DOI:10.11576/biuz-4103

Akumulacja dwutlenku węgla w ekosystemie i zastępowanie paliw kopalnych

Łagodzenie zmian klimatycznych za pomocą drzewostanów

E. D. SCHULZE I J. ROCK I F. KROIHER I V. EGENOLF I N. WELLBROCK I R. IRSLINGER I A. BOLTE I H. SPELLMANN

Ruch "Fridays for future" (Piątki dla przyszłości) w znacznym stopniu pobudził debatę publiczną na temat ochrony klimatu. Nadrzędnym celem skutecznej ochrony klimatu jest zmniejszenie zużycia paliw kopalnych [1]. Wyraźną oznaką tego jest planowane zamknięcie niemieckich kopalń węgla brunatnego. Ponadto formy użytkowania gruntów muszą również wykorzystywać wszystkie potencjały oszczędności, aby osiągnąć te ambitne cele polityczne, podczas gdy całkowite zapotrzebowanie na energię stale rośnie. Korzystanie z lasów jest w tym kontekście kwestią kontrowersyjną, ponieważ zderzają się tu bardzo różne interesy. Chodzi nie tylko o ochronę klimatu, ale także o różnorodność biologiczną, użyteczności publicznej nieruchomości, prawa właścicieli, a także zrównoważony charakter użytkowania. Poniżej przedstawiono różne warianty wkładu lasów w ochronę klimatu.

Droga drewna od lasu przez łańcuch przetwórczy, produkty drzewne do mikrobiologicznego procesu rozkładu lub jego energetycznego wykorzystania prowadzi przez wiele punktów węzłowych (Rysunek 1). Oprócz dostarczania drewna las hodowlany spełnia inne usługi ekosystemowe, w szczególności reguluje cykle materiałowe, dostarcza wody pitnej, miejsce do rekreacji i zapewnia różnorodność biologiczną.

Celem tej pracy jest wyjaśnienie jego funkcji w łagodzeniu zmiany klimatu. Alternatywnie, obszar leśny może być również wykorzystywany do produkcji energii technicznej. Gospodarka leśna zazwyczaj ma na celu realizację różnych potrzeb człowieka na tym samym obszarze. Wymagania te obejmują dostarczanie drewna, dostarczanie czystej wody i wykorzystanie rekreacyjne. Pomimo kompleksowej analizy łagodzenia zmiany klimatu w rolnictwie i leśnictwie [2], społeczeństwo i sektor leśny omawiają obecnie pięć różnych wariantów, w jaki sposób lasy mogą skuteczniej przyczyniać się do ochrony klimatu (wykres 2):

Wariant 1: Drzewostany nie są użytkowane do produkcji drewna, aby umożliwić ich samodzielny rozwój i śmierć. Martwa biomasa rozpada się w lesie i uwalnia uprzednio związany (w procesie fotosyntezy) węgiel poprzez oddychanie mikrobiologiczne.

Wariant 2: Drewno jest pozyskiwane i dostarczane do użytkowników drewna i producentów energii. Dopóki drzewa nie osiągną wieku rębności, duża część przyrostu pozostaje w lesie, nawet gdy drewno jest używane, i prowadzi do gromadzenia się zasobów węgla składowanych w biomasie.

Wariant 3: Pozyskane drewno jest przechowywane w produktach i zastępuje konkurencyjne materiały, które są produkowane z wysokimi wymaganiami energetycznymi (substytucja produktu materialnego).

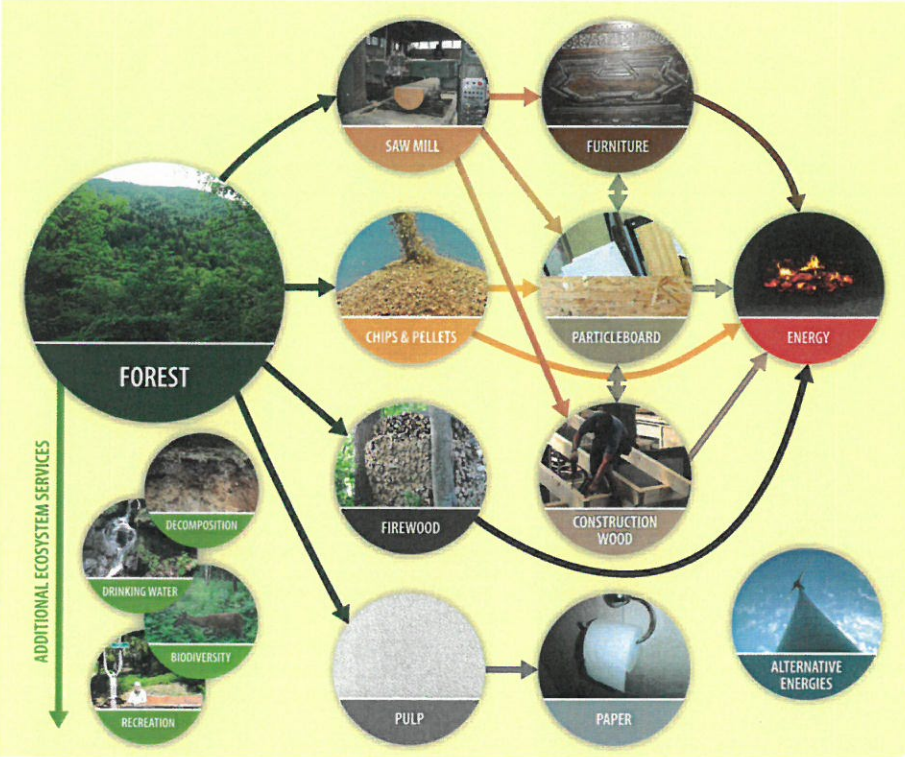
Wariant 4: Drewno jest wykorzystywane do energii bezpośrednio lub po uprzednim użyciu w produktach drzewnych i zastępuje zużycie paliw kopalnych (substytucja energii).

Wariant 5: Obszary leśne są wykorzystywane do produkcji energii np. poprzez zainstalowanie tam turbin wiatrowych lub paneli słonecznych. Byłaby to zmiana wymagająca zmiany użytkowania gruntów i ograniczenia gospodarki leśnej.

Mimo, że ten artykuł dotyczy głównie rozmiaru produkcji biomasy, możliwe wykorzystanie powyższych wariantów zależą od w głównej mierze do różnorodności siedlisk drzewostanowych.

Wykorzystanie różnorodności gatunków drzew podlega jednak istotnym zmianom pod względem ilości i rodzaju. W książce Soravia na temat wykorzystania lasów (1877) [3] opisano 63 gatunki drewna: 52 gatunki były używane w medycynie, 40 gatunków wykorzystano do produkcji przedmiotów, do produkcji farb potrzebne były 32 gatunki, a drewno opałowe pozyskano z 32 lasów. Nieco ponad sto lat później niewiele pozostało z tej różnorodności użytkowania [4]. Pod koniec XX wieku wiele zastosowań zostało zastąpionych przez metal, plastik i produkty chemiczne. Dwadzieścia gatunków drzewiastych stało się roślinami ozdobnymi, a sześć z wcześniej używanych gatunków znajduje się obecnie na "czerwonej liście", ponownie 25 gatunków drzewiastych jest wykorzystywanych tylko do ochrony krajobrazu. Obecnie ponad 70 procent zarządzanego lasu składa się tylko z czterech gatunków drzew (świerk, sosna, buk i dąb). Przykład pokazuje, że w przeszłości las był używany intensywniej i w bardziej zróżnicowany sposób i nie był chroniony. Historyczne formy wykorzystania, takie jak lasy pastwiskowe lub zagajniki o dużej różnorodności gatunków drzew, nie są już praktykowane. Inne rodzaje lasów zostały zdegradowane do użytków ekologicznych. Z jednej strony jest to godne ubolewania; z drugiej strony ta zmiana wykorzystania gatunków drzew nie ma wpływu na skuteczność klimatyczną lasu. Wraz ze zmniejszającą się liczbą używanych gatunków drzew zwiększa się jednak ryzyko szkód związanych z klimatem.

