsłonięcia- czerwony znacznik (daty odsłonięć korzeni Załącznik 3)



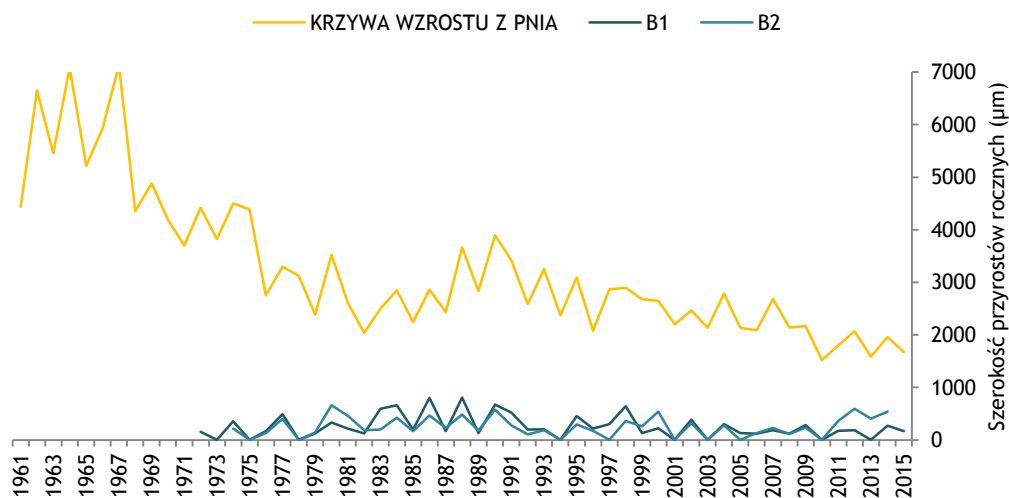
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEŃ ®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
DRUGA GŁÓWNA CZĘŚĆ KORZENIA ODSŁONIĘTEGO					
A1 (295)	0,55 ***	47	47	99,9	-
A2 (311)	0,72 ***	47	47	93,6	-

Ryc. 58. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami z drugiej głównej części odsłoniętej korzeni B07 sosny zwyczajnej ze strefy szlaku (A) (A1-A2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B07), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odsłonięcia- czerwony znacznik (daty odsłonięć korzeni Załącznik 3)



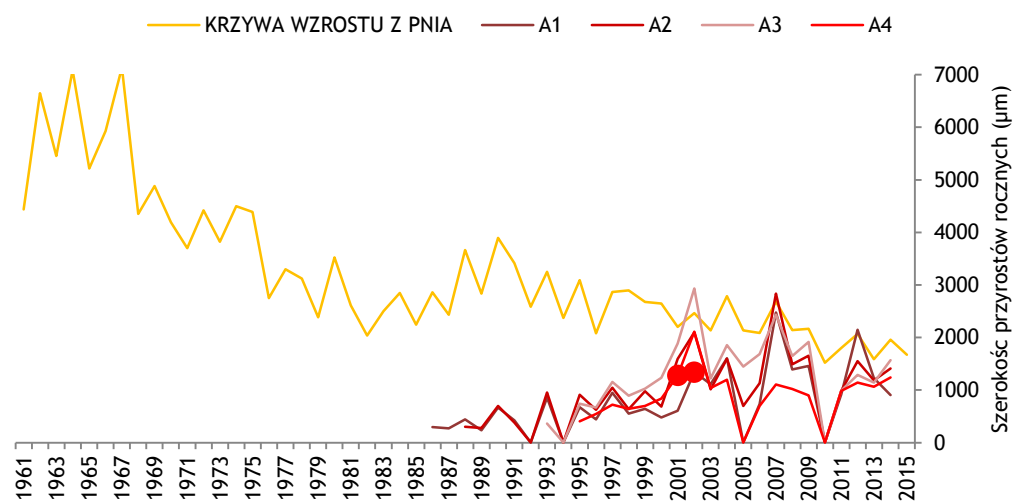
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ (cm))	KORELACJA PIEŃ®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
C1 (133)	0,43 ***	46	53	9,4	11,3
C2 (197)	0,33 *	44	52	11,5	15,4
C3 (256)	0,29 *	38	46	17,4	17,4

Ryc. 59. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zastąpionymi próbkami korzenia B09 sosny zwyczajnej ze strefy poza szlakiem (C) (C1-C3) oraz krzywą wzrostu z pnia (B09), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)



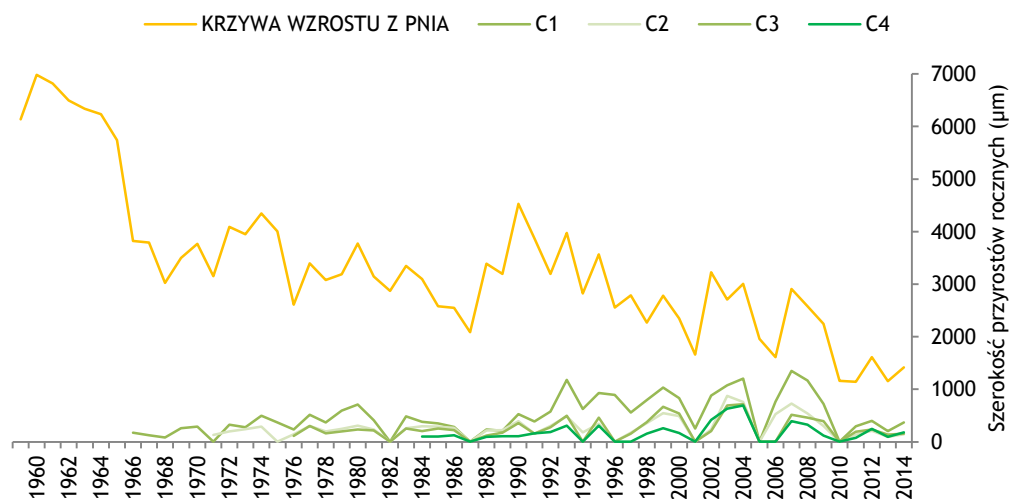
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEŃ®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
B1 (310)	0,33 *	36	44	20,5	18,2
B2 (389)	0,17	34	42	23,8	19,0

Ryc. 60. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zastąpionymi próbkami korzenia B09 sosny zwyczajnej ze strefy pobocza (B) (B1-B2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B09), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)



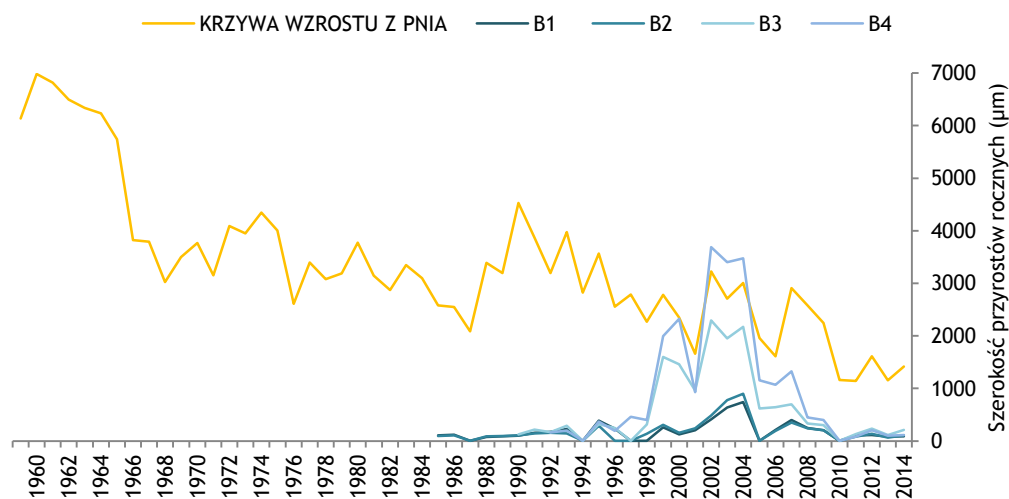
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEŃ ®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
ODSŁONIĘTE ODGAŁĘZIENIE GŁÓWNEGO KORZENIA					
A1 (457)	0,09	26	29	51,7	10,3
A2 (497)	0,13	24	27	63,0	11,2
A3 (513)	0,34	20	22	63,6	9,1
A4 (533)	0,20	18	20	70,0	10,0

Ryc. 61. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami z odsłoniętego odgałęzienia głównego korzenia zastłoniętego B09 sosny zwyczajnej ze strefy szlaku (A) (A1-A4) oraz krzywą wzrostu z pnia (B09), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odsłonięcia- czerwony znacznik (daty odsłonięć korzeni Załącznik 3)



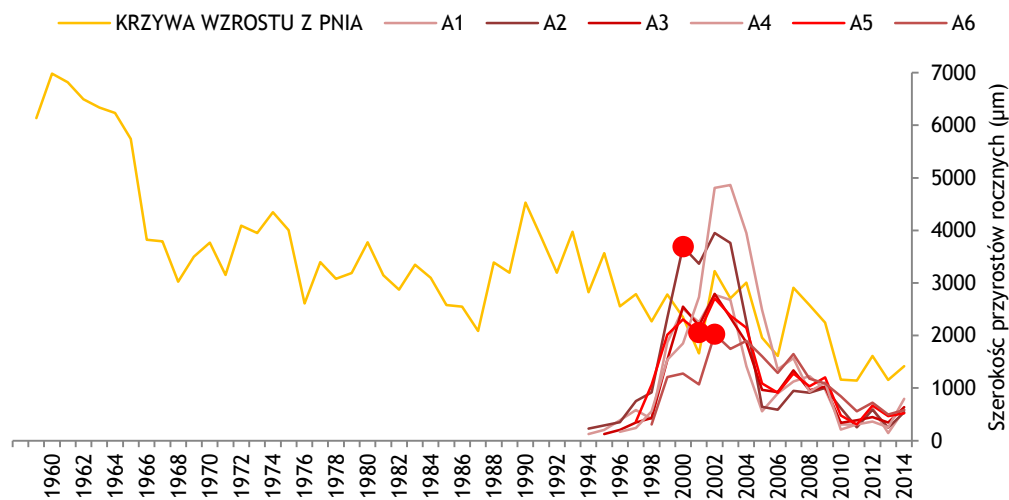
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEN ⑥	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
C1 (95)	0,28 *	44	49	25,5	10,2
C2 (140)	0,30 *	37	44	34,1	15,9
C3 (220)	0,33 *	31	39	35,9	20,5
C4 (290)	0,32	23	31	38,7	25,8

Ryc. 62. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zastąpionymi próbkami korzenia B10 sosny zwyczajnej ze strefy poza szlakiem (C) (C1-C4) oraz krzywą wzrostu z pnia (B10), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)



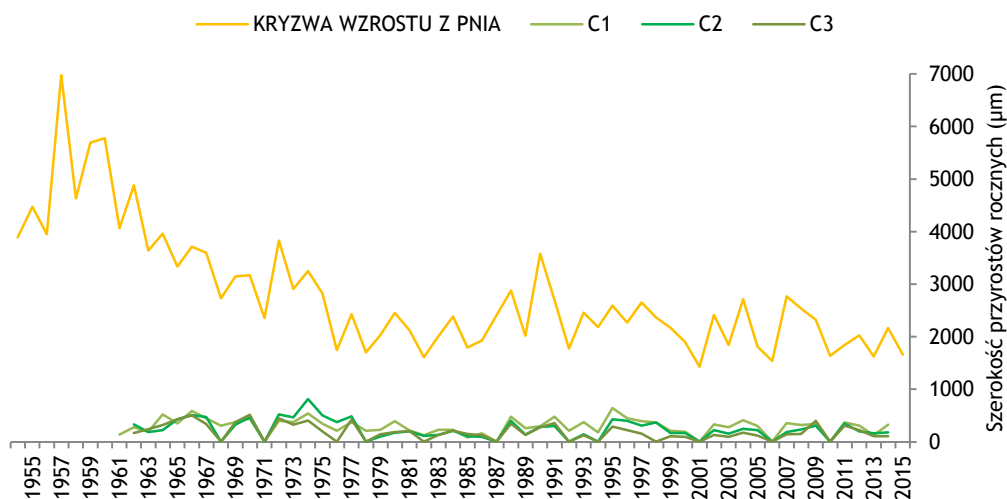
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEN ⑥	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
B1 (301)	0,31	22	30	43,3	26,7
B2 (310)	0,23	24	30	46,7	20,0
B3 (327)	0,45 *	22	25	80,0	12,0
B4 (346)	0,58 **	21	23	82,6	8,7

Ryc. 63. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zastąpionymi próbkami korzenia B10 sosny zwyczajnej ze strefy pobocza (B) (B1-B4) oraz krzywą wzrostu z pnia (B10), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)



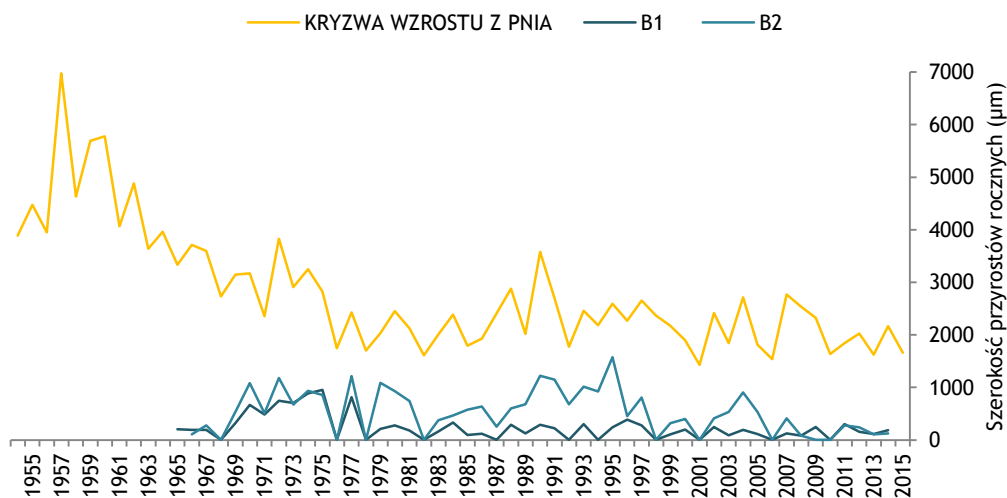
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEŃ ®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
GŁÓWNA CZĘŚĆ KORZENIA ODSŁONIĘTEGO					
A1 (358)	0,55 **	21	21	66,7	-
A2 (363)	0,51 **	21	21	81,0	-
A3 (384)	0,69 ***	20	20	60,0	-
A4 (395)	0,67 ***	19	19	73,7	-
A5 (414)	0,78 ***	18	18	44,4	-
A6 (424)	0,85 ***	17	17	41,1	-

Ryc. 64. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbami z głównej części odsłoniętej korzenia B10 sosny zwyczajnej ze strefy A (A1-A6) oraz krzywą wzrostu z pnia (B10), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odsłonięcia- czerwony znacznik (daty odsłonięć korzeni Załącznik 3)



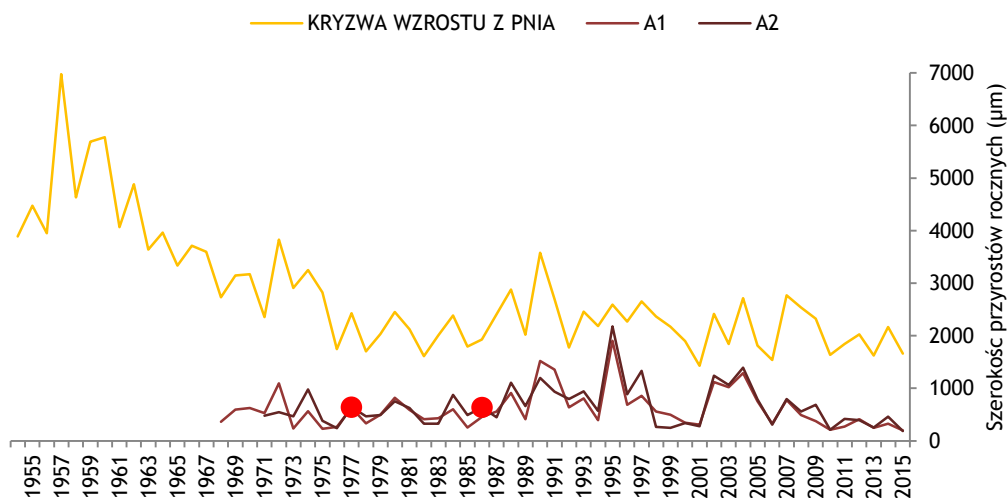
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEŃ ®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
C1 (102)	0,49 ***	49	54	9,3	9,3
C2 (132)	0,56 ***	44	53	15,1	17,0
C3 (165)	0,57 ***	41	53	17,0	22,6

Ryc. 65. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zastąpionymi próbkami korzenia B11 sosny zwyczajnej ze strefy poza szlakiem (C) (C1-C3) oraz krzywą wzrostu z pnia (B11), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)



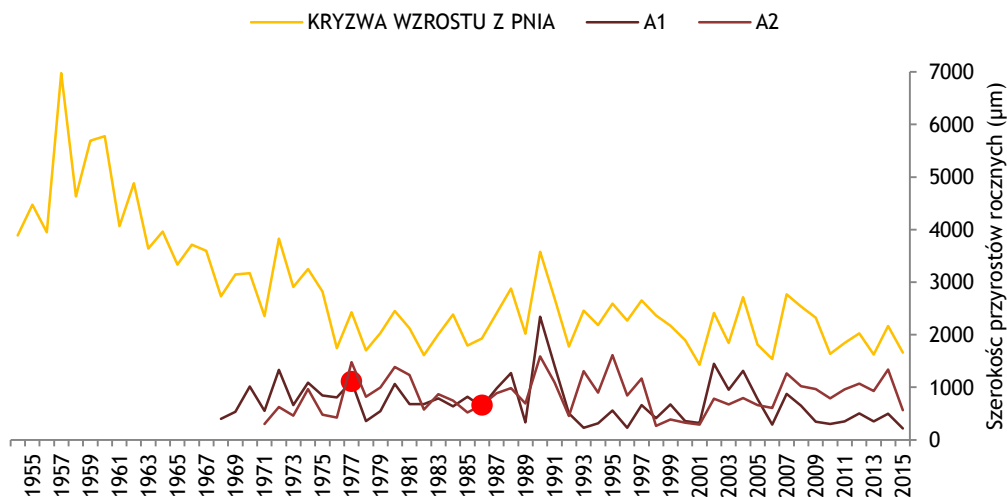
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEŃ ®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
B1 (193)	0,54 ***	39	50	26,0	22,0
B2 (238)	0,43 **	40	49	34,7	18,4

Ryc. 66. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zastąpionymi próbkami korzenia B11 sosny zwyczajnej ze strefy pobocza (B) (B1-B2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B11), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)



ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEN ⑥	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
PIERWSZA GŁÓWNA CZĘŚĆ KORZENIA ODSŁONIĘTEGO					
A1 (281)	0,58 ***	48	48	77,1	-
A2 (313)	0,54 ***	45	45	89,6	-

Ryc. 67. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami z pierwszej głównej części odsłoniętej korzenia B11 sosny zwyczajnej ze strefy A (A1-A2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B11), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odsłonięcia- czerwony znacznik (daty odsłonięć korzeni Załącznik 3)



ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ OD PNIA) (cm)	KORELACJA PIEN ⑥	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
DRUGA GŁÓWNA CZĘŚĆ KORZENIA ODSŁONIĘTEGO					
A1 (286)	0,54 ***	48	48	91,1	-
A2 (317)	0,67 ***	45	45	88,9	-

Ryc. 68. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami z drugiej głównej części odsłoniętej korzenia B11 sosny zwyczajnej ze strefy A (A1-A2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B11), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odsłonięcia- czerwony znacznik (daty odsłonięć korzeni Załącznik 3)

13.2. Dyskusja wyników datowania w wysokiej rozdzielczości zmian przyrostowych korzeni sosny zwyczajnej poddanych denudacji antropogenicznej

Wiek korzeni sosny zwyczajnej we wszystkich analizowanych strefach korzeni oszacowano poprzez pomiary szerokości przyrostów rocznych, będących wypadkową zwiększania wielkości korzenia w wyniku wzrostu wtórnego (Zielski, Krąpiec 2004). Przeprowadzone w wysokiej rozdzielczości datowanie pomostowe wybranych części systemów korzeniowych poddanych presji turystycznej na stanowisku Bachotek wskazało na znaczne rozbieżności w liczbie i szerokości przyrostów rocznych korzeni w profilu podłużnym. Wyraźna reakcja przyrostowa sosen na skutek wydeptywania korzeni zaznaczyła się nagłymi zaburzeniami w przebiegu krzywych przyrostowych korzeni odstoniętych. Wyraźny rozkład krzywych, związany z ich gwałtownym rozejściem determinowanym nagłą zmianą proporcji szerokości i liczby stojów w przeciwległych partiach korzenia odstoniętego, jest charakterystyczny dla działania silnych bodźców zewnętrznych w podłożu. Związane jest to bezpośrednio ze zmianą naturalnej osi wzrostu korzenia, tj. zmianą stanu równowagi wzrostu korzenia związanej z jego odstonięciem i działania procesów erozyjno-denudacyjnych w obrębie szlaku turystycznego. Ponadto odstonięte w obrębie szlaku korzenie sosny reagowały wzmoczoną redukcją przyrostów rocznych, na niesprzyjające warunki wzrostu, a zarazem silnym wzrostem szerokości stojów, będących efektem reakcji drzewa do regeneracji w sprzyjających warunkach.

Powszechne występowanie zaburzeń przyrostu radialnego w korzeniach wykazali odpowiednio D.C.F. Fayle (1968) oraz C. Krause i H. Morin (1995,1999). Autorzy ci stosowali seryjne próbkowanie wzdłuż głównej osi korzenia w interwale, co 10-15 cm do prezentacji krótkookresowej zmienności przyrostowej i anatomicznej korzeni. Znaczące rozbieżności w rozkładzie pierścieni rocznych w obrębie przekroju poprzecznego jak również wzdłuż profilu podłużnego korzenia wykazano także w próbach korzeni świerka pospolitego (*Picea abies*) pobranych z Gorców (Wrońska-Wałach i in. 2012; Wrońska-Wałach i in. 2016). Z kolei próbę datowania pomostowego pojedynczych sekwencji przyrostów rocznych pojedynczych przekrojów poprzecznych korzeni odstoniętych i pni drzew ze ścieżek turystycznych podjęli M. Pelfini i M. Santilli (2006).

Aktywność kambialna w korzeniach oraz w pniu jest różna i zależy od wielu czynników środowiskowych (Fayle 1968; Savidge 2000; Pelfini, Santilli 2006). Na wzrost korzenia poza auksyną tj. hormonem odpowiedzialny za procesy różnicowania komórek (Hejnowicz 2012) wpływ mają różne właściwości fizyczne pokrywy glebowej, takie jak temperatura, zawartość tlenu, wilgotność, zagęszczenie gleby czy naprężenia mechaniczne wzdłuż korzenia (Rowe 1964, Fayle 1968, 1975a, b; Shea 1973, Schrader i in. 2003). Według D.C.F. Fayle'a (1968) większa liczba pełnych pierścieni rocznych oraz mniejsza liczba przyrostów wyklinowujących w korzeniu zależna jest od wieku korzenia. Należy wskazać, iż jedynie niewielu autorów podjęło próbę porównania wzrostu radialnego pomiędzy pniem a odpowiadającym mu systemowi korzeniowemu (Pelfini, Santilli 2006; Wrońska-Wałach i in. 2012; Wrońska-Wałach i in. 2016). Wszyscy autorzy podejmujący tę próbę wykazali powszechny problem związany ze słabą zgodnością przyrostową pomiędzy korzeniami a krzywą wzrostu z pnia tego samego drzewa (Bodoque i in. 2005; Pelfini, Santilli 2006; Wrońska-Wałach i in. 2012; Wrońska-Wałach i in. 2016). W niniejszej pracy po raz pierwszy podjęto próbę szczegółowego rozpoznania zmienności przyrostu radialnego w różnych strefach systemu korzeniowego sosny zwyczajnej. Podobną próbę podjął D.C.F. Fayle (1968, 1975a, 1975b) dla sosny czerwonej (*Pinus resinosa*) z rejonu wschodniej Kanady. W opracowaniu D.C.F. Fayle'a (1968, 1975a, 1975b) brakuje jednak wskazania czy przeprowadzone datowania

przyrostów radialnych korzeni oparte były o i) szczegółowe badania pomostowe w obrębie pojedynczego korzenia oraz ii) analizę przeźroczy mikroskopowych, które umożliwiają pomiary nawet najwęższych przyrostów wyklinowujących. Dodatkowo badania D. Fayla'a (1968), w odróżnieniu do niniejszej pracy, nie obejmowały korzeni poddanych presji wydeptywania.

Przeprowadzone analizy przyrostów radialnych sosny zwyczajnej ze stanowiska Bachotek wykazały istotne różnice w reakcji przyrostowej pomiędzy pniem a odpowiadającym mu systemem korzeniowym, w tym częścią eksponowaną korzenia w obrębie szlaku turystycznego. Korzenie odstonięte pod wpływem silnego wydeptywania wykształciły szersze pierścienie, podczas gdy w pniu i korzeniach zasłoniętych przyrosty roczne pozostawały wąskie bądź ich reakcja przyrostowa na odstaniecie stowarzyszonego z nimi części korzenia była opóźniona. Zwiększony przyrost radialny związany z różnokierunkowym odstaniem korzeni wykazali J. Alestalo (1971), C. Krause, H. Morin (1995) i H. Gärtner (2007) oraz J.M. Bodoque i in. (2011).

Analizy mikroskopowe odstoniętych korzeni (tj. pobranych ze strefy A) sosny zwyczajnej ze stanowiska Bachotek wykazały silne uszkodzenia mechaniczne, będące efektem ich odstaniecia i eksponowania na tarcie związane z ciągłym deptaniem w obrębie szlaku. Dodatkowo we wszystkich korzeniach odstoniętych w obrębie szlaku wykazano brak wykształcania pełnych, tj. koncentrycznych pierścieni rocznych drewna oraz powszechne występowanie przyrostów wyklinowujących. Przyrosty brakujące i wyklinowujące powstają zarówno w korzeniach, jak i pniach drzew. Ich powstanie związane jest z różnicą w aktywności kambium wzdłuż osi korzenia jak i pnia (Fayle, Farrar 1965; Fayle 1968; Schweingruber 1996; Savidge 2000; Schrader i in. 2003; Novak i in. 2011). Badania wykazały, iż przyrosty brakujące i wyklinowujące występują jednak znacznie częściej w korzeniach niż w pniach drzew (Fayle 1968; Krause, Morin 1995). Dodatkową trudność w analizie przyrostów radialnych korzeni stanowi fakt, iż przyrosty brakujące i wyklinowujące mogą występować w różnych częściach pojedynczego przekroju poprzecznego korzenia (Wrońska-Wałach i in. 2012). Dodatkowo D. Wrońska-Wałach i in. (2016) wykazali, iż nawet pomiar przyrostów radialnych korzenia w najdłuższym promieniu przekroju poprzecznego często nie obejmuje pełnej serii przyrostów, co zauważono również w korzeniach sosny zwyczajnej w niniejszej pracy.

Kompleksowa analiza porównawcza szerokości przyrostów radialnych w 278 promieniach przeprowadzona dla 85 przekrojów poprzecznych pobranych z 8 korzeni pozwoliła na wyznaczenie okresów z dużą liczbą brakujących i wyklinowujących przyrostów rocznych w obrębie korzeni. Porównanie tych okresów pomiędzy przekrojami poszczególnych korzeni pozwoliło na wyznaczenie „głównych przyrostów brakujących”, tj. rozpoznanie niewykształcenia przyrostu dla wszystkich 8 systemów korzeniowych. Pośrednio można je określić, jako negatywne lata wskaźnikowe korzeni, które reprezentują lata: 1976, 1982, 1996, 2006 i 2010. W tych latach w większości przekrojów poprzecznych badanych systemów korzeniowych nie doszło do wykształcenia przyrostów rocznych. Wykształcenie negatywnych lat wskaźnikowych zidentyfikowano także dla korzeni świerka poddanych procesom erozyjnym w zlewniach górskich Gorców (Wrońska-Wałach i in. 2012).

Dodatkową trudność w dopasowaniu sekwencji krzywych przyrostów rocznych w korzeniach sosny zwyczajnej stanowiła duża zmienność wykształcenia przyrostów radialnych w przekroju podłużnym danego korzenia. W korzeniu o długości kilku metrów, na wzrost jego poszczególnych części wpływ mają zróżnicowane warunki siedliskowe. Dodatkowo na wzrost radialny eksponowanych fragmentów korzeni w różnym czasie i ze zróżnicowaną presją oddziałuje wydeptywanie

Wykonanie szczegółowego datowania pomostowego korzeni sosny zwyczajnej pozwoliło na wyznaczenie dokładnych, tj. wydatowanych, co do roku kalendarzowego, średnich krzywych wzrostu dla wybranych części systemu korzeniowego. Należy zaznaczyć, iż w większości korzeni naturalnie przyrastających w glebie nie rozpoznano kompletnej serii przyrostów radialnych. Wyłącznie trzy próby korzeni, położone najbliżej pnia, wykazały pełną sekwencję przyrostową (korzeń B01, B07, B15). W tych próbach udział przyrostów wyklinowujących był najmniejszy. Liczba przyrostów wyklinowujących wzrastała we wskazanych przekrojach wraz z rosnącą odległością od pnia drzewa. Zależność ta została wykazana również we wcześniejszych badaniach (Fayle 1975 a, b; Krause i Morin 1995, 1999).

Największy udział przyrostów wyklinowujących i brakujących wykazano w odstłoniętych bocznych rozgałęzieniach korzeni przybyszowych sosny zwyczajnej poddanych presji turystycznej (tj. korzeni ze strefy A). Odstłonięte w wyniku wydeptywania korzenie często nie posiadały rdzenia, jak również udział przyrostów wyklinowujących w tych próbach był równy 100%. Ciągła presja mechaniczna spowodowana wydeptywaniem w obrębie szlaku wymusiła niepełną alokację wzrostu korzenia postępującą po „bezpiecznej”, tj. dolnej części, znajdującej się w pokrywie glebowej (Gärtner 2007).

W częściach odstłoniętych korzeni sosny zwyczajnej poddanych wydeptywaniu wykazano również silne rozbieżności w zgodności wzorca przyrostowego korzeni w stosunku do krzywej wzrostu z pnia. Z jednej strony odstłonięte korzenie przybyszowe wykazały największą niezgodność wzorca przyrostowego korzenia z pniem. Z drugiej, najwyższą zgodność przyrostową między wszystkimi korzeniami a krzywą wzrostu z pnia wykazano dla odstłoniętych części korzenia głównego, charakteryzujących się pełną serią przyrostową.

Reakcja przyrostowa korzeni sosny zwyczajnej na zmienne warunki środowiskowe, w tym na zróżnicowaną presję turystyczną nie była opisywana dotychczas w literaturze naukowej. Przeprowadzona w wysokiej rozdzielczości analiza przyrostowa korzeni sosny zwyczajnej na Pojezierzu Brodnickim stanowi zatem pierwszy przykład aplikacji metody dendrochronologicznej do badań korzeni tego gatunku, odstłanianych w wyniku presji turystycznej w obszarze nizinym. Fakt ten wpływa na trudności w przeprowadzeniu analizy porównawczej. Trudno jest bowiem uznać scharakteryzowaną w pracy reakcję przyrostową korzeni zasłoniętych i odstłoniętych sosny zwyczajnej za typową. Dotychczasowe badania prowadzone były zarówno na innych gatunkach drzew, jak i zazwyczaj w obszarze górskim. Dotychczasowe badania przeprowadzane były jedynie na pojedynczych przekrojach poprzecznych korzeni i prezentowały krótkookresową, często niepełną, zmienność przyrostową. Ponadto opisane w literaturze korzenie (Bodoque 2005; Pelfini, Santilli 2006) odstłaniane w obrębie szlaków turystycznych wyraźnie różniły się ułożeniem głównej osi korzenia względem szlaku, niż te rozpoznane dla obszaru Pojezierza Brodnickiego. Wszystkie korzenie ze stanowiska Bachotek zostały odstłonięte jedynie częściowo (strefa A) i posiadały dominującą strefę zasłonięcia korzenia (strefa B i C), tj. część korzenia naturalnie przyrastającą w glebie. Podczas gdy większość korzeni odstłoniętych i analizowanych w ramach poprzednich prac (Bodoque i in. 2005; Pelfini, Santilli 2006) były całkowicie eksponowane.

Wysoka zmienność zgodności datowania pomostowego pomiędzy odstłoniętymi częściami systemu korzeniowego z pniem, wynika z dużej rozbieżności szerokości przyrostów rocznych w poszczególnych przekrojach korzeni pobranych z części odstłoniętej korzeni (strefa A). Bierze się to zapewne z dużego zróżnicowania intensywności i sezonowości wydeptywania korzeni, które wpływała na ich różnokierunkowe odstłanianie.

Na podstawie analizy przyrostowej wszystkich badanych korzeni sosny zwyczajnej ze stanowiska Bachotek wykazano, że na zgodność wzorca przyrostowego korzeni z pniem miały:

1) rzędowość korzeni, 2) strefowość korzeni, 3) wiek korzenia podczas odstonięcia oraz 4) charakter odstonięcia korzenia. Ponadto znaczący wpływ na stopień zgodności wzorca przyrostowego pomiędzy pniem a wybraną częścią korzenia ma rozpoznany dla sosny zwyczajnej odmienny charakter krzywych wzrostu z pnia i korzeni w tzw. okresie juwenilnym (młodocianym). Dla tego okresu pnie drzew wykazują niższą gęstość drewna oraz szersze słoje w stosunku do pozostałej części (Jakubowski 2004; Wąsik 2012). Z kolei w korzeniach nieekspozowanych przed odstonięciem dominują wąskie słoje z widocznym brakiem bądź niewielkim udziałem drewna późnego (Gärtner 2001, 2007).

Działalność miazgi, polegająca na wytwarzaniu wtórnych tkanek korzenia, jest w ogólnym zarysie taka sama jak w pniu. Istnieją jednak różnice w strukturze drewna korzenia i pnia. Cechą charakterystyczną słoju korzenia zastłoniętego jest występowanie dużych komórek drewna wczesnego ułożonych w jednym lub dwóch rzędach (Buchwał, Wrońska-Wałach 2008). Z uwagi na brak wypracowanych metod standaryzacji krzywych wzrostu korzeni, przedstawione wartości współczynnika korelacji między wzorcem przyrostowym korzenia z pniem należy traktować z zastrzeżeniem, iż dla okresu juwenilnego każdego korzenia nie dokonano usunięcia trendu biologicznego. W przyszłości porównanie tych dwóch wzorców przyrostowych wymagałoby wielokryterialnej standaryzacji danych z uwzględnieniem odmierności wzrostu korzeni i pnia.

Przeprowadzone badania pomostowe korzeni odstoniętych wykazały, że najwyższe wartości korelacji oraz pełna seria przyrostowa występuje w próbach pobranych z pojedynczych odstonień głównego korzenia, który rósł blisko powierzchni gleby i został odstonięty w wyniku powolnych procesów denudacyjnych po kilku latach od wyrośnięcia (korzeń B10A i B15A). Również wysokie wartości korelacji wykazały korzenie z tzw. strefowym odstonieniem, czyli posiadających kilka równoległych części odstoniętych (korzeń B07A i B11A). Najniższą zgodność przyrostową charakteryzowały młodsze odgałęzienia korzeni przybyszowych, które przez dłuższy czas rosły w pokrywie glebowej i zostały odstonięte w wyniku nagłego procesu erozyjnego (korzeń B09A). Przyrosty radialne tych korzeni do momentu nagłego odstonięcia prezentował typową strukturę korzenia zastłoniętego, tj. z niewielkim udziałem drewna późnego (Gärtner 2001, 2007). Przyrost wtórny korzeni po odstonięciu był determinowany przez zewnętrzne czynniki środowiskowe (Fayle 1968), jednocześnie wzorec przyrostowy korzeni po odstonięciu charakteryzowało większe podobieństwo do sekwencji przyrostowej pnia.

Można przypuszczać, że drzewo poddane presji mechanicznej w części szlaku turystycznego reagowało silniejszym działaniem obronnym, które przejawiało się zwiększeniem alokacji wzrostu w pierwszej kolejności w częściach odstoniętych głównego korzenia. Jednocześnie w odstoniętych bocznych odgałęzieniach korzeni przybyszowych wykazano w tym czasie brak reakcji przyrostowej i występowanie przyrostów brakujących.

14. Datowanie w wysokiej rozdzielczości zmian przyrostowych i anatomicznych korzenia sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z pojedynczym odślonięciem wraz z analizą sąsiedniego korzenia zastłoniętego

14.1. Analiza zmian przyrostowych korzenia odśloniętego i zastłoniętego

Na analizowanym szlaku turystycznym w obrębie stanowiska Bachotek zidentyfikowano tylko jeden przykład drzewa posiadającego odślonięcie korzenia w strefie szlaku i równoległe położoną część zastłoniętą korzenia, tj. naturalnie przyrastającą w glebie i położoną w strefie szlaku. W obrębie tego drzewa, oznaczonego jako drzewo B15, prześledzono i porównano serie przyrostowe fragmentów korzenia bocznego, który na długości 120 cm rozgałęział się na dwie równoległe części (Ryc. 41). Pierwsza część była reprezentowana przez korzeń zastłonięty (KZ), który w całym swoim przebiegu rósł naturalnie w pokrywie glebowej. Druga część wybranego fragmentu systemu korzeniowego była reprezentowana przez korzeń odślonięty (KO), który w wyniku wydeptywania uległ częściowej ekspozycji na powierzchni szlaku turystycznego. W pracy podjęto próbę szczegółowego porównania wzrostu wtórnego korzenia KO i KZ, tj. dwóch równoległych korzeni drzewa rosnącego w bezpośrednim sąsiedztwie szlaku turystycznego. Analizy miały na celu określenie zgodności wzorca przyrostowego dwóch korzeni w profilu podłużnym i zbadania, które części korzeni intensywniej reagują na zmienne warunki przyrostowe związane z oddziaływaniem ruchu turystycznego.

Tab. 6. Pozycja względem pnia oraz głębokość zalegania poniżej poziomu gruntu i wysokość podparcia nad powierzchnią szlaku turystycznego pobranych prób korzenia zastłoniętego (KZ) oraz odśloniętego (KO) z drzewa B15 z podziałem na strefy: poza szlakiem (C), pobocza (B) oraz szlaku (A).

	LP	ID PRÓBY KZ	ID PRÓBY KO	ODLEGŁOŚĆ OD PNIA (cm)	KZ_GŁĘBOKOŚĆ (cm)	KO_GŁĘBOKOŚĆ /WYSOKOŚĆ (cm)
STREFA POZA SZLAKIEM (A)	1	C1	C1	125	-12,7	-12,8
	2	C2	C2	158	-13,8	-12,9
	3	C3	C3	197	-12,9	-13,3
	4	C4	C4	235	-15,5	-14,9
	5	C5	C5	270	-15,8	-16,5
			ŚREDNIA		-14,14	-14,08
STREFA POBOCZA (B)	6	B1	B1	310	-15,2	-15,7
	7	B2	B2	335	-13,7	-14,3
	8	B3	B3	390	-10,8	-10,6
	9	B4	B4	437	-10,7	-10,5
			ŚREDNIA		-12,60	-12,77
STREFA SZLAKU (A)	10	A1	A1	484	-8,2	+1,77
	11	A2	A2	505	-15,7	+1,58
	12	A3	A3	536	-18,3	+1,62
			ŚREDNIA		-14,06	+1,66

Zgodnie z wcześniej przyjętą procedurą korzenie: zastłonięty (KZ) i odślonięty (KO) zostały podzielone na trzy strefy. Pierwsza strefa C poddana badaniom dendrogeomorfologicznym obejmowała części obu korzeni znajdujące się w odległości od 120 do 290 cm od pnia drzewa.

Średnia głębokość zalegania prób dla dwóch analizowanych korzeni w tej strefie wyniosła 14 cm (Tab. 6). W strefie B, znajdującej się na dystansie od 290 do 460 cm od pnia, średnia głębokość zalegania obydwu korzeni wyniosła ponad 12 cm. Z kolei ostatnia analizowana strefa szlaku (A) korzeni była zlokalizowana w przedziale od 460 do 550 cm od pnia (Tab. 6). Zaznaczyć trzeba, że w strefie szlaku (A) obydwu korzenie przyrastały w obrębie szlaku turystycznego. Korzeń KO posiadał odstąpiętą część w obrębie szlaku i był poddany bezpośredniej presji mechanicznej związanej z wydeptywaniem. Średnia wysokość ekspozycji korzenia (KO) ponad wierzchnią warstwę gleby wyniosła 1,7 cm, zaś średnia głębokość zalegania w pokrywie glebowej równolegle położonego korzenia (KZ) wyniosła 14 cm (Tab. 6). Na podstawie obserwacji terenowych rozpoznano, że próby pobrane z korzenia KZ i KO w strefie szlaku (A), położonych na tej samej odległości od pnia, były bliźniaczo, tj. równolegle położone w granicach szlaku turystycznego. Łącznie dla drzewa B15 przebadano po 12 przekrojów poprzecznych z każdego korzenia (tj. z KZ i KO), co dało sumę 24 wyrzynków korzeni. Pomiarów przyrostów radialnych dla wszystkich przekrojów poprzecznych w obu korzeniach wykonano średnio w odstępach, co 34 cm.

Średni wiek pobranych do analiz próbek korzeni wyniósł 54 lata dla korzenia odstąpiętego (KO) i 52 lata dla korzenia zastąpiętego (KZ). Chronologia stanowiska obejmowała okres od 1942 do 2014 roku, a sekwencja przyrostów rocznych dla pnia drzewa B15 prezentowała okres od 1952 do 2015. Korelacja pomiędzy chronologią stanowiska a pniem drzewa B15 wyniosła $r=0,67$ ($p<0,001$).

Tab. 7. KORZEŃ ZASŁONIĘTY (KZ). Wybrane cechy morfometryczne oraz wskaźniki przyrostowe i anatomiczne pobranych prób z korzenia ZASŁONIĘTEGO (KZ) z podziałem na strefy: poza szlakiem (C), pobocza (B) oraz szlaku (A)

	LP	ID PRÓBY	ODLEGŁOŚĆ OD PNIA (cm)	ŚREDNICA (cm)	POWIERZCHNIA (cm ²)	WSKAŹNIK KOLISTOŚCI	WSKAŹNIK EKSCENTRYCZNOŚCI	UDZIAŁ DREWNA PÓŹNEGO (%)
STREFA A	1	C1	125	4,21	13,91	0,91	0,94	19,02
	2	C2	158	4,02	12,69	0,90	0,95	22,63
	3	C3	197	3,90	11,94	0,91	0,90	18,07
	4	C4	235	3,32	8,65	0,90	0,89	20,17
	5	C5	270	3,06	7,35	0,91	0,77	17,04
			ŚREDNIA		3,70	10,91	0,91	0,89
STREFA B	6	B1	310	1,91	2,86	0,94	0,87	11,05
	7	B2	335	2,68	5,63	0,90	0,79	12,01
	8	B3	390	1,59	1,98	0,93	0,42	16,03
	9	B4	437	1,29	1,31	0,93	0,43	21,22
			ŚREDNIA		1,87	2,95	0,93	0,63
STREFA A	10	A1	484	1,72	2,32	0,96	0,44	38,43
	11	A2	505	1,48	1,72	0,95	0,45	21,04
	12	A3	536	1,03	0,83	0,97	0,39	8,76
			ŚREDNIA		1,41	1,62	0,96	0,43

Tab. 8. KORZEŃ ODSŁONIĘTY (KO). Wybrane cechy morfometryczne oraz wskaźniki przyrostowe i anatomiczne pobranych prób z korzenia odsłoniętego (KO) z podziałem na strefy: poza szlakiem (C), pobocza (B) oraz szlaku (A)

	LP	ID PRÓBY	ODLEGŁOŚĆ OD PNIA (cm)	ŚREDNICA (cm)	POWIERZCHNIA (cm ²)	WSKAŹNIK KOLISTOŚCI	WSKAŹNIK EKSCENTRYCZNOŚCI	UDZIAŁ DREWNA PÓZNEGO (%)
STREFA A	1	C1	125	4,21	13,91	0,91	0,94	19,02
	2	C2	158	4,02	12,69	0,90	0,95	22,63
	3	C3	197	3,90	11,94	0,91	0,90	18,07
	4	C4	235	3,32	8,65	0,90	0,89	20,17
	5	C5	270	3,06	7,35	0,91	0,77	17,04
		ŚREDNIA			3,70	10,91	0,91	0,89
STREFA B	6	B1	310	1,62	2,06	0,93	0,67	11,22
	7	B2	335	2,27	4,05	0,95	0,57	12,18
	8	B3	390	2,72	5,81	0,90	0,38	16,33
	9	B4	437	3,41	9,13	0,88	0,33	30,02
		ŚREDNIA			2,50	5,26	0,91	0,49
STREFA A	10	A1	484	5,63	24,89	0,78	0,18	61,28
	11	A2	505	5,02	19,78	0,81	0,15	65,53
	12	A3	536	4,46	15,61	0,77	0,00	67,18
		ŚREDNIA			5,04	20,09	0,78	0,11

Strefa poza szlakiem ®

W strefie C drzewa B15 porównano krzywe wzrostu pięciu przekrojów poprzecznych z każdego korzenia (tj. KZ i KO) z krzywą wzrostu z pnia (przekroje B15C1-B15C5). Fragmenty korzeni pobrane w odległości 125 cm od pnia posiadały najdłuższą sekwencję przyrostową sięgającą roku 1956 (Ryc.2 i Ryc.3). Zasadniczo wiek pobranych próbek z tej samej odległości od pnia z sąsiadujących ze sobą korzeni (tj. KZ i KO) był do siebie bardzo zbliżony. Średni wiek fragmentów korzeni pobranych dla obydwu korzeni wyniósł 59 lat.

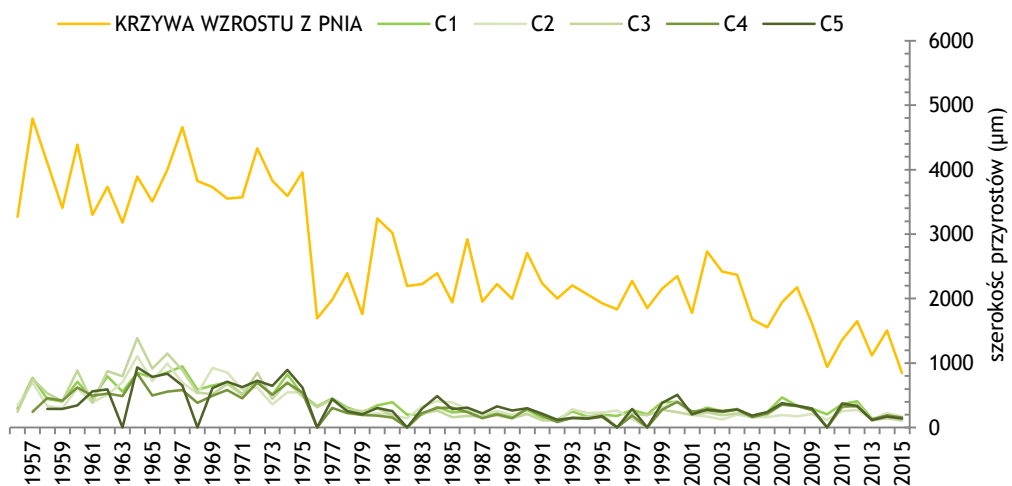
W kwestii średniej wielkości przyrostów rocznych nie zaobserwowano znaczących różnic pomiędzy korzeniem KO i KZ. Dla korzenia zastłoniętego (KZ) najszerszy przyrost roczny w badanych przekrojach poprzecznych miał 1388,5 µm (przekrój B15C3), z kolei dla korzenia odsłoniętego 956,7 µm (przekrój B15C1). Najwęższy zaś przyrost dla korzenia zastłoniętego wyniósł 87,5 µm (przekrój B15C4) a dla przekrojów z sąsiedniego korzenia 93,5 µm (przekrój B15C1). Średni udział drewna późnego w przekrojach poprzecznych dla obydwu korzeni był zbliżony i wyniósł ponad 19% (Tab. 7, Tab. 8).

Po zestawieniu krzywych wzrostu dla poszczególnych przekrojów poprzecznych stwierdzono znaczne przesunięcia w latach charakteryzujących się podobnymi szerokościami przyrostów rocznych w korzeniu. Większość przekrojów poprzecznych obu korzeni ze strefy C posiadało niekompletną serię przyrostów rocznych (Ryc. 69 i Ryc. 70). Przykładowo dla sekcji C5 krzywą wzrostu korzenia uzupełniono o osiem brakujących przyrostów (Ryc. 69 i Ryc.70). Średni udział przyrostów brakujących dla przekrojów poprzecznych obydwu sąsiadujących ze sobą korzeni w strefie C był zbliżony i wyniósł ok. 20% (Ryc. 69 i Ryc. 70). Zaobserwowano, że najstarsza sekcja C1 w obu korzeniach, która była położona najbliżej pnia posiadała jako jedyna pełną serię przyrostową. Ponadto dla sekcji C1 udział przyrostów wyklinowujących był najniższy i wyniósł minimalnie 12%. W obu korzeniach (tj. KZ i KO) zauważono stopniowy wzrost liczby przyrostów wyklinowujących w przekrojach

poprzecznych korzeni wraz z rosnącą odległością od pnia. Ponadto należy zaznaczyć, iż średni udział przyrostów wyklinowujących był niższy dla prób korzenia zasłoniętego (KZ) w porównaniu do korzenia odsłoniętego (KO). Z tym zagadnieniem bezpośrednio związana była kwestia ekscentryczności wzrostu korzeni. Dla prób obu korzeni ze strefy C wskaźnik ekscentryczności korzeni cechował się małą zmiennością i względnie wysoką wartością. Fakt ten uwidocznił się w dużym podobieństwie sekwencji przyrostowych w różnych promieniach przekroju poprzecznego obu korzeni (Ryc.69 i Ryc. 70).

