

JAN KOZŁOWSKI\*

## Jak najlepiej wykorzystać lasy do sekwestracji dwutlenku węgla?

### Wstęp

Ilość emitowanego w całym świecie dwutlenku węgla jest równoważna 9 mld ton rocznie w przeliczeniu na czysty węgiel. Gdyby ten węgiel załadować na typowe węglarki, utworzony pociąg opasałby 37 razy równik. Taka ilość dwutlenku węgla, gazu cieplarnianego, nieuchronnie musi prowadzić do katastrofy klimatycznej; niepokojące zjawiska towarzyszące zmianom klimatu już trwają. By zapobiec katastrofie, dekarbonizacja gospodarki jest absolutnie niezbędna. Na szczęście ma ona coraz większe poparcie społeczne na świecie. Będzie to jednak proces rozciągnięty w czasie, szczególnie trudny w kraju takim jak Polska, gdzie większość energii elektrycznej jest produkowana z węgla. To, że u nas dekarbonizacja będzie trwać dłużej niż w większości krajów Unii Europejskiej, nie zwalnia nas z odpowiedzialności za ograniczanie wzrostu stężenia dwutlenku węgla w atmosferze. Powinniśmy użyć w tym celu sił natury, nie zaniedbując przy tym stopniowej przebudowy energetyki i badań nad trwałą sekwestracją dwutlenku węgla. Już dziś lasy akumulują około 2,4 mld ton węgla w skali świata (Pan *et al.* 2011), przy czym głównym mechanizmem jest wzrost produkcji roślin (Campbell *et al.* 2017). Akumulowałyby znacznie więcej, gdyby wszystkie lasy były lasami naturalnymi (Erb *et al.* 2018). W czasach, gdy człowiek nie wywierał istotnego wpływu na biosferę, biomasa całej Ziemi zawierała 916 mld ton węgla, obecnie zawiera go jednak o połowę mniej, około 450 mld ton. Deforestacja jest odpowiedzialna za 53–58% tej zmiany, natomiast gospodarka leśna i przekształcanie stepów na pola i pastwiska za aż 42–47% (Erb *et al.* 2018). Wynika stąd, że proces powracania lasów do stanu naturalnego pochłonąłby ogromne ilości dwutlenku węgla. Zmiana polityki wobec lasów wymaga oczywiście kompromisów, ale jest możliwa. Poniżej proponuję scenariusz, który uwzględnia lasy jako narzędzie zarówno do walki z rosnącym stężeniem dwutlenku węgla w atmosferze, jak i do zachowania bioróżnorodności, ale zaspokajałby też zapotrzebowanie gospodarki na drewno, a w przeszłości nawet zwiększał jego podaż.

---

\* Prof. dr hab. Jan Kozłowski (jan.kozlowski@uj.edu.pl), członek korespondent PAN, Instytut Nauk o Środowisku Uniwersytetu Jagiellońskiego, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Tarnowie

### Czas rozdzielić różnorodne funkcje lasu

Ekosystemy różnią się bardzo zdolnością do magazynowania węgla. Bardzo wydajne są lasy, które nie tylko gromadzą ogromną ilość węgla w stosunkowo trwałych pniach, ale także powodują akumulację węgla w glebie w ilości dwukrotnie przewyższającej tę zgromadzoną w biomase nadziemnej (Whitehead 2011). Jednak lasy lasom nierówne: najwięcej akumulują lasy naturalne, mniej więcej dwa razy tyle, co lasy zagospodarowane (Erb *et al.* 2018). Stąd wynika możliwość połączenia dwóch niezwykle istotnych celów środowiskowych: sekwestracji dwutlenku węgla i ochrony bioróżnorodności. Wystarczy podzielić obecnie istniejące lasy na te, którym pozwoli się przebudowywać w kierunku lasu naturalnego, i te, w których optymalizować się będzie produkcję drewna. Oczywiście pozostawienie części lasów samym sobie, bo nie trzeba robić nic, by las sam szybciej lub wolniej przebudowywał się we właściwym dla danego siedliska kierunku i akumulował coraz więcej węgla, spowoduje wyrwę w produkcji ważnego surowca, jakim jest drewno. Taką lukę należy uzupełnić zakładaniem dedykowanych wyłącznie produkcji drewna plantacji lub lasów wprowadzając wielofunkcyjnych, ale nastawionych przede wszystkim na produkcję drewna, zwanych dalej lasami zagospodarowanymi. Zasoby finansowe i pracy ludzkiej poświęcane obecnie na tzw. pielęgnację lasów wielofunkcyjnych, przeznaczonych do naturalizacji, byłyby skierowane na zakładanie plantacji i nowych lasów zagospodarowanych.