RYS. 1 | ŚCIEŻKI PRZETWÓRSTWA DRZEWNEGO NA POTRZEBY UŻYTKOWE



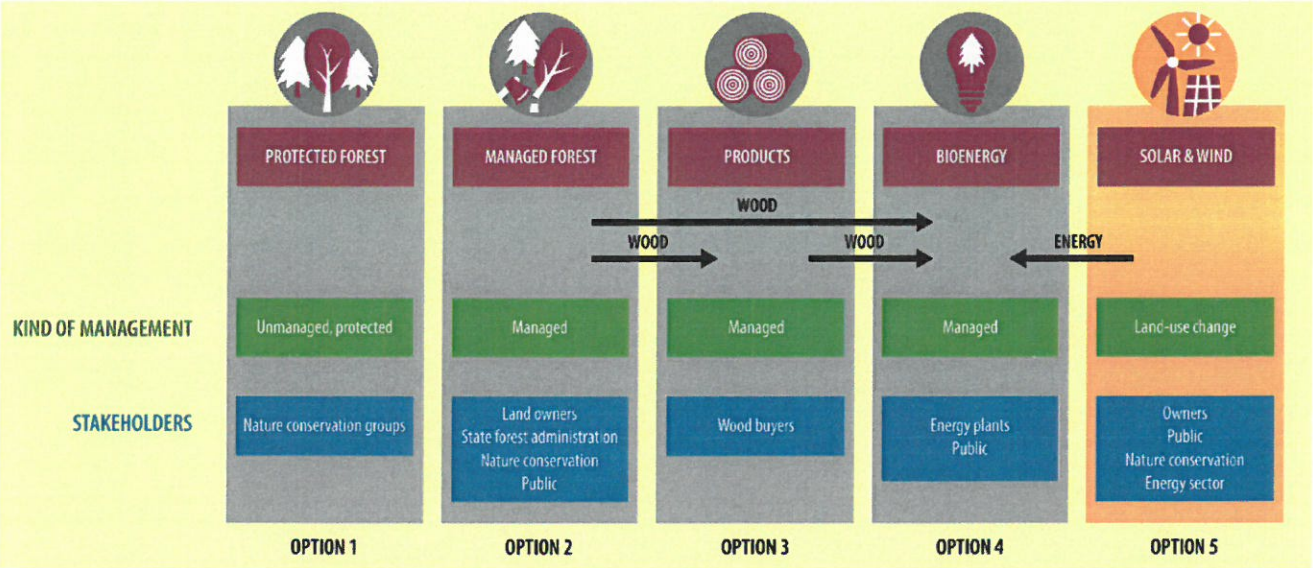
Ścieżka drewna od lasu, poprzez jego przetwarzanie na produkty drzewne aż do jego degradacji mikrobiologicznej lub jego wykorzystania do energii przechodzi przez wiele stacji. Oprócz dostarczania drewna, las gospodarczy spełnia inne usługi ekosystemowe, w szczególności regulację cykli materiałowych, dostarczanie wody pitnej, różnorodność biologiczną i rekreację. Alternatywnie, obszar leśny może być również wykorzystywany do produkcji energii technicznej.

Rejestrowanie usług leśnych w zakresie ochrony klimatu jest zgodne z wytycznymi IPCC [5]. Przepływ węgla z żywej i martwej biomasy z lasu poprzez produkty drzewne i zużycie energii z powrotem do atmosfery można opisać tylko schematycznie (rysunek 3). Niespójności rzeczywistych strumieni węgla i transportu drewna do użytku, a także ich rozliczanie w zakresie ochrony klimatu, stają się jasne. Gospodarka leśna należy tutaj do sektora "LULUCF" (Użytkowanie gruntów, Zmiana użytkowania gruntów i Leśnictwo). W przypadku IPCC węgiel w drewnie, który jest usuwany z lasu, jest uważany za bezpośrednio "emitowany". Aby uniknąć podwójnego liczenia emisji, emisje z drewna nie są opisywane w sektorze "energetycznym", gdy są spalane i nie są przypisywane sektorowi "energii" (zob. ramka 1 "Monitorowanie i księgowanie gazów cieplarnianych").

W SKRÓCIE

- *Lasy zarządzane w sposób zrównoważony w Niemczech zawierają taką samą ilość biomasy drzewnej na hektar powierzchni leśnej, jak lasy niezarządzane w momencie pozyskania.*
- *Zrównoważone zarządzanie opiera się na naturalnym rozwoju lasu. W przypadku produktów z drewna unika się stosowania materiałów budowlanych i innych materiałów o wysokich wymaganiach energetycznych w produkcji („substytucja produktu") i zastępują paliwa kopalne jako źródła energii („substytucja energii").*
- *Atmosfera nie jest dodatkowo obciążona energicznym wykorzystaniem drewna, ponieważ drewno zawiera węgiel niedawno związany w procesie fotosyntezy, który alternatywnie byłby uwalniany w procesach gnilnych.*
- *Gospodarka leśna i wykorzystanie drewna poprawiają obecnie bilans gazów cieplarnianych w Niemczech o około 11% do 14%.*
- *Efektywność użytkowania gruntów na cele energetyczne w lesie może być zwiększona dzięki elektrowniom wiatrowym i słonecznym. Prowadziłoby to jednak do osłabienia innych usług ekosystemów leśnych i dlatego jest kontrowersyjne.*

RYS. 2 | WARIANTY OCHRONY KLIMATU W LASACH I GRUPACH INTERESÓW, KTÓRE NALEŻY ROZWAŻYĆ



Rozliczanie wszystkich emisji z pozyskanego drewna w sektorze leśnym jest głównym punktem krytyki poprzednich zasad rachunkowości, ponieważ emisje są przypisywane lasowi, a zmniejszenie zużycia paliw kopalnych jest rozliczane w innych sektorach gospodarki. Ponadto różne grupy interesów chciałyby, aby ich własne priorytety były realizowane w dziedzinie gospodarki leśnej, często bez prawa do zbycia swoich aktywów. Rozdrobnienie odpowiedzialności i wysiłki różnych sektorów w celu rozszerzenia ich wpływu w celu maksymalizacji rozliczania "ich" wkładu w ochronę klimatu sprawiają, że ogólna ocena wyników w dziedzinie leśnictwa i sektora drzewnego jest trudna.