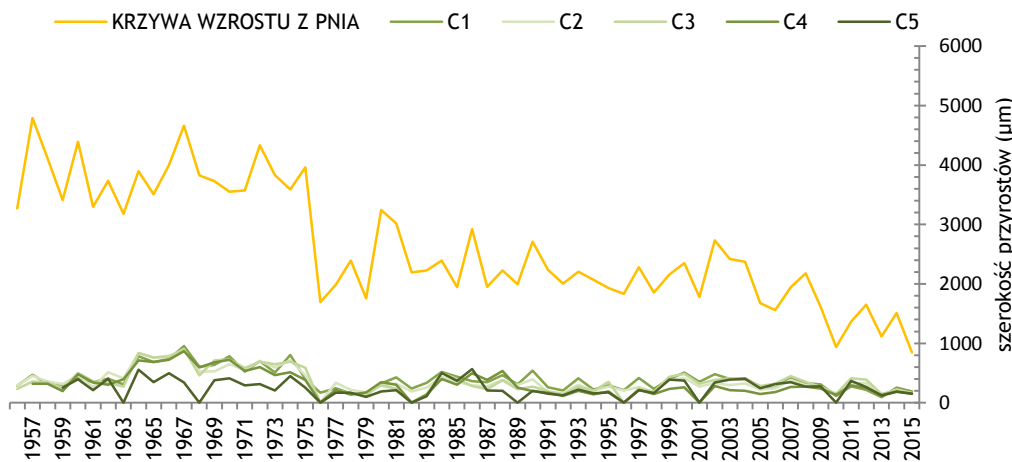
Wykonane datowanie pomostowe pozwoliło uzyskać wysoką zgodność pomiędzy krzywą wzrostu z pnia a krzywymi wzrostu przekrojów poprzecznych korzenia KZ i KO ze strefy C (Ryc. 69 i Ryc. 70). Średni współczynnik korelacji pomiędzy pniem a wszystkimi próbami korzenia zasłoniętego (KZ) wyniósł $R=0,75$ ($p<0,001$; $n=5$), zaś dla przekrojów korzenia odsłoniętego $r=0,66$ ($p<0,001$; $n=5$). Maksymalną wartość korelacji $R=0,83$ ($p<0,001$) odnotowano dla sekcji C1 korzenia (KZ) pobranej najbliżej pnia.

W strefie C wykazano najwyższą zgodność średniej wartości średnicy, powierzchni przekrojów korzeni oraz współczynnika kolistości pomiędzy próbami korzenia KZ i KO (Ryc.69 i Ryc.70).



ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ (cm))	KORELACJA PIENI®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
C1 (125)	0,83 ***	60	60	11,7	-
C2 (158)	0,74 ***	58	60	15,0	3,3
C3 (197)	0,77 ***	57	60	18,3	5,0
C4 (235)	0,75 ***	54	59	20,3	8,5
C5 (270)	0,64 ***	51	58	29,3	12,1

Ryc. 69. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami korzenia zastoniętego (KZ) ze strefy poza szlakiem (C) (C1-C5) oraz krzywą wzrostu z pnia (B15), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (*p<0,05, **p<0,01, *** p<0,001)



ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ (cm))	KORELACJA PIENI®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
C1 (125)	0,72 ***	60	60	13,3	-
C2 (158)	0,77 ***	59	60	15,0	1,7
C3 (197)	0,67 ***	57	60	20,0	5,0
C4 (235)	0,73 ***	55	59	25,4	6,8
C5 (270)	0,42 ***	49	57	43,9	14,0

Ryc. 70. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami korzenia odstoniętego (KO) ze strefy poza szlakiem (C) (C1-C5) oraz krzywą wzrostu z pnia (B15), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (*p<0,05, **p<0,01, *** p<0,001)

Strefa pobocza (B)

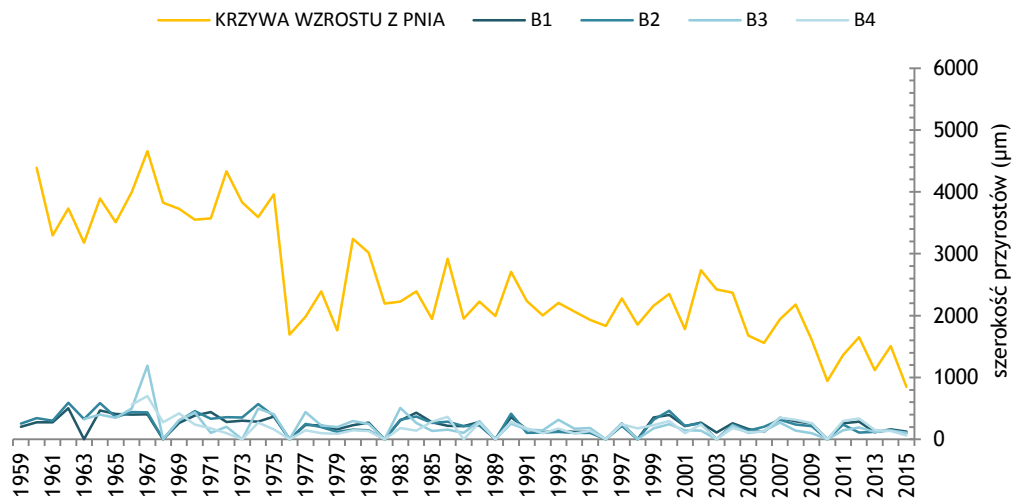
W strefie pobocza (B) pobrano po cztery przekroje poprzeczne z sąsiadujących ze sobą korzeni, tj. KO i KZ (Ryc. 71 i Ryc. 72). Wiek przekrojów poprzecznych w obydwu korzeniach, podobnie jak w strefie C, był do siebie bardzo zbliżony (Ryc. 71 i Ryc. 72). Średni wiek analizowanych korzeni w strefie pobocza (B) wyniósł 54 lata.

Analiza szerokości przyrostów rocznych wykazała wysoką zgodność liczby i szerokości przyrostów pomiędzy korzeniami KO i KZ ze strefy B. Średnia wielkość przyrostu dla obu grup korzeni była podobna i dla korzenia zastłoniętego (KZ) wyniosła 217,9 μm , a dla korzenia odstłoniętego (KO) 262,3 μm . W strefie pobocza (B) dla korzenia zastłoniętego rozpoznany największy przyrost mierzył 1192,5 μm (B3), z kolei dla korzenia odstłoniętego 1072,4 μm (B4). Największy przyrost dla przekrojów korzenia zastłoniętego wyniósł 65,1 μm (B4), a dla fragmentów korzenia odstłoniętego 74,3 μm (B4). Przekroje poprzeczne korzenia odstłoniętego w tej strefie pobocza (B) charakteryzowały się średnim udziałem drewna późnego na poziomie 17%, a średnia zawartość drewna późnego w próbach korzenia zastłoniętego wyniosła 15% (Tab. 7 i Tab. 8)

Strefę B charakteryzowała największa zmienność występowania przyrostów wyklinowujących i brakujących (Ryc. 71 i Ryc. 72). W przekrojach poprzecznych korzenia zastłoniętego rozpoznano większą liczbę przyrostów brakujących niż w próbach korzenia odstłoniętego. W obu korzeniach zaznaczył się wyraźny i stopniowy wzrost występowania przyrostów wyklinowujących w przekrojach poprzecznych korzeni, postępujący wraz ze zwiększającą się odległością od pnia. Znacznie większy udział przyrostów wyklinowujących zidentyfikowano dla próbek korzenia odstłoniętego. Podobne zależności wykazała analiza ekscentryczności przyrostów rocznych prób korzeni, która wykazała wyższe wartości ekscentryczności wzrostu dla prób korzenia odstłoniętego (Ryc. 71 i Ryc. 72).

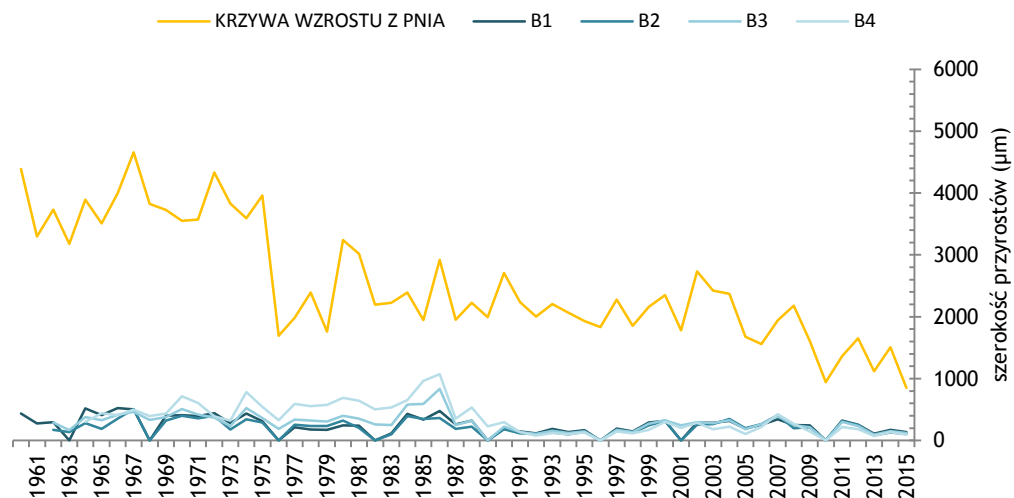
Pomiędzy krzywymi wzrostu przekrojów korzeni ze strefy B a krzywą wzrostu z pnia stwierdzono istotną statystycznie korelację ($r=0,53$; $p<0,001$). Uzyskana wartość korelacji, tj. zgodności wzorca przyrostowego korzeni KO i KZ ze strefy pobocza (B) z pniem, była jednak znacznie niższa niż wykazano dla strefy C. Średnia korelacja z pniem dla wszystkich prób analizowanych korzeni ze strefy B była do siebie bardzo zbliżona i wyniosła $R=0,56$ ($p<0,001$; $n=4$) dla korzenia zastłoniętego oraz $R=0,51$ ($p<0,001$; $n=4$) dla korzenia odstłoniętego. Najwyższą średnią korelację z pniem zanotowano dla prób B1 obu korzeni ($R=0,61$; $p<0,001$), a najniższą dla sekcji B4 również dla obu korzeni ($R=0,44$; $p<0,001$) (Ryc.71 i Ryc. 72).

Wybrane próby ze strefy B sąsiadujących ze sobą korzeni KO i KZ były znacznie mniejsze w porównaniu do przykładów ze strefy C. Średnia wielkość powierzchni przekroju korzeni była wyższa dla sekcji korzenia odstłoniętego niż dla przekrojów korzenia zastłoniętego (Ryc. 71 i Ryc. 72).



ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ (cm))	KORELACJA PIEŃ ®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
B1 (310)	0,63 ***	49	57	31,6	14,1
B2 (335)	0,62 ***	49	57	33,3	14,1
B3 (390)	0,54 ***	44	53	35,8	17,0
B4 (437)	0,44 ***	42	50	40,0	16,0

Ryc. 71. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami korzenia zastoniętego (KZ) ze strefy pobocza (B) (B1-B4) oraz krzywą wzrostu z pnia (B15), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (*p<0,05, **p<0,01, *** p<0,001)



IDPRÓBY (ODLEGŁOŚĆ (cm))	KORELACJA PIEŃ ®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
B1 (310)	0,58 ***	48	56	37,5	14,3
B2 (335)	0,48 ***	47	54	50,0	13,0
B3 (390)	0,52 ***	51	54	55,5	5,6
B4 (437)	0,47 ***	50	52	67,3	3,8

Ryc. 72. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami korzenia odstniętego (KO) ze strefy pobocza (B) (B1-B4) oraz krzywą wzrostu z pnia (B15), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (*p<0,05, **p<0,01, *** p<0,001)

Strefa szlaku A

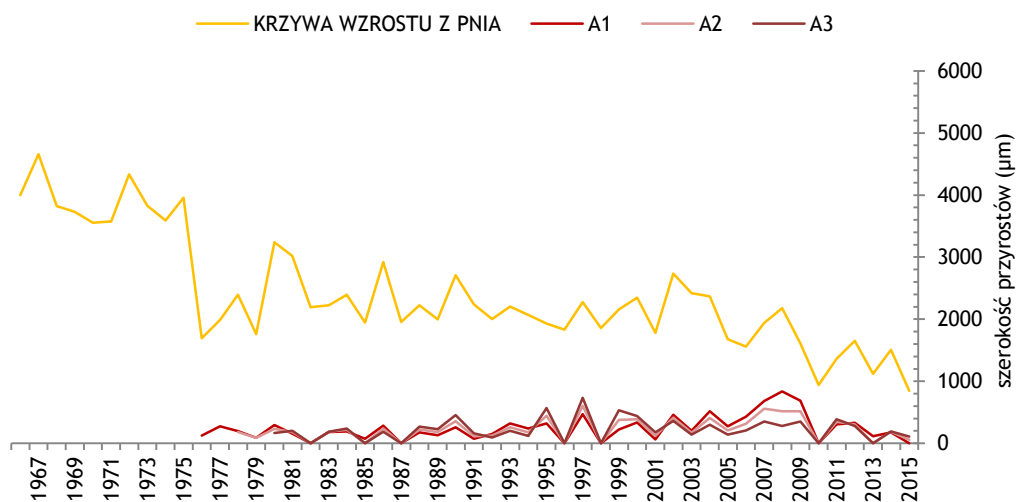
Z części szlaku (A) pobrano po trzy przekroje poprzeczne z sąsiadujących ze sobą korzeni KZ i KO (Ryc. 73 i Ryc. 74). Badane próby systemu korzeniowego w znacznym stopniu różniły się wiekiem. Na podstawie szczegółowych analiz wykazano, że części korzenia odsloniętego (KO) są zdecydowanie starsze niż te pobrane z sąsiedniego korzenia zastłoniętego (KZ). W strefie szlaku (A) opisano przekrój (A3) z najkrótszą serią przyrostów rocznych datowaną od roku 1980 (Ryc. 73). Średni wiek odsloniętych prób w strefie A dla korzenia odsloniętego wyniósł 47 lat, a dla części korzenia zastłoniętego 38 lat.

Znaczne różnice pomiędzy korzeniami rozpoznano porównując serię przyrostowe korzenia KO i KZ ze strefy A. Większe amplitudy szerokości przyrostów stwierdzono dla prób korzenia odsloniętego (Ryc. 73 i Ryc. 74). Korzeń KO w części odsloniętej w obrębie szlaku posiadał zdecydowanie szersze pierścienie. Średnia szerokość przyrostu radialnego korzenia KO wyniosła 927,1 μm , podczas gdy dla korzenia KZ było to 231,6 μm . Dla korzenia zastłoniętego (KZ) najszerszy przyrost radialny mierzył 838,9 μm (A1), z kolei największy pierścień części odsloniętej miał aż 5318,4 μm (A3). Dla porównania największy przyrost dla korzenia KZ wyniósł 56,2 μm (A2), a dla korzenia odsloniętego (KO) 105,9 μm (A3).

W strefie szlaku (A) zaznaczyły się największe rozbieżności pomiędzy sekwencjami przyrostowymi w przekrojach korzeni KZ i KO a krzywą wzrostu z pnia (Ryc. 73 i Ryc. 74). Jedyną istotną i bardzo wysoką korelację z pniem wykazano dla przekrojów poprzecznych pobranych z korzenia KO ($p < 0,001$) (Ryc. 74). W tej grupie prób z korzenia KO wykazano najwyższą zgodność przyrostową z krzywą wzrostu z pnia wynoszącą $r = 0,88$ ($p < 0,001$; przekrój A1). W strefie szlaku (A) nie zidentyfikowano przyrostów brakujących w odsloniętych częściach korzenia KO pobranych ze strefy szlaku turystycznego. We wszystkich odsloniętych próbach korzeni zauważono brak wykształcania pełnych, koncentrycznych pierścieni przyrostów rocznych i powszechne wykształcenie przyrostów wyklinowujących. W odsloniętych częściach korzenia KO poddanego presji turystycznej odnotowano największą ich liczbę (Ryc. 7). Średni udział przyrostów wyklinowujących w strefie A dla korzeni odsloniętych wyniósł aż 91%. Z kolei w obrębie prób z sąsiedniego korzenia zastłoniętego (KZ) średnia wartość przyrostów wyklinowujących była znacznie niższa i wyniosła 60% (Ryc. 73 i Ryc. 74).

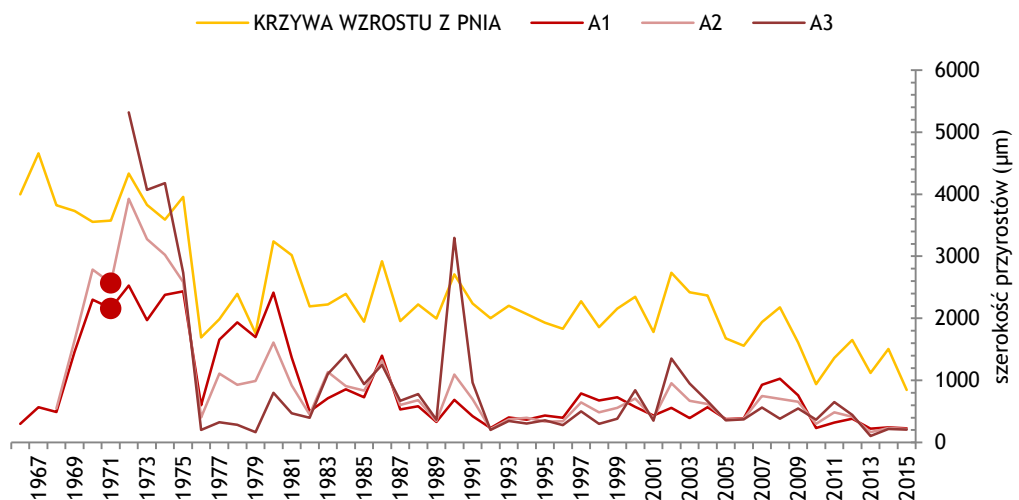
Badane próby korzenia KZ wykazały bardzo niskie wartości ekscentryczności wzrostu w stosunku do prób z pozostałych stref, tj. C i B. Z kolei dla prób korzenia odsloniętego wartość ekscentryczności wzrostu w strefie A była najniższa ze wszystkich analizowanych stref. Próby te wyróżniała wysoka rozbieżność zarówno w liczbie jak i wielkości przyrostów rocznych.

W strefie A zidentyfikowano największe modyfikacje cech morfometrycznych korzeni. W przypadku korzenia odsloniętego powierzchnia analizowanych prób była znacząco większa niż korzenia zastłoniętego. (Ryc. 73 i Ryc. 74). W strefie A średnia wielkość przekroju korzenia zastłoniętego stanowiła jedynie 8% średniej wielkości powierzchni przekrojów z korzenia odsloniętego (KO). Ponadto dla prób korzenia odsloniętego rozpoznano znacznie niższe wartości wskaźnika kolistości, z czym wiązała się wysoka nieregularność przyrostów radialnych rozpoznana dla tych korzeni.



ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ (cm))	KORELACJA PIEŃ ®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
A1 (494)	0,22	34	40	55,0	15,0
A2 (505)	0,27	31	38	50,5	18,4
A3 (536)	0,26	29	36	53,9	19,4

Ryc. 73. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami korzenia zastoniętego (KZ) ze strefy szlaku (A) (A1-A3) oraz krzywą wzrostu z pnia (B15), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (*p<0,05, **p<0,01, *** p<0,001)



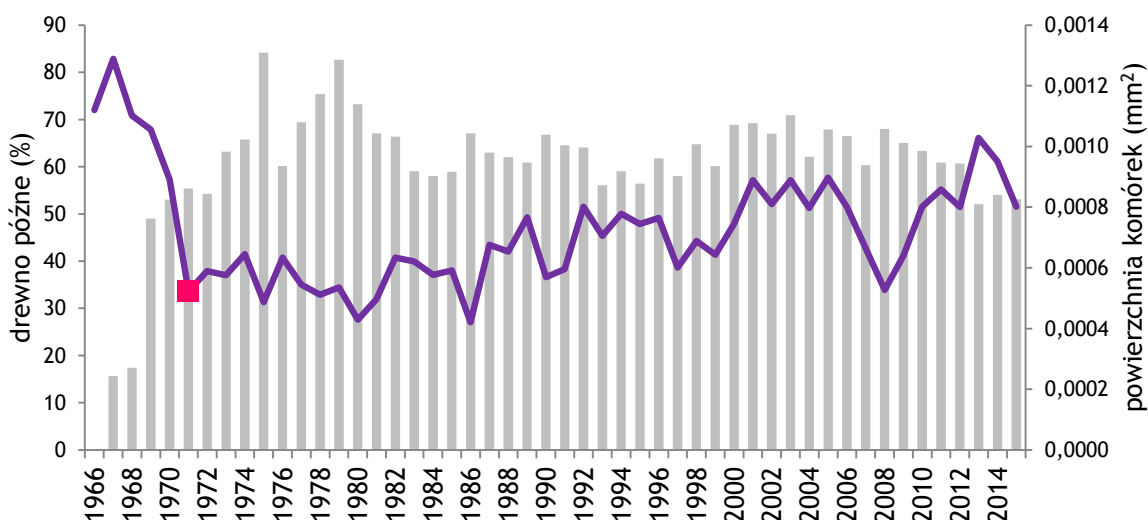
ID PRÓBY (ODLEGŁOŚĆ (cm))	KORELACJA PIEŃ ®	WIEK PRZED DAT.POM. (LATA)	WIEK PO DAT.POM. (LATA)	PRZYROSTY WYKLINOWUJĄCE [%]	PRZYROSTY BRAKUJĄCE [%]
A1 (494)	0,76 ***	50	50	84,0	0,0
A2 (505)	0,88 ***	48	48	87,5	0,0
A3 (536)	0,80 ***	44	44	99,0	0,0

Ryc. 74. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami korzenia odstoniętego (KO) ze strefy szlaku (A) (A1-A3) oraz krzywą wzrostu z pnia (B15), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (*p<0,05, **p<0,01, *** p<0,001). Moment odstonięcia- czerwony znacznik (daty odstonięć korzeni Załącznik 3)

14.2. Analiza zmian anatomicznych korzenia odsłoniętego i zasłoniętego

Na podstawie analiz mikroskopowych wykazano silne zmiany anatomii drewna korzenia odsłoniętego (KO) jedynie w strefie A, z kolei dla korzenia zasłoniętego (KZ) nie wykazano zmian anatomicznych wzdłuż profilu podłużnego. Części eksponowane korzenia (KO) posiadały liczne uszkodzenia mechaniczne, takie jak starcie górnej warstwy kambium i związane z tym pojawienie się licznych zranień. Ponadto w obrębie stojów rocznych korzenia KO wskazano na częste występowanie tzw. traumatycznych kanałów żywicznych (TKŻ) oraz drewna reakcyjnego. Jednocześnie w korzeniu zasłoniętym nie zaobserwowano żadnych uszkodzeń mechanicznych kambium. Jedyne zauważalne zmiany anatomiczne w korzeniu zasłoniętym dotyczyły zawartości drewna późnego, które charakteryzowało się nierównomiernym rozmieszczeniem w przyrostach rocznych.

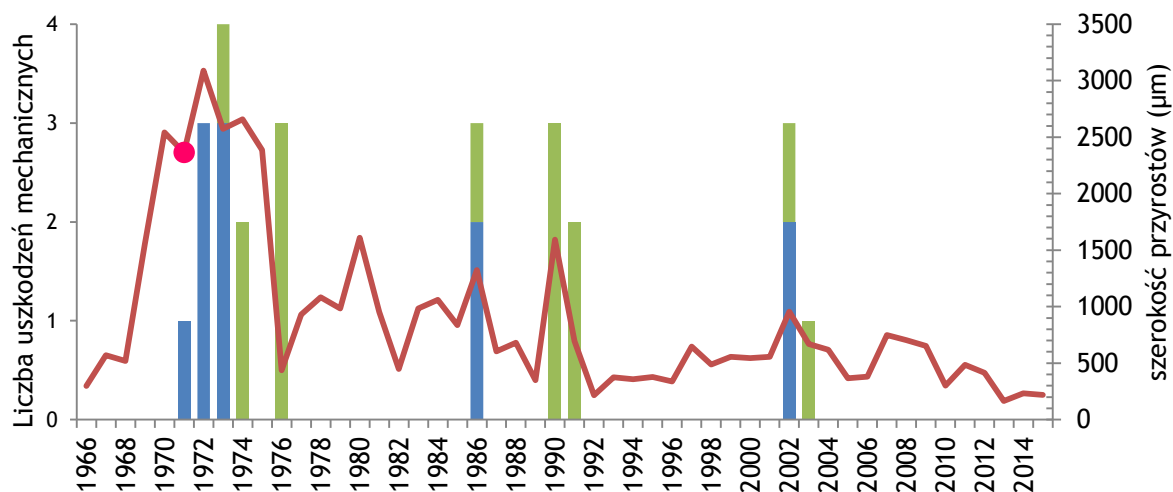
Na przelomie lat 60. i 70. XX wieku wykazano inicjację modyfikacji wskaźników anatomicznych w korzeniu odsłoniętym. Wykształcenie szerszych pierścieni rocznych zaobserwowano już w okresie juvenilnym, tj. po 4 latach od początku wzrostu korzenia. W roku 1968 wykazano nagły wzrost dekoncentryczności przyrostów rocznych, który zaznaczył się nierównomiernie we wszystkich przekrojach poprzecznych korzenia odsłoniętego (KO). Od tego roku po wewnętrznej (tj. dolnej, nieeksponowanej) części korzenia znacznie wzrastała szerokość przyrostów rocznych. Jednocześnie w górnej części korzenia, tj. części eksponowanej na powierzchni szlaku, notowany był stopniowy spadek szerokości przyrostów rocznych przechodzący w całkowitą redukcję alokacji przyrostów rocznych. We wszystkich odsłoniętych próbach korzenia KO zidentyfikowano wyraźne zniszczenia kory oraz kambium w szczególności w górnej części przekroju poprzecznego, tj. bezpośrednio eksponowanej na powierzchni szlaku. W przypadku sekcji A3 korzenia (KO) długotrwałe oddziaływanie mechaniczne związane z wydeptywaniem doprowadziło do całkowitej deformacji jego rdzenia. Pozostałe odsłonięte części korzenia (KO) posiadały maksymalnie ośmioletnią serię przyrostową w górnej części przekroju, tj. poddawanej wydeptywaniu na powierzchni szlaku.



Ryc. 75. Wskaźniki anatomiczne próby B15A1 korzenia odsłoniętego (KO) sosny zwyczajnej pobranego z powierzchni szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek. Objaśnienia: powierzchnia komórek drewna wczesnego (EW)- linia (kolor fioletowy), procentowy udział drewna późnego (LW)- słupki (kolor szary), moment odsłonięcia korzenia- znacznik (kolor różowy).

W badanych częściach korzenia odstłoniętego od roku 1968 zaobserwowano stopniowy wzrost udziału komórek drewna późnego oraz niewielki spadek wielkości komórek drewna wczesnego (Ryc. 75), który przypuszczalnie był zapisem powolnego odstania korzenia. Okres przelomowy był rok, 1971 który zaznaczył się pełną ekspozycją korzenia na powierzchni szlaku turystycznego. Fakt ten został odnotowany we wszystkich przekrojach korzenia (KO) pobranych ze strefy A. Odstąpienie to określono, jako naturalne, tj. postępujące poprzez wzrost wtórny z wyłączeniem bezpośredniego wpływu procesów zewnętrznych. Jednakże, należy wziąć pod uwagę, że po ekspozycji naturalnej, korzeń był wystawiony na sukcesywne pogłębianie odstąpienia, tj. oddziaływanie zewnętrznych bodźców środowiskowych w tym mechanicznego ścieranie związane z postępującym wydeptaniem w obrębie szlaku turystycznego.

Po „naturalnym” odstąpieniu korzenia (KO) nie wykazano zmian powierzchni komórek drewna wczesnego na całym profilu poprzecznym, co świadczy o dalszej stałej ekspozycji i postępującym oddziaływaniu procesów zewnętrznych (A1) (Ryc. 75). Analiza zmian anatomicznych potwierdza, że w 1969 roku udział drewna późnego w korzeniu (KO) z strefie szlaku (A) wzrósł o 28-32%. W kolejnych latach odnotowany był dalszy wzrost procentowej zawartości drewna późnego w tej części korzenia (KO). Największą zawartość drewna późnego zidentyfikowano w latach 1975 i 1979 i wyniosła ona odpowiednio 84% i 82% (A1). We wszystkich przekrojach korzenia KO w całym profilu poprzecznym rozpoznany został duży udział drewna późnego (Tab.3). Zawartość drewna późnego w przekrojach korzenia odstłoniętego (KO) wyniosła średnio od 61 do 67%. Dla porównania maksymalna zawartość drewna późnego dla prób korzenia zastłoniętego, jaką odnotowano w sekcji A1 wyniosła 38%, a średni udział drewna późnego we wszystkich próbach korzenia KZ w tej strefie wyniósł 23% (Tab. 7 i Tab. 8).



Ryc. 76. Uszkodzenia mechaniczne na tle średniej krzywej wzrostu dla części odstłoniętej korzenia (KO) strefy A ze szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek. Objasnienia: średnia krzywa wzrostu dla prób odstłoniętych strefy A- linia (kolor czerwony), blizny- słupki (kolor niebieski), traumatyczne kanały żywiczne- linia (kolor zielony), moment odstąpienia korzeni- znacznik (kolor różowy). Liczba uszkodzeń mechanicznych w danym roku przedstawiona w postaci wartości skumulowanej

W badanych częściach korzenia odstłoniętego (KO) zmiany anatomiczne, potencjalnie związane z oddziaływaniem ruchu turystycznego, zostały zidentyfikowane w różnych okresach (Ryc. 76). Uszkodzenia mechaniczne w korzeniu KO pojawiły się już w momencie odstąpienia, tj. w roku 1971. Ogółem w obrębie korzenia odstłoniętego wydatowano 11 blizn. Ich wystąpienie to lata 1971, 1972, 1973, 1986 oraz 2002. W trzech przypadkach w korzeniu (KO) odnotowano występowania traumatycznych kanałów żywicznych (TKŻ) przy jednoczesnej obecności blizny.

Dwukrotne pojawienie się TKŻ zauważono po roku od uszkodzenia kambium. W pozostałych przykładach występowanie TKŻ w korzeniu (KO) zaznaczyło się z kilkuletnim opóźnieniem od powstania blizny (Ryc. 76). W 84% zaistnienie uszkodzeń mechanicznych w korzeniu (KO) zaznaczyło się dla okresu letniego, tj. podczas trwania szczytu sezonu turystycznego. Dla kontrastu, w korzeniu zasłoniętym (KZ) w strefie A nie wykazano żadnych uszkodzeń mechanicznych w obrębie wszystkich przekrojów poprzecznych.

14.3. Dyskusja wyników datowania w wysokiej rozdzielczości zmian przyrostowych i anatomicznych korzenia sosny zwyczajnej z pojedynczym odsłonięciem wraz z analizą sąsiedniego korzenia zasłoniętego

W analizowanej części poziomego systemu korzeniowego drzewa B15 wykazano większe rozbieżności w rozkładzie szerokości i ilości przyrostów radialnych, anatomii drewna oraz cechach morfometrycznych w profilu podłużnym korzenia odsłoniętego (KO), niż w sąsiednim korzeniu zasłoniętym (KZ). Przeprowadzone datowanie pomostowe dwóch bliźniaczych korzeni z jednego drzewa wykazało wiele brakujących i wyklinowujących pierścieni w obrębie przekrojów poprzecznych wszystkich analizowanych stref korzeni.

Największe różnice w wielkości przyrostów rocznych i zmian anatomii drewna były widoczne w części odsłoniętej (tj. strefa szlaku) korzenia KO, poddanej intensywnej presji mechanicznej związanej z wydeptywaniem. Jednakże dla tej strefy stwierdzono najwyższą zgodność przyrostową między krzywą wzrostu z pnia a krzywymi z odsłoniętej części (tj. strefy szlaku) korzenia KO, charakteryzującymi się pełną serią przyrostową.

W próbach obu korzeni (KO i KZ) pobranych najbliżej pnia (strefa C) zmienność reakcji przyrostowej była niewielka, jednocześnie próby z tej strefy wykazały największą zgodność wzorca przyrostowego, która malała wraz ze wzrostem odległości od pnia drzewa (Tab. 9). Tym samym najniższą korelację pomiędzy próbami korzenia zasłoniętego (KZ) i odsłoniętego (KO), pobranymi z tej samej odległości względem pnia drzewa, odnotowano w strefie A (Tab. 9).

Tab. 9. Współczynnik korelacji Pearson'a pomiędzy próbami korzenia zasłoniętego (KZ) oraz odsłoniętego (KO) ze szlaku turystycznego stanowiska Bachotek pobrane z tej samej odległości względem podstawy pnia drzewa B15. R= współczynnik korelacji Pearson'a (*p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)

ID (cm)	STREFA POZA SZLAKIEM (C)					STREFA POBOCZA (B)				STREFA SZLAKU (A)		
	C1-C1 (125)	C2-C2 (158)	C3-C3 (197)	C4-C4 (235)	C5-C5 (270)	B1-B1 (310)	B2-B2 (335)	B3-B3 (390)	B4-B4 (437)	A1-A1 (484)	A2-A2 (505)	A3-A3 (536)
R	0,78***	0,86***	0,77***	0,75***	0,71***	0,68***	0,64***	0,41**	0,29*	0,17	0,21	0,26

Stwierdzono, że rozbieżność cech morfometrycznych pomiędzy dwoma sąsiadującymi ze sobą korzeniami (tj. KZ i KO) zależała od położenia pobranych prób względem odległości od pnia, osiągając największą zgodność w strefie C (Tab. 9). Ponadto w badanych fragmentach korzeni widoczna była prawidłowość w stosunku do ich morfologii, a dokładniej wskaźnika kolistości, rozmiaru korzeni oraz rozkładu ekscentryczności. W obu korzeniach zaobserwowano stopniowy wzrost wielkości korzeni, wskaźnika ekscentryczności oraz nieregularności kształtu przekrojów korzeni wraz ze wzrostem odległości od pnia drzewa. Wszystkie te parametry osiągały maksymalne wartości w strefie A (Tab. 7 i Tab. 8) dla obu korzeni (tj. KZ i KO). W większości próby korzenia odsłoniętego ze strefy A charakteryzowały się dolną asymetrią

rozkładu przyrostów radialnych przy na ogół symetrycznym przebiegu wzoru przyrostowego dla pozostałych prób obu korzeni ze strefy C i B.

Przedstawiona analiza zmian anatomii drewna korzeni drzewa B15 wskazuje, iż początkowy etap odstania korzenia KO był efektem wzrostu wtórnego korzenia (Gärtner 2007). Świadczy o tym fakt, iż jedynie pierwsze przyrosty skali dendrochronologicznej (tj. przyrosty juwenilne) posiadały cechy typowe dla korzenia zastąpionego, charakteryzującego się dużymi powierzchniami komórek drewna wczesnego oraz niewielkim udziałem komórek drewna późnego w obrębie przyrostów rocznych (Ryc.8). Oznacza to, że korzeń odstąpiły rósł blisko powierzchni gleby i co roku wykształcając koncentryczne przyrosty powodowały rozrost korzenia na grubość, a tym samym stopniowe przybliżanie korzenia do wierzchniej warstwy gleby. Korzeń na tym etapie wykształcał więcej komórek drewna późnego, przy niezmienniej wielkości komórek drewna wczesnego. Zjawisko odstania korzeni w wyniku wzrostu wtórnego zostało wcześniej opisane przez H. Gärtner'a (2007) w odniesieniu do odstąpiętych korzeni modrzewia (*Larix decidua* Mill.).

W przypadku analizowanych korzeni drzewa B15 zaobserwowano zależności pomiędzy reakcją anatomiczną i przyrostową korzeni, a warunkami wzrostu, które modyfikowane są w sezonie wegetacyjnym przez intensywny ruch turystyczny. Odstąpięte części korzenia KO położone w strefie szlaku (A), tj. w strefie szlaku turystycznego, były najbardziej narażone na ciągłą presję mechaniczną związaną z wydeptywaniem. Zapis częstych zmian w anatomii drewna, takich jak powszechne wykształcenie traumatycznych kanałów żywicznych czy obecność blizn wyraźnie zaznaczył się dla okresu letniego, tj. podczas trwania szczytu sezonu turystycznego, w korzeniu (KO). Otrzymane wyniki świadczą o zróżnicowanym charakterze jakościowym reakcji badanych części obu korzeni na zmieniające się warunki wzrostu, w tym warunki glebowe, silnie modyfikowane w strefie szlaku w wyniku działalności człowieka.

15. Dendrogeomorfologiczny zapis tempa denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym stanowiska Bachotek

15.1. Wybór metody kalkulacji tempa denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym przy użyciu korzeni odsłoniętych

Istotnym motywem podjęcia badań dendrogeomorfologicznych na szlaku turystycznym stanowiska Bachotek był niewielki udział prac o charakterze ilościowym dotyczących wpływu ruchu turystycznego na pokrywą glebową i rzeźbę szlaków na obszarze Polski niżowej. Dotychczasowe ilościowe wyliczenia tempa ubytku materiału ze szlaków były szacunkowe i odnosiły się jedynie do ogólnej wartości objętości materiału usuniętego w profilach poprzecznych ze szlaku, z pominięciem skali czasowej (Gager, Conacher 2001).

W niniejszej pracy w pierwszym etapie obliczenia tempa denudacji ze szlaku poddano weryfikacji trzy znane z literatury wskaźniki obliczenia tempa ubytku materiału wykorzystujące odsłonięcia korzeni drzew (Tab.10). Celem tego postępowania było testowanie i wybór odpowiedniej metody, która będzie brała pod uwagę zarówno cechy morfologiczne odsłoniętych korzeni sosny jak i typ podłoża na badanym szlaku. Należy podkreślić, iż większość korzeni odsłoniętych na stanowisku Bachotek charakteryzowało się podniesieniem osi korzenia w strefie odsłoniętej (Ryc. 78), stałym podparciem, tj. ciągłym kontaktem z powierzchnią gleby i występowaniem strefy zastoniętej korzenia poprzedzającej odsłonięcie, tj. częścią korzenia zlokalizowaną pomiędzy szlakiem turystycznym a pniem drzewa.

Pierwsza metoda kalkulacji tempa denudacji przy użyciu odsłoniętych korzeni, określona jako klasyczna, porównuje wysokość zawieszenia odsłoniętego korzenia mierzonej od górnej krawędzi korzenia po aktualną powierzchnię pokrywy glebowej na szlaku do wieku odsłonięcia korzenia i umożliwia wyliczenie tempa ubytku materiału ze szlaków w mm/rok (Tab.10) (Bodoque i in. 2005; Pelfini, Santilli 2006; Perez-Rodriguez i in. 2007). Metoda ta posiada pewne ograniczenia, które związane są z niedoszacowaniem rzeczywistej wartości ubytku materiału z powierzchni gruntu. Bezpośrednio dotyczy to nieuwzględnienia w obliczeniach metody klasycznej analiz struktury anatomicznej korzenia odsłoniętego w całym przekroju poprzecznym, szczególnie jego części przed odsłonięciem. Tym bardziej, że korzenie mogą wykazywać koncentryczną formę wzrostu, która znacząco wpływa na bezpośrednie określenie szybkości erozji (Perez-Rodriguez i in. 2007). Co więcej czynnikiem wpływającym na niedoszacowanie prezentowanych wartości tempa denudacji na szlaku jest brak szczegółowych analiz morfologicznych korzenia, który ma stały kontakt z glebą tj. znaczna jego część jest pod powierzchnią. Tym samym może skutkować to błędną interpretacją wielkości ubytku materiału z powierzchni szlaku. Jak zauważyli L. Vandekerckhove i in. (2001), to podejście metodyczne budzi niepewności uzyskanych wyników i wiąże się z problemem oceny postępującego przegłębienia badanej powierzchni. Miąższość ubytku gleby na szlaku zazwyczaj jest mierzona punktowo, tj. w miejscu kontaktu odsłoniętego korzenia z glebą. Brak porównania wartości miąższości wynoszonego materiału z wielu, różnowiekowych części korzenia budzi niepewność interpretacyjną. Proces ubytku materiału na szlaku nie generuje wyniesienia jednolitej warstwy wzdłuż całego korzenia. Często korzenie odsłonięte tworzą układ kaskadowy, co generuje powstanie form czasowej akumulacji materiału w obrębie korzeni już odsłoniętych. Duże odsłonięte korzenie wydają się wtedy chronić glebę przed erozją (Bodoque i in. 2011; Haubrock i in. 2009), tak że wysokość ubytku gleby byłaby niższa w punkcie kontaktu korzenia z glebą, niż w ich najbliższym otoczeniu. W rezultacie otrzymane wyniki badań powodują

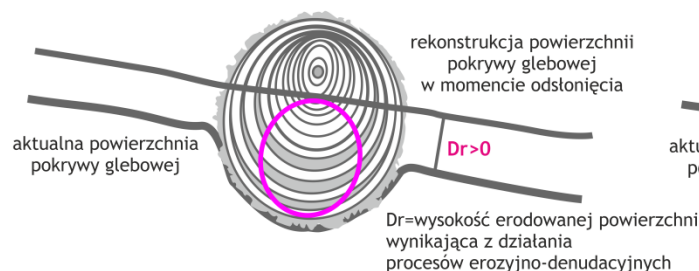
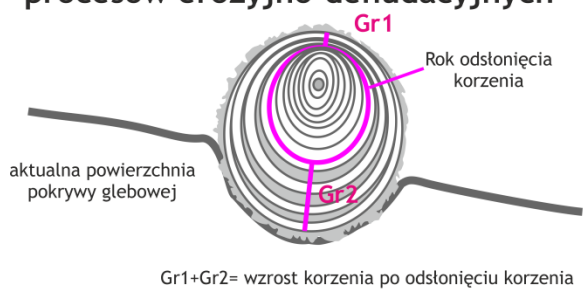
negatywną relację obserwowaną pomiędzy średnim tempem ubytku materiału na szlaku, a grubością korzenia (Bodoque i in. 2011).

Druga metoda kalkulacji tempa denudacji przy użyciu odstoniętych korzeni za kluczowy element obliczeń wskazuje porównanie struktur anatomicznych drewna korzenia utworzonych przed i po odstonięciu (Gärtner 2007). W swoich założeniach uwzględnia ona poznanie mechanizmu ksylogenezy, w tym wzrostu korzenia na grubość, zależnego od zdolnych do podziału komórek kambium i fellogenu (Hejnowicz 2012). Wiedząc, że dla aktywności kambium korzenia charakterystyczna jest okresowość tworzenia tyka i drewna, uwarunkowana następstwem pór roku, cyklicznie wywierany nacisk mechaniczny na korzeń powoduje reakcje anatomiczne widoczne na przekroju poprzecznym korzenia. Korzenie tracąc kontakt z podłożem, wykształcają szereg zmian przyrostowych, będących efektem wahań temperatury, światła słonecznego, a także zmian oporu gleby stymulującej dalszy rozwój korzenia (Fayle 1968, Bodoque i in. 2005). Największe zmiany zachodzą w budowie anatomicznej drewna korzeni (Gärtner i in. 2001), w której zaznacza się odrębność struktur drewna wczesnego i późnego, a jednocześnie zwiększa się szerokość przyrostów rocznych w korzeniu (Schweingruber 1996). W korzeniach odstoniętych pojawia się gwałtowne stłumienie wzrostu oraz występują traumatyczne kanały żywiczne w przyrostach (Malik 2008). Taka zmiana w drewnie korzenia często dotyczy nagłych odstonień korzeni tj. gdy korzeń traci kontakt z powierzchnią (Stoffel 2013). H. Gärtner i in. (2001), jako pierwsi, za moment całkowitego odstonienia korzenia uznali przyrost roczny charakteryzujący się redukcją wielkości komórek drewna wczesnego o 50% i więcej względem przyrostu poprzedzającego. Wiedza ta okazuje się być bardzo cenna w dalszym postępowaniu, tym bardziej, że dokładne rozpoznanie roku ekspozycji znacząco wpływa na obliczenia wielkości ubytku materiału z powierzchni gleby.

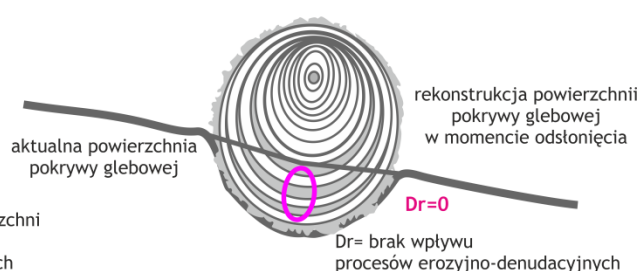
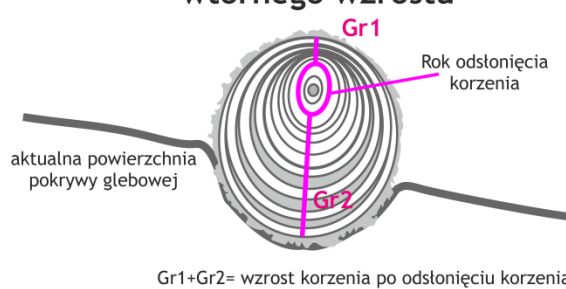
H. Gärtner (2007) w swoim podejściu badawczym w wysokiej rozdzielczości datuje procesy kształtujące rzeźbę terenu oraz podkreśla konieczność analizy zapisu reakcji anatomicznych korzenia na podstawie przeźroczy mikroskopowych. Ponadto porusza problem rekonstrukcji czasowej przyrostu na grubość kory, spełniającej funkcje ochronne drewna korzenia na czynniki zewnętrzne. Poznanie mechanizmu rozwoju, podziału i odkładania warstw kory w tym m.in. kory pierwotnej i epidermy jest równie ważne z punktu widzenia obliczeń tempa ubytku materiału ze szlaku. Warstwy kory mogą być roczne, ale również dwuletnie, a zatem nie można wiarygodnie ich datować (Kokociński 2002). W miarę starzenia się kora korzeni ulega łuszczeniu, bruzdowaniu i pęka powodując zmiany w strukturze kory, co w konsekwencji oszacowanie grubości kory w czasie ekspozycji korzenia nie jest możliwe bądź bez wnikliwych badań eksperymentalnych bardzo trudne. Dokładne przeanalizowanie średniej szerokości kory w różnych miejscach korzenia zarówno w górnej jak i dolnej części jego przekroju poprzecznego, potencjalnie pozwoliłoby uszczegółwić obliczenia wskaźnika tempa ubytku materiału ze szlaków.

Metoda zaproponowana przez H. Gärtner'a (2007) ma pewne ograniczenia. Autor podkreślił, że gdy korzeń jest zawieszony nad powierzchnią gruntu, wówczas jego ekspozycja najprawdopodobniej została spowodowana nagłym procesem erozyjnym. Sytuacja ta jest łatwa do rozpoznania w terenie, gdy korzeń w pełni dotyka powierzchni gleby lub w ogóle nie ma kontaktu z gruntem. Założenia H. Gärtner'a (2007) odnoszą się, zatem jedynie do sytuacji, w której wysokość odstoniętej części korzenia jest mniejsza od średnicy korzenia, co oznacza, że korzeń pozostawał w kontakcie z glebą. Z drugiej strony podejście to pozwala określić, czy początkowo rosnące blisko powierzchni gleby korzenie zostały odstonięte w wyniku wzrostu wtórnego czy działalności nagłych bądź powolnych procesów odstoniających (Ryc.77).

A. Odstonięcie korzenia w wyniku procesów erozyjno-denudacyjnych



B. Odstonięcie korzenia w wyniku wtórnego wzrostu



Ryc. 77. Schemat odstonięcia korzenia w wyniku procesów erozyjno-denudacyjnych (A) oraz odstonięcia korzenia w wyniku wzrostu wtórnego (B). Określenie wielkości korzenia (różowy okrąg) w momencie odstonięcia na podstawie zmian przyrostowych i anatomicznych pozwala na określenie charakteru procesu odpowiedzialnego za odstonięcia korzenia (za H. Gärtner'em 2007, zmodyfikowane przez P. Matulewski).
Dr- grubość erodowanej warstwy gruntu ; Gr1, Gr2 -wzrost korzeni po odstonięciu

Metoda datowania odstonień korzeni oparta na poznaniu struktury wewnętrznej drewna zaproponowana przez H. Gärtner'a (2007) stanowi uzupełnienie podejścia opracowanego przez V. C. LaMarche'a (1968). V. C. LaMarche traktował środek odstoniętych korzeni, jako względne położenie dawnej warstwy gruntu, tj. tej przed zaistnieniem procesu erozji gleby. Ponadto pozycję środka korzenia autor ten powiązał z wiekiem korzenia w celu określenia średniej wielkości ubytku materiału glebowego w czasie. W przyjętej wówczas metodzie przed V. C. LaMarche'a (1968) brak informacji uwzględniających rok odstonięcia i wielkości korzenia przed odstonieniem, co może powodować niedoszacowania analizowanego tempa ubytku materiału.

Kolejna metoda kalkulacji tempa denudacji przy użyciu odstoniętych korzeni została zaprezentowane przez C. Corona i in. (2011) oraz J.A. Ballesteros-Cánovas i in. (2013) i jest rozwinięciem metody zaproponowanej przez H. Gärtner'a (2007). Metoda ta w głównej mierze odwołuje się do precyzji identyfikacji i pomiaru zmian anatomicznych części odstoniętych i nieekspozowanych korzenia.

Wyniki badań przedstawione przez C. Corona i in. (2011) wskazują, że ciągłe i silne działanie bodźców środowiskowych powoduje reakcje anatomiczne w korzeniu, w tym zmniejszenie światła komórek drewna, gdy tylko gleba zakrywająca korzeń zostanie zredukowana do 30 mm. Ten przedwczesny spadek czego autorzy wyjaśniają okresowo występującymi niedogodnymi warunkami klimatycznymi oraz sezonową zmiennością cech fizyko-mechanicznych gleby, w której przyrasta korzeń (Rovéra i in. 2013). Rozmarzanie gruntu w porze wiosennej uzupełnione okresami suszy i nawałnym deszczem latem znacząco wpływa na środowisko glebowe (Antoine i in. 1995). Zdarzenia te destabilizują agregaty gleby m.in. zwiększa porowatość gleby poprzez pojawienie się licznych pęknięć na powierzchni gleby (Zhou 2013). Ze względu na niewielką miąższość, niektóre gleby w tym gleby wapienne są bardzo narażone na erozję. Woda deszczowa poprzez spękania penetruje glebę znacznie szybciej,

co powoduje przyspieszone rozpuszczanie węgla wapnia (Buckman, Brady 1971; Corona i in. 2011). W takich warunkach ciągłe i regularne oddziaływanie silnych bodźców środowiskowych zaznacza się zmniejszeniem komórek drewna wczesnego w przyrostach korzeni położonych już na głębokości ± 30 mm (Corona i in. 2011; Lopez Saez i in. 2011; Stoffel i in. 2013; Ballesteros-Cánovas 2015). Takie zależności dotyczyły korzeni drzew rosnących na wapiennych glebach szkieletowych z wysoką porowatością. Z kolei na glebach zbitych wykazano iż sporadyczne i nagłe procesy niszczące na wybrzeżu klifowym (Morel i in. 2017) nie powodują wyraźnych zmian anatomicznych w korzeniach rosnących blisko powierzchni gleby (Rovéra i in. 2013). Brak zmian przyrostowych w tym opisywanym przypadku jest dowodem na ekofizjologiczną adaptację korzeni do nowych warunków środowiskowych, tj. charakterystycznych dla analizowanego przypadku. W świetle tych najnowszych badań, identyfikacja cech pokrywy glebowej oraz zmian anatomicznych korzeni rosnących tuż pod powierzchnią gleby stanowią zatem punkt wyjścia do precyzyjnego określenia roku odstąpienia korzenia. W ramach kalkulacji tempa ubytku materiału C. Corona i in. (2011) zalecają przeprowadzenie analizy anatomii korzeni zastąpionych na różnych głębokościach i dokładną weryfikację wszelkich zmiany wzrostu korzenia, mogących świadczyć o zbliżaniu się korzenia do powierzchni pokrywy glebowej.

