

ANDRZEJ KŁOCEK, JAROSŁAW PIEKUTIN

# Wiek rębności w lesie normalnym oraz lesie celowym

Rotation age in normal and target forests

**ABSTRACT**

Kłoczek A., Piekutin J. 2015. Wiek rębności w lesie normalnym oraz lesie celowym. Sylwan 159 (12): 971-988.

The paper focuses on the deterministic model of normal forest, the probabilistic model of target forest and the processes related to the survival and mortality of forest stands suitable for these models. They are the basis for the assumptions, presented in this paper, of two different methods of regulating rotation age adequate for normal forest and target forest. Optimizing the rotation age of a stand is essential for the regulation of forest production. It aims to establish such an age-dependent state of stand, which is the most desirable from the point of view of the adopted forest management objectives. Because of the long-term cycle of stand development, optimizing the age at which a stand is considered mature for felling usually means maximizing the average annual increase in stand volume. Under the conditions of normal forest, the concept formulated in the first half of the nineteenth century, the above optimization criterion has the form of the equation [2]. The current annual increase of timber production ( $P_b(t_u)$ ) at the optimal rotation age ( $t_u$ ) is equal to the average annual increment ( $P_p(t_u)$ ). At this age, the intensity (rate) of the current growth of the production function ( $P_b(t_u)/P(t_u)$ ) becomes equal to the fraction of the stand area ( $1/I_u$ ). These relationships are illustrated in figure 3. The model of target forest is derived from the random nature of two opposing processes described as 'survival' and 'mortality' of forests. This is reflected in the transition probability matrix where a forest stand moves from the younger age class to the older or to the youngest age class. The probability function ( $U(t)$ ) of stand survival in individual management periods ( $t$ ) developed on the basis of these data, is one of the main parameters of the optimization equation for the rotation age of target forest [11]. Formula [13] indicates that the optimal rotation age ( $t=t_u$ ) is when the rate of growth in the volume of merchantable timber ( $P_b(t)/P(t)$ ) and the negative growth rate (decline) for a part or the entire stand ( $U_b(t)/U(t)$ ) are equal to a fraction of the stand area. These interactions are illustrated in figure 8, which additionally presents the effect of the decline in the survival rate on the optimal rotation age ( $t_u$ ). This age may be analyzed separately for natural disasters and for clear-cutting of stands in accordance with the forest management plan. These two categories of effects may also be dealt with jointly.

**KEY WORDS**

deterministic model of normal forest, probabilistic model of target forest, survival and mortality processes

**ADDRESSES**

Andrzej Kłoczek <sup>(1)</sup> – e-mail: A.Klocek@ibles.waw.pl  
 Jarosław Piekutin <sup>(2)</sup> – e-mail: Jaroslaw.Piekutin@wl.sggw.pl

<sup>(1)</sup> Instytut Badawczy Leśnictwa; Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3, 05-090 Raszyn

<sup>(2)</sup> Katedra Urządzenia Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

## Wstęp

W dotychczasowej historii poznania, opisu oraz kształtowania lasu i gospodarki leśnej można wyróżnić dwie zasadnicze koncepcje, nazywane również modelami lub teoriami: model lasu normalnego oraz model lasu celowego. Podstawę pierwszej z wymienionych koncepcji stanowiła mechanistyczna teoria przyrody, według której świat materialny funkcjonuje jako idealna maszyna. Wyrazem takiej wizji przyrody był surowy determinizm i bezwzględna przyczynowość, w myśl której wszystko, co się zdarza, ma konkretną przyczynę i wywołuje określony skutek. Przyjmowano zatem, że jeśli znany jest stan obecny i prawa przyczynowo-skutkowe danego systemu materialnego, wówczas z absolutną pewnością można określić przyszłe zdarzenia i ich skutki. Takie przekonanie legło także u podstaw koncepcji lasu normalnego.

Pierwsze krytyczne uwagi pod adresem koncepcji lasu normalnego pojawiły się w latach 30. ubiegłego wieku. Podniesiono w nich zwłaszcza rozbieżność między rzeczywistością a modelowymi założeniami lasu normalnego. Podstawową przyczyną tych rozbieżności był losowy (probabilistyczny) charakter zachodzących w lesie (drzewostanach) procesów starzenia się, zużywania, uszkodzeń, eksploatacji i odnowy, narodzin oraz śmierci. Zdarzenia losowe odnoszono zwłaszcza do organizmów i procesów biologicznych. W znacznym stopniu zdarzenia te stały się także rezultatem niespodziewanego, negatywnego wpływu otoczenia na lasy, choćby w postaci przemysłowych zanieczyszczeń środowiska leśnego lub klęsk żywiołowych. W tych warunkach, oprócz niepełnego zadrzewienia, zaczęły tracić na znaczeniu także założenia o jednakowej frakcji drzewostanów wszystkich klas wieku i o deterministycznym charakterze zależności przyczynowo-skutkowych w gospodarce leśnej. Przytoczone mankamenty koncepcji lasu normalnego stały się niezwykle istotnym bodźcem dla rozwoju koncepcji lasu celowego.

Niniejszy artykuł koncentruje uwagę na deterministycznym modelu lasu normalnego i probabilistycznym modelu lasu celowego oraz na adekwatnych dla nich procesach przeżywania i ubywania drzewostanów, a także na właściwych dla lasu normalnego oraz lasu celowego metodach regulacji wieku rębności drzewostanów.

## Model lasu normalnego

CHARAKTERYSTYKA KONCEPCJI LASU NORMALNEGO. Motywem narodzin współczesnej gospodarki leśnej był gwałtowny wzrost popytu na drewno ze strony intensywnie rozwijającego się od przełomu XVI i XVII wieku przemysłu, transportu i budownictwa, w tym zwłaszcza floty morskiej (po odkryciu Ameryki pod koniec XV wieku) oraz hutnictwa żelaza i szkła, a także warzelni soli [Speidel 1967]. Obawa o brak drewna na skutek nadmiernej eksploatacji lasów, szczególnie w pobliżu miast i wsi, doprowadziła w XVIII wieku do rozwoju metod regulacji produkcji drewna i użytkowania lasu, które wkrótce stały się przedmiotem planowania urzędzeniowego w gospodarce leśnej [Knocke i in. 2012]. Jego nadrzędnym celem była sformułowana w 1713 roku przez H. C. Carlowitza w podręczniku „Sylvicultura Oeconomica” zasada (idea, teoria) trwałości lasu, sprowadzana również do trwałości produkcji leśnej, trwałości pozyskania drewna lub trwałości dochodów pieniężnych gospodarki leśnej [Speidel 1967].

Urzeczywistnienie idei trwałości lasu przez określenie adekwatnych do jego stanu i funkcji metod zagospodarowania lasu znalazło wyraz w modelu (teorii) lasu normalnego, przedstawionym przez J. Ch. Hundeshagena w 1826 roku, a następnie rozwiniętym przez G. Hayera w 1841 roku [Oesten, Roeder 2002]. Model lasu normalnego jest rezultatem przeniesienia do leśnictwa metody wnioskowania właściwej dla nauk abstrakcyjnych (ścisłych), nazywanej dedukcją [Knocke i in. 2012]. W tradycyjnym ujęciu metoda ta polega na przechodzeniu od ogółu do

szczególu lub na wyprowadzaniu sądów szczegółowych z sądów ogólnych. Nowoczesne rozumienie dedukcji, jako metody wnioskowania, polega na logicznym przechodzeniu od przyczyn do skutków. Przyczynami są również zdania, które wcześniej zostały uznane za prawdziwe (przesłanki, tezy, aksjomaty), natomiast skutki są wnioskami logicznie z nich wynikającymi. Teoretyczne aspekty modelu lasu normalnego tkwią w kształtowanej od XVII wieku mechaniczno-deterministycznej koncepcji przyrody. Zapoczątkował ją francuski filozof i matematyk Kartezjusz, który swoje credo na temat jednolitej teorii opisującej nasz świat materialny zawarł w słowach: „nie widzę żadnej różnicy między maszynami zrobionymi przez rzemieślników a różnymi ciałami, które buduje sama natura” [Capra 1987]. Fascynacja funkcjonowaniem maszyn zaowocowała przeniesieniem przez Kartezjusza i Newtona ścisłych zależności przyczynowo-skutkowych na grunt przyrody. To właśnie dzięki tym zależnościom w tych samych warunkach zachodzą te same procesy i zjawiska lub też „podobne skutki wywodzą się od podobnych przyczyn” [Poper 1992]. O zjawiskach, których przebieg jest jednoznacznie określony, mówimy właśnie, że są zdeterminowane lub deterministyczne i na ogół opisujemy je za pomocą ścisłych reguł matematycznych.

Deterministyczno-mechanistyczna koncepcja lasu normalnego oparta jest na następujących tezach [Möhrring 1986; Klocek, Borowski 1990]:

- 1) skład gatunkowy drzewostanów gospodarstwa jest homogeniczny,
- 2) w gospodarstwie występują drzewostany wszystkich klas wieku,
- 3) drzewostany wszystkich klas wieku mają jednakową powierzchnię,
- 4) drzewostany wszystkich klas wieku mają taki sam współczynnik zadrzewienia,
- 5) bonitacja wszystkich drzewostanów gospodarstwa jest taka sama,
- 6) użytkowanie rębne obejmuje wyłącznie drzewostany dojrzałe do wyrębu.