Łatwo przewidzieć, jak zmieniać się będą lasy zmierzające w kierunku lasów naturalnych na większości obszaru Polski. Coraz bardziej będą w nich dominować drzewa liściaste, co da dodatkowy pozytywny efekt: będą bardziej odporne na pożary, których z powodu zmian klimatycznych należy spodziewać się więcej. Pożary zwiększają dodatkowo ilość dwutlenku węgla w atmosferze (Pellegrini *et al.* 2018). Przebudowa lasów nizinnych w kierunku liściastych i mieszanych będzie miała jeszcze jeden korzystny wpływ na klimat – w okresie zimy będą one odbijały znacznie więcej promieniowania słonecznego niż wiecznie zielone lasy iglaste. Drzewa będą stopniowo coraz starsze, w miarę zagęszczania się koron będą miały coraz bardziej zwarte i odporne na wiatr drewno, co też jest bardzo istotne, gdyż huraganów niestety przybywa i stają się średnio coraz silniejsze. Lasy te będą miały także bogatszy podszyt, dużo martwego drewna, no i oczywiście znacznie większą różnorodność zarówno flory, jak i fauny.

Martwe drewno w lesie zawsze niepokoi leśników, w większości widzących w nim marnujący się surowiec. Leśnicy używają także innych argumentów, tylko z pozoru racjonalnych. Mówią często, że martwe drewno to wylęgarnia szkodników. Jednak inne gatunki owadów żyją w martwym drewnie, inne w żywym, a ponadto im bliżej lasu naturalnego, tym więcej organizmów zwalczających szkodniki. Drugi argument, słuszny jakościowo, ale niesłuszny ilościowo, to fakt, że podczas rozkładu martwego drewna dwutlenek węgla, wcześniej związany podczas życia drzewa, będzie uwalniany do

atmosfery podczas rozkładu. Taka argumentacja nie uwzględnia jednak tego, że duża część węgla pozostanie w glebie, a ponadto tego, że proces rozkładu pni, głównego magazynu węgla, trwać będzie bardzo długo, w przypadku grubych pni nawet dekady. A za kilka dekad śmiać się będziemy z obecnych problemów energetycznych, gdyż energia z wiatru, fotowoltaiki, innych odnawialnych źródeł, a może i syntezy jądrowej, potrafi z nawiązką zaspokoić potrzeby świata, natomiast magazynowanie węgla jest wymogiem chwili.

Stare i nowe plantacje, a także lasy zagospodarowane, często zresztą nieróżniące się wiele od plantacji, mają także do spełnienia ważną rolę przy magazynowaniu węgla, a ogólniej przy ograniczaniu ilości dwutlenku węgla w atmosferze. Po pierwsze, plantacja lub las gospodarczy rosnąc, w dodatku w dużym tempie, magazynuje węgiel do chwili wycinki. Po drugie, drewno wbudowane w trwałe konstrukcje zatrzyma w sobie węgiel nawet na stulecia.

### **Budownictwo drewniane wielką szansą**

Magazynowanie węgla w trwałych konstrukcjach drewnianych jest bardzo obiecujące (Tollefson 2017), ale tylko pod warunkiem, że nie spowoduje wylesiania ani pogorszenia jakości lasów z punktu widzenia podtrzymywania różnorodności organizmów. W przeciwnym przypadku będzie kolejnym przekleństwem. Zatem warunkiem wstępnym intensyfikacji takiego budownictwa jest wcześniejsze wydzielenie lasów, którym pozwoli się zmierzać w kierunku lasów naturalnych.

