

## Badania nad bonitacją drzewostanów w świetle literatury

Site index research: a literature review

Wojciech Kędziora\* , Robert Tomusiak , Tomasz Borecki 

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Instytut Nauk Leśnych, Katedra Urządzania Lasu, Dendrometrii i Ekonomiki Leśnictwa, ul. Nowoursynowska 159; 02-776 Warszawa, Polska

\*Tel. +48 22 5938204, e-mail: wojciech.kedziora@wl.sggw.pl

**Abstract.** The purpose of this paper was to review literature covering the topic of site index with particular emphasis on Scots pine, the most important forest-forming species in Poland. We discuss the history of the site index, research on various tree species, statistical modelling methods, the spatial application of site index and age impact assessment.

The history of research on the site index of forest species is long and dates back to the 18th century. Many researchers thought that determining the quality of the habitat is very important from the point of view of rational forest management. The site index, as a measure of the potential of the habitat on which the forest grows, is one of the most important characteristics of forest stands. The site index depends on the selected model, but is most often expressed as the average or top height of trees of a given species at a certain age.

In our review, we point out several insufficiencies of studies on the site index, external influences and the connection of the site index with spatial conditions. Furthermore, research conducted so far has not explicitly confirmed that there is a relationship between the site index of pine stands and their geographical location in Poland. More research on the site index, especially in regard with climate change, is needed.

**Keywords:** forest site index, tree growth, forest site quality, forest site productivity

**Słowa kluczowe:** wskaźnik bonitacji drzewostanów, wzrost drzew, jakość drzewostanów, produktywność drzewostanów

### 1. Wstęp

Dynamiczne zmiany zachodzące w dostępności do informacji pozwalają na prowadzenie badań w coraz szerszym zakresie. Dzięki nowoczesnym metodom zbioru danych terenowych z dużej liczby powierzchni próbnych wiele problemów, które jeszcze do niedawna były bez odpowiedzi, jest rozwiązywanych. Jednym z takich ważnych problemów naukowych dla leśnictwa jest pełniejsza charakterystyka bonitacji i próba przestrzennego scharakteryzowania wzrostu lasów na podstawie tej cechy.

W biocenozie wszystkie gatunki drzew są jednakowo ważne, jednak z punktu widzenia gospodarczego niektóre z nich traktowane są priorytetowo. W Polsce spośród wszystkich gatunków lasotwórczych sosna zwyczajna *Pinus sylvestris* L. zasługiwała i zasługuje na szczególne uznanie. Ze względu na występujące gleby oraz klimat,

tworzące siedlisko, sosna jest najczęstszym gatunkiem w polskich lasach. Jej wartość dla polskiego leśnictwa podnosi mało problematyczny sposób prowadzenia oraz wysoka produktywność i gospodarcza użyteczność.

Dokładniejsze poznanie czynników wpływających na wzrost sosny przyczyni się do wzbogacenia wiedzy podstawowej o tym gatunku, a tym samym pozwoli na efektywniejsze gospodarowanie. Bonitacja drzewostanów, charakteryzująca możliwości wzrostowe gatunku, jest dobrym miernikiem wpływu otaczającego środowiska na życie drzew. Stała wielkość bonitacji w czasie wyraża niezmienność warunków środowiska, podczas gdy jej wahania świadczą o tym, że niektóre cechy otaczającego ekosystemu podlegają zmianom. Poznanie zmienności i zależności bonitacji od czynników zewnętrznych może być pomocne w zrozumieniu preferencji sosny. Jest to szczególnie aktualne i ważne przy obecnych dynamicznych zmianach klimatu związanych z jego ocieplaniem.

Wpłynęło: 27.02.2020 r., zrecenzowano: 25.03.2020 r., zaakceptowano: 2.04.2020 r.

Celem pracy jest przegląd literatury dotyczącej bonitowania ważnych gatunków leśnych, ze szczególnym uwzględnieniem sosny, najważniejszego gatunku lasotwórczego w Polsce. Dotychczasowy stan wiedzy o bonitacji sosny w Polsce wydaje się niewystarczający, a aktualne możliwości kontynuacji tych badań mogą tę wiedzę znacznie poszerzyć.

## 2. Ewolucja mierników potencjału produkcyjnego lasu

Badania nad bonitacją prowadzone były już w XVIII w. przez Oettelta (1764), który określił wysokość drzew jako wskaźnik „dobroci gleby”. W wieku XIX nastąpił rozwój nauk leśnych, który zmienił podejście do problemu bonitacji. Heyer jako pierwszy zaobserwował powiązanie pomiędzy przyrostem wysokości a wzrostem miąższości (Heyer 1841). Uważał, że określenie jakości siedliska jest ważne z punktu widzenia jego produktywności (Heyer 1845). Franz von Baur opisywał przeciętną wysokość jako najdokładniejszy i jedynie właściwy wskaźnik nie tylko do oceny normalnie wznoszącego drzewostanu, lecz także bonitacji (Baur 1881). W metodzie tej bonitację podzielono na klasy i każdej z nich przyporządkowano równe przedziały przeciętnej wysokości. Przedziały te, wraz z wiekiem drzewostanu, proporcjonalnie zwiększały swój zakres wysokości. Graficzna interpretacja przypominała zwiększające swój zakres pasma, stąd też jej nazwa – metoda pasowa. Zakładała ona, że wysokość drzewostanu wzrasta zgodnie z wyznaczoną krzywą zmiany wysokości oraz że drzewostany w określonym wieku charakteryzują się podobną produktywnością. Od tego czasu, pomimo początkowego sceptycyzmu (np. Hartig 1892) zaczęto utożsamiać bonitację wysokościową z produktywnością. Metoda ta, nazywana „metodą fitocentryczną”, polega na pomiarze roślinności rosnącej na danym terenie (Skovsgaard, Vanclay 2008). W odróżnieniu od „metody geocentrycznej”, opartej na właściwościach gleby i klimatu, jest często łatwiejsza do zastosowania. Metoda fitocentryczna najczęściej zakłada pomiar wielkości plonu roślinnego. W gospodarce rolnej jest to często praktykowany sposób, jednak przy odmienności typów gospodarstw rolnej i leśnej trudny do zastosowania. Rokroczne zbiory plonów w rolnictwie umożliwiają dokonanie wieloletnich analiz zmian produktywności. Taki sposób eksperymentowania w drzewostanach wymagałby wielu wieków badań. W leśnictwie próbę rozwiązania problemu stanowił pomiar wielkości plonu wyrażony miąższością (Assmann 1968) lub przeciętnym przyrostem całkowitej produkcji obliczonym dla wieku 100 lat (Philipp 1893). W czasach gdy w hodowli lasu stosowano słabe trzebieże, pozwalając części drzew opanowanych pozostać w drzewostanie, sposób ten dość dobrze odzwierciedlał możliwości produkcyjne siedliska. Jednak od kiedy zaczęto stosować umiarkowane i silne trzebieże, zdarzało się, że na siedlisku o potencjalnie wyższej produktywności stan zapasu był mniejszy niż na siedlisku

o niższym potencjale. Okazało się, że zasobność nie określa precyzyjnie potencjału produkcyjnego siedliska, ponieważ intensywność zabiegu miała istotny wpływ na wzrost zasobów drzewnych – po silnych trzebieżach potencjał był często niedoszacowany, przy słabych trzebieżach zaś przeszacowany (Magin 1958). W wyniku poszukiwania bardziej dogodnej miary do określania bonitacji wybrano przeciętną wysokość drzewostanu jako miarę, która ulega mniejszym wpływom zewnętrznym.

Pomiar bonitacji na podstawie miąższości bazuje na Prawie Eichhorna (sformułowanym dla jodły), które mówi, że pewnej średniej wysokości drzewostanu dla wszystkich klas siedliska odpowiadają jednakowe miąższości drzewostanu (Eichhorn 1902). W późniejszych latach Gerhardt rozszerzył je o świerk oraz sosnę (Gehrhardt 1909, 1921) oraz reformułował je na „rozszerzone prawo Eichhorna” mówiące o tym, że istnieje zależność pomiędzy produktywnością a wysokością drzewostanu uwarunkowaną siedliskiem, co uodowodnił Assmann (1955, 1959).

## 3. Bonitacja wzrostowa

Bonitacja wzrostowa, rozumiana jako wysokość drzewostanu w konkretnym wieku, jest dziś najbardziej rozpowszechnionym sposobem oceny jakości siedliska leśnego. Aktualnie istnieją dwa podejścia do jej pomiaru i w obu stosuje się sposób wskaźnikowy – należy zmierzyć drzewa próbne i sprawdzić do jakiej bonitacji należą.

Pierwszy sposób zakłada pomiar średniej wysokości i przypisanie jej do konkretnej klasy bonitacji. Rodzi to jednak pewne konsekwencje. W czasie naturalnego wzrostu drzew najstarsze drzewa przegrywają konkurencję i wydzielają się z drzewostanu. Procesy te symuluje się w czasie zabiegów pielęgnacyjnych. Przy silnej trzebieży dolnej może to prowadzić do nagłego i znacznego powiększenia się przeciętnej wysokości. Przykładowo, silna trzebież dolna w 65-letnim drzewostanie zmienia przeciętną wysokość z 24,5 m do 25,9 m, co podwyższa bonitację o 1/2 klasy (Assmann 1968).

Drugi sposób bazuje na określeniu wysokości górnej drzewostanu, rozumianej jako średnia wysokość określonej liczby najgrubszych drzew na powierzchni 1 ha. W tym przypadku, na skutek trzebieży bądź naturalnych procesów wydzielania się drzew, nastąpią jedynie nieznaczne przesunięcia wyników bonitacji. W badaniach z powierzchni doświadczalnych w Sachsenried 2 ustalono, że różnica wysokości górnej i przeciętnej, przy odpowiednim nasileniu zabiegów hodowlanych, może zmniejszyć się z poziomu 2,1 m do 1,0 m (Assmann 1968). Dalsze badania nad zastosowaniem wysokości średniej i górnej pokazały, że dla różnych zabiegów trzebieżowych można uzyskać różnice w bonitacji dochodzące do 3,2 m.