MONITOROWANIE I ROZLICZANIE GAZÓW CIEPLARNIANYCH

Ramowa konwencja w sprawie zmian klimatu (FCCC) wymaga, aby monitorowanie emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych (GHG) odbywało się niezależnie od tego, kto jest odpowiedzialny za zmiany w bilansie GHG. Protokół z Kioto (KP) [20, 21] wprowadził prawnie wiążące cele redukcji emisji dla krajów sygnatariuszy. Jednak przejęcie odpowiedzialności za antropogeniczną część obiegu węgla podlega częściowo innym zasadom niż sprawozdawczość w ramach FCCC, dlatego nie można porównywać wartości z obu systemów. Na przykład sprawozdawczość zróżnicowana według siedmiu sektorów

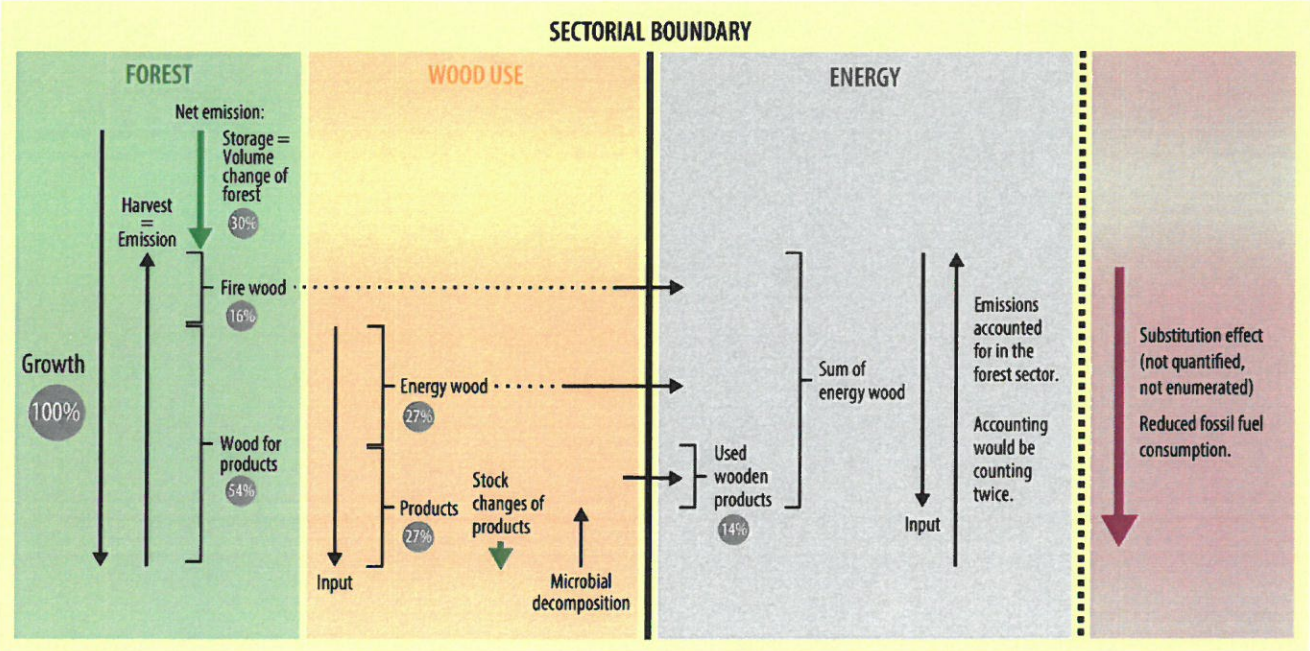
oznacza, że węgiel w drewnie opuszczający las jest uważany za wyemitowany, a zatem nie jest uwzględniany jako „wkład" w produkcję energii. To uproszczenie nie ma znaczenia dla sprawozdawczości [5, 6] według narodów. Jednak w przypadku oceny środków międzysektorowych (takich jak gospodarka leśna z wykorzystaniem drewna do produkcji energii) podejście sektorowe jest niewłaściwe, ponieważ optymalizacja emisji w jednym sektorze może prowadzić do dodatkowych emisji w innych sektorach.

Ważne są dwa aspekty:

KP wygasł z końcem 2020 r. i został de facto zastąpiony Konwencją Paryską (CoP) oraz rozporządzeniem UE (Rozporządzenie LULUCF). Dokładne zasady rozliczania zmian zapasów gazów cieplarnianych nie zostały jeszcze zdefiniowane, ale będą oparte na metodologii wytycznych IPCC-2006 [5]. W przyszłości dane dotyczące kompleksów leśnych będą dostępne dla Niemiec z czterech różnych systemów (FCCC, KP, CoP i regulacji LULUCF), które nie są bezpośrednio porównywalne ze względu na różnice systemowe.

Istnieje obowiązek ciągłego doskonalenia inwentaryzacji, tj. za pomocą lepszych metod lub nowych źródeł danych. Należy również przeliczyć również wartości z lat ubiegłych. Dlatego tylko najnowsze raporty są miarodajne [6].

RYS. 3 | TRANSPORT WĘGLA Z DRZEWOSTANÓW, POPRZEZ PRODUKTY DRZEWNE I UŻYTKOWANIE NA POTRZEBY ENERGETYCZNE, DO ATMOSFERY



Ponieważ nie zgłoszono wiązania fotosyntetycznego jako funkcji zarządzania, emisje respiracyjne również nie są zgłaszane. Poziome strzałki pokazują transport drewna z gospodarki leśnej i drewna do produkcji energii. Pionowe czarne strzałki pokazują "wejścia" i rzeczywiste emisje, których wagi wytwarzają grube zielone strzałki (dane zaadaptowane z [5]). Stanowią one obecnie zgłoszone zmiany w przechowywaniu pokrywy drzew leśnych i produktów drzewnych. Długość zielonej strzałki w magazynie produktów jest przeskalowana. Średnia zawartość węgla wynosi około 25 procent objętości świeżego drewna. Niebieskie strzałki reprezentują obliczone emisje z pozyskiwania drewna (wykorzystanie) i degradacji mikrobiologicznej produktów drzewnych, odpowiednio. Emisje z dostarczania i przetwarzania drewna nie są tutaj uwzględnione.

SKŁADOWANIE WĘGLA W ŻYWEJ I MARTWEJ BIOMASIE W LESIE (WARIANT 1 I 2)

W raportowaniu gazów cieplarnianych (GHG) bierze się pod uwagę dodawanie lub usuwanie do różnych grup akumulujących (w lesie: biomasa żywych i martwych roślin, gleby, produkty drzewne) lub zmianę wielkości tych grup w czasie [6] . Biomasa drzewiasta drzewostanów w Niemczech została ostatnio oceniona na podstawie Federalnej Inwentaryzacji Lasów (BWI) z 2012 r. Oraz na podstawie Inwentaryzacji Węgla z 2017 r. W podsieci BWI 2012 [7]. Obie pokazują zasoby i zmiany zasobów w drzewostanach oraz