Nie bójmy się plantacji leśnych. Ich udział w lasach świata wzrósł z 4,1 do 7,0% w latach 1990–2015 i ciągle rośnie (Payn *et al.* 2015). Zaspokajają one w coraz większym stopniu zapotrzebowanie na drewno. W roku 2012 aż 46,3% przemysłowego drewna w całym świecie pochodziło z plantacji, 65% w tropikach i subtropikach, 45% w strefie umiarkowanej i tylko 14% w strefie borealnej (Payn *et al.* 2015).

Postęp technologiczny w budownictwie drewnianym jest bardzo szybki, dzięki technice spajania drewna powstają coraz większe budynki, hale czy mosty. W 2015 roku w Bergen został zasiedlony energooszczędny drewniany apartamentowiec o wysokości 52,8 m, posiadający jednak elementy betonowe, wprawdzie nie konstrukcyjne, ale obciążające<sup>1</sup>. Kolejny rekord należał do University of British Columbia, który wybudował drewniany akademik oddany do użytku w 2017 roku, wysoki na 53 metry. Także ten rekord został już pobity, gdyż w Norwegii, w Brumunddal w pobliżu Hamar powstał drewniany hotel o wysokości 85,4 m (ryc. 1)<sup>2</sup>. Problematyka drewnianych mostów

<sup>1</sup> <http://www.buildup.eu/en/practices/cases/treet-wooden-high-rise-building-excellent-energy-performance>

<sup>2</sup> <https://www.dezeen.com/2019/03/19/mjostarne-worlds-tallest-timber-tower-voll-arkitekter-norway/>

została omówiona np. w Crocetti (2014) i Veie, Stensby & Bjertnaes (2015), a największą halę sportową o drewnianej konstrukcji posiada obecnie Northern Michigan University<sup>3</sup>.



Fot. 1. Najwyższy na świecie drewniany budynek: Wooden Hotel w pobliżu Hamar w Norwegii. Fot. Jan Kozłowski

W przyszłości możliwości konstrukcyjne będą jeszcze większe. Surowe drewno ma pewne właściwości mechaniczne, które ograniczają jego zastosowanie do bardzo wysokich i wymagających dużej wytrzymałości konstrukcji. Takie ograniczenia można jednak zlikwidować (Fratzl 2018; Song *et al.* 2018). Drewno nie tylko usztywnia drzewa, ale także stanowi tkankę przewodzącą wodę, dlatego składa się z licznych cienkich rurek. Ponadto prócz głównego składnika, celulozy, zawiera trudniej rozkładalną hemicelulozę, a zwłaszcza ligninę, której zadaniem jest ochrona przed inwazją mikroorganizmów, w tym grzybów. Metoda opisana w cytowanych pracach polega na usunięciu metodami chemicznymi większości hemicelulozy i ligniny, a następnie na sprasowaniu drewna w temperaturze 100° C pod dużym ciśnieniem 5 MPa przez jeden dzień. Tak obrobione drewno, z zapadniętymi już rurkami przewodzącymi wodę, uzyskuje niesamowite właściwości. Nie jest już wprawdzie tak lekkie, gdyż gęstość rośnie z 0,43 g/cm<sup>3</sup> do 1,3 g/cm<sup>3</sup>,

<sup>3</sup> <https://www.atlasobscura.com/places/superior-dome>

ale jest i tak sześciokrotnie lżejsze od stali. Przy ciągle niewielkiej gęstości jego sztywność i odporność na rozciąganie jest aż 11 razy większa od naturalnego drewna i dwukrotnie większa od stali! Znakomicie wypadły też testy na sprężystość i odporność na wilgoć. Te właściwości, które oczywiście wymagają sprawdzenia w skali półtechnicznej i technicznej, pobudzają wyobraźnię: jak ogromne, a równocześnie lekkie i trwałe konstrukcje mogłyby z takiego materiału powstawać.