Przy obliczaniu ilości ubytku gleby z odstąpiętych korzeni drzew istotne jest przede wszystkim precyzyjne ustalenie wysokości pobieranej części korzenia w odniesieniu do aktualnej powierzchni gleby. Wysokość eksponowanej części korzeni, która wpływa na obliczenia wielkości ubytku materiału, wyraźnie zależy od stabilności osi korzenia (Gärtner 2007; Corona i in. 2011). Klasyczna metoda kalkulacji tempa denudacji przy użyciu odstąpiętych korzeni nie uwzględnia w swoich założeniach problemu stabilności osi korzenia czy deformacji zewnętrznych struktur korzenia. Czasami w wyniku działania erozji pozycja korzenia jest niezmienna, co uwarunkowane jest zdolnością niektórych drzew do wyrównywania pozycji korzenia w stosunku do siły ciężenia zwanej diageotropizmem (Jackson, Barlow 1981). Jednakże silna presja mechaniczna, zmienne warunki glebowe oraz wzrost wtórny zaznaczający się wokół całego obwodu korzenia powodują względne podniesienie jego osi. Wraz z wiekiem wyraźnie zmienia się pozycja geometrycznego środka/ korzenia przy jednoczesnym stałym rozrostem bocznych części korzenia, a w szczególności intensywnej alokacji wzrostu promieniowego w chronionej, tj. niższej warstwie korzenia (LaMarche 1963, Heikkinen 1994). Współmiernie w morfologii korzenia zaznacza się asymetryczność przekrojów poprzecznych, wydłużenie osi korzenia w pionie oraz deformacja kory. W rezultacie przyrost zidentyfikowany, jako rok ekspozycji nie jest w tej samej pozycji, jak w czasie działania impulsu odstaniającego korzeń. Tym samym interpretacja wielkości ubytku materiału przy użyciu odstąpiętych korzeni może być obciążona błędem wynikającym z przyjętego postępowania. Metoda prezentowana przez C. Corona i in. (2011), biorąca za punkt wyjścia analizę wysokości odstąpiętej części korzenia, wyróżnia dwie sytuacje terenowe, gdzie (i) pierwsza zakłada względne podniesienie się osi korzenia po ekspozycji oraz (ii) druga, w której pozycja korzenia jest stabilna. Rozpoznanie położenia korzenia wiąże się bezpośrednio z określeniem rodzaju odstąpienia korzenia i pytaniem czy całkowita ekspozycja była spowodowana przez jedno nagłe zdarzenie czy przez proces działający powoli. W przypadku nagłego zdarzenia, wykazano brak podniesienia osi korzenia. W taki przypadku górna strona przyrostu rocznego po raz pierwszy przedstawiająca zmiany anatomiczne (tj. zmian wielkości komórek drewna wczesnego i wzrost zawartości drewna późnego) jest przyjmowana, jako miara minimalnego poziomu powierzchni gleby, jaka występowała w czasie odstąpienia korzenia.

Tab.10. Porównanie aktualnie stosowanych metod kalkulacji tempa ubytku materiału przy użyciu odstłoniętych korzeni wykorzystywanych w dendrogeomorfologii. Kropką zaznaczono badaną cechę w ramach danej metody.

- 1- Bodoque et al. (2005); Pelfini, Santilli (2006); Perez-Rodriguez et al. (2007): $D_R = E_x / NR_{EX}$,
 - 2- Gärtner (2007): $D_R = (R2 + (B1 + B2) / 2 + R1 - E_x) / NR_{EX}$,
 - 3- Corona et al. (2011); Lopez Saez et al. (2011); Stoffel et al. (2013); Ballesteros-Cánovas et al. (2015): $D_R = (E_x - (Gr1 + Gr2) + (B1 + B2) / 2 + \epsilon) / NR_{EX}$.
- Parametry brane pod uwagę przy obliczaniu wielkości tempa ubytku materiału zostały przedstawione i opisane na Ryc. 79.

BADANA CECHA	METODA		
	1*	2*	3*
pomiar wysokości podparcia bądź zawieszenia korzenia nad powierzchnią gruntu	•	•	•
określenie wieku korzenia w czasie odstłonięcia	•	•	•
pomiar i analiza budowy anatomicznej korzenia odstłoniętego na podstawie zdjęć makro- i mikroskopowych		•	•
analiza zmian pozycji osi korzeniowej		•	•
analiza rodzaju odstłonięcia korzenia w tym ekspozycji w wyniku przyrostu wtórnego korzenia		•	
analiza zmian anatomicznych w korzeniach nieekspozowanych			•
ograniczenie analiz jedynie do korzeni mających kontakt z powierzchnią gleby		•	

W niniejszej pracy w celu rozpoznania wielkości tempa denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym na stanowisku Bachotek wykorzystano metodę zaprezentowaną przez C. Corona i in. (2011), uwzględniającą fakt, iż potencjalne zmiany anatomiczne w tym zmniejszenie światła komórek drewna wczesnego, zapisują się w korzeniach rosnących już w przypowierzchniowych warstwach gleby (Tab.10). O wyborze tego podejścia badawczego zdecydowały wnikliwe analizy zmian anatomicznych korzeni nieodstłoniętych oraz obserwacje reakcji morfologicznych korzeni na szlaku turystycznym na stanowisku Bachotek. Należy wskazać, iż wszystkie korzenie odstłonięte na szlaku posiadały stałe podparcie, tj. kontakt z powierzchnią gleby. Wszystkie korzenie odstłonięte charakteryzowały się również zmienioną pozycją osi korzenia średnio o 5 cm (Załącznik 3). W pracy przyjęto następujące założenie, iż ciśnienie wzrostu promieniowego wywierane przez korzeń jest niższe niż mechaniczny opór gleby ze szlaku. Tym samym przyjęto, że ciągłe wydeptywanie korzeni jest przyczyną zaobserwowanej zmiany pozycji osi korzenia, tj. powszechnego podniesienia osi korzenia w obrębie szlaku (Ryc.78).



Ryc. 78. Podniesienie pozycji osi korzenia odstłoniętego sosny zwyczajnej w obrębie szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek

W niniejszym opracowaniu obliczono tempo denudacji używając wskazówek metodycznych C. Corony i in. (2011) z sugestią określenia przesunięcia (ang. *bias*), tj. średniej głębokości zalegania nieodstłoniętych części korzeni, w których widoczne są pierwsze anatomiczne sygnały odstąpienia, np. spadek wielkości komórek drewna wczesnego. Na podstawie wizualnej analizy struktury anatomicznej 35 korzeni zastłoniętych (posiadających odstłoniętą część w obrębie szlaku) ze stanowiska Bachotek wielkość przesunięcia (ang. *bias*) wyliczono na poziomie 20 mm. Oznacza to, iż w analizowanym obszarze badań na średniej głębokości 20 mm w korzeniach przyrastających naturalnie w glebie w obrębie szlaku turystycznego zaobserwowano pierwsze zmiany anatomiczne świadczące o przybliżeniu korzenia do powierzchni gleby i jego podatności na działaniu procesów zewnętrznych.

Wartość przesunięcia określono na podstawie analizy szerokości przyrostów rocznych i jej zmienności w drewnie korzeni zastłoniętych na różnych głębokościach oraz zwiększonej zawartości drewna późnego w obrębie całego przekroju poprzecznego korzeni. Dodatkowym argumentem użycia metody C. Corony (2011) wraz z uwzględnieniem przesunięcia (ang. *bias*) był fakt identyfikacji we wszystkich korzeniach zmiany pozycji części odstłoniętej korzeni w stosunku do ich części zastłoniętych, tj. podniesienia osi korzenia widoczne w profilu podłużnym danego korzenia.

Rozpoznanie wielkości tempa denudacji antropogenicznej na szlaku ze stanowiska Bachotek dokonano w oparciu o analizy anatomiczne i przyrostowe korzeni wykonane na przezroczach mikroskopowych. Opisane wcześniej analizy dendrogeomorfologiczne korzeni odstłoniętych na szlaku (Podrozdział 10.2) pozwoliły na wskazanie dat kalendarzowych, w których nastąpiło odstąpienie korzeni oraz na określenie typu procesów odstaniającego korzenie, tj. proces nagły o charakterze erozyjnym versus proces powolny - denudacja. Pomiaru szerokości słoików rocznych i wielkości drewna wczesnego w korzeniach dokonano z uwzględnieniem strefy wzrostu przed i po odstąpieniem. Dodatkowo dokonano pomiarów grubości kory w górnej i dolnej części korzenia zastłoniętego. Ponadto biorąc pod uwagę liczbę i położenie pobranych korzeni prześledzono przestrzenny zapis odstąpięć korzeni w danym systemie korzeniowym.

W obliczeniach wielkości ubytku materiału rozpoznano i uwzględniono wielkość korzenia przed odstąpieniem oraz wysokości korzenia względem aktualnej powierzchni gleby (Ryc. 79). Ilościowej oceny tempa denudacji antropogenicznej (DrA) dokonano uwzględniając obliczenia dwóch zmiennych:

- liczby słoików wykształconych w korzeniu od czasu jego ekspozycji (NR_{ex}), oraz
- grubości erodowanej warstwy gruntu po ekspozycji korzenia (Dr).

Lista pozostałych zmiennych uwzględnionych w obliczeniach tempa denudacji antropogenicznej (DrA) na szlaku została przedstawiona na Ryc. 79. Zakres cech branych pod uwagę przy kwantyfikacji tempa denudacji obejmował:

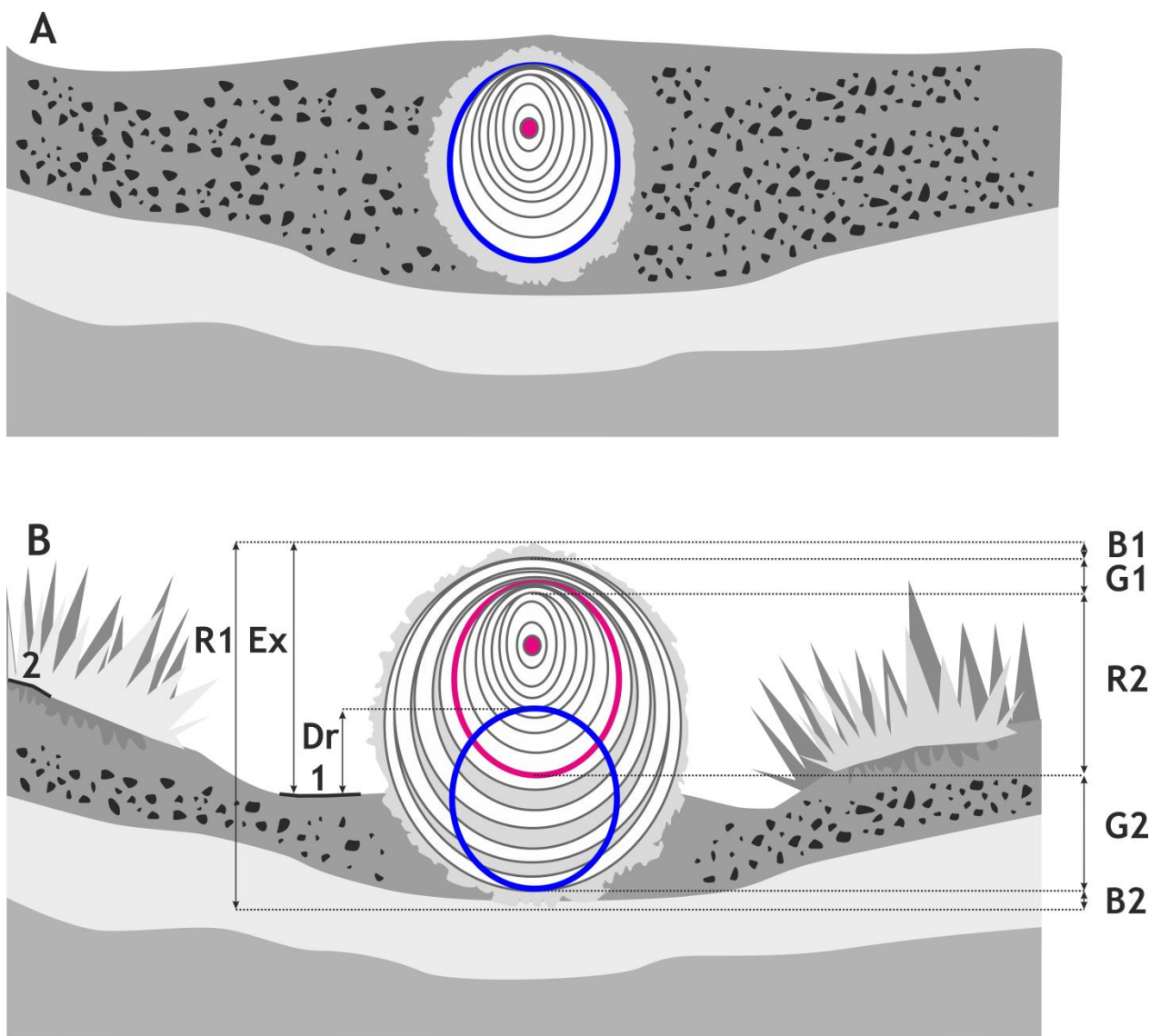
- całkowitą wysokość korzenia, mierzona prostopadle do powierzchni pokrywy glebowej ($R1$),
- wysokość między górną częścią korzenia, a aktualną powierzchnią gleby (Ex),
- wysokość części korzenia w czasie ekspozycji ($R2$) oraz po ekspozycji ($G1$ oraz $G2$) obliczoną na podstawie analizy zmian anatomicznych,
- grubości kory w górnej ($B1$) i dolnej ($B2$) części korzenia,
- tzw. przesunięcie (ang. *bias*), tj. średnia głębokość zalegania nieodstąpiętych części korzeni, w których zdiagnozowano anatomiczne sygnały odstąpięcia (ϵ).

Biorąc pod uwagę, że przyjęty przez autora obecny poziom gleby wyniósł „0”, grubości erodowanej warstwy gruntu po odstąpieniu korzenia (Dr) była możliwa do obliczenia według poniższego wzoru:

$$Dr = Ex - (G1 + G2) + (B1 + B2) / 2 + \epsilon$$

W celu oszacowania średniego rocznego tempa denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym na stanowisku Bachotek, grubości obliczonej wyżej erodowanej warstwy gruntu po odstąpieniu korzenia (Dr) podzielono przez liczbę przyrostów rocznych wykształconych od roku odstąpięcia (NR_{ex}).

$$DrA = Dr / NR_{ex}$$



Ryc. 79. Szkic sytuacyjny położenia korzenia sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w obrębie szlaku turystycznego przed odstonięciem (A) oraz odstoniętego (B) prezentujący parametry morfologii korzenia oraz pokrywy glebowej stosowane do obliczenia tempa denudacji antropogenicznej (Dr_A).

1- nienaruszona powierzchnia pokrywy glebowej na szlaku

2- aktualna powierzchnia pokrywy glebowej.

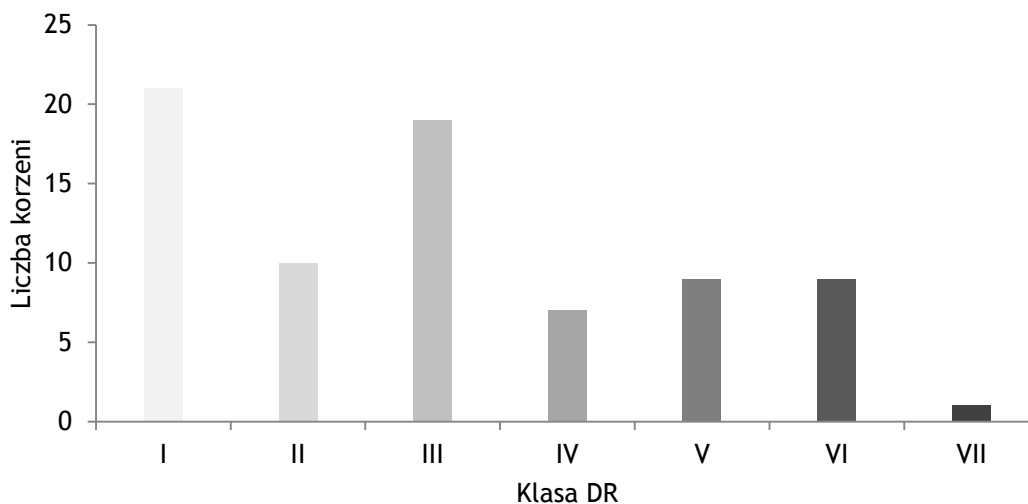
Wyjaśnienie pozostałych skrótów w tekście.

15.2. Wielkość tempa denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym stanowiska Bachotek

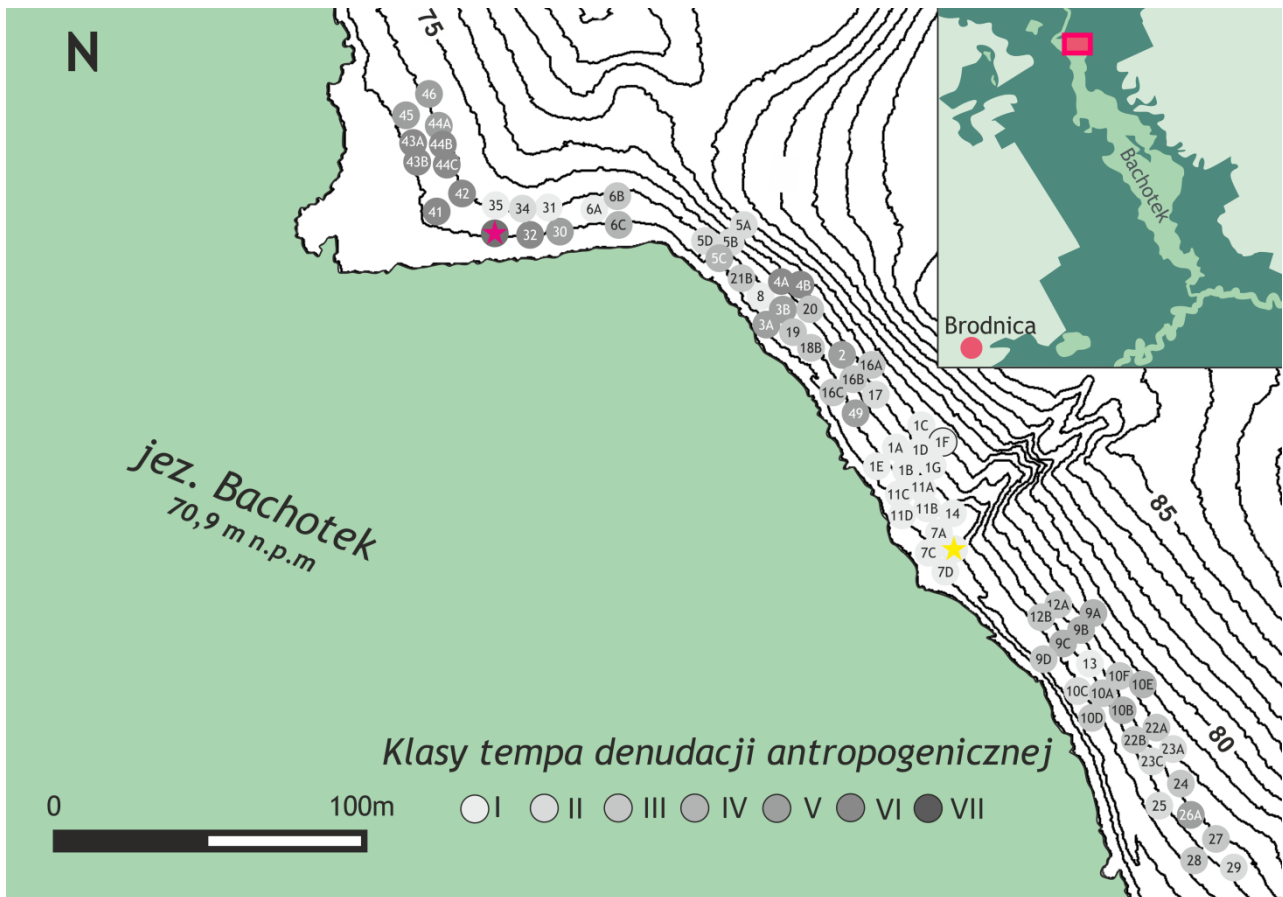
Wielkość tempa denudacji antropogenicznej (DrA) obliczono dla 76 próbek korzeni odsloniętych sosny zwyczajnej, tj. dla których zostało rozpoznane odslonięcie w wyniku powolnych procesów denudacyjnych (64%) oraz nagłych procesów erozyjnych (22%). Nie uwzględniono w kalkulacji korzeni odsloniętych w wyniku wzrostu wtórnego (14%), dla nich wartość tempa denudacji została określona na poziomie „0” (Gärtner 2007).

Przeprowadzone obliczenia według powyższego wzoru wskazywałyby, iż wzdłuż badanego szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek średnie tempo denudacji antropogenicznej (DrA) wyniosło $1,93 \pm 0,82$ mm/rok. Zakres uzyskanych wartości tempa denudacji zawierał się w przedziale od 0,71 do 3,80 mm/rok (Załącznik 4). 45% próbek korzeni (tj. 34 z 76) wykazało tempo denudacji powyżej średniej, tj. w przedziale od 1,95 do 3,80 mm/rok (Ryc. 3).

Wartości tempa denudacji (DrA) zostały zaszeregowane do pięciu klas (I-VII). Kryterium podziału na poszczególne klasy tempa denudacji zostało wyznaczone na podstawie ilości korzeni oraz uzyskanych wartości tempa denudacji dla poszczególnych prób wykorzystując metodę szeregu rozdzielczego przedziałowego. Najwyższy udział w rozkładzie klas tempa denudacji przypadło na I klasę (0,71-1,2 mm/rok) reprezentowaną przez 21 korzeni. Do klasy najwyższego tempa denudacji zakwalifikowano jedynie jeden korzeń (Ryc. 80). W sumie 66% pobranych prób reprezentowało klasy od I do III tempa denudacji antropogenicznej. Przestrzenne rozmieszczenie korzeni wraz z uzyskanym na podstawie badań dendrochronologicznym tempem denudacji przyporządkowanym do poszczególnych klas prezentuje Rycina 81.

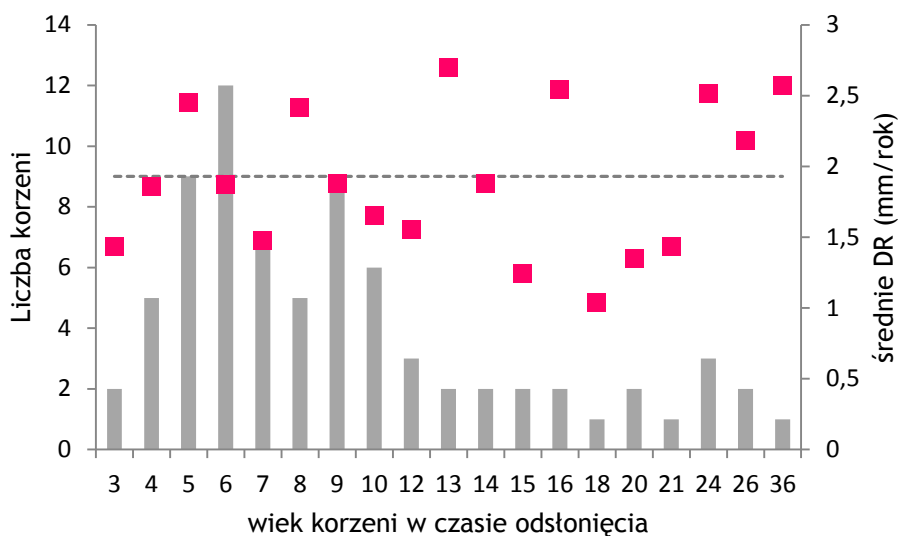


Ryc. 80. Histogram rozkładu klas tempa denudacji antropogenicznej (DrA) korzeni sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) ze stanowiska Bachotek objętych analizami dendrogeomorfologicznymi. Poszczególne klasy zawierają się w następujących przedziałach tempa denudacji -klasa I: 0,71-1,2 mm/rok; klasa II: 1,21-1,7 mm/rok; klasa III: 1,71-2,2 mm/rok; klasa IV: 2,21-2,7 mm/rok; klasa V: 2,71-3,2 mm/rok; klasa VI: 3,21-3,7 mm/rok; klasa VII: <3,71 mm/rok



Ryc. 81. Rozkład przestrzenny klas tempa denudacji antropogenicznej (DrA) (skala odcieni szarości) wraz z lokalizacją próbek korzeni sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) poddanych analizie dendrogeomorfologicznej na stanowisku Bachotek (w okręgu podano numer identyfikacyjny korzenia); klasa I: 0,71-1,2 mm/rok; klasa II: 1,21-1,7 mm/rok; klasa III: 1,71-2,2 mm/rok; klasa IV: 2,21-2,7 mm/rok; klasa V: 2,71-3,2 mm/rok; klasa VI: 3,21-3,7 mm/rok; klasa VII: <3,71 mm/rok; różowa gwiazdka- maksymalna wartość tempa denudacji, żółta gwiazdka- minimalna wartość tempa denudacji

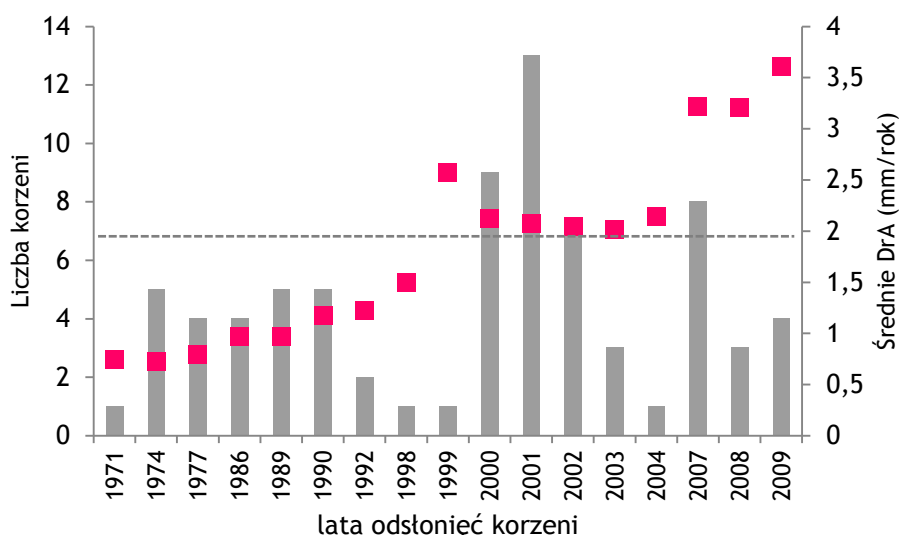
Uzyskane wartości tempa denudacji antropogenicznej (DrA) przeanalizowano pod kątem charakteru odstonień korzeni sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L) w obrębie stanowiska Bachotek. Porównano wyniki dla korzeni odstanianych powoli, przy udziale postępujących procesów denudacyjnych (tj. 64% analizowanych korzeni) oraz tych odstanianych nagle, przy udziale procesów erozyjnych o większym natężeniu (tj. 22% analizowanych korzeni). Większy zakres zmienności średniego tempa denudacji wykazano dla korzeni odstanianych powoli i wyniósł on od 0,71 do 3,68 mm/rok. Średnie tempo denudacji dla tej grupy korzeni wyniosło 1,68 mm/rok, podczas gdy wyliczone tempo denudacji dla korzeni odstanianych nagle, było większe i wyniosło 2,63 mm/rok.



Ryc. 82. Porównanie średniej wartości tempa denudacji antropogenicznej (DrA) obliczonej na podstawie analiz dendrochronologicznych korzeni sosny zwyczajnej w obrębie szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek z wiekiem korzeni w czasie odstonięcia. Liczba korzeni- kolor szary, średnie DrA obliczone danego wieku korzenia- kolor różowy. 1,93 mm/rok średnie DrA na szlaku turystycznym- linia przerywana

W obrębie analizowanego szlaku turystycznego dominowały korzenie, których średnia wieku w momencie odstonięcia wyniosła 9 lat. Udział korzeni poniżej 9 lat wyniósł 62% wszystkich analizowanych korzeni. Największy udział miały korzenie, których wiek w trakcie odstonięcia wyniósł 6 lat (Ryc. 82). Korzenie te stanowiły 16% wszystkich analizowanych prób. W pracy nie wykazano istotnej zależności między wiekiem korzenia w czasie odstonięcia a wielkością tempa denudacji antropogenicznej uzyskanej na podstawie analizy dendrochronologicznej danego korzenia. Najwyższe wartości średniego tempa denudacji antropogenicznej tj. 2,69 mm/rok uzyskano dla korzeni, których wiek w trakcie odstonięcia wyniósł 13 lat (Ryc. 82).

Zapis procesów odstania korzeni w ich przyrostach rocznych pozwolił na ujęcie zmienności tempa denudacji w skali chronologicznej. W tym celu prześledzono wartości średniego tempa denudacji, uzyskane dla korzeni odstanianych w poszczególnych latach (Ryc. 83). Porównanie to miało na celu wskazanie lat, w których dochodziło do najintensywniejszego ubytku materiału w obrębie analizowanego szlaku turystycznego. Kryterium wytypowania lat największego oddziaływania ruchu turystycznego na rzeźbę w obrębie stanowiska Bachotek było wystąpienie minimum czterech odstonień korzeni, dla których obliczone średnie tempo denudacji było wyższe niż wartość średniego tempa denudacji uzyskana dla wszystkich korzeni ogółem ze stanowiska Bachotek (tj. 1,93 mm/rok). Wyniki porównania przedstawia Ryc. 83 oraz Tab. 11.



Ryc. 83. Wykres średniej wartości tempa denudacji antropogenicznej (DrA) na szlaku turystycznym na stanowisku Bachotek dla korzeni odsoniętych sosny zwyczajnej w poszczególnych latach. Liczba korzeni- kolor szary, średnie tempo denudacji antropogenicznej dla danego roku odsonięcia korzenia (DrA)- kolor różowy, 1,93 mm/rok średnie (DrA) na szlaku turystycznym- linia przerywana

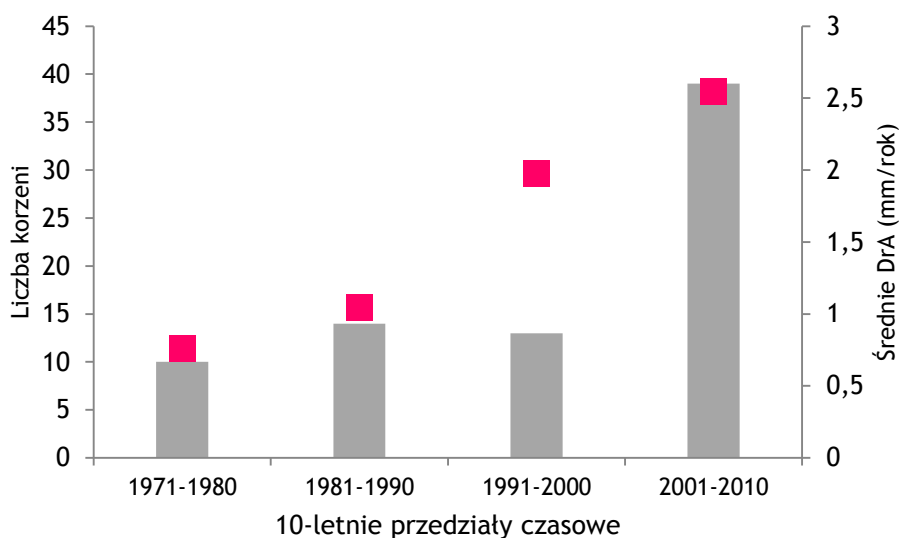
Tab. 11. Średnie tempo denudacji antropogenicznej (DrA) uzyskane w poszczególnych latach na podstawie analizy dendrogeomorfologicznej korzeni odsoniętych sosny zwyczajnej na szlaku turystycznym ze stanowiska Bachotek

ROK	Średnie DrA	Liczba korzeni	Odchylenie standardowe
1971	0,74	1	0,00
1974	0,73	5	0,01
1977	0,79	4	0,08
1986	0,96	4	0,11
1989	0,97	5	0,14
1990	1,17	5	0,28
1992	1,22	2	0,01
1998	1,50	1	0,00
1999	2,57	1	0,00
2000	2,13	9	0,44
2001	2,07	13	0,51
2002	2,04	7	0,23
2003	2,01	3	0,16
2004	2,14	1	0,00
2007	3,21	8	0,36
2008	3,21	3	0,04
2009	3,60	4	0,05
SUMA	1,93	76	0,14

Analizy dendrogeomorfologiczne korzeni w obrębie stanowiska Bachotek wykazały, iż zdecydowana większość odsonięć korzeni charakteryzujących się najwyższymi wartościami tempa denudacji (DrA) została wydatowana w ostatnich 15. latach. Najwyższe średnie tempo

denudacji antropogenicznej wykazano dla roku 2009 i wyniosło ono 3,60 mm/rok (Tab. 11). Kolejnymi latami dla których odnotowano wysokie tempo denudacji na szlaku turystycznym w obrębie stanowiska Bachotek był rok 2007 i 2008. W tych latach średnie tempo denudacji, jakie uzyskano wyniosło 3,21 mm/rok, choć należy wskazać, iż lata te były reprezentowane przez różną liczbę korzeni (Tab. 11). Zaobserwowano również, że tempo denudacji ze szlaku powyżej średniej charakteryzowało korzenie odstonięte po roku 1999 (Ryc. 83). Tym samym rozpoznano, że korzenie odstonięte w ostatnich latach reprezentują najwyższe wartości średniego tempa denudacji na szlaku turystycznym zaszeregowane do klasy VI (Ryc. 83). Do VI klasy tempa denudacji zaszeregowano jedynie korzenie z odstonięciami z okresu od 2007 do 2009 roku.

W celu rozpoznania zmienności czasowej uzyskanych średnich wartości tempa denudacji antropogenicznej wyszczególniono cztery okresy odstonień korzeni na szlaku turystycznym stanowiska Bachotek w ujęciu dziesięcioletnim (Ryc. 84). Przyporządkowane okresy zawierały się w następujących ramach czasowych: 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000 oraz 2001-2010. W układzie dekady najwięcej odstonień zanotowano dla pierwszej dekady XXI wieku, dla której wydatowano 39 korzeni, co łącznie stanowiło 51% analizowanych odstonień korzeni. Średnia wartość tempa denudacji dla tego okresu wyniosła 2,54 mm/rok. Najniższą średnią wartość tempa denudacji odnotowano dla najstarszych odstonień korzeni z lat 70. XX wieku i wynosiła ona 0,75 mm/rok.

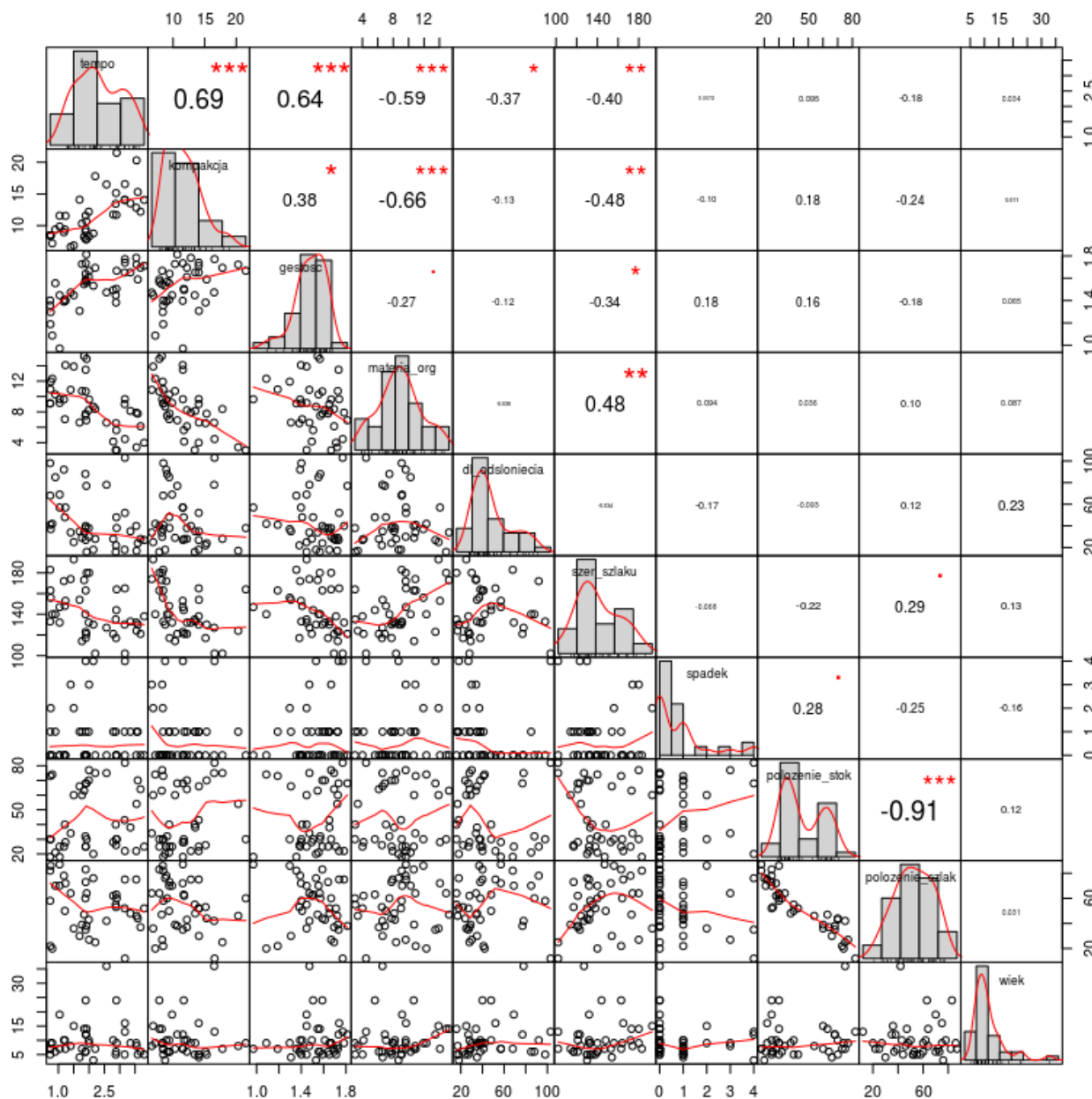


Ryc. 84. Zmienność tempa denudacji antropogenicznej w przedziałach dziesięcioletnich na podstawie odstonień korzeni sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w obrębie stanowiska Bachotek. Liczba korzeni- kolor szary, średnie tempo denudacji (DrA)- kolor różowy

15.3. Uwarunkowania tempa denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym stanowiska Bachotek

W niniejszym podrozdziale zamieszczono wyniki analiz statystycznych, których celem było określenie, czy dana zmienna opisująca, dotycząca właściwości fizycznych pokrywy glebowej ze szlaku, morfologii korzenia oraz morfometrii szlaku turystycznego ma wpływ na uzyskaną wielkość tempa denudacji antropogenicznej na szlaku (Załącznik 5). Powyższe zmienne zostały wybrane na podstawie przeglądu literatury oraz bezpośredniej obserwacji terenowej.

Analizę zależności pomiędzy wybraną zmienną opisującą a tempem denudacji na szlaku (tj. zmienną opisywaną) przeprowadzono z wykorzystaniem prostej regresji liniowej. W pierwszym etapie analizy wykonano testy diagnostyczne służące do weryfikacji poprawności założeń modelu regresji (Ryc. 85).



Ryc. 85. Testy diagnostyczne zmiennych użytych w modelach prostej regresji liniowej badających zależności między uzyskanym tempem denudacji (DrA , zmienna opisywana) a zmiennymi opisującymi, tj. właściwościami fizycznymi gleby na szlaku, morfologią korzenia oraz morfometrią szlaku turystycznego stanowiska Bachotek. Histogramy obrazują rozkład każdej ze zmiennych. Wartości liczbowe w górnej części wykresu prezentują macierz korelacji pomiędzy zmiennymi wraz z podaniem poziomu istotności statystycznej - czerwone gwiazdki (* - $p < 0.05$; ** - $p < 0.01$; *** - $p < 0.001$); dodatkowo rosnąca wielkość czcionki współczynnika korelacji wskazuje na jego rosnącą wartość. Dolne wykresy rozrzutu prezentują zależności pomiędzy zmiennymi w sposób graficzny i mogą być podstawą wnioskowania, czy zależności pomiędzy zmiennymi mają charakter liniowy czy nieliniowy.

Na tym etapie sprawdzono normalność rozkładu każdej ze zmiennych przy użyciu histogramu (Ryc. 85). Dla danych które nie wykazały rozkładu normalnego przeprowadzono transformacje logarytmiczną w celu zniwelowania skośności rozkładu. Dodatkowo, zależności pomiędzy tempem denudacji a wybraną zmienną opisującą rozpoznano przy wykorzystaniu korelacji Pearson'a i Spearman'a. Wszystkie analizy wykonano w środowisku R przy wykorzystaniu pakietów PerformanceAnalytics (Peterson i in. 2015) i corrplot (Wei i in. 2017).

Tab. 12. Porównanie wartości współczynników korelacji Pearson'a i Spearman'a obliczonych pomiędzy tempem denudacji na szlaku (zmienna opisywana) a poszczególną zmienną opisującą wraz z podaniem poziomów istotności statystycznej (p). Kolorem szary zaznaczono zależności istotne statystycznie; gwiazdką oznaczono zmienne opisujące dla których przeprowadzono transformację logarytmiczną.

Czynnik (zmienna opisująca)	Współczynnik korelacji Pearson'a	Poziom istotności statystycznej (p)	Współczynnik korelacji Spearman'a	Poziom istotności statystycznej (p)
stopień kompaktacji *	0,71	p<0,001	0,7	p<0,001
gęstość objętościowa	0,64	p<0,001	0,69	p<0,001
zawartość materii organicznej	-0,59	p<0,001	-0,62	p<0,001
całkowita długość odstąpienia	-0,37	p<0,05	-0,46	p<0,01
szerokość szlaku *	-0,40	p<0,01	-0,43	p<0,01
spadek terenu	0,01	p=0,96	0,04	p=0,8
położenie korzenia względem stoku*	0,12	p=0,45	0,15	p=0,36
położenie korzenia względem szlaku	-0,18	p=0,26	-0,2	p=0,22
wiek korzenia w czasie odstąpienia *	-0,02	p=0,92	-0,03	p=0,86

Prosta regresja liniowa wykazała, iż właściwości fizyczne pokrywy glebowej, takie jak stopień kompaktacji gleby, gęstość objętościowa gleby oraz zawartość materii organicznej posiadają istotny statystycznie wpływ na wielkość uzyskanego tempa denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym (Tab. 12). Wykazano, iż przy wysokim stopniu kompaktacji gleby oraz gęstości objętościowej gleby na szlaku odnotowywano istotne zwiększenie wartości tempa denudacji antropogenicznej na szlaku (Tab. 12). Związek ten został wyrażony współczynnikiem determinacji (r^2), który wyniósł odpowiednio 0,50 (p<0,001) i 0,42 (p<0,001) dla stopnia kompaktacji i gęstości objętościowej gleby na szlaku (Tab. 13). Odwrotną zależność wykazano natomiast dla zawartości materii organicznej, tj. przy wyższej zawartości materii rozpoznano w punkcie poboru korzenia niższe tempo denudacji.

Tab. 13. Parametry modeli prostej regresji liniowej badających zależności pomiędzy tempem denudacji (DrA) na szlaku turystycznym na stanowisku Bachotek (zmienna opisywana) a wybranymi elementami związanymi z właściwościami fizycznymi pokrywy glebowej na szlaku, morfologią korzenia oraz morfometrią szlaku, dla których wykazano zależności istotne statystycznie. Parametry prostego równania regresji: a - współczynnik kierunkowy; b - wyraz wolny; r^2 - współczynnik determinacji

zmienna opisująca	a	b	r^2
stopień zwięzłości gleby na szlaku	2,27	-3,36	0,50
gęstość objętościowa gleby na szlaku	3,27	-2,89	0,42
zawartość materii organicznej gleby na szlaku	-0,18	3,66	0,35
całkowita długość odstonięcia korzenia	-0,01	2,76	0,14
szerokość szlaku	-2,43	14,13	0,16

Poza czynnikami związanymi z właściwościami fizycznymi pokrywy glebowej na szlaku istotną zależność wykazano między tempem denudacji (DrA) a i) całkowitą długością odstonięcia korzenia oraz ii) szerokością szlaku w miejscu poboru korzenia do analiz dendrogeomorfologicznych. W obu przypadkach zależność ta była odwrotnie proporcjonalna.

15.4. Dyskusja wyników dotyczących wielkości i uwarunkowań tempa denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym

Na podstawie obserwacji terenowych rozpoznano powszechność występowania odstonień korzeni na całej długości badanego odcinka szlaku turystycznego w obrębie stanowiska Bachotek umożliwiając gęsty pobór korzeni do badań porównawczych. Tak przyjęte postępowanie badawcze pozwoliło scharakteryzować tempo denudacji antropogenicznej (DrA) w ujęciu przestrzennym, tj. w profilu podłużnym szlaku turystycznego. Jednak należy podkreślić, że rozpoznane wartości tempa denudacji antropogenicznej obliczono punktowo i odnoszą się one do miejsc poboru konkretnej odstoniętej części korzenia. Rozbieżności tempa denudacji antropogenicznej uzyskane pomiędzy sąsiednimi korzeniami rosnącymi wzdłuż szlaku wskazują, iż tempo charakteryzowało się silnym zróżnicowaniem zarówno przestrzennym jak i czasowym.

Znaczące postępy w aplikacji metody określania tempa denudacji antropogenicznej opartej na analizach dendrogeomorfologicznych korzeni są związane z jej wysoką rozdzielczością (Corona i in. 2011, Ballesteros-Cánovas i in. 2013; Stoffel i in. 2013; Zhou i in. 2013; Bodoque i in. 2017). Przeprowadzone badania prezentują pierwsze zastosowanie szczegółowych analiz zmian przyrostowych i anatomicznych korzeni odstoniętych do kalkulacji tempa ubytku materiału ze szlaku turystycznego w obszarze niżowym. Obliczenia tempa denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym ze stanowiska Bachotek zostały poprzedzone dyskusją i wyborem metody odpowiedniej dla lokalnych warunków wzrostu korzeni. Dodatkowo, w porównaniu do wcześniejszych opracowań wykorzystujących metodę, w niniejszej pracy badania oparto na datowaniu korzeni w wysokiej rozdzielczości, uwzględniając zarówno części odstonięte jak zastłonięte korzeni.

Należy nadmienić, iż przyjęta w pracy metoda obliczeniowa tempa denudacji przyjęta za zespołem autorskim C. Corona i in. (2011), biorąca pod uwagę tzw. przesunięcie (ang. *bias*), może budzić pewne wątpliwości metodyczne. Wątpliwości te generuje wartość przyjętego

przesunięcia, tj. głębokość 20 mm, na której zaobserwowano pierwsze sygnały anatomiczne potencjalnego odstąpienia korzeni naturalnie przyrastających w glebie, ale posiadających część odstąpiętą w obrębie szlaku turystycznego. W celu precyzyjnego ustalenia wartości przesunięcia, a tym samym w celu zwiększenia dokładności metody obliczania tempa denudacji antropogenicznej przy użyciu korzeni sosny zwyczajnej w obszarze badań, należałoby przeprowadzić pomiary zmian anatomii drewna komórek drewna wczesnego w korzeniach zasłoniętych w różnych przedziałach głębokości zalegania korzeni (Corona i in. 2011, Rovéra i in. 2013). Dodatkowo należałoby rozpoznać geometrię zmian osi podłużnej korzenia w strefie szlaku turystycznego.

W świetle tak przedstawionych ograniczeń metody, trzeba wskazać, iż uzyskane wartości tempa denudacji winny być interpretowane, jako szacunkowe, a precyzja ich pomiarów wymaga uszczegółowienia w przyszłych pracach badawczych. Uszczegółowienia metody należałoby dokonać w oparciu o badania eksperymentalne, tj. pobór korzeni zasłoniętych ze szlaku, rosnących na różnych głębokościach. Korzenie te winny być poddane takiej samej procedurze pomiarów anatomii drewna, tj. głównie pomiarów wielkości drewna wczesnego, jak korzenie odstąpięte na szlaku.

Błąd pomiarowy uzyskanych wartości tempa denudacji może wynikać również z przeszacowania wysokości ekspozycji korzenia na powierzchni szlaku, która potencjalnie może być powodowana przez wzrost kompaktacji gleby na skutek ciągłego wydeptywania. Z drugiej strony wnikliwe obserwacje terenowe oraz analiza pobranych korzeni w ich osi podłużnej wykazała, iż części odstąpięte korzeni w obrębie szlaków charakteryzuje podniesienie i zmiana pozycji osi korzenia. Ponadto silne modyfikacje w morfologii szlaku powodują wtórną depozycję materiału przemieszczanego na szlaku. Przemieszczanie to odbywa się w sposób nierównomierny, zarówno w profilu podłużnym jak i poprzecznym szlaku, co zostało wykazane na podstawie zmian anatomicznych widocznych w korzeniach wtórnie lub częściowo zasypywanych, a uprzednio odstąpiętych.

