

Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Biowęgiel – paliwo dla bioróżnorodności

prof. dr hab. Bożena Czech

17.11.2025



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



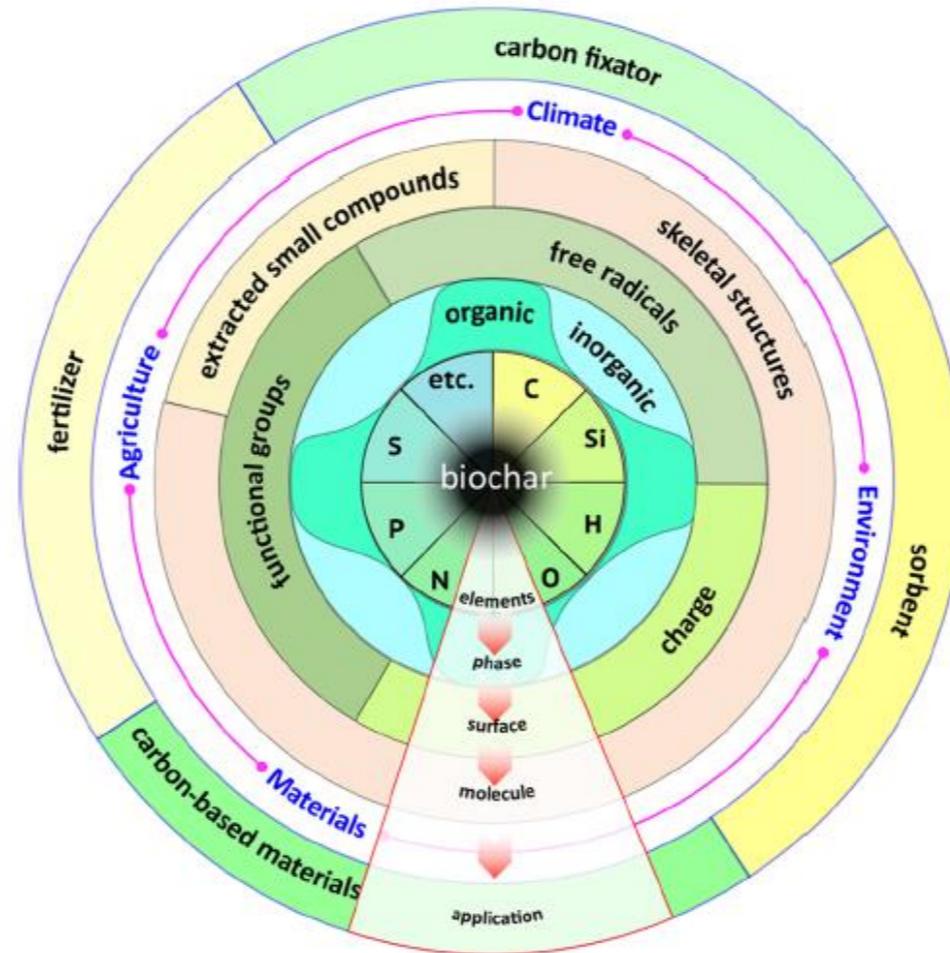
biowęgiel = czarne złoto

stabilny materiał węglowy otrzymany podczas pirolizy w atmosferze ubogiej w tlen w temperaturze $\leq 700^{\circ}\text{C}$



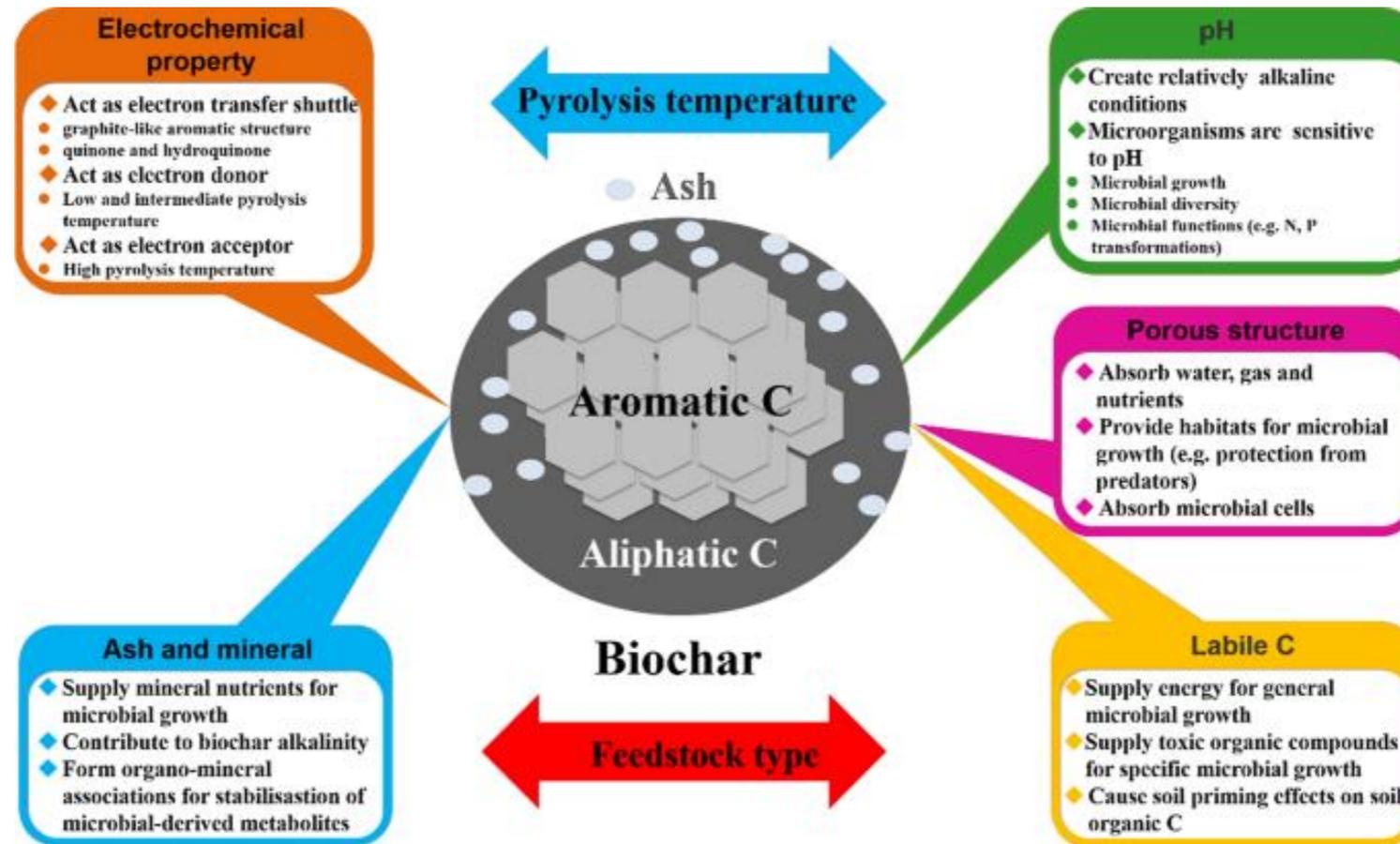
Rys. 1. Surowce do otrzymywania biowęgla i kierunki jego zastosowania.

biowęgiel – heterogeniczna struktura – ogromny potencjał aplikacyjny



Rys. 2. Heterogeniczna struktura biowęgla i jego potencjalne zastosowanie.

Co wpływa na właściwości biowęgla?



Rys. 3. Właściwości biowęgla i czynniki je determinujące.

proces otrzymywania biowęgla

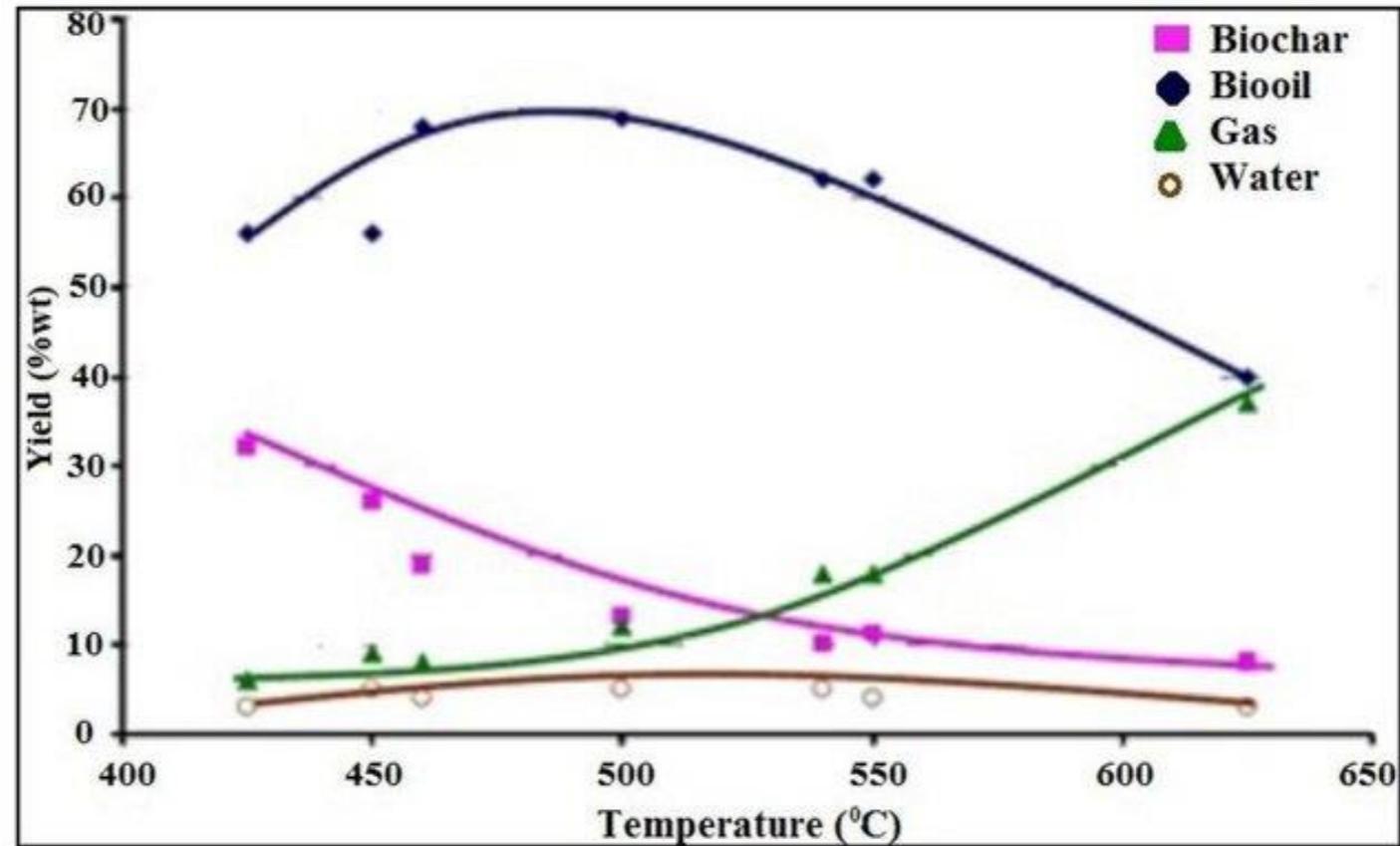
Tabela 1. Produkty pirolizy w zależności od rodzaju procesu.

Mode	Operating parameters		Liquid	Solid	Gas
	Peak temp.	Vapor residence time	(bio-oil)	(char)	(syngas)
Slow pyrolysis	Moderate (~500°C)	Long (5-30 min)	30% (70% water)	35%	35%
Intermediate pyrolysis	Moderate (~500°C)	Moderate (10-20 s)	50% (50% water)	20%	30%
Fast pyrolysis	Moderate (~500 °C),	Short (<2 s)	75% (25% water)	12%	13%
Gasification	High (>800 °C)	Moderate (10-20 s)	5% tar (55% water)	10%	85%

[Christian Riuji Lohri, Christian Riuji Lohri, Daniel Sweeney, Daniel Sweeney, Hassan Rajabu, Hassan Rajabu, Carbonizing urban biowaste for low-cost char production in developing countries - A review of knowledge, practices and technologies, Technical Report, Eawag, MIT D-Lab and UDSM, January 2015]

produkty pirolizy

- biowęgiel
- bioolej
- biogaz



Rys. 4. Produkty pirolizy w zależności od temperatury.

wpływ rodzaju materiału wyjściowego na właściwości biowęgla

Tabela 2. Właściwości fizykochemiczne biowęgla otrzymanych z różnych materiałów spirolizowanych w 600 °C.

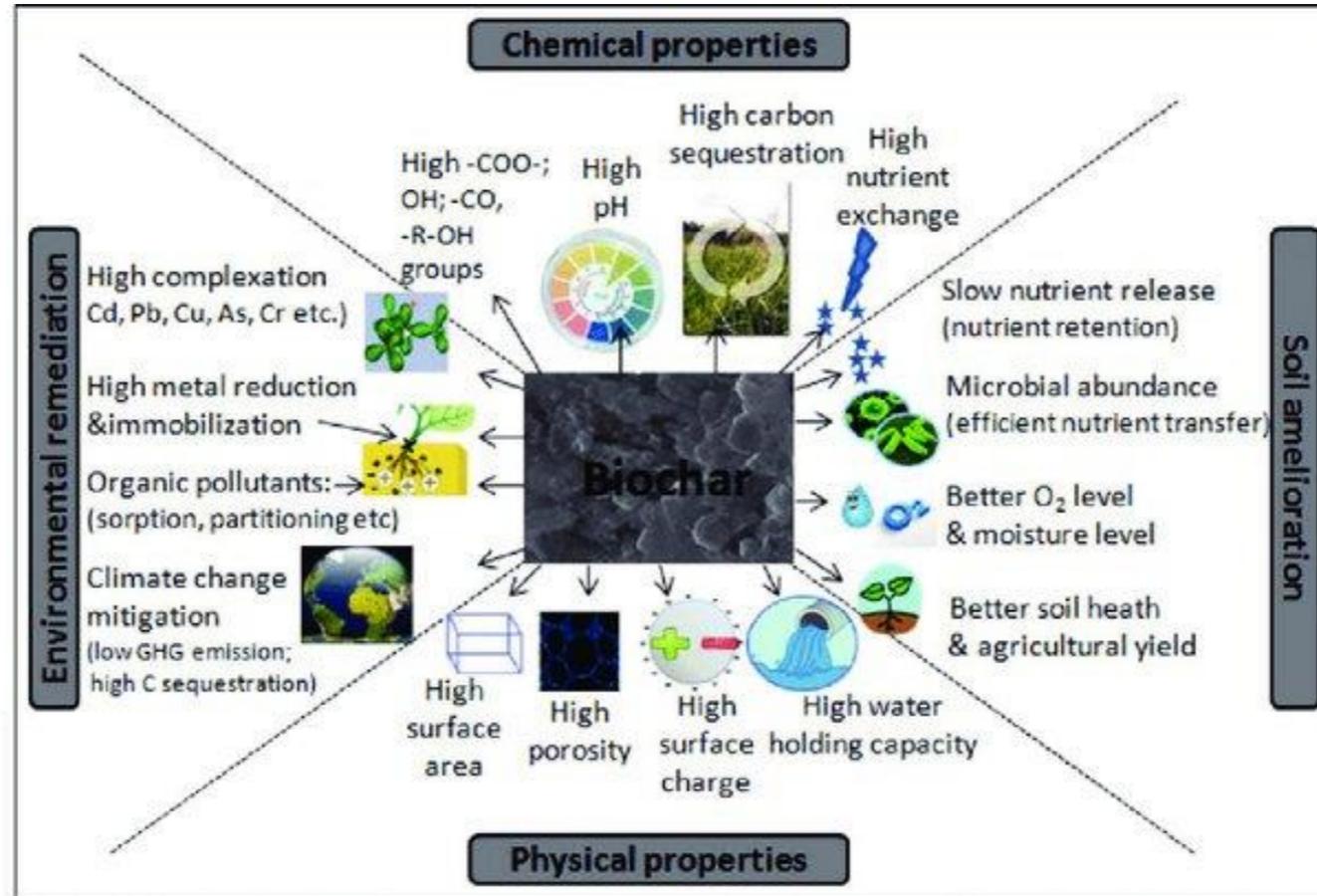
TOC – total organic carbon, całkowity węgiel organiczny

S_{BET} – powierzchnia ogólna

C_{total} – całkowite WWA

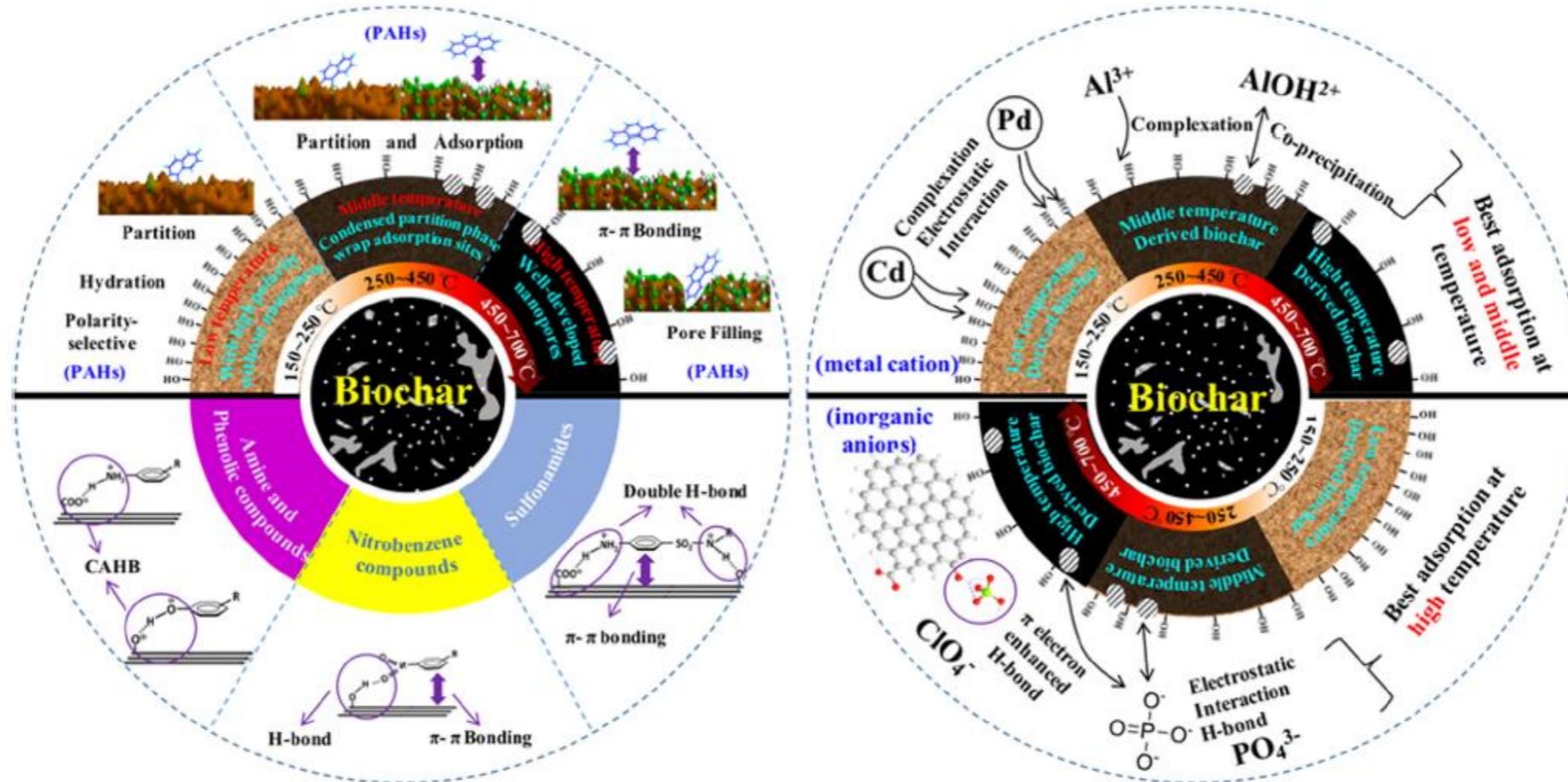
Materiał	pH	popiół (%)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	TOC (mg/g)	S_{BET} (m ² /g)	C_{total} (μg/kg)
BG	10,7c	25,9c	62,9b	1,20b	2,57c	7,43c	631b	0,94a	345,9c
SS	8,06a	62,8d	23,5a	0,57a	3,66d	9,50d	327a	1,14b	766,5d
SF	9,26b	6,70a	86,7d	1,67c	0,96a	3,96a	878c	26,1c	270,4b
CR	9,60b	14,1b	76,7c	2,71d	1,30b	5,18b	818c	90,1d	75,76a

charakterystyka fizykochemiczna biowęgla (porowatość, powierzchnia właściwa, grupy funkcyjne)



Rys. 5. Powiązanie właściwości biowęgla z możliwościami zastosowania.