odpowiadające im ilości węgla. Zgodnie z wynikami drugiej i trzeciej krajowej inwentaryzacji lasów (odpowiednio 2002 i 2012 r.) w Niemczech przyrost drewna wyniósł 1252 mln m³, a ubytek (utylizacja + śmiertelność) do 1091 mln m³, dzięki czemu zasób drewna wzrósł z 3436 mln m³ do 3,663 mln m³. W latach 2012–2017 ten zasób drewna ponownie wzrósł o 205 mln m³ i osiągnął rekordowy poziom 3868 mln m³ w 2017 r. W ten sposób w 2017 r. W żywej biomasie pochłonięto 1230 mln ton węgla. Roczna stopa składowania żywej biomasy wynosiła 1,1 tony C ha^{-1} rok^{-1} w latach 2012-2017 (zob. Ramka 2 „Wzrost lasu"). Ponieważ udział powierzchni klas wieku o wysokim wzroście od 21 do 60 lat zmniejszył się o 7 proc., Wzrost w okresie 2012-2017 zmniejszył się z 11,3 do 10,7 m3 ha^{-1} rok^{-1} w porównaniu z okresem 2002-2012. biomasa i posusz, jednak w lesie nadal gromadziło się dodatkowe 13,2 mln ton węgla netto rocznie [8]. „Zrównoważony rozwój" to „magiczne słowo" ukute przez H.C. von Carlowitza w 1732 roku w jego „Anweisung zur wilden Baumzucht": *„Stanie się to głównym celem nauki i dążenia i przedsiębiorczości lokalnej społeczności, jaka powinna być ochrona i właściwa gospodarka drewnem, aby istniało* ***ciągłe i zrównoważone użytkowanie****, co jest niezbędnym wymogiem, bez którego kraj może nie pozostać w jego istocie.".* Celem Carlowitza było zabezpieczenie wydobycia tzw. Drewna kopalnianego, które było niezbędne w szybach kopalnianych Księcia Saskiego. Carlowitz nie mówił nic o zasobach, które mają być pozyskiwane. Sprecyzowano jedynie, że utylizacja nie powinna przekraczać przyrostu na poziomie przedsiębiorstwa lub krajobrazu. W ten sposób zasoby drewna na poziomie krajobrazu są utrzymywane na stałym poziomie. Pojęcie to nie dotyczy życia pojedynczego drzewa, ale drzewostanów na poziomie krajobrazu. Oczekiwany poziom zasobów jest określany przez produkty, które mogą być pozyskiwane na poziomie krajobrazu.

ROZWÓJ LASU

Rozwój lasu zależy od gatunku drzew, budowy i wieku drzewostanów oraz warunków siedliskowych [22]. Drzewo tworzy co roku nowy słój wzrostu, który rozszerza żywą część drewna przewodzącą wodę i składniki odżywcze (biel). Jednocześnie biel wewnątrz pnia obumiera i tworzy dodatkową twardziel [23]. Jednak ilość węgla usuwanego z atmosfery nie odpowiada przyrostowi pojedynczego drzewa, ale przyrostowi wszystkich drzew na obszarze złożonym z dominujących, współdominujących i tłumionych osobników. Ten sam obszar może być kolonizowany przez wiele małych drzew lub kilka dużych drzew. W przypadku buka w odnowieniu naturalnym występuje ponad 300 000 sadzonek / ha, które w wieku 120 lat zmniejszają się do około 300 drzew / ha. Pomimo wszystkich połączeń między drzewami poprzez korzenie lub grzyby mykoryzowe, drzewa słabsze giną w sposób ciągły (proces ten nazywa się samooczyszczeniem). Przetrwają tylko najwyższe i najważniejsze drzewa. W procesie tym żywa część drewna w korzeniach i bieli rośnie proporcjonalnie do masy liści [22]. W buku biomasa żywa w drewnie (sapwood biomass - biomasa z drewna bielowego) wzrasta z około 40 t $C_{sapwood}$ ha-1 w wieku 30 lat do około 140 t $C_{sapwood}$ ha-1 w wieku 120 lat, a jednocześnie zmniejsza się masa liści z około 2 t C ha-1 w drzewostanie 30-letnim do około 1 t C ha-1 w drzewostanie 140-letnim [23]. Zatem stosunek tkanek oddychających do tkanek fotosyntetyzujących stale rośnie, podczas gdy przyrost maleje. Zmiany podaży drewna odpowiadają przyrostowi pomniejszonemu o wszystkie straty spowodowane zamieraniem lub utylizacją.

Przyczyny zaobserwowanych wzrostów i spadków zasobów drzew w lesie są różnorodne. Przede wszystkim, struktura wieku i skład gatunków drzew mają wpływ. Ponadto warunki terenowe i środowiskowe, katastrofy oraz wysokie lub niskie ceny rynkowe wpływają na poziom przed i końcowego wykorzystania, a tym samym na zapasy na stoisku. Ogólnie rzecz biorąc, starsze i wyższe drzewostany z wysokimi zapasami drewna są bardziej narażone na ryzyko biotyczne i abiotyczne (grzyby zgnilizny drewna, korniki, wiatr). W tym kontekście właściciele lasów podejmują decyzje, zaczynając od planu zarządzania, który jest ekspertyzą dla nieruchomości o powierzchni mniejszej niż 50 ha, oraz właściwych planów urządzania lasu dla nieruchomości większych niż 100. Te plany zarządzania regulują

produkcję i wykorzystanie przez okres 10 lat, a plany te podlegają kontroli państwowej. W ten sposób zapobiega się nadmiernej eksploatacji. Nie ma przymusu do zbiorów. Co do zasady cele działań leśnych nie pokrywają się z celami wariantu 1, jakim jest samo zwiększenie zasobów. Celem przytłaczającej większości właścicieli jest raczej generowanie dochodów w wyniku zrównoważonego zarządzania.

ZAPASY WĘGLA W GLEBIE W ZARZĄDZANYCH I CHRONIONYCH LASACH NIEZARZĄDZANYCH.

Porównanie maksymalnych i średnich zasobów drewna w niemieckich lasach na obszarach zarządzanych i chronionych (tabela 1) dostarcza informacji na temat rzeczywistego potencjału obu form wykorzystania. Lasy iglaste mają wyższe średnie zasoby użytkowe niż lasy liściaste. W drzewostanach świerkowych nie ma statystycznych różnic w średnich i maksymalnych zasobach zarządzanych i chronionych drzewostanach. W lasach liściastych średnie zasoby są niższe, gdy są zarządzane, ale maksymalne zasoby w czasie zbiorów nie różnią się między drzewostanami zarządzanymi i niezarządzanymi.

TAB. 1 | ŚREDNIE I MAKSYMALNE WIELKOŚCI DRZEWOSTANÓW, ŚREDNI WIEK DRZEWOSTANÓW WAŻONY OBSZAREM ORAZ WZROST ZARZĄDZANYCH I CHRONIONYCH LASÓW LIŚCIASTYCH I IGLASTYCH [7]

	las liściasty (buk)			las iglasty (świerk)		
	chronione	zarządzane	ważność	chronione	zarządzane	ważność
Średnie zapasy (ilości drewna) (m^3 ha-1 żywego i martwego)	435 + 34, n = 332	366 + 6, n = 9104	***	421 + 37, n = 308	425 + 6, n = 15073	n. s.
Maksymalny zapas drzewostanów (m^3 ha^{-1} żywego i martwego), w tym 95,percentyl	981 + 148, n = 46 od 732	919 + 195, n = 776 od 15519	n. s.	1118+202, n = 43 od 859	1098+201, n = 1456 od 29113	n. s.
Wiek ważony obszarem	115	101		94	69	
Przyrost drewna (m^3 ha^{-1} rok^{-1})	8,99 + 0,9, n = 327	10,28+0,16, n = 8746	***	9,01 + 1,04, n = 271	13,95 + 0,16, n = 14219	***

TAB. 2 | ZAPASY WĘGLA W GLEBIE NA GŁĘBOKOŚCI DO 1 M W NIEZRZĄDZONYCH I PRZYLEGŁYCH - ZARZĄDZANYCH DZIAŁKACH STARYCH OBSZARÓW CHRONIONYCH EUROPY