Z wymienionych tez wynika kilka bardzo istotnych wniosków poznawczo-praktycznych, zarówno natury przyrodniczej, jak i gospodarczej. Należy do nich przede wszystkim deterministyczny charakter procesów przechodzenia powierzchni drzewostanów z niższych do wyższych klas wieku. Jedynie drzewostany najstarszej klasy wieku, z powodu osiągnięcia dojrzałości rębnej, podlegają całkowitemu użytkowaniu, a zajmowana przez nie powierzchnia powraca do pierwszej klasy wieku celem jej odnowienia. Graficznym obrazem tych przejść jest rycina 1, natomiast ich skutkiem jest jednostajny (prostokątny) rozkład powierzchni drzewostanów w klasach wieku lasu normalnego (ryc. 2), zgodnie z poniższym wzorem:

$$h_i = h_1 = h_2 = \dots = h_n = \frac{H}{n} \quad [1]$$

gdzie:

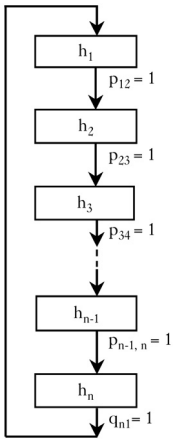
$H$  – powierzchnia lasu normalnego,

$n$  – najstarsza klasa wieku,

$h_i$  – powierzchnia drzewostanu  $i$ -tej klasy wieku dla  $i=1, 2, 3, \dots, n$ .

Do niezwykle istotnych cech lasu normalnego należy więc struktura wiekowa (klas wieku) drzewostanów i związana z nią długość cyklu produkcji, wielkość i struktura dochodów oraz kosztów gospodarstwa leśnego [Speidel 1967]. Na podstawie tych parametrów określany jest wiek dojrzałości rębnej drzewostanu, podporządkowany osiągnięciu maksymalnego poziomu celu, dla realizacji którego dany drzewostan został przeznaczony.

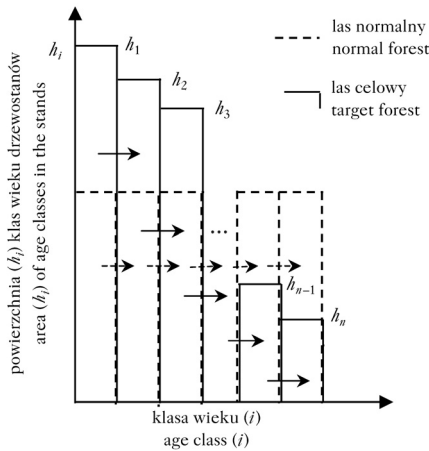
Motywy uznania drzewostanów za dojrzałe do wyrębu podyktowane są różnymi celami i warunkami ich realizacji. Na ogół dzieli się je na cztery umowne grupy [Speidel 1967; Klocek, Rutkowski 1986] obejmujące dojrzałość:



Ryc. 1.

Schemat deterministycznych przejść ( $p_{ij}$ ) powierzchni drzewostanów ( $h$ ) młodszych ( $i$ ) do starszych ( $j=i+1$ ) klas wieku oraz drzewostanów najstarszych ( $h_n$ ) do klasy użytkowania rębnego ( $q_{n1}$ ) w lesie normalnym

Scheme of deterministic transitions ( $p_{ij}$ ) of stands ( $h$ ) from younger ( $i$ ) to older ( $j=i+1$ ) age classes and the oldest stands ( $h_n$ ) to the final cut phase ( $q_{n1}$ ) in normal forest model



Ryc. 2.

Rozkład powierzchni drzewostanów w klasach wieku lasu normalnego ( $h_i=const.$ ) oraz lasu celowego ( $h_1 > h_2 > h_3 > \dots > h_n$ )

Distribution of stands area in age classes in normal ( $h_i=const.$ ) and target ( $h_1 > h_2 > h_3 > \dots > h_n$ ) forest model

- 1) fizyczną,
- 2) techniczną,
- 3) ekonomiczną,
- 4) socjalno-społeczną.

Pierwsza z wymienionych kategorii maksymalizuje wydajność produkcji drewna ogółem, druga tylko produkcję wybranych sortymentów, trzecia – zazwyczaj dochód pieniężny, a czwarta ukierunkowana jest na realizację funkcji publiczno-ochronnych lasu, dotyczących m.in. wypoczynku i rekreacji ludności oraz ochrony przyrody.

OPTIMALIZACJA WIEKU RĘBNOŚCI LASU NORMALNEGO. Z uwagi na wieloletni proces rozwoju drzewostanu i zmiany jego produktywności z upływem czasu, optymalizacja dojrzałości rębnej zazwyczaj sprowadza się do ustalania takiego wieku, w którym przyrost przeciętny roczny przyjętej kategorii produkcji drzewostanu osiąga maksimum. Odzwierciedla to następująca funkcja kryterium (dla  $t=t_u$ ):

$$P_p(t_u) = \frac{P(t_u)}{t_u} = \max \tag{2}$$

gdzie:

$P_p(t_u)$  – maksymalny przyrost przeciętny roczny przyjętego kryterium dojrzałości rębnej drzewostanu ( $P(t_u)$ ) w poszukiwanym optymalnym wieku rębności ( $t_u$ ).

W rachunku optymalizacyjnym funkcji [2] pominięto powierzchnię drzewostanu rębego ( $b(t_u)$ ), gdyż jako wartość stała nie ma ona wpływu na wynik optymalizacji.

Ustalenie optymalnego wieku ( $t_u$ ) wymaga obliczenia pochodnej funkcji [2], a następnie przyrównania otrzymanego równania do zera i jego rozwiązania. W rezultacie otrzymujemy poniższą zależność dla optymalnego wieku rębności ( $t_u$ ):

$$\frac{dP(t_u)}{dt_u} = \frac{P(t_u)}{t_u} \quad [3]$$

a tym samym:

$$\frac{\frac{dP(t_u)}{dt_u}}{P(t_u)} = \frac{1}{t_u} \quad [4]$$

Zawarta w równaniach pochodna funkcji  $dP(t_u)/dt_u$  odzwierciedla w przybliżeniu roczny przyrost bieżący funkcji kryterium dojrzałości drzewostanu, który dla odróżnienia od pochodnej można zapisać jako  $P_b(t_u)$ . W analizach ekonomicznych pochodną funkcji interpretuje się na ogół jako przyrost (ubytek) zmiennej zależnej odpowiadający przyrostowi zmiennej niezależnej o jednostkę, np. o rok, o 5, a nawet o 10 lat lub o jeden tysiąc złotych. Tak określane pochodne funkcji nazywane są w ekonomii „wartościami krańcowymi” lub „marginalnymi”. Analogicznie zapisujemy przyrost przeciętny roczny funkcji kryterium:  $P(t_u)/t_u = P_p(t_u)$ . Ostatecznie wzory [3] i [4] przyjmują postać dla  $t=t_u$ :

$$P_b(t_u) = P_p(t_u) \quad [3']$$

oraz

$$\frac{P_b(t_u)}{P(t_u)} = \frac{1}{t_u} \quad [4']$$

Wzór [3'] odzwierciedla powszechnie znaną w leśnictwie zasadę, w myśl której przyrost przeciętny roczny funkcji produkcji leśnej ( $P_p(t_u)$ ) osiąga maksimum w wieku zrównania wymienionego przyrostu z przyrostem bieżącym rocznym funkcji produkcji leśnej ( $P_b(t_u)$ ). Warunek ten, jak wskazuje równanie [4'], sprowadza się do zrównania (względne) tempa (stopy, intensywności) przyrostu bieżącego miąższości drzewostanu  $P_b(t_u)/P(t_u)$  z frakcją drzewostanu w wieku  $t_u$  ( $1/t_u$ ). Taką regułą określania optymalnego wieku rębności preferowali m.in. Assmann i Jedliński [Kłoczek 1999]. Zwrócili oni przy tym uwagę na fakt, że w ilorazie tempa (stopy) wzrostu  $P_b(t_u)/P(t_u)$  licznik jest w przybliżeniu pochodną mianownika, natomiast mianownik to całka licznika (znana obecnie jako całka Assmanna lub Jedlińskiego). Przytoczone relacje między  $P_b(t_u)$ ,  $P(t_u)$  oraz  $P_p(t_u)$  sprzyjają wykorzystaniu matematycznych metod analizy funkcji produkcji leśnej.

Dane niezbędne do określenia optymalnego wieku rębności ( $t_u$ ) w lesie normalnym przedstawiono w tabeli 1. Punktem wyjścia przeprowadzonych obliczeń były dane tablicowe dotyczące sumarycznej produkcji grubizny ( $P(t)$ ) drzewostanów świerkowych II klasy bonitacji [Szymkiewicz 1966]. Przedstawione wyniki mogą być odnoszone do gospodarstwa obrębowego o powierzchni  $H=t_u$  hektarów lub gospodarstwa okresowego o powierzchni 1 ha, lecz w wieku  $t=t_u$  lat. W pierwszym przypadku dla uzyskania corocznie maksymalnego przyrostu przeciętnego produkcji sumarycznej w wysokości 10,59 m<sup>3</sup>/ha konieczne jest posiadanie gospodarstwa o powierzchni 100 ha. Potwierdza to zrównanie w tych warunkach tempa wzrostu intensywności produkcji (0,010)

Tabela 1.

Określenie optymalnego wieku dojrzałości fizycznej drzewostanów w lesie normalnym (drzewostany świerkowe II klasy bonitacji)  
 Determination of the optimal rotation age in the normal forest model (Norway spruce stands in II site class)

$t$	$P(t)$ [m <sup>3</sup> /ha]	$P_{\beta}(t)$ [m <sup>3</sup> /ha/rok]	$P_{\beta}(t)/P(t)$	$P_{\beta}(t)$ [m <sup>3</sup> /ha/rok]	$I_t$
50	354	17,10	0,048	7,08	0,020
60	525	15,60	0,030	8,75	0,017
70	681	14,00	0,021	9,73	0,014
80	821	12,50	0,015	10,26	0,013
90	946	11,30	0,012	10,51	0,011
100≈ $t_{10}$	1059	10,10	0,010	10,59	0,010
110	1160	8,70	0,008	10,55	0,009

$P(t)$  – sumaryczna produkcja grubizny,  $P_{\beta}(t)$  – bieżący roczny przyrost miąższości grubizny obliczony jako  $P_{\beta}(t)=[P(t+10)-P(t)]/10$ ,  $P_{\beta}(t)/P(t)$  – stopa intensywności przyrostu produkcji grubizny,  $P_{\beta}(t)$  – przeciętny roczny przyrost miąższości grubizny,  $I_t$  – frakcja drzewostanu,  $t$  – wiek [lata]  
 $P(t)$  – total merchantable timber production,  $P_{\beta}(t)$  – current annual increment of merchantable timber volume,  $P_{\beta}(t)/P(t)$  – intensity of the current growth of the merchantable timber production,  $P_{\beta}(t)$  – average increment of merchantable timber volume,  $I_t$  – stand fraction,  $t$  – age [years]

Tabela 2.