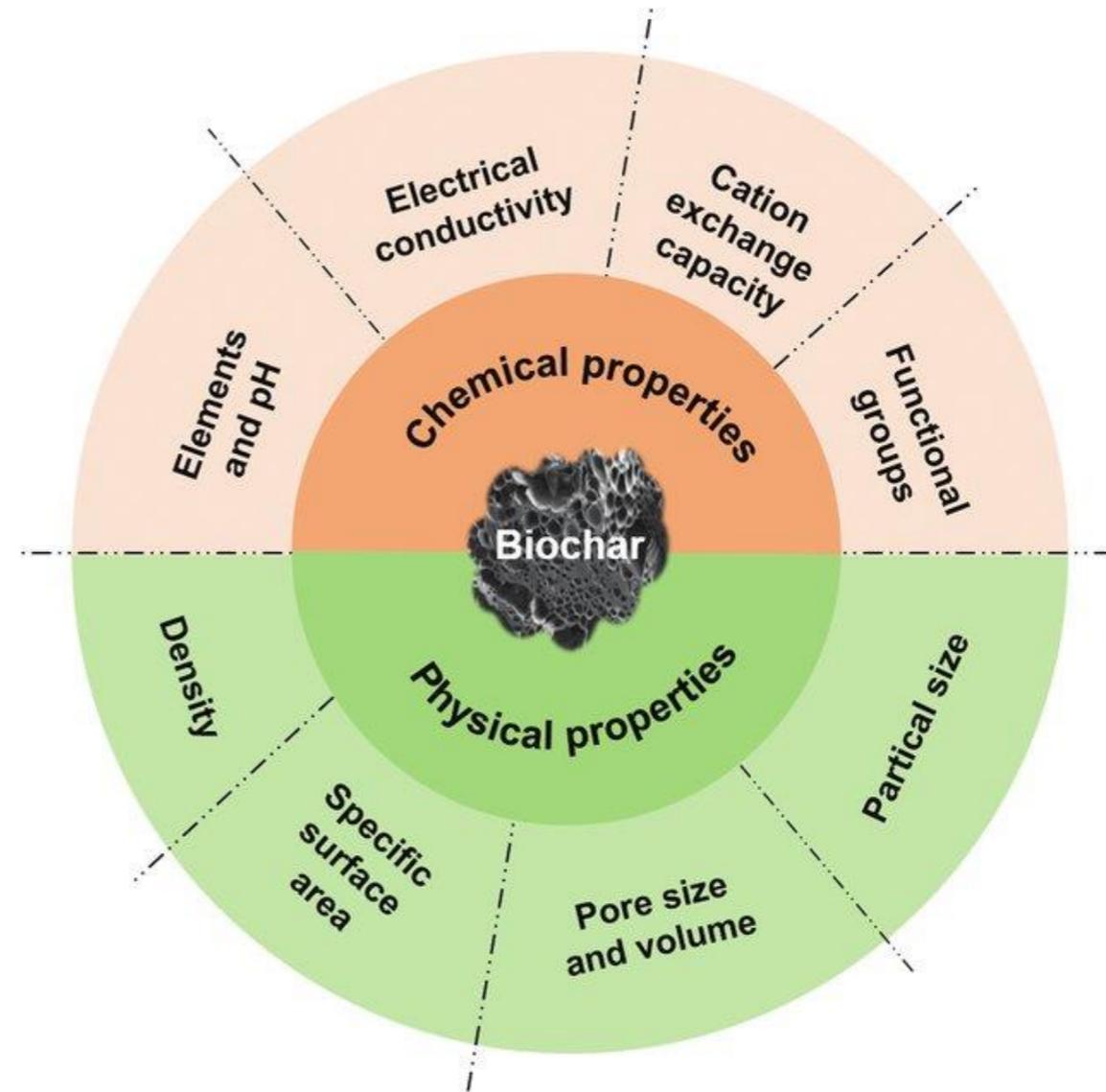
oddziaływanie biowęgla ze związkami organicznymi i nieorganicznymi



Rys. 6. Mechanizm sorpcji związków organicznych (po lewo) i nieorganicznych (po prawo) na powierzchni biowęgla.

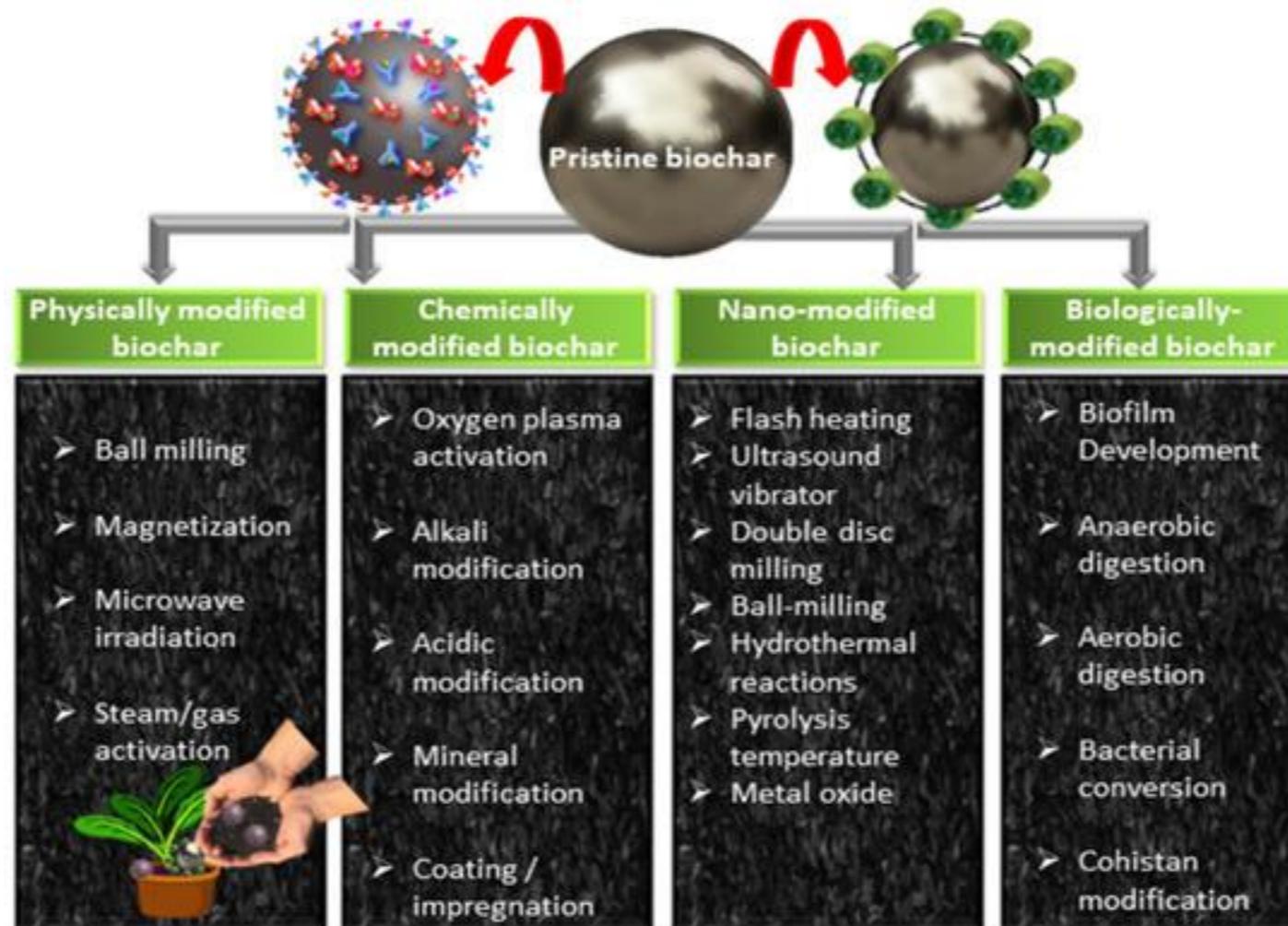
kluczowe właściwości fizykochemiczne = biowęgle projektowane

- wielkość powierzchni i porowatość
- grupy funkcyjne (O, N, S)
- popiół/składniki mineralne



Rys. 7. Właściwości fizykochemiczne biowęgla.

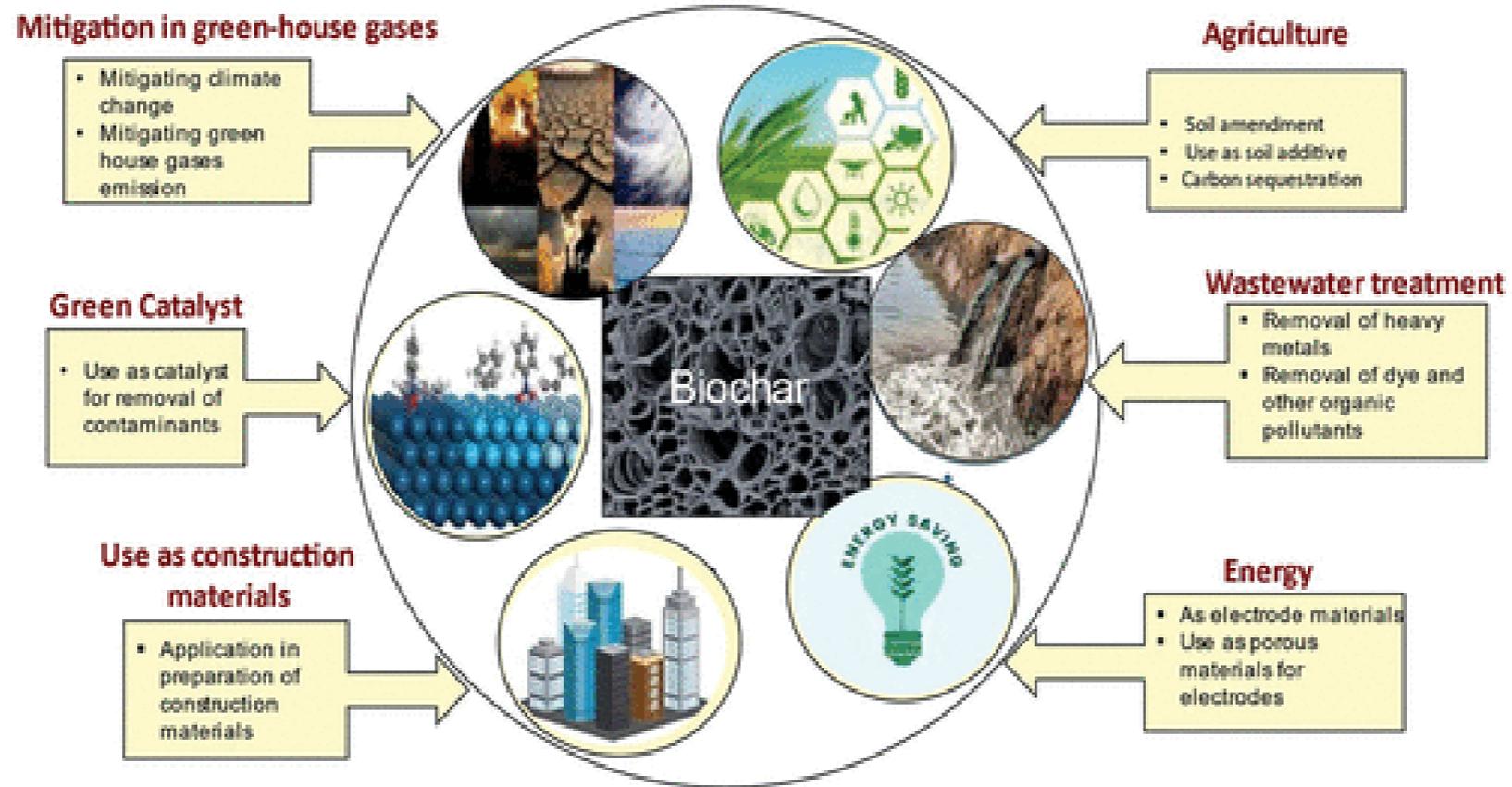
modyfikacje biowęgla



Rys. 8. Kierunki modyfikacji biowęgla.

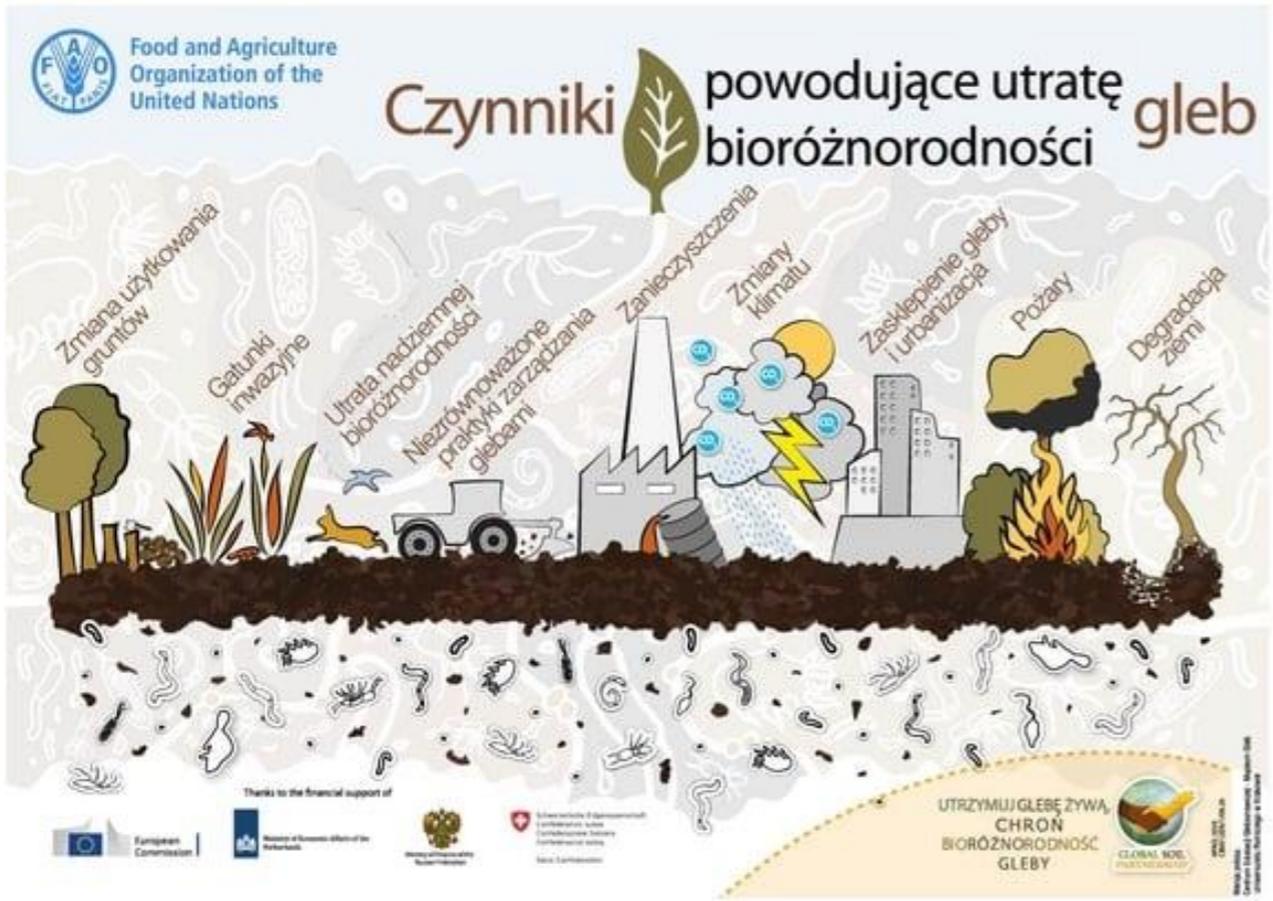
[<https://doi.org/10.3390/environments9050060>]

kierunki zastosowań biowęgla

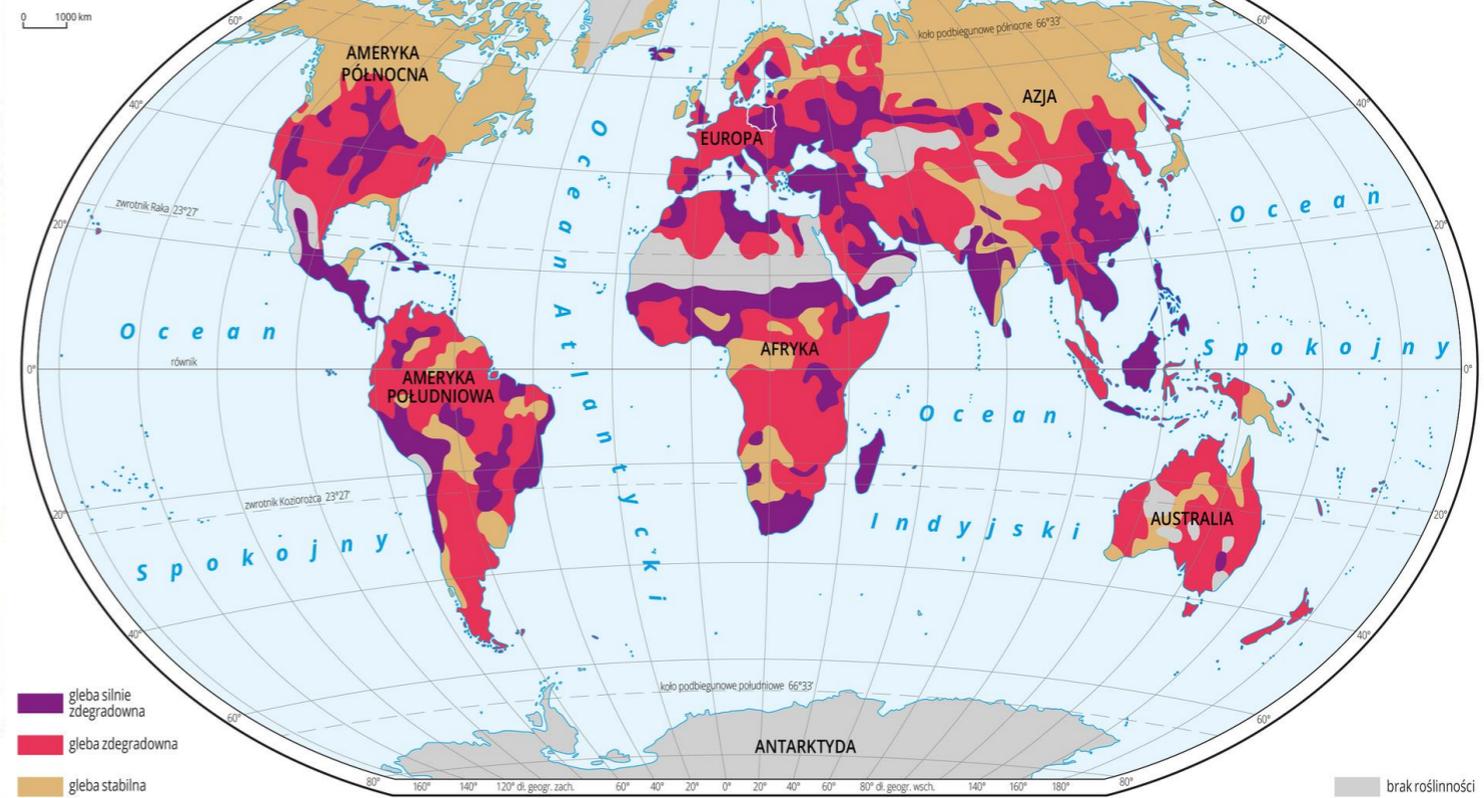


Rys. 9. Potencjalne kierunki zastosowania biowęgla.

globalny kontekst



ŚWIAT degradacja gleby



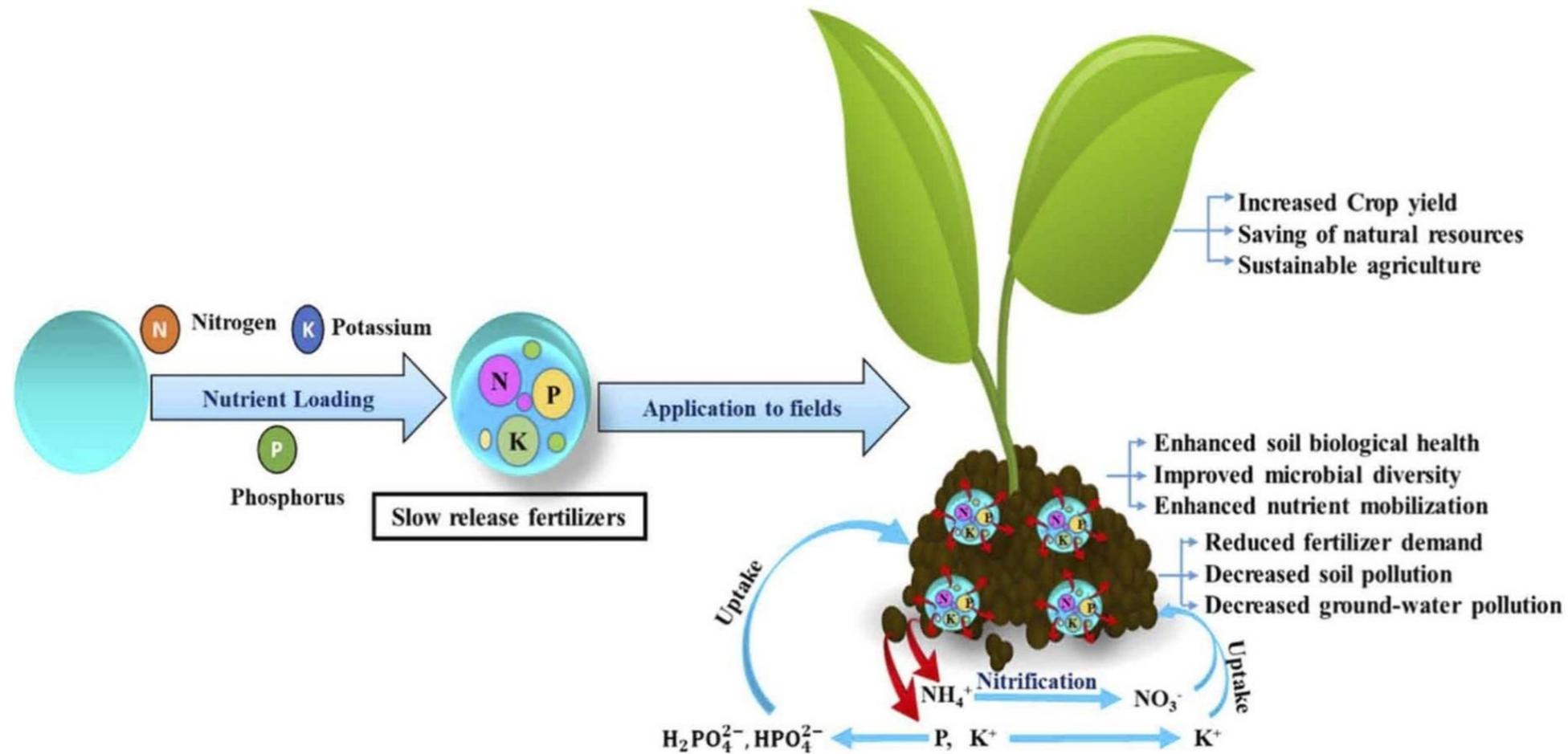
Rys. 10. Czynniki powodujące utratę bioróżnorodności gleb.

Rys. 11. Gleby zdegradowane na świecie.

[Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa - Państwowy Instytut Badawczy]

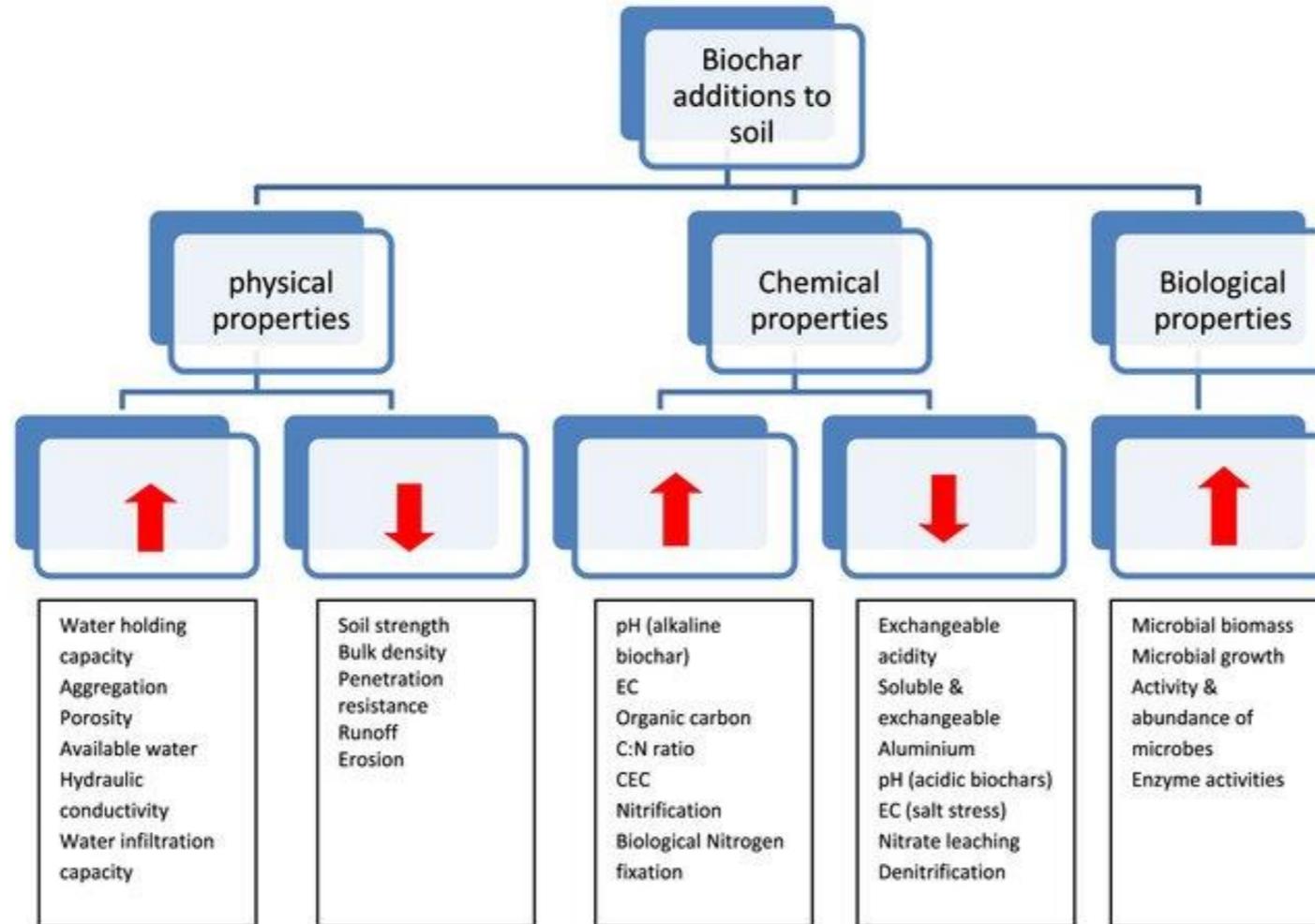
[<https://zpe.gov.pl/a/degradacja-gleb-na-swiecie-i-jej-skutki/DuguSPVVG>]

modyfikacje biowęгла (np. wzbogacanie w azot, żelazo, fosfor) SLOW RELEASE FERTILIZERS



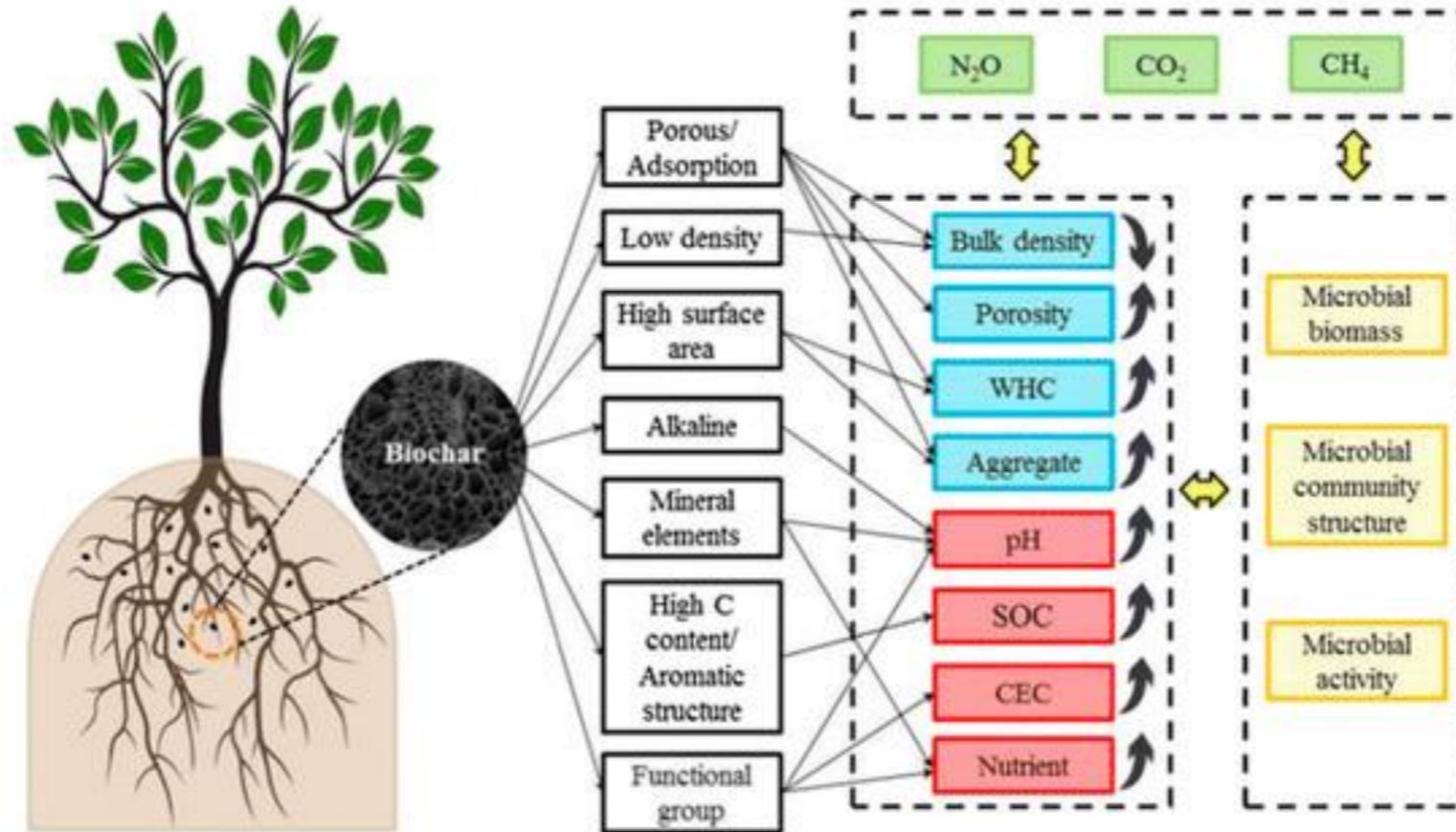
Rys. 12. Nawozy o spowolnionym uwalnianiu.

wpływ biowęglu na właściwości gleby



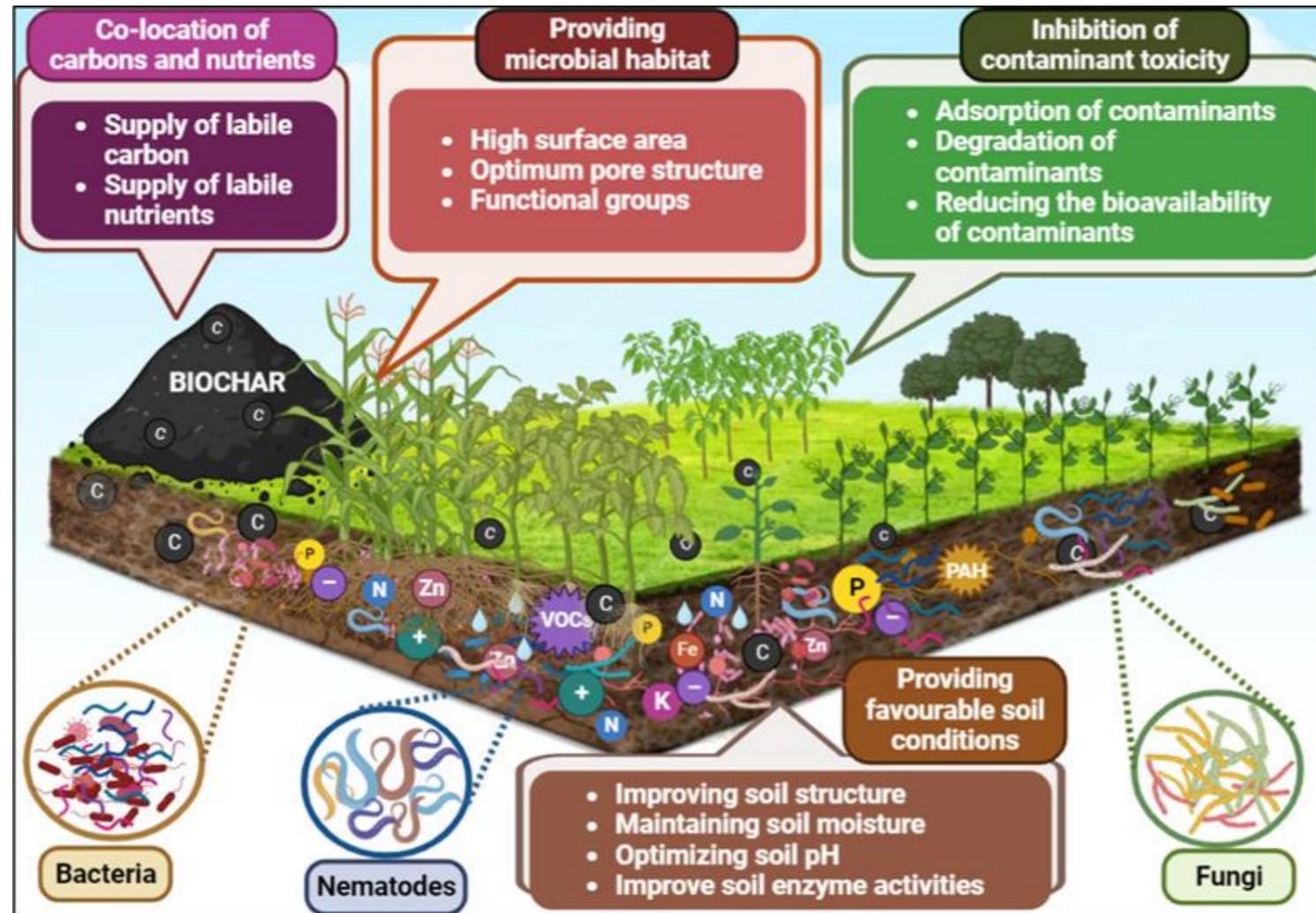
Rys. 13. Wpływ dodatku biowęglu na właściwości gleby.

wpływ biowęgla na glebę



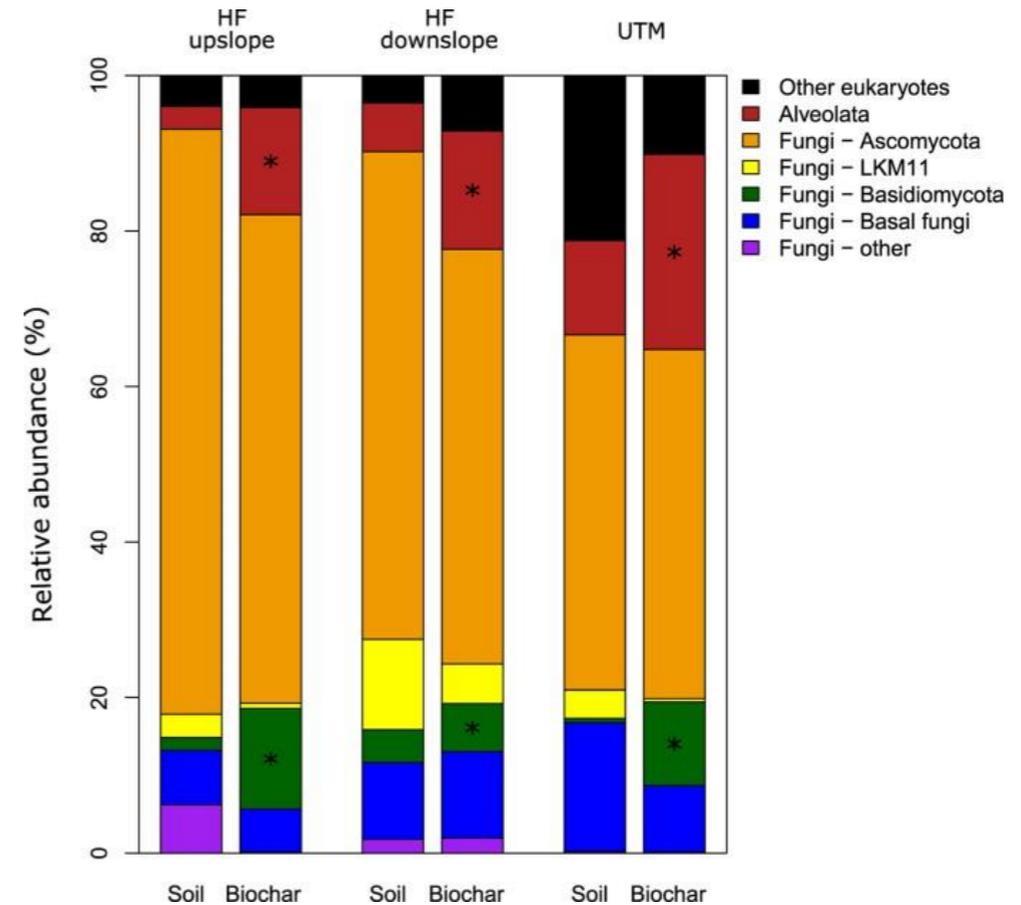
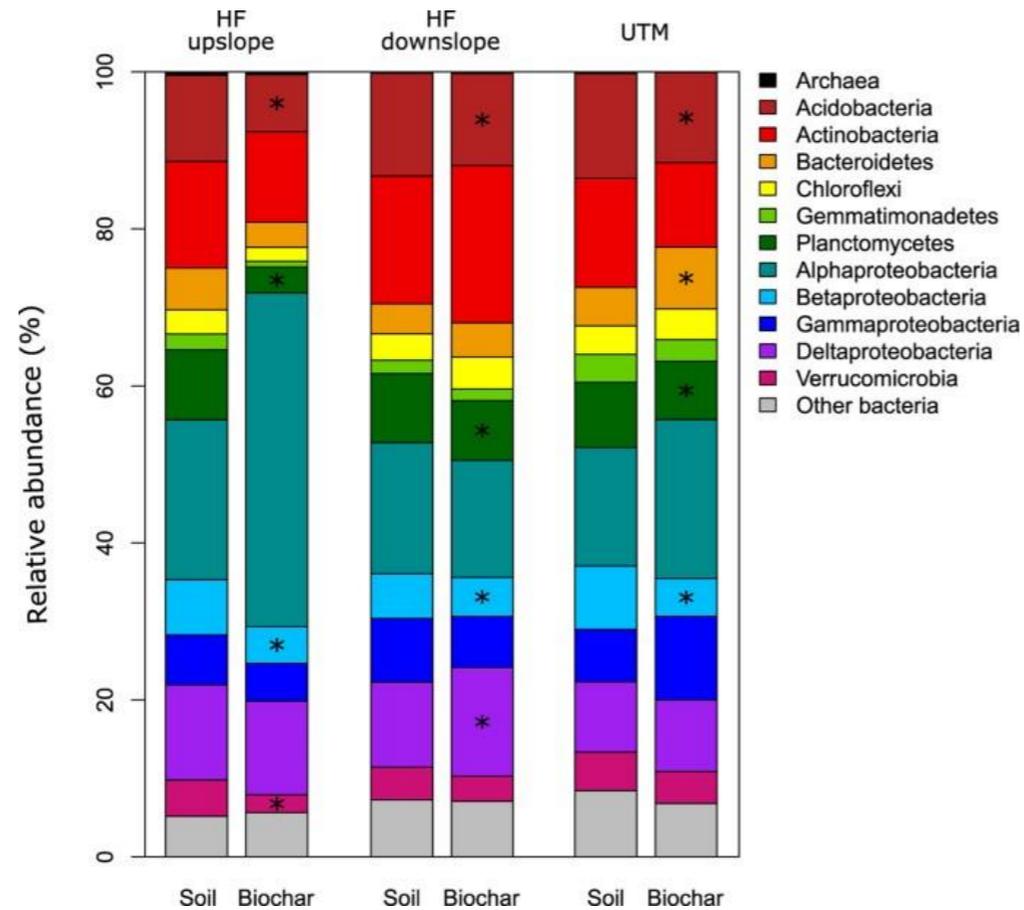
Rys. 14. Wpływ dodatku biowęgla na właściwości gleby.

biowęgiel jako siedlisko dla bakterii i grzybów

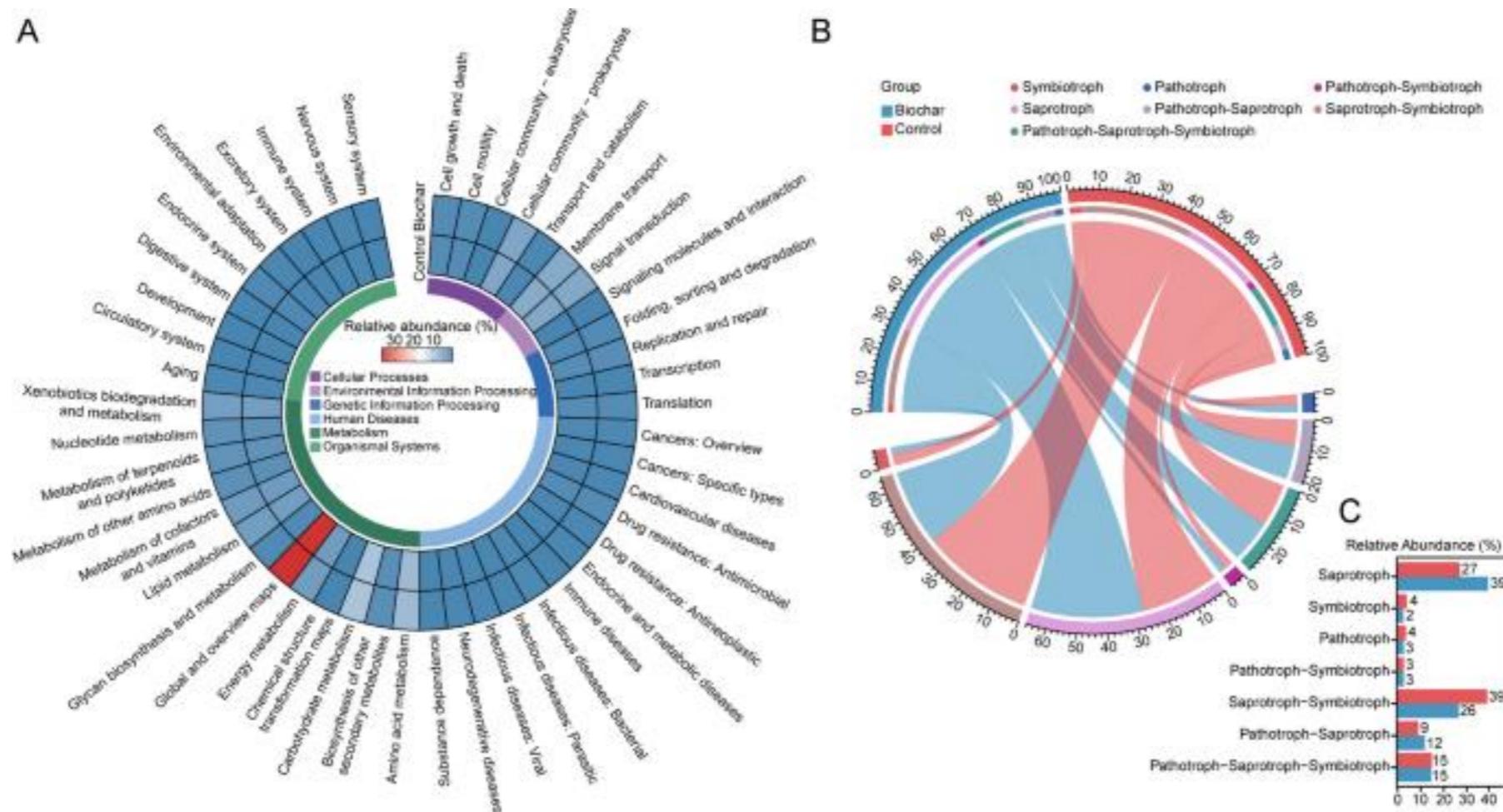


Rys. 15. Biowęgiel jako miejsce kolonizacji przez bakterie i grzyby.

mikrobiom glebowy

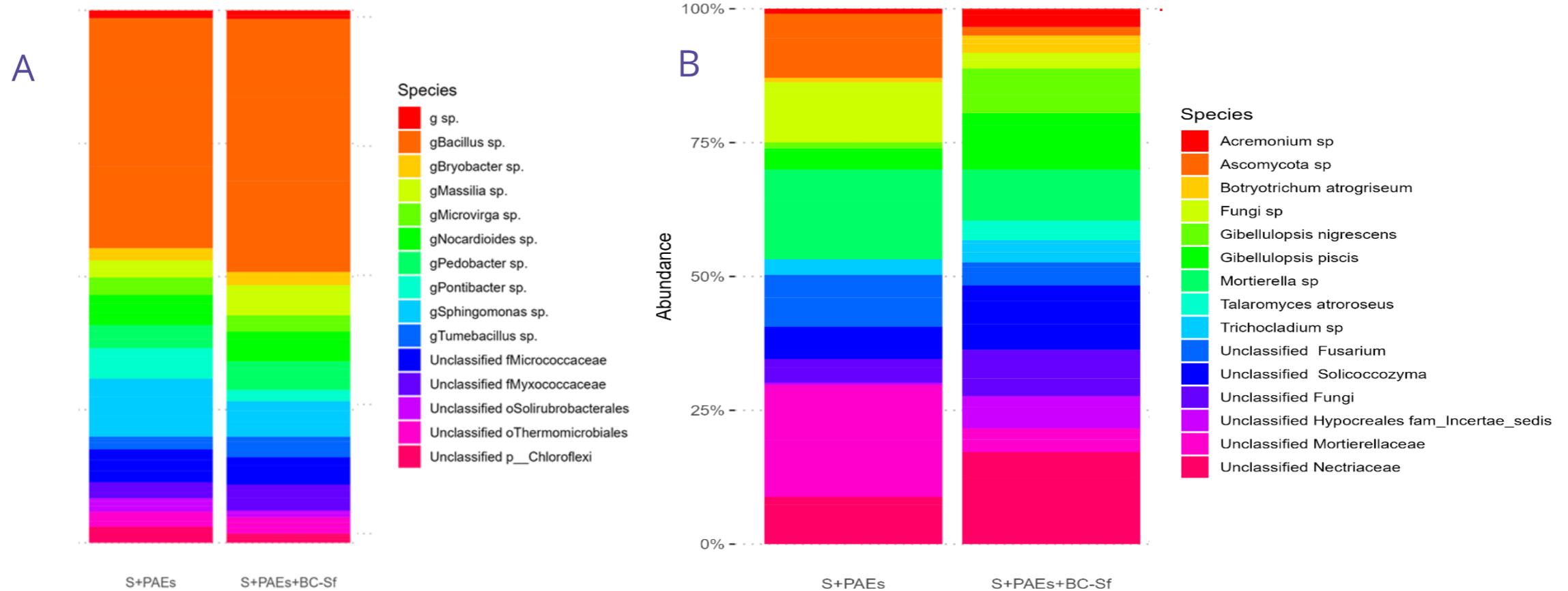


Rys. 16. Udział a) bakterii b) grzybów do całkowitego DNA społeczności prokariotycznej wyekstrahowanego z próbek gleby i biowęgla z trzech stanowisk leśnych.