Wielkie drewniane konstrukcje doskonale pokazują coraz mniejsze ograniczenia dla drewnianego budownictwa, ale przyszłość to oczywiście mniejsze drewniane budynki, także domy jednorodzinne, małe mosty itp. Należy pamiętać, że drewno ma mniejsze przewodnictwo cieplne niż beton, trzeba więc będzie użyć mniej materiałów izolacyjnych, których produkcja ma negatywny wpływ na środowisko przez chemiczne zanieczyszczenia, a także emisję dwutlenku węgla. Ponadto produkcja cementu jest bardzo istotnym źródłem emisji dwutlenku węgla.

### **Jak wybierać lasy, które będą zmierzać ku lasom naturalnym?**

Zwykle pierwsza odpowiedź, która przychodzi nam do głowy, to wybierać takie, które są możliwie blisko stanu naturalnego. Taka odpowiedź nie musi być jednak poprawna z punktu widzenia obu celów: wiązania dwutlenku węgla i ochrony bioróżnorodności. Naszym zdaniem najlepiej byłoby kierować się zwartością terytorialną pozostawionych samym sobie lasów, z uwzględnieniem tworzenia korytarzy między istniejącymi fragmentami. Wiele badań wskazuje, że fragmentacja może mieć dla bioróżnorodności podobne znaczenie jak łączna powierzchnia (np. Wilson *et al.* 2019). Puszcza Białowieska oczywiście się obroni, bo to zwarty kompleks. Ale z punktu widzenia wiązania dwutlenku węgla fakt, że w wielu miejscach Polski w skład lasów zmierzających ku naturalności wejdą młode lub nawet bardzo młode fragmenty będzie nawet korzystny – będą one magazynować węgiel szybciej niż lasy bliskie już stanowi naturalnemu. Najcenniejsze fragmenty są już i tak chronione, wchodząc w skład parków narodowych, rezerwatów czy obszarów Natura 2000.

### **Biowęgiel jako tani sposób na sekwestrację dwutlenku węgla**

Obecnie spala się w Polsce ogromne ilości biomasy w celu produkcji energii elektrycznej lub ciepłej. Tak pozyskaną energię uważa się za neutralną z punktu widzenia emisji dwutlenku węgla, gdyż węgiel związany w biomacie pochodzi z asymilacji dwutlenku węgla nie przed kilkunastoma lub kilkuset milionami lat, jak w przypadku paliw kopalnych, lecz współcześnie. Neutralność ta jest jednak niepełna, gdyż pozyskanie biomasy, jej transport i przygotowanie do spalania wymaga użycia energii, obecnie pochodzącej w większości z paliw kopalnych. Niemniej spalanie biomasy jest sposobem pozyskiwania energii obciążonym znacznie mniejszą emisją dwutlenku węgla niż w przypadku paliw kopalnych.

Ostatnie raporty pokazują, że dekarbonizacja gospodarki nie wystarczy – trzeba będzie wycofać z atmosfery spore ilości dwutlenku węgla. Rozważa się jego bezpośrednie wychwytywanie z atmosfery, lub produkowanie w przyszłości energii elektrycznej także z biomasy, przy równoczesnej sekwestracji wytwarzanego dwutlenku węgla, przy czym zwykle rozważa się jego trwałe magazynowanie. Istnieje jednak znacznie lepszy sposób wykorzystania biomasy połączonej z sekwestracją węgla – zgazowywanie. Nowoczesna technologia umożliwia masową produkcję gazu drzewnego, wykorzystanie go do kogeneracyjnej produkcji energii elektrycznej (z wykorzystaniem odpadowego ciepła), ale równocześnie pozwoli w sposób tani wycofać trwałe pewną ilość węgla z atmosfery. W trakcie zgazowywania drewna pozostaje jako odpad pewna ilość węgla drzewnego, tzw. biowęgla. Od dawna wiadomo, że dodanie takiego węgla do gleby poprawia jej strukturę, a dzięki własnościom sorpcyjnym biowęgla można uzyskać większe plony przy niższym nawożeniu, przynajmniej na glebach ubogich (Medyńska-Juraszek 2016). Węgiel wprowadzony do gleby praktycznie nie ulega utlenieniu, będzie więc tam rezydował bardzo długo, doskonale nadaje się zatem do sekwestracji (Lehmann i Joseph 2009). Zmniejszenie użycia nawozów sztucznych zmniejszy emisję dwutlenku węgla przy ich produkcji, a dodatkowo zmniejszy eutrofizację wód. Możliwość bardziej wydajnej produkcji żywności zwolni pewien dodatkowy areal na zakładanie plantacji drzew.