Określenie optymalnego wieku dojrzałości fizycznej drzewostanów w lesie celowym (drzewostany świerkowe o umiarkowanym poziomie ryzyka, przy współczynnikach funkcji Weibulla:  $S_{100}=0,65$  oraz  $\alpha=2,6$ )  
 Determination of the optimal rotation age in the target forest model (Norway spruce stands in moderate risk danger,  $S_{100}=0,65$ ,  $\alpha=2,6$ )

$t$	$P(t)$ [m <sup>3</sup> /ha]	$P_{\beta}(t)$ [m <sup>3</sup> /ha/rok]	$U(t)$	$U_0(t)$	$U_{\beta}(t)$	$P(t)/t \cdot U(t)$ [m <sup>3</sup> /ha/rok]	$P_{\beta}(t)/P(t)$	$U_{\beta}(t)/U(t)$	$P_{\beta}(t)/P(t) + U_{\beta}(t)/U(t)$	$I_t$
50	354	17,10	7,08	-0,039	-0,004	6,59	0,048	-0,004	0,044	0,020
60	525	15,60	8,75	-0,049	-0,005	7,81	0,030	-0,006	0,024	0,017
70≈ $t_{10}$	681	14,00	9,73	-0,058	-0,006	8,20	0,021	-0,007	0,014	0,014
80	821	12,50	10,26	-0,065	-0,007	8,06	0,015	-0,009	0,006	0,013
90	946	11,30	10,51	-0,071	-0,007	7,58	0,012	-0,010	0,002	0,011
100	1059	10,10	10,59	-0,074	-0,007	6,88	0,010	-0,011	-0,001	0,010
110	1160	8,70	10,55	-0,075	-0,008	6,07	0,008	-0,014	-0,006	0,009

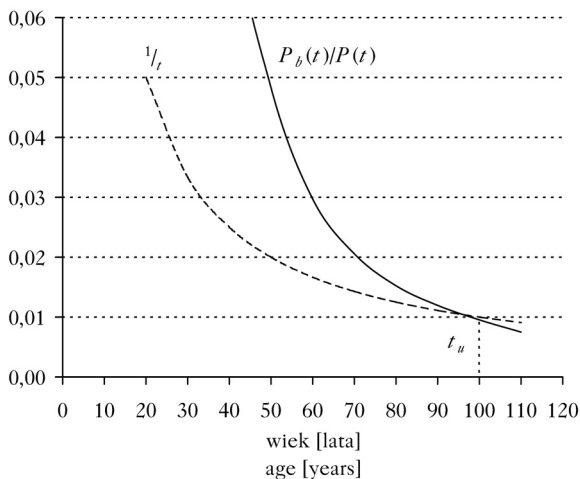
$U(t)$  – prawdopodobieństwo przeżywalności drzewostanu do wieku  $t$ ,  $U_0(t)$  – wskaźnik okresowego 10-letniego przyrostu przeżywalności,  $U_{\beta}(t)$  – wskaźnik bieżącego rocznego przyrostu przeżywalności,  $P(t)/t \cdot U(t)$  – przeciętny roczny przyrost miąższości grubizny zredukowany o  $U(t)$ ,  $U_{\beta}(t)/U(t)$  – roczna stopa intensywności przyrostu przeżywalności  
 $U(t)$  – probability of stand survival to the age  $t$ ,  $U_0(t)$  – survival increment index,  $P(t)/t \cdot U(t)$  – average increment of merchantable timber volume reduced by  $U(t)$ ,  $U_{\beta}(t)/U(t)$  – rate of survival decline

z powierzchnią frakcji drzewostanu (0,010). W drugim przypadku taki sam rezultat jest możliwy do uzyskania po każdych 100 latach z gospodarstwa o powierzchni  $H=1$  ha. Uzyskane wyniki wskazują, że warunek przedstawiony w równaniu [4'] jest spełniony w wieku około 100 lat, co ilustruje rycina 3.

### Model lasu celowego

WPLYW KLĘSK LOSOWYCH NA LAS. Opracowany w XIX wieku model lasu normalnego był zbieżny z dominującą od XVII do XX wieku deterministyczno-mechanistyczną teorią przyrody, a zarazem odwoływał się do dedukcyjnego systemu określania etatu użytkowania rębego lasu oraz regulacji dochodu gospodarstwa leśnego [Sekot 2012]. System ten zakładał m.in. stabilność warunków ekonomicznych gospodarstwa leśnego oraz jego odizolowanie od negatywnych wpływów gospodarczego i przyrodniczego otoczenia [Poznański 2004]. Wyniki konfrontacji z rzeczywistością spowodowały odesłanie omawianego modelu do grupy abstrakcyjnych rozwiązań intelektualnych. Dotyczyło to zwłaszcza zanegowanych przez praktykę i podnoszonych w literaturze jako niezwykle istotnych dwóch założeń modelu lasu normalnego: po pierwsze, ograniczenia użytkowania rębego wyłącznie do drzewostanów w wieku dojrzałości rębnej oraz po drugie, wykluczenia ryzyka wystąpienia szkód w lesie normalnym [Sekot 2012] lub (co na jedno wychodzi) – trwałego utrzymania równomiernego rozkładu powierzchni drzewostanów w klasach wieku [Poznański 2004]. Spełnienie tych postulatów wymagało lasu idealnego, charakteryzującego się cechami przypisywanymi w literaturze modelowi lasu normalnego [Jedliński 1947]. Natomiast powszechnie rozumiany las normalny to las rzeczywisty, wraz z występowaniem w nim huraganu, suszy, mrozu, śniegu, ognia, zwierzyny, owadów i innych czynników szkodliwych [Oesten, Roeder 2002]. Przeprowadzone badania i analizy ponad 40 starych kronik wskazują, że w lasach Czech i Bawarii frekwencja dużych klęsk żywiołowych w latach 1091-1526 kształtowała się na podobnym poziomie jak w całym późniejszym okresie, liczonym od początku XVIII wieku do czasów obecnych [Kouba 2002].

Do najczęściej wymienianych w literaturze sprawców klęsk przyrodniczych w lasach (nazywanych również czynnikami ryzyka w gospodarce leśnej) należą: owady, grzyby, zwierzyna, wiatry (w tym zwłaszcza huragany), susze, mrozy, śniegi i lody [Kouba 2002]. W ostatnich dekadach lista tych czynników poszerzyła się o elementy antropogeniczne, związane z przemysłowymi zanieczyszczeniami środowiska.



Ryc. 3.

Kształtowanie się frakcji drzewostanów ( $1/t$ ), stopy intensywności wzrostu produkcji ( $P_b(t)/P(t)$ ) oraz optymalnego wieku rębności ( $t_u$ ) w lesie normalnym  
Stand fraction ( $1/t$ ), intensity (rate) of the current growth of the production function ( $P_b(t)/P(t)$ ) and optimal rotation age ( $t_u$ ) in normal forest

Zdaniem wielu autorów sprawcą najbardziej dotkliwych szkód w lasach Europy są huragany i burze [Schmidt 2009]. Ważniejsze z punktu widzenia rozmiarów uszkodzonego drewna (zwłaszcza w drzewostanach świerkowych [Hanewinkel 2009]) huragany ostatniego 20-lecia to [Schmidt 2009; Bruchwald, Dmyterko 2010; Klocek, Młynarski 2011]:

- „Vivian” i „Wiebke”, 1990 rok, Nadrenia-Palatynat, uszkodziły drzewostany o miąższości 12 mln m<sup>3</sup>,
- „Gudrun”, 2005 rok, Szwecja, 75 mln m<sup>3</sup>,
- „Peer”, 2007 rok, Szwecja, 12 mln m<sup>3</sup>,
- „Cyril”, 2007 rok, Polska, 2,5 mln m<sup>3</sup>,
- huragan w Puszczy Piskiej, Kurpiowskiej i Boreckiej, 2002 rok, całkowitemu zniszczeniu uległo 6,0 tys. ha lasu.

Mimo że powierzchnia lasów uszkodzonych przez huragany niewiele się zmienia, to jednak znacząco rosną straty gospodarcze z tego tytułu. W okresie 1880-2002 częstotliwość huraganów utrzymywała się praktycznie na niezmiennym poziomie, istotnie natomiast zwiększyły się szkody na skutek wzrostu zasobności drzewostanów, które zostały uszkodzone przez huragany [Sallnäs 2013]. Na przykład huragan „Gudrun” w 2005 roku uszkodził drzewostany o łącznej miąższości 75 mln m<sup>3</sup>, podczas gdy podobny huragan w 1969 roku spowodował uszkodzenia 39 mln m<sup>3</sup> zapasu drewna na pniu. Do strat należy także zaliczyć wzrost kosztów pozyskania – co prawda niewielki – na skutek mniejszej wydajności pracy na terenach pohuraganowych. Podobnie negatywny wpływ na ekonomię gospodarstwa leśnego ma spadek cen drewna uszkodzonego. Na rachunek ujemnych konsekwencji huraganów należy także wpisać obniżenie wieku rębności drzewostanów świerkowych nawet do połowy kolei rębny, gdyż zmniejsza się udział drzewostanów starszych klas wieku, dostarczających cennych sortymentów [Bergh 2012].