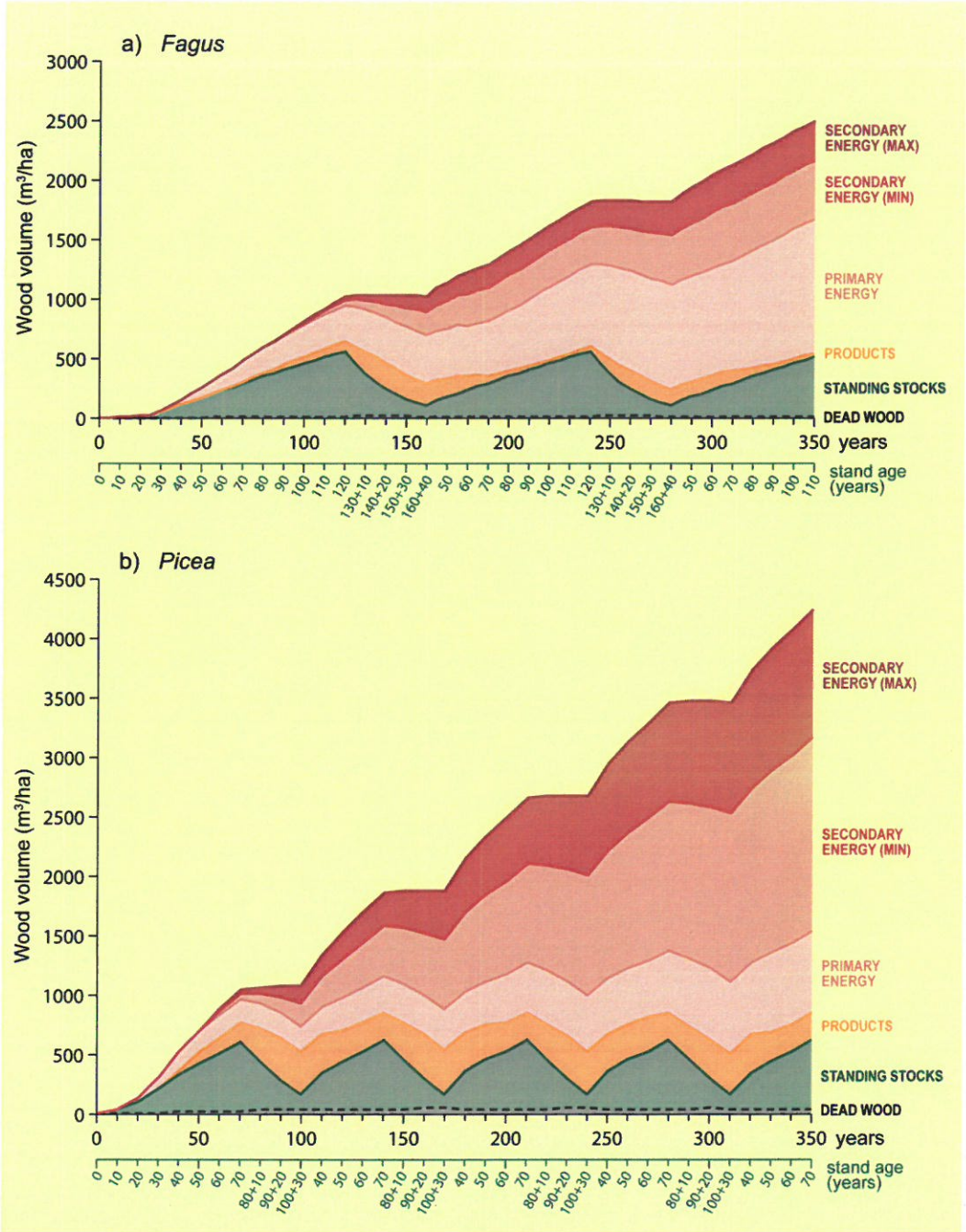
warstwa gleby	lokalizacja	liczba stanowisk	niezarządzane	zarządzane	ważność
C org. - obieg (t C/ha)	Fontainbleau	20	11,3 + 7,3	7,0 + 4,4	n. s.
	Białowieża	20	6,2 + 4,1	20,3 + 11,4	n. s.
	Hainich	465	7,2 + 4,5	5,3 + 3,5	n. s.
	Badanie stanu gleby	41 chronione 156 zarządzane	15,8 + 19,7	13,5 + 25,1	n. s.
gleba mineralna (t C/ha)	Fontainbleau	20	35,5 + 6,1	32,0 + 5,9	n. s.
	Białowieża	20	59,5 + 18,2	66,9 + 8,9	n. s.
	Hainich	465	102,9 + 20,8	98,5 + 27,3	n. s.
	Badanie stanu gleby	41 chronione /156 zarz.	80,3 + 41,0	81,1 + 40,1	n. s.

Źródło: Różne badania MPI-Biogeochemii w lasach liściastych i Instytucie Thünen w drzewostanach bukowych i według wyników BZE II w Niemczech.

Istnieje znacząca różnica między lasami zarządzanymi i chronionymi w przyrostach. Zarządzane lasy mają wyższe przyrosty, co sprowadza się do wyższego wkładu w ograniczanie zmian klimatycznych (jeśli jest stosowany). Ograniczenie wykorzystania prowadzi do procesów przemieszczeń ekonomicznych, w których popyt na drewno jest zaspokajany przez przywóz z innych regionów świata, których normy zrównoważonego rozwoju są często niższe, lub drewno jest zastępowane innymi materiałami, które są bardziej emisyjne w ich produkcji. Węgiel jest przechowywany nie tylko w drewnie, ale także w glebie mineralnej i w pokładach próchnicy, przy czym większa proporcja jest przechowywana w glebie mineralnej. Nie ma znaczących różnic między drzewostanami zarządzanymi i chronionymi, ani w warstwie organicznej, ani w glebie mineralnej (tabela 2). Jest to sprzeczne z badaniami, które zostały przeprowadzone na poszczególnych powierzchniach doświadczalnych [9], ale nie reprezentują warunków na poziomie krajobrazu. Drugie badanie

gleby leśnej (BZE-II) w Niemczech pokazuje, że węgiel w glebie w lasach rośnie pod obecnym zarządzaniem (około 0,41 t C ha-1 rok-1)[10].

RYS. 4 | CYKL ŻYCIA BUKA I ŚWIERKA



Pokazane są zmiany w biomasie drzewostanów, produktów i drewna energetycznego w cyklu życia dwóch gatunków drzew. Wszystkie parametry (w tym energia) są przekształcane na ilości drewna, aby były porównywalne z zasobami leśnymi i przyrostami. Buk ma większą wagę na objętość niż świerk i dlatego jest niedoceniany. Substytucja produktu nie jest pokazana z powodu niepewności w zakresie pokrycia. W przypadku zużycia energii rozróżnia się energię pierwotną (drewno opałowe) od energii wtórnej (odpady i przedmioty po ich użyciu). Ponieważ substytucji energetycznej nie można odwrócić, skutki sumują się w oszczędności kopalnych źródeł energii. W dłuższej perspektywie substytucja energii przyczynia się znacznie w większym stopniu do ochrony klimatu niż las. Fig. zgodnie z [19].