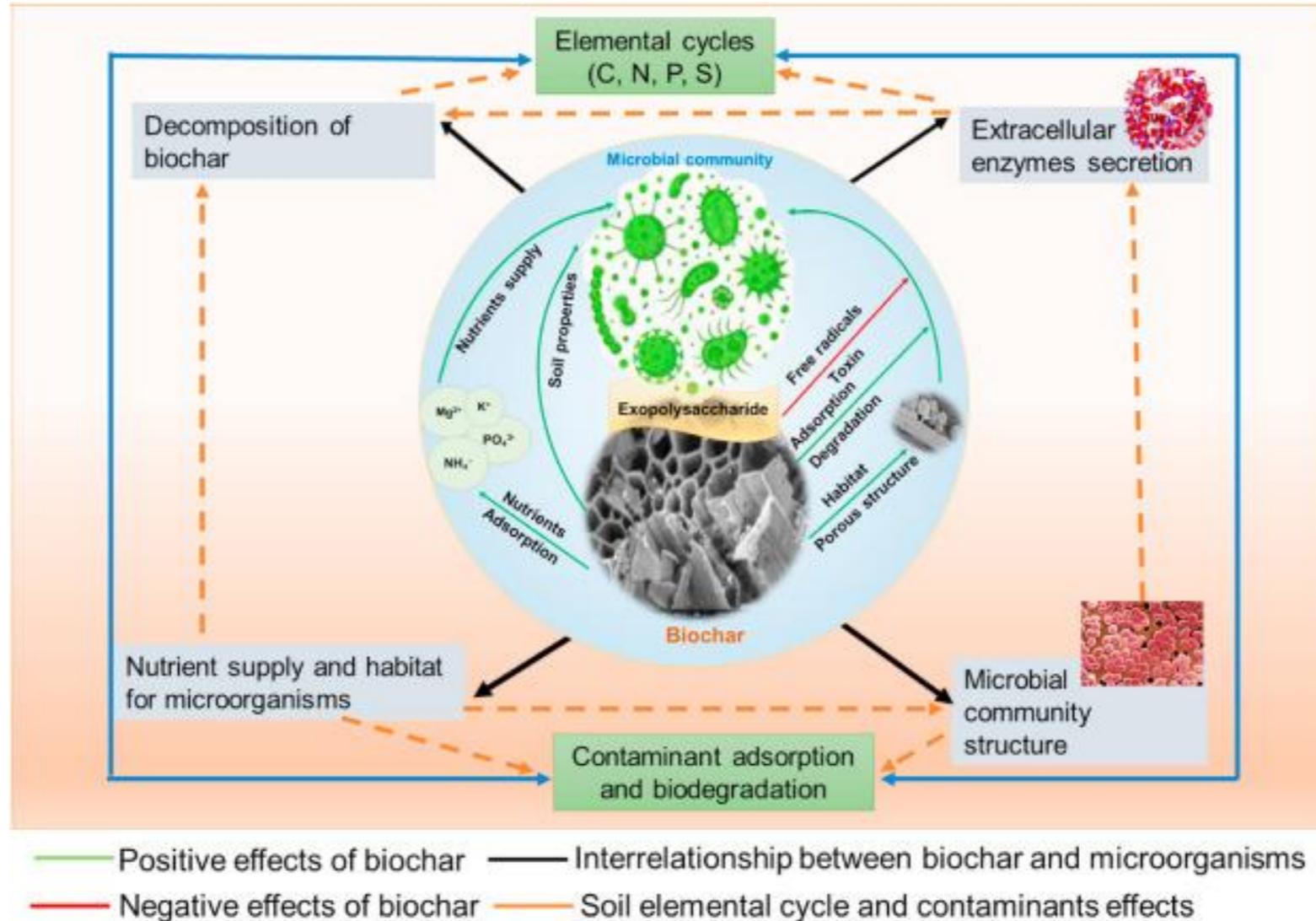
Rys. 17. A) Aktywność metaboliczna bakterii w glebie użyźnionej biowęgłem względna liczebność funkcji bakterii, B) wzorce troficzne grzybów, C) Względna liczebność grzybów.

stymulacja mikroorganizmów degradujących zanieczyszczenia (np. pestycydy, PAEs)



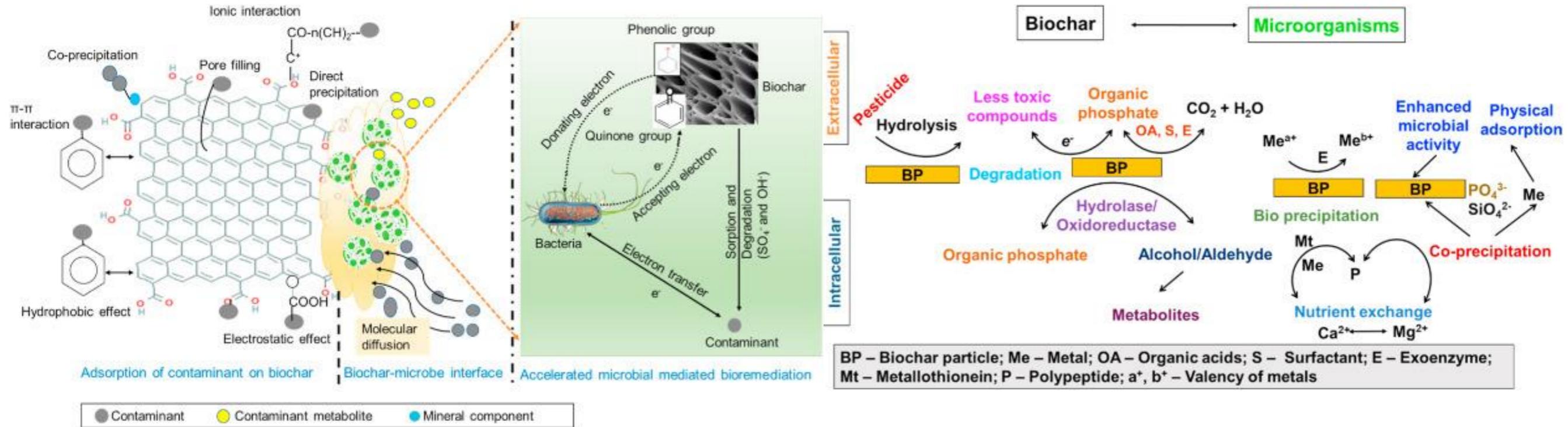
Rys. 18. Biowęgiel jako miejsce kolonizacji przez A) bakterie i B) grzyby w glebie zanieczyszczonej ftalanami.

interakcja biowęgla - mikroorganizmy



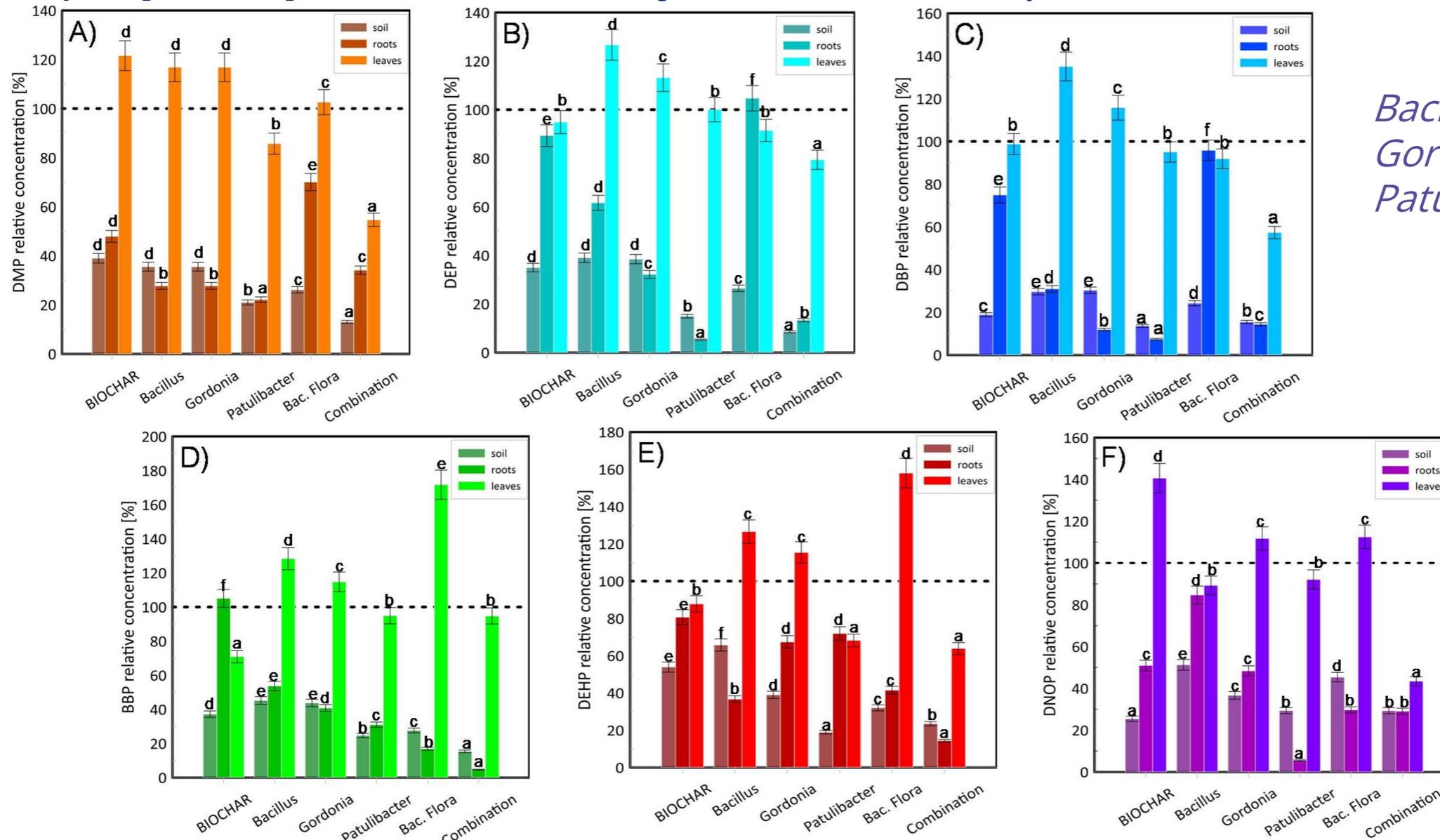
Rys. 19. Mechanizm interakcji biowęgla z mikroorganizmami i ich wpływ na środowisko.

interakcje biowęgla - mikroorganizmy



Rys. 20. Bioremediacja zanieczyszczeń za pomocą biowęgla poprzez wymianę elektronów (w przypadku związków organicznych) lub bioprecypitację (w przypadku metaloidów) pod wpływem zaadsorbowanych pozakomórkowych enzymów i substratów na powierzchni biowęgla.

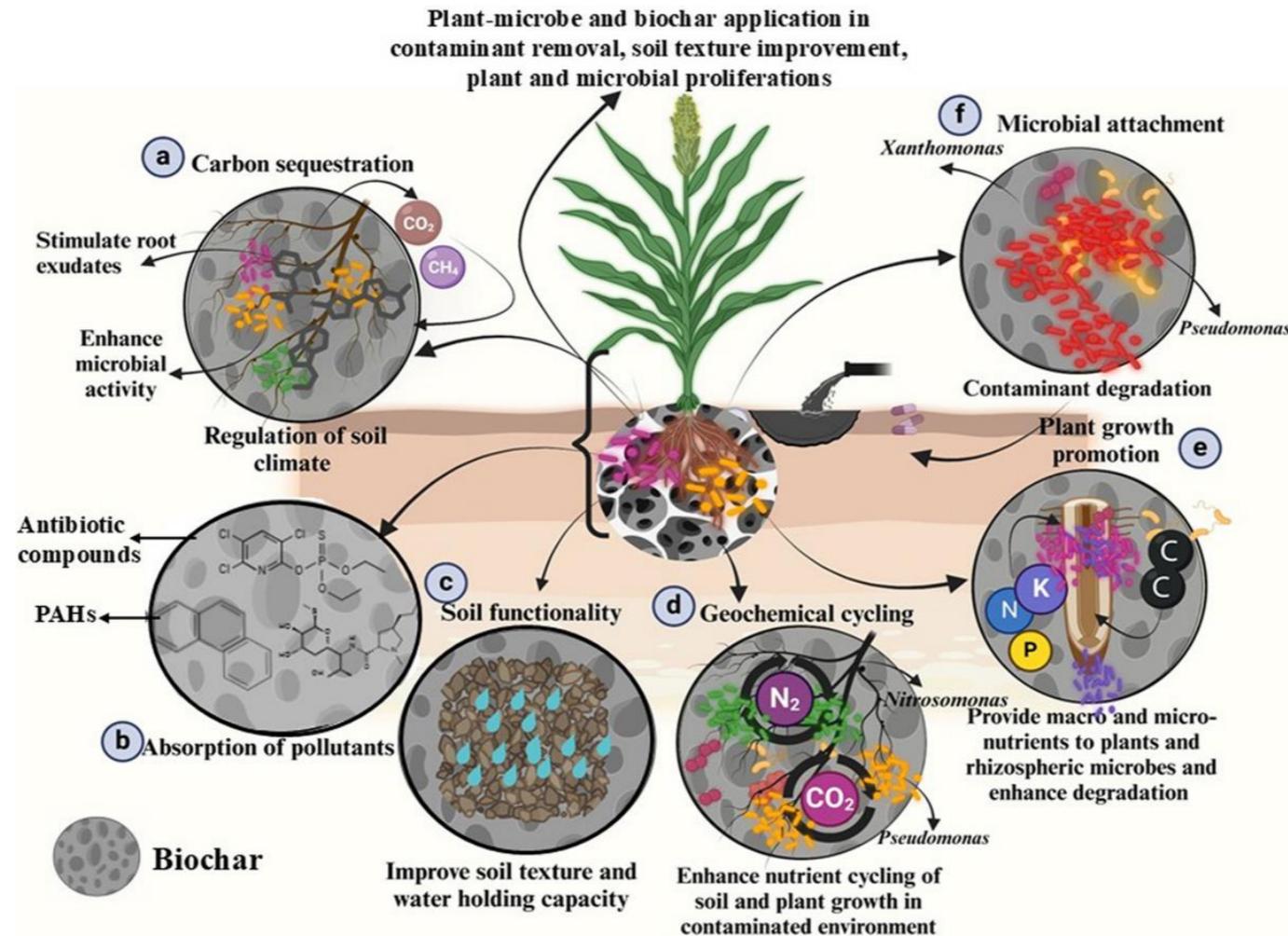
przykłady: immobilizacja bakterii na powierzchni biowęgla



Bacillus subtilis,
Gordonia phthalatica,
Patulibacter brassicae,

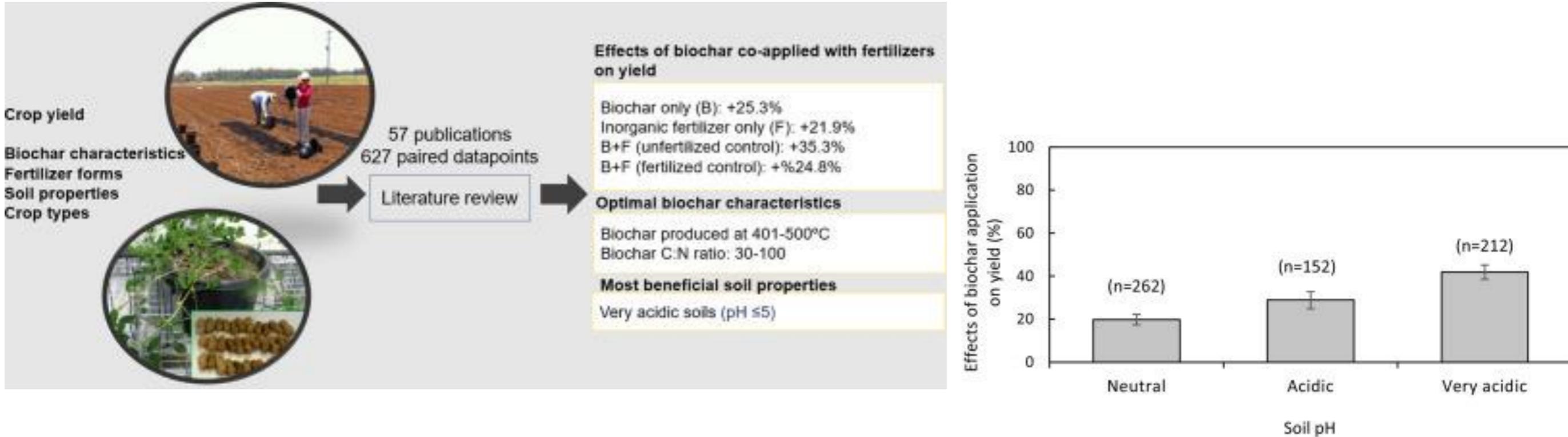
Rys. 21. Względne stężenie ftalanów A) DMP, B) DEP, C) DBP, D) BBP, E) DEHP, F) DNOP w glebie, korzeniach i liściach sałaty. Linia przerywana przy 100% oznacza zawartość ftalanów w glebie zanieczyszczonej. 23

biowęgiel + roślina + mikroorganizmy = remediacja gleb zanieczyszczonych



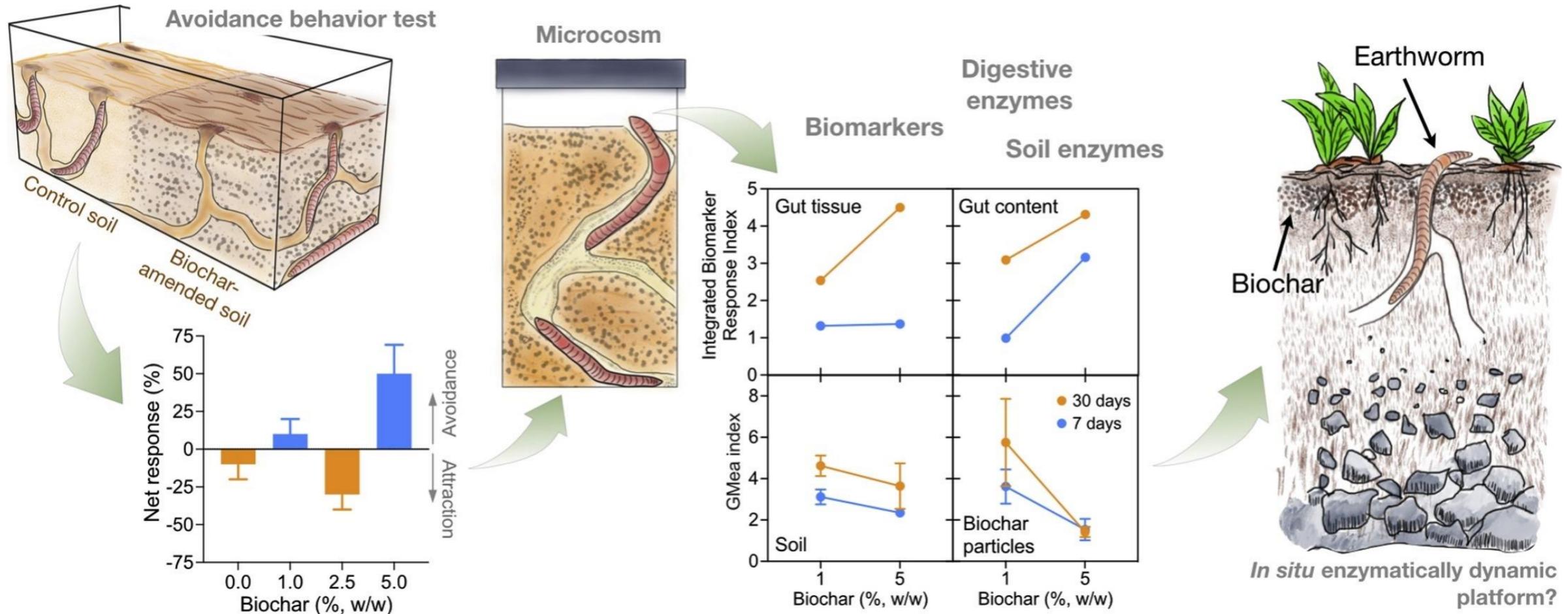
Rys. 22. Wpływ biowęgla na fitoremediację zanieczyszczonych gleb.