Produkcja odpadów drzewnych jest nieunikniona i będzie wzrastać w miarę rozwoju budownictwa drewnianego. Na plantacjach drzewnych prócz cennych pni powstaje ogromna ilość tzw. cienizny, nieprzydatnej do celów konstrukcyjnych. W miastach i ogrodach przydomowych powstaje nie tylko ogromna ilość odpadów nadających się do fermentacji w biogazowniach, ale także gałęzi, które mogłyby zostać zgazowane, dając energię elektryczną, ciepło kogeneracyjne i węgiel drzewny. W Niemczech istnieją gminne punkty zbioru gałęzi przeznaczonych do zgazowania. Firma Spanner Re<sup>2</sup> wytwarza modułowe urządzenia do produkcji energii elektrycznej w skojarzeniu z ciepłem i odpadowym biowęgłem o mocy od kilkunastu do nawet 2 MW energii elektrycznej i 4 MW energii cieplnej<sup>4</sup>. Podobne urządzenia produkuje austriacka firma Froeling<sup>5</sup>. Przeróbkę termiczną węgla można również prowadzić w taki sposób, by ilościowo nad gazem drzewnym dominował tzw. biowęgiel, który obecnie jest używany przede wszystkim w energetyce<sup>6</sup>, ale nic nie stoi na przeszkodzie, by technologię taką wykorzystać do wycofywania dwutlenku węgla z atmosfery, dodając biowęgiel do gleby.

Obecnie gazyfikację węgla należy prowadzić głównie w kierunku produkcji gazu drzewnego, by bezemisyjnie wyprodukować jak najwięcej energii elektrycznej i cieplnej.

<sup>4</sup> <https://www.holz-kraft.com/en/>

<sup>5</sup> <https://www.froeling.com/pl/produkty/cieplo-i-prad/nowosc-mala-elektrociepownia-chp.html>

<sup>6</sup> <http://www.fluid.pl/>

W przyszłości, gdy inne poza biomasą odnawialne źródła zastąpią paliwa kopalne, racjonalna będzie maksymalizacja produkcji biowęgla w celu wycofania jak największej ilości węgla z atmosfery i zdeponowanie go w glebach rolniczych i na plantacjach leśnych. Należy jednak mieć świadomość, że możliwości sekwestracji w ten sposób dwutlenku węgla wychwyconego wcześniej przez rośliny z powietrza są ograniczone. Badania dla stanu Massachusetts wykazały, że jest to mniej niż 1% emisji dwutlenku węgla w tym stanie (Timmons, Lema-Driscoll i Uddin 2017). Zmniejszenie zużycia nawozów, skuteczne jednak tylko na ubogich glebach, zapewne podwoiłoby tę liczbę. Już dziś należałoby prowadzić w Polsce badania nad wpływem biowęgla na plony w zależności od rodzaju gleby i poziomu nawożenia, jeśli już nie są prowadzone, by w przyszłości zoptymalizować wykorzystanie tej substancji do zmniejszania stężenia dwutlenku węgla w atmosferze.