Sprawcą niezwykle rozległych i negatywnych skutków w lasach XX wieku były przemysłowe zanieczyszczenia środowiska, w tym zwłaszcza powietrza i związane z nimi „zamieranie lasu”. Pierwsze znaczące symptomy tego zjawiska odnotowano już w XIX wieku. Również wtedy podjęte zostały pierwsze badania na większą skalę przez Akademię Leśną w Tharandt nad szkodliwym oddziaływaniem dwutlenku siarki na roślinność pobliskich pól i lasów. Negatywny wpływ gazów spalinowych oraz pyłów znalazł potwierdzenie w rosnącej powierzchni uszkodzonych drzewostanów. Pod koniec XIX wieku powierzchnia ta wynosiła np. 62% w Czechach w obwodzie Karlsbad, z czego 18% lasów nie nadawało się do dalszej hodowli. Wysoki poziom uszkodzenia lasów miał również miejsce na Śląsku na powierzchni 2 tys. ha [Klocek i in. 1990]. Na przełomie XIX i XX wieku do lokalnych szkód spowodowanych przez zanieczyszczenie powietrza dołączyły wielkopowierzchniowe zagrożenia całych lasów, głównie w Saksonii, Zagłębiu Ruhry oraz w górach Rudawy [Bemmann 2013]. Natomiast w 1960 roku uszkodzenia dużych powierzchni leśnych objęły Skandynawię i Wielką Brytanię.

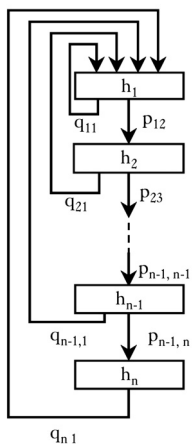
Na początku lat 80. ubiegłego wieku zamieranie lasów wskutek kwaśnych deszczów stało się problemem międzynarodowym, a dla środowiska przyrodniczego zagadnieniem pierwszoplanowym. Przeprowadzona w 1981 roku szacunkowa ocena stanu lasów w Niemczech wskazywała, że 7,7% tamtejszych lasów zostało uszkodzonych. Natomiast według pierwszej jednolitej inwentaryzacji szkód leśnych wykonanej w 1984 roku uszkodzenia lasu wystąpiły na 50% powierzchni leśnej, a ich wartość wyceniona została na 440 mld DM [Detten 2013]. Przemysłowe zanieczyszczenia powietrza doprowadziły w Polsce w latach 1978-1983 m.in. do całkowitego rozpadu drzewostanów w Górach Izerskich na powierzchni 12 tys. ha, przy szacowanej na 867 tys. ha powierzchni lasów w kraju objętych emisją pyłów i gazów przemysłowych. W tym samym



okresie, według danych IUFRO, około 6 mln ha lasów w Europie wykazywało uszkodzenia zarówno klasyczne, jak i nowego rodzaju.

Obserwowany proces rosnącej poprawy stanu lasów w Europie w ostatnim dwudziestolecu napotkał na nowe zagrożenia ze strony zmian klimatu [Depenhauer, Möhring 2010]. Co prawda wpływ zjawisk klimatycznych na stan lasu i produktywność drzewostanów był podnoszony już w XIX wieku, m.in. przez Hartiga (w 1804 roku), Cotta (w 1828 roku) i Gayera (w 1886 roku) [Klocek, Młynarski 2011], jednak szczególne nasilenie negatywnych zjawisk kłęskowych spowodowanych przez zmiany klimatu nastąpiło po 2000 roku [Detten 2013]. Prognozy tych zmian w Europie Środkowej przewidują w XXI wieku m.in. wzrost średniej temperatury o 6°C, a w okresie zimowym nawet powyżej 4°C. Zwiększą się również opady, np. w Szwecji przeciętnie od 10 do 20%. Wraz ze zmianami klimatu nasila się gradacje owadów, nastąpi rozwój patogenów roślin oraz wzrośnie migracja do Europy obcych gatunków drzew [Sällnas 2013]. Prognozy te już przyczyniły się do konsolidacji ośrodków naukowych i ponownego nasilenia badań nad zjawiskiem zamierania lasów (Waldsterben) z nadzieją, że co prawda „to człowiek doprowadził do zamierania lasu, ale zarazem to człowiek może ten proces zahamować” [Wagner 2013].

CHARAKTERYSTYKA LASU CELOWEGO. Zapoczątkowana przez Wagnera w 1928 roku krytyka lasu normalnego [Möhring 1986] przybrała na sile w latach 60. i późniejszych ubiegłego wieku. Dotyczyła ona zwłaszcza nierealności pełnego zadrzewienia w całym cyklu produkcji leśnej. Aby uniknąć tych zastrzeżeń, Laer i Speidel [1959] zaproponowali zastąpienie zadrzewienia zapasem celowym (niem. Zielvorrat). Natomiast Kouba [1969], analizując wpływ kłesk żywiołowych na strukturę wiekową drzewostanów, skonstatował, że przejście drzewostanów z niższych do wyższych stopni wieku odbywa się w sposób probabilistyczny, a nie deterministyczny. Dalsze badania prowadzone w tym kierunku w latach 70. XX wieku, przez takich autorów jak Suzuki [1971], Rutkowski [1971], Kouba [1973] oraz Poznański [1973], a następnie przez Klocka i Oestena [1992], wzbogaciły analizę i modelowanie rozwoju struktury lasu o prawdopodobieństwa przejść drzewostanów młodszych klas wieku do starszych (zgodnie z procesem starzenia się) oraz drzewostanów wszystkich klas wieku do pierwszej klasy na skutek ich częściowego lub całkowitego wyrębu z powodu osiągnięcia wieku rębności lub też wymuszonego ich użytkowania przedrębne, wywołanego kłeskami żywiołowymi (współczynniki  $q_{ji}$  na ryc. 4). Z kolei w latach 1978-1981 badania Lucasa i Andersa zaowocowały opracowaniem optymalizacyjnego modelu wiekowej struktury lasu, znanego pod nazwą OPAL (niem. Optimierung der Altersstruktur) [Klocek, Rutkowski



Ryc. 4.

Schemat probabilistycznego przejścia (przeżywalności –  $p_{ij}$  oraz śmiertelności –  $q_{ji}$ ) powierzchni drzewostanów 10-letnich klas wieku w lesie celowym

Scheme of probabilistic transitions ( $p_{ij}$  – survival,  $q_{ji}$  – mortality) of stands in 10-years age classes in target forest

1986; Klocek, Oesten 1993]. Najczęściej jednak przywoływanym osiągnięciem nauk leśnych tamtego okresu jest sformułowana przez Kurtha z Wydziału Leśnego w Tharandt celowa struktura lasu (niem. Zielstruktur), a następnie model lasu celowego (niem. Zielwald). Model ten wywodzi się z losowego charakteru dwóch podstawowych, a zarazem przeciwstawnych procesów, określanych ogólnie jako „przejście”. Jedną kategorią tych procesów (zdarzeń), traktowanych jako synonimy, obejmuje: „przeżywanie” („przeżycie”), „narodziny”, „rozrodczość”, „odnowę”, „uzupełnienie” itd. Natomiast do drugiej kategorii należą procesy „śmierci”, „ubywania”, „śmiertelności”, „zużycia”, „rozpadu”, „starzenia”, „wyrębu” i in. Różnorodność przytoczonych terminów jest wynikiem szerokiego i rosnącego wykorzystania procesów przejścia (przeżywalności i śmiertelności) do oceny zmian demograficznych, ubezpieczenia od następstw nieszczęśliwych wypadków, ale także odnowy maszyn i urządzeń technicznych [Kožniewska, Włodarczyk 1978].

Powszechność procesów życia i śmierci w teorii odnowy wskazuje, że określenia te mają swoje korzenie w demografii [Kožniewska, Włodarczyk 1978]. Istotnie, ocena procesów przeżywalności i śmiertelności zapoczątkowana została przeszło 100 lat temu przez firmy ubezpieczeniowe, które ze względów finansowych chciały określić liczbę lat, które ma jeszcze szansę przeżyć ubezpieczona lub ubezpieczająca się osoba. Dla usprawnienia stosowanych obliczeń demografowie zaczęli konstruować „tabele przeżywania – śmierci”, określające m.in. współczynniki urodzeń oraz współczynniki śmiertelności [Campbell, Reece 2012]. Podobnego rodzaju rozwiązanie w formie macierzy przejść drzewostanów przedstawił Poznański [1973], natomiast Kouba [2002], kierując się rozwiązaniami stosowanymi w Austrii, Czechach i Niemczech, zaprezentował „tabele życia lasu”, koncentrując uwagę przede wszystkim na określeniu dla drzewostanów poszczególnych klas wieku prawdopodobieństw „przeżywania” i „ubywania” oraz na ustaleniu przeciętnych okresów życia drzewostanów, a także na procentowych udziałach klas wieku drzewostanów zniszczonych przez śniegi, wiatry i pożary oraz wszystkie te czynniki razem wzięte. Podobny cel przyświecał prawdopodobnie zapowiadnemu przez profesorów Wydziału Leśnego SGGW w Warszawie w latach 50. ubiegłego wieku wprowadzeniu do praktyki tzw. kart drzewostanów, zawierających nie tylko ich historię, ale przede wszystkim informacje niezbędne do prowadzenia racjonalnej gospodarki leśnej. Kilka dekad wcześniej Leslie z Oksfordu zauważył, że strukturę wiekową populacji niektórych gatunków zwierząt można również przedstawić w formie odpowiednio zbudowanej macierzy prawdopodobieństw przejścia [Krebs 2011]. Macierz ta (nazywana później macierzą Lesiego) doczekała się interesujących modyfikacji, polegających m.in. na zastąpieniu klas wieku przez stadia rozwojowe.

W leśnictwie natomiast nowy kierunek badań, zapoczątkowany w drugiej połowie XX wieku, skoncentrował uwagę przede wszystkim na procesach przeżywalności drzewostanów, opisywanych za pomocą macierzy prawdopodobieństw przejść oraz funkcji przeżywalności. Ujęcie macierzowe znalazło wyraz m.in. w opracowaniach Rutkowskiego [1969], Klocka i Oestena [1992], Kouby [2002] oraz Poznańskiego [2004]. W ostatnim okresie dominującą pozycję w literaturze przedmiotu zajęła funkcja przeżywalności oraz związane z nią problemy i metody dotyczące bądź to wyboru składu gatunkowego drzewostanu [Beinhofer 2010; Möhring i in. 2010b; Knoke i in. 2012], bądź też oceny wpływu ryzyka na funkcję przeżywalności i optymalny wiek rębności lasu celowego [Klocek, Oesten 1993; Beinhofer, Knoke 2007; Hanewinkel 2009; Sekot 2012].