W obu metodach problem może stanowić zmienność osobnicza pod względem wzrostu wysokości. Dynamika wzrostu

odbiegająca od przyjętego „wachlarza” bonitacji skutkuje jej zmianą, najczęściej spadkiem, nawet o 0,7 stopnia jakości. Dodatkowo, np. pogorszenie stosunków wodnych w czasie wzrostu drzewostanu, może powodować obniżenie bonitacji (Assmann 1968).

Nie tylko zmiany poziomu lustra wody mogą wpływać na wielkość bonitacji. Okazuje się, że przyrost wysokości różni się w zależności od klimatu. Porównano dwa rodzaje tablic zasobności z różnych regionów: Hummela i Christiego (1953) dla drzew iglastych Wielkiej Brytanii oraz Wiedemanna (1936) dla świerka w Niemczech i okazało się, że ich tempo wzrostu jest odmienne (Magin 1957).

Problematiczny jest również fakt, że w różnych tablicach używano zarówno różnej liczby klas bonitacji, jak i odmiennej szerokości przedziałów charakteryzujących klasy. Schober (za: Assmann 1968) zaproponował, aby odległości między poszczególnymi klasami bonitacji wynosiły 4 m w wieku 100 lat (4,5 metra dla świerka). Inną propozycją były bonitacje absolutne (w odróżnieniu od klasowych) określające wysokość drzewostanu w wieku rębności. Problemem okazała się ocena bonitacji przy ewentualnej zmianie wieku rębności. Trudności występowały również przy porównywaniu bonitacji absolutnej między gatunkami. Próbą ujednoczenia różnych propozycji był postulat Wecka, aby bonitacja absolutna była mierzona jako przeciętna wysokość drzewostanu w wieku 100 lat (Weck 1948). Stwarzało to jednak problemy omówione wcześniej. Dlatego też aktualnie najbardziej rozpowszechnioną formą określania bonitacji drzewostanów jest propozycja Assmanna. Zakłada ona, że bonitacja wzrostowa drzewostanów to wysokość górna (wysokość 100 najgrubszych drzew na 1 ha) w wieku 100 lat (Assmann 1959).

System absolutnych bonitacji może być przyjęty dla bonitacji wysokościowej (Assmann 1959; Skovsgaard, Vanclay 2008) i jednocześnie jest jednoznaczny w oznaczeniu oraz łatwy w pomiarze, można go porównywać bez dodatkowych przeliczeń. Należy zauważyć, że w leśnictwie pożądaną do określenia cechą jest bonitacja siedliska, określana przy pomocy bonitacji drzewostanu. Ta ostatnia obarczona jest pewnym błędem, np. niedostosowaniem składu gatunkowego do siedliska lub też zaburzonymi warunkami wzrostu w poprzednich okresach (Gieruszyński 1959). Z badań tych wynika, że wskaźnik bonitacji nie jest przystosowany do różnych gatunkowo drzewostanów, współczynnik zadrzewienia nie jest brany pod uwagę, wskaźnik bonitacji nie jest stały i może zmieniać się w czasie, nie można wprost porównywać wskaźnika bonitacji dla różnych gatunków. Należy pamiętać, że problemem jest precyzyjne określenie wieku drzewostanu.

Abstrahując od tych ograniczeń, wskaźnik bonitacji jest użytecznym miernikiem pozwalającym na użycie prostej wartości numerycznej, którą łatwo pomierzyć i zrozumieć leśnikowi. Dopóty będzie on w użyciu, dopóki nie zostanie zastąpiony miernikiem pozbawionym powyższych ograniczeń, którego wyliczenie będzie równie łatwe (Avery et

al. 2019). Stąd też, wskaźnik bonitacji jest najczęściej wyrażany jako górna wysokość drzew danego gatunku w konkretnym wieku (Bruchwald, Kliczkowska 1997; Bruchwald et al. 1999; Sharma et al. 2012; Socha et al. 2017).

Badania nad bonitacją w ujęciu klasowym i absolutnym prowadzone są, jak wcześniej wspomniano, przynajmniej od XVIII w. Głównym efektem tych badań jest budowa modeli wskaźnika bonitacji (krzywych bonitacyjnych) dla różnych gatunków, np. daglezi zielonej *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (Monserud 1984; Means, Helm 1985; Milner 1992), sosny żółtej *Pinus ponderosa* Dougl. ex C. Lawson (Milner 1992), modrzewia zachodniego *Larix occidentalis* Nutt. (Milner 1992), sosny wydmowej *Pinus contorta* Douglas (Milner 1992), sosny taeda *Pinus taeda* L. (Popham et al. 1979; Cao et al. 1997), sosny długoigielnej *Pinus palustris* Mill. (Cao 1997), sosny kalifornijskiej *Pinus radiata* D. Don (Burkhart, Tennent 1977), sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. (Bruchwald 1979; Elfving, Kiviste 1997; Socha, Orzeł 2013), buka pospolitego *Fagus sylvatica* L. (Nord-Larsen 2006), świerka zwyczajnego *Picea abies* L. H. Karst (Kliczkowska, Bruchwald 2000; Socha et al. 2015) czy olchy czarnej *Alnus glutinosa* L. (Socha, Ochał 2017).

W pracy Cieszewskiego i Zasady (2002) przeprowadzono przekształcenie anamorficznego modelu bonitacyjnego Bruchwalda i in. (2000a) do postaci dynamicznej, pozwalającej uzyskać wartość wskaźnika bonitacji dla dowolnie pomierzonej pary ‘wiek – wysokość’ w mniej pracochłonny sposób. Tablice zasobności Szymkiewicza udało się Cieszewskiemu i Zasadzie (2003a) przekształcić w model bonitacyjny. W pracy Cieszewskiego i Zasady (2003b) zaproponowano użycie uniwersalnej metody różnic algebraicznych do wyprowadzenia ogólnych dynamicznych równań bonitacyjnych.

Badania nad zmiennością cech drzew i drzewostanów sosnowych w Polsce, uwzględniające również bonitację, są prowadzone od relatywnie długiego czasu, co warunkuje potencjalnie dużą ilość materiału porównawczego (Bruchwald 1977; Keller 1991; Bruchwald, Kliczkowska 2000; Socha, Orzeł 2011). W piśmiennictwie wyraźnie zaznacza się trend badań nad samymi modelami bonitacyjnymi sosny, zarówno w skali lokalnej (Sewerniak 2008; Beker, Andrzejewski 2013), jak i w skali kraju (m.in. Cieszewski, Zasada 2003a). Z podobnych badań w literaturze znaleźć można jedynie takie, które swoim zasięgiem ograniczają się do wybranych regionów (Sewerniak, Piernik 2012; Socha, Orzeł 2013). Dotychczasowe badania nad zmiennością bonitacji drzewostanów sosnowych w skali kraju wskazały na konieczność włączenia dodatkowych parametrów środowiskowych i drzewostanowych, mogących potencjalnie wpływać na zróżnicowanie bonitacji drzewostanów sosnowych (Bruchwald et al. 2000a).

Badaniami wysokości górnej drzewostanu zajmowali się m.in. Bruchwald (1979), Socha (2005) oraz Beker (2007).

Ten ostatni zaproponował wysokość górną biologiczną – drzew górujących i panujących wg Krafta (1884) – jako najdokładniejszą w całym okresie życia drzewostanu, jednak trudną do zmierzenia ze względu na dużą pracochłonność.

Socha i współpracownicy (2015) w swoich badaniach opracowali modele bonitacyjne dla podstawowych gatunków lasotwórczych w Polsce (sosny, jodły *Abies alba* Mill., jesionu *Fraxinus excelsior* L., osiki *Populus tremula* L., brzozy *Betula* L., olszy czarnej, dębu *Quercus* L., buka, modrzewia *Larix decidua* Mill., świerka, robinii akacjowej *Robinia pseudoacacia* L., dębu czerwonego *Quercus rubra* L., daglezi *Pseudotsuga* Carriere, graba *Carpinus betulus* L., lipy *Tilia* L. i klonu *Acer* L.). Udało im się zbudować matematyczny model wskaźnika bonitacji na podstawie danych z tablic zasobności używanych w Polsce. Dla większości gatunków wykorzystali oni zmodyfikowany model Cieszewskiego (Cieszewski, Zasada 2003b), który dawał najlepsze rezultaty. Opracowali również modele bonitacyjne dla głównych gatunków lasotwórczych Polski, bazując na najnowszym materiale empirycznym (Socha et al. 2017).

W badaniach przeprowadzonych w drzewostanach południowej części Polski (Socha, Orzeł 2013) opracowano zestaw dynamicznych krzywych bonitacyjnych dla sosny. Co więcej, zauważono, że model tablicowy Schwappacha (1943) wykazuje mniejsze tempo wzrostu w młodości i większe przy starszych drzewostanach. Natomiast matematyczny model Bruchwalda (Bruchwald et al. 2000a,b), budowany według innych zasad, wykazuje znaczne rozbieżności pomiędzy prognozowanym a rzeczywistym przebiegiem wzrostu.

W badaniach prowadzonych na terenie Puszczy Niepołomickiej (Socha, Orzeł 2011) opracowano lokalny, dynamiczny system krzywych bonitacyjnych. Badania te zostały rozszerzone w kolejnych latach na drzewostany pochodzące z południowej Polski (Socha, Orzeł 2013), a także na bonitację świerka pospolitego na siedliskach górskich (Socha 2011).