### **Proponowane rozwiązania a projekt „Leśne gospodarstwa węglowe” Lasów Państwowych**

Opis projektu na stronie Lasów Państwowych zaczyna się następująco: „Projekt Leśne Gospodarstwa Węglowe jest jednym z flagowych programów rozwojowych Lasów Państwowych. Działania tego typu prowadzone są ze względu na postępujące zmiany klimatyczne, których głównym czynnikiem sprawczym jest wysoka emisja dwutlenku węgla do atmosfery. Projekt ma następujące zadania: zwiększenie ilości dwutlenku węgla pochłanianego przez ekosystem leśny, głównie drzewostany i glebę, redukcję emisji z obszarów podmokłych oraz magazynowanie węgla na składach drewna”<sup>7</sup>. Projekt ma być realizowany w latach 2017–2026. Główna część projektu to rozległe badania naukowe, które, jeśli dobrze przeprowadzone, mogą wnieść cenne informacje dotyczące funkcjonowania lasów jako magazynów węgla, jednak do samej sekwestracji się nie przyczynią. Druga część projektu, prowadzona w 23 nadleśnictwach na terenie całego kraju na łącznej powierzchni 12 000 ha, to już działania praktyczne, takie jak podsadzenia (4328,66 ha), odnowienia prowadzone tzw. metodą Sobańskiego, czyli wysiewanie oprócz gatunków głównych także gatunków towarzyszących (1368,60 ha), tzw. odnowienia naturalne, bo są one jednak kierowane przez człowieka (611,60 ha), a także dodatkowe zalesienia, wprowadzania gatunków szybkoorosnących, stosowanie rębni niezupełnych, zmiana wieku rębności drzewostanów oraz odnowienia na powierzchniach otwartych. Te działania przyczynią się oczywiście do sekwestracji dwutlenku węgla i zdaje się, że wykazanie tego i wprowadzenie do obrotu certyfikatów jest jednym z głównych celów projektu. Sądząc z wypowiedzi polityków, drugi cel jest propagandowy – stwarzanie pozorów, że wprawdzie będziemy dalej opierać gospodarkę na węglu, ale

<sup>7</sup> [http://projekty-rozwojowe.lasy.gov.pl/projekty-rozwojowe/-/asset\\_publisher/7PcENrBXIBZJ/content/lesne-gospodarstwa-weglowe](http://projekty-rozwojowe.lasy.gov.pl/projekty-rozwojowe/-/asset_publisher/7PcENrBXIBZJ/content/lesne-gospodarstwa-weglowe)

lasy dadzą sobie radę z wchłanianiem emitowanego dwutlenku węgla. Takie argumenty mogą przekonać jedynie osoby niezorientowane, a więc ogół społeczeństwa, gdyż eksperci doskonale wiedzą, że włączenie lasów w ograniczanie ilości gazów cieplarnianych w atmosferze jest wprawdzie ważne, ale ilościowo daleko niewystarczające. Popieranie budownictwa drewnianego ujęte w projekcie jako „magazynowanie węgla na składach drewna” należy rozumieć, że w celu późniejszego wykorzystania bez wcześniejszego proponowanego podziału lasów pod względem funkcji, czyli bez pozostawienia ich znacznej części, najprawdopodobniej połowy, samym sobie jest szczególnie niebezpieczne, gdyż może doprowadzić do dewastacji lasów przez zwiększenie pozyskania drewna, a więc odnieść dla klimatu skutek odwrotny od zamierzonego.

Działania w ramach projektu „Leśne gospodarstwa węglowe” nie tylko nie są sprzeczne z przedstawionymi w tym artykule postulatami, ale są nawet zbieżne, jednak pod podstawowym warunkiem, że znacznej części lasów umożliwi się zmierzanie w kierunku lasów naturalnych. Część badawcza bez wątplenia wykaże, że lasy pozostawione samym sobie akumulują coraz więcej węgla, bo to już zostało udowodnione (Erb *et al.* 2018) i nie trzeba czekać do 2026 roku, by podjąć odpowiednie decyzje. Możliwość przypisania różnym typom lasu w naszych warunkach klimatycznych i geologicznych konkretnej ilości węgla zakumulowanej na każdym hektarze będzie wartością dodaną projektu. Będzie można wtedy dokładnie wykazać, ile energii można ciągle pozyskiwać z paliw kopalnych, by nasza gospodarka mogła być rzeczywiście uznana za zeroemisyjną. Nie ludźmy się jednak, zgodnie z już zgromadzonym zasobem wiedzy będzie to niewielki procent zużywanej energii, cała reszta będzie musiała być pozyskiwana ze źródeł zeroemisyjnych.