Nieodłącznie związane z powyższymi badaniami prawdopodobieństwa przeżywania i ubywania drzewostanów odzwierciedlają stosunek liczbowy każdego z tych zdarzeń do ogólnej liczby wszystkich możliwych przypadków sprzyjających tym zdarzeniom [Empacher, Sęp 1970]. Mogą zatem być interpretowane jako prawdopodobieństwa empiryczne lub częstości. W literaturze poświęconej procesom rozwoju lasu prawdopodobieństwa te powszechnie nazywane są

współczynnikami (wskaźnikami) użytkowania lub wyrębu drzewostanów oraz współczynnikami przeżycia lub przeżywania [Klocek, Rutkowski 1986; Poznański 2004; Beinhofer 2010]. Ustala się je oddzielnie dla poszczególnych klas lub podklas wieku drzewostanów, prezentuje zaś w formie tzw. macierzy prawdopodobieństwa przejść drzewostanów, najczęściej w 20- lub 10-letnich klasach wieku, rzadziej w krótszych okresach. Na ogół długość analizowanych okresów rozwoju lasu (gospodarstwa leśnego) jest równa przyjętej szerokości klasy wieku.

Odzwierciedleniem procesów ubywania i przeżywania drzewostanów w macierzy prawdopodobieństwa przejść są współczynniki  $q_j$  oraz  $p_j$ . Ponieważ suma prawdopodobieństwa zdarzeń  $q_j$  oraz  $p_j$  równa się jedności, prawdopodobieństwo przeżycia drzewostanów ( $p_j$ ) wynosi:

$$p_j = 1 - q_j \quad [5]$$

gdzie:

$q_j$  – prawdopodobieństwo przejścia w przyjętym interwale czasowym (okres klasy wieku) powierzchni drzewostanów z klasy wieku o numerze  $j$  do klasy wieku o numerze 1 [Klocek, Rutkowski 1986; Poznański 2004].

Przejścia niektórych drzewostanów do pierwszej klasy wieku są następstwem realizacji zaplanowanego wyrębu oraz/lub wymuszonego przez klęski żywiołowe użytkowania przedrębego. Okres objęty analizą procesów przejść drzewostanów jest pod względem liczby lat równy przyjętej klasie wieku. Wyrażenie  $1 - q_j$  oznacza prawdopodobieństwo przejścia w okresie równym szerokości klasy wieku pozostałej po wyrębie powierzchni drzewostanów o numerze  $j$  do klasy wieku o numerze  $j+1$ . Symbol 0 w omawianej macierzy oznacza brak przejść drzewostanów.

Decydujący wpływ współczynnika  $q$  na przeżywalność drzewostanów wymaga jednoznacznego określenia procesów wyrębu (ubywania) drzewostanów. Tymczasem autorzy przytoczonego wyżej modelu optymalizacji wiekowej struktury gospodarstwa zrębowego (OPAL) pomijali w macierzy przejść planowane użytkowanie rębne drzewostanów ostatniej, rębnej klasy wieku [Klocek, Rutkowski 1986]. Wychodzili bowiem z założenia, że prawdopodobieństwo  $q$  odnosi się jedynie do losowych (a więc obarczonych ryzykiem) przypadków wyrębu lub rozpadu drzewostanów przed osiągnięciem wieku rębności. Podejście takie jest nadal stosowane na Zachodzie [Sekot 2012].

Inne rozwiązanie przyjęli Poznański i Rutkowski [Klocek, Rutkowski 1986]. Polega ono m.in. na włączeniu powierzchni drzewostanu objętego planowanym użytkowaniem rębnym do procesu przeżywania i wyrębu. Podejście to łączy wszystkie procesy przechodzenia drzewostanów, zaciera jednak odrębność i skalę zmian wywołanych przez klęski żywiołowe oraz będące rezultatem racjonalnej gospodarki leśnej. W tej sytuacji warto rozważyć propozycję Beinhofera [2009, 2010] oraz Sekota [2012] polegającą na sporządzaniu odrębnych macierzy przejść dla poszczególnych czynników sprawczych szkód leśnych, różnych gatunków drzew leśnych, odmiennych metod zagospodarowania itd. oraz określaniu sumarycznych wskaźników dla wszystkich procesów przeżywania i ubywania drzewostanów w gospodarstwie leśnym.

Syntetycznym wynikiem omawianych procesów przejścia (przeżywania i wyrębu) drzewostanów jest rozkład powierzchni drzewostanów w klasach wieku w części dotyczącej lasu celowego (ryc. 2). Pozwala on na sformułowanie kilku podstawowych wniosków dotyczących lasu celowego: po pierwsze, współczynniki śmiertelności ( $q$ ) są wysokie i bliskie jedności dla drzewostanów ostatnich, dojrzałych do wyrębu klas wieku, natomiast niewielkie i bliskie zeru dla drzewostanów młodszych klas wieku, po drugie, im większy współczynnik śmiertelności oraz wyższy wiek rębności, tym mniej drzewostanów dochodzi do wieku dojrzałości rębnej oraz po trzecie, im większe współczynniki przeżywalności drzewostanów młodszych i średnich stopni wieku,

tym większe możliwości użytkowania rębnego. Wymienione cechy lasu celowego nie wyczerpują jego odrębności od lasu normalnego. Podstawowy zbiór założeń lasu celowego w ujęciu Oestena i Roedera [2002] obejmuje następujące tezy:

- drzewostany w klasach wieku mają rozkład jednoboczny o asymetrii dodatniej,
- drzewostany wszystkich klas wieku mają jednakowy skład gatunkowy,
- gospodarstwo leśne składa się z drzewostanów wszystkich klas wieku, a każda klasa wieku ma inną powierzchnię,
- gospodarstwo leśne klas wieku charakteryzuje się zależnym od ryzyka (klęski żywiołowe) malejącym zadrzewieniem w miarę wzrostu wieku drzewostanów,
- gospodarstwo leśne klas wieku objęte ryzykiem klęsk żywiołowych charakteryzuje się niejednakową, zależną od wieku, stabilną strukturą bonitacji.

Przytoczony zbiór przesłanek lasu celowego jest wynikiem teoretycznej koncepcji modelowej tego lasu. Koncepcja ta mieści się w deterministyczno-losowym nurcie postrzegania i opisu ekosystemu, jakim jest las [Poznański 2004]. Podobny pogląd przedstawili Oesten i Roeder [2002], odwołując się do probabilistyczno-deterministycznej koncepcji lasu celowego. Można przypuszczać, że w miarę rozwoju wiedzy koncepcja lasu celowego będzie się stopniowo powiększać o założenia deterministyczne, ale niekoniecznie zbieżne z koncepcją lasu normalnego.

**FUNKCJA PRZEŻYwalności DRZEWOSTANÓW.** Do specyficznych cech gospodarki leśnej należy niezwykle długi okres produkcji, na ogół utożsamiany z wiekiem dojrzałości rębnej drzewostanów. W Europie Środkowej wiek ten waha się od 60 do 250 lat [Möhrling i in. 2010a]. Już chociażby tylko z tego powodu gospodarka leśna charakteryzuje się dużym ryzykiem odchylenia się *in minus* uzyskanego rezultatu od wielkości planowanej czy też oczekiwanej. Różnicę tę w powszechnym ujęciu nazywamy stratą i traktujemy ją jako miarę ryzyka. Jej wysokość zależy nie tylko od częstości i intensywności wystąpienia czynników sprawczych ryzyka, ale także od wrażliwości poszczególnych składników majątkowych gospodarstwa leśnego na ryzyko oraz od ich wartości [Holthausen i in. 2004]. Dotyczy to zwłaszcza drzewostanu, który pełni funkcję zarówno składnika majątku gospodarstwa leśnego, jak i jego produktu.

Analiza i ocena ryzyka w lasach wymaga sprowadzenia do wspólnego mianownika różnych jego skutków oraz różnych przyczyn. Osiągnięcie tego celu umożliwiają metody integracji skutków ryzyka w lasach, w tym zwłaszcza metoda oceny prawdopodobieństwa rozpadu (wyrębu) części lub całej powierzchni drzewostanów i jej przejścia do pierwszej klasy wieku w celu odnowienia [Höller 2009; Knoke i in. 2012]. Natomiast kwantyfikacja przeżywalności drzewostanów polega na określeniu prawdopodobieństwa przejścia całej ich powierzchni lub jej części z niższego do wyższego stopnia wieku na skutek procesów starzenia się. Wymienione procesy przejścia określane są za pomocą wskaźników rozpadu i przeżycia drzewostanów [Knoke i in. 2012].

Punktem wyjścia oceny procesów przeżycia drzewostanów jest współczynnik prawdopodobieństwa rozpadu drzewostanów [Beinhofer 2010; Knoke i in. 2012]:

$$q(t) = \frac{p(t) - p(t+10)}{p(t)} \quad [6]$$

gdzie:

- $q(t)$  – współczynnik prawdopodobieństwa rozpadu drzewostanu w określonym wieku ( $t$ ), wyrażonym na ogół w 10-letnich klasach wieku,
- $p(t)$  – współczynnik prawdopodobieństwa przeżycia przez drzewostan do danego wieku ( $t$ ).

Jak wynika ze wzoru [5], prawdopodobieństwo przeżycia ( $p(t)$ ) stanowi dopełnienie do jedności prawdopodobieństwa rozpadu ( $q(t)$ ).