Nieścisłości interpretacyjne dotyczące wielkości tempa denudacji antropogenicznej bezpośrednio związane są także z wiekiem odstąpiętych korzeni. Ostatnie wyniki badań dendrogeomorfologicznych wskazują, że wartości tempa denudacji obliczone dla młodych drzew mogą zawiązać regionalne, długoterminowe wskaźniki tempa o 50% (Suceri 2017). Jednak wyniki te nie wykluczają użycia dendrogeomorfologii w kalkulacji tempa ubytku materiału, a jedynie sugerują, że należy starannie wybrać drzewa z najstarszą skalą, aby jak najlepiej przedstawić w ujęciu długoterminowym charakter procesów erozyjno-denudacyjnych. Na badany stanowisku Bachotek pobrano próby korzeni z możliwie najstarszym zapisem klimatycznym i środowiskowym, w związku z tym odzwierciedlono względnie najdłuższy okres oddziaływania denudacji antropogenicznej (DrA) na szlaku turystycznym.

Wskaźniki tempa denudacji antropogenicznej uzyskane przy użyciu korzeni odstąpiętych zostały wykorzystane do ilościowego określenia degradacji danej powierzchni w wielu miejscach na świecie. Zdając sobie sprawę z nieścisłości metodycznych, uzyskane wartości średniego tempa denudacji na szlaku na stanowisku Bachotek porównano z wcześniejszymi studiami dendrogeomorfologicznymi przeprowadzonymi w obrębie szlaków turystycznych wybranych pasm górskich ze świata. W tym względzie wykorzystano wyniki pomiarów tempa denudacji na szlakach z Gór Kastylijskich (Bodoque i in. 2005; Rubiales i in. 2008), masywu Babiej Góry (Buchwał 2010), włoskiej części Alp (Pelfini, Santilli 2006), Gór Białych (Krusic 1990), chińskich Gór Qilian (Zhou i in. 2013) i Pirenejów (Bodoque i in. 2017) (Tab. 14).

Tab. 14. Porównanie wyników dotyczących wielkości tempa ubytku materiału z powierzchni szlaku turystycznego uzyskanych przy użyciu analiz dendrochronologicznych odstępów korzeni dla wybranych obszarów badawczych świata z wynikami uzyskanymi w pracy

Obszar	Autor	Wielkość tempa denudacji	Jednostka	Gatunek drzewa
Hiszpania, Guadarrama Mountains	Bodoque i in. 2005, Rubiales i in. 2008	1,6-2,6 1,1-1,8	mm.yr-1	<i>Pinus sylvestris</i> L., <i>Quercus ilex</i>
Polska, masyw Babiej Góry	Buchwał 2010	3,6 (1,9-6,0)	mm.yr-1	<i>Picea abies</i>
Włochy, Alpy, Valtellina	Pelifini, Santilli 2006	2,7-3,7	mm.yr-1	<i>Pinus montana</i> <i>Pinus cembra</i>
Stany Zjednoczone, Góry Białe, New Hampshire	Krusic 1990	0,66-0,75	cm.yr-1	
Chiny, Góry Qilian	Zhou i in. 2013	5,3 (3,3-13,5)	mm.yr-1	<i>Picea wilsonii</i>
Hiszpania, Ordesa and Monte Perdido	Bodoque i in. 2017	3,1 (1,5) 8,9 (4,3)	mm.yr-1	<i>Pinus uncinata</i> <i>Fagus sylvatica</i>
Polska, Pojezierze Brodnickie	Matulewski	1,93 (0,71-3,80)	mm.yr-1	<i>Pinus sylvestris</i>

Uzyskane w wybranych obszarach świata wartości tempa denudacji (DrA) (Tab. 14) są zdecydowanie wyższe, niż te wyliczone dla stanowiska Bachotek. Różnice mogą wynikać z metody, jaką wykorzystano przy obliczeniach tempa denudacji antropogenicznej, jak również z charakteru rzeźby terenu, w tym stopnia nachylenia terenu i odporności podłoża poszczególnych szlaków turystycznych. Stosunkowo wysokie tempo denudacji ze szlaku w obszarach górskich może wynikać z przyspieszonego spływu wody po powierzchni szlaku charakteryzującego się większym spadkiem. Sptukiwanie doprowadza do powstania licznych rozcięć erozyjnych w obrębie szlaku pozbawionego pokrywy roślinnej. Ponadto rozpoznane różnice mogą być efektem odmiennego obciążenia ruchem turystycznym analizowanych obszarów (tereny górskie a pojezierze).

Dotychczas na obszarze pojezierzy nie przeprowadzono analiz dendrogeomorfologicznych, celem określenia tempa denudacji na szlakach turystycznych. Niniejsze opracowanie jest, więc pierwszym studium dotyczącym zastosowania tej metody na nizinnych szlakach turystycznych Europy, a jego wyniki nie mogą być porównane z innym obszarem niżowym.

Uzyskane dane odnośnie tempa denudacji antropogenicznej na stanowisku Bachotek wskazują na stosunkowo powolny przebieg procesów usuwania materiału z powierzchni szlaku. Widoczne jest to również w morfologii badanego szlaku, w obrębie którego, nie zaobserwowano głębokich rozcięć erozyjnych czy zniszczeń wynikających z intensywnych przekształceń rzeźby szlaku. Niewielkie wartości nachylenia szlaku również nie predysponują go do intensywnych przekształceń rzeźby. Tę zależność potwierdza dominacja powolnych odstępów korzeni, tzw. odstępów denudacyjnych (64%), wykazanych w obrębie stanowiska Bachotek.

W obrębie badanego odcinka szlaku zaobserwowano dość równomierny rozkład klas tempa denudacji, który może być wynikiem niewielkiego nachylenia terenu oraz podobnymi warunkami glebowymi na całej długości analizowanego szlaku (Ryc. 80). Jedyne zróżnicowanie w rozkładzie klas tempa denudacji jest widoczne w jego górnym odcinku, gdzie znajdują się najmłodsze korzenie, charakteryzujące się najwyższą klasą tempa denudacji (DrA). W pracy wykazano zależność, iż najmłodsze odstępnięcia reprezentują najwyższe wartości średniego tempa denudacji na szlaku turystycznym (Ryc. 83). Początek XXI wieku charakteryzował się zatem

zintensyfikowanym oddziaływaniem ruchu turystycznego na szlak turystyczny w obrębie stanowiska Bachotek.

W literaturze przedmiotu rozpoznano, że korzenie drzew, które zostały odstonięte w wyniku działania procesów niszczących, zdecydowanie zwalniają prędkość spływającej wody i jednocześnie zatrzymują spłukiwany materiał (Łajczak, 1994, 1996; Wałdykowski, 2006a, b). Jednak charakter tych procesów zależy od położenia korzeni względem szlaku, spadku terenu czy właściwości fizycznych gleby (Tomczyk 2010). Właściwości fizyczne gleb ulegają pogorszeniu pod wpływem użytkowania turystycznego, tj. rozjeżdżania, obozowania czy deptania. Gleby na szlaku turystycznym są szczególnie wrażliwe na te rodzaje użytkowania w okresie wczesnowiosennym. W tym czasie ma miejsce silne rozpulchnianie w wyniku działalności zamrozu oraz szybkie obsychanie zwiertzeliny gliniasto-ilastej w ciągu doby (Prędko 2002). Liczne badania wskazują na wzrost zwięzłości i gęstości objętościowej gleby oraz zmniejszenie porowatości w stosunku do gleb niezaburzonych wpływem mechanicznego nacisku na podłoże (Róg i in., 1980; Maciaszek, Zwydak 1992a, b; Prędko 2000, 2002; Kopeć, Głęb 2002; Dusza 2006; Tomczyk 2011). Usunięcie organicznych poziomów nadkładowych i kompaktacja gleb obniża ich zdolności retencyjne. W przypadku nachylonego szlaku woda, która nie może wsiąknąć w podłoże, odpływa zgodnie z jego spadkiem powodując erozję. Natomiast na terenach płaskich tworzą się miejsca podmokłe (Maciaszek, Zwydak, 1992a; Hammitt i Cole 1998).

Dotychczasowe badania dendrogeomorfologiczne wykazały, że wpływ na tempo ubytku materiału miały wysokość zawieszenia korzenia nad bieżącą powierzchnią gruntu (Šilhán 2016), spadek terenu (Corona i in. 2011) oraz wiek odstonięcia korzenia (Bodoque i in. 2011). W obrębie badanego szlaku wpływ właściwości fizycznych charakteryzujących przypowierzchniową warstwę gleby na wielkość tempa denudacji jest najbardziej spodziewany. Przeprowadzone w pracy analizy wykazały istotną statystycznie zależność pomiędzy tempem ubytku materiału ze szlaku a zmiennymi charakteryzującymi pokrywę glebową w obrębie szlaku turystycznego, w tym szczególnie stopnia kompaktacji gleby, gęstości objętościowej gleby oraz zawartości materii organicznej.

Na badanym szlaku wzmożone wydeptywanie i ubijanie powierzchni szlaku w wyniku postępującej turystyki pieszej i rowerowej spowodował wzrost gęstości objętościowej gleby. Zagęszczenie gleby wpłynęło na zwiększenie jej zwięzłości, a tym samym na wzrost oporów mechanicznych stawianych przez glebę rozwijającym się częściom podziemnym korzeni sosny zwyczajnej. Wpływ ten był tym silniejszy, im niższa była wilgotność pokrywy glebowej. Wzrost stopnia kompaktacji oraz gęstości objętościowej gleby pozytywnie wpłynęła na wzrost wartości tempa denudacji antropogenicznej obliczonym na podstawie odstonień korzeni na szlaku turystycznym o stosunkowo niewielkich różnicach wysokości. Mimo, że w literaturze geomorfologicznej rozpoznano prawidłowość, iż wraz ze spadkiem zwięzłości gleby rośnie spłukiwanie oraz spływ powierzchniowy (Majewski 2014), to niniejsze badania mogą wskazywać na dominującą rolę ruchu turystycznego w tym wydeptywania, powodującego przyspieszenie wynoszenia materiału z powierzchni szlaku.

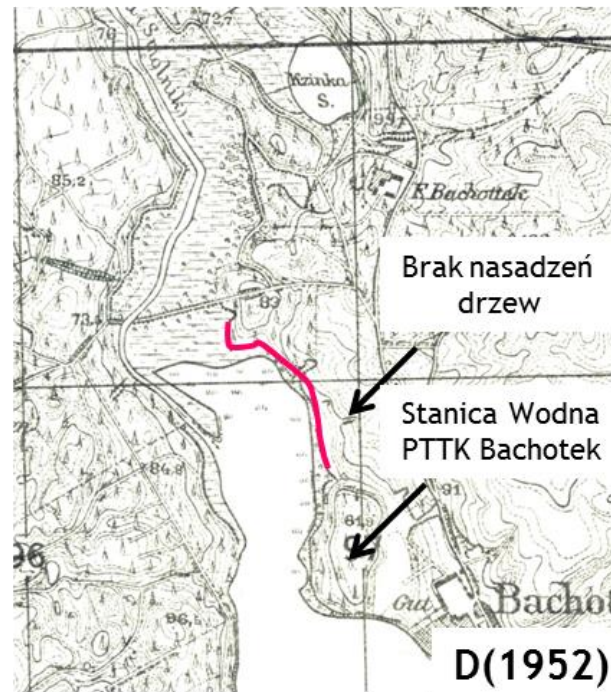
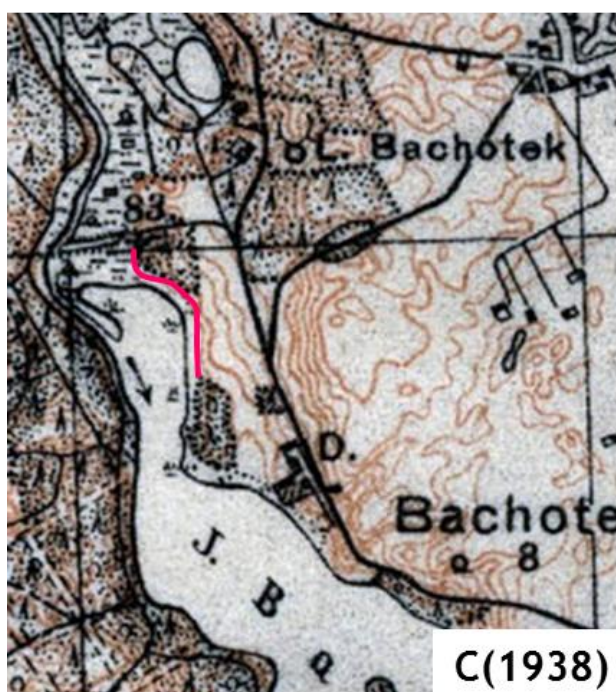
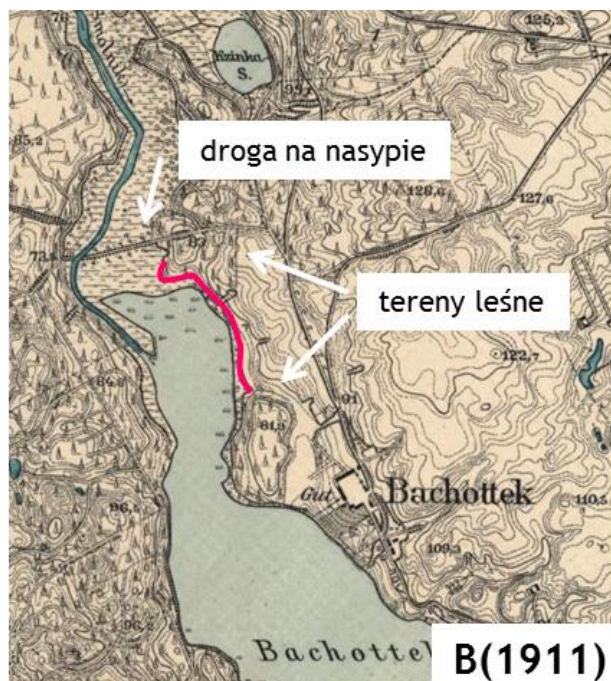
Ponadto wykazano, że przy wzroście zawartości materii organicznej gleby na szlaku turystycznym, rozpoznano niższe tempo denudacji antropogenicznej (DrA). Zauważono również, że przy wzroście szerokości szlaku oraz długości części odstoniętej korzenia malała wielkość tempa denudacji w jego obrębie. Badania nie wykazały związku pomiędzy spadkiem terenu w miejscu poboru korzenia a wartością tempa denudacji antropogenicznej (DrA), co może być wynikiem stosunkowo niewielkich różnic wysokościowych w obrębie badanego szlaku turystycznego. (Ryc. 85).

16. Etapy oddziaływania denudacji antropogenicznej na korzenie i pnie drzew sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w obrębie szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek

Zastosowanie metody dendrochronologicznej przy wykorzystaniu odstąpień korzeni sosny zwyczajnej na nizinym szlaku turystycznym na Pojezierzu Brodnickim pozwoliło na prześledzenie etapów oddziaływania denudacji antropogenicznej na rzeźbę krawędziowej części rynny subglacjalnej jeziora Bachotek. Uzyskana sekwencja przyrostowa i zapis zmian anatomicznych w odstąpionych korzeniach stanowi obraz rozwoju procesów erozyjno-denudacyjnych na szlaku turystycznym w ujęciu czasowo-przestrzennym.

Badany szlak turystyczny stanowił doskonałe miejsce do przeprowadzenia analiz dendrochronologicznych, z uwagi na fakt, że dotychczas nie podlegał żadnym pracom gospodarki leśnej i jako jeden z niewielu na Pojezierzu Brodnickim był w użytkowaniu jedynie dla ruchu pieszego i rowerowego. W wyniku oddziaływania turystyki w nawierzchni szlaku turystycznego rozpoznano liczne odstąpione korzenie sosny zwyczajnej (Ryc. 16), które stanowiły bardzo dobry materiał do datowań dendrochronologicznych.

Badany odcinek żółtego pieszego szlaku turystycznego został oficjalnie wyznaczony w 1977 roku przez Oddział Miejski PTTK w Toruniu. Od 1932 roku ośrodek ten był jednym z sześciu znakujących szlaki w Polsce. Pod jego opieką znajdowały się szlaki piesze Pojezierza Brodnickiego (Miłoszewski 2011). Niestety nie znamy dokładnego ich przebiegu w momencie wyznakowania, tj. na początku XX wieku. Informacje na prawdopodobne istnienie analizowanego szlaku, jako drogi leśno-polnej w tym czasie, odnajdujemy w publikacji M. Orłowicza (1924), gdzie przebieg szlaku widoczny jest na Rycinie 86C. W opracowaniu tego autora znajdujemy wycieczki ze stacji kolejowej Tama Brodzka, wzdłuż wschodniego brzegu jeziora Bachotek do miejscowości Zbiczo, co częściowo pokrywa się ze współczesnym przebiegiem szlaku. Ponadto M. Orłowicz (1924) wskazał, że w znacznej części wschodnia część jeziora Bachotek w tamtym czasie była niezalesiona, co również potwierdzają materiały kartograficzne z okresy międzywojennego. Lasy ówczesne występowały jedynie płatowo na krawędzi rynny jeziora Bachotek (Ryc. 86C).



Ryc. 86. Stanowisko Bachotek na archiwalnych mapach topograficznych z roku 1893(A), 1911(B), 1938(C) oraz 1952(D). Źródło danych kartograficznych: niemieckie mapy topograficzne Messtischblätter w skali 1:25 000 (2682 Pokrzydowo z 1911 roku), Wojskowy Instytut Geograficzny w skali 1:25 000 (P35-S29-G Brodnica z 1938 roku), Army Map Service w skali 1:25 000 (AMS_M851 Pokrzydowo 2682 z 1953 roku), Karte des Deutschen Reiches w skali 1:100 000 (197 Kauernik/Kurzętnik z 1893 roku). Badany odcinek szlaku turystycznego- linia różowa

Mapa z roku 1893 wskazuje występowanie obszarów leśnych jedynie w północnej części badanego szlaku turystycznego (Ryc. 86A). Dopiero na mapie z 1911 roku widoczne jest zwiększenie zalesienia w południowej części obszaru, na tzw. półwyspie, gdzie obecnie znajduje się Stacja Wodna PTTK Bachotek. Środkowy odcinek obejmujący znaczącą część zbocza rynny jeziora Bachotek był wówczas pozbawiony nasadzeń drzew (Ryc. 86B). Badania

dendrochronologiczne potwierdzają, że najstarsze okazy sosny zwyczajnej rosnące w sąsiedztwie szlaku turystycznego rozpoznano w północnej części obszaru badań (wiek najstarszej próbki wydatowano na rok 1942). Przeciętny wiek drzew w obrębie szlaku wyniósł 65 lat i sięgał roku 1950. Zapis kartograficzny i kronikarski dowodzi, że nasadzenia drzew sosny w północno-wschodniej części szlaku nastąpiły dopiero na przełomie lat 40. i 50. XX wieku. Opracowanie kartograficzne z 1952 roku po raz pierwszy wskazuje drogę wzdłuż krawędziowej części zbocza jeziora Bachotek, która odnosiłaby się do ewentualnego przebiegu badanego szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek.

Archiwalne materiały dokumentacyjne w postaci map topograficznych sugerują, że niewysoki wał w postaci grobli na rozlewiskach Skarlanki w północnej części jeziora Bachotek został utworzony w czasie między 1893 a 1911 rokiem (Ryc. 86A i Ryc. 86B). Współcześnie stanowi on ważny łącznik pomiędzy trasami z Brodnicy i Zbiczna w kierunku jeziora Bachotek i Pokrzydowa. Trasa na grobli w połączeniu z badanym odcinkiem szlaku turystycznego stanowi ważny zwornik ruchu turystycznego w północnej części jeziora Bachotek. Oprócz pełnienia funkcji łączącej obie trasy, miejsce to spełnia rolę krajoznawczą - malowniczej trasy spacerowej wzdłuż rozlewisk Skarlanki do mostu Jadwigi, miejsca pamięci z czasów II wojny światowej oraz rezerwatu Bachotek.

W świetle analizy materiałów archiwalnych uznać można, że początek zorganizowanego ruchu turystycznego nad jeziorem Bachotek nastąpił w latach 50. XX wieku, kiedy to oficjalnie została założona Stanica Wodna PTTK Bachotek. Miało to miejsce w roku 1952. Stanica zlokalizowana jest w północno-wschodniej części jeziora Bachotek. Od tego czasu notowano rozwój funkcji rekreacyjno-wypoczynkowych w tej części Pojezierza Brodnickiego. W początkach rozwoju turystyki był to ośrodek niewielki, tj. z kubaturą do 50 osób. Jednak szybki przyrost liczby miejsc turystycznych nad jeziorem Bachotek zaobserwowano już od początku lat 60. XX wieku. W 1962 roku powstał sąsiedni ośrodek zakładowy PGR, a w 1966 roku ośrodek Polmo. W tym czasie obciążenie badanych ośrodków wypoczynkowych nad jeziorem Bachotek wyniosło od 31 os/ha (PGR) do 109 os/ha (PTTK) (Dysarz 1980). Kulminacja ruchu turystycznego nastąpiła w latach 70. XX wieku (Zielski 1978). Jednocześnie był to okres, kiedy zanotowano pierwsze odstonięcia korzeni sosny zwyczajnej udokumentowanych analizami dendrochronologicznymi w niniejszej pracy. Na analizowanym szlaku prowadzącym z Brodnicy i Zbiczna do Stancji Wodnej PTTK Bachotek nie zanotowano odstonień młodszych niż 1971 rok. Materiał dendrochronologiczny nie ujawnił wpływu ruchu turystycznego w dłuższej niż 45 lat skali czasowej. Starszych odstonień korzeni sosny nie udokumentowano, bowiem wśród pobranych ze stanowiska Bachotek korzeni. Pokazuje to, iż wcześniejsze użytkowanie tego odcinka szlaku turystycznego, tj. w połowie lat 50. XX wieku, najprawdopodobniej nie było intensywne. Ten wczesny etap antropopresji nie pozostawił czytelnych śladów w zapisie przyrostowym korzeni, prawdopodobnie ze względu na niewielką skalę ruchu turystycznego a także potrzeby czasu na degradację powierzchni szlaku turystycznego. Należy wspomnieć także, iż w środkowej części badanego odcinka szlaku drzewa były stosunkowo młode z nierozwiniętym w pełni poziomym systemem korzeniowym. Ich nasadzenie nastąpiło dopiero na przełomie lat 40 i 50. XX wieku, co również mogło wpłynąć na brak zarejestrowanych odstonień korzeni na szlaku.

Analizując zestawienie dat odstonień wszystkich korzeni pobranych ze stanowiska Bachotek, można stwierdzić, że grupują się one w zwarte, dające się jasno zdefiniować horyzonty czasowe. Dodatkowo uzyskane w różnych latach odstonięcia korzeni sosny zwyczajnej na stanowisku Bachotek są rozproszone na całej jego długości. Przyczyny takiego stanu rzeczy, z uwagi na niewielkie obciążenie turystyczne stanowiska Bachotek, można próbować doszukiwać

się w bardziej losowym odstanianiu korzeni na tym szlaku. Taki stan wydają się potwierdzać uzyskane wyniki tempa denudacji antropogenicznej, a dokładniej brak zależności przestrzennych uzyskanych dla średniego tempa denudacji (DrA) na badanym odcinku szlaku.

Przeprowadzone analizy dendrogeomorfologiczne jednoznacznie wskazały na znaczący, bo aż 64% udział powolnych procesów denudacyjnych w modelowaniu szlaku turystycznego. Do grupy procesów denudacyjnych należy w tym względzie zaliczyć przede wszystkim wydeptywanie, będące nieodzownym elementem użytkowania turystycznego szlaków. Zdecydowaną mniejszość stanowiły nagłe odstąpienia korzeni (22%) sosny zwyczajnej w obrębie badanego szlaku. Przyczyny wystąpienia nagłych odstąpienia korzeni należy upatrywać w zwiększonej presji mechanicznej na glebę oraz występującym punktowo większym spadku terenu na szlaku w miejscu poboru korzenia. Ponadto grupa korzeni odstąpienia wykazała ponowne zastąpienie świadczące o zamiennie występujących procesach denudacyjno-erozyjnych i akumulacji w miejscu poboru korzeni. Jednocześnie należy wskazać, że w ujęciu przestrzennym typ odstąpienia korzeni sosny miał charakter rozproszony, tj. bez jednoznacznego wskazania miejsc największej intensyfikacji odstąpienia typu erozyjnego w obrębie badanego szlaku. Tak kształtujący się rozkład typów odstąpienia korzeni na szlaku turystycznym stanowiska Bachotek jednoznacznie skłania do stwierdzenia, iż przekształcenia rzeźby w jego obrębie zachodzą losowo, pod wpływem postępujących powolnych procesów denudacyjnych kształtowanych głównie przez ruch turystyczny.

Dodatkowo, przeprowadzone analizy dendrochronologiczne wykazały, iż korzenie sosny w obrębie szlaku turystycznego były odstaniane w przeciągu ostatnich 40 lat. Najstarsze odstąpienie korzeni miało miejsce w 1971 roku, a najmłodsze w 2009 roku. W przeciągu tego okresu wyraźnie zaznaczają się zarówno lata o wysokiej frekwencji odstąpienia, jak również te, w ciągu których nie zanotowano żadnych ekspozycji korzeni.

Na podstawie zrealizowanych analiz dendrochronologicznych w pracy dokonano próby wydzielenia faz rozwoju turystyki w okolicach jeziora Bachotek. W czasowo-przestrzennym rozkładzie korzeni zaznaczyły się kumulacje odstąpienia korzeni, które były podstawą do wyróżnienia czterech okresów oddziaływania denudacji antropogenicznej na drzewa sosny zwyczajnej na stanowisku Bachotek. Okresy te zawierają się kolejno w następujących ramach czasowych:

- Okres od lat 50. XX wieku do 1985 roku;
- Okres 2: 1986-1998;
- Okres 3: 1999-2009;
- Okres 4: 2010- aktualnie.

Pierwszy okres, tj. od lat 50. XX wieku do 1986 roku, charakteryzował się inicjacją oddziaływania denudacji antropogenicznej na korzenie sosny zwyczajnej i rzeźbę terenu szlaku turystycznego stanowiska Bachotek. W literaturze regionalnej odnotowano, że był to okres szybkiego przyrostu liczby miejsc noclegowych i pierwszych zorganizowanych wyjazdów zakładowych organizowanych w tym obszarze. W pierwszym okresie oddziaływania denudacji antropogenicznej na stanowisku Bachotek najstarsze odstąpienia korzenia sosny zwyczajnej zarejestrowano w roku 1971. Jednocześnie, w świetle badań archiwalnych, był to okres funkcjonowania pierwszych znakowanych tras turystycznych na obszarze Pojezierza Brodnickiego. W latach 1976-1978 w wyniku prac toruńskiego oddziału PTTK oficjalnie oznakowano wcześniej istniejące trasy turystyczne, jak i wyznaczono nowe szlaki m.in. wzdłuż wschodniego brzegu jeziora Bachotek. W latach 70. XX wieku odnotowano trzy daty odstąpienia korzeni (1971, 1974, 1977). Najwięcej odstąpienia korzeni rozpoznano dla 1974 i 1977 roku (po pięć odstąpienia korzeni).

Jeden z historycznych zapisów wskazuje (Dysarz 1993), że po ciepłym i bezopadowym kwietniu w 1974 roku, kiedy to zauważono wzmożony ruch turystycznym w kolejnym miesiącu, w okresie od 5. do 7. maja nastąpił długotrwały ulewny deszcz, który zaznaczył się wyraźnym przekształceniem i utworzeniem form erozyjnych (Dysarz 1993). Nie wykluczono zatem, że odstonięcia korzeni wydatowane dla roku 1974, związane były wyłącznie z czynnikiem naturalnym tj. bez ingerencji człowieka. Wzmożone wydeptywanie w tym okresie mogło dodatkowo intensyfikować procesy erozyjno- denudacyjne na szlaku turystycznym. Potwierdzeniem tego są również przeprowadzone w latach 1974-1977 obserwacje przez R. Dysarza (1993), który zauważył wzrost powierzchni zniszczeń w tym rozwój liniowych form wydeptywania, wzrost zwięzłości gleby oraz przekształcenia roślinności na terenie Stacji Wodnej PTTK Bachotek w wyniku użytkowania turystycznego. Jak podaje wspomniany autor w latach 1974-1977 odnotowano wzrost ruchu turystycznego w związku z małą ilością opadów i wysokimi letnimi temperaturami powietrza. Ponadto w świetle badań dendrochronologicznych wykazano, iż w badanym okresie korzenie były odstaniane jedynie w wyniku powolnych procesów denudacyjnych bądź w wyniku wzrostu wtórnego. Nie zanotowano w tym okresie nagłych odstonień korzeni sosny zwyczajnej na stanowisku Bachotek.

Ogólna liczba odstonień korzeni, jaką odnotowano dla tego okresu stanowi 16% całkowitej liczby odstonień korzeni wydatowanych na analizowanym szlaku turystycznym. Niewielka liczba odstonień korzeni w tym okresie nie świadczy o małej presji turystycznej, lecz wskazuje na potencjalną inicjację oddziaływania procesów erozyjno-denudacyjnych na szlaku w wyniku postępującego ruchu turystycznego. Ponadto należy wskazać, iż w latach 70. XX wieku średni wiek drzew ze szlaku turystycznego wyniósł jedynie ± 23 lata, a poziomy system korzeniowy sosen nie był w pełni rozwinięty, a tym samym nisko podatny na odstanianie

Z pierwszym etapem czytelnego oddziaływania ruchu turystycznego na sosnę zwyczajną związane są pierwsze zmiany przyrostowe zaobserwowane w pniach drzewach poddanych presji turystycznej. Analizując średni wzorzec przyrostowy pni drzew rosnących wzdłuż szlaku turystycznego w porównaniu ze stanowiskiem referencyjnym (tj. niepoddanym presji), rozpoznano dużą dynamikę cech dymensyjnych przyrostów sosny zwyczajnej, a więc dużą wrażliwość na zmiany warunków środowiskowych. Od końca lat 70. XX wieku na analizowanym szlaku zaznaczyło się nagłe stłumienie szerokości przyrostów rocznych sosny zwyczajnej, którego kontinuum widoczne jest do lat współczesnych. Lata 70. XX wieku to gwałtowny rozwój funkcji turystycznych nad jeziorem Bachotek. Z badań nad relacjami klimat-wzrost wynika, że szerokość słoju przyrostów rocznych drewna sosny jest najbardziej zależny od opadów w czerwcu i lipcu oraz temperatury maksymalnej lipca. Miesiące te pokrywają się z letnim okresem, w którym ruch turystyczny i wypoczynkowy jest najbardziej nasilony. Potencjalnie szczególnie niedobory wody występują w miejscach wydeptywanych na szlaku, powstających na skutek mechanicznego niszczenia roślinności, ubijania gleby oraz jej zubożenia w substancje organiczne w wyniku nasilonego ruchu turystycznego. Potwierdzeniem tych zależności jest opracowanie A. Zielskiego i in. (1998), którzy rozpoznali również w latach 70. XX wieku głęboką depresję przyrostu rocznego sosny zwyczajnej z obszaru eksploatacji turystycznej nad jeziorem Wielkie Partęczyny, odległym około 20 km od stanowiska Bachotek. Jak wskazuje A. Zielski i in. (1998) drzewa rosnące w bliskim otoczeniu ośrodka rekreacyjnego charakteryzowały się obniżoną szerokością pierścieni rocznych i wyższą wrażliwością na zmiany warunków wodnych w okresie letnim.

Po roku 1977 przez dziewięć lat zapis dendrogeomorfologiczny wskazuje na zupełny brak ekspozycji korzeni. Sytuację tę możemy interpretować, jako zmniejszenie intensywności oddziaływania ruchu turystycznego na rzeźbę szlaku na stanowisku Bachotek. Dopiero od 1986 roku na szlaku turystycznym zaznacza się kolejny okres intensyfikacji oddziaływania ruchu

turystycznego na rzeźbę terenu szlaku, który wyraża się podobną ilością odstąpień korzeni w stosunku do okresu poprzedniego. Odstąpienia korzeni zanotowano w latach 1986-1992. Łącznie we wspomnianym okresie zanotowano 18% ogólnej liczby odstąpień korzeni sosny zwyczajnej pobranych ze szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek. Z drugiej strony okres 1986-1998, można określić mianem pierwszego etapu oddziaływania „turystyki masowej”. Lata 80. i 90. XX wieku to rozwój funkcji turystycznych na Pojezierzu Brodnickim i okres wzmożonego ruchu wypoczynkowego: wczasów zakładowych, biwaków czy kolonii młodzieżowych w ośrodkach nad jeziorami na Pojezierzu Brodnickim (Dysarz 1990; Zielski i in. 1998). Jednocześnie należy podkreślić, że w okresie 1989-1991 odnotowano po raz pierwszy znaczną liczbę uszkodzeń mechanicznych korzeni na stanowisku Bachotek, których genezę dostrzeżono w ciągłym deptaniu odłanianych lub już odstąpionych korzeni.

Trzeci okres oddziaływania denudacji antropogenicznej na drzewa sosny zwyczajnej na stanowisku Bachotek trwający od 1998 do 2009 roku zaznaczył się zintensyfikowanym wpływem ruchu turystycznego na rzeźbę i udokumentowany został zwielokrotnioną liczbą odstąpień korzeni na szlaku w stosunku do poprzednich okresów. Największą kumulację odstąpień korzeni sosny rozpoznano właśnie w trzecim okresie, tj. w pierwszych latach XXI wieku. W 2001 roku zanotowano maksymalną liczbę odstąpień korzeni dla wszystkich okresów, tj. 66% (15 korzeni). Równie silnie zaznaczył się rok 2007 (11 odstąpień) oraz rok 2000 (9 odstąpień). Ponadto wyłącznie dla okresu 2002-2004 zanotowano największą liczbę uszkodzeń mechanicznych, tj. 24% wszystkich rozpoznanych blizn. Dodatkowo z przeprowadzonej analizy dendrogeomorfologicznej korzeni wynika, iż największe tempo przekształceń rzeźby na szlaku miało miejsce w roku 2009 i wyniosło 3,60 mm/rok (Ryc. 83). Kolejnymi latami dużej intensywności procesów na szlaku turystycznym stanowiska Bachotek były również lata: 2007 i 2008. Średnie tempo denudacji, jakie uzyskano w tych latach wyniosło 3,22 mm/rok.

Lata 90. XX wieku i początek XXI wieku to kolejna faza wzrostu ruchu turystycznego na Pojezierzu Brodnickim będąca efektem transformacji ustrojowej. W tym czasie odnotowano dalszy rozwój turystyki wypoczynkowej w tym obszarze (PTTK Brodnica), głównie turystyki biwakowej, rajdowej i wędrowniej, które spowodowały znaczne obciążenie badanego odcinka szlaku. Na Pojezierzu Brodnickim postępował rozwój funkcji rekreacyjnych i sportowych, związany w funkcjonowaniem ośrodków wypoczynkowych oraz turystyki kajakowej i wodnej w okolicach jeziora Bachotek.

Czwarty okres oddziaływania denudacji antropogenicznej na drzewa sosny zwyczajnej na stanowisku Bachotek zaznaczający się od roku 2009 i trwający do dziś, to czas, w którym nie zanotowano nowych odstąpień korzeni. W tym okresie widoczny jest stopniowy wzrost obciążenia analizowanego szlaku, co potwierdza przeprowadzony monitoring ruchu turystycznego w okresie 2014-2016. Dowodem na ciągłe działanie presji turystycznej na szlaku turystycznym w obrębie stanowiska Bachotek są liczne wystąpienia uszkodzeń mechanicznych, tj. blizn i traumatycznych kanałów żywicznych. W czwartym okresie wykazano, bowiem 33% wszystkich rozpoznanych uszkodzeń mechanicznych w korzeniach odstąpionych sosny zwyczajnej na analizowanym szlaku.

Pierwsze dwa etapy oddziaływania denudacji antropogenicznej na drzewa sosny zwyczajnej wykazane dla stanowiska Bachotek w dużej mierze przyczyniły się do zainicjowania i poszerzenia strefy oddziaływania turystyki na środowisko geograficzne obszaru badań. Szybkiemu zniszczeniu uległa naturalna nawierzchnia szlaku i terenów sąsiadujących ze szlakiem. Tak zapoczątkowany etap transformacji pokrywy glebowej na szlaku turystycznym zapisał się w korzeniach sosny zwyczajnej, których odłanianie było spowodowane mechanicznym oddziaływaniem ruchu turystycznego od lat 70. XX wieku. Pierwsze zapisy

dotyczące zniszczeń na szlakach oraz problemów, jakie generuje wydeptywanie i ubijanie powierzchni gleby na obszarach eksploatowanych turystycznie na Pojezierzu Brodnickim, również w kontekście przekształceń rzeźby, odnajdujemy w publikacjach z tego okresu (Zielski 1978). W świetle analiz dendrochronologicznych, można stwierdzić, iż na przestrzeni ostatnich pięciu dekad użytkowanie szlaku na stanowisku Bachotek zdecydowanie wzrosło. Dodatkowo, pierwszą dekadę XXI wieku charakteryzuje największa liczbą odstonień i uszkodzeń mechanicznych korzeni sosny, co może wskazywać na potencjalnie największy udział turystyki w przekształcaniu rzeźby szlaku stanowiska Bachotek na przestrzeni ostatniego półwiecza.

W celu interpretacji uzyskanych prawidłowości dotyczących oddziaływania ruchu turystycznego na korzenie sosny zwyczajnej odwołuje się do dwóch przyczyn. Pierwsza z nich wskazuje, że okres pierwszej dekady XXI wieku to wzrost intensyfikacji presji turystycznej na badanym szlaku turystycznym. Wiąże się to z nasileniem wydeptywania powierzchni szlaku, co w konsekwencji przyczyniło się do wzrostu tempa denudacji antropogenicznej odnotowanym na stanowisku Bachotek. Przeprowadzone w ramach niniejszej pracy precyzyjne pomiary natężenia ruchu turystycznego w okres 2014-2016 potwierdzają rosnący trend ruchu turystycznego na stanowisku Bachotek. Jednak brak danych ilościowych na temat obciążenia szlaku dla dłuższego okresu czasu, w tym dla okresu 1971-2015, utrudnia analizę porównawczą i interpretację uzyskanych wyników w szerszej skali czasowej.

Druga przyczyna postrzega problem wpływu denudacji antropogenicznej w kontekście średniego wieku drzewostanu sosny z obszaru badań. W pracy wykazano, że pierwsza dekada XXI wieku to okres kulminacyjny oddziaływania ruchu turystycznego, zapoczątkowanego w latach 70. XX wieku. Od tego czasu przez ponad 30 lat pokrywa glebowa oraz korzenie drzew były poddawane stopniowej presji mechanicznej, czego efektem jest zróżnicowany wiek odstonień korzeni i uszkodzeń mechanicznych uzyskanych w pracy. Z upływem czasu w obrębie szlaku turystycznego zaznaczyły się co raz bardziej widoczne zmiany komponentów środowiska geograficznego, szczególnie te dotyczące zmian w przypowierzchniowej warstwie gleby oraz kondycji i zdrowotności drzew. Należy wskazać, iż dopiero na początku XXI wieku większość nasadzonych sztucznie w latach 40. i 50. XX wieku sosen w obszarze badań osiąga średni wiek 50 lat, tj. pełną dojrzałość. Przypuszczać należy, że dopiero w tym czasie płytko osadzony system korzeniowy drzew sosny zwyczajnej staje się wyraźnie rozwinięty. E. Melzer (1964) badał systemy korzeniowe drzewostanów sosny w różnym wieku. W 43-letnim stwierdził silnie rozwinięty poziomy system korzeni, głównie między warstwą humusową a mineralną, tj. płytko osadzonych w podłożu. Tym samym potwierdza to fakt, iż większa liczba rozgałęzień korzeni przybyszowych sosny ze szlaku była potencjalnie bardziej podatna na oddziaływanie denudacji antropogenicznej i narażona na ekspozycję na powierzchni szlaku turystycznego na początku pierwszej dekady XXI wieku.

17. Zastosowanie metody dendrogeomorfologicznej w badaniach denudacji antropogenicznej na szlakach turystycznych- wskazówki metodyczne

Za największą zaletę zastosowania metody dendrochronologicznej do badania denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym uznano możliwość prześledzenia jej czasowo-przestrzennej zmienności. W pracy wykazano, iż korzenie sosny zwyczajne poddane szczegółowemu próbkowaniu i badaniu pomostowemu są wysokorozdzielczym źródłem informacji na temat antropogenicznych przekształceń rzeźby na szlaku turystycznym. Należy jednak wskazać, iż w celu aplikacji korzeni sosny zwyczajnej do badań dendrochronologicznych na szlaku, ich pobór powinien odbywać się w profilu podłużnym szlaku. Dodatkowo korzenie winnym być pobrane przy zachowaniu stosunkowo wysokiej replikacji, celem uzyskania wysokiej dokładności pomiaru.

W celu rozpoznania kierunku i etapów oddziaływania denudacji antropogenicznej konieczne jest szczegółowe rozpoznanie anatomii i struktury przyrostowej pierścieni rocznych korzeni na pełnych przekrojach mikroskopowych. Badania makroskopowe, jak i mikroskopowe przeprowadzone jedynie na wybranych fragmentach korzeni poddanych oddziaływaniu procesów erozyjno-denudacyjnych mogą prowadzić do przeszacowania lub niedoszacowania czasu wystąpienia badanych procesów, z uwagi na powszechność nieregularnego wzrostu korzeni.

Brakujące, i wyklinowujące przyrosty roczne występujące powszechnie w korzeniach sosny mogą spowodować istotne błędy pomiarowe. Liczba przyrostów rocznych w przekroju poprzecznym korzenia powinna być analizowana w różnych kierunkach, tj. w kilku promieniach pokrywających swoim zasięgiem cały przekrój poprzeczny analizowanego korzenia, tak, aby ograniczyć możliwości niedoszacowania przyrostów rocznych. Zaleca się, aby w obrębie każdego przekroju poprzecznego korzenia wykonano analizy wykształcenia przyrostów rocznych w od trzech do pięciu i więcej promieniach, w zależności od wielkości przekroju poprzecznego korzenia i jego deformacji. Uwzględnić należy najkrótszy i najdłuższy promień oraz promienie pośrednie. Przeprowadzone badania wykazały, iż nie zawsze najdłuższy promień posiadał pełną sekwencję przyrostową korzenia. W wyborze promieni należy unikać blizn oraz nagromadzeń traumatycznych kanałów żywicznych. Pozwoli to wyznaczyć reprezentatywne krzywe wzrostu, charakteryzujące przekrój poprzeczny większości korzeni. Uzyskane średnie krzywe wzrostu uzyskane z pojedynczego przekroju poprzecznego korzenia należałoby porównać z sąsiednimi przekrojami poprzecznymi, pobranymi z tego samego korzenia oraz krzywą wzrostu z pnia analizowanego drzewa. Jak wykazały badania pomostowe przeprowadzone w ośmiu wybranych do analiz szczegółowych systemach korzeniowych, precyzja wydatowania korzeni wzrastała wraz z ilością przekrojów pobranych do analiz. Celem wskazania odpowiedniej ilości przekrojów koniecznych do precyzyjnego wydatowania korzenia odsoniętego na szlaku zaleca się przeprowadzenie dalszych szczegółowych badań dendrochronologicznych, obejmujących części systemów korzeniowych sosny. Zwiększenie ilości przeanalizowanych przypadków pozwoli w przyszłości na zastosowanie odpowiednich narzędzi statystycznych, które mogłyby wskazać minimalną liczbę przekrojów korzeni, jakie należałoby rekomendować do dalszych prac dendrogeomorfologicznych.

Porównanie sekwencji przyrostowych prób korzenia wzdłuż jego profilu podłużnego, obejmującego strefy zastłonięte i odsonięte pozwoliło na całkowite wyeliminowanie przyrostów, brakujących i wyklinowujących. Analiza sekwencji przyrostów rocznych większej ilości fragmentów korzeni pozwoliła również na konstrukcję chronologii korzeni, rzadko spotykaną w literaturze, oraz możliwość porównania jej dalszym etapie z krzywą wzrostu z pnia oraz chronologią stanowiska.

W pracy wykazano, iż w odstłoniętym pojedynczym korzeniu często jest zapisanych kilka epizodów erozyjno-denudacyjnych. W celu rzeczywistego uchwycenia daty jak i charakteru ekspozycji korzenia, próby z każdego korzenia powinny być pobierane na niewielkiej odległości, zarówno ze strefy odstłoniętej i zastłoniętej korzenia. W pracy wykazano, iż 20% korzeni pobranych metodą seryjnego próbkowania było odstłanianych etapowo, tj. kolejne fragmenty korzenia, poczynając od najbardziej wysuniętego w kierunku środka szlaku turystycznego, miały zapisaną coraz młodszą ekspozycję.

Oprócz zmian anatomicznych świadczących o odstłonięciu, w korzeniach sosny wykazano powszechne występowanie wtórnych zmian anatomicznych i przyrostowych, pojawiających się po okresie ekspozycji korzenia. Zmiany te mają postać nagłych redukcji przyrostów, zwykle połączonych z nagromadzeniami kanałów żywicznych lub blizn i drewna reakcyjnego. Wszystkie te zmiany mogą stanowić pomocniczy wskaźnik w określaniu roku, w którym doszło do nasilenia procesów erozyjno-denudacyjnych na szlaku.

W celu precyzyjnego określenia ekspozycji korzenia i rozpoznania zmian anatomicznych, z całych przekrojów poprzecznych korzeni należy przygotować przeźrocza mikroskopowe. Do identyfikacji odstłonięcia korzeni należy zastosować powszechnie używane w analizach dendrogeomorfologicznych wskaźniki anatomiczne odstłonięcia korzeni drzew iglastych (Gärtner 2007) Przede wszystkim należy dokonać pomiarów średniej wielkości komórek drewna wczesnego, szerokości przyrostów rocznych oraz określenia procentowego udziału drewna późnego. Jedynie przy tak rozpisanej technice pomiarowej możliwe jest precyzyjne wskazanie czasu odstłonięcia korzenia.

W analizie struktury przyrostów rocznych korzeni pojawiają się problemy interpretacyjne związane z występowaniem przyrostów fałszywych i wyklinowujących. Jak wykazały przeprowadzone analizy, do datowania odstłonięć korzeni w rozdzielczości rocznej konieczne jest datowanie pomostowe korzeni z pniem. W pierwszej kolejności zalecane jest wykonanie datowania pomostowego pomiędzy serią szerokości przyrostów radialnych poszczególnych przekrojów poprzecznych korzenia. W następnej kolejności należy porównać serie przyrostowe pomiędzy różnymi częściami korzenia, w tym z przekrojem poprzecznym korzenia położonym najbliżej nasady pnia. W niniejszej pracy wykazano, iż część zastłonięta korzenia położona najbliżej pnia, ale pobrana w odległości powyżej 1 metra od pnia, posiadała najpełniejszą serią przyrostową. W zależności od sytuacji terenowej poboru próbek korzeni należałoby dokonywać zarówno w częściach odstłoniętych korzeni, jak i zastłoniętych. Postępowanie to ma na celu wykrycie wszystkich przyrostów brakujących i wyklinowujących sosny zwyczajnej, co silnie koresponduje z wynikami uzyskanymi dla świerka zwyczajnego (Wrońska-Wałach i in. 2016).

W kwestii określenia tempa denudacji antropogenicznej istotne jest przede wszystkim indywidualne ustalenie położenia korzenia, tj. czy korzeń jest podparty bądź zawieszony nad aktualną pokrywą glebową na szlaku. Istotną kwestią jest również określenie pozycji i stabilności osi korzenia, tj. czy doszło do ewentualnego podniesienia osi korzenia w wyniku ciągłego oddziaływania presji mechanicznej na korzeń. Pomocne w określeniu tempa denudacji antropogenicznej jest również rozpoznanie charakteru odstłonięcia korzenia, w tym szczególnie czy korzenie rosnące blisko powierzchni gleby nie zostały odstłonięte w wyniku wzrostu wtórnego.

18. Podsumowanie

Przeprowadzone kompleksowe badania dendrogeomorfologiczne pozwoliły na rozpoznanie jakościowe, ale przede wszystkim ilościowe, zmian przyrostowych i anatomicznych w korzeniach sosny zwyczajnej poddanych denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym na stanowisku Bachotek. Szczegółowe analizy dendrogeomorfologiczne korzeni pobranych ze szlaku turystycznego pozwoliły na określenie zasięgu czasowego i przestrzennego oddziaływania denudacji antropogenicznej w popularnym turystycznie obszarze Brodnickiego Parku Krajobrazowego.

Monitoring ruchu turystycznego na szlaku turystycznym

Wynikiem pracy jest ciągły monitoring ruchu turystycznego, jakiego dokonano na szlaku turystyczny w okolicy jeziora Bachotek. Tak szczegółowego opracowania dokonano po raz pierwszy dla Pojezierza Brodnickiego. Przeprowadzone badania monitoringowe dały dokładny obraz natężenia ruchu turystycznego w sezonie pomiarowym od 2014 do 2016 roku. Roczne obciążenie badanego szlaku na stanowisku Bachotek wyniosło ponad 7600 osób w 2014 roku, 9200 dla 2015 roku i ponad 10000 osób w roku 2016. Na podstawie analizy porównawczej rejestru danych uzyskanych z monitoringu ruchu turystycznego, wykazano, iż liczba osób odwiedzających szlak na przestrzeni ostatnich trzech lat wrosła o 31% w stosunku do roku 2014. Na tle całego okresu pomiarowego wyraźną dominację wykazano dla natężenia ruchu turystycznego w sierpniu (średnia liczba turystów ok. 3000 osób), a następnie w okresie maj-lipiec.

Analiza dendrochronologiczna pni drzew sosny zwyczajnej

Przeprowadzone analizy dendrochronologiczne pozwoliły na rozpoznanie wpływu czynników klimatycznych na przyrosty roczne sosny zwyczajnej poddanej oraz niepoddanej presji turystycznej na stanowisku Bachotek. Obie chronologie sosny cechowały się zbliżoną odpowiedzią przyrostu rocznego na ekstremalne warunki temperatury powietrza i opady. Wzrost radialny sosny zwyczajnej dla obu stanowisk był ściśle zależny od warunków termicznych końca zimy i wiosny oraz warunków opadowych w lutym. Wykazano, że drzewa poddane presji turystycznej charakteryzowała silniejsza wrażliwość klimatyczna, co ujawniło się zarówno w postaci wyższych współczynników korelacji jak i większej liczbie lat wskaźnikowych dla tego siedliska. Średni przyrost radialny sosen rosnących w bliskim sąsiedztwie szlaku był silnie zależny od maksymalnej temperatury powietrza w lipcu ($r=-0,32$ $p<0,001$) oraz opadów atmosferycznych w czerwcu ($r=0,25$ $p<0,01$) i lipcu ($r=0,25$ $p<0,01$). Uzyskane zależności sugerują, iż sosna poddana presji turystycznej jest potencjalnie bardziej podatna na deficyt wody, który może być powodowany silną kompaktacją gleby na szlaku i w jego otoczeniu. Ujawniono tym samym, iż wpływ na tzw. „wrażliwość klimatyczną” sosny zwyczajnej ma postępująca na badanym szlaku turystycznym denudacja antropogeniczna.