Prace nad ujęciem wzrostu wysokości lub bonitacji w ramy matematyczne prowadził Stępień (1979), który przy użyciu elektronicznych technik obliczeniowych wyznaczył współczynniki równania do obliczania bonitacji w zależności od wieku dla sosny, jodły, świerka, buka oraz dębu. Podobne badania prowadzili także Socha (1997) oraz Jarosz i Kłapeć (2002).

#### 4. Statystyczne sposoby modelowania wskaźnika bonitacji

Analiza wskaźnika bonitacji była również prowadzona w pracach metodycznych, skupiających się na ocenie przydatności różnych metod statystycznych w modelowaniu wartości tej cechy. W pracy Subedi i Foxa (2016) sku-

piającej się nad wpływem cech glebowych na wskaźnik bonitacji sosny taeda *P. taeda* porównano użycie regresji wielokrotnej oraz regresji cząstkowych najmniejszych kwadratów. Wang i współpracownicy (2005) przebadali przy użyciu różnych technik statystycznych przestrzenną zależność wskaźnika bonitacji od czynników środowiska w Kanadzie. W ich przypadku najlepszą techniką, radzącą sobie również z nietypowymi wartościami danych, była technika uogólnionych modeli addytywnych (GAM). Do podobnych wniosków doszli badacze zajmujący się bonitacją w warunkach górskich w Turcji (Aertsen et al. 2010). W Czechach i na Słowacji użyto sieci neuronowych o predykcji wskaźnika bonitacji na podstawie danych klimatycznych dla świerka, buka i jodły (Hlásny et al. 2017). W badaniach z zachodnich Stanów Zjednoczonych (Latta et al. 2009) including biofuels supply, carbon sequestration, and projections of forest growth. Using PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model) użyto danych z wielkoobszarowej inwentaryzacji stanu lasu w celu modelowania wpływu zmiennych klimatycznych na potencjalną produktywność drzewostanów. Wang (2005) porównał cztery metody modelowania (regresję nieliniową, drzewo decyzyjne, uogólnione modele addytywne oraz sieci neuronowe) przestrzennej zmienności wskaźnika bonitacji sosny wydmowej *Pinus contorta* Dougl. ex Loud. na terenie borealnych borów mieszanych w Kanadzie. Badano również możliwość użycia teledetekcji do określania wskaźnika bonitacji dla sosny kalifornijskiej *P. radiata* w Nowej Zelandii (Watt et al. 2015). Dodatkowo, stworzono model określający produktywność w dwóch wariantach: przy posiadaniu danych o wieku i w wariancie zakładającym brak takich danych (Watt et al. 2016).

#### 5. Przestrzenne ujęcie wskaźnika bonitacji

Mimo wielu przeprowadzonych dotychczas badań, wiedza o związku między czynnikami środowiskowymi a ich wpływem na wzrost drzew w ujęciu przestrzennym jest nadal niewielka. W badaniu nad topolą osikową *Populus tremuloides* Michx. (Chen et al. 2002) przeanalizowano wpływ środowiska na wskaźnik bonitacji w szerszym wymiarze przestrzennym, uzyskując 61% wyjaśnionej zmienności. Niektóre czynniki miały odmienny wpływ na badaną cechę w różnych strefach. To pokazuje, że wyniki mogą zmieniać się w zależności od skali przestrzennej w jakiej je się analizuje. W badaniach nad wskaźnikiem bonitacji daglezi zielonej *P. menziesii* porównano użycie regresji liniowej oraz regresji ważonej geograficznie (ang. Geographically-Weighted Regression) w centralnej części stanu Idaho w USA (Kimsey et al. 2008). Wykazano, że użycie metody przestrzennej pozwoliło wyjaśnić o 29% więcej zmienności we wskaźniku bonitacji oraz zmniejszyło błąd o ok. 53%. Do tej pory przeprowadzone bada-

nia nie potwierdziły jednoznacznie, że istnieje zależność bonitacji drzewostanów sosnowych od ich położenia geograficznego w Polsce. Badania te nie wyjaśniają również definitywnie, czy zależności zaobserwowane lokalnie znajdują odzwierciedlenie w skali całego kraju (Bruchwald et al. 2000a).

## 6. Analiza wpływu wieku na wskaźnik bonitacji

Problem większego niż spodziewany przyrostu drzew został poruszony w pracy Elfvinga i Tegnhammara (1996), w której wykazano że sposób zagospodarowania może mieć niebagatelny wpływ na wzrost drzew. Jednocześnie wiadomo, że wzrost na wysokość zostaje zahamowany przy pracach hodowlanych, tj. czyszczeniach i trzebieżach, co może zaburzać model bonitacyjny (Hynynen 1995). Badania prowadzone nad świerkiem w Niemczech i Austrii wykazały istotną statystycznie zmianę wzoru przyrostu wysokości drzewostanów powiązaną z wiekiem badanego obiektu (Schadauel 1996; Wenk, Vogel 1996). Podobne badania nad bukiem potwierdzają te same zależności (Untheim 1996). Jednocześnie badania z południowych Niemiec pokazują, że tablice zasobności używane dziś nie oddają dobrze dynamiki wzrostu drzew, najczęściej przeszacowując wyniki uzyskiwane empirycznie (Pretzsch 1996). Szeroko zakrojone badania nad dynamiką wzrostu drzewostanów świerkowych i bukowych w Europie od 1870 roku wykazują, że dalej podążają one za wcześniej wyznaczonymi trendami, aczkolwiek drzewostany gwałtowniej zwiększają swój przyrost (Pretzsch et al. 2014). Równocześnie wydłużenie okresu wegetacyjnego i wzrost temperatury przyspieszają procesy fizjologiczne (Crafts-Brandner, Salvucci 2004), szczególnie na żyzniejszych siedliskach. Badania nad wskaźnikiem bonitacji świerka zwyczajnego z Badenii-Wirtembergii (Yue et al. 2014) wykazały, że w połowie XX wieku zmienił się schemat przebiegu wzrostu badanego gatunku. Podobne badania na terenie Finlandii nad sosną zwyczajną, świerkiem pospolitym oraz modrzewiem wykazały różnicę w schemacie przebiegu wzrostu badanych gatunków w porównaniu do Europy Środkowej (Mäkinen et al. 2017). Pogłębione analizy dotyczące emisji azotu w rejonie badań dowiodły, że najprawdopodobniejszą przyczyną podwojenia się przyrostu drzew w ciągu ostatniego wieku był sposób zagospodarowania lasu.

## 7. Podsumowanie

Historia badań dotycząca bonitowania gatunków leśnych jest długa i sięga XVIII wieku. Wielu prekursorów tych badań słusznie uważało, że określenie jakości siedliska jest bardzo ważne z punktu widzenia racjonalnej gospodarki leśnej. Bonitacja drzew, jako miara potencjału siedliska, na

którym wzrasta las, stanowi jedną z najważniejszych charakterystyk drzewostanów gospodarczych. Bonitacja, w zależności od wybranego modelu, wyrażana jest najczęściej jako średnia wysokość drzew danego gatunku w określonym wieku (Bruchwald 1997, 1999; Sharma et al. 2002; Socha et al. 2017). Niemożliwe jest natomiast porównanie bonitacji między gatunkami ze względu na ekologię poszczególnych gatunków. Określenie bonitacji dla gatunku panującego w drzewostanie pozwala jednoznacznie scharakteryzować potencjał wzrostowy siedliska (Chen, Klinka 2000; Kliczkowska, Bruchwald 2000; Socha 2005). Modelowanie tego potencjału przeprowadza się najczęściej dla jednego gatunku drzewa. Podsumowując przegląd literatury dotyczący tego problemu należy stwierdzić, że dla podstawowego gatunku lasotwórczego w Polsce, tj. sosny, brak jest aktualnych opracowań obejmujących swym zakresem bonitację drzewostanów w skali kraju. Dotyczy to zarówno charakterystyki statystycznej, jak i wpływu czynników zewnętrznych oraz powiązania bonitacji z warunkami panującymi w układzie przestrzennym.

## Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak potencjalnych konfliktów.

## Źródło finansowania badań

Badania zrealizowano w ramach grantów SGGW, numer: 505-10-032600-L00372-99, 505-10-032600-M00313-99 oraz 505-10-032600-Q00436-99.

## Literatura

- Aertsen W., Kint V., van Orshoven J., Özkan K., Muys B. 2010. Comparison and ranking of different modelling techniques for prediction of site index in Mediterranean mountain forests. *Ecological Modelling* 221(8): 1119–1130. DOI 10.1016/j.ecolmodel.2010.01.007.
- Assmann E. 1955. Die Bedeutung des „erweiterten Eichhorn'schen Gesetzes“ für die Konstruktion von Fichten-Ertragstafeln. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 74(11–12): 321–330.
- Assmann E. 1959. Höhenbonität und wirkliche Ertragsleistung. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 78(1–2): 1–20.
- Assmann E. 1968. *Nauka o produktywności lasu*. PWRiL, Warszawa, 627 s.
- Avery T.E., Burkhart H.E., Bullock B.P. 2019. *Forest measurements*. Waveland Press, Long Grove, IL, 434 s.
- Baur F. 1881. *Die Rotbuche in Bezug auf Ertrag, Zuwachs und Form*. Verlag von Paul Parey, Berlin, 624 s.
- Beker C. 2007. Wysokość górna w drzewostanach sosnowych. *Sylvan* 3(3): 36–42. DOI 10.26202/sylvan.2006035.
- Beker C., Andrzejewski T. 2013. Model wzrostu niepielęgnowanych drzewostanów sosnowych II. Lokalny model bonitacyjny PINUS. *Acta Scientiarum Polonorum Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria* 12(3): 15–23.