W praktyce mamy na ogół do czynienia z wieloletnimi okresami rozwoju drzewostanów, obejmującymi kilka, a nawet kilkanaście planistycznych okresów gospodarczych, przeważnie 20- lub 10-letnich, rzadziej 5-letnich [Klocek, Młynarski 2011]. W tej sytuacji istotne znaczenie ma wieloetapowa ocena procesów życia drzewostanów. Odzwierciedla ją wzór prawdopodobieństwa przeżycia przez drzewostan całego okresu – od momentu jego założenia do dowolnego wieku ( $t$ ), łącznie z wiekiem rębności ( $t_n$ ) [Klocek, Oesten 1993; Beinhofer 2010]:

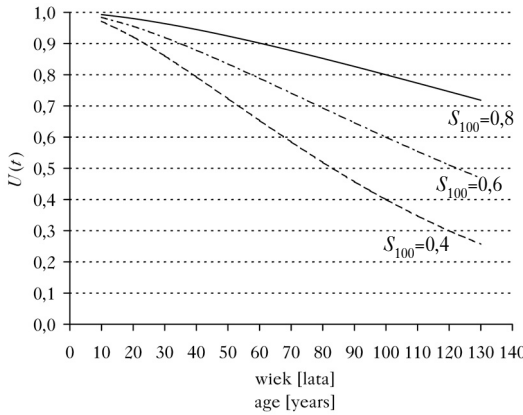
$$R_t = [1 - q_1] \cdot [1 - q_2] \cdot [1 - q_3] \cdot \dots \cdot [1 - q_{t_n}] = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot \dots \cdot p_{t_n} = \prod_{t=1}^{t_n} p_t \quad [7]$$

Odzwierciedleniem wyrównanych graficznie prostych łamanych łączących punkty przeżywalności drzewostanów ( $R_p$ ) różnych klas wieku w lesie celowym może być jedna z trzech krzywych przedstawionych na rycinie 7. Niezwykle istotną cechą tych krzywych, odróżniającą las celowy od lasu normalnego, jest malejąca powierzchnia drzewostanu w miarę wzrostu jego wieku. Tymczasem kalkulacje efektywności w lesie celowym prowadzone są na ogół według reguł właściwych dla prostokątnego rozkładu drzewostanów w klasach wieku, odpowiednich dla lasu normalnego.

Analogicznie jak we wzorze [7] możemy obliczyć prawdopodobieństwo rozpadu drzewostanu po dowolnej liczbie przeżytych okresów gospodarczo-planistycznych ( $t$ ). Zauważmy, że w przedstawionej analizie czas życia drzewostanu ma na ogół charakter dyskretny (skokowy). Tymczasem w rachunkach czasu życia różnych obiektów dominują zmienne typu ciągłego [Kozłowska, Włodarczyk 1978]. Tę formę analizy reprezentuje coraz częściej stosowana w leśnictwie uproszczona wersja wykładniczej funkcji Weibulla. Jej postać zmodyfikowana przez Möhringa i in. [2010b], a następnie przez Sekota [2012] przedstawia się następująco:

$$U(t) = e^{-(t/100)^\alpha \cdot \ln S_{100}} \quad [8]$$

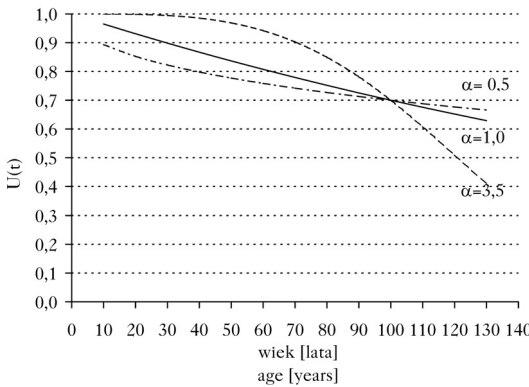
Oprócz wieku ( $t$ ) wzór [8] zawiera dwa wskaźniki związane z rozwojem drzewostanu i z produkcją drewna na pniu, tj.  $S_{100}$  oraz  $\alpha$ . Parametr  $S_{100}$  określa, jaka część powierzchni drzewostanu (wrażona w %) osiąga 100 lat. Im wartość tego wskaźnika ( $S_{100}$ ) jest bliższa 1, tym mniejsze ryzyko oraz większa intensywność przeżycia (i odwrotnie), co przy stałym wskaźniku  $\alpha=2$  ilustruje rycina 5. Natomiast parametr  $\alpha$  charakteryzuje przebieg (koncentrację) ryzyka dotyczący funkcji przeżycia drzewostanu. Przy  $\alpha < 1$  ma miejsce typowe ryzyko dla najmłodszych drzewostanów (uprawy i młodniki), których wskaźnik śmiertelności maleje coraz wolniej wraz ze wzrostem wieku drzewostanu. Z kolei dla  $\alpha=1$  wskaźnik ryzyka jest równomiernie rozłożony na wszystkie klasy wieku drzewostanów. Innymi słowy – ryzyko w tej sytuacji jest niewrażliwe na zmiany wieku drzewostanu (wskaźnik śmiertelności = constans). I wreszcie, im większa jest wartość współczynnika  $\alpha$  dla  $\alpha > 1$ , tym bardziej wraz z wiekiem drzewostanu rośnie typowe ryzyko wieku w postaci wskaźnika jego rozpadu (śmiertelności), co przy stałym wskaźniku  $S_{100}=0,6$  ilustruje rycina 6. Kształtowanie się funkcji przeżycia dla różnej kombinacji współczynników  $S_{100}$  ( $S_{100}=0,4, 0,6$  lub  $0,8$ ) oraz  $\alpha$  ( $\alpha=0,5, 1,0$  lub  $3,5$ ) (ryc. 5 i 6) opracowano na podstawie publikacji Möhringa i in. [2010b]. Natomiast rycina 7 ilustruje opracowane przez różnych autorów i przedstawione przez Höllera [2009] funkcje przeżywalności drzewostanów świerkowych położonych w górzystych terenach w pobliżu Alp w Bawarii. Występujące w trzech tamtejszych urzędach leśnych (nadleśnictwach) czynniki ryzyka pogrupowane zostały w trzy klasy: 1) huragany (małe ryzyko), 2) huragany, śniegi i owady (duże ryzyko) oraz 3) suma czynników szkodliwych o najwyższym ryzyku (lata 1990-2008). Dodatkowym elementem analizy ryzyka była ocena wpływu szkód na cenę drewna oraz



Ryc. 5.

Wartości funkcji przeżywalności ( $U(t)$ ) przy jednakowym poziomie rozpadu drzewostanów w klasach wieku ( $\alpha=1,5$ ) oraz różnym przebiegu ryzyka ( $S_{100}$ ) [Möhrring i in. 2010b]

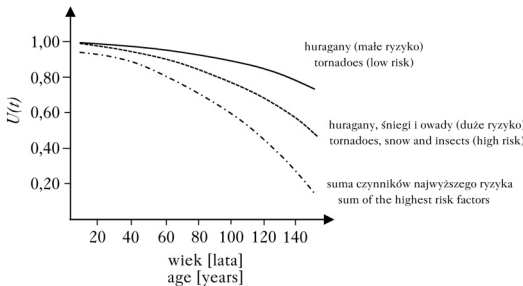
Survival function ( $U(t)$ ) values for rate of stand decomposition equal in age classes ( $\alpha=1,5$ ) and various levels of risk factor ( $S_{100}$ ) [Möhrring i in. 2010b]



Ryc. 6.

Wartości funkcji przeżywalności ( $U(t)$ ) przy jednakowym poziomie rozpadu drzewostanów w klasach wieku ( $S_{100}=0,7$ ) i różnej koncentracji ryzyka ( $\alpha$ ) [Möhrring i in. 2010b]

Survival function ( $U(t)$ ) values for equal risk factor level ( $S_{100}=0,7$ ) and various rates of stand ( $\alpha$ ) [Möhrring i in. 2010b]



Ryc. 7.

Wartości funkcji przeżywalności drzewostanów świerkowych ( $U(t)$ ) w zależności od ich wieku i różnych czynników ryzyka [Höllerl 2009]

Survival function ( $U(t)$ ) values for Norway spruce stands in relation to their age and various risk factors [Höllerl 2009]

koszty pozyskania. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że zjawiska kłęskowe obniżają przeciętną cenę  $1\text{ m}^3$  drewna o 50%, natomiast koszty pozyskania praktycznie nie ulegają zmianie [Höllerl 2009].

OPTIMALIZACJA WIEKU RĘBNOŚCI W LESIE CELOWYM. Malejąca w miarę wzrostu wieku drzewostanów ich odporność na zjawiska kłęskowe oraz towarzyszący jej spadek udziału powierzchni drzewostanów starszych klas wieku (w tym także ich zadrzewienia) powodują, że w lesie celowym podstawowym parametrem regulacji wieku rębności jest prawdopodobieństwo przejścia drzewostanów. Informuje ono, jaka część drzewostanu danej klasy wieku przejdzie po upływie przyjętego okresu do następnej, wyższej klasy wieku, a jaka zaś, na skutek użytkowania i zjawisk kłęskowych, wróci do pierwszego stopnia wieku [Sekot 2012]. Dane do określenia powyższych



prawdopodobieństw można ustalić na dwa sposoby. Pierwszy, nazywany mikroobserwacjami, sprowadza się do określenia liczby zaobserwowanych przejść „z klasy wieku do klasy wieku” w objętych badaniami pojedynczych zbiorowościach drzewostanów. Drugi sposób, zwany makroobserwacjami, sprowadza się do ustalenia powierzchniowej struktury drzewostanów w klasach wieku dla dużej liczby momentów czasu [Kozłowska, Włodarczyk 1978].