SKŁADOWANIE WĘGLA W PRODUKTACH DRZEWNYCH I SUBSTYTUCJA PRODUKTÓW (OPCJA 3)

Przetwarzanie drewna ma dwa skutki dla łagodzenia zmiany klimatu: (1) wpływa na ilość węgla ustalonego w produktach drzewnych (składowanie produktów) oraz (2) zastępuje materiały, które wymagają większej ilości energii kopalnej w ich produkcji niż produkty drzewne (substytucja produktu, substytucja materiałów). Zgodnie z obecnymi umowami

międzynarodowymi tylko pula produktów jest obecnie zaliczona do wkładu sektora leśnego i drzewnego w ochronę klimatu. Substytucja produktów jest określana ilościowo jako spadek zużycia paliw kopalnych, ale nie jest zgłaszana jako taka, a nawet uznawana na korzyść sektora leśnego i drzewnego. Produkty z drewna obejmują szerokie spektrum zastosowań, od drewna budowlanego, przez drewno meblowe, po papier toaletowy (rysunek 1). Oprócz wykorzystania jako kłody tartaczne, niższej jakości drewno i odpady drzewne z przetwarzania (np. trociny) są przekształcane w płyty wiórowe lub wykorzystywane do celów energetycznych. Z drewna iglastego, 84 procent jest obecnie używany jako materiał w pierwszym etapie przetwarzania, podczas gdy większość (70 procent) drewna liściastego jest używany bezpośrednio do energii [11-13]. Celem jest osiągnięcie kaskadowego wykorzystania, w którym drewno jest ponownie wykorzystywane do różnych produktów w kilku etapach i jest wykorzystywane w celach energetycznych tylko na końcu tego łańcucha wykorzystania. Celem jest zwiększenie składowania produktów w przyszłości w celu związania węgla w nim składowanego, który został usunięty z atmosfery za pomocą fotosyntezy, w dłuższej perspektywie i w większych ilościach.

Ważnym parametrem oceny skuteczności przechowywania produktu jest średni czas użytkowania. W przypadku produktów wytwarzanych z drewna bukowego, ze względu na obecnie wysoki odsetek drewna opałowego, średnia żywotność wynosząca trzy lata jest niższa niż średni czas próchniejącego w lesie drewna bukowego (11 lat). W przypadku świerku wskaźniki rozpadu produktów i rozkładające się kłody są takie same (22 lata). Drewno iglaste rozpada się wolniej i jest przechowywane w używanej formie dłużej niż drewno liściaste [11]. Badanie cyklu życia drewna (rys. 4) pokazuje, że składowanie produktu (ilość drewna w postaci produktu) pozostaje prawie stałe przez dłuższy czas przy obecnym użytkowaniu. Zmagazynowanie w postaci produktu jest magazynowaniem pośrednim przed ostatecznym odzyskiem energii.

Zwiększenie puli produktów równoważy emisję gazów cieplarnianych w atmosferze bez bezpośredniego zmniejszenia zużycia paliw kopalnych.

Zasadniczo wszystkie produkty drzewne mogą być również wytwarzane z innych materiałów. Kupujący decyduje, czy drewno lub inny materiał jest używany. Jednakże stosowanie produktów drzewnych pozwala uniknąć użycia materiałów, które wymagają więcej energii do produkcji (substytucja produktu). Na przykład, produkcja drewnianego domu wymaga 35 do 50 procent mniej energii niż funkcjonalnie równoważne solidnej konstrukcji [2]. Substytucję produktu szacuje się na podstawie czynnika opisującego oszczędności emisji dwutlenku węgla (w tonach węgla) na tonę węgla w produkcie drzewnym. Średnie czynniki substytucyjne określone do tej pory [14-16] wynosi od 1,2 do 2,1 t C/t C i mają wysoki stopień niepewności. Na podstawie tych czynników w Niemczech unika się rocznie od 28 do 53 milionów ton $CO_{2\text{-equiv}}$ ze źródeł kopalnych. Jest to 2,8 do 4,9 $CO_{2\text{-equiv}}$ ha^{-1} rok^{-1}, nawet biorąc pod uwagę zużycie paliw kopalnych podczas przetwarzania. Substytucja produktów nie jest zgłaszana w bilansie gazów cieplarnianych zgodnie z wytycznymi IPCC [5]. Zastąpienie produktu zmniejsza zużycie paliw kopalnych, a tym samym ma inną jakość niż magazynowanie. Produkcja nowych materiałów z drewna na bazie gazyfikacji biomasy lub restrukturyzacji celulozy nie była tutaj brana pod uwagę.

ENERGETYCZNE WYKORZYSTANIE BIOMASY (WARIANT 4)

Wykorzystanie drewna jako paliwa jest jednym z najstarszych zastosowań przez ludzi. Nawet dzisiaj stosunkowo duża ilość drewna jest wykorzystywana bezpośrednio do energii (drewno opałowe, zrębki drzewne, pelet). Resztki i odpady z przetwórstwa drewna są również wykorzystywane do celów energetycznych (np. w zakładach suszenia), podobnie jak produkty drzewne po użyciu.

TAB. 3 | BILANS DRZEWNY NIEMIEC

	(mln m^3/rok)	%
Przyrost drzewostanów w Niemczech	121.6	100
Zmiana stanu zapasów	15.3	13
Martwe drewno w lesie	10.4	9
Pozostałości po ścince	10.1	8
Drewno wielkowymiarowe w korze (na rynku)	10.1	8
Drewno opałowe	19.7	16
Drewno przemysłowe	56.0	46
	(m^3_{diesel} ha^{-1} $year^{-1}$)	(t CO_2 ha^{-1} $year^{-1}$)
Zastępowanie produktów bogatych w energię	1.1 to 1.9	2.8 to 4.9
Zastępowanie oleju opałowego spalanym drewnem	1.1 to 1.2	2.9 to 3.2

Kolory - zielony: ilość drewna uprawianego w lesie, Czerwony: wykorzystanie drewna, Żółty: skutki klimatyczne uwzględniające zużycie paliw kopalnych w pozyskiwaniu drewna i przetwórstwie drewna [12].

Odzysk energii z produktów po użyciu jest tylko częściowo udany, na przykład poprzez odpady wielkogabarytowe lub odpady drewna z renowacji budynków. Inne produkty drzewne rozkładają się na miejscu, takie jak słupy ogrodzeniowe na łące. Obecnie tylko około 54 procent produktów drzewnych jest wykorzystywanych do celów energetycznych [11]. Kwantyfikacja objętości drewna energetycznego jest problematyczna, ponieważ część pozyskanego drewna nie jest rejestrowana i jest transportowana z lasu z drewnem jako "dodatek" podczas sprzedaży drewna (np. wielkowymiarowego w korze). Kolejna część jest zbierana do użytku prywatnego i nie jest statystycznie brana pod uwagę [11]. Oficjalne "statystyki rejestrowania" są zatem niekompletne. Z całkowitego rocznego przyrostu, ponad 70 procent jest używany w niemieckim lesie. Udział przemysłu w całkowitym rocznym przyroście wynosi około 46 procent.

W dyskusji na temat wykorzystania drewna jako źródła energii często twierdzi się [17, 18], że drewno ma niższą gęstość energii niż paliwa kopalne i w związku z tym zanieczyszcza atmosferę bardziej niż wykorzystanie paliw kopalnych. Zaniedbuje to fakt, że w lasów zarządzanych w sposób zrównoważony emisja CO_2 jest odzyskiwana w dającej się przewidzieć przyszłości, podczas gdy formacja nowych paliw kopalnych trwa miliony lat. Ze względu na oddychanie ekosystemu, około 74 do 94 procent fotosyntetycznie związanego węgla jest degradowane przez drobnoustroje w chronionym lesie w porównaniu do 75 do 81 procent w zarządzanym lesie w stosunkowo krótkim czasie. Rozkład martwego drewna i rozkład pozostałości wyrównawczych (gałązek i gałęzi) podczas zarządzania zasilają ekosystem. Dzięki wykorzystaniu energetycznego drewna, chemicznie związana energia w drewnie nie jest wykorzystywana przez mikroorganizmy, ale przez ludzi. Jest to jedyny sposób na zastąpienie bogatych w energię paliw kopalnych. Stanowi to prawie 10 procent całkowitego cyklu CO_2. Emisje ze spalania biomasy są równoważone niższym oddychaniem ekosystemu. **Gospodarka leśna i wykorzystanie drewna poprawiają obecnie roczny bilans gazów cieplarnianych w Niemczech o około 11–14 procent**, który jest podzielony w przybliżeniu na składowanie lasów (żywa i martwa biomasa i gleba leśna) i wykorzystanie drewna (składowanie produktów, wymiana materiałów i energii).