- Bruchwald A. 1977. Change in top height of pine forest stands with age. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Biological Sciences* 5: 335–342.
- Bruchwald A. 1979. Zmiana z wiekiem wysokości górnej w drzewostanach sosnowych. *Sylwan* 2: 1–11.
- Bruchwald A., Dudek A., Michalak K., Rymer-Dudzinska T., Wróblewski L., Zasada M. 1999. Model wzrostu dla drzewostanów świerkowych. *Sylwan* 143(1): 19–31.
- Bruchwald A., Kliczkowska A. 1997. Kształtowanie się bonitacji dla drzewostanów sosnowych Polski. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa* 838: 63–73.
- Bruchwald A., Kliczkowska A. 2000. Kształtowanie się bonitacji dla drzewostanów sosnowych Polski, w: *Przestrzenne zróżnicowanie wzrostu sosny*. A. Bruchwald, H. Jakubczyk (red.). Fundacja Rozwój SGGW, Warszawa, 30–41. ISBN 83-7274-005-4.
- Bruchwald A., Michalak K., Wróblewski L., Zasada M. 2000.a. Analiza funkcji wzrostu wysokości dla różnych regionów Polski, w: *Przestrzenne zróżnicowanie wzrostu sosny*. A. Bruchwald, H. Jakubczyk (red.). Fundacja Rozwój SGGW, Warszawa, 84–91. ISBN 83-7274-005-4.
- Bruchwald A., Michalak K., Wróblewski L., Zasada M. 2000.b. Wzrost wysokości sosny w różnych regionach Polski, w: *Przestrzenne zróżnicowanie wzrostu sosny*. A. Bruchwald, H. Jakubczyk (red.). Fundacja Rozwój SGGW, Warszawa, 77–83. ISBN 83-7274-005-4.
- Burkhart H.E., Tennent R.B. 1977. Site index equations for radiata pine in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science* 7(3): 408–416.
- Cao Q.V., Baldwin V.C., Lohrey R.E. 1997. Site index curves for direct-seeded loblolly and longleaf pines in Louisiana. *Southern Journal of Applied Forestry* 21(3): 134–138. DOI 10.1093/sjaf/21.3.134.
- Chen H.Y.H., Klinka K. 2000. Height growth models for high-elevation subalpine fir, engelmann spruce, and lodgepole pine in British Columbia. *Western Journal of Applied Forestry* 15(2): 62–69. DOI 10.1093/wjaf/15.2.62.
- Chen H.Y., Krestov P.V., Klinka K. 2002. Trembling aspen site index in relation to environmental measures of site quality at two spatial scales. *Canadian Journal of Forest Research* 32(1): 112–119. DOI 10.1139/x01-179.
- Cieszewski C.J., Zasada M. 2002. Dynamiczna forma anamorficznego modelu bonitacyjnego dla sosny pospolitej. *Sylwan* 146(7): 17–24.
- Cieszewski C.J., Zasada M. 2003.a. Model bonitacyjny dla sosny na podstawie tablic zasobności Szymkiewicza. *Sylwan* 147(1): 51–62. DOI 10.26202/sylwan.2003006.
- Cieszewski C.J., Zasada M. 2003.b. Wyprowadzanie ogólnych dynamicznych równań bonitacyjnych za pomocą uniwersalnej metody różnic algebraicznych. *Sylwan* 147(3): 40–46. DOI 10.26202/sylwan.2003027.
- Crafts-Brandner S.J., Salvucci M.E. 2004. Analyzing the impact of high temperature and CO<sub>2</sub> on net photosynthesis: Biochemical mechanisms, models and genomics. *Field Crops Research* 90(1): 75–85. DOI 10.1016/j.fcr.2004.07.006.
- Eichhorn F. 1902. Ertragstafeln für die Weißtanne (F. Eichhorn red.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 111 s. DOI 10.1007/978-3-662-41354-8.
- Elfving B., Kiviste A. 1997. Construction of site index equations for *Pinus sylvestris* L. using permanent plot data in Sweden. *Forest Ecology and Management* 98(2): 125–134. DOI 10.1016/S0378-1127(97)00077-7.
- Elfving B., Tegnhammar L. 1996. Trends of tree growth in Swedish forests 1953–1992: An analysis based on sample trees from the national forest inventory. *Scandinavian Journal of Forest Research* 11(1–4): 26–37. DOI 10.1080/02827589609382909.
- Gehrhardt E. 1909. Ueber Bestandes-Wachstumsgesetze und ihre Anwendung zur Aufstellung von Ertragstafeln. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 85: 117–128.
- Gehrhardt E. 1921. Eine neue Kiefern-Ertragstafel. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 97: 145–156.
- Gieruszyński T. 1959. Pomiar drzew i drzewostanów. PWRiL, Warszawa, 376 s.
- Hartig R. 1892. Ueber den Entwicklungsgang der Fichte im geschlossenen Bestände nach Höhe, Form und Inhalt. *Forst-Naturwiss Z*: 169–185.
- Heyer C. 1841. Die Waldertrags-Regelung. Verlag von B.C. Ferber, Giessen, 264 s.
- Heyer C. 1845. Wedenkinds Neue Jahrb. Climate Change: The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge, 30, 1–127.
- Hlásny T., Trombik J., Bošľa M., Merganič J., Marušák R., Šebeň V., Štěpánek P., Kubišta J., Trnka M. 2017. Climatic drivers of forest productivity in Central Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 234–235: 258–273. DOI 10.1016/j.agrformet.2016.12.024.
- Hummel F.C., Christie J. 1953. Revised yield tables for conifers in Great Britain. Forestry Commission, London, 23 s.
- Hynynen J. 1995. Modelling tree growth for managed stands. *The Finnish Forest Research Institute Research Papers* 576.
- Jarosz K., Klapeć B. 2002. Modelowanie wzrostu drzewostanów z wykorzystaniem funkcji Gompertza. *Sylwan* 146(4): 35–42.
- Keller W. 1991. Określanie bonitacji na podstawie siedliska. *Sylwan* 135(7): 41–49.
- Kimsey M.J., Moore J., McDaniel P. 2008. A geographically weighted regression analysis of Douglas-fir site index in north central Idaho. *Forest Science* 54(3): 356–366. DOI 10.1093/forests/54.3.356.
- Kliczkowska A., Bruchwald A. 2000. Kształtowanie się bonitacji drzewostanów świerkowych na terenach górskich. *Sylwan* 144(9): 5–15.
- Kraft G. 1884. Beiträge zur lehre von den durchforstungen, schlagstellungen und lichtungshieben. Klindworth, Hannover, 147 s.
- Latta G., Temesgen H., Barrett T. M. 2009. Mapping and imputing potential productivity of Pacific Northwest forests using climate variables. *Canadian Journal of Forest Research* 39(6): 1197–1207. DOI 10.1139/X09-046.
- Magin R. 1957. Probleme bei der Aufstellung von Leistungstafeln für mehrschichtige Mischbestände, w: *Mitt. Stf. Bayern* 29: 176–185.
- Magin R. 1958. Über die Brauchbarkeit des forstlichen Bonitätsbegriffes. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 129: 145–150.
- Mäkinen H., Yue C., Kohnle U. 2017. Site index changes of Scots pine, Norway spruce and Larch stands in southern and central Finland. *Agricultural and Forest Meteorology* 237–238: 95–104. DOI 10.1016/j.agrformet.2017.01.017.