Mikroobserwacje zostały wykorzystane do przedstawienia w niniejszym opracowaniu wskaźników przejścia drzewostanów z niższych do wyższych klas wieku, na przykładzie drzewostanów świerkowych o umiarkowanym poziomie ryzyka, dla współczynników  $S_{100}=0,65$  i  $\alpha=2,6$  [Möhrling i in. 2010b]. W tych warunkach funkcja przeżywalności (ryzyka) Weibulla ma poniższą formę:

$$U(t) = e^{-(t/100)^{2,6} \cdot \ln 0,65} \quad [9]$$

Dla ustalenia optymalnego wieku rębności lasu celowego konieczna jest przede wszystkim znajomość funkcji sumarycznej produkcji miąższości grubizny drewna ( $P(t)$ ) lub innej kategorii dojrzałości rębnej drzewostanów. W przypadku ilościowej dojrzałości rębnej, maksymalizującej przyrost przeciętny roczny brutto ( $P_p(t)$ ) sumarycznej produkcji grubizny ( $P(t)$ ), funkcja produkcji ma postać (dla  $t=t_u$ ):

$$P_p(t_u) = \frac{P(t_u)}{t_u} = \max \quad [10]$$

Na skutek niepełnej przeżywalności drzewostanów z powodu zjawisk kłęskowych wynik powyższych obliczeń miąższości brutto lasu celowego ulega redukcji do poziomu netto z tytułu ograniczonego dla danego drzewostanu (gatunek, wiek drzewostanu itp.) wskaźnika przeżywalności  $U(t)$ . Przedstawiona przez Klocka i Oestena [1993] metoda optymalizacji wieku rębności lasu celowego ( $Z(t)$ ) sprowadzona została ostatecznie do postaci (dla  $t=t_u$ ):

$$Z(t_u) = \frac{P(t_u)}{t_u} \cdot U(t_u) = P_p(t_u) \cdot U(t_u) = \max \quad [11]$$

Ustalenie optymalnego wieku rębności, maksymalizującego przyrost przeciętny roczny miąższości drzewostanu, wymaga obliczenia pochodnej funkcji [11], a następnie przyrównania otrzymanego wyrażenia do zera i jego rozwiązania. Po wykonaniu tych rachunków otrzymujemy poniższy warunek [12] na optymalny wiek rębności lasu celowego ( $t_u$ ), sformułowany przez Klocka i Oestena [1993], w ramach współpracy Katedry Ekonomiki Leśnictwa SGGW oraz Instytutu Ekonomiki Leśnictwa Uniwersytetu we Freiburgu pod koniec ubiegłego wieku:

$$\frac{\frac{dP(t_u)}{dt_u}}{P(t_u)} + \frac{\frac{dU(t_u)}{dt_u}}{U(t_u)} = \frac{1}{t_u} \quad [12]$$

Lewa strona powyższego równania optymalizującego wiek rębności reprezentuje stopę (tempo) przyrostu (wzrostu) produkcji drewna na pniu ( $(dP(t)/dt)/P(t)$ ) oraz stopę przejścia (spadku) powierzchni drzewostanów z młodszych do starszych klas wieku ( $(dU(t)/dt)/U(t)$ ). Zauważmy przy tym, że liczniki lewej strony wymienionych ilorazów określają w przybliżeniu pochodne funkcji  $dP(t)/dt$  oraz  $dU(t)/dt$ , natomiast odniesienie tych pochodnych do wielkości samych funkcji  $P(t)$  oraz  $U(t)$  informuje o względnym tempie zmian tychże funkcji. Przykładem takiej zależności jest chociażby iloraz  $1/t$ , którego licznik jest właśnie pochodną mianownika.

W praktyce, wzorem ekonomicznych wielkości marginalnych, zamiast pochodnych funkcji  $P(t)$  oraz  $U(t)$ , zawartych w równaniu [12], na ogół stosowane są przyrosty bieżące roczne lub 5-, a nawet 10-letnie tych funkcji, oznaczone tu jako  $P_b(t)$  oraz  $U_b(t)$ . Przy tej konwencji równanie [12] ma postać (dla  $t=t_u$ ):

$$\frac{P_b(t_u)}{P(t_u)} + \frac{U_b(t_u)}{U(t_u)} = \frac{1}{t_u} \quad [13]$$

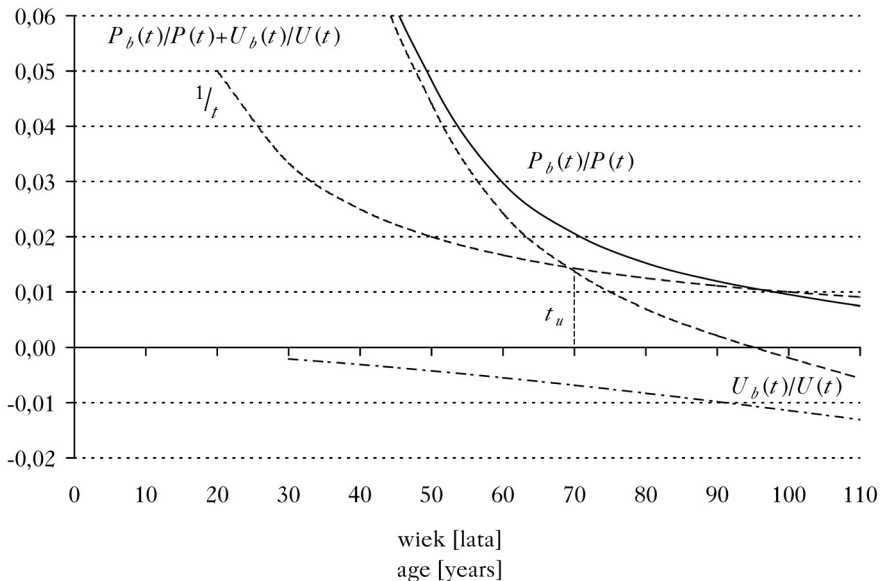
Polega ona na tym, że liczniki równania [12] reprezentują w przybliżeniu przyrosty bieżące roczne odnośnych parametrów funkcji produkcji leśnej, mianowniki zaś wielkości sumaryczne (globalne) tych parametrów.

Z graficznych form funkcji przeżywalności  $U(t)$  (ryc. 7) wynika, że w rozpatrywanej sytuacji funkcja ta maleje coraz szybciej w miarę wzrostu wieku drzewostanu ( $t$ ) oraz nasilania się czynników ryzyka drzewostanu. Z kolei rycina 8 oraz dane w tabeli 2 wskazują, że ujemnemu nachyleniu krzywej  $U(t)$  odpowiada również ujemna stopa wskaźnika przeżywalności drzewostanu ( $U_b(t)/U(t)$ ):

$$\frac{dU(t)}{dt} = U_b(t) < 0 \quad \text{oraz} \quad \frac{U_b(t)}{U(t)} < 0 \quad \text{dla } t=t_u \quad [14]$$

Po dodaniu powyższego wskaźnika do stopy przyrostu produkcji leśnej ( $P_b(t)/P(t)$ ) widać, jak znaczny wpływ na wiek rębności ( $t_u$ ) wywiera spadek przeżywalności. W sytuacji przedstawionej na rycinie 8 dodanie ujemnej stopy  $U_b(t)/U(t)$  do  $P_b(t)/P(t)$  powoduje zmniejszenie (przesunięcie w dół) rzędnych ilorazu  $P_b(t)/P(t)$  właśnie o  $U_b(t)/U(t)$ . W takim wypadku zachowanie warunku [12]/[13] decydującego o punkcie przecięcia skorygowanej krzywej  $P_b(t)/P(t) + U_b(t)/U(t)$  z krzywą frakcji drzewostanu  $1/t$  wymaga przesunięcia na rycinie 8 wymienionego punktu przecięcia, reprezentującego optymalny wiek rębności ( $t_u$ ), w lewo i nieco w górę. Oznacza to zmniejszenie wieku rębności lasu celowego, a zarazem wskazuje, że pogorszenie warunków rozwoju i zmniejszenie produktywności drzewostanu prowadzi do skrócenia cyklu produkcji leśnej.

Proces obliczeń optymalnego wieku rębności drzewostanów ( $t_u$ ) w lesie celowym przedstawiono na przykładzie drzewostanów świerkowych II klasy bonitacji. Dane wejściowe do tych



Ryc. 8.

Kształtowanie się frakcji drzewostanu ( $1/t$ ), stopy intensywności wzrostu produkcji ( $P_b(t)/P(t)$ ) oraz stopy intensywności spadku przeżywalności ( $U_b(t)/U(t)$ ) w lesie celowym o umiarkowanym poziomie ryzyka  
Stand fraction ( $1/t$ ), intensity of the current growth of the production function ( $P_b(t)/P(t)$ ) and rate of survival decline ( $U_b(t)/U(t)$ ) in target forest of moderate risk danger



obliczeń dotyczące sumarycznej produkcji miąższości grubizny  $P(t)$  dla 10-letnich okresów gospodarczych ( $t$ ) zostały zaczerpnięte z tablic zasobności i przyrostu drzewostanów [Szymkiewicz 1966]. Na tej podstawie obliczono następnie zawarte w tabeli 2 wskaźniki dotyczące przyrostu bieżącego rocznego miąższości grubizny ( $P_b(t)$ ) oraz przeciętnego rocznego przyrostu miąższości grubizny ( $P_p(t)$ ).

Kolejna grupa wskaźników dotyczy przeżywalności drzewostanów określonej na podstawie funkcji Weibulla [Sekot 2012] i przyjętych za literaturą wartości współczynników dla umiarkowanego poziomu ryzyka:  $S_{100}=0,65$  oraz  $\alpha=2,6$ . Przyjmując za punkt wyjścia wskaźnik okresowego przyrostu przeżywalności ( $U_o(t)$ ), określono, z pewnym uproszczeniem, bieżące przyrosty wskaźników przeżywalności ( $U_b(t)$ ) jako wielkości przeciętne roczne dla poszczególnych 10-letnich okresów gospodarczych:

$$U_b(t) = \frac{U(t+10) - U(t)}{10} \quad [15]$$

W analogiczny sposób określa się przyrost bieżący roczny produkcji miąższości grubizny ( $P_b(t)$ ). Trzecia grupa wskaźników obejmuje stopę intensywności produkcji (przyrostu) grubizny ( $P_b(t)/P(t)$ ) i stopę intensywności przyrostu przeżywalności drzewostanu ( $U_b(t)/U(t)$ ) oraz łączną ich sumę ( $P_b(t)/P(t) + U_b(t)/U(t)$ ) (tab. 2).