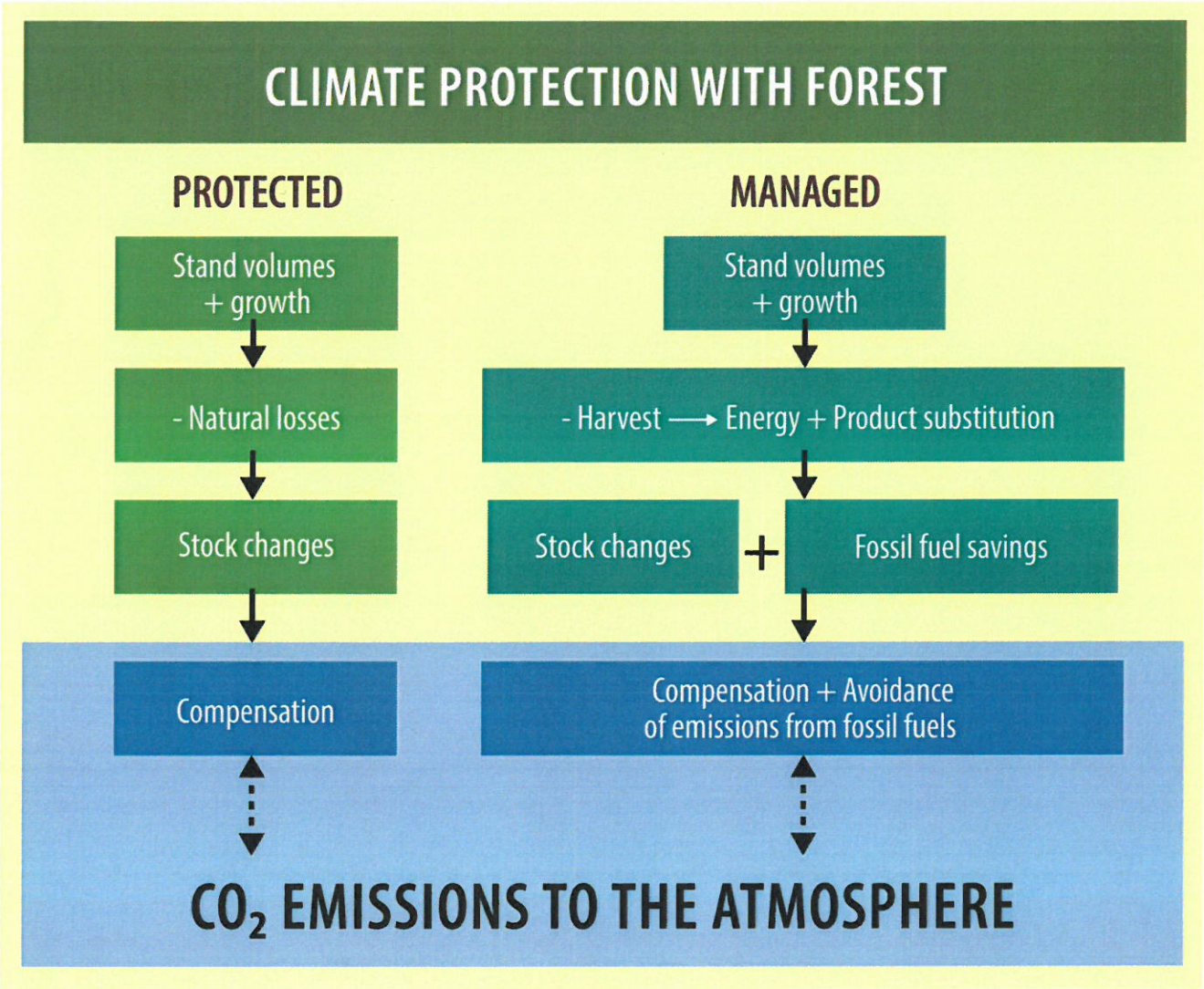
WYKORZYSTANIE GRUNTÓW LEŚNYCH DO INSTALACJI WIATROWYCH I SŁONECZNYCH (WARIANT 5)

Fotosynteza wykorzystuje około jednego procenta energii słonecznej incydentu. Jest to około 4 procent energii, która może być wytwarzana na tym samym obszarze przez turbiny wiatrowe i 0,1 procent energii, która może być wytwarzana przez elektrownie słoneczne [11]. W warunkach laboratoryjnych ogniwa słoneczne są w stanie zużytkować do 34 procent energii słonecznej. W celu osiągnięcia ambitnych celów ochrony klimatu w Niemczech powstaje zatem pytanie, czy obszary leśne nie powinny być w tym celu przekształcane pod

budowę elektrowni wiatrowych i słonecznych (wariant 5).

Ekspansja turbin wiatrowych w lasach wpływa przede wszystkim na dziką przyrodę (zwłaszcza owady, nietoperze i ptaki) oraz na krajobraz. Zajęcie gruntów jest stosunkowo niskie, ale nie należy go lekceważyć [11]. Instalacje solarne miałyby technicznie większy sens, ale wymagałyby usunięcia istniejącego lasu co wiązałoby się utratą siedlisk dla roślin i zwierząt. W związku z tym są one postrzegane raczej krytycznie. Z ekonomicznego punktu widzenia te alternatywne formy użytkowania gruntów pozostaną interesujące dla właściciela, dopóki nie zostaną odpowiednio wynagradzane za świadczenie usług ekosystemowych wykraczających poza wykorzystanie drewna. W związku z tym dyskusja nie została jeszcze zakończona.

RYS. 5 | MOŻLIWOŚCI LASÓW W ZAKRESIE ŁAGODZENIA ZMIANY KLIMATU



WNIOSKI

Definitywne rozliczenie ochrony klimatu dla lasów jest niekompletne. Nie uwzględniono znaczenia gospodarki leśnej i wykorzystania drewna dla łagodzenia zmiany klimatu (rysunek 5). Rezygnacja z użytkowania drewna („odłogowanie lasów") w celu dalszej rozbudowy zasobów węgla w lesie wiąże się z wysokim ryzykiem i nie jest zrównoważona. Istnieją dodatkowe efekty wypierania wynikające z użytkowania lasów w lasach poza granicami Niemiec, aby zaspokoić zapotrzebowanie na drewno. Dostarczanie drewna dla przemysłu drzewnego i przetwórczego umożliwia wykorzystanie produktów drzewnych jako substytutu w budownictwie i innych zastosowaniach, których produkcja jest bardziej energochłonna i powoduje wyższe emisje (substytucja materiału). Energetyczne wykorzystanie drewna zastępuje paliwa kopalne (substytucja energetyczna), a w przypadku

zrównoważonej gospodarki leśnej nie obciąża dodatkowo atmosfery, ponieważ węgiel związany w drewnie jest na przemian uwalniany w wyniku rozkładu. Do tej pory substytucja materiałowa i energetyczna nie była uznawana za usługę gospodarki leśnej. Żądanie uznania tych usług pojawiło się już w 1999 roku [17, 18]. Gdyby na przykład lasy zostały przekształcone w elektrownie słoneczne, wydajność produkcji energii na hektar ziemi znacznie by wzrosła, ale wiele usług ekosystemowych lasu zostałoby drastycznie upośledzonych. Pod warunkiem, że nie zmieni się użytkowanie gruntów leśnych, zrównoważona gospodarka oraz wykorzystanie materiałowe i energetyczne drewna pozyskanego w tych procesach w dłuższej perspektywie w większym stopniu przyczyni się do ochrony klimatu niż naturalny rozwój lasów bez wykorzystania drewna.