- Means J.E., Helm M.E. 1985. Height growth and site index curves for douglas-fir on dry sites in the Willamette National Forest. *USDA Forest Service Research Paper* 341: 17.
- Milner K.S. 1992. Site index and height growth curves for ponderosa pine, western larch, lodgepole pine, and Douglas-fir in western Montana. *Western Journal of Applied Forestry* 7(1): 9–14. DOI 10.1093/wjaf/7.1.9.
- Monserud R.A. 1984. Height growth and site index curves for inland douglas-fir based on stem analysis data and forest habitat type. *Forest Science* 30(4): 943–965. DOI 10.1093/forestscience/30.4.943.
- Nord-Larsen T. 2006. Developing dynamic site index curves for European Beech (*Fagus sylvatica* L.) in Denmark. *Forest Science* 52(2): 173–181. DOI 10.1093/forestscience/52.2.173.
- Ottelt K.C. 1764. Practischer Beweis, daß die Mathesis bey dem Forstwesen unentbehrliche Dienste thue. Joh. Andreas Schill, Arnstadt, 174 s.
- Philipp K. 1893. Hilfstabellen für Taxatoren. Müller, Karlsruhe, 32 s.
- Popham T.W., Feduccia D.P., Dell T.R., Mann W.F.J., Campbell T.E. 1979. Site index for loblolly plantations on cutover sites in the West Gulf Coastal Plain. *USDA Forest Service Research Note*, 250 s.
- Pretzsch H. 1996. Growth trends of forests in Southern Germany, w: Growth trends in European Forests. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN 978-35-40614-60-9. DOI 10.1007/978-3-642-61178-0\_11.
- Pretzsch H., Biber P., Schütze G., Uhl E., Rötzer T. 2014. Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nature Communications* 5(1): 4967. DOI 10.1038/ncomms5967.
- Schadauel K. 1996. Growth trends in Austria, w: Growth trends in European Forests. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN 978-35-40614-60-9. DOI 10.1007/978-3-642-61178-0\_20.
- Schwappach A. 1943. Ertragstabellen der wichtigeren Holzarten. Merkur, Praga.
- Sewerniak P. 2008. Wstępne wyniki badań nad wpływem uziarnienia gleby na bonitację drzewostanów sosnowych w południowo-zachodniej Polsce. *Roczniki Gleboznawcze* 59(3): 256–262.
- Sewerniak P., Piernik A. 2012. Ujęcie wpływu właściwości gleb piaszczystych na bonitację drzewostanów sosnowych w południowo-zachodniej Polsce w modelach regresji. *Sylwan* 156(8): 563–571. DOI 10.26202/sylwan.2012043.
- Sharma M., Amateis R.L., Burkhart H.E. 2002. Top height definition and its effect on site index determination in thinned and unthinned loblolly pine plantations. *Forest Ecology and Management* 168(1–3): 163–175. DOI 10.1016/S0378-1127(01)00737-X.
- Sharma R.P., Brunner A., Eid T. 2012. Site index prediction from site and climate variables for Norway spruce and Scots pine in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27(7): 619–636. DOI 10.1080/02827581.2012.685749.
- Skovsgaard J.P., Vanclay J.K. 2008. Forest site productivity: A review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry* 81(1): 13–31. DOI 10.1093/forestry/cpm041.
- Socha J. 1997. Matematyczne ujęcie bonitacji siedliska. *Sylwan* 2(141): 31–36.
- Socha J. 2005. Zależność pomiędzy wysokością górną a wysokością przeciętną w górskich drzewostanach świerkowych. *Sylwan* 149(8): 10–17. DOI 10.26202/sylwan.9200518.
- Socha J. 2011. Krzywe bonitacyjne świerka pospolitego na siedliskach górskich. *Sylwan* 155(12): 816–826. DOI 10.26202/sylwan.2011067.
- Socha J., Bruchwald A., Neroj B., Gruba P., Wertz B., Ochał W., Pierzchański M. 2017. Sprawozdanie końcowe z realizacji usługi badawczej pod nazwą „Aktualna i potencjalna produktywność siedlisk leśnych Polski dla głównych gatunków lasotwórczych” Raport dla PGL LP.
- Socha J., Ochał W. 2017. Dynamic site index model and trends in changes of site productivity for *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. in southern Poland. *Dendrobiology* 77: 45–57. DOI 10.12657/denbio.077.004.
- Socha J., Ochał W., Grabczyński S., Maj M. 2015. Modele bonitacyjne dla gatunków lasotwórczych Polski opracowane na podstawie tablic zasobności. *Sylwan* 159(8): 639–649. DOI 10.26202/sylwan.2015011.
- Socha J., Orzeł S. 2011. Dynamiczne krzywe bonitacyjne dla drzewostanów sosnowych Puszczy Niepołomickiej. *Sylwan* 155(5): 301–312. DOI 10.26202/sylwan.2010078.
- Socha J., Orzeł S. 2013. Dynamiczne krzywe bonitacyjne dla sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z południowej Polski. *Sylwan* 157(1): 26–38. DOI 10.26202/sylwan.2012094.
- Stępień E. 1979. Bonitowanie jakości siedliska na podstawie funkcji bonitacji. *Zeszyty Naukowe SGGW – AR, Leśnictwo* 27: 77–87.
- Subedi S., Fox T.R. 2016. Predicting loblolly pine site index from soil properties using partial least-squares regression. *Forest Science* 62(4): 449–456. DOI 10.5849/forsci.15-127.
- Unthelm H. 1996. Has site productivity changed? A case study in the Eastern Swabian Alb, Germany, w: Growth trends in European Forests. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN 978-35-40614-60-9. DOI 10.1007/978-3-642-61178-0\_12.
- Wang Y., Raulier F., Ung C.-H. 2005. Evaluation of spatial predictions of site index obtained by parametric and nonparametric methods – A case study of lodgepole pine productivity. *Forest Ecology and Management* 214(1–3): 201–211. DOI 10.1016/j.foreco.2005.04.025.
- Watt M.S., Dash J.P., Bhandari S., Watt P. 2015. Comparing parametric and non-parametric methods of predicting Site Index for radiata pine using combinations of data derived from environmental surfaces, satellite imagery and airborne laser scanning. *Forest Ecology and Management* 357: 1–9. DOI 10.1016/j.foreco.2015.08.001.
- Watt M.S., Dash J.P., Watt P., Bhandari S. 2016. Multi-sensor modelling of a forest productivity index for radiata pine plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science* 46(1): 9. DOI 10.1186/s40490-016-0065-z.
- Weck J. 1948. Forstliche Zuwachs-und Ertragskunde. Neumann Verlag, Radebeul, Berlin, 92 s.
- Wenk G., Vogel M. 1996. Height growth investigations of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in the Eastern Part of Germany during the last century, w: Growth trends in European Forests. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN 978-35-40614-60-9. DOI 10.1007/978-3-642-61178-0\_10.
- Wiedemann E. 1936. Die fichte. M. & H. Schaper, Hannover, 248 s.
- Yue C., Mäkinen H., Klädtke J., Kohnle U. 2014. An approach to assessing site index changes of Norway spruce based on

spatially and temporally disjunct measurement series. *Forest Ecology and Management* 323: 10–19. DOI: 10.1016/j.foreco.2014.03.031.

### **Wkład autorów**

W.K., R.T., T.B. – koncepcja pracy, W.K., R.T. – przegląd literatury, W.K. – napisanie pracy

## Site index research: a literature review

Wojciech Kędziora<sup>\*</sup>, Robert Tomusiak<sup>\*</sup>, Tomasz Borecki<sup>\*</sup>

Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Institute of Forest Sciences, Department of Forest Management Planning and Forest Economics, ul. Nowoursynowska 159; 02–776 Warsaw, Poland

\*Tel. +48 22 5938204, e-mail: wojciech.kedziora@wl.sggw.pl

**Abstract.** The purpose of this paper was to review literature covering the topic of site index with particular emphasis on Scots pine, the most important forest-forming species in Poland. We discuss the history of the site index, research on various tree species, statistical modelling methods, the spatial application of site index and age impact assessment.

The history of research on the site index of forest species is long and dates back to the 18th century. Many researchers thought that determining the quality of the habitat is very important from the point of view of rational forest management. The site index, as a measure of the potential of the habitat on which the forest grows, is one of the most important characteristics of forest stands. The site index depends on the selected model, but is most often expressed as the average or top height of trees of a given species at a certain age.

In our review, we point out several insufficiencies of studies on the site index, external influences and the connection of the site index with spatial conditions. Furthermore, research conducted so far has not explicitly confirmed that there is a relationship between the site index of pine stands and their geographical location in Poland. More research on the site index, especially in regard with climate change, is needed.

**Keywords:** Forest site index, tree growth, forest site quality, forest site productivity

### 1. Introduction

The dynamic changes taking place in the availability of information enable research to be conducted at an increasingly wider scale. Modern methods of collecting field data from a large number of sample plots has allowed many problems, which until recently were unanswered, to be solved. One of such important scientific problems for forestry is the more complete characterization of the site index and the attempt to spatially characterize forest growth based on this feature.

All tree species are equally important in the biocenosis, but from an economic point of view, some are given priority. In Poland, among all forest-forming species, the Scots pine *Pinus sylvestris* L. deserved and deserves special recognition. Due to the existing soils and climate forming the habitat, pine is the most common species in Polish forests.

Its value to Polish forestry is increased by the few problems it poses in its management, its high productivity and economic utility.

A better understanding of the factors influencing the growth of pine will contribute to enriching the basic knowledge about this species, and thus, allow for more effective management. The site index of a stand, which characterizes the growth potential of the species, is a good measure of the impact of the surrounding environment on the life of trees. A constant site index value over time expresses the consistency of environmental conditions, while its fluctuations indicate that some features of the surrounding ecosystem are changing. Knowing the variability and dependence of the site index on external factors can help in understanding the preferences of pine. This is particularly relevant and important in the current dynamics of climate change associated with its warming.

Received: 27.02.2020 r., accepted after revision: 2.04.2020 r.

The aim of this paper is to review the literature on the site index of important forest species, with particular emphasis on pine, the most important forest-forming species in Poland. The current state of knowledge about the site index of pine in Poland seems to be insufficient, and the current possibilities of continuing this research may significantly broaden this knowledge.

## 2. The evolution of measures of the production potential of the forest

Research on the site index was conducted as early as in the 18<sup>th</sup> century by Oettelt (1764), who defined the height of the trees as an indicator of ‘soil goodness’. The 19<sup>th</sup> century brought the development of forestry science, which changed the approach to the problem of the site index. Heyer was the first to observe the link between height increment and volume growth (Heyer 1841). He believed that determining the quality of a habitat is important in terms of its productivity (Heyer 1845). Franz von Baur described average height as the most accurate and only proper indicator, not only for assessing normal stand growth, but also for appraising its site index (Baur 1881). In this method, the site index was categorized into classes, with each class assigned to an equal interval of average height. These intervals increased proportionally with the age of the stand. The graphical interpretation resembled the increasing height of ranges, hence its name – the range method. It assumed that the height of a stand increases in accordance with the determined height change curve, and that stands at a certain age have similar productivity. Since then, despite initial scepticism (e.g., Hartig 1892), the height site index started to be identified with productivity. This method, called the ‘phytogenic method’, consists of measuring the vegetation growing in a given area (Skovsgaard, Vanclay 2008). Unlike the ‘geocentric method’, which is based on the properties of the soil and climate, it is often easier to apply. The phytogenic method usually involves measuring plant yields. This is often practiced in farming, but given the differences between the types of farming and forestry, it is difficult to apply. Annual crop harvests in agriculture makes it possible to make long-term analyses of productivity changes. Such a way of experimenting in stands would require many centuries of research. In forestry, an attempt to solve this problem was to measure yield expressed as volume (Assmann 1968) or the average total production increment calculated for the age of 100 years (Philipp 1893). At a time when silviculture practice included light thinning, allowing some of the dominated trees in Kraft’s classes 4–5 (Kraft 1884) to re-

main in the stand, this method worked well in reflecting the production capacity of the habitat. However, since the use of moderate and strong thinning, there have been instances where the stock levels were lower in a habitat with potentially higher productivity than in one with a lower potential. It turned out that the abundance does not precisely determine the productive potential of a habitat, because the intensity of the treatment had a significant impact on the growth of wood resources – after strong thinning, the potential was often underestimated, whereas with light thinning, it was overestimated (Magin 1958). As a result of searching for a more convenient measure for the site index, average stand height was chosen as a measure that is less affected by external factors.