wpływ biowęgla na wzrost i plonowanie roślin



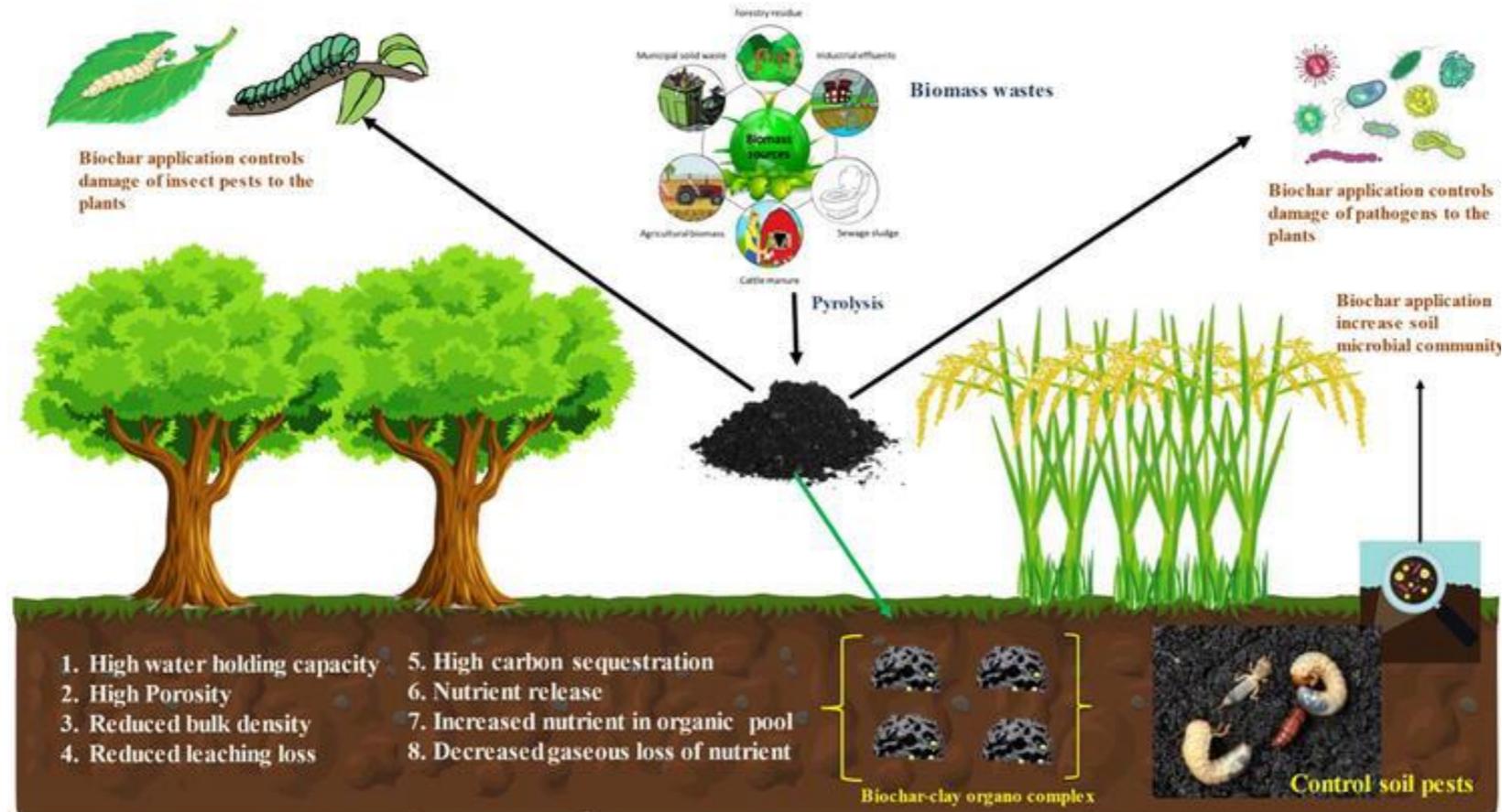
Rys. 23. Meta-analiza danych literaturowych dotycząca wpływu biowęgla na plonowanie.

wpływ pośredni na organizmy glebowe (dżdżownice, nicienie)



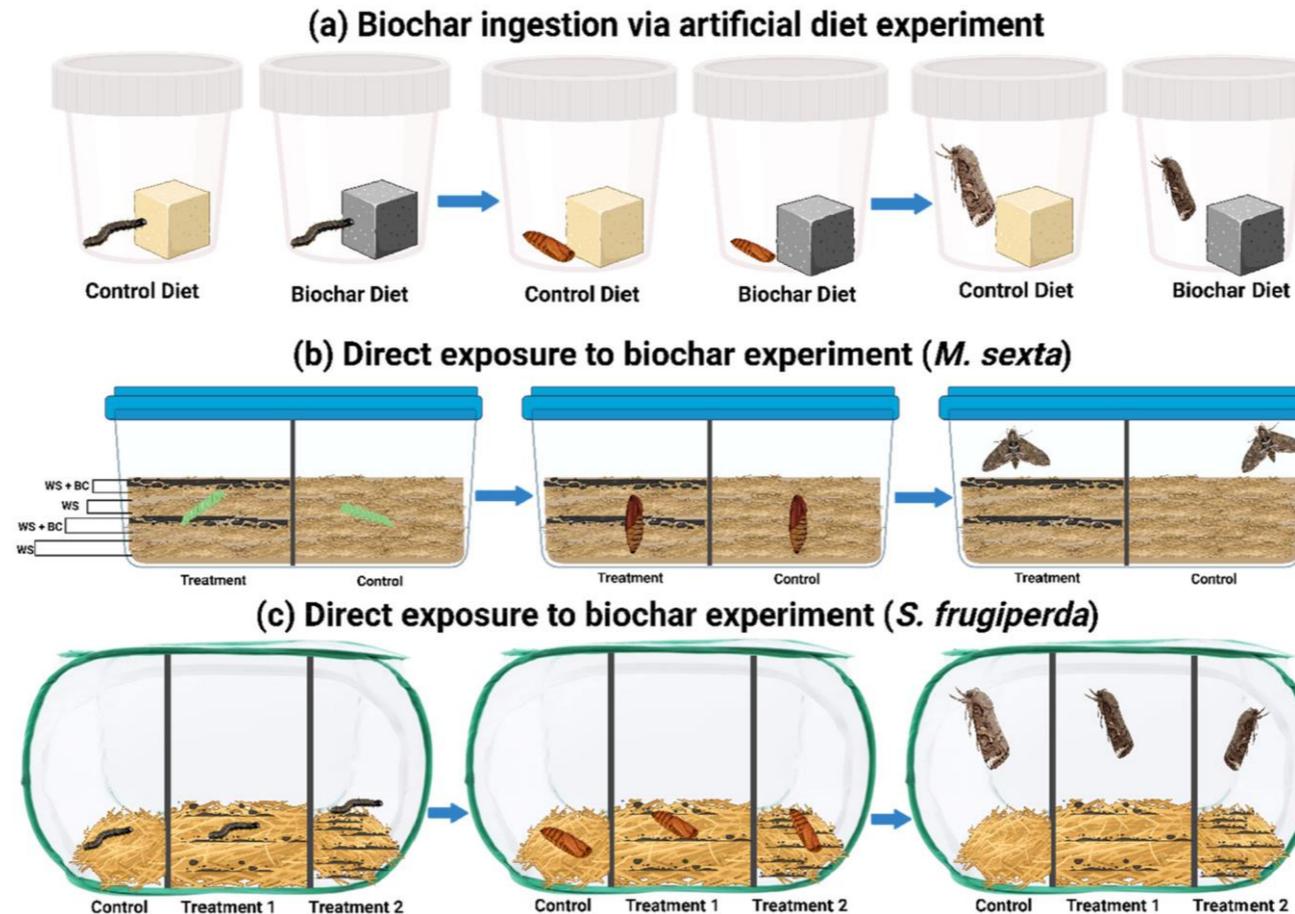
Rys. 24. Wpływ biowęgla na *Lumbricus terrestris*.

wpływ pośredni na organizmy glebowe (dżdżownice, nicienie)

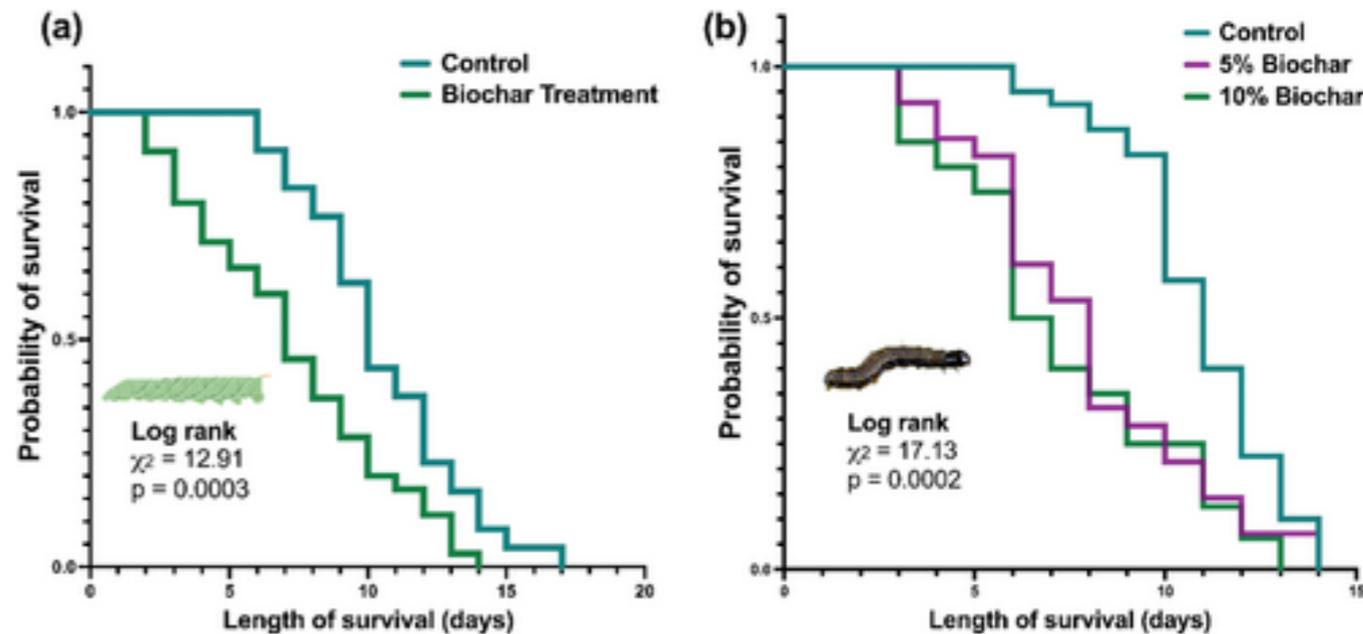
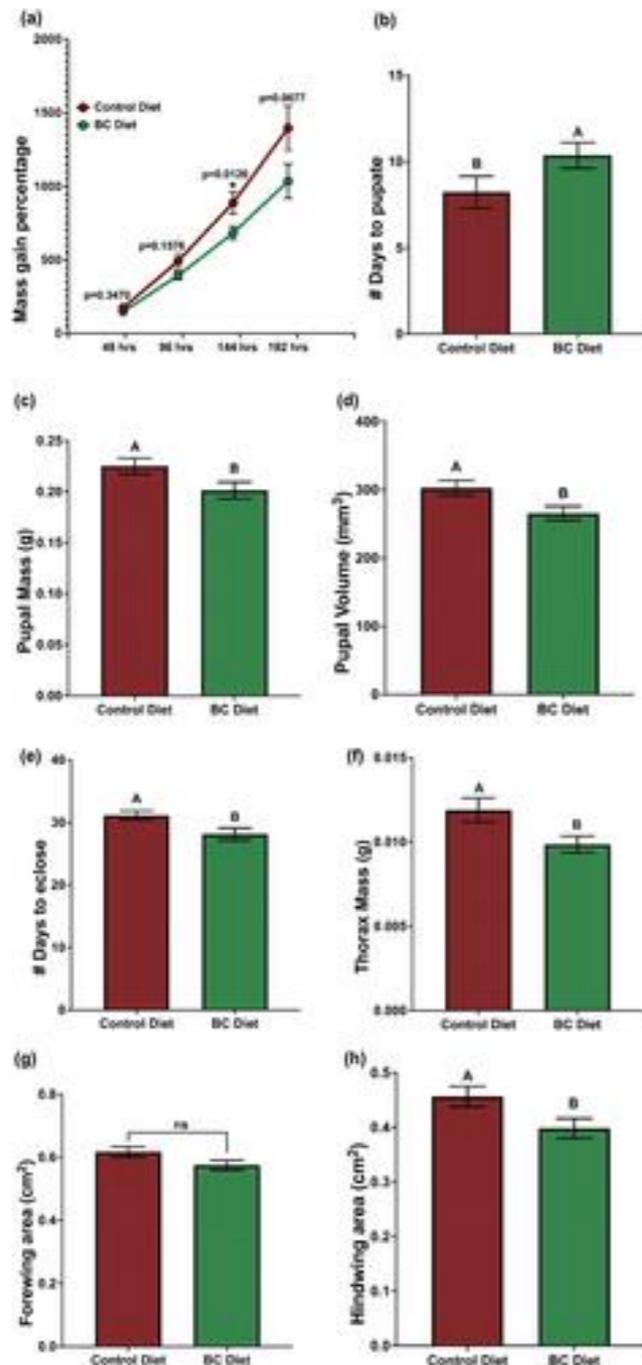


Rys. 25. Rola biowęgla na kontroli szkodników gleb.

biowęgiel hamuje wzrost, przepoczwarczenie i wylęg u owadów roślinożernych przepoczwarczających gąsienica tytoniowa (*Manduca sexta*) i ćma jesienna (*Spodoptera frugiperda*)



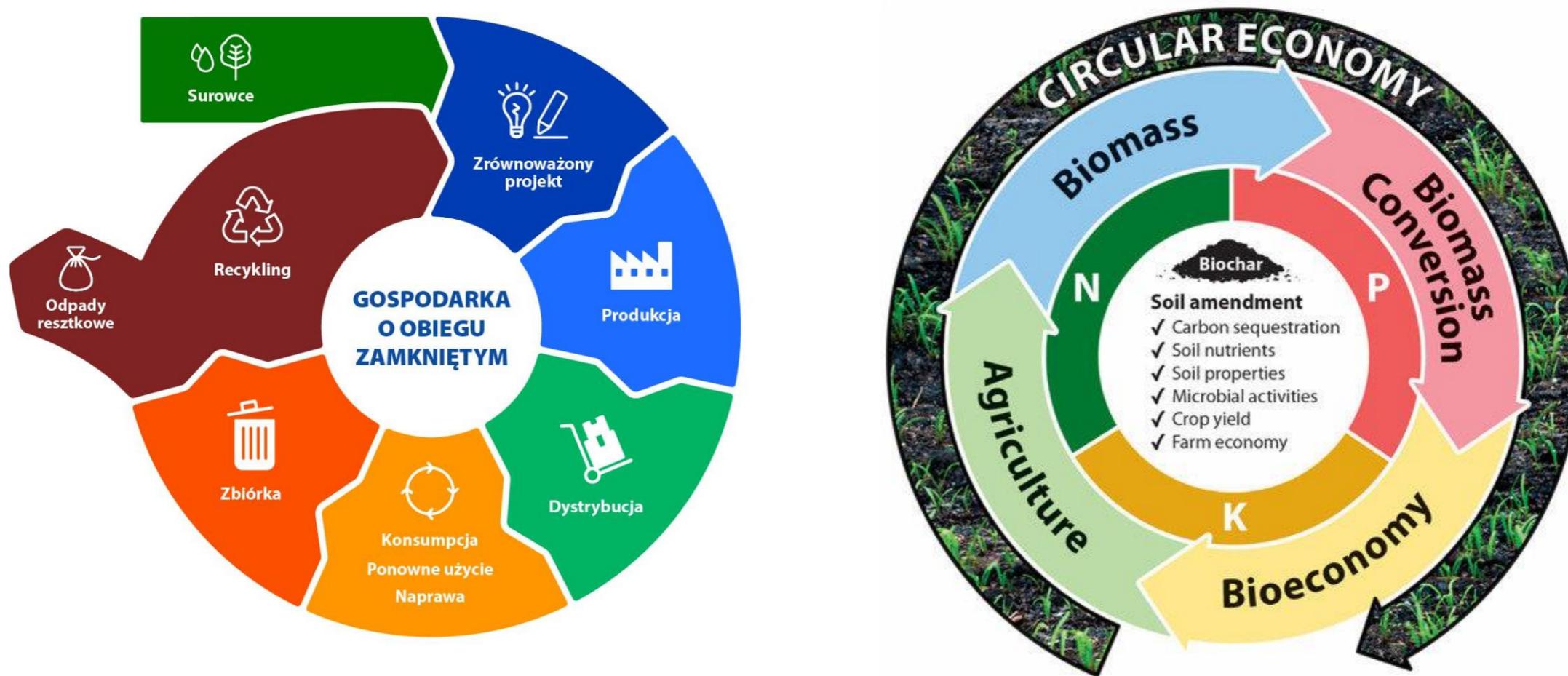
Rys. 26. Wpływ biowęgla (5%) na gąsienicę tytoniową (*Manduca sexta*) i ćmę jesienną (*Spodoptera frugiperda*).



Rys. 28. Krzywe przeżycia Kaplana-Meiera przedstawiające długość przeżycia (w dniach) (a) *M. sexta* i (b) FAW w odpowiedzi na różne rodzaje biowęgla.

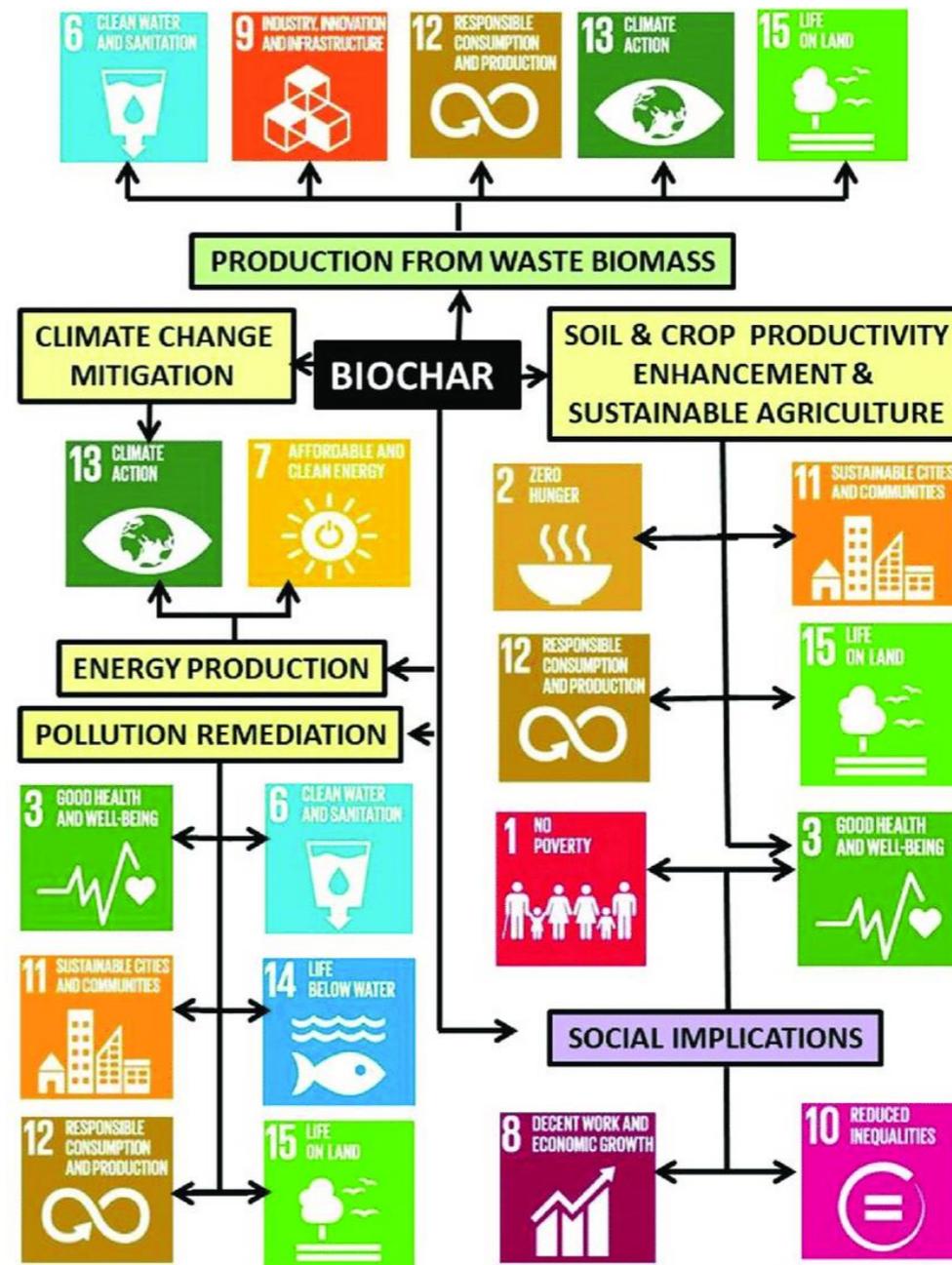
Rys. 27. a) Procentowy przyrost masy gąsienic motyla FAW w drugim stadium larwalnym, (b) liczbę dni do przepoczwarczenia, (c) masę poczwarki, (d) objętość poczwarki, (e) liczbę dni do wylęgu, (f) masę tułowia, (g) powierzchnię przedniego skrzydła i (h) powierzchnię tylnego skrzydła motyla FAW.

biowęgiel w rolnictwie regeneracyjnym i gospodarce o obiegu zamkniętym



Rys. 29. Gospodarka o obiegu zamkniętym i udział biowęgla w GOZ.