Przedstawione wyniki wskazują również na istnienie wyraźnego związku pomiędzy natężeniem ruchu turystycznego, a kondycją drzew wyrażoną wielkością przyrostów rocznych. Rozpoznano, że intensyfikacja wydeptywania powoduje zmniejszenie przyrostów rocznych drzew rosnących wzdłuż szlaku. Jednoznacznie można stwierdzić, że denudacja antropogeniczna znacząco modyfikuje wzrost sosny zwyczajnej w obrębie szlaku. Ten istotny fakt powinien zostać uwzględniony w przyszłych badaniach dendroekologicznych sosny, ale również pozostałych gatunków drzew poddanych oddziaływaniu turystycznej antropopresji.

Analiza dendrochronologiczna korzeni sosny zwyczajnej Lata odśnieżeń korzeni sosny zwyczajnej

Analizy dendrogeomorfologiczne pozwoliły na uchwycenie przebiegu denudacji antropogenicznej na stanowisku Bachotek w cyklu wieloletnim, tj. na przestrzeni ostatnich 50 lat. W zapisie odśnieżeń korzeni na szlaku, reprezentującym lata 1971-2016, zidentyfikowano 17 horyzontów czasowych interpretowanych, jako okresy intensyfikacji ruchu turystycznego i przekształceń rzeźby analizowanego szlaku. Uzyskane daty odśnieżeń wykazały, iż wśród pobranych próbek korzeni dominują odśnieżenia nie starsze niż 17 lat. Najstarsze odśnieżenie korzeni sosny wydatowano na rok 1971, a najmłodszą datą odśnieżenia, jaką uzyskano był rok 2009.

Charakter i kierunkowość odśnieżeń korzeni sosny zwyczajnej

Wynikiem przeprowadzonych analiz dendrogeomorfologicznych jest rozpoznanie typów procesów odpowiedzialnych za odśnieżenia korzeni sosny zwyczajnej w obrębie szlaku turystycznego. Zdecydowana większość, bo aż 64% pobranych prób była odśniana stopniowo, przy udziale procesów powolnych. W pracy wykazano, iż procesy te pełnią główną rolę w kształtowaniu rzeźby w obrębie badanego szlaku turystycznego. Wystąpienie nagłych procesów erozyjnych potwierdza zapis anatomiczny jedynie 22% analizowanych prób korzeni sosny zwyczajnej. Uzyskane rezultaty pozwalają, zatem wnioskować, iż usuwanie materiału z powierzchni szlaku turystycznego zachodzi stopniowo, na skutek powolnych procesów denudacyjnych, występujących zamiennie z procesami akumulacji materiału w obrębie szlaków, co również zostało udokumentowane w anatomii korzeni pobranych ze szlaku. Uściślając, 13% badanych prób korzeni pobranych ze stanowiska Bachotek wykazało wtórne zasłonięcie. Dodatkowo zapis anatomiczny 14% prób korzeni udokumentował, że korzenie zostały odśnieżone w wyniku wzrostu wtórnego, tj. bez bezpośredniego udziału człowieka.

Szczegółowe badania pomostowe, jakim poddano wybrane części systemów korzeniowych sosny zwyczajnej odśnieżonych w obrębie szlaku, wykazały rozbieżne daty odśnieżenia pojedynczego korzenia w jego profilu podłużnym, tj. w różnej odległości od pnia. Ta niejednorodna reakcja przyrostowa i anatomiczna wykazana dla większości korzeni odśnieżonych w obrębie szlaku, dowodzi etapowemu i różnokierunkowemu wpływowi denudacji antropogenicznej na odśnieżenia korzeni sosny zwyczajnej na stanowisku Bachotek. Wiedza na temat niejednoczesnej reakcji przyrostowej korzenia na działanie wielokierunkowych procesów odśniewających korzeń w jego profilu podłużnym winna być brana pod uwagę w postępowaniu badawczym przyszłych analiz dendrochronologicznych, opierających się na analizie jedynie wybranego fragmentu korzenia.

Uszkodzenia mechaniczne odśnieżonych korzeni sosny zwyczajnej

Na podstawie analiz wieku blizn i traumatycznych kanałów żywicznych w pracy wyznaczono lata dużego stresu mechanicznego oddziałującego na korzenie sosny zwyczajnej w obrębie stanowiska Bachotek. Łącznie rozpoznano 208 blizn i 262 traumatycznych kanałów żywicznych w 88 korzeniach odśnieżonych. Wykazano, iż 42% pobranych korzeni została odśnieżona przy jednoczesnej obecności blizn, co wskazuje na bardzo silny stres mechaniczny, jakim były poddawane korzenie sosny zwyczajnej w obrębie szlaku. Duży udział zranień, a przy tym powszechne wykształcenie zagęszczonych kanałów żywicznych wskazuje na rolę intensywnego wydeptywania i mechanicznej presji ruchu turystycznego na kondycję drzewostanu sosny zwyczajnej porastającego bezpośrednio otoczenie szlaku turystycznego stanowiska Bachotek. Tym samym zaobserwowane zahamowanie przyrostu w pniach drzew rosnących wzdłuż

szlaku turystycznego (PRES), stowarzyszone z licznymi uszkodzeniami mechanicznymi zdiagnozowanymi dla korzeni sosny zwyczajnej na szlaku, stanowi trwałą reakcję przyrostową pni sosny zwyczajnej na postępującą denudację antropogeniczną.

Dodatkowo, zauważono tendencję generowania zwiększonej ilości występowania blizn i traumatycznych kanałów żywicznych w okresach ciepłych z najwyższą średnią temperaturą powietrza, czyli latem, a w szczególności w czerwcu oraz sierpniu. Jest to sezon wzmożonej presji turystycznej, co potwierdzają wyniki przeprowadzonego monitoringu ruchu turystycznego, które wykazały, iż miesiącem największego obciążenia szlaku był sierpień, a następnie okres maj-lipiec. Przyznać należy zatem, iż analizowany szlak został poddany silnej presji mechanicznej w sezonach sprzyjających do uprawiania turystyki pieszej z wysoką temperaturą powietrza i brakiem opadów. Tym samym właśnie w procesie wydeptywania odpowiedzialnego za rozwój denudacji antropogenicznej należy upatrywać dominującą rolę w modyfikowaniu przyrostu radialnego i anatomii drewna korzeni sosny zwyczajnej na szlaku.

Datowanie w wysokiej rozdzielczości zmian przyrostowych w korzeniach sosny zwyczajnej

W aspekcie uszczegółowienia metody dendrogeomorfologicznej analizy odstępień korzeni na szlaku przeprowadzone badania wykazały możliwość niedoszacowania wieku pojedynczego odstępiecia korzeni sosny zwyczajnej sięgającą średnio 20%. Należy szczególnie mocno podkreślić, iż wszystkie analizowane korzenie sosny zwyczajnej odstępięte w obrębie szlaku turystycznego posiadały powszechne wykształcenie przyrostów wyklinowujących (64%) oraz wysoki udział przyrostów brakujących (18%). Wysoka zmienność korelacji datowania pomostowego wybranych części systemu korzeniowego z pniem uzyskana w pracy wynikała z dużej nieregularności wzrostu przyrostów rocznych w poszczególnych przekrojach poprzecznych korzeni pobranych w różnej odległości od pnia. Związane jest to z wysokim zróżnicowaniem intensywności wydeptywania, które wpływał wielokierunkowo i wieloetapowo na wzrost radialny korzeni oraz ich anatomię. W świetle tych wyników w zakresie przyszłych badań odstępień korzeni zaleca się rozbudowanie dotychczasowej metody badań, szczególnie o badanie pomostowe uwzględniające analizę zmian przyrostowych w części odstępiętej, jak i zastępiętej badanego systemu korzeniowego. Istotnym elementem precyzji datowania odstępień korzeni powinno być wykonywanie datowania pomostowego pomiędzy sekwencją krzywych wzrostu różnych części korzenia z krzywą wzrostu z pnia, jak i chronologią stanowiska.

Stwierdzono, że na niedoszacowanie wieku odstępiecia korzeni sosny zwyczajnej w obrębie szlaku ma wpływ typ korzenia, a dokładniej rzędowości korzenia względem pnia drzewa. Przeprowadzone analizy wykazały, że najwyższą zgodność wzorca przyrostowego z pniem oraz pełną serię przyrostową posiadały jedynie odstępięcia korzenia głównego. Z kolei najniższą zgodność przyrostową charakteryzowały odstępięcia zidentyfikowane w odgałęzieniach korzenia głównego, tj. w korzeniach przybyszowych.

Przeprowadzone w wysokiej rozdzielczości datowanie pomostowe przekrojów poprzecznych dwóch „bliźniaczych” korzeni pobranych z tego samego drzewa wykazało duże dysproporcje w liczbie i szerokości przyrostów radialnych w sąsiadujących strefach korzeni, tj. pobranych w tej samej odległości od pnia, ale poddanych pośredniemu (korzeń zastępięty na szlaku) i bezpośredniemu wydeptywaniu (korzeń odstępięty na szlaku). Większe rozbieżności w rozkładzie przyrostów radialnych zidentyfikowano w korzeniu z częścią odstępiętą niż w korzeniu zastępiętym, tj. naturalnie przyrastającym w glebie. Przekroje poprzeczne tych dwóch korzeni pobrane najbliżej pnia wykazały najwyższą zgodność wzorca przyrostowego z pniem. Zgodność krzywej wzrostu korzenia z krzywą wzrostu z pnia w obu przypadkach malała wraz ze wzrostem odległości od pnia. Największe zróżnicowanie szerokości przyrostów

radialnych zostało wykazane dla części odstłoniętej korzenia sosny zwyczajnej, poddanego intensywnej presji mechanicznej i wydeptywaniu. Jednakże dla tej strefy korzenia stwierdzono całkowity brak przyrostów brakujących, przy dużym udziale przyrostów wyklinowujących. Część odstłonięta korzenia w obrębie szlaku posiadała dodatkowo najwyższą zgodność przyrostową z krzywą wzrostu z pnia oraz z chronologią stanowiska.

Wielkość i uwarunkowania tempa denudacji antropogenicznej obliczonego na podstawie odstłonieć korzeni sosny zwyczajnej

W pracy wykazano, iż efektem postępującego ruchu turystycznego jest inicjowanie oraz przyspieszanie denudacji antropogenicznej na szlaku turystycznym. Przeprowadzone analizy dendrochronologiczne korzeni sosny zwyczajnej dowiodły, iż w obrębie szlaku na stanowisku Bachotek zachodzi ciągły proces denudacji antropogenicznej powodujący powolne przemieszczanie materiału na szlaku. Średnie tempo denudacji antropogenicznej wyliczone na podstawie datowań odstłonieć korzeni sosny zwyczajnej na stanowisku Bachotek wyniosło $1,93 \pm 0,82$ mm/rok. Zakres otrzymanych wartości tempa denudacji zawiera się w przedziale od 0,71 do 3,80 mm/rok. Stwierdzono, że 45% (tj. 34 korzenie z 76) próbek korzeni wykazało tempo denudacji powyżej średniej, tj. w przedziale od 1,95 do 3,80 mm/rok.

Analizy regresji wykazały, iż na badanym odcinku szlaku turystycznego tempo denudacji antropogenicznej warunkowało pięć czynników: stopień kompaktacji gleby, gęstość objętościowa gleby, zawartość materii organicznej, całkowita długość odstłonięcia korzenia oraz szerokość szlaku. Wykazano, iż przy wzroście stopnia kompaktacji gleby oraz gęstości objętościowej gleby odnotowywano istotne zwiększenie wartości tempa denudacji antropogenicznej na szlaku. Odwrotną zależność wykazano natomiast dla zawartości materii organicznej tj. wraz ze wzrostem jej zawartości w pokrywie glebowej na szlaku rozpoznano niższe tempo denudacji antropogenicznej (DrA). Zauważono również, że przy wzroście szerokości szlaku oraz długości części odstłoniętej korzenia malała wielkość tempa denudacji w jego obrębie.

Etapy oddziaływania denudacji antropogenicznej na korzenie i pnie drzew sosny zwyczajnej na szlaku turystycznym

Sekwencja zapisu procesów odstłaniania korzeni oraz wieku uszkodzeń mechanicznych pozwoliły na wyznaczenie etapów oddziaływania denudacji antropogenicznej na korzenie i pnie sosny zwyczajnej na szlaku turystycznym na stanowisku Bachotek. Uzyskane wyniki mogą być podstawą do określenia stopnia zmian strukturalnych w korzeniach i pniach sosny zwyczajnej, poddanych denudacji antropogenicznej. Ogółem, wyznaczano cztery okresy oddziaływania turystyki na korzenie i pnie sosny zwyczajnej w obrębie szlaku turystycznego:

Okres 1: trwający od lat 50. XX wieku do 1985 roku. Był to etap tzw. inicjacji ruchu turystycznego, przejawiający się niskim oddziaływaniem ruchu turystycznego na korzenie sosny zwyczajnej. W tym okresie pierwsze odstłonięcie korzeni wydatowano na rok 1971. Dla końca lat 70. XX wieku wykazano nagłe stłumienie wzrostu przyrostu rocznego dla drzew poddanych presji turystycznej.

Okres 2: trwający od 1986 do 1997 roku. Był to pierwszy etap oddziaływania tzw. turystyki masowej w okolicach Bachotka. Na początku lat 90. XX wieku odnotowano po raz pierwszy znaczną liczbę uszkodzeń mechanicznych, których genezę dostrzeżono w ciągłym deptaniu odstłanianych lub już odstłoniętych korzeni sosny zwyczajnej na szlaku.

Okres 3: trwający od 1998 do 2009 roku. Okres ten zaznaczył się zintensyfikowanym oddziaływaniem ruchu turystycznego na korzenie i pnie drzew, wyrażonym zwielokrotnioną ilością odstłonieć korzeni w stosunku do poprzednich okresów. Łącznie w tym okresie zanotowano

66% ogólnej liczby odstąpień korzeni sosny zwyczajnej pobranych ze szlaku turystycznego stanowiska Bachotek i aż 72% wszystkich zidentyfikowanych uszkodzeń mechanicznych w obrębie korzeni odstąpionych.

Okres 4: trwający od roku 2009 to okres, w którym nie zanotowano nowych odstąpień korzeni. Mimo, że nie rozpoznano odstąpień to widoczny jest stopniowy wzrost obciążenia szlaku. Dowodem na ciągłe działanie presji turystycznej na szlaku turystycznym są liczne uszkodzenia mechaniczne, tj. blizny i traumatyczne kanały żywiczne, jakie udokumentowano w korzeniach sosny zwyczajnej.

W pracy wykazano zastosowanie metody dendrochronologicznej do badań wpływu denudacji antropogenicznej na przyrosty radialne i anatomie drewna korzeni sosny zwyczajnej ze szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek. Dowiedziono, że zapis przyrostów radialnych korzeni drzew jest wartościowym archiwum zmian środowiska geograficznego o wysokiej rozdzielczości czasowej. Jednocześnie należy stwierdzić, że analiza dendrochronologiczna okazała się skutecznym narzędziem do badań ilościowych wpływu antropopresji na przekształcenia rzeźby strefy niżowej, w tym rozpoznania tempa denudacji antropogenicznej na wybranym obszarze Pojezierza Brodnickiego. Przeprowadzone studium wpływu denudacji antropogenicznej na wzrost sosny zwyczajnej wykazało istotny udział presji turystycznej w tym wydeptywania, na zmiany przyrostowe korzeni oraz pni tego gatunku. Wyniki badań potwierdziły tym samym przyjętą hipotezę badawczą, iż denudacja antropogeniczna powoduje trwałe zmiany przyrostowe i anatomiczne w korzeniach sosny mogące stanowić ilościowym wskaźnik antropopresji.

Literatura

- Alestalo J., 1971. Dendrochronological interpretation of geomorphic processes, *Fennia*, 105, 1-140.
- Andronikou A., 1987. Cyprus: management of the tourist sector, *Tourism Management*, 7, 2, 127-129.
- Andrzejewski H., Bielecki P., Burak S., Chrapkowski B., Ceynowa- Giełdoń M., Cyzman W., Dąbrowska B., Noryśkiewicz A., Rejewski M., Rutkowski L., Szczepański Z., Tomaszewski W., Zatuski T., Zielski A., 1996. Rezerwy przyrody województwa toruńskiego (opracowanie zbiorowe). Urząd Wojewódzki w Toruniu. Wydział Ochrony środowiska Wojewódzki Konserwator Przyrody.
- Antonova G.F., Stasova V.V., 1993. Effects of environmental factors on wood formation in Scots pine stems. *Trees* 7:214-219.
- Antipov N.I., 1971. O sootnošeni mieždu kutukuljarnoj i ustičnoj transpiraciej u drevesnych i kustarnikowych rastenij. *Fizjologia rastenij*, 18 (6): 1207-1212.
- Antoine P., Giraud D., Meunier M., Van Ash T., 1995. Geological and geotechnical properties of the "Terres Noires" in southeastern France: weathering, erosion, solid transport and instability. *Engineering Geology* 40, 223-234.
- Ashworth G.J., Dietvorst A.G.J., 1995. *Tourism and spatial transformations: implications for policy and planning*, CAB International, Wallingford.
- Bahrani Sh., Mahboobi F., Sadidi J., Jafari Aghdam M., 2011. Estimating the Rate of Sheet Erosion by Dendrogeomorphological. Analysis of Tree Roots in Gharechai (Ramian). *Catchment Physical Geography Research Quarterly*, No. 75, Spring 2011. 18-21.
- Baillie M.G.L., Pilcher J.R., 1973. A simple cross-dating program for tree-ring research. *Tree-Ring Bulletin* 33: 7-14.
- Baker M.L., 1982. Traditional landscape and mass tourism in Alps, *The Geographical Review*, 72, 4, 395-415.
- Ballesteros J.A., Bodoque J.M., Diez-Herrero A., Sanchez-Silva M., Stoffel M., 2011. Calibration of floodplain roughness and estimation of flood discharge based on tree-ring evidence and hydraulic modelling. *Journal of Hydrology* 403. 103-115
- Ballesteros-Cánovas J.A., Bodoque J.M., Lucia A., Martín-Duque J.F., Diez-Herrero A., Ruiz-Villanueva V., Rubiales J.M., Genova M., 2013. Dendrogeomorphology in badlands: Methods, case studies and prospects. *Catena* 106: 113-122.
- Ballesteros-Cánovas J.A., Corona C., Stoffel M., Lucia-Vela A., Bodoque J.M., 2015. Combining terrestrial laser scanning and root exposure to estimate erosion rates. *Plant and Soil* 394(1-2): 127-137.
- Ballesteros-Cánovas J.A., Stoffel M., Czajka B., Janecka K., Kaczka R.J., Lempa M., 2016. Paleoflood discharge reconstruction in Tatra Mountain streams. *Geomorphology* 272.
- Ballesteros-Cánovas J.A., Stoffel M., Martín-Duque J.F., Lucía A., Bodoque J.M., Montgomery D.R., 2017. Gully evolution and geomorphic adjustments of badlands to reforestation. *Scientific Reports* 7/
- Balon J., 1981. Rodzaje i formy antropogenicznej degradacji stoku, „Parki Narodowe i Rezerwy Przyrody”, 4, 1.
- Balon, J., 1982. Morfologiczna działalność taternictwa, *Taternik*, 1.
- Bandota-Ciołczyk, E., Kurzyński, J., 1996. Stan zdrowotny, żywotność oraz uszkodzenia mechaniczne świerka i kosodrzewiny na obszarze użytkowanym przez narciarzy i turystów na Pilsku. [w:] Łajczak, A., Michalik, S., Witkowski, Z. (red). Wpływ narciarstwa i turystyki pieszej na przyrodę masywu Pilska, *Studia Naturae* 41, Kraków 1996, s. 183-195.
- Barczak A., Jankow W., Kubinek Ł., Strus P., Wołowicz T., 2002. Podatność na degradacje szlaków turystycznych Ojcowskiego Parku Narodowego. [w:] J. Partyka (red.), *Użytkowanie turystyczne parków narodowych. Ruch turystyczny-zagospodarowanie-konflikty-zagrozenia*. Wyd. Ojcowski Park Narodowy, Ojców: 703-722.
- Barke M., 1996. *Tourism in Spain: critical issues*, CA International, Walingford.
- Bates G.H., 1935. The vegetation of footpaths sidewalks, cart-tracks and gateways. *J. Ecology*, nr 23.

- Bätzing W., 1991. Die Alpen, Entstehung und Gefährdung einer europäischen Kulturlandschaft. C.H. Beck, München.
- Becheri E., 1991. Rimini and Co: the end of legend?, *Tourism Management*, 12, 3, 229-235.
- Becker M. Nieminen T. M. Géréma F. 1994. Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France- the role of climate and atmospheric CO₂. *Annals of Forest Science*, 51(5), 477-492.
- Bednarek R., Prusinkiewicz Z., 1999. *Geografia gleb*, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Bednarek R., Sewerniak P., Gruba R., 2007. Analiza porównawcza czarnych ziem i gleb murszastych na terenie Brodnickiego Parku Krajobrazowego. [w:] W. Marszelewski, L. Kozłowski. *Ochrona i Zagospodarowanie Dorzecza Drwęcy Tom I. Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu. Instytut Geografii*. 19-30.
- Bednarz Z., 1986. An example of the application of the tree-ring chronology of the Dwarf Mountain Pine (*Pinus Mugo var Mughus Zenari*) for the dating of geomorphological processes in the Tatra Mts. *Dendrochronologia* 4: 75-77.
- Bégin, Y., Langlais, D., Cournoyer, L., 1991a. Tree-ring dating of shore erosion events (Upper St Lawrence stream, eastern Canada). *Geografiska Annaler* 73A, 53-59.
- Bégin, Y., Langlais, D., Cournoyer, L., 1991b. A dendrogeomorphic estimate of shore erosion, Upper St Lawrence estuary, Québec. *Journal of Coastal Research* 7, 607-615.
- Belay M., Bewket W., 2012. A Participatory Assessment of Soil Erosion and Farm Management Practices in Northwest Ethiopia. 1-9.
- Bernatek-Jakiel A., Wrońska-Wałach D., 2018. Impact of piping on gully development in mid-altitude mountains under a temperate climate: A dendrogeomorphological approach. *Catena* 165. 320-332.
- Białobok S., 1967. Zmienność cech morfologicznych i fizjologicznych w zależności od środowiska. *Zarys fizjologii sosny zwyczajnej, Zakład Dendrologii i Arboretum Kórnickie PAN, Warszawa-Poznań*, 1-32.
- Białobok S., 1970. Rozmieszczeni w Euroazji. Sosna zwyczajna. *Nasze drzewa leśne, t. I, PWN, Warszawa-Poznań*, 78-85.
- Bilski S., 1978. Region brodnicki. *Historia, zabytki, krajobraz. Brodnica (II wyd. Toruń)*
- Bilski S., 1989. *Z kultury ludowej regionu brodnickiego. Brodnica-Toruń.*
- Bilski S., 1991. *Słownik biograficzny region brodnickiego. Brodnica-Toruń.*
- Bodoque J. M. Díez-Herrero A. Martín-Duque J. F. Rubiales J. M. Godfrey A. Pedraza J. Carrasco R. M. Sanz M. A. 2005. Sheet erosion rates determined by using dendrogeomorphological analysis of exposed tree roots: two examples from Central Spain. *Catena*, 64: 81-102.
- Bodoque J.M., Lucia A., Ballesteros J.A., Martín-Duque J.F., Rubiales J.M., Genova M., 2011. Measuring medium-term sheet erosion in gullies from trees: A case study using dendrogeomorphological analysis of exposed pine roots in central Iberia. *Geomorphology* 134: 417-425.
- Bodoque J.M., Ballesteros-Cánovas J.A., Lucia A., Díez-Herrero A., Martín-Duque J.F., 2015. Source of error and uncertainty in sheet erosion rates estimated from dendrogeomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*.
- Bodoque J.M., Ballesteros-Cánovas J.A., Rubiales J.M., Perucha M.A., Nadal-Romero E., Stoffel M., 2017. Quantifying Soil Erosion from Hiking Trail in a Protected Natural Area in the Spanish Pyrenees. *Land Degradation and Development*.
- Bogacz J., 1974. Wpływ turystyki na roślinność w Babiogórskim Parku Narodowym. *Chrońmy Przyrodę Ojczyznę*, 6: 30-35.
- Boński M., 1988. *Przewodnik przyrodniczy po województwie toruńskim. Prace popularnonaukowe 48, Warszawa-Poznań-Toruń.*
- Bollati I., Della Seta M., Pelfini M., Del Monte M., Fredi P., Lupia Palmieri E., 2012. Dendrochronological and geomorphological investigations to assess water erosion and mass wasting processes in the Apennines of Southern Tuscany (Italy). *Catena* 90, 1-117.

- Bollsweiler M., Stoffel M., Schneuwly D. M., Bourqui K., 2008. Traumatic resin ducts in *Larix decidua* stems impacted by debris flows. *Tree Physiology*, 28: 255-263.
- Boudreau S., Payette S., Morneau C., Couturier S., 2003. Recent Decline of the George River Caribou Herd as Revealed by Tree-Ring Analysis. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 35, 2: 187-195.
- Bouwer H., 1986. Intake rate cylinder infiltrometer. In: methods of soil analysis. Part I, Physical and mineralogical methods, *Agronomy Monograph no. 9*. Am. Soc. Of Agronomy, Soil Sc Soc. Of America.
- Böhm W., 1979. Methods of Studying Root systems. *Ecological Studies*, Vol. 33. (tłum. Metody badania systemów korzeniowych. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa, 1985)
- Brandner B., 1995. Skitourismus: von der Vergangenheit zum Potential der Zukunft, Rüegger, Chur.
- Bratton S.P., Hickler M.G., Graves J.H., 1978. Visitor impact on backcountry campsites in the Rocky Mountains, *Environmental Management*, 2, 431-442.
- Brenot, J., Quiquerez, A., Petit, C., Garcia, J.P., 2008. Erosion rates and sediment budgets in vineyards at 1-m resolution based on stock unearthing (Burgundy, France). *Geomorphology* 100, 345-355.
- Brown J.H., Kalisz S.P., Wright W., 1977. Effects of recreational use on forest sites, *Environmental Geology*, 1, 425-431.
- Brudnicki R., 2007. Zróżnicowanie potencjału turystycznego obszarów wiejskich dorzecza Drwęcy. [w:] W. Marszelewski, L. Kozłowski. *Ochrona i Zagospodarowanie Dorzecza Drwęcy Tom I*. Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu. Instytut Geografii. 47-60.
- Bryan, R. B.: 1977. The influence of soil properties on degradation of mountain hiking trail at Grovelsjon', *Geogr. Ann.* 59A, 49-65.
- Buchwał A., 2009a. Dendrogeomorphological records of trail erosion. In: Kaczka R., Malik I., Owczarek P., Gärtner H., Heinrich I., Helle G., Schleser G. (Eds.): *TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology*, Vol. 7. GFZ Potsdam, Scientific Technical Report STR 09/03, Potsdam: 166-170.
- Buchwał A., 2009b. Rekonstrukcja procesów erozyjno-denudacyjnych na ścieżkach turystycznych w świetle badań dendrogeomorfologicznych (Babia Góra). [W:] A. Kostrzewski, R. Paluszkiewicz (red.), *Geneza, litologia i stratygrafia utworów czwartorzędowych*, t. V, *Seria Geografia nr 88*, 17-30.
- Buchwał A., 2010. Wpływ ruchu turystycznego na przekształcenia rzeźby masywu Babiej Góry- zapis dendrogeomorfologiczny, praca doktorska napisana w Zakładzie Geoekologii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu pod kierunkiem prof. zw. dr hab. Andrzeja Kostrzewskiego, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Poznań, 2010.
- Buchwał A., Ćwiąkała P., Gudowicz J., 2009. Wykorzystanie pomiarów geodezyjnych do analizy denudacji antropogenicznej (Sokolica, Babia Góra), *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej*, 126, s. 35-44.
- Buchwał A., Winowski M., 2009. Reconstructing temporal patterns of rotational landslides activity using dendrogeomorphological approach (Wolin Island). *Questiones Geographicae*, 28A/2: 5-14.
- Buchwał A., Wrońska-Wałach D., 2008. Zapis denudacji naturalnej i antropogenicznej w odsloniętych korzeniach świerka (*Picea abies*) (Karpaty fliszowe). *Landform Analyses*, 9: 33-36.
- Buckaman H.C., Brady N.C., 1971. *Gleba i jej właściwości*. PWRiL. Warszawa.
- Bukowski Z., Ziemia T., 2005. *Z historii brodnickiego sportu*. Brodnica.
- Bunn A. G., 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26: 115-124.
- Bunn, A.G., 2010. Statistical and visual cross-dating in R using the dplR library. *Dendrochronologia* 28: 251-258.
- Burak S, (red.) 1992. *Przyroda województwa toruńskiego*. Urząd Wojewódzki w Toruniu. Toruń.
- Burak S., Marszelewski W., Solarczyk A., 2000. *Jeziora województwa kujawsko-pomorskiego*, Bydgoszcz.
- Burak S., Chrapkowski B., Koj R., Przystalski A., Załuski T., 2016. *Przyroda powiatu brodnickiego*. Starostwo Powiatowe w Brodnicy. Polskie Wydawnictwo Reklamowe. Toruń.

- Buras A., Wilmsking M., 2014. Straight lines or eccentric eggs: a comparison of radial and spatial ring width measurements and its implications for climate transfer functions. *Dendrochronologia*, 32 (2014). 313-326.
- Burden R.F., Randerson P.F., 1972. Quantitative studies of the effects of human trampling on vegetation as an aid to the management of seminatural areas. *Journal of Applied Ecology*, 9, 439-457.
- Burger H., 1940. Physicalische Eigenschaften von Wald-und Frielandböden. VI Der Wld als Erholungsstätte und der Wald-boden. Schweiz. Anst. Forstl. Vershunchsw. Mitt., 21, 223-249.
- Butler, D.R., 1979. Dendrogeomorphological analysis of flooding and mass movement, Ram Plateau, Mackenzie Mountains, Northwest Territories. *The Canadian Geographer* 23: 62-65.
- Butler D.R, Malanson G.P., 1985. A history of high magnitude snow avalanches, southern Glacier National Park, Montana, USA. *Mountain Research and Development* 5: 175-182.
- Bywater M., 1991. Prospects for Mediterranean beach resorts: an Italian case study, *Travel and Tourism Analyst*, 5, 75-89.
- Carić H., 2011. Cruising tourism environmental impacts: case study of Dubrovnik, Croatia. *The Journal of Coastal Research (JCR)*. 61, 104.
- Carrara P.E., Carroll T.R., 1979. Determination of erosion rates from exposed tree roots in the Piceance Basin, Colorado. *Earth Surface Processes and Landforms* 4: 307-317.
- Cater E., 1987. Tourism in the least developed countries, *Annals of Tourism Research*, 14, 220-226.
- Ceynowa-Giełdon M., 1971. Osobliwości florystyczne i rezerваты Ziemi Chełmińskiej. Przewodnik florystyczny. Toruń.
- Chartier, M.P., Rostagno, C.M., Roig, F.A., 2009. Soil erosion rates in rangelands of northeastern Patagonia: a dendrogeomorphological analysis using exposed shrub roots. *Geomorphology* 106, 344-351.
- Chartier M.P., Giantomasi M.A., Renison D., 2016. Exposed roots as indicators of geomorphic processes: A case-study from Polylepis mountain woodlands of Central Argentina. *Dendrochronologia* 37 (2016) 57-63.
- Ciapata S., Zielonka T., 2013. Applicability of dendrochronology in the evaluation of the long-term impact of hiking on the condition of stands adjacent to hiking trails. *Folia turistica*. Vol.28(2).
- Ciapata S. Adamski P. Zielonka T., 2014. Tree ring analysis as an indicator of environmental changes caused by tourist trampling- A potential method for the assessment of the impact of tourists. *Geochronometria* 41(4): 392-399
- Cieszewska A., Deptuła M., 2013. Czynniki wpływające na degradację szlaków turystycznych na terenie Tatrzańskiego Parku Narodowego, „Studia i materiały CEPL w Rogowie”, R.15, Zeszyt 37/4, 77-82.
- Ciszewski D., Malik I., Rahmonov O., 2004, Wykorzystanie wieku drzew w badaniach tempa migracji koryta Małej Panwi (Równina Opolska), *Przegląd Geograficzny*, 76, 65-77.
- Ciurzyński Z., 1977. Przekształcenia krajobrazu w pasie nadmorskim Pobreża Słowińskiego. *Chrońmy Przyrodę Ojczystą*. z. 5-6.
- Cedro A., 2001a. Próba oceny oddziaływania temperatury powietrza i opadów atmosferycznych na przyrost radialny sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris*) na Pomorzu Zachodnim. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio B, Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia* Vol. 55/56. 105-112.
- Cedro A., 2001b. Dependence of radial growth of *Pinus sylvestris* l. from western Pomerania on the rainfall and temperature conditions. *Geochronometria* Vol. 20, pp 69-74, 2001 - *Journal on Methods and Applications of Absolute Chronology*.
- Churski Z., 1973. Uwagi o warunkach wodnych i ich wpływie na procesy erozyjne w dolinie Drwęcy. *Acta Universitatis Nicolai Copernici, Geografia* 9, Toruń 1973. 63-86.
- Churski Z., 1983. Eutrophication and the disappearance of lakes in the Brodnica Lake District, Northern Poland as a result of human interference. *Hydrobiologia*, 103 (1), 165-168.
- Churski Z., 1988. Wpływ gospodarczej działalności człowieka na zmiany jezior I mokradel na Pojezierzu Brodnickim.

- Cohen E., 1978. The impact of tourism on the physical environment, "Annals of Tourism Research, z. 5, nr. 2, s. 215-237.
- Cole D.N., 1981. Vegetation changes associated with recreational use and fire suppression in the Eagle Cap wildness, Oregon, some management implications, *Biological Conservation*, 20, 247-270.
- Cole D. N., 1983. Assessing and monitoring backcountry trail conditions. Res. Pap. INT-303. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1-10.
- Cole D.N., 1987. Effects of three seasons of experimental trampling on five montane forest communities and a grassland in western Montana, USA. *Biological Conservation*, 40(3): 219-244.
- Cole D.N., 1989. Wilderness campsite monitoring methods: a sourcebook. General Technical Report INT-259. Ogden, UT: USDA For. Serv., Intermountain Research Station, 1-57.
- Cole D. N., 1993a. Trampling effects on mountain vegetation in Washington, Colorado, New Hampshire and New Carolina. USDA Forest Service, RP INT-464.
- Cole D.N., 1993b. Minimizing conflict between recreation and nature conservation. [w:] D.S. Smith, P.C. Hellmund (red.), *Ecology of greenways: design and function of linear conservation areas*. University of Minnesota Press, Minneapolis, MN: 105-122.
- Cole D.N., Bayfield N.G., 1993. Recreational trampling of vegetation: standard experimental procedures, *Biological Conservation*, 63, 209-215.
- Coleman R., 1981. Footpath erosion in the English Lake District. *Applied Geography*, 1(2): 121-131.
- Cook E.R. Briffa K. Shiyatov S. Mazepa A. Jones P.D. 1990. Data analysis. [w:] E.R. Cook, L.A. Kairiukstis (red.). *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. Boston: International Institute for Applied Systems Analysis, Kluwer Academic Publishers. 97162.
- Cook, E.R. K. Peters. 1981. The smoothing spline: A new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bull.* 41:45-53.
- Corona C., Saez JL., Rovéra G., Stoffel M., Astrade L., Berger F., 2011. High resolution, quantitative reconstruction of erosion rates based on anatomical changes in exposed roots at Draix, Alpes de Haute-Provence - critical review of existing approaches and independent quality control of results. *Geomorphology* 125: 433-444.
- Corona C., Saez JL., Stoffel M., Rovéra G, Edouard JL., Berger F., 2013. Seven centuries of avalanche activity at Echalp (Queyras massif, southern French Alps) as inferred from tree rings. *Holocene* 23: 292-304.
- Cunha L., 1997. Tourism and environmental degradation on the west coast of Portugal. In Machado, J. Reis and Ahern, Jack - *Environmental Challenges in an Expanding Urban World and the Role of Emerging Information Technologies Conference*. Lisbon.
- Czajka B., 2011. Zapis lawin śnieżnych w przebiegu górnej granicy lasu w Tatrach Zachodnich, [w:] Machowski R., Rzętała M. (red.) *Z badań nad wpływem antropopresji na środowisko* 12: 26-38.
- Czajka B., Kaczka R.J., Guzik M., 2012. Zmiany morfometrii szlaków lawinowych w Dolinie Kościeliskiej od utworzenia Tatrzańskiego Parku Narodowego. [w:] Łajczak A. (red.), *Antropopresja w wybranych strefach morfoklimatycznych - zapis w rzeźbie i osadach*, Wyd. Pozkał, Prace Wydziału Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego 77: 126 - 135.
- Czochański J., 1993. Rekreacyjne wykorzystanie obszarów chronionych, jako element degradacji krajobrazu na przykładzie TPN, (w:) M. Pietrzak (red.), *Ekologia krajobrazu w badaniach terytorialnych systemów rekreacyjnych*. Wyd. Krajowego Instytutu Badań Samorządowych, Poznań 1993, s. 27-30.
- Czochański J., 2000. Wpływ użytkowania turystycznego na rozwój procesów i form erozyjno-denudacyjnych w otoczeniu szlaków. [w:] Czochański, J., Borowiak, D. (red.), *Z badań geograficznych w Tatrach Polskich*. Wyd. UG, Gdańsk, 315-328.
- Czochanski J., Szydarowski W., 1996. Turystyka piesza i jej wpływ na środowisko przyrodnicze Tatrzańskiego Parku Narodowego. [w:] Krzan, Z. (red.), *Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego a Człowiek. Tom III - Wpływ Człowieka*. TPN, Polskie Towarzystwo przyjaciół Nauk o Ziemi, Oddział Krakowski, Kraków - Zakopane 1996, 43-44.

- Czuba J., 1969. Walory naturalne środowiska geograficznego ziemi chełmińskiej i ich ocena dla potrzeb turystyki i wypoczynku.
- Czubiński Z., 1937. Roślinność Pojezierza Brodnickiego i terenów sąsiednich ze stanowiska ochrony przyrody. *Okr. Kom. Ochr. Przy. Na Wielkopolskę i Pomorze* 7, 88-116.
- Czubiński Z., 1938. Badania fitosocjologiczne nad torfowiskami mszarnymi Pojezierza Brodnickiego. *Spraw. Pozn. Tow. Przyj. Nauk* 3: 203-207.
- Czubiński Z., 1948. Stosunki florystyczne południowo-wschodniej części Pojezierza Brodnickiego. *Pozn. Tow. Przyj. Nauk* 9, 3: 1-65.
- Danzer S.R., 1996. Rates of slope erosion determined from exposed roots of ponderosa pine at Rose Canyon Lake, Arizona. In *Tree Rings, Environment, and Humanity*, Dean J.J., Meko D.M., Sewnam T.W. (red.). *Proceedings of the International Conference, University of Arizona: Tucson*; 671-678.
- De Groot D.S., 1983. Tourism and conservation in the Galapagos Islands, *Biological Conservation*, 26, 291-300.
- den Ouden, J., Sass-Klaassen, U.G.W., Copini, P., 2007. Dendrogeomorphology-a new tool to study drift-sand dynamics. *Netherlands Journal of Geosciences* 86, 355-363.
- Denne M. P., 1988. Definition of Latewood according to Mork (1928). *IAWA Bulletin*, 10 (1): 59-62.
- Desrosiers M., 1992. Etude dendrochronologique de l'érosion associée aux crues du Saint-Laurent, Saint Antoine de Tilly, Québec. *Géographie Physique et Quaternaire*, 46. No.2. 173-180.
- Dębicki R., Bilakowska K., Chodorowski J., Bartmiński P. 2015. Impact of tourism on selected properties of soils of Bukowa Góra Educational Path (Roztoczański National Park, Eastern Poland), *Annales UMCS*, vol. LXIX, 2, Sectio B: 69-77.
- Dick B.M., Jewell I., Hey R., Simon P., Peszle I., 2015. Erosion Rates Derived From Exposed Tree Roots - New Tools in Water Resources Management.
- Dickinson G., 1996. Environmental degradation in the countryside: Loch Lomond, Scotland, (w:) G.K. Priestley, J.A. Edwards, H. Coccossis (red.), *Sustainable tourism?: European experiences*, CAB International, Wallingford.
- Dixon G., Hawes M., McPherson G., 2004. Monitoring and modeling walking track impacts in the Tasmanian Wilderness World Heritage Area, Australia. *Journal of Environmental Management*, 71(4): 305-320.
- Dunne, T., Dietrich, W.E., Brunengo, J., 1978. Recent and past erosion rates in semi-arid Kenya. *Zeitschrift für Geomorphologie N. F. Suppl.* 29, 130-140.
- Dusza A., 2006. Wpływ turystyki na zmianę warunków przyrodniczych rejonu Kalatówek w Tatrach polskich. *Przegląd Geologiczny*, 54 (8): 694-699.
- Düggeli M., 1937. Wie wirkt das öftere Betreten des Wald-bodens auf einzelne physikalische und biologische Eigenschaften. *Schweiz. Ztschr. Forstwesen*, 21, 223-249.
- Dygdała J. (red.), 1998. Brodnica-siedem wieków miasta. Rada Miejska w Brodnicy. Towarzystwo Miłośników Ziemi Michałowskiej. Brodnica.
- Dysarz R., 1979. Problemy oceny środowiska geograficznego obszarów pojeziernych dla potrzeb wypoczynku świątecznego w skali planu szczegółowego na przykładzie Jez. Jezuickiego. *Monografie nr 116. AWF Poznań*.
- Dysarz R., 1980. Zmiany w środowisku geograficznym ośrodków wypoczynkowych zachodzące pod wpływem ruchu turystycznego, *Przegląd Geograficzny*, t. LII, z. 1: 127-141.
- Dysarz R., 1993. Charakter przekształceń środowiska geograficznego obszarów użytkowanych rekreacyjnie na wybranych przykładach w strefie pojezierzy, *Wyd. Uczelniane WSP Bydgoszcz* 1993.
- Eardley A.J., Viavant W., 1967. Rates of denudation as measured by Bristlecone Pines. *Special Studies*, vol. 21, *Utah Geological and Mineralogical Survey, Cedar Breaks, Utah*.
- Eckstein D., Bauch J. 1969. Beitrag zur Rationalisierung eines dendrochronologischen Verfahrens und zur Analyse seiner Aussagesicherheit. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 88 (4): 230-25.

- Ermich K. 1959. Badania nad sezonowym przebiegiem przyrostu grubości pnia u *Pinus sylvestris* L. i *Quercus robur* L. *Acta Soc. Bot. Pol.* 28: 15-63.
- Ewertowski M., Tomczyk A., 2007. Ocena stanu środowiska geograficznego szlaków turystycznych - wykorzystanie GIS do integracji danych terenowych i kartograficznych. *Przegląd Geograficzny*, vol. 79 (2): 271-295.
- Faliński J.B. 1965. Synantropizacja szaty roślinnej. I. Neofityzm I apofityzm w szacie roślinnej Polski, nr 25. Warszawa-Białowieża.
- Faliński J.B. 1973. Reakcja runa leśnego na wydeptywanie w świetle badań eksperymentalnych. *Phytocenosis*, vol.2 nr 3. Warszawa-Białowieża.
- Fantucci R., 2007. Dendrogeomorphological analysis of shore erosion along Bolsena lake (Central Italy). *Dendrochronologia*, 24: 69-78.
- Farrell T.A., Marion J.L., 2002a. Trail impacts and trail impact management related to ecotourism visitation at Torres del Paine National Park, Chile. *Leisure/Loisir: Journal of the Canadian Association for Leisure Studies*, 26(1/2):31-59.
- Fayle D. C. F., 1968. Radial Growth in Tree Roots - Distribution, Timing, Anatomy, Faculty of Forestry, University of Toronto, Technical report No. 9, Toronto.
- Fayle, D.C.F., 1975a. Extension and longitudinal growth during the development of red pine root systems. *Can. J. For. Res.* 5, 109-121.
- Fayle, D.C.F., 1975b. Distribution of radial growth during the development of red pine root systems. *Can. J. For. Res.* 5, 608-625.
- Fayle, D.C.F., 1976. Stem sway affects ring width and compression wood formation in exposed root bases. *Forest Science* 22, 193-194.
- Fayle, D.C.F., Farrar, J.L., 1965. A note on the polar transport of exogenous auxin in woody root cuttings. *Canadian Journal of Botany* 43, 1004-1007.
- Feliksik E., Wilczyński S. 2009. The effect of climate on tree-ring chronologies of native and nonnative tree species growing under homogenous site conditions. *Geochronometria* 33:49-57.
- Fidelus J., 2008a. Rola ruchu turystycznego w przekształcaniu ścieżek i dróg turystycznych na obszarze Tatrzańskiego Parku Narodowego. *Prace Geograficzne UJ, Kraków*, 120: 19-30.
- Fidelus J., 2008b. Skutki przekształceń antropogenicznych rzeźby w obrębie ścieżek I dróg turystycznych na wybranych obszarach Tatr Zachodnich, *Landform Analysis*. 9, 276-279.
- Fornal-Bieniak B., 2011. Wpływ turystyki na ekosystemy leśne Pogórza Ciężkowickiego, *Studia i Materiały CEPL w Rogowie*, R. 13, z. 3(28), 175-180.
- Fritts H.C., 1976. *Tree-Rings and Climate*. Acad. Press, New York, San Francisco, London. 567.
- Gacki T., 1975. Rekreacja a krajobraz na półwyspie Hel. *Chronmy Przyrodę Ojczyść*, z.3.
- Galon R., 1931. Morfologia doliny Drwęcy, *Badania geograficzne nad Polską północno-zachodnią*, z 6-7, Poznań.
- Galon R., 1972. Pojezierze Pomorskie i przyległe wysoczyzny jeziorne. [w:] *Geomorfologia Polski*, t.2: Niż Polski, R. Galon (red.). Warszawa.
- Galon R., Kotarbiński J., Wójcik C., 1979. Objasnienia do mapy geologicznej Polski 1:200 000, ark. Brodnica, red. Mojski J.E., Warszawa.
- Gartner W., 1996. *Tourism development, principles, processes and policies*, Van Nostrand Reinhold, New York, London.
- Gärtner H., 2003. Holzanatomische Analyse diagnostischer Merkmale einer Freilegungsreaktion in Jahrringen von Koniferenwurzeln zur Rekonstruktion geomorphologischer Prozesse. *Dissertationes Botanicae*, 378: 1-118.
- Gärtner H., 2006. The applicability of roots in Dendrogeomorphology. [w:] Schleser G. et al. (eds.), *TRACE - Tree Rings in Archeology, Climatology and Ecology*, Vol. 1, 120-124.

- Gärtner H., 2007. Tree roots - Methodological review and new development in dating and quantifying erosive processes. *Geomorphology*, 86: 243-251.
- Gärtner H., Heinrich I. 2009. The formation of traumatic rows of resin ducts in *Larix decidua* and *Picea abies* (Pinaceae) as a result of wounding experiments in the dormant season. *IAWA Journal*, 30 (2): 199-215.
- Gärtner H., Lucchinetti S., Schweingruber F.H., 2014. New perspectives for wood anatomical analysis in dendrosciences: The GSL1- microtome. *Dendrochronologia*. Volume 32, Issue 1, 2014. 47-51.
- Gärtner H., Schweingruber F.H., 2013. Microscopic Preparation Techniques for Plant Stem Analysis. Swiss Federal Research Institute WSL. Birmensdorf.
- Gärtner H., Schweingruber F.H., Dikau R., 2001. Determination of erosion rates by analyzing structural changes in the growth pattern of exposed roots. *Dendrochronologia*, 19 (1): 81-91.
- Gilewska S., 1999. Obszar młodoglacjalny, [w:] L. Starkel (red.), *Geografia Polski. Środowisko przyrodnicze*, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa, 281-288.
- Godefroid S., Koedam N., 2004. The impact of forest paths upon adjacent vegetation: effects of the path surfacing material on the species composition and soil compaction. *Biological Conservation* 119. 405-419.
- Gołaszewski M., Rojan E., Tsemegas I., 2010. Wpływ wybranych elementów środowiska przyrodniczego na stan szlaków turystycznych w Dolinie Pięciu Stawów Polskich, *Nauka a zarządzanie obszarem Tatr i ich otoczeniem*. TPN, Zakopane, tom III, 29-34.
- Gorczyca E., 2000. Wpływ ruchu turystycznego na przekształcanie rzeźby wysokogórskiej na przykładzie masywu Czerwonych Wierchów i Regli Zakopiańskich, [w:] B. Obrębska-Starkel (red.), *Studia z zakresu geografii fizycznej, Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne*, 105, 369-389.
- Gózdź O., Kapuściński R., 1975. Ochrona przyrody w Świętokrzyskim Parku Narodowym w świetle rozwoju turystyki. *Chrońmy Przyrodę Ojczystą*. z. 4 .
- Gormsen E., 1997. The impact of tourism on costal areas. *Geojournal*, 42, 1, 39-54.
- Grażawski K., Ziomko M., 2014. Wykorzystanie dziedzictwa kulturowego w promocji turystycznej regionu na przykładzie Pojezierza Brodnickiego [w:] K. Grażawski (red.). *Turystyka historyczna na pograniczu pomorsko- mazowiecko-mazurskim*, Olsztyn 2014, 99-116.
- Grissino-Mayer H. D. 2001. Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research* 57 (2): 205-221.
- Grotzbach E.F., 1985. The Bavarian Alps: problems of tourism, agriculture and environmental conservation, [w:] T.V. Singh, J. Kaur (red.), *Integrated mountain development*, Himalayan Books, 141-155.
- Grzelak-Kostulska E., Hołowiecka B., 2007. Zmiany w stanie i strukturach demograficznych ludności dorzecza Drwęcy. [w:] W. Marszelewski, L. Kozłowski. *Ochrona i Zagospodarowanie Dorzecza Drwęcy Tom I*. Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu. Instytut Geografii. 85-104
- Guiot, J. 1991. The bootstrapped response function. *Tree-Ring Bulletin* 51:39-41.
- Guyette R.P., Cutter B.E., 1991. Tree-ring analysis of fire history of a post oak savanna in the Missouri Ozarks. *Nat. Areas J.* 11: 93-99.
- Guzik M., Skawiński P., Wężyk P., 2002. Oddziaływanie narciarstwa zjazdowego na szatę roślinną Doliny Goryczkowej w Tatrach. [w:] J. Partyka (red.), *Użytkowanie turystyczne parków narodowych. Ruch turystyczny - zagospodarowanie - konflikty - zagrożenia*. Ojców, 723-733.
- Guzikowa M., 1982. Wpływ pieszego ruchu turystycznego na szatę roślinną Pienińskiego Parku Narodowego (wybrane zagadnienia, ze szczególnym uwzględnieniem skutków wydeptania). *Studia Naturae, Seria A, PAN*, 22: 227-241.
- Hammit W.E, Cole D.N., 1998. *Widland recreation: ecology and management*. Wiley, New York.
- Hawes M., Candy S., Dixon G., 2006: A method for surveying the condition of extensive walking track systems. *Landscape and Urban Planning*, 78 (3): 275-287.
- Hawkins J.P., Roberts C.M., 1992. Effects of recreational scuba diving on fore-reef slope communities of coral reef, *Biological Conservation*, 62, 171-178.