The measurement of the site index using volume is based on the Eichhorn’s Rule (formulated for fir), which states that a certain average stand height for all habitat classes corresponds to the same stand volume (Eichhorn 1902). In later years, Gerhardt extended this to spruce and pine (Gerhardt 1909, 1921) and reformulated it into the ‘Extended Eichhorn’s Rule’, stating that there is a relationship between productivity and habitat-dependent stand height, which was proven by Assmann (1955, 1959).

## 3. Height site index

Site index, understood as the height of a stand at a particular age, is today the most common way to assess the quality of a forest habitat. Currently, there are two approaches to measuring it and both use an indicator method – you have to measure the sample trees and check which discount they belong to.

The first approach involves measuring the average height and assigning it to a specific grade. However, this has some consequences. During natural tree growth, the weakest trees lose the competition and are separated from the stand. These processes are simulated during the tending process. With severe lower thinning, this can lead to a sudden and significant increase in the average height. For example, strong bottom thinning in a 65-year-old stand changes the average height from 24.5 m to 25.9 m, which increases the discount by ½ class (Assmann 1968).

The second way is based on the determination of the height of the upper stand, understood as the average height of a certain number of the thickest trees on an area of 1 ha. In this case, as a result of thinning or natural processes of tree secretion, there will be only slight shifts in the results of the discount. In the study from the experimental plots in Sachsenried 2, it was found that the difference in height between the upper and the average height, with an appropriate intensity of cultivation, may decrease from 2.1 m to 1.0 m

(Assmann 1968). Further studies on the application of average and upper altitude showed that for different thinning treatments, differences of up to 3.2 m can be obtained.

In both methods, individual variation in height may be a problem. The growth rate deviating from the accepted 'fan' of the discount results in its change, usually a decrease of even 0.7 degree of quality. In addition, deterioration of water conditions during stand growth, for example, may cause a reduction of the discount (Assmann 1968).

It is not only changes in the level of the water table that can affect the amount of the discount. It turns out that the increase in height varies from one climate to another. Two types of abundance tables from different regions were compared: Hummel and Christie (1953) for conifers in Great Britain and Wiedemann (1936) for spruce in Germany and it turned out that their growth rate is different (Magin 1957).

It is also problematic that different tables used different number of discount classes as well as different width of compartments characterizing the classes. Schober (after: Assmann 1968) proposed that the distances between the different discount classes should be 4 m at the age of 100 (4.5 m for spruce). Another proposal was absolute site index (as opposed to class ones), which determined the height of the stand at the felling age. A problem proved to be the assessment of the site index at a possible change of the felling age. Difficulties were also encountered when comparing the absolute tree stand and stand height between the species. An attempt to unify the various proposals was made by Weck's postulate that the absolute site index should be measured as the average stand height at the age of 100 years (Weck 1948). However, this created the problems discussed earlier. Therefore, the Assmann proposal is currently the most common form of determining the stand's site index. This proposal assumes that the site index is the upper height (the height of the 100 thickest trees per 1 ha) at the age of 100 years (Assmann 1959).

The absolute site index can be adopted for height discounting (Assmann 1959; Skovsgaard, Vanclay 2008) and at the same time is unambiguous in designation and easy to measure, it can be compared without additional conversions. It should be noted that in forestry, the desired feature to be determined is the habitat classification, determined by means of the stand classification. The latter is burdened with a certain error, for example, inadequate species composition to the habitat or disturbed growth conditions in previous periods (Gieruszyński 1959). From these studies, it results that the stand site index is not adapted to different species of stands, the afforestation coefficient is not taken into account, the site

index is not constant and may change over time, the site index for different species cannot be directly compared. It should be remembered that the problem is the precise determination of the stand age.

Aside from these limitations, the site index is a useful measure to use a simple numerical value that is easy to measure and understand by the practitioner. It will remain in use until it is replaced by a meter without these limitations, the calculation of which will be equally easy (Avery et al. 2019). Therefore, the site index is most often expressed as the upper height of trees of a given species at a specific age (Bruchwald, Kliczkowska 1997; Bruchwald et al. 1999; Sharma et al. 2012; Socha et al. 2017).

As mentioned earlier, research on the class and absolute site index has been conducted at least since the 18th century. The main effect of these studies is the construction of models of the coefficient of variation (coefficient curves) for different species, for example, Douglas fir *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (Monserud 1984; Means, Helm 1985; Milner 1992), yellow pine *Pinus ponderosa* Dougl. ex C. Lawson (Milner 1992), West Larch *Larix occidentalis* Nutt. (Milner 1992), dune pine *Pinus contorta* Douglas (Milner 1992), taeda pine *Pinus taeda* L. (Popham et al. 1979; Cao et al. 1997), the long-needle pine *Pinus palustris* Mill. (Cao 1997), California *Pinus radiata* D. Don (Burkhart, Tennent 1977), *Pinus sylvestris* L. (Bruchwald, 1979; Elfving, Kiviste 1997; Socha, Eagle 2013), *Fagus sylvatica* L. beech (Nord-Larsen 2006), spruce of common *Picea abies* L. H. Karst (Kliczkowska, Bruchwald 2000; Socha et al. 2015) or black alder *Alnus glutinosa* L. (Socha, Ochał 2017).

In the work by Cieszewski and Zasada (2002), a transformation of the Bruchwald's (2000a) anamorphous site index model was carried out to a dynamic form, which allows to obtain the value of the discount rate for any measured pair 'age-height' in a less labour-intensive way. The tables of Szymkiewicz's affluence were successfully transformed by Cieszewski and Zasada (2003a) into a voucher model. The work by Cieszewski and Zasada (2003b) proposed the use of a universal method of algebraic differences to derive general dynamic discount equations.

Research on the variability of characteristics of pine trees and stands in Poland, also taking into account the site index, has been conducted for a relatively long time, which determines the potentially large amount of comparative material (Bruchwald 1977; Keller 1991; Bruchwald, Kliczkowska 2000; Socha, Orzeł 2011). The literature clearly shows the trend of research on the pine voucher models themselves, both locally (Sewerniak 2008; Beker, Andrzejewski 2013) and nationally (e.g., Cieszewski, Zasada 2003a).

From similar studies, only those limited to the selected regions can be found in the literature (Sewerniak, Piernik 2012; Socha, Orzeł 2013). The previous research on the variability of pine stand site index on the national scale has indicated the necessity to include additional environmental and stand parameters that may potentially affect the variability of pine stand site index (Bruchwald et al. 2000a).

The top stand height was studied by Bruchwald (1979), Socha (2005) and Beker (2007). The latter proposed the upper biological height – of the top and dominating trees according to Kraft (1884) – as the most accurate in the entire life of the stand, but difficult to measure due to the high labour intensity.

Socha and colleagues (2015) in their research developed discount models for basic forest-forming species in Poland (pines, firs *Abies alba* Mill., ash *Fraxinus excelsior* L., aspen *Populus tremula* L., birches *Betula* L., black alder, oak *Quercus* L., beech, larch *Larix decidua* Mill., spruce, acacia *Robinia pseudoacacia* L., red oak *Quercus rubra* L., Douglas fir *Pseudotsuga* Carriere, hornbeam *Carpinus betulus* L., lime trees *Tilia* L. and maple *Acer* L.). They have managed to build a mathematical model of the coefficient of discount based on data from the abundance tables used in Poland. For most species, they used a modified model of Cieszewski (Cieszewski, Zasada 2003b), which gave the best results. They also developed discount models for the main forest-forming species in Poland, based on the latest empirical material (Socha et al. 2017).

In the research carried out in the stands of the southern part of Poland (Socha, Orzeł 2013), a set of dynamic discount curves for pine was developed. What is more, it was noted that the Schwappach's table model (1943) shows a lower growth rate in youth and a higher growth rate in older stands. The mathematical model of Bruchwald (Bruchwald et al. 2000a,b), built according to different principles, shows significant discrepancies between the predicted and actual growth rate.

In the research carried out in the Niepolomice Forest (Socha, Orzeł 2011), a local, dynamic system of site index curves was developed. The research was extended in subsequent years to include stands from southern Poland (Socha, Orzeł 2013), as well as to

The work on the inclusion of an increase in altitude or discount in the mathematical framework was carried out by Stępień (1979), who, using electronic calculation techniques, determined the coefficients of the equation for calculating discount depending on age for pine, fir, spruce, beech and oak. Similar studies were also conducted by Socha (1997) and Jarosz and Kłapeć (2002).

#### 4. Statistical modeling of site index

The analysis of the site index was also carried out in methodological works, focusing on the evaluation of the usefulness of various statistical methods in modelling the value of this feature. In Subedi and Fox's work (2016) focusing on the influence of soil traits on the site index of *P. taeda* pine, the use of multiple and partial regression of the smallest squares was compared. Wang and colleagues (2005) investigated the spatial dependence of the site index on environmental factors in Canada using various statistical techniques. In their case, the best technique, also dealing with unusual data values, was the technique of generalized additive models (GAM). Similar conclusions have been reached by researchers dealing with site index in Turkey's mountains (Aertsen et al. 2010). In the Czech Republic and Slovakia, neural networks were used with prediction of the site index based on climatic data for spruce, beech and fir (Hlásny et al. 2017). In a study from the Western United States (Latta et al. 2009), data from the Large-Area Forest Inventory were used to model the impact of climate variables on potential stand productivity. Wang (2005) compared four modelling methods (non-linear regression, decision tree, generalised additive models and neural networks) of spatial variability of the site index of *Pinus contorta* Dougl. pine. ex Loud. in Canada's mixed boreal forest. The possibility of using remote sensing to determine the site index for California *P. radiata* pine in New Zealand (Watt et al. 2015) was also investigated. In addition, a model was developed to determine the productivity of the two variants: with age data and with the variant assuming no such data (Watt et al. 2016).