W projekcie „Leśne gospodarstwa węglowe” pojawił się zapis, że jednym z celów jest redukcja emisji z obszarów podmokłych. Ponieważ obszary takie bardzo wydajnie magazynują węgiel, chodzi zapewne o emisję metanu i należy się obawiać, że leśnicy myślą o melioracjach. Metan jest rzeczywiście groźnym gazem cieplarnianym, o wielokrotnie silniejszym efekcie niż dwutlenek węgla. Jest to jednak gaz nietrwały, który po kilkunastu latach<sup>8</sup> rozłoży się w atmosferze do dwutlenku węgla i pary wodnej<sup>9</sup>. Ponie-

<sup>8</sup> [https://ec.europa.eu/clima/sites/campaign/pdf/gases\\_pl.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/campaign/pdf/gases_pl.pdf)

<sup>9</sup> Najprostsze równanie opisujące dynamikę dwutlenku węgla ma postać:  $dS/dt = a - bS$ , gdzie  $S$  jest ilością metanu w atmosferze,  $a$  jest tempem dopływu metanu do atmosfery, natomiast  $bS$  jest tempem rozkładu metanu, proporcjonalnym do ilości, gdyż każda cząsteczka ma taką samą szansę rozpadu pod wpływem wysokoenergetycznego promieniowania. Zatem stan równowagi można wyrazić wzorem  $S = a/b$ , a więc zwiększenie emisji metanu będzie wprawdzie zwiększać nieco stan równowagi dynamicznej, ale nie jest to równoznaczne z ciągłym nagromadzeniem się w atmosferze metanu, tak jak w przypadku trwałego dwutlenku węgla. Rozłożony metan zwiększy wprawdzie pulę dwutlenku węgla, ale ilościowo jest to mało istotne.



waż znacznie więcej węgla jest wiązane w mokradłach niż emitowane w postaci metanu, mokradła, w tym podmokłe lasy, sprzyjają wycofywaniu dwutlenku węgla z atmosfery. Należy zatem unikać wszelkich działań w kierunku osuszania terenów podmokłych, także na terenach zalesionych.

### Wnioski

Zmagazynowanie węgla w trwałych konstrukcjach, przekształcenie części lasów w zmierzające ku naturalności i wprowadzanie biowęgla do gleby nie zbilansuje obecnej emisji dwutlenku węgla w Polsce. Są to tylko ważne niskokosztowe działania pomocnicze, natomiast konieczna jest przede wszystkim przebudowa energetyki w kierunku bezemisyjności. Obszar Polski, zwłaszcza tereny poza górami, jest dobrym miejscem dla zwiększania zalesienia. Wprawdzie zalesienia w terenach górskich będą nieco mniej skuteczne z punktu widzenia ochrony klimatu, gdyż świerki obniżają albedo (Whitehead 2011), ale zostaną osiągnięte dodatkowe inne cele ekologiczne – ochrona gleb przed erozją i zatrzymywanie większej ilości wody, a zatem ograniczanie powodzi. W obliczu już trwających i nasilających się katastrof klimatycznych i dramatycznego spadku różnorodności biologicznej nie stać nas na realizację działań prośrodowiskowych o jednym tylko celu. Proponowane tu rozwiązania w pewnej części zbilansują emisję dwutlenku węgla do atmosfery, ograniczą pożary lasu i negatywne skutki huraganowych wiatrów i powodzi, a także przyczynią się do zachowania lub zwiększenia różnorodności biologicznej. Więcej lasów zmierzających ku naturalności i wzrost zastosowania drewna w budownictwie to także większy komfort dla ludzi, ich rekreacji i warunków mieszkaniowych.