Dane zawarte w tabeli 2 wskazują, że optymalny wiek rębności przykładowego lasu celowego wynosi 70 lat. W wieku tym bowiem kulminuje zredukowany o  $U(t)$  przyrost przeciętny roczny  $P(t)/t$ , a suma stopy intensywności przyrostu grubizny ( $P_b(t)/P(t)$ ) oraz stopy ujemnego przyrostu przeżywalności ( $U_b(t)/U(t)$ ) jest równa frakcji drzewostanu ( $1/t_u$ ). Potwierdza to również rycina 8, według której suma ilorazów  $P_b(t)/P(t)$  (0,021) oraz  $U_b(t)/U(t)$  (-0,007) zrównuje się z ilorazem  $1/t_u$  (0,014) właściwym dla optymalnego wieku rębności  $t_u$  (70 lat).

Obliczony wiek rębności lasu celowego ( $t_u=70$  lat) jest krótszy od wieku rębności lasu normalnego ( $t_u=100$  lat) o 30 lat (100-70), natomiast przyrost przeciętny roczny jest mniejszy o 2,39 m<sup>3</sup>/ha/rok (10,59-8,20). Obniżenie wskaźnika przeżywalności w lesie celowym do 0,843 w wieku rębności równym 70 lat ( $t_u$ ) spowoduje wzrost powierzchni drzewostanów młodszych klas wieku w porównaniu z lasem normalnym. Tym samym ulegnie pogorszeniu struktura sortymentowa zapasu oraz wzrosną koszty odnowienia i pielęgnacji drzewostanów młodszych klas wieku na skutek wzrostu ich powierzchni. W rezultacie obniży się rentowność produkcji leśnej i wzrośnie znacznie przedsięwzięć ograniczających ryzyko gospodarki leśnej.

## Literatura

- Beinhofer B. 2009. Weitständig erzogene Nadelholzbestände – eine lukrative Alternative? Allg. Forst-Jagdztg, 3/4: 65-75.
- Beinhofer B. 2010. Zur Anwendung der Portfoliotheorie in der Forstwirtschaft – Finanzielle Optimierungsansätze zur Bewertung von Diversifikationseffekten. Forstliche Forschungsberichte, München.
- Beinhofer B., Knoke T. 2007. Umtriebszeit und Risiko der Fichte. AFZ – Der Wald 3: 4.
- Bemmann M. 2013. Das Waldsterben – ein „modernes“ Umweltproblem? W: Das Waldsterben. Rückblick auf einen Ausnahmezustand, München. 16-27.
- Bergh J. 2012. Wpływ zmian klimatu na zagrożenia, strukturę drzewostanów oraz produkcję drewna w lasach Szwecji. W: Przyrodnicze i gospodarcze aspekty produkcji oraz wykorzystania drewna. Zimowa Szkoła Leśna, IBL, Sękocin Stary. 242-248.
- Bruchwald A., Dmyterko E. 2010. Lasy Beskidu Śląskiego i Żywieckiego – zagrożenia, nadzieja. IBL, Sękocin Stary.
- Campbell N. A., Reece J. B. 2012. Biologia. Dom Wydawniczy REBIS Sp. z o.o., Poznań.
- Capra F. 1987. Punkt zwrotny. PIW, Warszawa.
- Deppenheuer O., Möhring B. 2010. Waldeigentum. Dimensionen und Perspektiven. Springer-Verlag, Berlin.
- Detten R. 2013. Das Waldsterben-Rückblick auf einen Ausnahmezustand. Oekom Verlag, München.
- Empacher A., Sep Z. 1970. Mały słownik matematyczny. Wiedza Powszechna, Warszawa.
- Hanewinkel M. 2009. Risikomanagement am Beispiel von Sturmschäden und Arealverschiebungen. W: Wald im Klimawandel – Risiken und Anpassungsstrategien. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 42: 144.

- Höllerl S. 2009. Berücksichtigung finanzieller Aspekte bei waldbaulichen Entscheidungen – eine Fallstudie für reine Fichtenbestände in der Bergmischwaldzone. *Forstarchiv*. 1: 4-14.
- Holthausen N., Hanewinkel M., Holec J. 2004. Risikomanagement in der Forstwirtschaft am Beispiel des Sturmrisikos. *Forstarchiv*. 75: 149-157.
- Jedliński W. 1947. Urządzenie lasu. Część II. Nakładem Spółdzielni „Las” na podstawie wydania z 1922 r., Toruń.
- Klocek A. 1999. Rentowność gospodarstwa leśnego a formy własności leśnej. W: *Publiczne funkcje lasów*. Polskie Towarzystwo Leśne. Warszawa – Gdańsk. Wydawnictwo „Wież Jutra”. 19-33.
- Klocek A. 2000. Modelowanie procesów decyzyjnych w gospodarce leśnej. W: *Stan i perspektywy badań z zakresu zarządzania lasu i ekonomiki leśnictwa*. Materiały IV Konferencji Leśnej. IBL, Warszawa. 285-296.
- Klocek A., Borowski S. 1990. Las celowy – nowa idea w leśnictwie. *Las Polski* 20: 1145-1147.
- Klocek A., Huculak W., Płotkowski L. 1990. Kilka refleksji na temat historii, filozofii nauki, ekonomii i przemysłowych szkód leśnych. *Las Polski* 13: 2, 6-7.
- Klocek A., Młynarski W. 2011. Ryzyko w gospodarstwie leśnym. W: *Strategia rozwoju lasów i leśnictwa w Polsce do 2030 r.* Zimowa Szkoła Leśna, IBL, Sękocin Stary. 217-233.
- Klocek A., Oesten G. 1991. Bestimmung der optimalen Umtriebszeit im Zielwaldmodell. *Allg. Forst-u. J.* 162 (5/6): 92-100.
- Klocek A., Oesten G. 1992. Macierzowe ujęcie rozwoju lasu. *Prace IBL* 738: 30.
- Klocek A., Oesten G. 1993. Optymalizacja wieku rębności w lesie normalnym oraz celowym. *Prace IBL* 747: 27.
- Klocek A., Rutkowski B. 1986. Optymalizacja regulacji użytkowania rębnego drzewostanów. PWRiL, Warszawa.
- Knoke T., Grieß V., Hahn A., Röbiger J. 2012. *Forstbetriebsplanung als Entscheidungshilfe*. Eugen Ulmer KG, Stuttgart.
- Kouba J. 1973. Die Markov'schen Ketten und die Definition des Normalwaldes. *Internationales Forsteinrichtungssymposium, TU Dresden, Vorträge* 2: 381-390.
- Kouba J. 2002. Das Leben und seine Lebensunsicherheit. *Forstw. Cbl.* 121: 211-228.
- Koźniewska I., Włodarczyk M. 1978. *Modele odnowy, niezawodności i masowej obsługi*. PWN, Warszawa.
- Krebs Ch. I. 2011. *Ekologia*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Laer. W., Speidel, G. 1959. *Forsteinrichtung, Leitsätze und Zahlgrundlagen*. W: *Grundlagen der Forstwirtschaft*. M. u. H. Schaper, Hannover.
- Möhring B. 1986. Dynamische Betriebsklassensimulation – Ein Hilfsmittel für die Waldschadensbewertung und Entscheidungsfindung im Forstbetrieb. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben* 20: 268.
- Möhring B., Leeften G., Finckenstein B. 2010a. Die wirtschaftliche Situation der Forstwirtschaft. W: *Waldeigentum, Bibliothek des Eigentums, Band 8*, Springer Verlag. 73-99.
- Möhring B., Staupendahl K., Leeften G. 2010b. Modellierung und Bewertung natürlicher forstlicher Risiken mit Hilfe von Überlebensfunktionen. *Forst und Holz* 65 (4): 26-30.
- Oesten G., Roeder, A. 2002. *Management von Forstbetrieben*. I. Verlag Dr. Kessel. Universität Freiburg.
- Poper K. 1992. *Wiedza naukowa*. PWN, Warszawa.
- Poznański R. 1973. Las jako układ i macierz prawdopodobieństwa przejść. *Sylvan* 117 (5): 29-38.
- Poznański R. 2004. *Nowe metody regulacji w zarządzaniu lasu*. Katedra Urządzania Lasu AR w Krakowie.
- Rutkowski B. 1971. Problem regulacji w gospodarstwie leśnym. *Sylvan* 115 (3): 1-11.
- Sallnäs O. 2013. Przykłady postępowania z ryzykiem w szwedzkim leśnictwie. W: *Planowanie w gospodarstwie leśnym XXI wieku*. IBL, Zimowa Szkoła Leśna, Sękocin Stary. 363-372.
- Schmidt L. 2009. Risikomanagement in der Versicherungsbranche- indwurfversicherungen in Schweden und Vorschläge für einen qualitativen Risikoindex. W: *Wald im Klimawandel- Risiken und Anpassungsstrategien*. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 42: 144.
- Sekot W. 2012. Zielstrukturen und Zielvorräte für die Ertragsregelung. *Forstzeitung* 11: 4-6.
- Speidel G. 1967. *Forstliche Betriebswirtschaftslehre*. Verlag Paul Parey, Hamburg – Berlin.
- Suzuki T. 1983. Gentan-Wahrscheinlichkeit, Vorhersagemodelle für die Entwicklung des Normalwaldes und für die Planung des Holzaufkommens. *Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und Niedersächsischen Forstlichen Versuchsaustalt* 76.
- Szymkiewicz B. 1966. *Tablice zasobności i przyrostu drzewostanów*. PWRiL, Warszawa.
- Wagner R. 2013. Vom Alarm zum etablierten Forschungsobjekt: Waldsterben in den Forstwissenschaften. W: *Das Waldsterben: Rückblick auf einen Ausnahmezustand*. Verlag Oekom, München. 34-47.