#### 5. Spatial investigation of site index

Despite many studies carried out so far, there is still little knowledge of the relationship between environmental factors and their impact on tree growth in spatial terms. In a study on *Populus tremuloides* Michx., Chen et al. (2002) analysed the impact of the environment on the site index in a wider spatial dimension, yielding 61% of the explained variability. Some factors had a different impact on the feature studied in different zones. This shows that the results may vary depending on the spatial scale in which they are analysed. In the study on the Douglas fir rate, *P. menziesii* compared the use of linear and Geographically-Weighted Regression in central Idaho, USA (Kimsey et al. 2008). It was shown that the use of the spatial method allowed to explain by 29% more variability in the site index and reduced the error by about 53%. The studies conduc-

ted so far have not confirmed unequivocally that there is a dependence of the pine stands' site index on their geographical location in Poland. These studies also do not definitively explain whether the dependence observed locally is reflected on a nationwide scale (Bruchwald et al. 2000a).

## 6. Age impact on site index

The problem of larger than expected tree growth was addressed in a paper by Elfving and Tegnhammar (1996), which showed that management can have a significant impact on tree growth. At the same time, it is known that the growth at height is inhibited by breeding work, that is, cleaning and thinning, which can disturb the discount model (Hynynen 1995). Research conducted on spruce in Germany and Austria showed a statistically significant change in the stand height increment pattern related to the age of the examined object (Schadauel 1996; Wenk, Vogel 1996). Similar studies on beech confirm the same relationships (Untheim 1996). At the same time, studies from southern Germany show that the abundance tables used today do not reflect well the growth dynamics of trees, most often overestimating the results obtained empirically (Pretzsch 1996). Extensive research on the growth dynamics of spruce and beech stands in Europe since 1870 shows that they continue to follow the previously determined trends, although the stands are increasing their growth more rapidly (Pretzsch et al. 2014). At the same time, the lengthening of the growing season and temperature increase accelerate physiological processes (Crafts-Brandner, Salvucci 2004), especially in more fertile habitats. Studies on the site index of the Baden-Württemberg spruce (Yue et al. 2014) have shown that in the mid-20th century, the growth pattern of the species under investigation changed. Similar studies in Finland on pine, spruce and larch showed a difference in the growth pattern of the studied species compared to Central Europe (Mäkinen et al. 2017). In-depth analyses of nitrogen immissions in the study area proved that the most probable cause of doubling of tree growth during the last century was the forest management.

## 7. Summary

The history of research on the site index of forest species is long and goes back to the 18th century. Many pioneers of this research rightly believed that determining the quality of a habitat is very important for rational forest management. Tree site index, as a measure of the potential of a habitat on which a forest grows, is one of the most important characteristics of economic stands. Site index,

depending on the chosen model, is usually expressed as the average height of trees of a given species at a certain age (Bruchwald 1997, 1999; Sharma et al. 2002; Socha et al. 2017). However, it is not possible to compare the site index between species due to the ecology of individual species. Determination of the density of the species in the stand allows to unambiguously characterize the growth potential of the habitat (Chen, Klinka 2000; Kliczkowska, Bruchwald 2000; Socha 2005). Modelling of this potential is most often performed for one tree species. Summarizing the literature review concerning this problem, it should be stated that for the basic forest-forming species in Poland, that is, pine, there are no current studies covering the stand site index on the national scale. This concerns both the statistical characteristics, as well as the influence of external factors and the connection of the discount with the conditions prevailing in the spatial system.

## Conflicts of interest

The authors declare no potential conflicts of interest.

## Source of funding

This research were funded by WULS-SGGW grants number: 505-10-032600-L00372-99, 505-10-032600-M00313-99 oraz 505-10-032600-Q00436-99.

## References

- Aertsen W., Kint V., van Orshoven J., Özkan K., Muys B. 2010. Comparison and ranking of different modelling techniques for prediction of site index in Mediterranean mountain forests. *Ecological Modelling* 221(8): 1119–1130. DOI 10.1016/j.ecolmodel.2010.01.007.
- Assmann E. 1955. Die Bedeutung des „erweiterten Eichhorn'schen Gesetzes“ für die Konstruktion von Fichten-Ertragstafeln. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 74(11–12): 321–330.
- Assmann E. 1959. Höhenbonität und wirkliche Ertragsleistung. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 78(1–2): 1–20.
- Assmann E. 1968. *Nauka o produktyjności lasu*. PWRiL, Warszawa, 627 s.
- Avery T.E., Burkhart H.E., Bullock B.P. 2019. *Forest measurements*. Waveland Press, Long Grove, IL, 434 s.
- Baur F. 1881. *Die Rotbuche in Bezug auf Ertrag, Zuwachs und Form*. Verlag von Paul Parey, Berlin, 624 s.
- Beker C. 2007. Wysokość górna w drzewostanach sosnowych. *Sylwan* 3(3): 36–42. DOI 10.26202/sylwan.2006035.
- Beker C., Andrzejewski T. 2013. Model wzrostu niepielegnowanych drzewostanów sosnowych II. Lokalny model bonitacyjny PINUS. *Acta Scientiarum Polonorum Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria* 12(3): 15–23.

- Bruchwald A. 1977. Change in top height of pine forest stands with age. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Biological Sciences* 5: 335–342.
- Bruchwald A. 1979. Zmiana z wiekiem wysokości górnej w drzewostanach sosnowych. *Sylwan* 2: 1–11.
- Bruchwald A., Dudek A., Michalak K., Rymer-Dudzinska T., Wróblewski L., Zasada M. 1999. Model wzrostu dla drzewostanów świerkowych. *Sylwan* 143(1): 19–31.
- Bruchwald A., Kliczkowska A. 1997. Kształtowanie się bonitacji dla drzewostanów sosnowych Polski. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa* 838: 63–73.
- Bruchwald A., Kliczkowska A. 2000. Kształtowanie się bonitacji dla drzewostanów sosnowych Polski, w: *Przestrzenne zróżnicowanie wzrostu sosny*. A. Bruchwald, H. Jakubczyk (red.). Fundacja Rozwój SGGW, Warszawa, 30–41. ISBN 83-7274-005-4.
- Bruchwald A., Michalak K., Wróblewski L., Zasada M. 2000.a. Analiza funkcji wzrostu wysokości dla różnych regionów Polski, w: *Przestrzenne zróżnicowanie wzrostu sosny*. A. Bruchwald, H. Jakubczyk (red.). Fundacja Rozwój SGGW, Warszawa, 84–91. ISBN 83-7274-005-4.
- Bruchwald A., Michalak K., Wróblewski L., Zasada M. 2000.b. Wzrost wysokości sosny w różnych regionach Polski, w: *Przestrzenne zróżnicowanie wzrostu sosny*, A. Bruchwald, H. Jakubczyk (red.). Fundacja Rozwój SGGW, Warszawa, 77–83. ISBN 83-7274-005-4.
- Burkhardt H.E., Tennent R.B. 1977. Site index equations for radiata pine in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science* 7(3): 408–416.
- Cao Q.V., Baldwin V.C., Lohrey R.E. 1997. Site index curves for direct-seeded loblolly and longleaf pines in Louisiana. *Southern Journal of Applied Forestry* 21(3): 134–138. DOI 10.1093/sjaf/21.3.134.
- Chen H.Y.H., Klinka K. 2000. Height growth models for high-elevation subalpine fir, engelmann spruce, and lodgepole pine in British Columbia. *Western Journal of Applied Forestry* 15(2): 62–69. DOI 10.1093/wjaf/15.2.62.
- Chen H.Y., Krestov P.V., Klinka K. 2002. Trembling aspen site index in relation to environmental measures of site quality at two spatial scales. *Canadian Journal of Forest Research* 32(1): 112–119. DOI 10.1139/x01-179.
- Cieszewski C.J., Zasada M. 2002. Dynamiczna forma anamorficznego modelu bonitacyjnego dla sosny pospolitej. *Sylwan* 146(7): 17–24.
- Cieszewski C.J., Zasada M. 2003.a. Model bonitacyjny dla sosny na podstawie tablic zasobności Szymkiewicza. *Sylwan* 147(1): 51–62. DOI 10.26202/sylwan.2003006.
- Cieszewski C.J., Zasada M. 2003.b. Wyprowadzanie ogólnych dynamicznych równań bonitacyjnych za pomocą uniwersalnej metody różnic algebraicznych. *Sylwan* 147(3): 40–46. DOI 10.26202/sylwan.2003027.
- Crafts-Brandner S.J., Salvucci M.E. 2004. Analyzing the impact of high temperature and CO<sub>2</sub> on net photosynthesis: Biochemical mechanisms, models and genomics. *Field Crops Research* 90(1): 75–85. DOI 10.1016/j.fcr.2004.07.006.
- Eichhorn F. 1902. Ertragstafeln für die Weißtanne (F. Eichhorn red.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 111 s. DOI 10.1007/978-3-662-41354-8.
- Elfving B., Kiviste A. 1997. Construction of site index equations for *Pinus sylvestris* L. using permanent plot data in Sweden. *Forest Ecology and Management* 98(2): 125–134. DOI 10.1016/S0378-1127(97)00077-7.
- Elfving B., Tegnhammar L. 1996. Trends of tree growth in Swedish forests 1953–1992: An analysis based on sample trees from the national forest inventory. *Scandinavian Journal of Forest Research* 11(1–4): 26–37. DOI 10.1080/02827589609382909.
- Gehrhardt E. 1909. Ueber Bestandes-Wachstumsgesetze und ihre Anwendung zur Aufstellung von Ertragstafeln. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 85: 117–128.
- Gehrhardt E. 1921. Eine neue Kiefern-Ertragstafel. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 97: 145–156.
- Gieruszyński T. 1959. Pomiar drzew i drzewostanów. PWRiL, Warszawa, 376 s.
- Hartig R. 1892. Ueber den Entwicklungsgang der Fichte im geschlossenen Bestande nach Höhe, Form und Inhalt. *Forst-Naturwiss Z*: 169–185.
- Heyer C. 1841. Die Waldertrags-Regelung. Verlag von B.C. Ferber, Giessen, 264 s.
- Heyer C. 1845. Wedenkinds Neue Jahrb. Climate Change: The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge, 30, 1–127.
- Hlásny T., Trombik J., Bošefa M., Merganič J., Marušák R., Šebeň V., Štěpánek P., Kubišta J., Trnka M. 2017. Climatic drivers of forest productivity in Central Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 234–235: 258–273. DOI 10.1016/j.agrformet.2016.12.024.
- Hummel F.C., Christie J. 1953. Revised yield tables for conifers in Great Britain. Forestry Commission, London, 23 s.
- Hynynen J. 1995. Modelling tree growth for managed stands. *The Finnish Forest Research Institute Research Papers* 576.
- Jarosz K., Kłapeć B. 2002. Modelowanie wzrostu drzewostanów z wykorzystaniem funkcji Gompertza. *Sylwan* 146(4): 35–42.
- Keller W. 1991. Określanie bonitacji na podstawie siedliska. *Sylwan* 135(7): 41–49.
- Kimsey M.J., Moore J., McDaniel P. 2008. A geographically weighted regression analysis of Douglas-fir site index in north central Idaho. *Forest Science* 54(3): 356–366. DOI 10.1093/forestscience/54.3.356.
- Kliczkowska A., Bruchwald A. 2000. Kształtowanie się bonitacji drzewostanów świerkowych na terenach górskich. *Sylwan* 144(9): 5–15.
- Kraft G. 1884. Beiträge zur lehre von den durchforstungen, schlagstellungen und lichtungshieben. Klindworth, Hannover, 147 s.
- Latta G., Temesgen H., Barrett T. M. 2009. Mapping and imputing potential productivity of Pacific Northwest forests using climate variables. *Canadian Journal of Forest Research* 39(6): 1197–1207. DOI 10.1139/X09-046.
- Magin R. 1957. Probleme bei der Aufstellung von Leistungstafeln für mehrschichtige Mischbestände, w: *Mitt. Stf. Bayern* 29: 176–185.