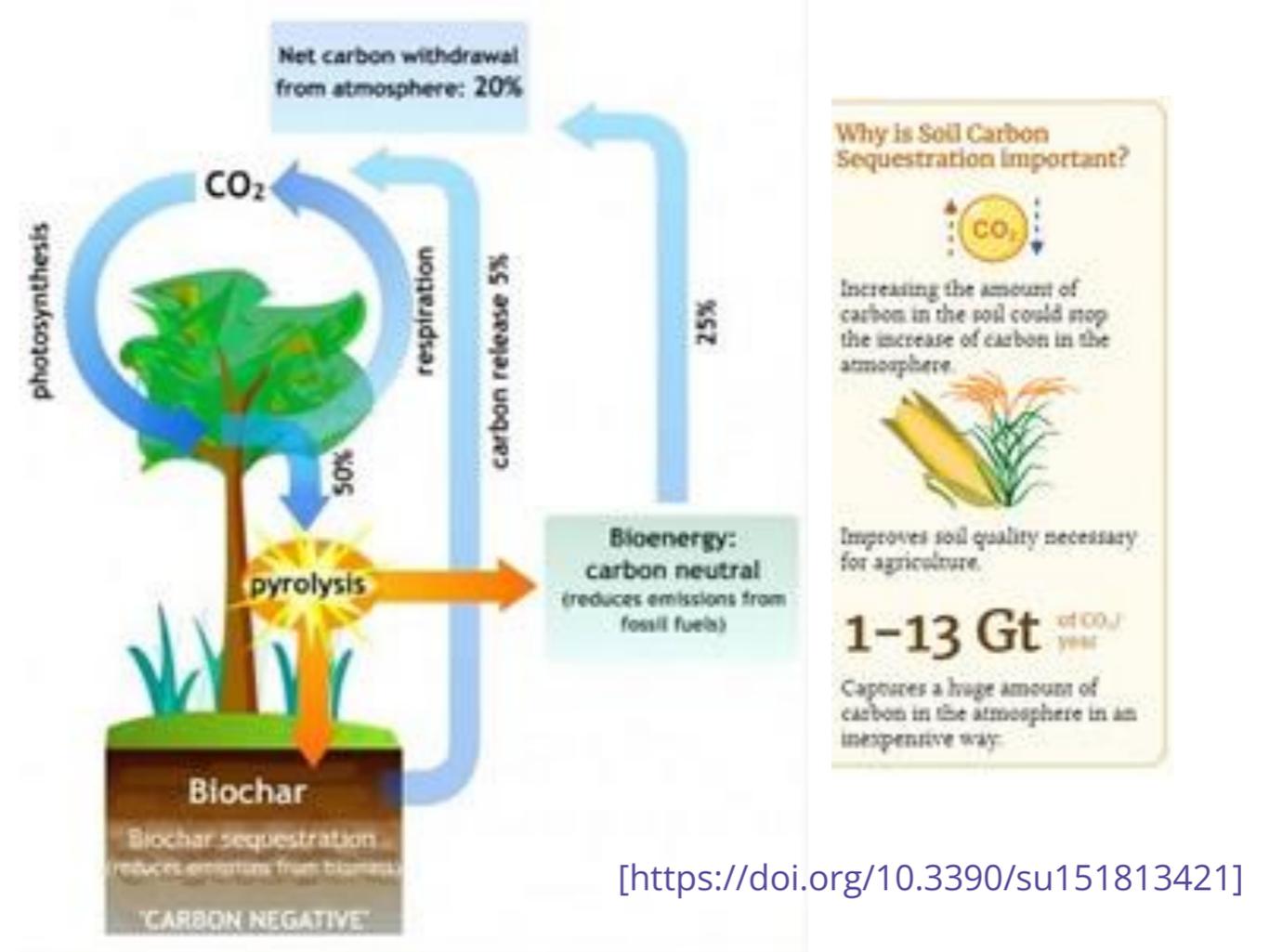
Biowęgiel=
realizacja 14!
z 16 Celów
Zrównoważonego
Rozwoju



Rys. 30. Biowęgiel a cele zrównoważonego rozwoju.

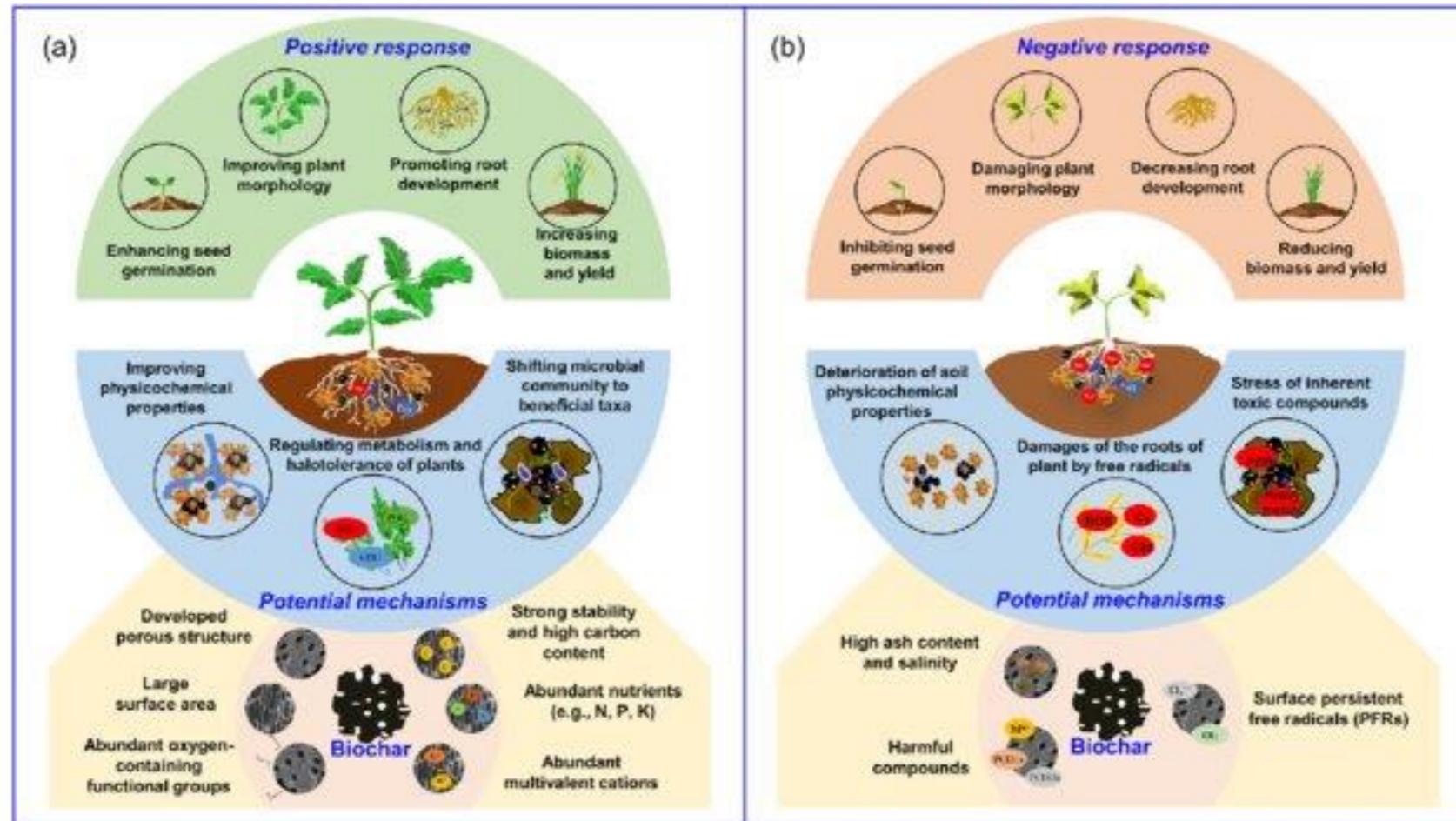
wpływ biowęgla na stabilność ekosystemów i adaptację do zmian klimatycznych

- 50% C z biomasy magazynuje się w biowęglu
- gleby wzbogacone biowęgłem zapewniają również 50-80% redukcję emisji NO_x
- Biowęgiel jest ujemny pod względem emisji CO_2
- = biowęgiel odwraca depozycję CO_2 z paliw kopalnych w atmosferze, usuwając węgiel z aktywnego cyklu i wiążąc go w nieaktywnym cyklu węglowym



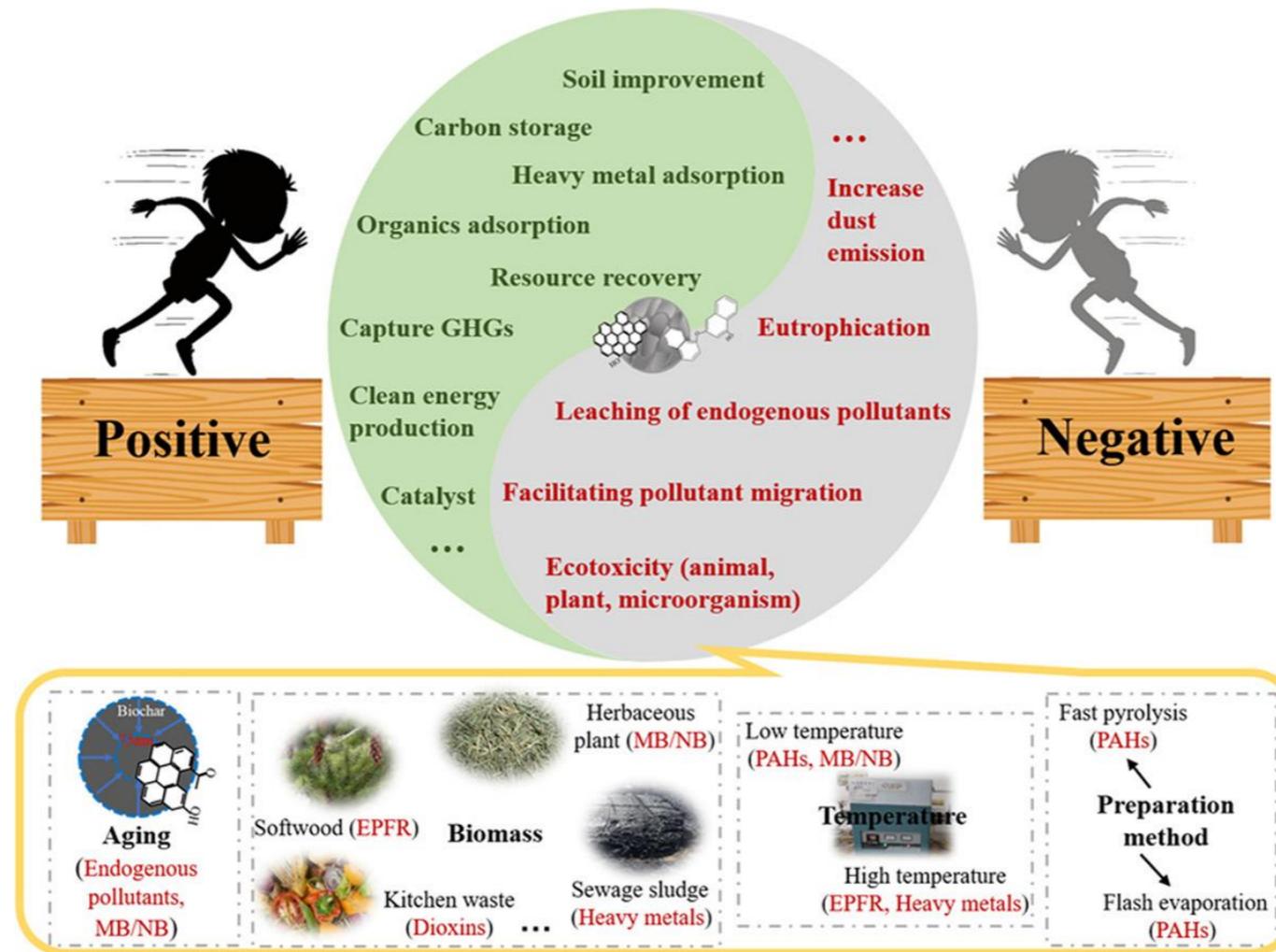
Rys. 31. Udział biowęgla w cyklu geochemicznym węgla.

ale czy zawsze?



Rys. 32. Pozytywny a) i negatywny b) wpływ biowęgla na rośliny rosnące w glebie zasolonej.

potencjalne zagrożenia (WWA, metale ciężkie, ROS w procesie starzenia)

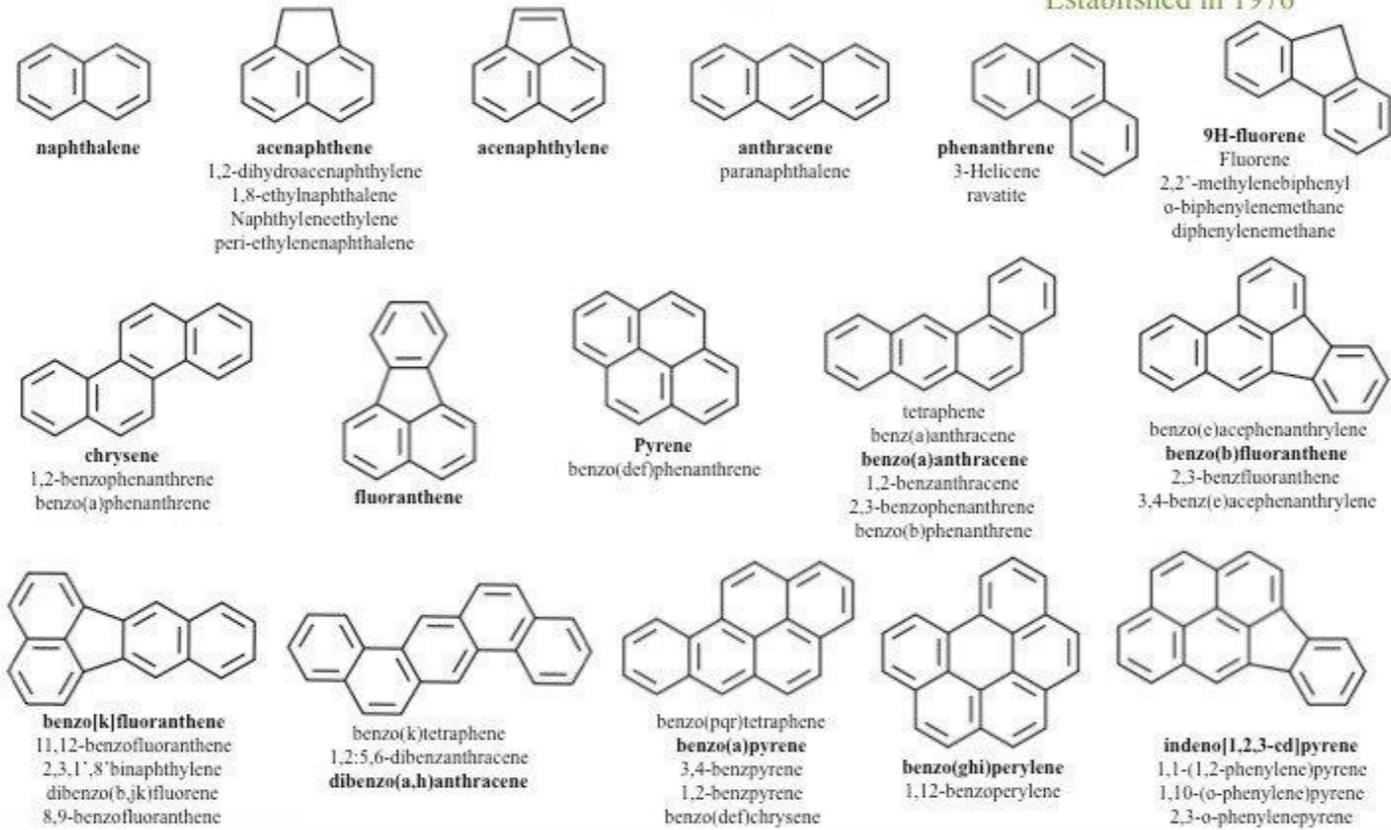


Rys. 33. Efekty pozytywne i negatywne biowęgla.

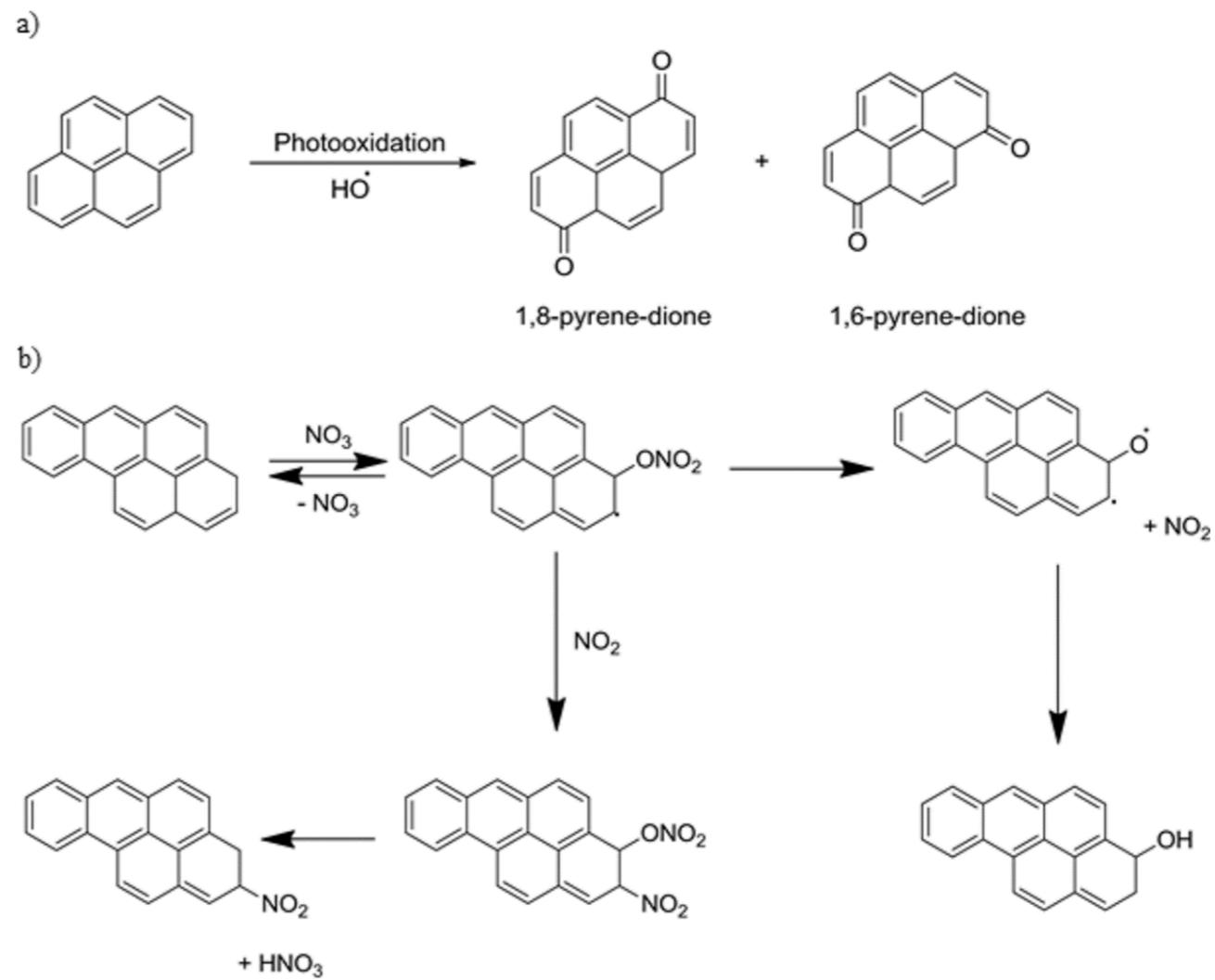
[<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126611>]