### Bibliografia

- Campbell J.E., Berry J.A., Seibt U., Smith S.J., Montzka S.A., Launois T., Belviso S., Bopp L., Laine M. (2017). *Large historical growth in global terrestrial gross primary production*. Nature, 544, 84–87.
- Crocetti R. (2014). *Timber bridges: general issues, with particular emphasis on Swedish typologies*. Internationales Holzbau-Forum IHF, 20, [http://www.forum-holzbau.com/pdf/61\\_IHF\\_2014\\_Crocetti.pdf](http://www.forum-holzbau.com/pdf/61_IHF_2014_Crocetti.pdf).
- Erb K.H., Kastner T., Plutzer C., Bais A.L.S., Carvalhais N., Fetzel T., Gingrich S., Haberl H., Lauk C., Niedertscheider M., Pongratz J., Thurner M., Luyssaert S. (2018). *Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass*. Nature, 553, 73–76.
- Fratzl P. (2018). *Wood made denser and stronger*. Nature, 554, 172–173.
- Lehmann J., Joseph L. (2009). *Biochar for Environmental Management*. Sterling, VA, London.
- Medyńska-Juraszek A. (2016). *Biowęgiel jako dodatek do gleb*. Soil Science Annual, 67, 151–157.
- Pan Y., Birdsey R.A., Jingyun Fang J. et al. (2011). *A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests*. Science, 333, 988–993.

- Payn T., Carnus J.-M., Freer-Smith P., Kimberley M., Kollert W., Liu S., Orazio C., Rodriguez L., Silva L.N., Wingfield M.J. (2015). *Changes in planted forests and future global implications*. *Forest Ecology and Management*, 352, 57–67.
- Pellegrini A.F.A., Ahlstrom A., Hobbie S.E., Reich P.B., Nieradzik L.P., Staver A.C., Scharenbroch B.C., Jumpponen A., Anderegg W.R.L., Randerson J.T., Jackson R.B. (2018). *Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity*. *Nature*, 553, 194–198.
- Song J., Chen C., Zhu S., Zhu M., Dai J., Ray U., Li Y., Kuang Y., Li Y., Quispe N., Yao Y., Gong A., Leiste U.H., Bruck H.A., Zhu J.Y., Vellore A., Li H., Minus M.L., Jia Z., Martini A., Li T., Hu L. (2018). *Processing bulk natural wood into a high-performance structural material*. *Nature*, 554, 224–228.
- Timmons D., Lema-Driscoll A., Uddin G. (2017). *The Economics of Biochar Carbon Sequestration in Massachusetts*. UMass Clean Energy Extension, University of Massachusetts.
- Tollefson J. (2017). *Wood grows up*. *Nature*, 545, 280–282.
- Veie J., Stensby T.A., Bjertnaes M.A. (2015). *New dimensions in bridge construction in Norway*. Internationales Holzbau-Forum IHF, 21, [http://www.forum-holzbau.com/pdf/65\\_IHF\\_2015\\_Bjertnaes.pdf](http://www.forum-holzbau.com/pdf/65_IHF_2015_Bjertnaes.pdf).
- Whitehead D. (2011). *Forests as carbon sinks—benefits and consequences*. *Tree Physiology*, 31, 893–902.
- Wilson K.L., De Gisi J., Cahill C.L., Barker O.E., Post J.R. (2019). *Life-history variation along environmental and harvest clines of a northern freshwater fish: plasticity and adaptation*. *Journal of Animal Ecology*, w druku, doi.org/10.1111/1365-2656.12965.

### How to best utilise forests for carbon dioxide sequestration?

Forests may play important role in partial neutralization of CO<sub>2</sub> emission. To maximize their potential it is unavoidable to divide them into forests that will be allowed to evolve toward natural state and forest predisposed for timber production, supplemented with forest plantations. Natural forests store almost twice more carbon in biomass and soil than managed forests, and carbon contained in wood from plantations and timber-producing forests will be frozen long time in wooden constructions. Gasification of wood debris instead of burning will allow for production of biocarbon that added to soil will residue there through decades, and will decrease necessary amount of artificial fertilizers, which production is an important source of carbon dioxide. Forests evolving to natural state will be less prone to fire and hurricanes, and will better protect biodiversity. Presented project is not contradictory to the project “The Forest Carbon Farms” of State Forests, but allows to reach better results in shorter time and likely at lower cost.

**Key words:** CO<sub>2</sub> sequestration; natural forests; forest plantations, biocarbon, biodiversity