- Magin R. 1958. Über die Brauchbarkeit des forstlichen Bonitätsbegriffes. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 129: 145–150.
- Mäkinen H., Yue C., Kohnle U. 2017. Site index changes of Scots pine, Norway spruce and Larch stands in southern and central Finland. *Agricultural and Forest Meteorology* 237–238: 95–104. DOI 10.1016/j.agrformet.2017.01.017.
- Means J.E., Helm M.E. 1985. Height growth and site index curves for douglas-fir on dry sites in the Willamette National Forest. *USDA Forest Service Research Paper* 341: 17.
- Milner K.S. 1992. Site index and height growth curves for ponderosa pine, western larch, lodgepole pine, and Douglas-fir in western Montana. *Western Journal of Applied Forestry* 7(1): 9–14. DOI 10.1093/wjaf/7.1.9.
- Monserud R.A. 1984. Height growth and site index curves for inland douglas-fir based on stem analysis data and forest habitat type. *Forest Science* 30(4): 943–965. DOI 10.1093/forestscience/30.4.943.
- Nord-Larsen T. 2006. Developing dynamic site index curves for European Beech (*Fagus sylvatica* L.) in Denmark. *Forest Science* 52(2): 173–181. DOI 10.1093/forestscience/52.2.173.
- Oettel K.C. 1764. Practischer Beweis, daß die Mathesis bey dem Forstwesen unentbehrliche Dienste thue. Joh. Andreas Schill, Arnstadt, 174 s.
- Philipp K. 1893. Hilfstabellen für Taxatoren. Müller, Karlsruhe, 32 s.
- Popham T.W., Feduccia D.P., Dell T.R., Mann W.F.J., Campbell T.E. 1979. Site index for loblolly plantations on cutover sites in the West Gulf Coastal Plain. *USDA Forest Service Research Note*, 250 s.
- Pretzsch H. 1996. Growth trends of forests in Southern Germany, w: Growth trends in European Forests. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN 978-35-40614-60-9. DOI 10.1007/978-3-642-61178-0\_11.
- Pretzsch H., Biber P., Schütze G., Uhl E., Rötzer T. 2014. Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nature Communications* 5(1): 4967. DOI 10.1038/ncomms5967.
- Schadauel K. 1996. Growth trends in Austria, w: Growth trends in European Forests. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN 978-35-40614-60-9. DOI 10.1007/978-3-642-61178-0\_20.
- Schwappach A. 1943. Ertragstabellen der wichtigeren Holzarten. Merkur, Praga.
- Sewerniak P. 2008. Wstępne wyniki badań nad wpływem uziarnienia gleby na bonitację drzewostanów sosnowych w południowo-zachodniej Polsce. *Roczniki Gleboznawcze* 59(3): 256–262.
- Sewerniak P., Piernik A. 2012. Ujęcie wpływu właściwości gleb piaszczystych na bonitację drzewostanów sosnowych w południowo-zachodniej Polsce w modelach regresji. *Sylvan* 156(8): 563–571. DOI 10.26202/sylvan.2012043.
- Sharma M., Amateis R.L., Burkhart H.E. 2002. Top height definition and its effect on site index determination in thinned and unthinned loblolly pine plantations. *Forest Ecology and Management* 168(1–3): 163–175. DOI 10.1016/S0378-1127(01)00737-X.
- Sharma R.P., Brunner A., Eid T. 2012. Site index prediction from site and climate variables for Norway spruce and Scots pine in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27(7): 619–636. DOI 10.1080/02827581.2012.685749.
- Skovsgaard J.P., Vanclay J.K. 2008. Forest site productivity: A review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry* 81(1): 13–31. DOI 10.1093/forestry/cpm041.
- Socha J. 1997. Matematyczne ujęcie bonitacji siedliska. *Sylvan* 2(141): 31–36.
- Socha J. 2005. Zależność pomiędzy wysokością górną a wysokością przeciętną w górskich drzewostanach świerkowych. *Sylvan* 149(8): 10–17. DOI 10.26202/sylvan.9200518.
- Socha J. 2011. Krzywe bonitacyjne świerka pospolitego na siedliskach górskich. *Sylvan* 155(12): 816–826. DOI 10.26202/sylvan.2011067.
- Socha J., Bruchwald A., Neroj B., Gruba P., Wertz B., Ochał W., Pierzchalski M. 2017. Sprawozdanie końcowe z realizacji usługi badawczej pod nazwą „Aktualna i potencjalna produktywność siedlisk leśnych Polski dla głównych gatunków lasotwórczych” Raport dla PGL LP.
- Socha J., Ochał W. 2017. Dynamic site index model and trends in changes of site productivity for *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. in southern Poland. *Dendrobiology* 77: 45–57. DOI 10.12657/denbio.077.004.
- Socha J., Ochał W., Grabczyński S., Maj M. 2015. Modele bonitacyjne dla gatunków lasotwórczych Polski opracowane na podstawie tablic zasobności. *Sylvan* 159(8): 639–649. DOI 10.26202/sylvan.2015011.
- Socha J., Orzeł S. 2011. Dynamiczne krzywe bonitacyjne dla drzewostanów sosnowych Puszczy Niepołomickiej. *Sylvan* 155(5): 301–312. DOI 10.26202/sylvan.2010078.
- Socha J., Orzeł S. 2013. Dynamiczne krzywe bonitacyjne dla sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z południowej Polski. *Sylvan* 157(1): 26–38. DOI 10.26202/sylvan.2012094.
- Stępień E. 1979. Bonitowanie jakości siedliska na podstawie funkcji bonitacji. *Zeszyty Naukowe SGGW – AR, Leśnictwo* 27: 77–87.
- Subedi S., Fox T.R. 2016. Predicting loblolly pine site index from soil properties using partial least-squares regression. *Forest Science* 62(4): 449–456. DOI 10.5849/forsci.15-127.
- Unthelm H. 1996. Has site productivity changed? A case study in the Eastern Swabian Alb, Germany, w: Growth trends in European Forests. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN 978-35-40614-60-9. DOI 10.1007/978-3-642-61178-0\_12.
- Wang Y., Raulier F., Ung C.-H. 2005. Evaluation of spatial predictions of site index obtained by parametric and nonparametric methods – A case study of lodgepole pine productivity. *Forest Ecology and Management* 214(1–3): 201–211. DOI 10.1016/j.foreco.2005.04.025.
- Watt M.S., Dash J.P., Bhandari S., Watt P. 2015. Comparing parametric and non-parametric methods of predicting Site Index for radiata pine using combinations of data derived from environmental surfaces, satellite imagery and airborne laser scanning. *Forest Ecology and Management* 357: 1–9. DOI 10.1016/j.foreco.2015.08.001.

- Watt M.S., Dash J.P., Watt P., Bhandari S. 2016. Multi-sensor modelling of a forest productivity index for radiata pine plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science* 46(1): 9. DOI 10.1186/s40490-016-0065-z.
- Weck J. 1948. Forstliche Zuwachs-und Ertragskunde. Neumann Verlag, Radebeul, Berlin, 92 s.
- Wenk G., Vogel M. 1996. Height growth investigations of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in the Eastern Part of Germany during the last century, w: Growth trends in European Forests. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN 978-35-40614-60-9. DOI 10.1007/978-3-642-61178-0\_10.
- Wiedemann E. 1936. Die fichte. M. & H. Schaper, Hannover, 248 s.
- Yue C., Mäkinen H., Klädtke J., Kohnle U. 2014. An approach to assessing site index changes of Norway spruce based on spatially and temporally disjunct measurement series. *Forest Ecology and Management* 323: 10–19. DOI: 10.1016/j.foreco.2014.03.031.

### Author's contributions

W.K., R.T., T.B. – conceptualization, W.K., R.T. – literature review, W.K. – manuscript preparation