- Henry B., 1988. The environmental impact of tourism in Jamaica. *World Leisure and Recreation*, 29, 19-21.
- Holder J.S., 1988. Pattern and impact of tourism on the environment of Carribean, *Tourism Management*, 9, 2, 119-127.
- Heinrich I, Gärtner H., 2008. Variations in tension wood of two broadleaved tree species in response to different mechanical treatments: Implications for dendrochronology and mass movement studies. *International Journal of Plant Sciences* 169/7: 928-936.
- Hejnowicz Z., 2012. Anatomia i histogeneza roślin naczyniowych. Organy wegetatywne (wydanie nowe). Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa.
- Herbin J., 1995. Mass tourism and problem of tourism planning in French mountains, (w:) G.J. Ashworth, A.G.J., Dietvorst (red.), *Tourism and spatial transformations: implications for policy and planning*, CAB International, Wallingford.
- Hielscher T., 1879. Bericht über die im Auftrage des Westpr. bot. zool. Vereins im Kreise Strassburg vom 12 bis 24 September 1878 ausgeführten Excursionen. *Ber. D. Westpr. Bot.Zool. Vereins. Danzig*.
- Hitz O.M., Gärtner H., Monbaron M., 2006. Reconstruction of Erosion Rates in Swiss Mountain Torrents. [w:] Heinrich I., Gärtner H., Monbaron M., Schleser G. (red.). *TRACE-Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology*, 4. Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, pp. 196-202.
- Hitz O.M., Gärtner H., Heinrich I., Monbaron M., 2008. Application of ash (*Fraxinus excelsior* L.) roots to determine erosion rates in mountain torrents. *Catena*, 72: 248-258.
- Hupp C.R., 1986. The headward extend of fluvial landforms and associated vegetation on Massanutten Mountain, Virginia. *Earth Surf. Proc. Landf.* 11: 545-555.
- Hupp, C.R., Carey, W.P., 1990. Dendrogeomorphic approach to estimating slope retreat, Maxey Flats, Kentucky. *Geology* 18, 658-661.
- Iwicki S., 1976. Przyrodnicze podstawy zagospodarowania turystycznego Pojezierza Brodnickiego. Zeszyty Naukowe Instytutu Turystyki nr 4. Warszawa.
- Iwicki S. Zielski A., 1990. Brodnicki Park Krajobrazowy. Przewodnik Przyrodniczo-Krajoznawczy. Warszawa.
- Jakubowski M., 2004. Udział bielu, twardzieli drewna młodocianego i dojrzałego w strzałach sosen zwyczajnych (*Pinus sylvestris* L.) wyrosłych w różnych warunkach siedliskowych. *Sylwan* 148 (8):16-24.
- Jała Z., Cieślakiewicz D., 2004. Potencjalna erozja gleb w Karkonoskim Parku Narodowym, *Opera Corcontica*, nr 41, 66-73.
- Janecka K., Kaczka R.J., 2014. Zapis erupcji wulkanicznych w przyrostach rocznych limby *Pinus cembra* L. w Tatrach Wysokich. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie. R. 16. Zeszyt 40 / 3 / 2014*.
- Janecka K., Kaczka R.J., 2016. Wpływ występowania drewna kompresyjnego na dekoncentryczność szerokości przyrostów i sygnał klimatyczny w świerku pospolitym z regla dolnego w Tatrach Zachodnich. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie R. 18. Zeszyt 48 / 3 / 2016. 43-55*.
- Jankowski M., 2014, Bielicowanie jako wtórny proces w glebach rdzawych brodnickiego parku krajobrazowego, [w:] *Antropogeniczne przekształcenia pokrywy glebowej Brodnickiego Parku Krajobrazowego*, red. Świtoniak M., Jankowski M., Bednarek R., Toruń, 9-24.
- Jarosz S., 1951. Parki narodowe i rezerваты przyrody. Spółdzielczy Instytut Wydawniczy. „KRAJ”.
- Jasnowska J., 1977. Czynniki wpływające na rozmiary stojów rocznych drewna sosny na torfowisku wysokim w zespole *Vacciniouliginosi-Pinetum*. *Rocz. Dendrol.*, XXX, Warszawa.
- Jędrzejczyk I., 1995. Ekologiczne uwarunkowania i funkcje turystyki, Wyd. Śląsk, Katowice.
- Joachim H.F., 1953. Untersuchungen über die WAurzelausbildung der Pappel und die Standortsansprüche von Pappelsorten. *Deutsche Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin. Wiss. Abh.* 7, 205.
- Jodłowski M., 2003. Wpływ taternictwa na przemiany i sposób funkcjonowania ścian skalnych w Tatrach. [w:] Pietrzak M., (red), *Krajobraz - turystyka - ekologia, Problemy Ekologii Krajobrazu*, 11: 55-65.

- Kaczka R., 1999. The role of coarse woody debris in fluvial processes during the flood of the July 1997, Kamienica Łącka valley, Beskidy Mountains, Poland. *Studia Geomorph. Carp.-Balcan.*, 33.
- Kaczka R. J., 2009. Dynamics of large woody debris and wood dams in mountain Kamienica Stream, Polish Carpathians. *TRACE - Tree Rings in Archaeology Climatology and Ecology*, Proceeding of the Dendrosymposium 2008, April 27-th-30th Zakopane, Poland, 7, 171-175.
- Kaczka R.J., Czajka B., Janecka K., 2014. Ocena dokładności dendrochronologicznego datowania ekstremalnych zdarzeń geomorfologicznych. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie R.* 16. Zeszyt 40 / 3 / 2014. 282-289.
- Kaczka R.J., Czajka B., Wyźga B., Wróblewska A., Mikuś P., 2014. Hydroclimatic effects on the condition of grey alder (*Alnus incana* L. Moench) and European larch (*Larix decidua* L. Mill.) growing in the riparian forest of an incised mountain river. *Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology*, Vol. 12. GFZ Potsdam, Scientific Technical Report STR 14/05, Potsdam: 96-101.
- Kaczka R.J., Janecka K., Lempa M., Rączkowska Z., 2015. Zastosowanie metod dendrochronologicznych w badaniach lawin śnieżnych. *Landform Analysis*. Vol. 28. 15-27.
- Kaczka R.J., Wyźga B., 2008. Formowanie i dynamika kęp rzeki górskiej w zapisie dendrochronologicznym na przykładzie dolnego biegu Białki. [w:] B. Wyźga (red.). *Stan środowiska rzek południowej Polski i możliwości jego poprawy*. Instytut Ochrony Przyrody PAN, Kraków, 2008. 93-102.
- Kaennel M.D., Schweingruber F.H., 1995. *Multilingual Glossary of Dendrochronology. Terms and definitions in English*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf / Paul Haupt Publishers, Berne.
- Kamiński M., 2012. Zastosowanie metod fotogrametrycznych do oceny dynamiki ruchów masowych- wybrane przykłady z Polski. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* Vol. 24, 2012, 111 - 122.
- Kapuściński R., 1962. *Busz po polsku*. Czytelnik, Warszawa.
- Kapuściński R., 2002. Turystyka w parkach narodowych- możliwości i ograniczenia, [w:] J. Partyka (red.), *Użytkowanie turystyczne parków narodowych. Ruch turystyczny- zagospodarowanie- konflikty- zagrożenia*. Ojców, 677-683.
- Karasiewicz M.T., Hulisz P., Noryśkiewicz A.M., Noryśkiewicz B., Krześlak I., Świtoniak M., Stachowicz-Rybka R., 2011. Postglacjalna historia zagłębienia bezodpływowego przy jeziorze Retno na Pojezierzu Brodnickim na podstawie badań interdyscyplinarnych. [w:] *Człowiek i jego wpływ na środowisko przyrodnicze w przeszłości i czasach historycznych: V Polska Konferencja Paleobotaniki Czwartorzędu*. Górzno. 13-17 czerwca 2011. (red.) Hulisz P., Karasiewicz M.T., Noryśkiewicz A.M. Państwowy Instytut Geologiczny- Państwowy Instytut Badawczy. Warszawa: 149-157.
- Karasiewicz M.T., Juśkiewicz W., 2012. Budowa geologiczna i geneza zagłębienia bezodpływowego w rezerwacie Retno na tle najbliższego otoczenia. [w:] Karasiewicz M.T., Hulisz P., Świtoniak M., *Postglacjalna historia zagłębienia bezodpływowego w rezerwacie Retno (Pojezierza Brodnickie)*. Wyd. Nauk. UMK, Toruń.
- Karasiewicz M.t., Sobiech M., Hulisz P., Świtoniak M., 2013. Zastosowanie GIS w badaniach paleogeograficznych w rezerwacie Retno (Brodnicki Park Krajobrazowy). [w:] M. Kunz, A. Nienartowicz *Systemy informacji geograficznej w zarządzaniu obszarami chronionymi: od teorii do praktyki*. Tuchola-Toruń. 61-71.
- Kariel H.G., Draper D., 1992. Outdoor recreation in Mountains. *Geojournal*, 27, 1, 97-104.
- Kasprzak M., 2005: Tempo degradacji powierzchni dróg i ścieżek turystycznych w Karkonoszach Wschodnich. *Opera Corcontica*, 42: 17-30.
- Kasprzak M., 2006. Erozja wodna na drogach i ścieżkach turystycznych w Karkonoszach. *Przyroda Sudetów*, 9: 179-190.
- Ketchledge E.H., Leonard R.E., 1970. Impact of man on the Adirondack high country. *Conservationist*, 25(2): 14-18.
- Kępczyński K., 1973. Szata roślinna doliny dolnej i środkowej Drwęcy oraz terenów do niej przyległych. *Acta Universitatis Nicolai Copernici, Geografia IX*, 31, 123-158.

- Kępczyński K., Zielski A., 1974. Zespoły leśne jeziora Mielwo i torfowiska do niego przyległego w powiecie brodnickim. Acta Univ. N. Copern., Biologia 16:125-167.
- Kiryłuk H., Borkowska- Niszczota M., 2009. Wpływ turystyki na środowisko przyrodnicze w opinii turystów Biebrzańskiego Parku Narodowego. Economy Management (1)2009.
- Kiszka K., 2016. Dendrochronological study of the Sawicki landslide activity in the Beskid Niski Mts (Polish Fylsch Carpathians). Landform Analysis 32: 9-26.
- Klecka, A., 1937. Vliv seslapavani na asociaci trafnych porostu. Obornik Ceskoslovenske Akademie Zemedelskie, 12, 715-724.
- Klein Tank A. M. G. Wijngaard J. B. Können G. P. Böhm R. Demaree E. G. Gocheva A. Mileta M. Pashiardis S. Hejkrlik L. Kern-Hansen C. Heino R. Bessemoulin P. Müller-Westermeier G. Tzanakou M. Szalai S. Palsdottir T. Fitzgerald D. Rubin S. Capaldo M. Maugeri M. Leitass A. Bukantis A. Aberfeld R. Vanengelen A. F. V. Forland E. Miletus M. Coelho F. Mares C. Razuvaev V. Nieplova E. Cegnar T. Antoniolopez J. Dahlström B. Moberg A. Kirchhofer W. Ceylan A. Pachaliuk O. Alexander L. V. Petrovic P. 2002. Daily dataset of 20th- century surface air temperature and precipitation series for the european climate assessment. Int. J. Climatol, 22: 1441-1453.
- Klima K., Chowaniak M., 2009. The effect of slope gradient on plant cover index (C) of fodder beet crops grown on eroded loess soil. Soil Sci. Ann., 60(4):50-56. (in Polish).
- Klimaszewski K., 1973. Założenia rozwoju turystyki wodnej w Polsce w latach 1971-1985. Instytut Turystyki, Warszawa.
- Klinggraeff H.v., 1880. Verzeichniss der wichtigeren im August und September 1879 im Kreise Strasburg gefundenen Pflanzen. Ber. D. Westpr. Bot. Zool. Vereins. Danzig.
- Kojs P., Malik I., Wistuba M., Stopka R., Trąbka K. 2012. Mechanizmy wzrostu ekscentrycznego i formowania się drewna reakcyjnego w kontekście badań dendrogeomorfologicznych-wprowadzenie do nowej hipotezy. Studia i Materiały CEPL, Rogów, 30 (1): 147-156.
- Kokociński W., 2002. Anatomia drewna. Poznań
- Kolishchuk V., 1990. Dendroclimatological study of prostrate woody plants. Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences (eds E. Cook & L. Kairiukstis), pp. 394. Kluwer Academic Publishers, London, England.
- Kołodziejczyk J., 1930. Wycieczka na Pojezierze Brodnickie. PTK, Touring-Klub. Warszawa.
- Kołodziejczyk J., 1955. Pojezierze Brodnickie. SiT. Warszawa.
- Kondracki J., 2000. Geografia regionalna Polski. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa
- Kopeć S., Głąb T., 2002. Wpływ udeptywania szlaków turystycznych w Tatrach polskich na środowisko glebowe. Probl. Zagosp. Ziem Gór., 48: 285-289.
- Koprowski M., Zielski A., Skowronek T., 2011. Analiza przyrostów rocznych dwóch sosen (*Pinus sylvestris*) o nietypowej budowie strzały na terenie Nadl. Borne Sulinowo. Sylwan 155(8): 555-562.
- Koprowski M., Przybylak K., Zielski A., Pospieszńska A., 2012. Tree rings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as a source of information about past climate in northern Poland. Int J Biometeorol 56: 1-10.
- Koprowski M., Winchester V., Zielski A., 2010. Tree reactions and dune movements: Slowinski National Park, Poland. Catena 81: 55-65.
- Kostrowicki A.S., 1970. Zastosowanie metod geobotanicznych w ocenie przydatności terenu dla potrzeb rekreacji i wypoczynku. Przegląd Geograficzny. 42,4.
- Kostrowicki A.S., 1981. Metoda określania odporności roślin na uszkodzenia mechaniczne powstałe na skutek wydeptania, [w:] A. S. Kostrowicki (red.), Wybrane zagadnienia teorii i metod oceny oddziaływania człowieka na środowisko, Prace Geograficzne PAN 1981, 139, 39-72.
- Kostrzewski A., 2001, Stan badań erozji gleb na Pomorzu Zachodnim, Folia Universitatis Agriculturae Stetinensis 217, Agricultura 87, 117-124.
- Kozłowski S., 1972. Regionalne prognozowanie gospodarki zasobami przyrody. Przegląd Geograficzny. z. 3.

Kożuchowski K., 2005. Walory przyrodnicze w turystyce i rekreacji. Podręcznik akademicki. Wyd. Kurpisz. Poznań.

Krause, C., Morin, H., 1995. Changes in radial increment in stems and roots of balsam spruce (*Abies Balsamea* L. Mill.) after defoliation by spruce budworm. *The Forestry Chronicle* 71/6, 747-754.

Krause, C., Morin, H., 1999. Root growth and absent rings in mature black spruce and balsam fir, Quebec, Canada. *Dendrochronologia* 16-17, 21-35 (1998-1999).

Krawiec A., 2007. Wody podziemne Pojezierza Brodnickiego. [w:] W. Marszelewski, L. Kozłowski. *Ochrona i Zagospodarowanie Dorzecza Drwęcy Tom I. Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu. Instytut Geografii.* 199-210.

Krąpiec M., Margielewski W., 1991. Zastosowanie analizy dendrogeomorfologicznej w datowaniu powierzchniowych ruchów masowych. *Kwartalnik AGH - Geologia* 17 (1-2): 67-81, Kraków.

Krąpiec M., Margielewski W., 2000. Analiza dendrogeomorfologiczna ruchów masowych na obszarze polskich Karpat fliszowych. *Kwartalnik AGH, Geologia* 26(2): 141-171.

Krąpiec M., Rączkowski W., Gil E., Kłusek M., Janicki T., Kowalski Z., Zabuski L., 2004. Zastosowanie analizy dendrogeomorfologicznej do monitoringu obszarów osuwiskowych w Beskidzie Niskim oraz jego praktyczne wykorzystanie. Grant badawczy nr KBT 4T12B 025 26.

Krąpiec M., Rączkowski W., Danek M., Gil E., Kłusek M., Zabuski L., 2008. Monitoring dendrogeomorfologiczny osuwisk w Beskidzie Niskim. *Prace Komisji Paleogeografii Czwartorzędu Polskiej Akademii Umiejętności* 6: 173-184.

Krippendorf J., 1958. *Pojezierze Brodnickie.* SiT. Warszawa.

Krusic P., 1990. Soil erosion and tree roots response along hiking trails in the White Mountains of New Hampshire - A study performed during the first North American Dendroecological Fieldweek. Pinkham Notch Camp, Gorham, New Hampshire, August 12-19 August 1990.

Krusiec M., 1996. Wpływ ruchu turystycznego na przekształcanie rzeźby Tatr Zachodnich na przykładzie Doliny Chochotowskiej, *Czasopismo Geograficzne*, 67, 3-4, 303-320.

Kundzewicz, Z. W. Stoffel, M. Kaczka R. J., Wyźga, B. Niedźwiedź, T. Pińskwar, I. Ruiz-Villanueva, V. Łupikasza E., Czajka B., Ballesteros-Canovas J. A., Małarzewski Ł., Choryński A., Janecka K., Mikuś P., 2014. Floods at the Northern Foothills of the Tatra Mountains - A Polish-Swiss Research Project. *Acta Geophysica*, 62(3), 620-641.

Kundzewicz W. Z., Stoffel M., Kaczka R., Wyźga B., Niedźwiedź T., Pińskwar I., Ruiz-Villanueva V., Łupikasza E., Czajka B., Ballesteros-Cánovas J.A., Małarzewski Ł., Choryński A., Janecka K., Mikuś P., 2017. Floods at the northern foothills of the Tatra Mountains - A Polish-Swiss research project. *Acta Geophysica* vol. 62, 620-641.

Krause C., Eckstein D., 1993. Dendrochronology of roots. *Dendrochronologia*. 11:9-23.

Krzemień K., Gorczyca E., 2005. Wpływ turystyki na przekształcanie rzeźby Tatr, [w:] B. Domański, S. Skiba (red), *Geografia i sacrum*, tom II, IG i GP UJ, Kraków 2005, 77-86.

Krzymowska-Kostrowicka A., 1999. *Geoekologia turystyki i wypoczynku*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 1999.

Krzymowska-Kostrowicka A., Kostrowicki A.S., 1985. Środowisko przyrodnicze, jako obiekt użytkowania turystycznego. [w:] *Warunki przyrodnicze rozwoju turystycznych form rekreacji. Monografii, podręczniki i skrypty AWF, Poznań.* 209.

Kurek W., 2005. Wpływ turystyki na środowisko przyrodnicze obszarów górskich. [w:] Domański B., Skiba S. (red.), 2005, *Geografia i Sacrum*, tom 2, IGiGP UJ, Kraków. 95-104.

Kurek W., 2008. *Turystyka*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, 448-453.

LaMarche Jr. V. C., 1961. Rate of slope erosion in the White Mountains, California. *Geological Society of America Bulletin* 72: 1579-1580.

LaMarche Jr. V. C., 1963. Origin and geologic significance of buttress roots of bristlecone pines, White Mountains, California, U.S. Geological Survey Professional Paper 475C, C149-C150.

- LaMarche Jr. V. C., 1968. Rates of slope degradation as determined from botanical evidence, White Mountains, California, U.S. Geological Survey Professional Paper 32-1, 341-377.
- Langer G., 1993. Tourismus und Landschaftsbild: Nutzen und Kosten der Landschaftspflege, Tourismus und Dienstleistungswirtschaft Serie, Kulturverl., Wien.
- Laska M., Kaczka R., 2010. Dendrochronologiczna rekonstrukcja lawin w Tatrach Wysokich. Nauka a zarządzanie obszarem Tatr i ich otoczeniem, tom I. Zakopane 2010.
- Leliwa-Piotrowicz J., 1935(2016). Pojezierze Brodnickie. Gmina Kurzętnik.
- Letkiewicz B., Zakrzewski B., 2007. Bezpośrednie zagrożenie powodzią od rzeki Drwęcy. [w:] W. Marszelewski, L. Kozłowski. Ochrona i Zagospodarowanie Dorzecza Drwęcy Tom I. Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu. Instytut Geografii. 227-236.
- Lempa M., Kaczka R. J., Rączkowska Z., 2014. Rekonstrukcja aktywności lawin śnieżnych w Białym Żlebie w (Tatry Wysokie) na podstawie przyrostów rocznych świerka pospolitego (*Picea abies* L. Karst.). Spojrzenie w głąb słoja - anatomia drewna w badaniach dendrochronologicznych. Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej 40(3): 105-112.
- Lempa M., Kaczka R.J., Janecka K., Rączkowska Z., 2015. Dendrogeomorphological study on snow avalanches in the Tatra Mountains (Southern Poland) [w:] R.M. Wilson, G. Helle, H. Gärtner (red.), TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology, Volume 13. Scientific Technical Report 15/06, Potsdam: GFZ German Research Centre for Geosciences, pp. 110-115.
- Lempa M., Kaczka R. J., Rączkowska Z., Janecka K., 2016. Combining tree-ring dating and geomorphological analyses in the reconstruction of spatial patterns of the runout zone of snow avalanches, Rybi Potok Valley, Tatra Mountains (Poland). Geographia Polonica Vol. 89 No. 1 (2016). 31-45.
- Lennarts S., Taxacher G., 1995. Tourismusentwicklung in den Alpen: Bilanz, Gefahren, Perspektiven, Dokumentation eines Studeinprojekts der Thomas-Morus-Akademe, Bensberg.
- Leonard R.E., Whitney A.M., 1977. Trail transect: a method for documenting trail changes. Res. Pap. NE-389. Broomall, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, 1-8.
- Leszczycki S., 1977. Geografia a planowanie przestrzenne i ochrona środowiska, PWN Warszawa.
- Leung Y., Marion J.L., 2000. Recreation impacts and management in wilderness: a state-of-knowledge review, USDA Forest Service Proceedings 2000, RMRS-P-15-VOL-5, 23-48.
- Lewandowski W., 2003. Ekologia krajobrazu a turystyka ekologiczna, [w:] Pietrzak M. (red.), Krajobraz-Turystyka- Ekologia. Problemy Ekologii Krajobrazu- Tom XI. Bogucki Wyd. Naukowe, Leszno, 153-158.
- Lichwa M., Wetniak A., 2003. Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000 arkusz Skarlin wraz z objaśnieniami, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Liddle M.J., 1975. Selective review of the ecological effects of human trampling on natural ecosystems, Biological Conservation, 7, 17-34.
- Liddle M.J., 1997. Recreation ecology: the ecological impact of outdoor recreation and ecotourism, Chapman&Hall, London.
- Liddle M. J., Scorgie H.R.A., 1980. The effect of recreation on freshwater plants and animals: a review. Biological Conservation, 7, 183-206.
- Lityński M., Goleń J., 2003. Drwęca oraz Wel i Pojezierze Brodnickie. Polskie Towarzystwo Turystyczno-Krajoznawcze. Warszawa.
- Lopez- Saez J.S., Corona C., Stoffel M., Rovéra G., Astrade L., Bérger F., 2011. Mapping of erosion rates in marly badlands based on coupling of anatomical changes in exposed roots with slope maps derived from LIDAR data. Earth Surf. Process. Landf. 36 (9): 1162-1171.
- Lopez Saez J., Corona C., Stoffel M., 2012a. Probability maps of landslide reactivation derived from tree-ring records: Pra Bellon landslide, southern French Alps. Geomorphology 138: 189-202.

- Lopez Saez J., Corona C., Stoffel M., 2012b. Dendrogeomorphic reconstruction of past landslide reactivation with seasonal precision: the Bois Noir landslide, southeast French Alps. *Landslides* 9: 189-203.
- Lopez Saez J., Corona C., Stoffel M., Berger F., 2014. Assessment of forested shallow landslide movements coupling tree ring records from stems and exposed roots. *Géomorphologie: relief, processus, environnement* 2. 159-174.
- Lucia A., Laronne J., Martin-Duque J.F., 2011. Geodynamic processes on sandy slope gullies in central Spain field observations, methods and measurements in a singular system. *Geodin Acta* 24:61-7.
- Lukashina N., Amirkhanov M.M., Anisimov V., Trunev A., 1996. Tourism an environmental degradation in Sochi, Russia, *Annals of Tourism Research*, 23, 3, 654-665.
- Lutz H.J., 1945. Soil conditions of picnic grounds in public forest parks. *J. For.*, 74(1): 35-37.
- Luo M., Zhou Y., Wang K.K., 2011. Response of Anatomical Features of Broadleaf Tree Root in Karst Area to Soil Erosion. *Procedia Engineering* 18 (2011) 232 - 239.
- Łajczak A., Michalik S., Witkowski Z., 1996. Wpływ narciarstwa i turystyki pieszej na przyrodę masywu Pilska, *Studia Naturae* nr 41.
- Łuczyńska-Bruzda M., 1966. Parki narodowe a turystyka. *Ziemia 1965, Sport i Turystyka*, Warszawa.
- Łuczyńska-Bruzda M., 1969. Charakterystyka przestrzenna parków narodowych i wynikające z niej zadania planowania przestrzennego. *Ochrona Przyrody*, R.34.
- Maciaszek W., Zwydak M., 1992a. Turystyczna degradacja gleb w punktach widokowych na wybranych szczytach beskidzkich, *Zeszyty Naukowe AR, Kraków*, 22, 17-27
- Maciaszek W., Zwydak M., 1992b. Degradacja górskich gleb leśnych w pobliżu szlaków turystycznych. *Zeszyty Naukowe AR, Kraków*, 22, 3-16
- Majer-Durman A., 2013. Wpływ turystyki wypoczynkowej na środowisko przyrodnicze widziane oczami turysty. *Problemy Ekologii Krajobrazu. Rekreacja w krajobrazach o wysokim potencjale. Tom XXXIV*. 169-174.
- Majewski M., 2014. Wykorzystanie eksperymentu terenowego w badaniach erozji wodnej gleb w zlewni Chwalimskiego Potoku (Pojezierze Drawskie, Górna Parsęta). *Prace Geograficzne*, 138, 57-66.
- Maleval V., Astrade L., 2003. Le modelage d'une cuvette lacustre artificielle après son remplissage : quantification et chronologie de l'évolution des rives du lac de Saint-Pardoux. *Revue de Géographie Alpine / Journal of Alpine Research, Association pour la diffusion de la recherche alpine*, 2003, 91 (1), pp.29-40
- Malik I., 2005a. Przebieg erozji wąwozowej na podstawie datowania odstonięcia korzeni drzew- na przykładzie badań z Wysoczyzny Proboszczowskiej (Wyżyna Śląska), *Przegląd Geograficzny*, 77, 3, 367-381.
- Malik I., 2005b. Dendrochronologiczny zapis transformacji koryta rzeki meandrującej na przykładzie Małej Panwi (Równina Opolska). *Czasopismo Geograficzne*, 76 (3): 165-182.
- Malik I., 2006. Contribution to understanding the historical evolution of meandering rivers using dendrochronological methods: example of the Mała Panew River in southern Poland. *Earth Surf. Process and Landforms*, 31: 1227-1245.
- Malik I., 2008a. Dendrochronologiczny zapis współczesnych procesów rzeźbotwórczych kształtujących stoki i doliny rzeczne wybranych stref krajobrazowych Europy Środkowej, *Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego Nr 2566, Wyd. UŚ, Katowice*, 1-156.
- Malik I., 2008b. Dating of small gully formation and establishing erosion rate in old gullies under forest by means of anatomical changes in expose tree roots (Southern Poland). *Geomorphology*, 93 (3-4), 421-436.
- Malik I., Ciszewski D. 2008. Meandering river bank erosion and channel lateral migration recorded in black alder (*Alnus glutinosa*) tree rings. *Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology*, 7: 133-139.
- Malik I., Gerold I., 2006. Rola drzew w kształtowaniu rzeźby wąwozów lessowych na przykładzie Wysoczyzny Proboszczowickiej (Wyżyna Śląska), *Czasopismo Geograficzne*, 7, 327-342.

- Malik I., Matyja M., 2008. Bank erosion history of a mountain stream determined by means of anatomical changes in exposed tree roots over the last 100 years (Bílá Opava River-Czech Republic), *Geomorphology*, 98 (1-2): 126-142.
- Malik I., Owczarek P., 2005. Wykorzystanie odstoniętych korzeni drzew do określenia przebiegu erozji zboczy dolin i dostawy zwierzelin do koryt rzek górskich (Sudety Wschodnie), *Czasopismo Geograficzne*, 76 (3): 101-116.
- Malik I., Owczarek P., 2007. Dendrochronologiczny zapis erozji koryt potoków górskich w sąsiedztwie zapór przeciw rumowiskowych na przykładzie Černego Potoku (Deseniki-Sudety Wschodnie). *Przegląd Geograficzny*, 79, 2: 313-334.
- Malik I., Owczarek P., Migoń P., 2009. Rock fall as a source in sediment in the forested mid-mountain zone in the Kamienne Mountains (Middle Sudetes - SW Poland). [w:] Kaczka R, Malik I, Owczarek P, Gärtner H, Helle G, Heinrich I (eds.): *TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology*, Vol. 7. GFZ Potsdam, Scientific Technical Report STR 09/03. 176-180.
- Malik I., Wistuba M., 2012. Dendrochronological methods for reconstructing mass movements - an example of landslide activity analysis using tree-ring eccentricity, *Geochronometria* 39(3): s. 180-196.
- Marin, P., Filion, L., 1992. Recent dynamics of subarctic dunes as determined by tree-ring analysis of white spruce, Hudson Bay, Québec. *Quaternary Research* 38, 316-330.
- Marion J. L., Olive N., 2006. Assessing and understanding trail degradation: Results from Big South Fork National River and Recreational Area. National Park Service, Final Research Report. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 1-80.
- Marion J.L., Leung Y.F., 2001. Trail resource impacts and an examination of alternative assessment techniques. *Journal of Park and Recreation Management*, 19, 3: 17-37.
- Marion J.L., Leung Y.F., Nepal S.K., 2006. Monitoring trail conditions: new methodological considerations. *Visitor Impact Monitoring*, 23, 2: 36-49.
- Marsz A., 1972. Metoda obliczenia pojemności rekreacyjnej ośrodków wypoczynkowych na Niżu. PTPN, Prace Komisji Geograficzno-Geologicznej, t. XII, z.3. Poznań.
- Marszelewski W., Szczepaniak R., 1991. Przewodnik wędkarski po jeziorach brodnickich. Inowrocław-Toruń.
- Marszelewski W., Adamczyk A., 2004. Changes in the area of the Mazurian lakes in the light of the cartographic materials at scale 1:25 000, *Limnological Review*, 4, 167 - 176.
- Matczak A., 1988. Metoda obliczania pojemności rekreacyjnej ośrodków wypoczynkowych na niżu. Prace Komisji Geograficzno- Geologicznej PTPN, XII, 3, 73.
- Matczak A., Szymańska D., 1997. Studia nad strukturą przestrzenno-funkcjonalną miasta- przykład Brodnica. Uniwersytet Mikołaja Kopernika.
- Mattheck C. 1991. *Trees-the mechanical design*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Mattheck C., Breloer H., 1995. *The body language of trees*. HMSO. London.
- Matulewski P., 2011. Ocena funkcjonowania turystyki kajakowej w regionie brodnickim oraz jej wpływ na wybrane elementy środowiska przyrodniczego, Praca magisterska wykonana w Zakładzie Geografii Kompleksowej Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, pod kierunkiem prof. zw. hab. Leona Kozackiego, UAM Poznań 2011.
- Matulewski P., 2013a. Topologiczna analiza przestrzenna struktury sieci szlaków kajakowych w powiecie brodnickim.[w:] *Badania Fizjograficzne. R.IV- Seria A- Geografia Fizyczna (A64)*, Wydawnictwo Naukowe Bogucki, Poznań: ISBN 978-83-7654-221-8, 181-196
- Matulewski P., 2013b. Analiza przestrzenna szlaków kajakowych powiatu brodnickiego. [w:] *Młodzi naukowcy dla Polskiej Nauki część VIII. Nauki Przyrodnicze Tom IV*, Kuczera M. (red). Wydawnictwo Creativetime, Kraków: ISBN 978-83-63058-22-7, 228-236
- Matulewski P., 2013c. Analiza kajakowego ruchu turystycznego na szlakach wodnych w gminie Górzno. [w:] *Nowe trendy w naukach przyrodniczych 3. Creative Science- Monografia 2012. Tom I*, Kuczera M. (red). Wydawnictwo Creativetime, Kraków.

- Matulewski P., 2013d. Analiza szlaków turystycznych w powiecie brodnickim. [w:] Nowe trendy w naukach przyrodniczych 4. Creative Science- Monografia 2013. Tom II, Kuczera M. (red). Wydawnictwo Creativetime, Kraków.
- Matulewski P., 2014a. Turystyka w rezerwach przyrody na obszarze regionu brodnickiego. [w:] Współczesne problemy i kierunki badawcze w geografii, Tom 2. Wydawnictwo Naukowe UJ, IGIGP UJ Kraków.
- Matulewski P., 2014b. Walory turystyczne lasów Pojezierza Brodnickiego.[w:] red. Terlecka M., Sierakowski M., Monografia naukowa: Wybrane ekologiczno-socjologiczne aspekty ochrony środowiska, Wydawnictwo Armagraf Krosno, (IV) 2014.
- Matulewski P., 2016. Negatywny wpływ turystyki na środowisko przyrodnicze. Przegląd literatury. Interdyscyplinarnie o ochronie środowiska. Teoria i praktyka - wybrane problemy, (red.) Terlecka M. K., Kleśta A., Tom 2. 2015, 45-60.
- Matulewski P. Malinowska-Limanówka M. Szymura P. 2015. Wpływ ruchu turystycznego na wybrane właściwości gleb na szlaku turystycznym na terenie Pojezierza Brodnickiego. Geograficzne aspekty rozwoju turystyki. Prace z zakresu turystyki i rekreacji. 65-80.
- Mazurski K.R., 1972. Mikrorelief szlaków karkonoskich, Opera Corcontica, nr 9, 7-20.
- McAuliffe JR., Scuderi LA., McFadden LD., 2006. Tree-ring record of hillslope erosion and valley floor dynamics: Landscape responses to climate variation during the last 400yr in the Colorado Plateau, northeastern Arizona. *Global and Planetary Change* 50: 184-201.
- McCaroll D., Loader N.J., 2004. Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews*. Volume 23, Issues 7-8, 771-801.
- Meinecke E.P., 1928. A report upon the effect of excessive tourist Travel on the California Redwood parks. California Dept. Nat. Resources Div. Parks., 20.
- Megahan W.F., Seyedbagheri K.A., Dodson P.C., 1983. Long term erosion on granitic roadcuts based on exposed tree roots. *Earth Surf Process Landf*, 8 (1983), pp. 19-28
- Mendyk Ł., 2013. Antropogeniczne przekształcenia gleb hydrogenicznych w obszarach młodoglacjalnych na przykładzie Pojezierza Brodnickiego. [w:] M. Jakiel, (red.), Środowisko geograficzne w badaniach młodych geografów, IGIGP UJ, Kraków. 93-102.
- Messerli P., 1987. The development of tourism in the Swiss Alps: Economic, societal and environmental effects. *Mountain Research and Development* 7,1, 13-23.
- Meyer K.G., 2002. Managing degraded off-highway vehicle trails in wet, unstable, and sensitive environments. Rpt No.2E22A68. USDA Forest Service, Technology and Development Program, Missoula, MT.
- Michalik S., 1974. Ochrona przyrody a rekreacja. *Chrońmy Przyrodę Ojczystą* , 30, nr 1.
- Michałowicz P., Malik I., Wistuba M., 2014. Dendrochronologiczny zapis niewielkich trzęsień ziemi występujących na Podhalu. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie*. R.16, 40/3/2014. 203-210.
- Mieczkowski Z., 1995. Environmental issues of tourism and recreation, Univ. Press of America, Lanham.
- Migoń P., 2009. Geomorfologia. Wyd. Naukowe PWN. Warszawa.
- Migoń P., Kacprzak A., Malik I., Kasprzak M., Owczarek P., Wistuba M., Panek T., 2014. Geomorphological, pedological and dendrochronological signatures of a relict landslide terrain, Mt Garbatka (Kamienne Mts), SW Poland. *Geomorphology* 219: 213-231
- Mika M., 2000. Turystyka jako czynnik przemian środowiska przyrodniczego- stan badań. *Prace geograficzne* 106. 73-98.
- Mika M., 2004. Turystyka a przemiany środowiska przyrodniczego Beskidu Śląskiego, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków.
- Mikuś P., Wyźga B., Kaczka R. J., Walusiak E., Zawiejska J., 2013. Islands in a European mountain river: Linkages with large wood deposition, flood flows and plant diversity, *Geomorphology* 202:115-127.
- Miłoszewski H., 2011. Znakowanie szlaków turystycznych. Oddział Miejski Polskiego Towarzystwa Turystyczno- Krajoznawczego im. Mariana Sydowa w Toruniu. Historia działalności w latach 1921-2010.

- Mirek, Z., 1996. Antropogeniczne zagrożenia i przekształcenia środowiska przyrodniczego. [w:] Mirek, Z. (red.). Przyroda TPN. Tatry i Podtatrze. Tom III, 1996, Wyd.: TPN, 595-617.
- Mirek, Z., Piękoś-Mirkowa, H., 1980. Oddziaływanie turystyki na szatę roślinną Tatr. Wierchy 48, 20-34.
- McCarroll D., Loader N. J. 2004. Stable isotopes in tree rings. Quaternary Science Reviews 23: 771-801.
- McCord V.A.S., 1987. Late Holocene sediment yield and transport in a northern Arizona drainage basin reconstructed by tree-ring analysis. U.S. Department of Energy, Publication CONF-8608144, pp. 213-223.
- Momoli R.S., Cooper M., Tomazello Filho M., Silveira Lobão M., 2012. Application of dendrogeomorphology on the study of soil sediment deposition in the stems of Guarea guidonea trees in a disturbed riparian forest in Goiás state, Brasil. Sci. For., Piracicaba, v. 40, n. 93
- Monz C., 2000. Recreation resource assessment and monitoring for mountain regions. [w:] P.M. Godde, M.F. Price, F.M. Zimmermann (red.), Tourism and development in mountain regions. National Outdoor Leadership School, 288 Main Street, Lander, WY 82520, USA.
- Morel P., Corona C., Lopez-Saez J., Rovéra G., Dewez T., Stoffel M., Berger F., 2017. Quantifying coastal erosion rates using anatomical change in exposed tree roots at Porquerolles Island (Var, France). Geophysical Research Abstracts Vol. 19, EGU2017-13724, 2017.
- Morawska M., 2012. Zapis erozji wąwozowej w anatomii drewna odłoniętych korzeni drzew w Dolinie Błędzianki (Pojezierze Litewskie). Studia i Materiały CEPL w Rogowie R. 14. Zeszyt 1 (30) / 2012.
- Morawska M., Wrońska-Wałach D., 2014. Dendrogeomorphological analysis of gully erosion in different types of landscapes. Examples from Szeskie Hills and Gorce Mountains. [w:] Gärtner H., Rozenberg P., Montés P., Bertel O., Helle G., Heinrich I. (red.) (2012): TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology, Vol. 10. GFZ Potsdam, Scientific Technical Report STR 12/03, Potsdam, p. 119 - 126.
- Myga-Piatek U., Jankowski G. 2009. Wpływ turystyki na środowisko przyrodnicze i krajobraz kulturowy - analiza wybranych przykładów obszarów górskich. Problemy Ekologii Krajobrazu. T.XXV, 27-38.
- Naylor M.C.W., 1977. The impact of recreation on the vegetation and soils of Kinder Scout, Discussion Papers in Conservation 16, University College, London.
- Nawrocka N., 2013. Analiza dendrogeomorfologiczna drzew różnych gatunków z obszaru osuwiska „L. Sawickiego” w Szymbarku, Beskid Niski, Karpaty Zewnętrzne. Folia Quaternaria 81: 175-188.
- Nepal S.K., 2003. Trail impacts in Sagarmatha (Mt. Everest) National Park, Nepal: a logistic regression analysis. Environmental Management, 32(3): 312-321
- Niewiarowski W., 1968. Morfologia i rozwój pradoliny i doliny Drwęcy. Studio SOC. Scient. Toruń 1968 Sec. C, vol. 6, nr 5. Toruń.
- Niewiarowski W., 1973. Rzeźba terenu i budowa geologiczna doliny Drwęcy i jej otoczenia (w granicach województwa bydgoskiego) i ich wpływ na zagrożenie erozją wodną gleb, Acta Universitatis Nicolai Copernici, Geografia 9, Toruń. 123-158.
- Niewiarowski W., 1983. Zarys morfogenezy Pojezierza Brodnickiego. [w:] Przewodnik wycieczek Zjazdu Geografów Polskich. UMK, Toruń.
- Niewiarowski W., 1986. Morfogeneza sandru brodnickiego na tle innych form polodowcowych Pojezierza Brodnickiego, Acta Universitatis Nicolai Copernici, Geografia 19, Toruń, 3-30.
- Niewiarowski W. 1987. Development of Lake Strażym (Brodnica Lake District, Northern Poland) during the Late Glacial and Holocene. Acta Palaeobotanica 27(1): 251-268.
- Niewiarowski W., 1989. Wahania poziomu jezior w późnym glacie i holocenie na przykładzie jezior Pojezierza Brodnickiego. Oceanological Studies and Reviews 56: 277-288.
- Niewiarowski W., 1995. Główne rysy rzeźby terenu Pojezierza Brodnickiego oraz problem wahań poziomu jezior w okresie późnego glaciału i holocenu. [w:] Geomorfologia i hydrologia Pojezierza Brodnickiego i Dobrzyńskiego oraz osobliwości przyrodnicze parków krajobrazowych. Przewodnik wycieczek nr 3, 44, Zjazd PTG. Toruń: 17-27.
- Niewiarowski W., 1999. O metodach określenia zmian i wahań poziomu jezior. AUNC Toruń, Geografia XXIX (103): 59-76.

- Niewiarowski W., Wysota W., 1986, Poziomy wysoczyznowe Wysoczyzny Brodnickiej, AUNC, Geografia 19, 60, 39-46.
- Noryśkiewicz B., 1987a. History of vegetation during the Late-Glacial and Holocene in Brodnica Lake District in the light of pollen analysis of Lake Strażym deposits. *Acta Palaeobotanica* 27(1): 283-304.
- Noryśkiewicz B., 1987b. History of Vegetation at the Brodnica Lake District in the Light of Pollen Analysis of Bottom Deposits of Strażym Lake. *Wissenschaftliche Zeitschrift. Ernst-Moreith-Arndt-Universität Greifswald. Mathematisch-Naturwissenschaftliche. Reihe* 36(2-3): 38-40.
- Noryśkiewicz A. M. 2012. Historia roślinności i klimatu zarejestrowana w małym bezodpływowym zagłębieniu w rezerwacie Retno. [w:] M. T. Karasiewicz, P. Hulisz, M. Świtoniak (red.), *Postglacjalna historia zagłębienia bezodpływowego w rezerwacie Retno (Pojezierze Brodnickie)*, 87-107. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń.
- Novak K., de Luis M., Čufar K., Raventós J., 2011. Frequency and variability of missing tree rings along the stems of *Pinus halepensis* and *Pinus pinea* from a semiarid site in SE Spain. *J. Arid Environ.* 75, 494-498.
- Obmiński Z. 1970. Zarys ekologii. W: Białobok S. (red.). *Sosna zwyczajna, Nasze drzewa leśne.* 1:152-231, Warszawa-Poznań.
- Okołów Cz., 1978. Uszkodzenia systemów korzeniowych drzew spowodowane nadmiernym ruchem turystycznym w Białowieskim Parku Narodowym. *Sylwan* 122 (11): 63-71.
- Olesiak A., Tomusiak R., Kędziora W., Wojtan R., 2014. Charakterystyka dendrochronologiczna drzew rosnących na wydmach nadmorskich. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie.* R.16, 40/3/2014. 211-219.
- Olive N.D., Marion J.L., 2009. The influence of use-related, environmental, and managerial factors on soil loss from recreational trails. *Journal of Environmental Management*, 90: 1483-1493.
- Orłowicz M., 1924. *Ilustrowany przewodnik po województwie pomorskiem.* Polska Biblioteka Turystyczna. Wyd. Książnica Polska. Lwów-Warszawa.
- Ostrowski S., 1976. Rozwój krajowego ruchu turystycznego w Polsce w latach 1971-1975. *Zeszyty Naukowe Instytutu Turystyki nr 4.* Warszawa.
- Owsiak J., 1975. Pojemność turystyczna akwenów i szlaków wodnych. *Zeszyty Naukowe Instytutu Turystyki, II, 2-3.*
- Owsiak J., Piskorski Z., 1990. Metoda obliczania pojemności turystycznej obszarów strefy pojeziernej (Na przykładzie Brodnickiego Parku Krajobrazowego). [w:] *Turystyka jako czynnik rozwoju społeczno-gospodarczego. Roczniki Centralnego Programu Badań Podstawowych* 08.06.Warszawa.140-148.
- Owsiak J., Sewerniak J., 1995. *Turystyka w Brodnickim Parku Krajobrazowym. Przewodnik wycieczki nr 3,* [w:] 44 Zjazd Polskiego Towarzystwa Geograficznego, Toruń. 35-40.
- Owsiak J., Sewerniak J., 2004. Drogi wodne w infrastrukturze turystycznej Polski. *Problemy turystyki t.27 nr 3/4.* Instytut Turystyki, Warszawa, str.61-80.
- Pacione M., 1977. Tourism: its effects on the traditional landscape in Ibiza and Formentera, *Geography*, 62, 43-47.
- Papciak T., Malik I., Krzemień K., Wistuba M., Górczyca E., Wrońska-Wałach D., Sobucki M., 2015. Precipitation as a factor triggering landslide activity in the Kamień massif (Beskid Niski Mts, Western Carpathians). *Bulletin of Geography, Physical Geography Series.* T.8(1). 5-17.
- Pawlik Ł., Migoń P., Owczarek P., Kacprzak A., 2013. Surface processes and interactions with forest vegetation on a steep mudstone slope, Stołowe Mountains, SW Poland. *Catena*, 2013. Vol.2013.
- Pawlik Ł., Mailk I., Ślęzak A., Wistuba M., 2017. Life encroaching rocks - dendrogeomorphological evidence of biomechanical weathering caused by tree roots. Conference paper. Conference: 9th International Conference on Geomorphology, At New Delhi, India.
- Pawlik Ł., Musielok Ł., Migoń P., Wrońska-Wałach D., Duszyński F., Kasprzak M., 2017. Deciphering the history of forest disturbance and its effects on landforms and soils : lessons from a pit-and-mound locality at Rogowa Kopa, Sudetes, SW Poland. *Bulletin of Geography, Physical Geography Series.* T.12(1). 59-81.

- Pelfini M., Santilli M., 2006. Dendrogeomorphological analyses on exposed roots along two mountain hiking trails in the Central Italian Alps, *Geogr. Ann. A*, 88A(3), 223-236.
- Perez-Rodriguez R., Marques M. J., Bienes R., 2007. Use of dendrogeomorphological method in *Pinus halepensis* to estimate the soil erosion in the South East of Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*, 378: 156-160.
- Peterson B.G, Carl P., Boudt K., Bennett R., Ulrich J., Zivot E., Cornilly D., Hung E., Lestel M., Balkissoon K., Wuertz D., 2015. Package 'PerformanceAnalytics'.
- Phipps, R.L., Johnson G.P., Terrio P.J., 1995. Dendrogeomorphic Estimate of Changes in Sedimentation Rate along the Kankakee River Near Momence, Illinois. U.S. Geological Survey Water Resources Investigation 94-4190, Urbana, IL.
- Piégay, H., Hupp, C.R., Citterio, A., Dufour, S., Moulin, B., Walling, D.E., 2008. Spatial and temporal variability in sedimentation rates associated with cutoff channel infill deposits: Ain River, France. *Water Resources Research* 44, W05420.
- Piękoś-Mirkowa H., Mirek Z., 1982. Flora synantropijna w otoczeniu obiektów turystycznych w Tatrach. *Studia Naturae*, A, 22, Zakład Ochrony przyrody i Zasobów Naturalnych PAN, Kraków, 133-197.
- Pignatti S., 1993. Impact of tourism on the mountain landscape of central Italy. *Landscape and Urban Planning*. 24(1-4), 49-53.
- Poesen J., 2011. Challenges in gully erosion research. *Landform Analysis*. 17:5-9.
- Poesen J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., Valentin, C., 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 50, 91-113.
- Poręba G., Malik I., Wistuba M., 2014. Dendrochronologiczny i geochemiczny zapis erozji i sedymentacji w wąwozach lessowych (przykład z Wysoczyzny Proboszczowickiej), *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej w Rogowie* 16(40): s. 113-121.
- Price M.F., 1981. *Mountain and man: a study process and environment*, University of California Press, Berkeley.
- Price M.F., 1992. Patterns of the development of tourism in mountain environments, *Geojournal* 27,1,87-96.
- Prayag G., Brittnacher A., 2014. Environmental Impacts of Tourism on a French Urban Coastal Destination: Perceptions of German and British Visitors. *Tourism Analysis*. Volume 19 (4). 461-475.
- Prędko R. 2000. Ocena zniszczeń środowiska przyrodniczego Bieszczadzkiego Parku Narodowego w obrębie pieszych szlaków turystycznych w latach 1995-1999- porównanie wyników monitoringu. *Roczniki Bieszczadzkie* 8: 343-252.
- Prędko R. 2001. Przemiany właściwości powietrzno-wodnych gleb w obrębie pieszych szlaków turystycznych Bieszczadzkiego Parku Narodowego. *Roczniki Bieszczadzkie* 9: 225-236.
- Prędko R., 2002. Wpływ ruchu turystycznego na teksturę oraz właściwości wodne gleb w obrębie szlaków pieszych Bieszczadzkiego Parku Narodowego, [w:] J. Partyka (red.), *Użytkowanie turystyczne parków narodowych. Ruch turystyczny- zagospodarowanie- konflikty- zagrożenia*. Ojców, 762-770.
- Pröbstl U., 1990. Belastung von Oekosystemen durch Freizeit und Erholung, *Der Schriftreihe des Deutschen Rates für Landschaftspflege*, 57.
- Przybylak R., Maszewski R., 2009. Zmienność cyrkulacji atmosferycznej w regionie bydgosko-toruńskim w latach 1881-2005. *Acta Agrophysica* 2009, 14(2), 427-447.
- Przybylski T., 1993. Ekologia. [w:] Białobok S., Boratyński A., Bugała W. (red.). *Biologia sosny zwyczajnej*. Wyd. Sorus, Poznań-Kórnik.
- Pstrocka-Rak M., 2017. *Przyrodnicze uwarunkowania turystyki pieszej w Karkonoskim Parku Narodowym w aspekcie chłonności i pojemności turystycznej*. Wrocław 2017.
- Ptaszycka- Jackowska D., 1979. O podziale rezerwatów pod kątem ich wykorzystania turystycznego. *Chrońmy Przyrodę Ojczyzną*. z.4.
- Puwalski K., 2007. *Przyroda powiatu nowomiejskiego*. Starostwo Powiatowe w Nowym Mieście Lubawskim. Polskie Wydawnictwo Reklamowe.