US EPA 16 Priority Pollutants PAH Compounds

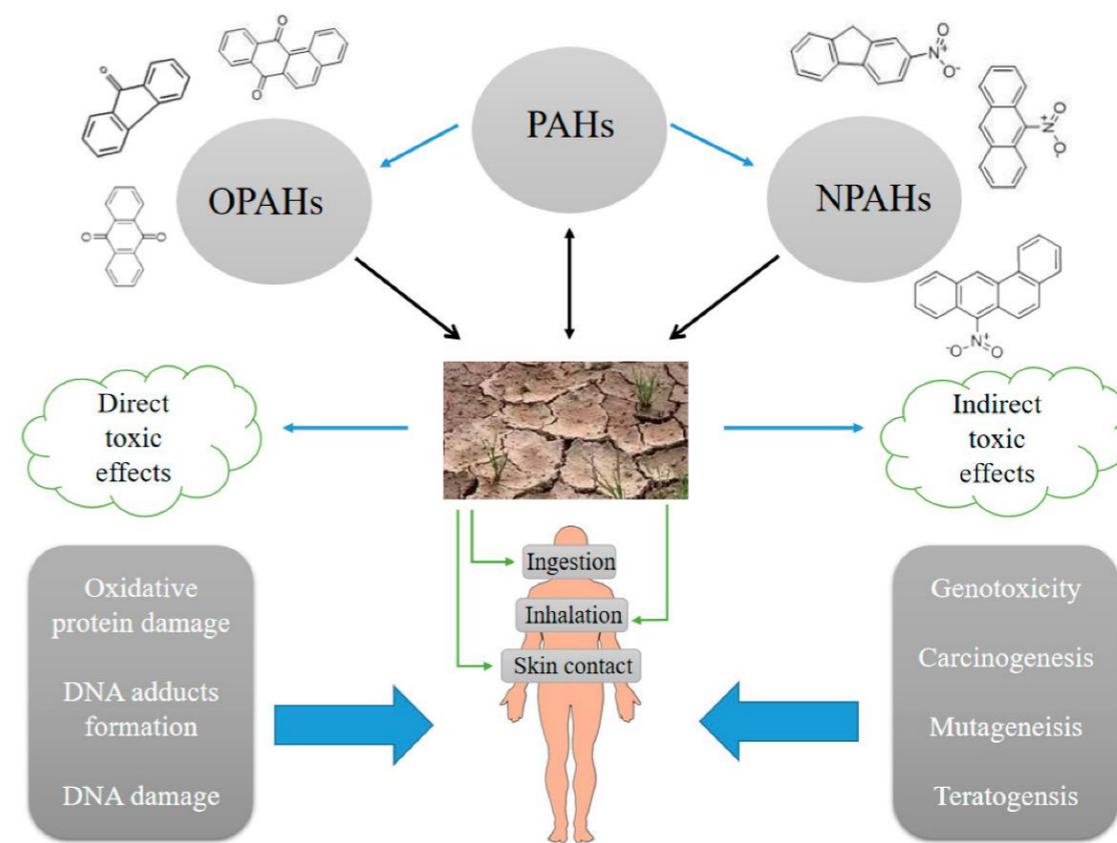
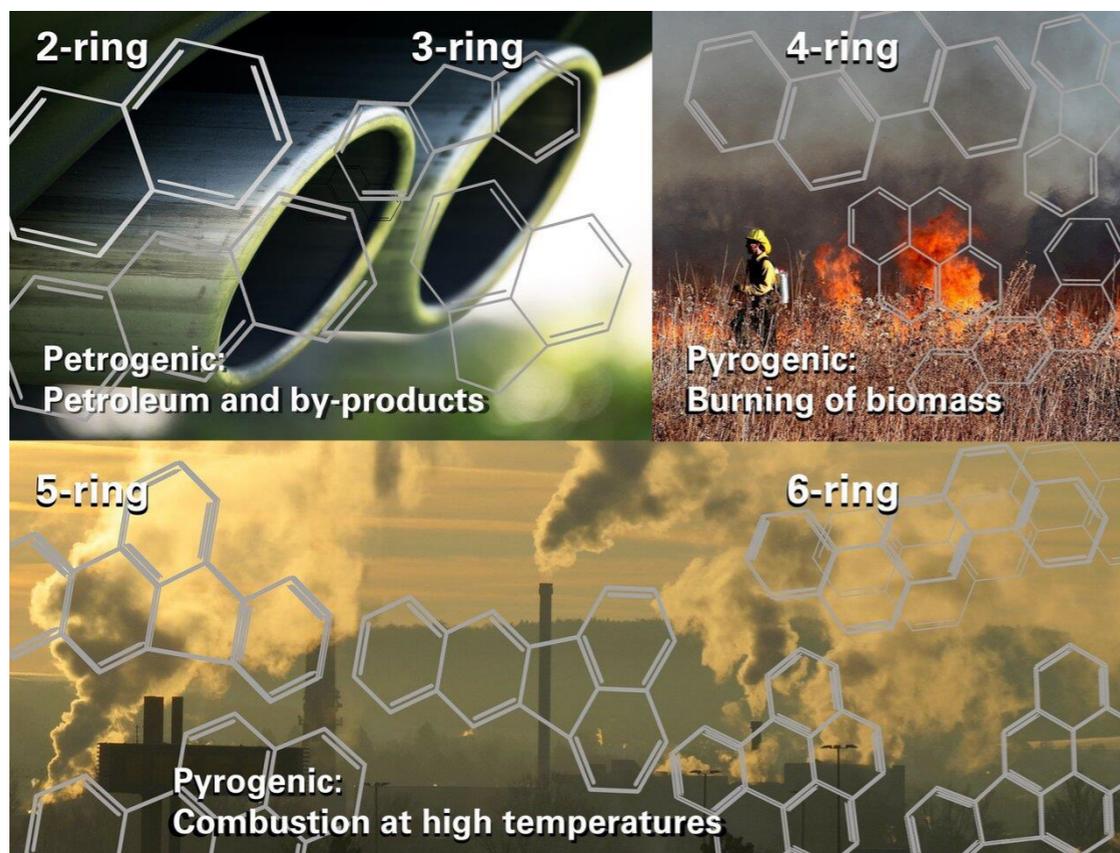
*Established in 1976



ale...



toksyczność



Rys. 34. Toksyczność pochodnych WWA.

Zawartość całkowita WWA

- Σ16 WWA US EPA
- International Biochar Initiative 6-300 mg kg⁻¹ s.m.
- European Biochar Certificate 4-12 mg kg⁻¹ s.m.
- A pochodne WWA?



biodostępność

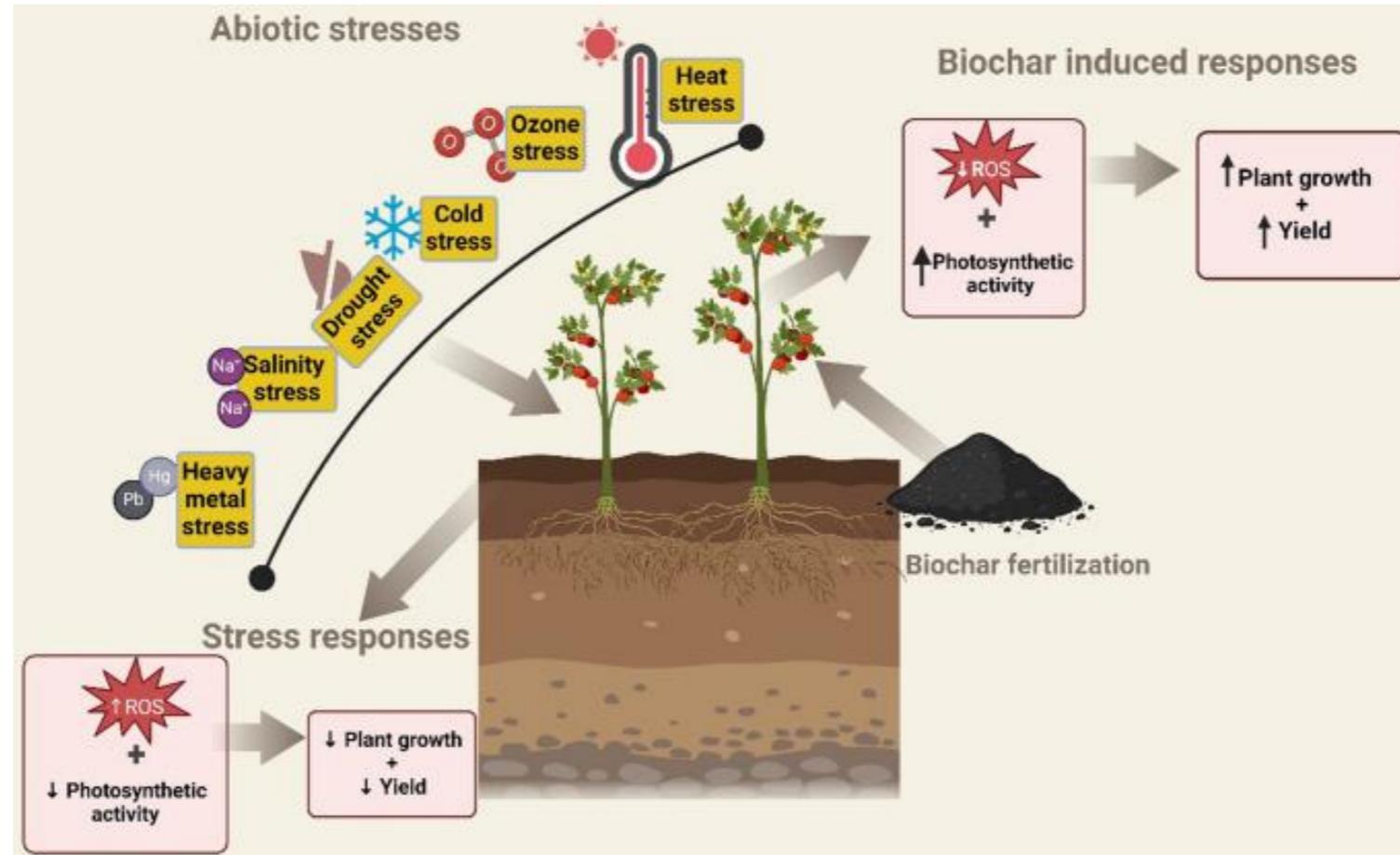
- Tylko formy biodostępne mogą oddziaływać z organizmami żywymi i wykazywać toksyczność



Tabela 3. Całkowite i biodostępne WWA i ich pochodne.

biowęgiel	biomateriał	Całkowite WWA [µg/g]	Całkowite pochodne WWA [µg/g]	Biodostępne WWA [ng/L]	Biodostępne pochodne WWA [ng/L]
BCCH500	Osad ściekowy	123.79 ± 5.67	16.32 ± 0.75	9.060 ± 0.410	0.394 ± 0.018
BCCH600		120.70 ± 5.53	44.58 ± 2.04	9.044 ± 0.524	0.930 ± 0.047
BCCH700		116.93 ± 5.35	35.62 ± 1.63	9.398 ± 0.481	0.885 ± 0.056
BCKZ500		159.78 ± 7.32	2.30 ± 0.11	8.580 ± 0.360	0.224 ± 0.011
BCKZ600		188.47 ± 8.63	4.86 ± 0.22	10.13 ± 0.46	0.536 ± 0.025
BCKZ700		190.13 ± 8.71	2.82 ± 0.13	16.07 ± 0.60	0.386 ± 0.019
BCZ500		90.16 ± 4.13	2.72 ± 0.13	33.50 ± 1.22	0.806 ± 0.028
BCZ600		125.83 ± 5.76	5.30 ± 0.24	39.98 ± 1.46	1.903 ± 0.070
BCZ700		110.04 ± 5.04	4.01 ± 0.18	38.33 ± 1.40	0.940 ± 0.034
BCSI600		150.04 ± 6.87	12.43 ± 0.57	3.33 ± 0.15	0.427 ± 0.20
BCS500	Słoma pszeniczna	124.53 ± 5.70	22.81 ± 1.04	3.53 ± 0.18	0.177 ± 0.007
BCS600		145.21 ± 6.65	28.40 ± 1.30	2.56 ± 0.11	0.831 ± 0.030
BCS700		65.37 ± 2.99	19.16 ± 0.88	1.67 ± 0.07	0.625 ± 0.026
BCW500	wierzba	151.55 ± 6.94	1.48 ± 0.07	3.51 ± 0.20	0.248 ± 0.011
BCW600		181.08 ± 8.29	1.92 ± 0.09	3.17 ± 0.15	0.478 ± 0.022
BCW700		158.02 ± 7.24	4.31 ± 0.20	3.53 ± 0.17	0.480 ± 0.023
BCA600	słonecznik	151.47 ± 6.94	7.64 ± 0.35	4.45 ± 0.24	0.51 ± 0.02
BCD600	Odpady drzew liściastych	57.36 ± 2.63	<LOD	2.22 ± 0.11	<LOD
BCF600	Odpady drzew iglastych	134.01 ± 6.14	11.89 ± 0.54	3.67 ± 0.17	0.32 ± 0.02
BCUHS500	Pozostałości z biogazowni	157.42 ± 7.21	3.56 ± 0.16	33.07 ± 1.17	0.688 ± 0.024
BCUHS600		201.64 ± 9.23	5.62 ± 0.26	41.53 ± 1.52	0.883 ± 0.032
BCUHS700		140.52 ± 6.43	2.24 ± 0.10	28.07 ± 1.03	0.453 ± 0.017
BCKOS600		180.18 ± 8.25	3.42 ± 0.16	10.36 ± 0.38	0.217 ± 0.008
BCPIL600		187.31 ± 8.58	16.19 ± 0.74	10.38 ± 0.38	4.641 ± 0.170

biowęgiel w środowisku



Rys. 35. Wpływ procesów środowiskowych na glebę użyźnioną biowęgłem.

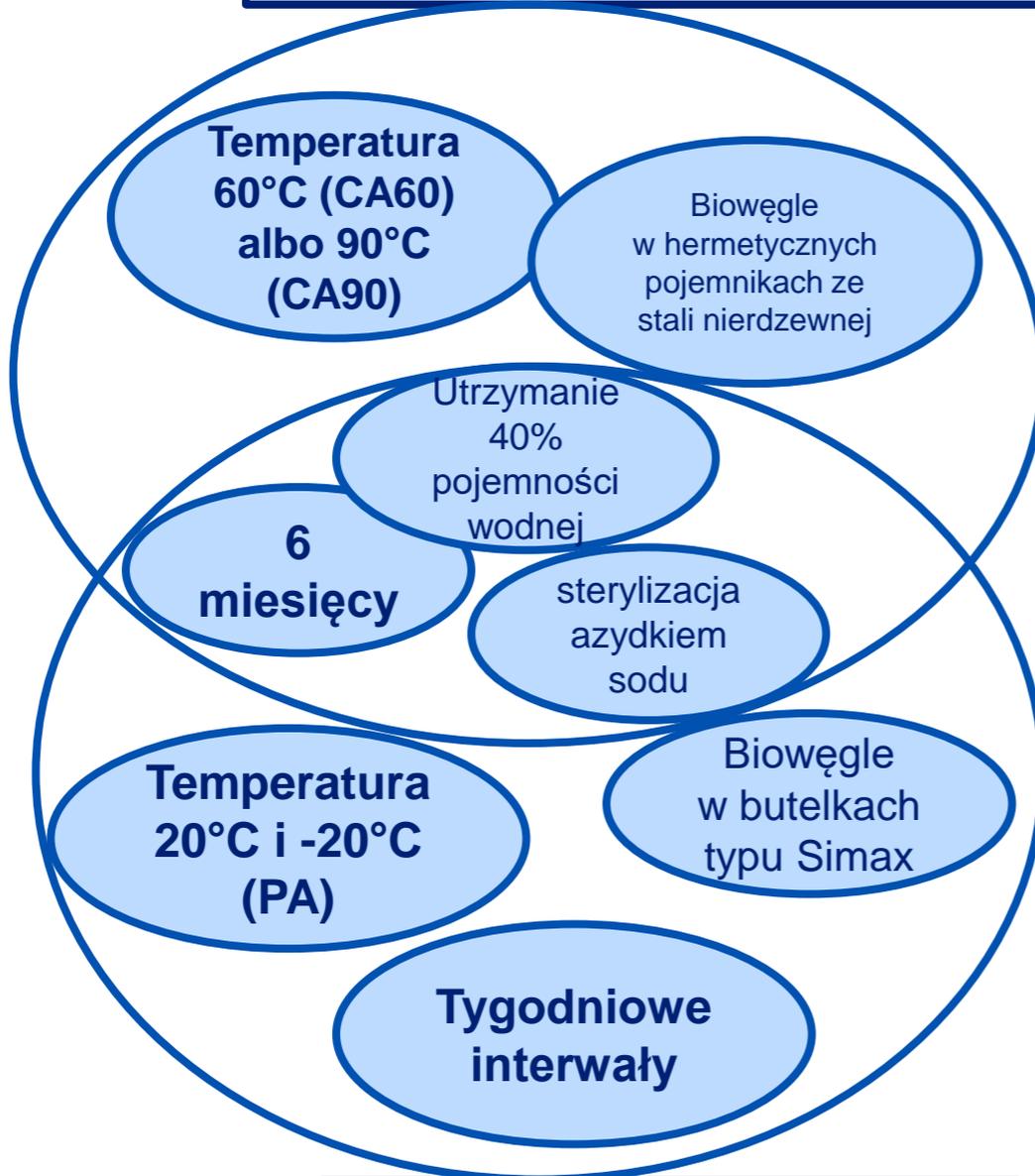
starzenie biowęgla



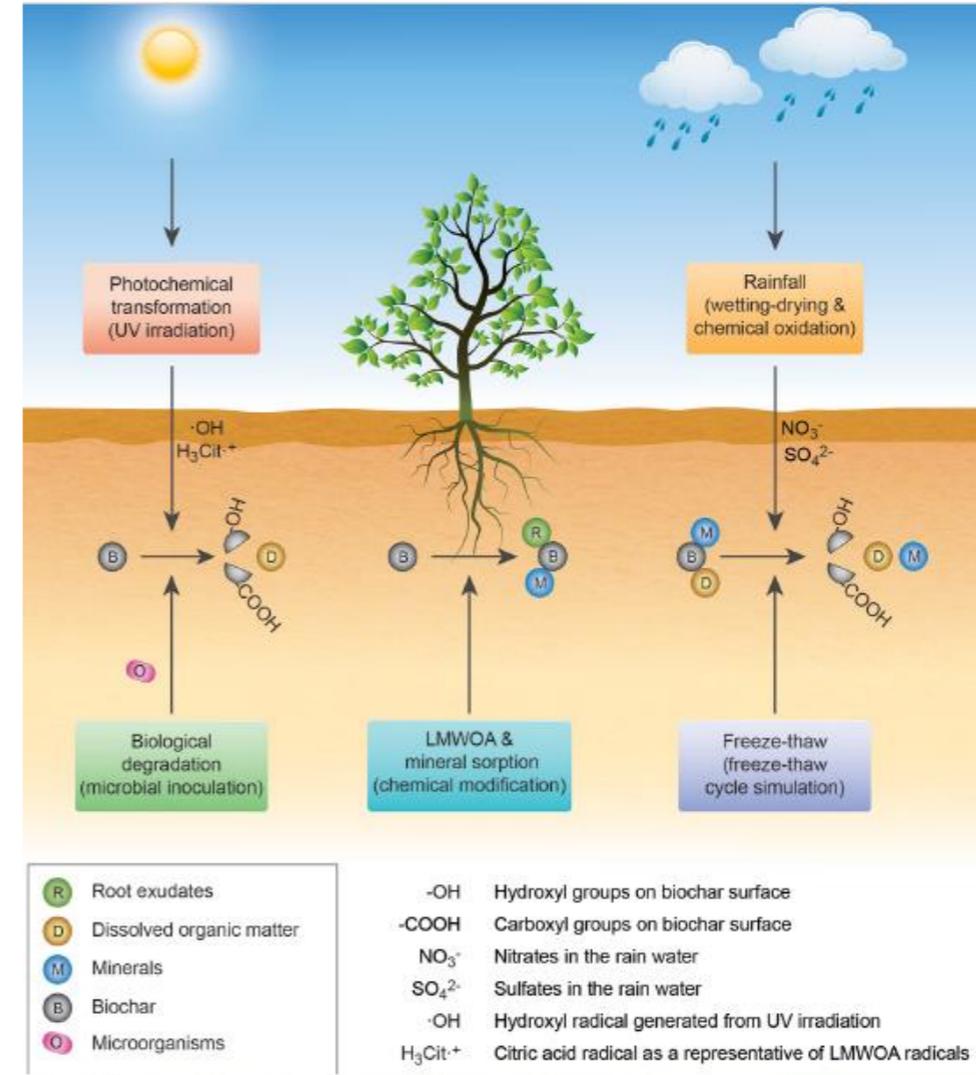
6 miesięcy

Starzenie chemiczne

Część eksperymentalna



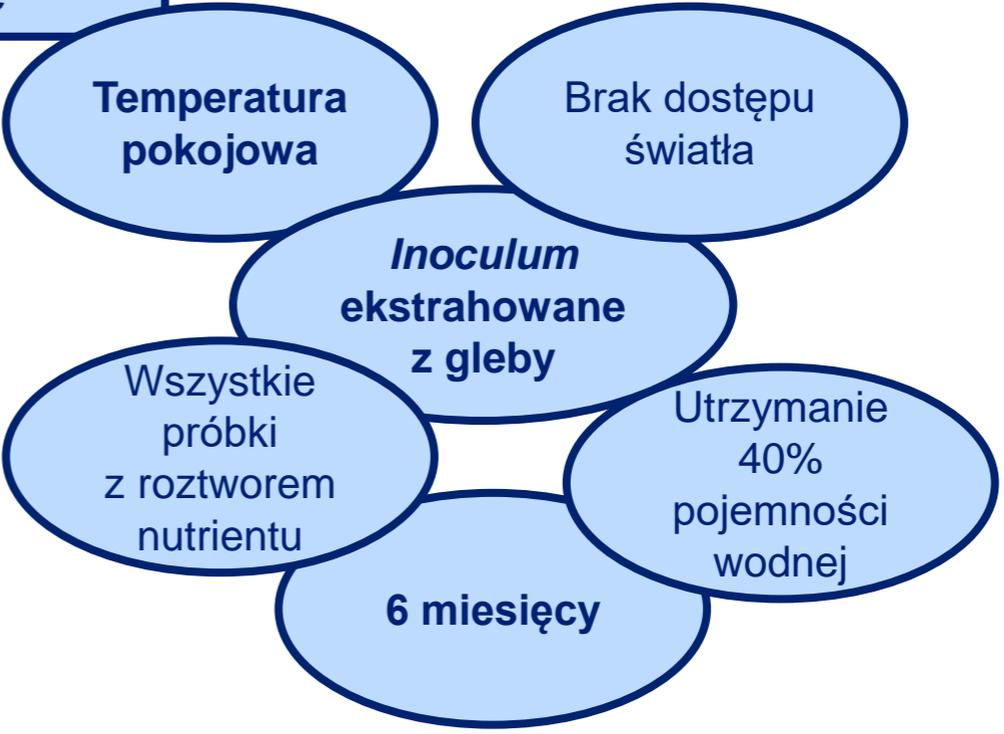
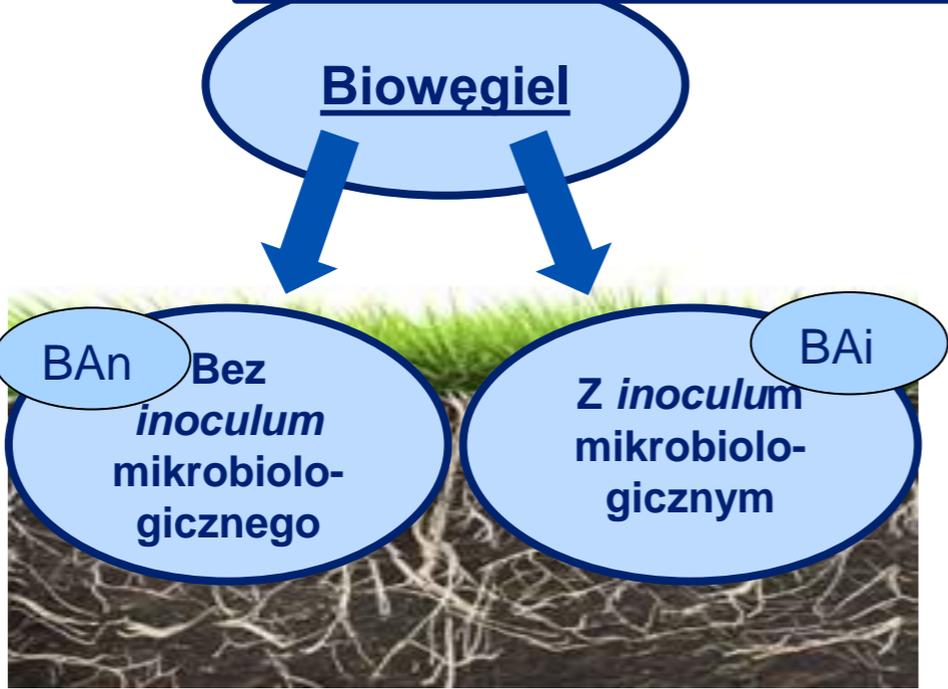
Starzenie fizyczne