PODSUMOWANIE

Przedstawione warianty wkładu lasu w ochronę klimatu podążają ścieżką drewna od lasu do odzyskiwania energii. Lasy zarządzane w sposób zrównoważony mogą uniknąć 6 do 8 ton emisji CO_2 ha^{-1} rok^{-1} poprzez dostarczanie drewna, podczas gdy niezarządzane lasy równoważą emisje z paliw kopalnych poprzez magazynowanie dwutlenku węgla w ekosystemie, ale nie oszczędzają paliw kopalnych.

PODSUMOWANIE

Łagodzenie zmiany klimatu przez lasy

Jest to przegląd możliwości, dzięki którym gospodarka leśna przyczynia się do łagodzenia skutków zmiany klimatu. Śledzimy drewno od zbiorów do jego ostatecznego zużycia energii. Poprzez dostawy drewna, gospodarka leśna może zastąpić od 6 do 8 ton CO_2 $ha^{-1}rok^{-1}$ emisji paliw kopalnych, podczas gdy w warunkach niezarządzania składowania dwutlenku węgla kompensuje emisje paliw kopalnych bez zmniejszenia zużycia paliw kopalnych.

SŁOWA KLUCZOWE:

Substytucja produktów, substytucja energii, sekwestracja dwutlenku węgla, rozliczanie emisji, wpływ na klimat.

PODZIĘKOWANIA:

Dziękujemy pani Annett Börner (www.dn.com.au/annett-boerner.html) za zaprojektowanie ilustracji.

LITERATURA:

[1] EU, 2020, https://ec.europa.eu/clima/policies/stragegies/2030de [2] Advisory Council for Agricultural Policy, Nutrition and Consumer Health Protection and Scientific Advisory Council for Forest Policy at the BMEL. Climate protection in agriculture and forestry and the downstream sectors of food and wood use. Expert opinion, Berlin, 2016, 409 pp.

[3] Soravia P, 1877, Technologie botanico della Provincia di Belluno, Belluno Reprint 1987.

[4] WBGU, World in Transition, Conservation and Sustainable Use of the Biosphere. Annual Report 1999, Springer, 482.

[5] IPCC Guidelines, 2006, https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/ public/2006gl/vol4.html.

[6] NIR, 2020, https://unfccc.int/sites/default/files/resource/deu-2020- nir-15apr2020.zip

[7] BWI (Federal Forest Inventory). https://www.bundeswaldinventur.de/,

Results at https://bwi.info

[8] Henning et al, Forest productivity. AFZ-TheForest, 2019, 14, 28- 31

[9] M. Mayer et al., Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. Forest Ecology and Management, 2020, 466, 118127.

[10] N. Wellbrock, A. Bolte, Status and dynamics of forests in Germany. Ecol. Studies Vol 237, Springer Verlag, Heidelberg, 2019, 384.

[11] E. D. Schulze et al., The climate mitigation effect of bioenergy from sustainably managed forests in Central Europe. GCB Bioenergy, 2020, 12, 186-197.

[12] D. Jochem et al., Estimation of wood removals and fellings in Germany: a calculation approach based on the amount of used roundwood. Eur. J. Forest Res., 2015, 134, 869-888.

[13] M. Bösch et al., Physical input-output accounting of the wood and paper flow in Germany. Resources Conserv. Recycl., 2015, 94, 99-109.

[14] E. Heuer et al, What do forests and wood contribute to climate protection in Germany? AFZ-DerWald, 2016, 15, pp. 22-23.

[15] P. Leskinen et.al., Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation. From Science to Policy 7. European Forest Institute, 2018, 27.

[16] Wissenschaftlicher Beirat Waldpolitik beim BMEL (ed.), Eck punkte der Waldstrategie 2050. Stellungnahme. Berlin, 2020, 71.

[17] ESAC, Multifunctionality and sustainability in the European Union's forests. European Academies, 2017. ISBN:978-3-8047-3728-0, 41.

[18] Forest Wood Manifesto of 1999, Yearbook of Ecology, Beck, Munich, 281-285.

[19] E. D. Schulze et al., The climate mitigation potential of managed versus unmanaged spruce and beech forest in Central Europe. In: JCM Pires and AL da Cunia Concalves (eds) Bioenergy with carbon capture and storage, Elsevier, The Hague, 2019, 131- 149.

[20] UNFCCC-COP3 (1997), https://unfccc.int/process-and-meetings/ conferences/past-conferences/kyoto-climate-change-conference december-1997/cop-3,

[21] UNFCCC-COP21 (2015), http://unfccc.int/resource/docs/2015/ cop21/eng/l09r01.pdf.

[22] E. D. Schulze et al, Plant Ecology, 2nd ed. Springer, Heidelberg, 2019, 926.

[23] M. Thurner et al., Sapwood biomass carbon in northern boreal and temperate forests. Global Ecol. Biogeogr. 2018, 28, 640-660.

[24] M. Mund, E. D. Schulze, Impacts of forest management on the carbon budget of European beech (Fagus sylvatica) forests. Allg. Forst u. Jagdzeitung, 2006, 177, 47-63.

AUTORZY:

Prof. emeritus Dr. Dr. h. c. Ernst Detlef Schulze — *studied forestry and biology, worked as a professor of plant ecology at the University of Bayreuth before becoming the founding director of the Max Planck Institute for Biogeochemistry in Jena.*

Dr. Joachim Rock — *works at the Thünen Institute for Forest Ecosystems in Eberswalde in the field of Greenhouse Gas Monitoring. He studied forestry, holds a PhD in geoecology and has been working on greenhouse gas accounting, climate change and forest management for 20 years.*

Franz Kroiher — *studied forestry and is a cross sectional conservation officer at the Thünen Institute for Forest Ecosystems in Ebers walde.*

Vincent Egenolf — *is a research associate at the Center for Environmental Systems Research (CESR) at the University of Kassel. He studied biology and bioeconomics and is currently investigating the forest footprint of the German bioeconomy and its impacts.*

Dr. Nicole Wellbrock — *heads in the Thünen Institute. for forest ecosystems the soil survey in forests. She studied geography with a focus on soil science and did her PhD on critical loads for nitrogen deposition.*

Prof. (ret.) Roland Irslinger — *studied forestry, worked as a professor of ecology at the University of Applied Forest Sciences in Rottenburg am Neckar, established a site mapping in Brazil, and founded a professorship for ecobalancing and climate change in Rottenburg.*

Prof. Dr. Andreas Bolte — *studied forestry, is an adjunct professor of forest ecology at the University of Göttingen and heads the Thünen Institute for Forest Ecosystems.*

Prof. Dr. Hermann Spellmann *was head of the Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Northwest German Forest Research Institution) until March 31, 2020, taught in the Department of Silviculture and Forest Ecology of Temperate Zones at the University of Göttingen, and was chairman of the Scientific Advisory Board for Forest Policy at the Federal Ministry of Food and Agriculture until December 31, 2019.*

Correspondence:
Prof. Dr. Dr.h.c. Ernst Detlef Schulze
Max Planck Institute for Biogeochemistry P.O. Box 100164
07701 Jena
E-mail: dschulze@bgc-jena.mog.de

© *2021* The authors. Biology in unserer Zeit