- R Development Core Team. 2007. R: a language and environment for statistical computing. R. Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN 3-900051-07-0, URL: <http://www.r-project.org>.
- Rdesińska I., 1968. Monografia geograficzno-gospodarcza Brodnicy, praca magisterska wykonana w Instytucie Geografii UMK w Toruniu, 34.
- Rouphael A.B., Inglis G.J., 1997. Impact of recreational scuba diving at sites with different reef topographies, *Biological Conservation*, 82 (3), 329-336.
- Rączkowska Z., Kozłowska A., 2010. Wpływ turystyki na rzeźbę i roślinność przy ścieżkach w otoczeniu Kasprowego Wierchu, *Nauka a zarządzanie obszarem Tatr i ich otoczeniem*, Zakopane, tom III, 21-28.
- Regel S., 1975. Chłonność obszarów turystyczno-wypoczynkowych. *Zeszyty naukowe Instytutu Turystyki*, II, 2-3, 109-117.
- Regel S., Regel K., Dysarz R., Zwoliński A., 1972. Wskaźniki chłonności na obszarach turystycznych. Bydgoszcz.
- Remisz J., 2012. Morfodynamika stoków usypiskowych Ostrzycy i Kalwarii k. Barda (Sudety). *Studia i Materiały CEPL w Rogowie*. R.13, 1/0/2012. 176-184.
- Remisz J., Bijak S., 2011. Stoki usypiskowe Ostrzycy i ich aktywność w świetle badań dendrogeomorfologicznych. *Przyroda Sudetów*, 14: 197-206.
- Remisz J., Bijak S., 2012. Dendrochronologiczny zapis aktywności stoków usypiskowych Suchawy i Kruczej Skąły (Sudety Środkowe). *Przyroda Sudetów*, 15: 209-218.
- Remisz J., Bijak S., Parzóch K., Witek M., 2014. Czy dało się przewidzieć? - osuwisko na Średniaku w świetle informacji z przyrostów rocznych. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie*. R.16, 40/3/2014. 122-129.
- Remisz J., Migoń P., Malik I., Owczarek P., 2009. Stoki usypiskowe w polskiej części Sudetów - rozmieszczenie i wiek. [w:] A. Kostrzewski, R. Paluszkiwicz (red.), *Geneza, litologia i stratygrafia utworów czwartorzędowych*, t. V. UAM, Seria Geografia 88: 447-465.
- Romeril M., 1989. Tourism and the environment- accord or discord. *Tourism Management*, 10 (3), 204-208.
- Rozko L., 1972. Geomorfologia. W: *Województwo bydgoskie*. PWN Poznań.
- Root J. D., Kapnik L. J., 1972. Trail conditions along a portio of the Great Divide trail route, Alberta and British Columbia Mountains (Research Report No. 72-5).
- Róg Z., 1985. Wpływ turystyki na leśne środowisko glebowe, *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Nauki Techniczne nr 50, Inżynieria Środowiska nr 1*, Białystok.
- Róg Z., Uggla H., Uggla Z., 1980. Wpływ wydeptywania na właściwości gleb leśnych, *Roczniki Gleboznawcze*, t.21., z 3/4.
- Rubiales J.M., Bodoque J.M., Ballesteros J.A., Díez-Herrero A., 2008. Response of *Pinus sylvestris* roots to sheet-erosion exposure: an anatomical approach. *Nat. Hazards Earth Syst.Sci.*, 8: 223-231.
- Ruiz-Villanueva V., Díez-Herrero A., Stoffel M., Bollschweiler M., Bodoque J.M., Ballesteros J.A., 2010. Dendrogeomorphic analysis of Flash floods in a small ungauged mountains catchment (Central Spain), *Geomorphology*, 118: 383-392.
- Rusiecki J., 1981. *Szlakiem po Drwęcy*. Krajowa Agencja Wydawnicza. Gdańsk.
- Rzepecka A., Czajka B., Mikuś P., Kaczka R.J., Wyźga B. 2012. Rozwój kępy o złożonej strukturze w zwirodennym rzece górskiej. Wyniki analiz dendrochronologicznych i kartograficznych. *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej, Rogów* 1(30).
- Savidge, R.A., 2000. Intrinsic regulation of cambial growth. *J. Plant Growth Regul.* 20, 52-77.
- Schindelin J., Arganda-Carreras I., Frise , 2012. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis, *Nature methods* 9(7): 676-682.
- Schneuwly D.M., Stoffel M., 2008. Spatial analysis of rockfall activity, bounce heights and geomorphic changes over the last 50 years - A case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology*, 102, 522-531.

- Schneuwly D.M., Stoffel M., Bollschweiler M. 2008. Formation and spread of callus tissue and tangential rows of resin ducts in *Larix decidua* and *Picea abies* following rockfall impacts. *Tree Physiology*, 29: 281-289.
- Schrader J., Bab, K., May S.T., Palme K., Bennett M., Bhalerao R.P., Sandberg G., 2003. Polar auxin transport in the wood-forming tissues of hybrid aspen is under simultaneous control of developmental and environmental signals. *Proc.Natl. Acad. Sci.* 100 (17), 10096-10101.
- Schweingruber F. H., 1978. *Mikroskopische Holzanatomie*, Swiss Federal Institute of Forestry Research, Birmensdorf, 215.
- Schweingruber F. H., 1991. *Microoskopische Holzanatomie. Anatomie microscopique du bois. Microscopic Wood Anatomy*, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research.
- Schweingruber F.H., 1996. *Tree Rings and Environment. Dendroecology*. Paul Haupt Verlag, Bern, 609.
- Schweingruber F.H., 2007. *Wood structure and Environment*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 279.
- Scuderi L.A., 2017. Quantification of long-term erosion rates from root exposure/tree age relationships in an alpine meadow catchment. *Geomorphology* 283 (2017), 114-121.
- Seabroke A.K., Marsh J.S., 1981. *The environmental impact of water-based recreation*. Vnace Bibliographies, Monticello.
- Sewerniak J., 1998. Środowisko geograficzne Brodnicy. [w:] Dygdała J. (red.), *Brodnica- siedem wieków miasta*. Zakład Poligraficzno-Wydawniczy „Pozkal”, Inowrocław.
- Shea, S.R., 1973. Growth and development of jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) in relation to edaphic factors in northeastern Ontario. In: Ph.D. Thesis. Univ. Toronto, Ont, 466.
- Shroder J.F., 1975. Dendrogeomorphological analysis of mass movement. *Proceedings of the Association of American Geographers* 7: 222-226.
- Shroder J.F. 1978. Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quaternary Research* 9: 168-185.
- Shroder J.F., 1980. Dendrogeomorphology: review and new techniques of tree-ring dating. *Progress in Physical Geography* 4, 161-188.
- Šilhán K., 2012. Dendrogeomorphological analysis of the evolution of slope processes on flysch rocks (Vsetínské vrchy Mts; Czech Republic). *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 7: 39-49.
- Šilhán K., 2016. How different are the results acquired from mathematical and subjective methods in dendrogeomorphology? Insights from landslide movements. *Geomorphology* 253: 189-198.
- Šilhán K., Pánek T., Hradecký J., Stoffel M., 2015. Tree-age control on reconstructed debris-flow frequencies: examples from a regional dendrogeomorphic reconstruction in the Crimean Mountains. *Earth Surface Processes and Landforms* 40: 243-251.
- Šilhán K., Ružek I., Burian L., 2016a. Dynamics of gully side erosion: a case study using tree roots exposure data. *Open Geosci.* 2016; 8:108-116.
- Šilhán K., Pánek T., Hradecký J., Tichavský R., 2016. The polygenetic origin and surface development of the Laspi slope deformation in the Crimean Mountains. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Vol. 60/1 (2016), 11-20, Stuttgart, March 2016.
- Sikorski M., 2009. Antropopresja i jej skutki geomorfologiczne w obrębie szlaków turystycznych w Świętokrzyskim Parku Narodowym, „*Studia i Materiały CEPL w Rogowie*” 2009, R.11, Zeszyt 4 (23), 238-245.
- Singh T.V., 1989. *The Kulu valley: impact of tourism development in the mountains areas*. Himalayan Books, New Delhi.
- Sinkiewicz M., 1998, *Rozwój denudacji antropogenicznej w środkowej części Polski północnej*, UMK, Toruń.
- Skawiński, P., 1993. Oddziaływanie człowieka na przyrodę kopuły Kasprowego Wierchu oraz Doliny Goryczkowej w Tatrach. [w:] Cichocki W., (red.), *Ochrona Tatr w obliczu zagrożeń*. Wyd. Muzeum Tatrzańskiego, Zakopane, 197-226.

- Skawiński, P., Krzan, Z., 2002. Restytucja szaty roślinnej kopuły Kasprowego wierzchu w latach 1993-2001, W: Przemiany środowiska przyrodniczego Tatr, Kraków - Zakopane 2002, 407-411.
- Skiba S., Szmuc R., Zaleski T., 1995. Wstępna charakterystyka właściwości wodnych gleb Bieszczadzkiego Parku Narodowego, Roczniki Bieszczadzkie 4, 117-122.
- Skłodowski J., 2009. Oddziaływanie turystyki wodnej na ekosystemy leśno-jeziorne, Studia i Materiały CEPL w Rogowie 2009, R.11, Zeszyt 4 (23), s. 267-273.
- Skłodowski J., 2011. Zagrożenie mezofauny powodowane turystycznym zaśmiecaniem lasów, Sylwan 2011, 155 (4), s. 261-269.
- Skłodowski J., Bartosz S., Dul Ł., Grzybek D., Jankowski S., Kajetanem M., Kalisz P., Korenkiewicz U., Mazur G., Myszek J., Ostasiewicz M., Primka B., Puczyłowska I., Radzikowski M., Roeding P., Serek B., 2009. Próba oceny wpływu szerokości szlaków turystycznych na otaczające je środowisko lasu. Sylwan 153 (10): 699-709, 2009
- Skłodowski J., Lipka D., 2011. Wędkarstwo rekreacyjne a zaśmiecanie ekotonów nabrzeżnych na przykładzie wybranych odcinków Doliny Środkowej Wisły, Turystyka w lasach i na obszarach przyrodniczo cennych, Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej R.13, z.3 (28) / 2011, 181-187.
- Smolska E., 2002. The intensity of soil erosion in agricultural areas in North-Eastern Poland. Landform Analysis 3: 25-33.
- Smolska E., 2008, Rola opadów ekstremalnych w denudacji stoków młodoglacjalnych na przykładzie Pojezierza Suwalskiego. Landform Analysis 8: 69-72.
- Sołowiej D., 1979. Stan degradacji środowiska przyrodniczego wybranych krajobrazach jez. Jaroszyńskiego i jez. Wisetka a konieczność zweryfikowania kryteriów oceny dla rekreacji w skali planowania miejscowego. Monografie, nr 116. AWF Poznań.
- Speight M.C.D., 1973. Outdoor recreation and its Ecological Effects, A bibliography and review, Discussion Papers in Conservation, 4, University College, London.
- Sperski E., 1974. Drwęca i jej dorzecze. Warszawa.
- Stokes A, Berthier S., 2000. Irregular heartwood formation in leaning stems of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) is related to eccentric, radial stem growth. Forest Ecology and Management 135:115±121.
- Stoffel M., 2008. Dating past geomorphic processes with tangential rows of traumatic resin ducts. Dendrochronologia, 26: 53-60.
- Stoffel M., Bollschweiler M., 2008. Tree-ring analysis in natural hazards research-an overview. Natural Hazards and Earth System Sciences, 8: 187-202.
- Stoffel, M., Bollschweiler, M., Butler, D.R., Luckman, B.H., 2010. Tree Rings and Natural Hazards: A State-of-the-Art. Springer, Heidelberg, Berlin, New York.
- Stoffel M., Hitz O. M., 2008. Rockfall and snow avalanche impacts leave different anatomical signatures in tree rings of juvenile *Larix decidua*. Tree Physiology, 28: 1713-1720.
- Stoffel M., Perret S., 2006. Reconstructing past rockfall activity with tree rings: some methodological considerations. Dendrochronologia, 24(1): 1-15.
- Stoffel M., Corona C., Ballesteros-Cánovas JA., Bodoque JM., 2013. Dating and quantification of erosion processes based on exposed roots. Earth-Science Reviews 123: 18-34.
- Stoffel M., Huggel C., 2012. Effects of climate change on mass movements in mountain environments. Progress in Physical Geography 36, 421-439.
- Stoffel, M., Wilford, D.J., 2012. Hydrogeomorphic processes and vegetation: disturbance, process histories, dependencies and interactions. Earth Surface Processes and Landforms 37, 9-22.
- Styperek J., 2001. Pieszne szlaki turystyczne w polskich parkach narodowych. Turyzm, t.11,z.1.
- Styperek J., 2002. Linearne systemy penetracji rekreacyjnej. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.
- Sun D., Walsh D., 1998. Review of studies on environmental impacts of recreation and tourism in Australia. Journal of Environmental Management, 53(4): 323-338.

- Sun L., Wang X., Hong J., 2014. Response of anatomical structures in tree roots to an erosion event on the southeastern Tibetan Plateau. *Geomorphology* 204:617-624.
- Swearingen W.D., Bencherifa A. (red.), 1996. *The North African environment at risk*, Oxford Westview Press, Boulder.
- Szpikowski J., 1998. Wielkość i mechanizm erozji wodnej gleb na stokach użytkowanych rolniczo w zlewni młodo glacialnej (górną Parsętą, Chwalimski Potok), *Bibliotheca Fragmenta Agronomica*, 4B/98, 113-124.
- Szychowska-Krapiec E., Wiśniowski Z., 1996. Zastosowanie analizy przyrostów rocznych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris*) do oceny wpływu zanieczyszczeń przemysłowych na przykładzie zakładów chemicznych Police. *Geologia*, 22, 3.
- Szydarowski W., 2000. Rozwój form erozyjnych w otoczeniu szlaków turystycznych Tatrzańskiego Parku Narodowego. [w:] J. Czochoński, D. Borowiak (red.), *Z badań geograficznych w Tatrach Polskich*, Wyd. Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk: 315-328.
- Szwichtenberg A., 1976. Atrakcyjność turystyczna Mielna i czynniki ją pomniejszające. *Koszalińskie Studia i Materiały* nr3/15.
- Świąchowicz J., 2002. Współdziałanie procesów stokowych i fluwialnych w odprowadzaniu materiału rozpuszczonego i zawiesiny ze zlewni pogórskiej. Instytut Geografii UJ, Kraków.
- Świtoniak M., 2007. Ocena wartości ekologicznej gleb o dwudzielnym uziarnieniu w aspekcie zrównoważonego gospodarowania obszarami leśnymi Brodnickiego Parku Krajobrazowego. [w:] W. Marszelewski, L. Kozłowski. *Ochrona i Zagospodarowanie Dorzecza Drwęcy Tom I*. Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu. Instytut Geografii. 335-344
- Świtoniak M., 2011. Przekształcenia pokrywy glebowej obszarów wysoczyznowych Pojezierza Brodnickiego w wyniku oddziaływania denudacji antropogenicznej, [w:] M. Jankowski (red.), *Wybrane problemy genezy, systematyki, użytkowania i ochrony gleb regionu kujawsko-pomorskiego*, Wrocław, Warszawa, Polskie Towarzystwo Substancji Humusowych, Polskie Towarzystwo Gleboznawcze, 227-247.
- Świtoniak M., Jankowski M., Bednarek R., (red.) 2014. *Antropogeniczne przekształcenia pokrywy glebowej Brodnickiego Parku Krajobrazowego*. Wyd. Naukowe UMK, Toruń.
- Theobald W.F., 1994. *Global tourism: the next decade*, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Timell T.E., 1986. *Compression Wood in Gymnosperms*. Springer Verlag. Berlin- Heidelberg-New York-Tokyo.
- Tomczyk A.M., Ewertowski M., 2008. Oddziaływanie wybranych form turystyki na środowisko przyrodnicze - przegląd metod badań. [w:] Z. Młynarczyk, A. Zajadacz (red.), *Uwarunkowania i plany rozwoju turystyki. Tom 1. Przyrodnicze zasoby turystyczne i metody ich oceny*. Wyd. Naukowe UAM, Poznań: 239-260.
- Tomczyk A.M., Ewertowski M., 2011a. Degradation of recreational trails, Gorce National Park, Poland, *Journal of Maps*, 7(1), s. 507-518.
- Tomczyk A.M., 2011b. A GIS assessment and modelling of environmental sensitivity of recreational trails: The case of Gorce National Park, Poland, *“Applied Geography”*, nr 31(1), s. 339-351.
- Tomczyk A.M., 2011c. Analiza ilościowa degradacji szlaków turystycznych na przykładzie Gorceńskiego Parku Narodowego i Popradzkiego Parku Krajobrazowego, praca doktorska napisana w Zakładzie Geomorfologii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu pod kierunkiem prof. UAM dr hab. Leszka Kasprzaka, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Poznań, 2011.
- Tomczyk A.M., Ewertowski M., Popko-Tomasiewicz K., 2012. Ocena stanu tras turystycznych w Gorceńskim Parku Narodowym, *Ochrona Beskidów Zachodnich*, nr 4, s. 83-97.
- Tracz H. 2003. Konsekwencje ekologiczne obniżenia aktywności biologicznej gleb terenów poddawanych presji turystyczno-rekreacyjnej. *Sylwan* 147 (6): 38-43.
- Tracz H. 2004. Wpływ presji turystyczno-rekreacyjnej na wybrane parametry aktywności biologicznej gleby. [w:] Pieńkos K. (red.) *Problemy zrównoważonego rozwoju turystyki, rekreacji i sportu w lasach.. Akademia Wychowania Fizycznego w Warszawie*. 257-263.

- Tracz H., Gaca L., 2000. Wpływ presji ruchu turystyczno-rekreacyjnego na szkody w lasach nadleśnictwa Józefów-Roztocze. [w:] Pieńkos K.(red.), 2000, Problemy turystyki i rekreacji w lasach polskich, krajowa konferencja naukowa, Polskie Towarzystwo Leśne, Komisja Inżynierii Leśnej i Gospodarki Wodnej, Akademia Wychowania Fizycznego im. Józefa Piłsudskiego w Warszawie, Instytut Turystyki i Rekreacji, Warszawa. 133-139.
- Tracz H., Pampuch T., 2009. Środowiskowe aspekty turystyki i rekreacji w ekosystemach leśnego kompleksu promocyjnego „Lasy Mazurskie”. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie*, Rogów, 23 (4): 274-280.
- Tschurtschenthaler P., 1986. *Das Landschaftsproblem im Fremdenverkehr: dargestellt anhand der Situation des Alpenraums: eine ökonomische Analyse*, Haupt, Bern
- Umiński J., 1970. *Brodnica I okolice*. WOIT. Bydgoszcz
- Vanderkerckhove L., Muys B., Poesen J., De Weerd B., Coppé N., 2001. A method for dendrochronological assessment of medium-term gully erosion rates. *Catena* 45, 123-161.
- Vater H., 1927. Die Bewurzelung der Kiefer, Fichte und Buche. *Tharandter Forstl. Jahrb.* 78, 65-85.
- Wagenhoff E., 1938. Untersuchungen über die Entwicklung des Wurzelsystems der Kiefer auf diluvialen Sandböden. *Z. Forst-Jagdwes.* 70, 449-494.
- Waksmundzki K. 1976. Parki Narodowe- problemy wybrane. *Zeszyty Naukowe PAX*, NR 1-2 (12-13).
- Wall G., 1977. Impacts of outdoor recreation on the environmental, Council of Planning Librarians Monticello.
- Wall G., Wright C., 1977. The environmental impact of outdoor recreation, Publication series of Department of Geography, Faculty of Environmental Studies, University of Waterloo.
- Wałykowski P., 2006a. Geomorfologiczne skutki oddziaływania turystyki aktywnej na drogi i ścieżki turystyczne na przykładzie Gorczańskiego Parku Narodowego i jego otuliny, [w:] A. Świeca, K. Kałamucki (red.), *Turystyka aktywna i jej rozwój na Roztoczu - regionie pogranicza*, Urząd Marszałkowski Woj. Lubelskiego, UMCS, Lublin, 2006, 267-274.
- Wałykowski P., 2006b. Wpływ dróg górskich na dynamikę procesów morfogenetycznych w rejonie Turbacza, *Ochrona Beskidów Zachodnich, Gorczański Park Narodowy, Poręba Wielka*, 2006, t. I, 67-79.
- Watson A., 1985. Soil erosion and vegetation damage near ski lifts at Cairgorn, Scotland. *Biological Conservation*, 33, 363-381.
- Ważyński B., 1997. *Urządzanie i zagospodarowanie lasu dla potrzeb turystyki i rekreacji*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu.
- Wąsik R., 2012. Zastosowanie analizy dendrochronologicznej do określenia zmienności gęstości drewna na przekroju poprzecznym pnia, na przykładzie jodły olbrzymiej (*Abies grandis* Lindl.). *Studia i Materiały CEPL W Rogowie*. R.14 Zeszyt 1 (30).260-267.
- Wei T., Simko V., Levy M., Xie Y., Jin Y., Zemla J., 2017. Package ‘corrplot’.
- Wenjun L., Xiaodong G., Chunyan L., 2005. Hiking trails and tourism impact assessment in protected area: Jiuzhaigou Biosphere Reserve, China. *Environmental Monitoring and Assessment*. 108(1–3), 279-293.
- Werker E., Fahn A., 1969. Resin ducts of *Pinus halepensis* Mill.-Their structure, development and pattern of arrangement. *Bot.J. Lin. Sac.*, 62. 379-411.
- Wertz, B., 2012. Dendrochronologiczna ocena wpływu emisji przemysłowej na główne gatunki drzew iglastych z Wyz`yny Kieleckiej. *Sylwan* 156/5, 379-390.
- Whinam J., Chilcott N.M., 2003. Impacts after four years of experimental trampling on alpine/sub-alpine environments in western Tasmania. *Journal of Environmental Management*, 67(4): 339-351.
- Wigley T.M.L., Briffa K.R., Jones P.D., 1984. On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 201-213.
- Wigley T.M.L., Jones P.D., Briffa K.R., 1987. Cross-dating methods in dendrochronology. *Journal of Archaeological Science*. Volume 14, Issue 1, 51-64.

- Willard B.E., Marr J.W., 1970. Effects of human activities on alpine tundra ecosystems in Rocky Mountain National Park, Colorado, *Biological Conservation*, 2, 257-265.
- Wilson B.F., 1964. Structure and growth of woody roots of *Acer rubrum* L. *Harvard For. Pap.* (Harvard Univ. Petersham, Mass. USA No. 11, 1-14.)
- Wilson B.F., 1975. Distribution of secondary thickening in tree root systems. [w:] *The Development and Function of Roots*. Ed. By J.G. Torrey, D.T. Clarkson. London-New York-San Francisco: Academic Pres. 197-219.
- Witkowska-Żuk L., 2000. Roślinność leśna w warunkach presji turystycznej. *Sylwan* 144 (11): 5-2.
- Wilczyński S., 2003. Modele klimat-przyrost radialny sosen z Tatr, Pienin i Ojcowa. *Sylwan* 147 (12): 27-35.
- Wilczyński S., 2006. The variation of tree-ring widths of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) affected by air pollution. *Eur. J. For. Res.* 125: 213-219.
- Wilczyński S., Wertz B. 2012. Sygnał klimatyczny w seriach przyrostów radialnych jodły pospolitej oraz modrzewia europejskiego. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie* 30: 66-74.
- Wiles G.C., Calkin P.E., Jacoby G.C., 1996. Tree-ring analysis and Quaternary geology: Principles and recent applications. *Geomorphology* 16(1996), 259-272.
- Wilkinson P.F., 1978. Environmental impact of outdoor recreation and tourism. Monticello, Ill. Vance.
- Winchester V., Gartner H., Bezzi M., 2007. Dendrogeomorphological applications. [w:] Kalvoda, J., Goudie, A.S. (eds), *Geomorphological Variations*. Prague: 183-203.
- Wistuba M., Malik I., 2011. Indeks dekoncentryczności przyrostów rocznych drzew - narzędzie do identyfikacji współczesnych ruchów osuwiskowych. *Czasopismo Geograficzne*, 82 (4):401-421.
- Wistuba M., Malik I., Gärtner H., Kojs P., Owczarek P., 2013. Application of eccentric growth of tree-rings as a tool for landslide analyses (an example of *Picea abies* Karst. in the Carpathian and Sudeten Mountains -Central Europe), *Catena* 111: s. 41-55.
- Witek M., Remisz J., Bijak S., 2014. Dendrohydrologiczna analiza obniżenia w terasie zalewowej Ścinawki w okolicach Gorzuchowa (Sudety Środkowe). *Studia i Materiały CEPL w Rogowie*. R.16, 40/3/2014. 165-173.
- Wodziczko A., 1929. Zabytki przyrody na Pomorzu. [w:] *Polskie Pomorze*. Wydawnictwo Inst. Bałt. Toruń.
- Wojda T., Tracz H., 2003. Dynamika metabolizmu oddechowego gleb wybranych stanowisk parku dendrologicznego. *SGGW. Sylwan* 147 (5): 21-27.
- Worbes M., 1995. How to measure growth dynamics in tropical trees - a review. *IAWA J.*, 16: 337-361.
- Woś A., 1999. *Klimat Polski*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Wójcik G., Wójcikowa A., 1973. Uwagi o klimacie dorzecza doliny Drwęcy oraz o niektórych aspektach mikroklimatu doliny Drwęcy, *Acta Universitatis Nicolai Copernici, Geografia* 9, Toruń 1973, 87-112.
- Wrońska-Wałach D., 2009. Dendrogeomprphological analysis of a headwater area in the Gorce Mountains, *Studia Geomorphologica Carphato-Balcanica*, 63: 97-114.
- Wrońska-Wałach D., Gorczyca E., Buchwał A., Korpak J., Sobucki M., Wałdykowski P., 2012. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie*. R.14. Zeszyt 1(30), 195-202.
- Wrońska-Wałach D., 2014. Differing response to extreme rainfall events in headwater areas recorded by wood anatomy in roots (Gorce Mountains, Poland). *Catena*, 118: 41-54.
- Wrońska-Wałach D., Sobucki M., Buchwał A., Gorczyca E., Korpak J., Wałdykowski P., Gartner H., 2016. Quantitative analysis of ring growth in spruce roots and its application towards a more precise dating. *Dendrochronologia* 38(2016), 61-71.
- Zanetto G., Soriani S., 1996. *Tourism and Environmental Degradation: the Northern Adriatic Sea*, [w:] Priestley G.K., Edwards J.A., Coccossis H., *Sustainable Tourism?: European Experiences*, CAB Intl., Wallingford.
- Zang, C. Biondi F. 2015. treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography* 38, 431-436.

- Zawadzki S. (red.), 2006. Gleboznawstwo. Wyd. IV. Państw. Wyd. Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Zdanowicz E., Skłodowski J., 2013. Ocena zmian w środowisku wokół szlaków rekreacyjnych wokół Lasu Bielańskiego w Warszawie, *Studia i Materiały CEPL w Rogowie*, R. 15. Zeszyt 37 / 4 / 2013, 348-355.
- Zielonka T., Dubaj N., 2009. A tree-ring reconstruction of geomorphologic disturbances in cliff forests in the Tatra Mts., *Landform Analysis*, 11: 71-76.
- Zielonka T., Holeksa J., Ciapała Sz., 2008. A reconstruction of flood events using scarred trees in the Tatra Mountains, Poland. *Dendrochronologia*, 26: 173-183.
- Zielonka A., Oleszko B., Juszcak E., Wrońska-Wałach D., 2014. Zapis dynamiki procesów osuwiskowych w przyrostach rocznych korzeni jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.)- przykład z Pogórza Karpackiego. *Studia i Materiały CEPL* 40, 139-148.
- Zielski A. 1978. Zespoły leśne Pojezierza Brodnickiego oraz wpływ na nie gospodarki leśnej i turystyki (Forest associations of Brodnica Lake District and the effect of forest exploitation and tourism). *Stud. Soc. Sc. Toruń*. 10,4:3-85.
- Zielski A. 1993. Lata wskaźnikowe u sosny zwyczajnej rosnącej w rejonie Torunia dziś i w czasach średniowiecznych (Pointer years in pines growing in the locality of Torun nowadays and in the Middle Ages). *AUNC Biologia* 46,89:227-244.
- Zielski A. 1996. Wpływ temperatury i opadów na szerokość słoju rocznych drewna u sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w rejonie Torunia (The influence of Temperature and Precipitation on Ring Width of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Locality of Torun). *Sylvan*, 2:71-80.
- Zielski A., 1997. Uwarunkowania środowiskowe przyrostów radialnych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w Polsce północnej na podstawie wielowiekowej chronologii. Wydawnictwo UMK, Toruń, pp. 127.
- Zielski A., Błaszowski A., Barankiewicz A., 1998. Dynamika przyrostu radialnego sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) na obszarze leśnym eksploatowanym turystycznie nad jeziorem Wielkie Partęczyny (Nadl. Brodnica). *Sylvan*. Nr. 3: 69-78.
- Zielski A., Sygit W., 1998. Wpływ klimatu na przyrost radialny sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.), badania wzdłuż równoleżnika 52° N i transekcie Śląsk- Białowieża. [w:] A. Breymeyer i E. Roo-Zielińska (red.). Reakcja borów sosnowych na zmianę klimatu wzdłuż równoleżnika 52o N (12-32oE) oraz na zmiany w depozycji zanieczyszczeń chemicznych na transekcie Śląsk - Białowieża. Dokumentacja Geograficzna IG PAN Warszawa Nr. 13: 161-185.
- Zielski A., Barankiewicz A., 2000. Dendrochronologiczna analiza przyrostów radialnych sosny zwyczajnej na terenie leśnictwa Dębie, Nadleśnictwa Włocławek. *Sylvan*. Vol. 5: 69-74.
- Zielski A., Krąpiec M., 2004. *Dendrochronologia*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Zielski A., Krąpiec M., Koproński M., 2010. *Dendrochronological Data*. [w:] Przybylak R., Majorowicz J., Brázdil R., Kejna M. (red.). *The Polish Climate in the European Context: An Historical Overview*. Springer. 191-217.
- Zhou F., Xiaohua G., Junzhou Z., Zhiqian Z., Qiuyan C., Zongying C., 2013. Application of *Picea wilsonii* roots to determine erosion rates in eastern Qilian Mountains, Northwest China. *Trees* (2013) 27:371-378

Strony internetowe

Sobiech M., 2014. Potężna rzeka płynąca pod lodem. Rynna jeziora Bachotek. Górzno wśród lasów i jezior (blog popularno-naukowy)(www.gorzberg.blogspot.com)

Bank Danych o Lasach (<https://www.bdl.lasy.gov.pl/portal/mapy>)

Bank Danych Lokalnych, Kultura i Sztuka, Muzea- zwiedzający muzea i oddziały w latach 1995-2016 (<https://bdl.stat.gov.pl/BDL/dane/podgrup/wymiary>)

Brodnica nad Drwęcą. Przewodnik turystyczny po regionie. (<http://www.brodnica-online.pl/>)

Brodnicki Park Krajobrazowy (<http://www.parki.kujawsko-pomorskie.pl/bpk>)

Nadleśnictwo Brodnica (<http://www.brodnica.torun.lasy.gov.pl/>)

Stacja Wodna PTTK Bachotek (<http://www.brodnica.pttk.pl/>)

Starostwo Powiatowe w Brodnicy

(https://www.brodnica.com.pl/asp/pl_start.asp?typ=13&menu=399&strona=1&schemat=3#)

Urząd Miejski w Brodnicy (<https://www.portal.brodnica.pl/>)

Cybis Dendrochronology (<http://www.cybis.se/forfun/dendro/index.php>)

Package 'dplR' (<https://cran.r-project.org/web/packages/dplR/dplR.pdf>)

Package 'PerformanceAnalytics' (<https://cran.r-project.org/web/packages/PerformanceAnalytics/PerformanceAnalytics.pdf>)

Package 'corrplot' (<https://cran.r-project.org/web/packages/corrplot/corrplot.pdf>)

Package 'treeclim' (<https://cran.r-project.org/web/packages/treeclim/treeclim.pdf>)

Materiały kartograficzne

niemieckie mapy topograficzne Messtischblätter w skali 1:25 000 (2682 Pokrzydowo z 1911 i 1940 roku),

mapy z Wojskowego Instytutu Geograficznego w skali 1:25 000 (P35-S29-G Brodnica z 1938 roku),

Army Map Service w skali 1:25 000 (AMS_M851 Pokrzydowo 2682 z 1953 roku),

Karte des Deutschen Reiches w skali 1:100 000 (197 Kauernik/Kurzętnik z 1893 roku, 35-29 Brodnica z 1940 roku),

mapy topograficzne w skali 1:50 000 (arkusz Brodnica N-34-99-B)

Inne źródła danych

Kroniki PTTK Brodnica Oddział nr 2

Kroniki Stacji Wodnej PTTK Bachotek

Materiały Brodnickiego Parku Krajobrazowego

Materiały Nadleśnictwa Brodnica

Spis rycin

Ryc. 1. Wpływ antropopresji turystycznej na wybrane komponenty środowiska geograficznego. Stan badań w Polsce od lat 60. XX wieku. Opracowanie własne na podstawie przeglądu literatury (opis postępowania w podrozdziale 4.5)	15
Ryc. 2. Zastosowanie metody dendrochronologicznej w geomorfologii z podziałem na badany proces morfogenetyczny. Stan badań w Polsce w latach 1986-2018 (marzec). Opracowanie własne na podstawie przeglądu literatury (opis postępowania w podrozdziale 4.5). Lista pozycji naukowych Załącznik nr. 1.	22
Ryc. 3. Zastosowanie metody dendrochronologicznej w geomorfologii z podziałem na rodzaj materiału badawczego tj. pnie i korzenie drzew. Stan badań w Polsce w latach 1986-2018 (marzec). Opracowanie własne na podstawie przeglądu literatury (opis postępowania w podrozdziale 4.5).....	23
Ryc. 4. Zastosowanie metody dendrochronologicznej do ilościowej oceny procesów geomorfologicznych z podziałem na badany proces morfogenetyczny. Stan badań na świecie od 1961 roku. Opracowanie własne na podstawie przeglądu literatury (opis postępowania w podrozdziale 4.5). Lista pozycji naukowych Załącznik nr 2.	28
Ryc. 5. Stanowisko Bachotek (północno-wschodnia część jeziora Bachotek) wraz z lokalizacją powierzchni badawczych: drzewa rosnące wzdłuż szlaku turystycznego, poddane presji turystycznej (PRES)- obszar zaznaczony kolorem czerwonym; drzewa na stanowisku referencyjnym, niepoddane presji turystycznej (REF)- obszar zaznaczony kolorem niebieskim (A). Prace terenowe przy pobieraniu wywiertów z pni drzew sosny zwyczajnej (<i>Pinus sylvestris</i> L.) przy pomocy świdra przyrostowym Presslera (C) na stanowisku Bachotek (D).....	31
Ryc. 6. Przykład odstąpiętego korzenia sosny zwyczajnej (<i>Pinus sylvestris</i> L.) w obrębie szlaku turystycznego ze stanowiska Bachotek wraz z zaznaczonymi miejscami poboru prób do analiz mikroskopowych (białe prostokąty)	35
Ryc. 7. Schemat systemu korzeniowego sosny zwyczajnej (<i>Pinus sylvestris</i> L.) w obrębie szlaku turystycznego z Pojezierza Brodnickiego z podziałem na trzy strefy poboru korzeni wydzielone wzdłuż profilu podłużnego korzenia odstąpiętego na szlaku.....	36
Ryc. 8. Etapy prac laboratoryjnych w celu przygotowania przeźroczy mikroskopowych korzeni sosny zwyczajnej wykonane w trzech laboratoriach dendrochronologicznych (patrz tekst).....	38
Ryc. 9. Przekrój poprzeczny korzenia sosny zwyczajnej z zaznaczonym przebiegiem pięciu promieni (A) wzdłuż których dokonano pomiarów liczby i szerokości przyrostów rocznych w korzeniu; wykrycie strefy przyrostów wyklinowujących w korzeniu (B).	39
Ryc. 10. Badane elementy struktury przyrostowej i anatomicznej korzeni sosny zwyczajnej	40
Ryc. 11. Sposób montażu i zabezpieczenia czujników pyroelektrycznych typu Eco-Twin z logerem do automatycznego zliczania ruchu turystycznego na szlaku turystycznym na stanowisku Bachotek	43
Ryc. 12. Lokalizacja Pojezierza Brodnickiego ze stanowiskiem badawczym Bachotek na tle podziału fizycznogeograficznego wg Kondrackiego (2000) i opisem sąsiednich mezoregionów.	49
Ryc. 13. Mapa morfologiczna północnej części rynny jeziora Bachotek (A) oraz przebieg szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek w obrębie strefy krawędziowej (B-D).....	52
Ryc. 14. Pojezierze Brodnickie z zaznaczonymi obszarami leśnymi oraz siecią hydrograficzną z lokalizacją stanowiska badawczego Bachotek (fioletowa gwiazdka)	54
Ryc. 15. Mapa topograficzna Pojezierza Brodnickiego na tle Polski (C), z lokalizacją stanowiska Bachotek (A) oraz widok na północno-wschodnią krawędź rynny jeziora Bachotek, wzdłuż której został poprowadzony badany szlak turystyczny (B).	57
Ryc. 16. Przebieg badanego szlaku turystycznego poprowadzonego wzdłuż krawędzi rynny jeziora Bachotek wraz z widocznymi na jego powierzchni odstąpięciami korzeni sosny zwyczajnej (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	59
Ryc. 17. Lokalizacja badanego odcinka szlaku turystycznego poprowadzonego wzdłuż północno-wschodniej części rynny jeziora Bachotek na numerycznym modelu rzeźby terenu (A) oraz mapie poziomicowej (B).....	60
Ryc. 18. Mapa obszarów leśnych w północno-wschodniej części jeziora Bachotek z przebiegiem badanego szlaku turystycznego (różowy kolor). Objaśnienia skrótów: LMŚW (las mieszany świeży), BMŚW (bór mieszany świeży), LW (las wilgotny). Charakterystyka średniego wieku oraz średniej wysokości sosny zwyczajnej w obrębie danej powierzchni na podstawie opisu taksacyjnego drzewostanu	61
Ryc. 19. Łączne miesięczne obciążenie turystyczne analizowanego szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek dla sezonu kwiecień-październik dla okresu pomiarowego 2014-2016	68
Ryc. 20. Średnia liczba turystów na tydzień na szlaku turystycznym na stanowisku Bachotek dla sezonu kwiecień - październik dla okresu pomiarowego 2014-2016	68
Ryc. 21. Średnie dzienne obciążenie szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek w sezonie kwiecień-październik dla okresu pomiarowego 2014-2016	69

Ryc. 22. Chronologia rzeczywista (A) oraz chronologia indeksowana (B) sosny zwyczajnej poddanej presji turystycznej (PRES; linia czarna) i niepoddanej presji (REF; linia szara) ze stanowiska Bachotek dla okresu 1951-2014. Obszary zaciemnione określają liczbę drzew użytych do konstrukcji obu chronologii poddanej presji (szraf jasnoszary) i chronologii niepoddanej presji (szraf ciemnoszary)	72
Ryc. 23. Wartości współczynnika korelacji Pearson'a między średnią miesięczną temperaturą (A), sumą opadów (B); temperaturą maksymalną (C), temperaturą minimalną (D), a chronologią indeksowaną sosny zwyczajnej (<i>Pinus sylvestris</i>) poddanej presji turystycznej (PRES; czarny słupek) oraz ze stanowiska referencyjnego (REF; szary słupek); linia przerywana oznaczona poziom istotności statystycznej $p < 0,05$. Wartości miesięczne poszczególnych zmiennych klimatycznych zostały zaszeregowane od października roku poprzedzającego do września roku aktualnego, tj., dla którego był mierzony wzrost radialny.	73
Ryc. 24. Porównanie różnic średniej sumy opadów, średniej temperatury, temperatury maksymalnej oraz temperatury minimalnej, danego miesiąca ze średnią z wielolecia dla pozytywnych i negatywnych lat wskaźnikowych wyznaczonych dla obu chronologii (BACHOTEK: A, C, E, G; tj. chronologii poddanej presji turystycznej (PRES) i chronologii referencyjnej (REF) łącznie) oraz wyłącznie dla stanowiska drzew poddanych presji turystycznej (PRES: B, D, F, H) ..	77
Ryc. 25. Zmiany strukturalne i anatomiczne odsoniętych korzeni sosny zwyczajnej ze szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek z widocznym starciem kambium rdzenia (A) oraz wykształceniem blizny (B).....	81
Ryc. 26. Wyróżnione typy drzew sosny zwyczajnej z odsonieniami korzeni w obrębie szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek. Wyjaśnienie typów drzew (I-V) w tekście	84
Ryc. 27. Wyniki datowań dendrochronologicznych odsonień korzeni sosny zwyczajnej w obrębie szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek	86
Ryc. 28. Przestrzenne rozmieszczenie korzeni sosny zwyczajnej według charakteru odsonień wraz z podaniem ID próby wzdłuż badanego szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek.	87
Ryc. 29. Zmiana wielkości drewna wczesnego (DW) i szerokości przyrostów rocznych (TRW) korzenia sosny zwyczajnej (<i>Pinus sylvestris</i> L.), interpretowane, jako efekt wtórnego zasłonięcia korzenia (granatowa strzałka) wcześniej odsoniętego na szlaku turystycznym w obrębie stanowiska Bachotek.	88
Ryc. 30. Wyniki datowań dendrochronologicznych blizn w korzeniach sosny zwyczajnej pobranych ze szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek.....	89
Ryc. 31. Wyniki datowań dendrochronologicznych traumatycznych kanałów żywicznych (TKŻ) w korzeniach sosny zwyczajnej pobranych ze szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek	90
Ryc. 32. Porównanie frekwencji występowania blizn (A), traumatycznych kanałów żywicznych (TKŻ) (B) oraz liczby odsonień korzeni sosny (C) na szlaku turystycznym ze stanowiska Bachotek z chronologiami rzeczywistymi i) drzew sosny zwyczajnej poddanych (PRES- czarna linia) oraz ii) niepoddanych presji turystycznej (REF- szara linia)	91
Ryc. 33. Porównanie liczby odsonień korzeni (A i B), występowania blizn (C i D) i traumatycznych kanałów żywicznych (E i F) wykazanych dla korzeni sosny zwyczajnej pobranych ze szlaku turystycznego stanowiska Bachotek z sumą opadów w okresie wegetacyjnym (A, C, E) oraz ze średnią temperaturą powietrza w sezonie wegetacyjnym (B, D, F) w okresie 1970-2015.	92
Ryc. 34. Wartości współczynnika korelacji Pearson'a między sumą opadów w okresie wegetacyjnym (A), średnią temperaturą powietrza w okresie wegetacyjnym (B) a liczbą odsonień, blizn i traumatycznych kanałów żywicznych wykazanych dla korzeni sosny zwyczajnej pobranych ze szlaku turystycznego stanowiska Bachotek dla okresu 1970-2015; linią oznaczono poziom istotności statystycznej $p < 0,05$	93
Ryc. 35. Wartości współczynnika korelacji między miesięczną sumą opadów (A), średnią miesięczną temperaturą powietrza (B) a liczbą odsonień, blizn i traumatycznych kanałów żywicznych wykazanych dla korzeni sosny zwyczajnej pobranych ze szlaku turystycznego stanowiska Bachotek w okresie 1970-2015; linią oznaczono poziom istotności statystycznej $p < 0,05$	93
Ryc. 36. Przykład korzenia odsoniętego w wyniku przyrostu wtórnego (B43C)	95
Ryc. 37. Przykład nagłego odsonięcia korzenia z widocznym wzrostem produkcji drewna późnego, wyraźnie zmniejszoną powierzchnią komórek drewna wczesnego w kolejnym przyroście i zwiększoną szerokością kolejnych przyrostów rocznych (B01A1A). Strzałką zaznaczono moment odsonięcia korzenia	95
Ryc. 38. Zmiany powierzchni komórek drewna wczesnego (EW) na tle zmian udziału drewna późnego (LW) w korzeniu odsoniętym erozyjnie	96
Ryc. 39. Przykład korzenia odsonianego powoli (w przeciągu kilku lat) (B08A)	96
Ryc. 40. Zmiany powierzchni komórek drewna wczesnego (EW) na tle zmian udziału drewna późnego (LW) w korzeniu odsoniętym denudacyjnie	97
Ryc. 41. Szkic terenowy systemu korzeniowego sosny zwyczajnej z podziałem na strefy zasłonięte: poza szlakiem (C), pobocze szlaku (B) oraz strefę szlaku z odsonieniem na jego powierzchni (A), który został poddany seryjnemu próbkowaniu (białe linie oznaczają miejsca poboru fragmentów korzenia do analiz mikroskopowych).	100

Ryc. 42. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zasłoniętymi próbkami korzenia B01 sosny zwyczajnej ze strefy poza szlakiem (C) (C1-C3) oraz krzywą wzrostu z pnia (B01), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001).....	105
Ryc. 43. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zasłoniętymi próbkami korzenia B01 sosny zwyczajnej ze strefy pobocza (B) (B1-B2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B01), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)	105
Ryc. 44. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbą z pierwszej głównej części odsoniętej korzenia B01 sosny zwyczajnej ze strefy szlaku (A) (A1) oraz krzywą wzrostu z pnia (B01), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)/ Moment odsonięcia-czerwony znacznik (daty odsonięć korzeni Załącznik 3).....	106
Ryc. 45. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami z drugiej głównej części odsoniętej korzenia B01 sosny zwyczajnej ze strefy szlaku (A) (A1-A4) oraz krzywą wzrostu z pnia (B01), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odsonięcia-czerwony znacznik (daty odsonięć korzeni Załącznik 3)	106
Ryc. 46. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami z odsoniętego odgałęzienia (korzeń przybyszowy) głównego korzenia B01 sosny zwyczajnej ze strefy szlaku (A) (A1-A3) oraz krzywą wzrostu z pnia (B01), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odsonięcia-czerwony znacznik (daty odsonięć korzeni Załącznik 3).....	107
Ryc. 47. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zasłoniętymi próbkami korzenia B05 sosny zwyczajnej ze strefy poza szlakiem (C) (C1-C2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B05), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001).....	108
Ryc. 48. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zasłoniętymi próbkami korzenia B05 sosny zwyczajnej ze strefy pobocza (B) (B1-B2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B05), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)	108
Ryc. 49. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbą z głównej części odsoniętej korzenia B05 sosny zwyczajnej ze strefy szlaku (A) (A1) oraz krzywą wzrostu z pnia (B05), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odsonięcia-czerwony znacznik (daty odsonięć korzeni Załącznik 3).....	109
Ryc. 50. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami z odsoniętego odgałęzienia (korzeń przybyszowy) głównego korzenia B05 sosny zwyczajnej ze strefy szlaku (A) (A1-A3) oraz krzywą wzrostu z pnia (B05), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odsonięcia-czerwony znacznik (daty odsonięć korzeni Załącznik 3).....	109
Ryc. 51. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zasłoniętymi próbkami korzenia B06 sosny zwyczajnej ze strefy poza szlakiem (C) (C1-C4) oraz krzywą wzrostu z pnia (B06), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001).....	110
Ryc. 52. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zasłoniętymi próbkami korzenia B06 sosny zwyczajnej ze strefy pobocza (B) (B1-B4) oraz krzywą wzrostu z pnia (B06), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)	110
Ryc. 53. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami z głównej części odsoniętej korzenia B06 sosny zwyczajnej ze strefy szlaku (A) (A1-A2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B06), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odsonięcia- czerwony znacznik (daty odsonięć korzeni Załącznik 3)	111
Ryc. 54. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami z odsoniętego odgałęzienia głównego korzenia B06 sosny zwyczajnej ze strefy szlaku (A) (A1-A2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B06), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odsonięcia- czerwony znacznik (daty odsonięć korzeni Załącznik 3).....	111
Ryc. 55. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zasłoniętymi próbkami korzenia B07 sosny zwyczajnej ze strefy poza szlakiem (C) (C1-C2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B07), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001).....	112
Ryc. 56. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zasłoniętymi próbkami korzenia B07 sosny zwyczajnej ze strefy pobocza (B) (B1-B2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B07), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)	112
Ryc. 57. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami z pierwszej głównej części odsoniętej korzenia B07 sosny zwyczajnej ze strefy szlaku (A) (A1-A2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B07), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odsonięcia- czerwony znacznik (daty odsonięć korzeni Załącznik 3).....	113

Ryc. 58. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami z drugiej głównej części odsloniętej korzenia B07 sosny zwyczajnej ze strefy szlaku (A) (A1-A2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B07), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odslonięcia- czerwony znacznik (daty odslonięć korzeni Załącznik 3).....	113
Ryc. 59. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zasłoniętymi próbkami korzenia B09 sosny zwyczajnej ze strefy poza szlakiem (C) (C1-C3) oraz krzywą wzrostu z pnia (B09), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001).....	114
Ryc. 60. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zasłoniętymi próbkami korzenia B09 sosny zwyczajnej ze strefy pobocza (B) (B1-B2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B09), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)	114
Ryc. 61. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami z odsloniętego odgałęzienia głównego korzenia zasłoniętego B09 sosny zwyczajnej ze strefy szlaku (A) (A1-A4) oraz krzywą wzrostu z pnia (B09), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odslonięcia- czerwony znacznik (daty odslonięć korzeni Załącznik 3)	115
Ryc. 62. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zasłoniętymi próbkami korzenia B10 sosny zwyczajnej ze strefy poza szlakiem (C) (C1-C4) oraz krzywą wzrostu z pnia (B10), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001).....	116
Ryc. 63. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zasłoniętymi próbkami korzenia B10 sosny zwyczajnej ze strefy pobocza (B) (B1-B4) oraz krzywą wzrostu z pnia (B10), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)	116
Ryc. 64. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami z głównej części odsloniętej korzenia B10 sosny zwyczajnej ze strefy A (A1-A6) oraz krzywą wzrostu z pnia (B10), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odslonięcia- czerwony znacznik (daty odslonięć korzeni Załącznik 3)	117
Ryc. 65. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zasłoniętymi próbkami korzenia B11 sosny zwyczajnej ze strefy poza szlakiem (C) (C1-C3) oraz krzywą wzrostu z pnia (B11), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001).....	118
Ryc. 66. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy zasłoniętymi próbkami korzenia B11 sosny zwyczajnej ze strefy pobocza (B) (B1-B2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B11), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)	118
Ryc. 67. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami z pierwszej głównej części odsloniętej korzenia B11 sosny zwyczajnej ze strefy A (A1-A2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B11), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odslonięcia- czerwony znacznik (daty odslonięć korzeni Załącznik 3).....	119
Ryc. 68. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami z drugiej głównej części odsloniętej korzenia B11 sosny zwyczajnej ze strefy A (A1-A2) oraz krzywą wzrostu z pnia (B11), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (poziom istotności statystycznej: *p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001). Moment odslonięcia- czerwony znacznik (daty odslonięć korzeni Załącznik 3)	119
Ryc. 69. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami korzenia zasłoniętego (KZ) ze strefy poza szlakiem (C) (C1-C5) oraz krzywą wzrostu z pnia (B15), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (*p<0,05, **p<0,01, *** p<0,001)	128
Ryc. 70. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami korzenia odsloniętego (KO) ze strefy poza szlakiem (C) (C1-C5) oraz krzywą wzrostu z pnia (B15), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (*p<0,05, **p<0,01, *** p<0,001)	128
Ryc. 71. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami korzenia zasłoniętego (KZ) ze strefy pobocza (B) (B1-B4) oraz krzywą wzrostu z pnia (B15), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (*p<0,05, **p<0,01, *** p<0,001)	130
Ryc. 72. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami korzenia odsloniętego (KO) ze strefy pobocza (B) (B1-B4) oraz krzywą wzrostu z pnia (B15), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (*p<0,05, **p<0,01, *** p<0,001)	130
Ryc. 73. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami korzenia zasłoniętego (KZ) ze strefy szlaku (A) (A1-A3) oraz krzywą wzrostu z pnia (B15), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (*p<0,05, **p<0,01, *** p<0,001).....	132
Ryc. 74. Porównanie sekwencji przyrostów rocznych pomiędzy próbkami korzenia odsloniętego (KO) ze strefy szlaku (A) (A1-A3) oraz krzywą wzrostu z pnia (B15), wartości po datowaniu pomostowym. R= współczynnik korelacji Pearson'a (*p<0,05, **p<0,01, *** p<0,001). Moment odslonięcia- czerwony znacznik (daty odslonięć korzeni Załącznik 3).....	132

- Ryc. 75. Wskaźniki anatomiczne próby B15A1 korzenia odstłoniętego (KO) sosny zwyczajnej pobranego z powierzchni szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek. Objasnienia: powierzchnia komórek drewna wczesnego (EW)- linia (kolor fioletowy), procentowy udział drewna późnego (LW)- słupki (kolor szary), moment odstłonięcia korzenia- znacznik (kolor różowy). 133
- Ryc. 76. Uszkodzenia mechaniczne na tle średniej krzywej wzrostu dla części odstłoniętej korzenia (KO) strefy A ze szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek. Objasnienia: średnia krzywa wzrostu dla prób odstłoniętych strefy A- linia (kolor czerwony), blizny- słupki (kolor niebieski), traumatyczne kanały żywiczne- linia (kolor zielony), moment odstłonięcia korzenia- znacznik (kolor różowy). Liczba uszkodzeń mechanicznych w danym roku przedstawiona w postaci wartości skumulowanej..... 134
- Ryc. 77. Schemat odstłonięcia korzenia w wyniku procesów erozyjno-denudacyjnych (A) oraz odstłonięcia korzenia w wyniku wzrostu wtórnego (B). Określenie wielkości korzenia (różowy okrąg) w momencie odstłonięcia na podstawie zmian przyrostowych i anatomicznych pozwala na określenie charakteru procesu odpowiedzialnego za odstłonięcia korzenia (za H. Gärtner'em 2007, zmodyfikowane przez P. Matulewski). Dr- grubość erodowanej warstwy gruntu ; Gr1, Gr2 -wzrost korzeni po odstłonięciu 139
- Ryc. 78. Podniesienie pozycji osi korzenia odstłoniętego sosny zwyczajnej w obrębie szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek..... 142
- Ryc. 79. Szkic sytuacyjny położenia korzenia sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w obrębie szlaku turystycznego przed odstłonięciem (A) oraz odstłoniętego (B) prezentujący parametry morfologii korzenia oraz pokrywy glebowej stosowane do obliczenia tempa denudacji antropogenicznej (DrA)..... 144
- Ryc. 80. Histogram rozkładu klas tempa denudacji antropogenicznej (DrA) korzeni sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) ze stanowiska Bachotek objętych analizami dendrogeomorfologicznymi. Poszczególne klasy zawierają się w następujących przedziałach tempa denudacji -klasa I: 0,71-1,2 mm/rok; klasa II: 1,21-1,7 mm/rok; klasa III: 1,71-2,2 mm/rok; klasa IV: 2,21-2,7 mm/rok; klasa V: 2,71-3,2 mm/rok; klasa VI: 3,21-3,7 mm/rok; klasa VII: <3,71 mm/rok..... 145
- Ryc. 81. Rozkład przestrzenny klas tempa denudacji antropogenicznej (DrA) (skala odcieni szarości) wraz z lokalizacją próbek korzeni sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) poddanych analizie dendrogeomorfologicznej na stanowisku Bachotek (w okręgu podano numer identyfikacyjny korzenia); klasa I: 0,71-1,2 mm/rok; klasa II: 1,21-1,7 mm/rok; klasa III: 1,71-2,2 mm/rok; klasa IV: 2,21-2,7 mm/rok; klasa V: 2,71-3,2 mm/rok; klasa VI: 3,21-3,7 mm/rok; klasa VII: <3,71 mm/rok; różowa gwiazdka- maksymalna wartość tempa denudacji, żółta gwiazdka- minimalna wartość tempa denudacji..... 146
- Ryc. 82. Porównanie średniej wartości tempa denudacji antropogenicznej (DrA) obliczonej na podstawie analiz dendrochronologicznych korzeni sosny zwyczajnej w obrębie szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek z wiekiem korzeni w czasie odstłonięcia. Liczba korzeni- kolor szary, średnie DrA obliczone danego wieku korzenia- kolor różowy. 1,93 mm/rok średnie DrA na szlaku turystycznym- linia przerywana 147
- Ryc. 83. Wykres średniej wartości tempa denudacji antropogenicznej (DrA) na szlaku turystycznym na stanowisku Bachotek dla korzeni odstłoniętych sosny zwyczajnej w poszczególnych latach. Liczba korzeni- kolor szary, średnie tempo denudacji antropogenicznej dla danego roku odstłonięcia korzenia (DrA)- kolor różowy, 1,93 mm/rok średnie (DrA) na szlaku turystycznym- linia przerywana 148
- Ryc. 84. Zmienność tempa denudacji antropogenicznej w przedziałach dziesięcioletnich na podstawie odstłonięć korzeni sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w obrębie stanowiska Bachotek. Liczba korzeni- kolor szary, średnie tempo denudacji (DrA)- kolor różowy 149
- Ryc. 85. Testy diagnostyczne zmiennych użytych w modelach prostej regresji liniowej badających zależności między uzyskanym tempem denudacji (DrA, zmienna opisywana) a zmiennymi opisującymi, tj. właściwościami fizycznymi gleby na szlaku, morfologią korzenia oraz morfometrią szlaku turystycznego stanowiska Bachotek. Histogramy obrazują rozkład każdej ze zmiennych. Wartości liczbowe w górnej części wykresu prezentują macierz korelacji pomiędzy zmiennymi wraz z podaniem poziomu istotności statystycznej - czerwone gwiazdki (*- $p < 0.05$; ** - $p < 0.01$; ***- $p < 0.001$); dodatkowo rosnąca wielkość czcionki współczynnika korelacji wskazuje na jego rosnącą wartość. Dolne wykresy rozrzutu prezentują zależności pomiędzy zmiennymi w sposób graficzny i mogą być podstawą wnioskowania, czy zależności pomiędzy zmiennymi mają charakter liniowy czy nieliniowy. 150
- Ryc. 86. Stanowisko Bachotek na archiwalnych mapach topograficznych z roku 1893(A), 1911(B), 1938(C) oraz 1952(D). Źródło danych kartograficznych: niemieckie mapy topograficzne Messtischblätter w skali 1:25 000 (2682 Pokrzydowo z 1911 roku), Wojskowy Instytut Geograficzny w skali 1:25 000 (P35-S29-G Brodnica z 1938 roku), Army Map Service w skali 1:25 000 (AMS_M851 Pokrzydowo 2682 z 1953 roku), Karte des Deutschen Reiches w skali 1:100 000 (197 Kauernik/Kurzętnik z 1893 roku). Badany odcinek szlaku turystycznego- linia różowa 157

Spis tabel

Tab. 1. Negatywne skutki ruchu turystycznego na wybrane komponenty środowiska geograficznego	65
Tab. 2. Łączna liczba turystów zarejestrowana na szlaku turystycznym na stanowisku Bachotek dla okresu pomiarowego 2014-2016.....	67
Tab. 3. Statystyki opisowe chronologii indeksowanej drzew sosny zwyczajnej	71
Tab. 4. Charakterystyka pozytywnych (kolor jasny czerwony) oraz negatywnych (jasny niebieski) lat wskaźnikowych sosny zwyczajnej poddanej (PRES) i niepoddanej (REF) presji turystycznej na stanowisku Bachotek wraz z potwierdzeniem ich wystąpienia w publikacjach naukowych dotyczących sosny zwyczajnej na terenie Polski północnej; kolorem ciemno szary zaznaczono pozytywne wspólne lata wskaźnikowe dla obu chronologii; kolorem jasno szarym zaznaczono negatywne wspólne lata wskaźnikowe.....	75
Tab. 5. Odległość od pnia oraz głębokość zalegania i wysokość podparcia nad powierzchnią szlaku turystycznego analizowanych prób korzeni sosny zwyczajnej (<i>Pinus sylvestris</i> L.) z wybranych drzew rosnących w obrębie stanowiska Bachotek z podziałem na strefy korzenia: A - strefa szlaku, B - strefa pobocza, C -strefa poza szlakiem	101
Tab. 6. Pozycja względem pnia oraz głębokość zalegania poniżej poziomu gruntu i wysokość podparcia nad powierzchnią szlaku turystycznego pobranych prób korzenia zasłoniętego (KZ) oraz odsłoniętego (KO) z drzewa B15 z podziałem na strefy: poza szlakiem (C), pobocza (B) oraz szlaku (A).....	124
Tab. 7. KORZEŃ ZASŁONIĘTY (KZ). Wybrane cechy morfometryczne oraz wskaźniki przyrostowe i anatomiczne pobranych prób z korzenia ZASŁONIĘTEGO (KZ) z podziałem na strefy: poza szlakiem (C), pobocza (B) oraz szlaku (A)	125
Tab. 8. KORZEŃ ODSŁONIĘTY (KO). Wybrane cechy morfometryczne oraz wskaźniki przyrostowe i anatomiczne pobranych prób z korzenia odsłoniętego (KO) z podziałem na strefy: poza szlakiem (C), pobocza (B) oraz szlaku (A)	126
Tab. 9. Współczynnik korelacji Pearson'a pomiędzy próbkami korzenia zasłoniętego (KZ) oraz odsłoniętego (KO) ze szlaku turystycznego stanowiska Bachotek pobrane z tej samej odległości względem podstawy pnia drzewa B15. R= współczynnik korelacji Pearson'a (*p<0.05, **p<0.01, *** p<0.001)	135
Tab.10. Porównanie aktualnie stosowanych metod kalkulacji tempa ubytku materiału przy użyciu odsłoniętych korzeni wykorzystywanych w dendrogeomorfologii. Kropką zaznaczono badaną cechę w ramach danej metody.	141
Tab. 11. Średnie tempo denudacji antropogenicznej (DrA) uzyskane w poszczególnych latach na podstawie analizy dendrogeomorfologicznej korzeni odsłoniętych sosny zwyczajnej na szlaku turystycznym ze stanowiska Bachotek ..	148
Tab. 12. Porównanie wartości współczynników korelacji Pearson'a i Spearman'a obliczonych pomiędzy tempem denudacji na szlaku (zmienna opisywana) a poszczególną zmienną opisującą wraz z podaniem poziomów istotności statystycznej (p). Kolorem szary zaznaczono zależności istotne statystycznie; gwiazdką oznaczono zmienne opisujące dla których przeprowadzono transformację logarytmiczną.	151
Tab. 13. Parametry modeli prostej regresji liniowej badających zależności pomiędzy tempem denudacji (DrA) na szlaku turystycznym na stanowisku Bachotek (zmienna opisywana) a wybranymi elementami związanymi z właściwościami fizycznymi pokrywy glebowej na szlaku, morfologią korzenia oraz morfometrią szlaku, dla których wykazano zależności istotne statystycznie. Parametry prostego równania regresji: a - współczynnik kierunkowy; b - wyraz wolny; r ² - współczynnik determinacji	152
Tab. 14. Porównanie wyników dotyczących wielkości tempa ubytku materiału z powierzchni szlaku turystycznego uzyskanych przy użyciu analiz dendrochronologicznych odsłonięć korzeni dla wybranych obszarów badawczych świata z wynikami uzyskanymi w pracy.....	154

Załączniki

ZAŁĄCZNIK 1. Zastosowanie dendrochronologii w badaniach procesów geomorfologicznych. Stan badań od 1986 roku (opracowanie własne)	203
ZAŁĄCZNIK 2. Zastosowanie dendrogeomorfologii do ilościowej oceny tempa ubytku materiału. Stan badań na świecie od 1961 roku (opracowanie własne)	205
ZAŁĄCZNIK 3. Charakterystyka analizowanych w niniejszej pracy 88 próbek korzeni odsłoniętych sosny zwyczajnej (<i>Pinus sylvestris</i> L.) pobranych w obrębie szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek (Pojezierze Brodnickie) (patrz. Rozdział 11)	208
ZAŁĄCZNIK 4 Charakterystyka korzeni odsłoniętych sosny zwyczajnej (<i>Pinus sylvestris</i> L.) i parametrów wykorzystanych do obliczenia tempa denudacji antropogenicznej (DrA) na szlaku turystycznym na stanowisku Bachotek. (patrz Rozdział 15)	212
ZAŁĄCZNIK 5. Zmienne analizowane w celu określenia ich wpływu na wielkość tempa denudacji antropogenicznej (DrA) na badanym szlaku turystycznym na stanowisku Bachotek (patrz rozdział 15).....	215
ZAŁĄCZNIK 6. Skany wybranych zeszlifowanych korzeni odsłoniętych sosny zwyczajnej pobranych z powierzchni szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek z widocznymi makroskopowo zmianami przyrostowymi i anatomicznymi (patrz Rozdział 12).	216

ZAŁĄCZNIK 1. Zastosowanie dendrochronologii w badaniach procesów geomorfologicznych. Stan badań od 1986 roku (opracowanie własne)

Rodzaj procesu morfogenetycznego	Obszar badań		Autor/-rzy
Procesy osuwiskowe	Pogórze Zachodniobeskidzkie	Pogórze Wiśnickie	Zielonka i in. 2014
	Beskidy Środkowe	Beskid Niski/Masyw Kamienia	Papciak, Malik, Krzemień, Wistuba, Gorczyca, Wrońska-Watach, Sobucki 2015
	Beskidy Środkowe	Beskid Niski, Szymbark, osuwisko Sawicki	Nawrocka 2013, Kiszka 2016
		Beski Niski	Krapiec i in. 2004; Krapiec i in. 2008
	Karpaty Fliszowe		Krapiec, Margielewski 1991, 2000
	Sudety Wschodnie	Masyw Śnieżnika/Średniak	Remisz, Bijak, Parzóch, Witek 2014
	Sudety Środkowe	Góry Kamienne/Garbatka/Suchawa/Turzyna	Migoń i in. 2013, 2014;
	Beskid Śląski	Węgierska Górka	Wiktorowski i in. 2017
	Beskidy Zachodnie	Milówka/Beskid Żywiecki	Wistuba, Malik, Polowy, Michałowicz 2014
	Tatry Wysokie	Dolina Roztoki	Zielonka, Dubaj 2009
Uznam i Wolin	Woliński PN	Bednarz 1986	
spętywanie	Sudety Środkowe	Góry Stołowe/ Rogowa Kopa	Buchwał, Winowski 2008, 2009
sufozja	Bieszczady	zlewnia Bereźnica Wyżyna	Pawlik, Migoń, Owczarek, Kacprzak 2013; Pawlik i in. 2017
erozja wąwozowa	Pojezierze Litewskie (Suwalskie)	Dolina Błędzianki/Szeskie Wzgórza	Bernatek-Jakiel, Wrońska-Watach 2018
	Beskidy Zachodnie	Gorce	Morawska 2012; Morawska, Wrońska-Watach 2012
	Wyżyna Śląska/Nizina Śląska	Wysoczyzna Proboszczowicka/Leśnica	Morawska 2012; Morawska, Wrońska-Watach 2012
erozja źródłiskowa	Beskidy Zachodnie	Gorce	Malik, Gerold 2006; Malik 2005, 2006, 2008a, 2008b; Poręba, Wistuba, Malik 2014
erozja rzeczna	Beskidy Zachodnie	Gorce	Wrońska-Watach 2006, 2009, 2014; Buchwał, Wrońska-Watach 2008; Wrońska-Watach i in.2012
	Sudety Środkowe	Ścinawka koto Gorzuchowa	Witek, Remisz, Bijak 2014
	Pogórze Spisko-Gubałowskie	Białka	Kaczka, Wyźga 2008
	Obniżenie Orawsko-Podhalańskie	Czarny Dunajec	Kaczka, Wyźga, Zawiejska 2008; Rzepecka, Czajka, Mikuś, Kaczka, Wyźga 2012; Mikuś, Wyźga, Kaczka, Walusiak, Zawiejska 2013
	Tatry	Chochołowski, Roztoka, Rybi Potok	Kaczka, Czajka, Janecka 2014
		Potok Waksmundzki	Zielonka, Holesa, Ciapała 2008
Góry Opawskie	Biała Głuchotaska	Malik, Owczarek 2005	
Nizina Śląska	Równina Opolska/Mała Panew	Ciszewski, Malik, Rahmonov 2004; Malik 2002, 2004a, 2004b, 2005, 2007	

Rodzaj procesu morfogenetycznego	Obszar badań		Autor/-rzy
procesy erozyjno-denudacyjne	Tatry	Kuźnice-Nosal; Strążyska-Grzybowiec; Mała Łaka-Miętusi	Ciapała, Adamski, Zielonka 2014
	Besкиды Zachodnie	Masyw Babiej Góry	Buchwał, Wrońska-Wałach 2008; Buchwał 2008, 2009, 2010
	Pojezierze Chelmińsko-Dobrzyńskie	Pojezierze Brodnickie/okolice jez. Wielkie Partęczyny	Zielski, Błaszowski, Barankiewicz 1998
lawiny śnieżne	Tatry Wysokie	Biały Żleb	Lempa, Kaczka, Rączkowska 2014; Lempa, Kaczka, Janecka, Rączkowska 2014, 2016; Kaczka i in. 2015
	Tatry Zachodnie	Dolina Kościeliska	Czajka, Kaczka, Guzik 2012
	Tatry Wysokie	Dolina Rybiego Potoku	Laska, Kaczka 2010
odpadanie/stożki usypiskowe	Sudety Środkowe	Suchawa, Krucza Skala	Remisz, Bijak 2012
		Suchawa	Malik, Owczarek, Migon 2009
		Suchawa, Włostowa	Remisz, Migoń, Malik, Owczarek 2009
	Pogórze Kaczawskie	Góry Suche	Pawlik i in. 2017
		Ostrzyca	Remisz, Bijak 2011; Remisz 2012
trzęsienia ziemi	Tatry	Domański Wierch/Podgród	Michałowicz, Malik, Wistuba 2014
akumulacja eoliczna	Pobrzeże Koszalińskie	Mierzeja Sarbska	Olesiak, Tomasiuk, Kędziora, Wojtan 2014
		Słowiński PN/Wydma Czołpińska	Koprowski, Winchester, Zielski 2010
ekstremalne procesy fluwialne	Tatry	Dolina Chochotowska, Potok Strążyski, Roztoki, Rybi Potok	Ballesteros i in. 2015
			Kundzewicz i in. 2014, Kundzewicz i in. 2017
erupcja wulkanów	Tatry	Dolina Rybiego Potoku	Janecka, Kaczka 2014, 2016

ZAŁĄCZNIK 2. Zastosowanie dendrogeomorfologii do ilościowej oceny tempa ubytku materiału. Stan badań na świecie od 1961 roku (opracowanie własne)

Nr	Rodzaj procesu morfogenetycznego	Środowisko geograficzne	Położenie	Autor/-rzy	Wielkość tempa erozji	Jednostka	Badany gatunek drzewa
1	erozja źródłkowa	leje źródłowe i nisze źródłkowe	Polska, Gorce	Wrońska-Wałach 2009	1,9-19,0	mm.yr-1	<i>Picea abies</i>
2	erozja boczna	brzeg rzeki	Stany Zjednoczone, Texas, Houston, Buffalo and Greens Bayou	Dick i in. 2013 Dick i in. 2015	0,007-0,5	ft.yr-1	<i>Acer Populus Fraxinus Celtis occidentalis Ulms Quercus Fagus Ulmus</i>
3	erozja boczna	brzeg rzeki	Szwajcaria, Mattertal Valley Niemcy	Gärtner i in. 2001	-	-	<i>Larix decidua</i>
4	erozja boczna	brzeg rzeki	Stany Zjednoczone, Virginia South Fork Shenandoah River	Stotts i in. 2014	0,3-21,2 0,3-16,8	cm.yr-1	<i>Fraxinus pennsylvanica Acer negundo, Celtis occidentalis Acer saccharinum</i>
5	erozja boczna	brzeg rzeki	Argentyna, Patagonia	Stoffel i in. 2012			<i>Austrocedrus chilensis Nothofagus dombeyi Pseudotsuga menziesii,</i>
6	erozja boczna akumulacja fluwialna	dolina rzeki	Polska południowa Mała Panew	Malik 2005	0,24-0,36 0,07-1,83	m.yr-1	<i>Pinus sylvestris Alnus glutinosa Alnus incana</i>
7	erozja jeziorna	brzeg jeziora	Włochy, Viterbo, Bolsena Lake	Fantucci 2007	28-92	mm.yr-1	<i>Populus nigra</i>
8	erozja jeziorna	brzeg jeziora	Stany Zjednoczone, Arizona, Rose Canyon Lake	Danzer 1996	1,0	mm.yr-1	<i>Pinus ponderosa Dougl, Ex C, Lawson</i>
9	erozja jeziorna	brzeg jeziora	Francja, Limousin, lac de Saint-Pardoux	Maleval, Astrade 2003	0,2-27	cm.yr-1	
10	erozja jeziorna	brzeg jeziora	Kanada, Québec, St, Lawrence estuary	Bégin i in. 1991a, 1991b, 1992 Desrosiers i in. 1992	0,15	m3m-2.yr-1	<i>Fraxinus pennsylvanica Populus deltoides Ulmus americana Populus balsamifera Tilia Americana Acer saccharinum</i>
11	erozja gleb	badlandy	Włochy, Apeniny, Monte Oliveto Maggiore Abbey	Bollati i in. 2012	2,7-37,5	mm.yr-1	<i>Pinus pinea</i>
12	erozja gleb	badlandy	Francja Alpes de Haute-Provence Draix	Corona i in. 2011b	5,1	mm.yr-1	<i>Pinus sylvestris</i>
13	erozja gleb	tereny krasowe	Chiny, Guizhou	Luo i in. 2011			<i>Broadlesf Tree Root</i>
14	erozja gleb	stepy	Argentyna, Patagonia, Punta Ninfas	Chartier i in. 2009	2,4-3,1	mm.yr-1	<i>Margyricarpus pinnatus</i>
15	erozja gleb	przecięte drogą zbocza gór	Stany Zjednoczone, Idaho, Ditch Creek	Megahan i in. 1983	10,0-11,0	mm.yr-1	<i>Pinus ponderosa, Pseudotsuga menziesii, Abies grandis</i>
16	erozja gleb	zbocza górskie	Stany Zjednoczone, Kentucky, Appalacy Maxey Flats	Hupp, Carey 1990	1,92-3,16	mm.yr-1	<i>Quercus montana</i>

17	erozja gleb	sawanna	południowa Kenia	Dunne i in. 1978	8,0-14,7	mm.yr-1	<i>Acacia drepanolohium</i> <i>Acacia tortilis</i> <i>Sericomopsis pallida</i>
18	erozja gleb	użytki rolne	północno-zachodnia Etiopia, Amhara region	Belay, Bewket 2012	0,21-1,94(1,26)	mm.yr-1	<i>Croton macrostachyus</i> <i>Acacia lahai</i> , <i>Eucalyptus camaldulensis</i> <i>Albizia</i> <i>gummifera</i> <i>Terminalia brownie</i> <i>Sesbania sesban</i>
19	erozja gleb	stok/droga turystyczna	Chiny, Góry Qilian	Zhou I in, 2013	3,3-13,5(5,3)	mm.yr-1	<i>Piceawilsonii</i>
20	erozja i denudacja antropogeniczna	szlak turystyczny	Hiszpania, Guadarrama Mountains	Bodoque i in. 2005 Rubiales i in. 2008	2,6-1,6	mm.yr-1	<i>Pinus sylvestris</i> L., <i>Quercus ilex</i>
21	erozja i denudacja antropogeniczna	szlak turystyczny	Polska, masyw Babiej Góry	Buchwał 2010	3,6(1,9-6,0)	mm.yr-1	<i>Picea abies</i>
22	erozja i denudacja antropogeniczna	szlak turystyczny	Włochy, Alpy, Valtellina	Pelifini, Santilli 2006	2,7-3,7	mm.yr-1	<i>Pinus montana</i> <i>Pinus cembra</i>
23	erozja i denudacja antropogeniczna	szlak turystyczny	Stany Zjednoczone, Góry Białe, New Hampshire	Krusic 1990	0,66-0,75	cm.yr-1	
24	Erozja i denudacja antropogeniczna	szlak turystyczny	Hiszpania, Ordesa and Monte Perdido National Park	Bodoque i in. 2017	3,1 (1,5) 8,9(4,3)	mm.yr-1	<i>Pinus uncinata</i> , <i>Fagus sylvatica</i>
24	erozja morska (abrazja)	klify nadmorskie	Francja Wyspa Porquerolles	Rovéra i in. 2013 Morel i in. 2017	2,5	cm.yr-1	<i>Pinus halepensis</i>
25	erozja powierzchniowa	zbocza górskie	Stany Zjednoczone, Kolorado, Piceance Basin	Carrara and Carroll 1979	1,18	mm.yr-1	<i>Pinyon</i> (<i>Pinus edulis</i>), <i>Juniperus</i> <i>osteosperma</i>
26	erozja powierzchniowa	badlandy	Hiszpania, Segovia, Guadarrama Mountains	Bodoque i in. 2011	6,2-8,8	mm.yr-1	<i>Pinus sylvestris</i> <i>Pinus pinaster</i>
27	erozja powierzchniowa	wąwozy	Francja Alpes de Haute- Provence Draix	Lopez Saez I in. 2011	5,9	mm.yr-1	<i>Pinus sylvestris</i>
28	erozja powierzchniowa	tereny leśne	Hiszpania, Madryt	Pérez-Rodríguez 2007	3,5-8,8	mm.yr-1	<i>Pinus halepensis</i>
29	erozja powierzchniowa	zbocza górskie	Stany Zjednoczone, Góry Białe, Kalifornia	LaMarche 1961, 1963, 1968	0,015-0,12	mm.yr-1	<i>Pinus aristata</i>
30	erozja powierzchniowa	zbocza górskie	Stany Zjednoczone, Utah, Cedar Breaks	Eardley, Viavant 1967	0,29	mm.yr-1	<i>Pinus longaeva</i> D,K, Bailey
31	erozja powierzchniowa	zbocza górskie	Iran, Golestan	Bahrami i in.2011	0,54	mm.yr-1	<i>Taxus</i> , <i>Chamaecyparis</i> , <i>Quercus</i> ,, <i>Fraxinus</i>
32	erozja powierzchniowa	badlandy	Hiszpania, Segovia,	Ballesteros- Cánovas i in. 2015	1,8-16,2	mm.yr-1	<i>Pinus pinaster</i>
33	erozja powierzchniowa	badlandy	Hiszpania, Segovia, Guadarrama Mountains	Bodoque i in. 2015	1,4-14,0	mm.yr-1	<i>Pinus pinaster</i>

34	erozja powierzchniowa	zbcza wzniesień	Stany Zjednoczone, Wyżyna Kolorado, Kolorado	McAuliffe i in. 2006	1,9	mm.yr-1	<i>Pinyon pine (Pinus edulis)</i>
35	erozja powierzchniowa	wysokogórska łąka leśna	Stany Zjednoczone, California, Horseshoe meadow	Scuderi 2017	0,29-0,45	cm.yr-1	<i>Pinus Balforiana</i>
36	erozja wąwozowa	wąwozy	południowo-wschodnia Hiszpania, Guadalentin	Vandekerckhove i in. 2001	6,0	m3/yr-1	<i>Pinus halepensis</i>
37	erozja wąwozowa	wąwozy	południowo-wschodnia Słowacja	Šilhán i in. 2016	1,0	cm.yr-1	<i>Quercus petraea Carpinus betulus Tilia cordata Robinia pseudoacacia</i>
38	erozja wąwozowa	wąwozy	Francja Alpes de Haute-Provence Draix	Corona i in. 2011a	5,9-6,3	mm.yr-1	<i>Pinus sylvestris</i>
39	erozja wąwozowa	wąwozy	Polska, Wysoczyzna Proboszwicka	Malik 2008	0,21-0,52/0,63/0,18-1,98	mm.yr-1	<i>Fagus sylvatica</i>
40	erozja wąwozowa	wąwozy	Czechy, Vsetínské vrchy	Šilhán i in. 2012	0,16-3,19	m.yr-1	<i>Picea abies Larix decidua</i>
41	erozja wąwozowa	wąwozy	Polska, Pojezierze Litewskie	Morawska 2012	0,2-6,0	cm.yr-1	<i>Fraxinus excelsior Acer platanoides , Alnus glutinosa</i>
42	procesy osuwiskowe	zbcza górskie	południowo-wschodnia Francja, Davids-Bas landslide	Lopez Saez i in. 2014			<i>Pinus uncinata</i>
43	procesy osuwiskowe sływy gruzowe	zbcza górskie	Ukraina, Góry Krymskie	Šilhán i in. 2016	1,0	cm.yr-1	<i>Drzewa iglaste</i>
44	procesy osuwiskowe sływy gruzowe erozja boczna erozja liniowa	strumienie górskie	środkowa Szwajcaria, Brüggentalbach Steinibach	Hitz i in. 2008			<i>Fraxinus excelsior</i>
45	sedymentacja	lasy łęgowe	Brazylia, Goiás	Momoli i in.2012	1,4	mm.yr-1	<i>Guarea guidonea</i>
46	sedymentacja	dolina rzeczne	Francja, Dorzecze Rodanu	Piegay i in.2008	0,65-2,4	cm.yr-1	<i>Fraxinus excelsior Populus nigra Alnus glutinosa</i>
47	sedymentacja	dolina rzeczne	Stany Zjednoczone, Indiana/Illinois Kankakee river	Phipps i in. 1995	0,59-0,75	cm.yr-1	<i>Fraxinus, Ulmus, Quercus</i>
48	sedymentacja	zlewnia rzeki	Stany Zjednoczone, północna Arizona	McCord 1987			
49	sedymentacja eoliczna	wydmy subarktyczne	Kanada, Québec, Zatoka Hudson	Marin, Filion 1992	2,5-3,3 7,65 18,0-30,0 74,0	cm.yr-1	<i>Picea glauca</i>
50	sedymentacja eoliczna	wydmy nadmorskie	Polska północna Stowiński PN	Koprowski i in. 2010	2,4-3,5	mm.yr-1	<i>Pinus sylvestris</i>
51	sedymentacja eoliczna	wydmy	Holandia, Deelensche Start, Loonse en Drunense Duinen	den Ouden i in. 2007	0,02-0,2	m.yr-1	<i>Quercus robur</i>

ZAŁĄCZNIK 3. Charakterystyka analizowanych w niniejsze pracy 88 próbek korzeni odsłoniętych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) pobranych w obrębie szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek (Pojezierze Brodnickie) (patrz. Rozdział 11)

NR	ID PRÓBK	PIERWSZY ROK WYDAT, PRZYROSTU	ROK ODSŁONIĘCIA	TYP ODSŁONIĘCIA KORZENIA E- erozyjne D- denudacyjne W- wzrost wtórny	TYP DRZEWA Z ODSŁONIĘCIEM KORZENI	ŚREDNICA KORZENIA (mm)	POWIERZCHNIA KORZENIA (mm ²)	KOLISTOŚĆ KORZENIA	POŁOŻENIE KORZENIA WZGLĘDEM SZLAKU 1- PROSTOPADLE 2- RÓWNOLEGLE	ZMIANA POZYCJI OSI KORZENIA ODSŁONIĘTEGO WZGLĘDEM CZĘŚCI ZASŁONIĘTEJ (cm)	DLUGOŚĆ ODSŁONIĘCIA KORZENIA (cm)	SZEROKOŚĆ SZLAKU (cm)	ODLEGŁOŚĆ OD PNIA (cm)
1	B01A0	1982	1989	E	IV	22	748,5	0,87	1	4,2	92 (187)	172	250
2	B01A1A	1979	1989	E		29,6	384,7	0,85					
3	B01A1B	1979	1989	D		20,3	308,8	0,95					
4	B01A1C	1977	1989	D		29,1	2144,8	0,76					
5	B01AA	1980	1989	E		30,4	798,1	0,86					
6	B01A2	1986	1990	D		24,3	798,0	0,87					
7	B01A2A	1984	1990	D		21,5	654,0	0,88					
8	B02	1988	2001	E	I	53,3	816,5	0,79	2	3,6	103	102	380
9	B03	1976	2000	E	II	39,2	1363,6	0,80	1	9,1	48	144	355
10	B03A1	1976	2000	D		36,1	1278,0	0,81					
11	B04	1998	2007	E	I	21,2	1086,6	0,81	1	10,2	35	133	250
12	B04A1	1999	2007	D		20,8	987,0	0,83					
13	B05A1	1969	1990	D	IV	29,8	629,7	0,90	2	7,1	78 (165)	127	340
14	B05A2	1970	1990	D		23,8	605,3	0,92					
15	B05A3	1970	1990	D		24,1	460,7	0,93					
16	B05A4	1963	1999	D		36	884,9	0,82					
17	B06A0	1974	1977	D	IV	33,1	1062,8	0,79	1	4,8	68 (102)	183	350
18	B06A1	1974	1977	W		30,8	873,7	0,86					
19	B06A2	1974	2000	D		31,2	889,0	0,86					
20	B06A3	1974	2000	D		30,2	823,1	0,85					

21	B07A	1969	1974	D	III	25,1	311,3	0,89	1	5,3	98 (162)	133	245
22	B07A0	1969	1974	D		28,1	445,0	0,81					
23	B07A1	1969	1974	D		27,1	315,2	0,87					
24	B07A2	1969	1974	D		26,2	293,4	0,81					
25	B08A	1971	1977	D	II	39,1	967,9	0,86	1	6,9	85	140	325
26	B09A1	1986	2002	D	II	19,2	445,9	0,86	2	7,6	77	121	455
27	B09A2	1988	2001	E		27,3	708,6	0,90					
28	B09A3	1993	2001	E		30,2	1014,8	0,85					
29	B09A4	1995	2002	D		19,1	476,5	0,93					
30	B10A1	1994	2000	D	I	18,2	845,5	0,82	1	6,5	88	140	350
31	B10A2	1994	2000	D		18,8	557,8	0,82					
32	B10A3	1995	2001	D		20,5	761,6	0,83					
33	B10A4	1996	2001	D		26,7	1087,6	0,78					
34	B10A5	1997	2001	D		25,4	937,4	0,79					
35	B10A6	1998	2002	E		26,6	521,8	0,91					
36	B11A01	1968	1986	D	III	29,3	610,2	0,88	1	7,1	69 (132)	132	275
37	B11A02	1968	1977	D		31,2	793,6	0,93					
38	B11A1	1971	1986	D		27,8	434,7	0,75					
39	B11A2	1971	1977	D		34,2	788,0	0,93					
40	B12A	1997	2003	D	I	17,6	714,6	0,90	2	5,4	38	117	320
41	B12B	1997	2003	D		19,6	400,7	0,84					
42	B12C	1997	2003	W		16,9	327,0	0,92					
43	B13	1965	1974	D	I	21,2	418,8	0,91	1	4,8	37	156	280
44	B14	1977	1986	D	I	20,6	277,1	0,85	1	5,3	42	140	265
45	B15A1	1965	1971	W	V	51,2	2097,4	0,81	1	4,2	62	188	480
46	B15A2	1968	1971	W		50,3	1601,2	0,80					

47	B15A3	1971	1971	W		48,9	1464,0	0,81					
48	B16A	1990	2002	D	IV	15,6	167,9	0,93	2	4,5	38 (63)	132	300
49	B16B	1990	2000	E		28,5	547,7	0,83					
50	B16C	1990	2000	D		24,1	535,2	0,86					
51	B16D	1992	2007	W		23,5	228,5	0,92					
52	B17A	1982	1992	D	II	28,4	419,6	0,84	2	5,6	48	148	270
53	B18A	1996	2001	W	IV	24,3	285,2	0,87	1	6,2	28 (53)	102	320
54	B18B	1996	2003	D		22,8	306,3	0,83					
55	B19	1994	2001	D	I	21,1	210,7	0,77	1	6,0	29	114	270
56	B20	1990	2002	D	I	20,4	503,2	0,90	1	6,1	27	123	265
57	B21A	2001	2007	W	I	14,6	118,7	0,90	1	4,0	18	130	250
58	B21B	2001	2004	D		18,8	279,2	0,77					
59	B22A	1993	2002	D	III	17,2	221,3	0,96	1	4,8	30 (62)	180	260
60	B22B	1993	2002	D		21,1	249,6	0,87					
61	B22C	1994	2004	W		15,6	90,6	0,96					
62	B23A	1993	2001	D	I	11,8	218,1	0,88	1	4,6	34	174	240
63	B23B	1993	2001	W		11,2	159,8	0,83					
64	B23C	1993	2001	D		12,1	177,1	0,86					
65	B24A	1976	2000	E	IV	26,1	796,8	0,86	1	6,2	40 (68)	163	280
66	B25A	1985	1992	D	I	29,8	1464,4	0,80	1	5,1	57	153	190
67	B26A	1991	2007	E	I	22	930,3	0,81	1	4,5	52	165	210
68	B26B	1991	2007	W		20,3	694,2	0,85					
69	B27A	1987	2001	D	IV	23,1	637,9	0,85	1	5,1	34	173	200
70	B28A	1987	2001	D	IV	23,5	684,8	0,84	1	4,4	16	180	220
71	B29	1983	1998	D	I	16,3	80,8	0,86	1	4,2	25	193	245
72	B30	1992	2001	D	I	44,5	806,1	0,75	1	5,1	38	164	320

73	B31	1979	1986	D	IV	34,2	562,1	0,89	2	6,4	57	147	330
74	B32	1998	2007	D	IV	19,8	511,1	0,83	2	5,2	40	132	335
75	B33	2002	2007	E	I	18,2	243,6	0,66	2	4,4	27	138	340
76	B34A	1997	2001	D	IV	19,3	474,6	0,90	2	4,3	35 (85)	154	260
77	B35	1963	1971	D	I	28,2	521,6	0,82	1	6,5	41	163	165
78	B41	2003	2009	D	II	10,3	84,2	0,85	1	4,8	28	121	220
79	B42	2001	2009	D	II	15,6	194,8	0,75	2	4,2	17	124	230
80	B43A	2003	2009	E	II	8,1	63,5	0,90	1	4,6	24	130	370
81	B43B	2004	2009	E		8,8	65,5	0,88					
82	B43C	2004	2009	W		6,2	57,2	0,92					
83	B44A	2003	2008	E	II	11,8	68,9	0,70	2	4,2	18	130	400
84	B44B	2003	2008	E		12,1	65,2	0,67					
85	B44C	2003	2008	E		10,6	90,5	0,91					
86	B45A	2002	2007	D	III	12,3	183,5	0,92	2	4,4	16 (38)	135	390
87	B46A	2001	2007	E	II	12	133,9	0,84	2	5,1	22	117	350
88	B49A	1997	2007	D	II	12,8	136,4	0,78	1	4,3	28	121	365
						24,0	585,1	0,8		5,0	41,8	143,7	298,0

ZALĄCZNIK 4 Charakterystyka korzeni odstoniętych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) i parametrów wykorzystanych do obliczenia tempa denudacji antropogenicznej (DrA) na szlaku turystycznym na stanowisku Bachotek. (patrz Rozdział 15)

Nr	ID próbki	Rok pobrania	Wiek korzenia	Rok odstonięcia	Wiek po odstonięciu (NRex)	Ex(mm)	Dr(mm)	DrA (mm/rok)	Klasa DrA
1	B01A0	2014	32	1989	25	20,2	24,6	0,98	I
2	B01A1A	2014	35	1989	25	30,3	29,4	1,18	I
3	B01A1B	2014	35	1989	25	13,4	21,2	0,85	I
4	B01AA	2014	37	1989	25	28,1	24,6	0,98	I
5	B01A1C	2014	34	1989	25	24,2	21,1	0,84	I
6	B01A2A	2015	29	1990	25	21,1	21,8	0,87	I
7	B01A2B	2015	31	1990	25	18,3	21,7	0,87	I
8	B02A	2014	26	2001	13	53,1	41,2	3,17	V
9	B03A	2013	37	2000	13	36,3	37,6	2,89	V
10	B03A1	2013	37	2000	13	33	35,9	2,76	V
11	B04A	2015	17	2007	8	21	26,8	3,35	VI
12	B04A1	2015	16	2007	8	20,7	26,4	3,30	VI
13	B05A1	2013	44	1990	23	30,3	32,9	1,43	II
14	B05A2	2013	43	1990	23	23,8	31,3	1,36	II
15	B05A3	2013	43	1990	23	24,1	30,8	1,34	II
16	B05A4	2013	50	1999	14	30,5	36,0	2,57	IV
17	B06A0	2013	39	1977	36	29,3	26,1	0,73	I
18	B06A2	2013	39	2000	13	22,6	27,1	2,08	III
19	B06A3	2013	39	2000	13	25,9	29,7	2,28	IV
20	B07A	2015	46	1974	41	24,2	29,2	0,71	I
21	B07A0	2015	46	1974	41	23,9	29,6	0,72	I
22	B07A1	2015	46	1974	41	23,8	29,7	0,72	I
23	B07A2	2015	46	1974	41	23,6	29,9	0,73	I

24	B08A	2014	43	1977	37	38,2	33,3	0,90	I
25	B09A1	2014	28	2002	12	17,4	23,0	1,91	III
26	B09A2	2014	26	2001	13	27	28,9	2,22	IV
27	B09A3	2014	21	2001	13	30	29,2	2,25	IV
28	B09A4	2014	19	2002	12	19	28,2	2,35	IV
29	B10A1	2014	20	2000	14	11	22,6	1,61	II
30	B10A2	2014	20	2000	14	12,3	23,9	1,71	III
31	B10A4	2014	19	2001	13	12	24,5	1,88	III
32	B10A5	2014	18	2001	13	26,5	30,7	2,36	IV
33	B10A6	2014	17	2001	13	24,9	25,7	1,97	III
34	B10A7	2014	16	2002	12	22	28,6	2,38	IV
35	B11A01	2015	47	1986	29	26,1	30,2	1,04	I
36	B11A02	2015	47	1977	38	29,3	29,1	0,76	I
37	B11A1	2015	44	1986	29	27,1	28,3	0,98	I
38	B11A2	2015	44	1977	38	32	29,7	0,78	I
39	B12A	2016	19	2003	13	15,2	24,6	1,89	III
40	B12B	2016	19	2003	13	17,1	25,3	1,95	III
41	B13A	2015	50	1974	41	21	30,8	0,75	I
42	B14A	2015	38	1986	29	15,2	23,2	0,80	I
43	B16A	2015	25	2002	13	11,1	23,2	1,78	III
44	B16B	2014	24	2000	14	27	27,9	1,99	III
45	B16C	2014	24	2000	14	21,3	26,8	1,91	III
46	B17A	2015	33	1992	23	25,2	27,8	1,21	II
47	B18B	2015	19	2003	12	20,3	26,4	2,20	III
48	B19	2015	21	2001	14	20,9	24,8	1,77	III
49	B20	2015	25	2002	13	13,9	24,6	1,89	III
50	B21B	2015	14	2004	11	17,8	23,6	2,14	III

51	B22A	2015	22	2002	13	13,2	26,0	2,00	III
52	B22B	2015	22	2002	13	16,2	25,3	1,95	III
53	B23A	2016	23	2001	15	8,1	21,0	1,40	II
54	B23C	2015	22	2001	14	8,2	22,1	1,58	II
55	B24	2016	40	2000	16	18,3	30,2	1,89	III
56	B25A	2015	30	1992	23	22,1	28,2	1,23	II
57	B26A	2016	25	2007	9	17,2	28,5	3,17	V
58	B27A	2015	28	2001	14	13	25,8	1,84	III
59	B28A	2015	28	2001	14	15,4	26,9	1,92	III
60	B29A	2015	32	1998	17	12,4	25,5	1,50	II
61	B30A	2015	23	2001	14	44,1	40,6	2,90	V
62	B31A	2015	36	1986	29	31,3	30,2	1,04	I
63	B32A	2015	17	2007	8	17,8	28,4	3,54	VI
64	B33A	2015	13	2007	8	21,8	30,4	3,80	VII
65	B34A	2015	18	2001	14	17,9	23,7	1,69	II
66	B35A	2015	52	1971	44	26,1	32,6	0,74	I
67	B41A	2015	12	2009	6	8,2	22,1	3,68	VI
68	B42	2015	14	2009	6	14,2	21,3	3,55	VI
69	B43A	2015	12	2009	6	6,9	21,6	3,59	VI
70	B43B	2015	11	2009	6	6,8	21,6	3,60	VI
71	B44A	2015	12	2008	7	11,2	22,2	3,16	V
72	B44B	2015	12	2008	7	11,1	22,6	3,23	VI
73	B44C	2015	12	2008	7	10	22,7	3,24	VI
74	B45A	2015	13	2007	8	11,8	23,0	2,87	V
75	B46A	2015	14	2007	8	12	23,1	2,88	V
76	B49A	2015	18	2007	8	11,2	22,3	2,79	V
średnia			28		18	20,9	27,1	1,93	

ZAŁĄCZNIK 5. Zmienne analizowane w celu określenia ich wpływu na wielkość tempa denudacji antropogenicznej (DrA) na badanym szlaku turystycznym na stanowisku Bachotek (patrz rozdział 15)

Nr	Zmienna opisująca	Zakres wartości	Jednostka	Liczba analizowanych próbek korzeni
Czynniki związane z charakterystyką pokrywy glebowej szlaku				
1	zwięzłość	5.63-22.5	[kg/cm ²]	76
2	gęstość objętościowa gleby	0.97-1.81	[g/cm ³]	76
3	zawartość materii organicznej	3.02-15.25	[%]	76
4	wilgotność objętościowa	2.34-19.0	[%]	76
Czynniki związane z charakterystyką korzeni odsłoniętych ze szlaku				
5	wiek korzenia po odsłonięciu	6-41	-	76
6	powierzchnia korzenia	0,63-21,42	[cm ²]	76
7	średnica korzenia	8.2-56.3	[mm]	76
8	wysokość korzenia nad powierzchnią gruntu	5.1-51.2	[mm]	76
9	wskaźnik kolistości	0.66-0.96	-	76
10	położenie względem przebiegu szlaku	67% prostopadle 33% równoległe 14.1-86.8	[°]	41
11	typ odsłonięcia szlaku	64% denudacyjne 22% erozyjne	1-denudacyjne 2-erozyjne	76
12	długość części odsłoniętej korzenia	16.0-103.0	[cm]	41
Czynnik związany z użytkowaniem szlaku				
13	szerokość szlaku		[cm]	41

ZAŁĄCZNIK 6. Skany wybranych wyszlifowanych próbek korzeni odśnieżonej sosny zwyczajnej pobranych z powierzchni szlaku turystycznego na stanowisku Bachotek z widocznymi makroskopowo zmianami przyrostowymi i anatomicznymi (patrz Rozdział 12).