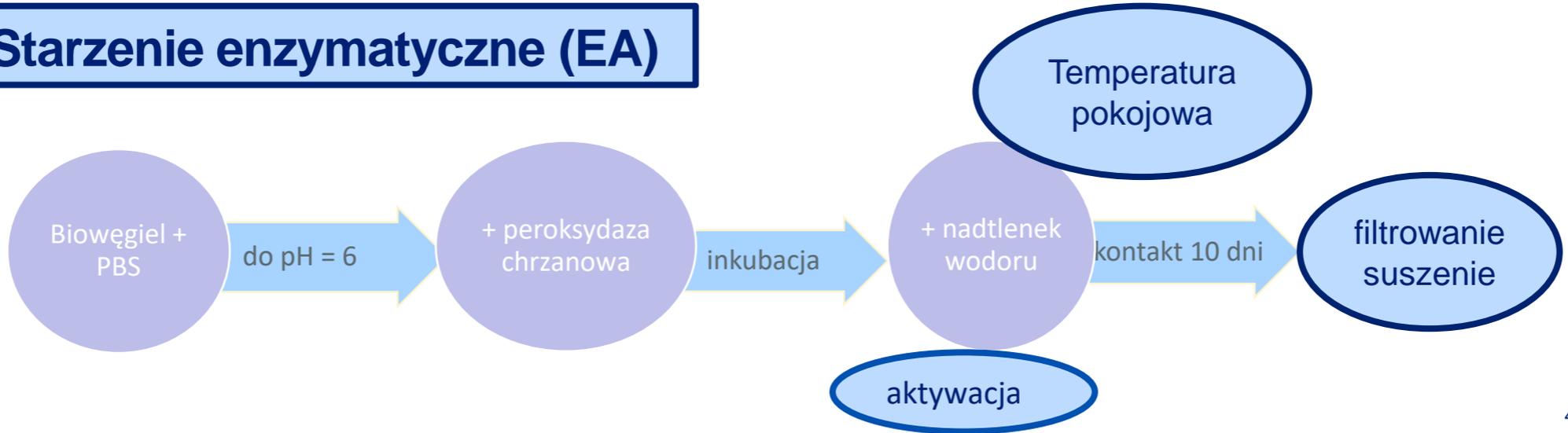
Rys. 36. Mechanizm starzenia biowęgla i konsekwencje sztucznego przyspieszonego starzenia.

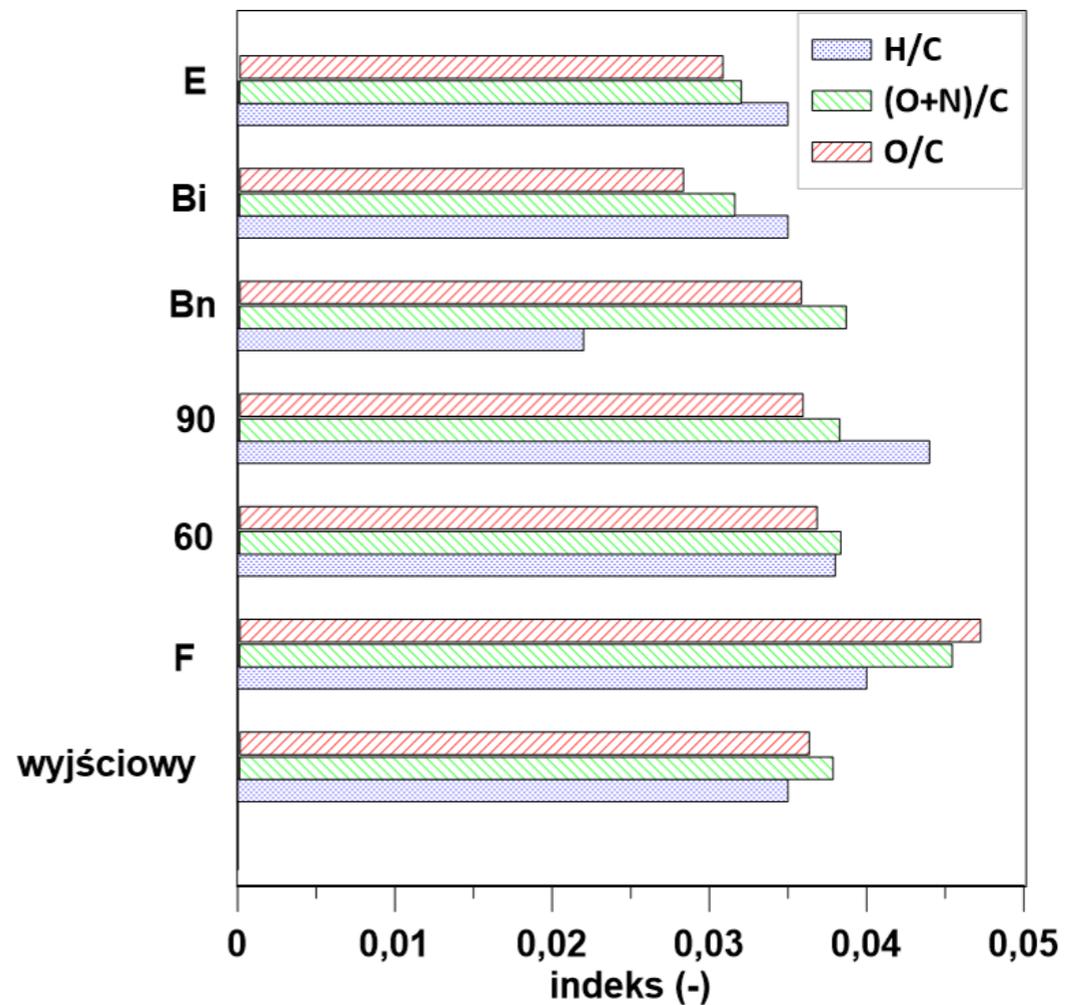
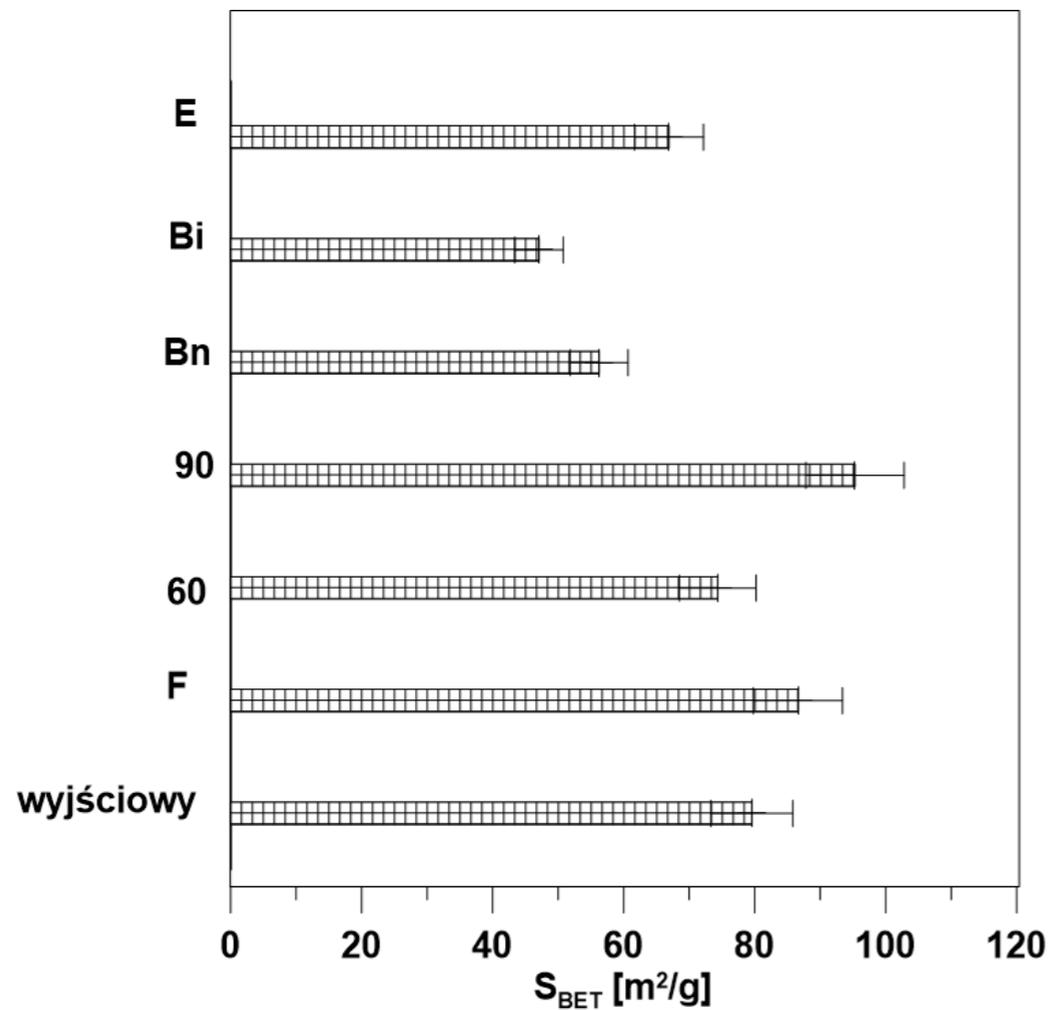
Część eksperymentalna

Starzenie biologiczne

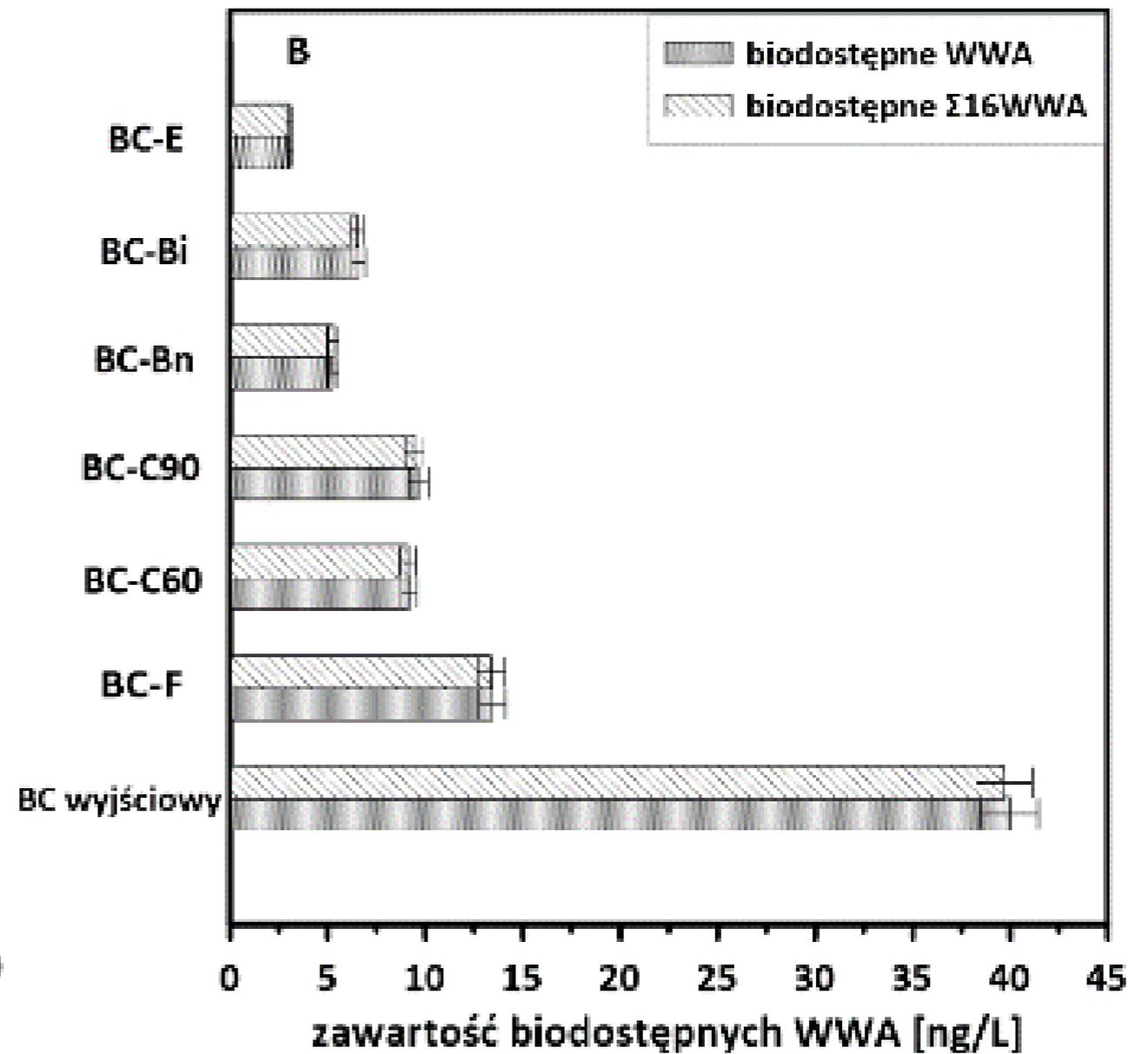
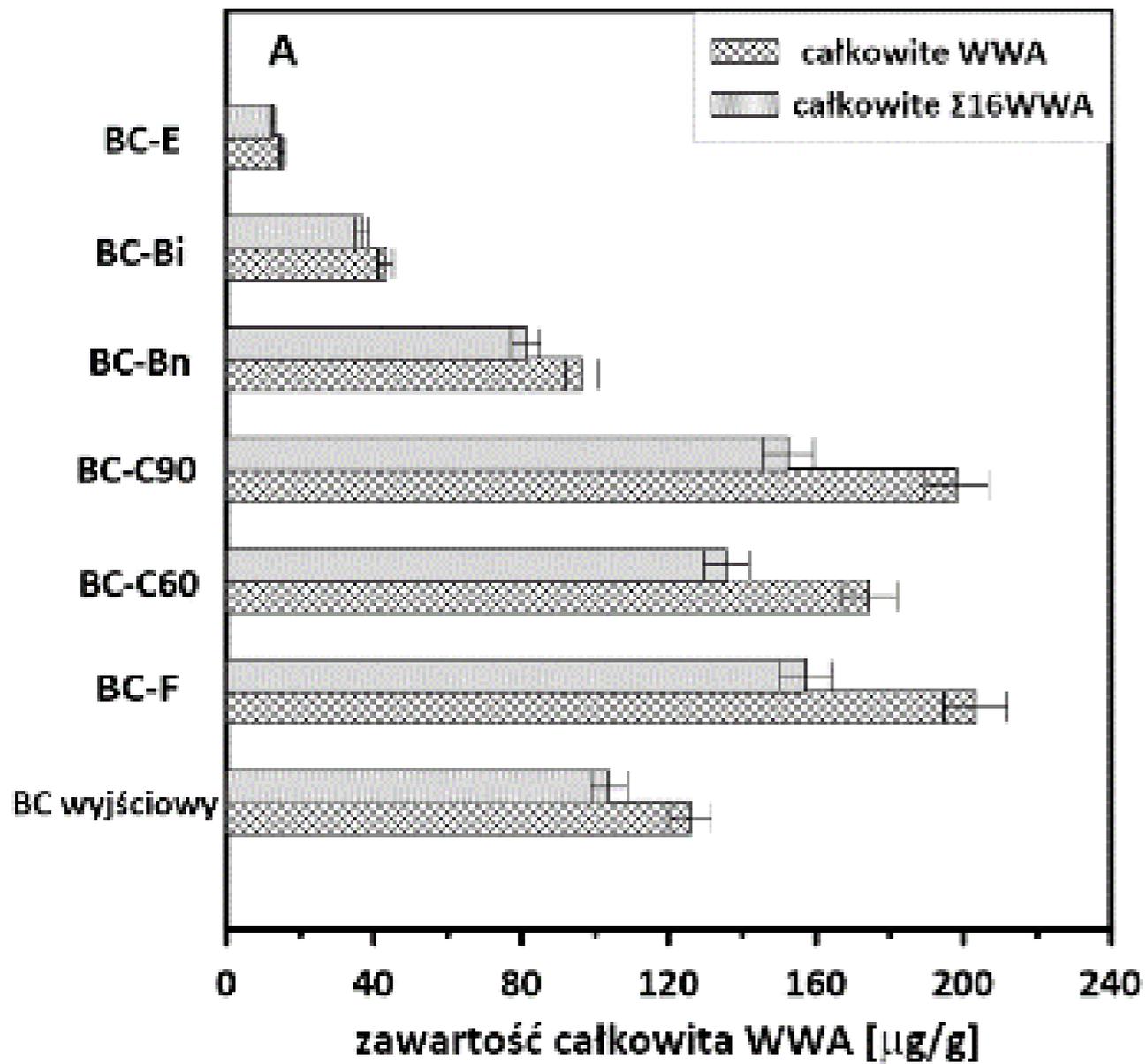


Starzenie enzymatyczne (EA)



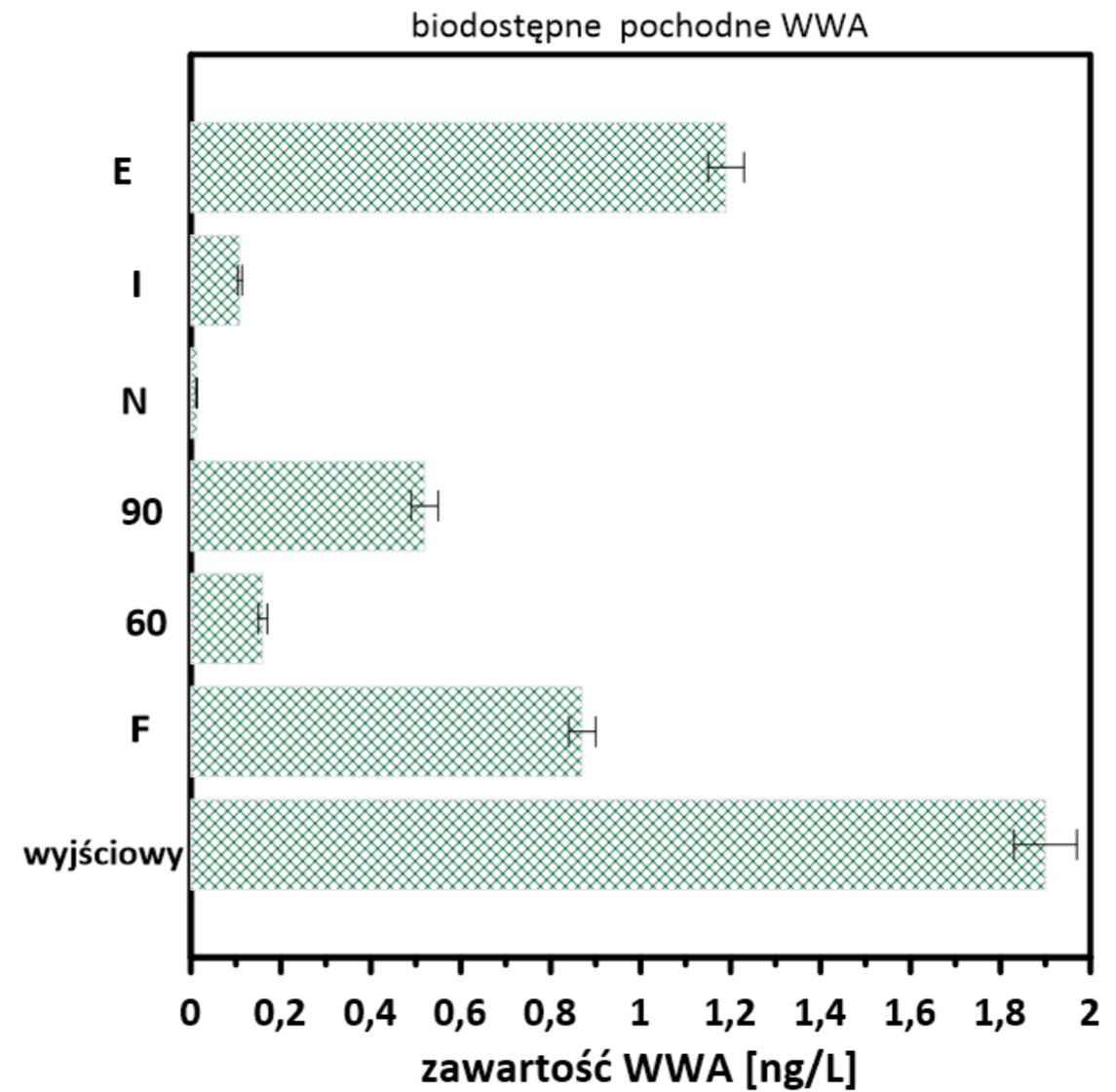
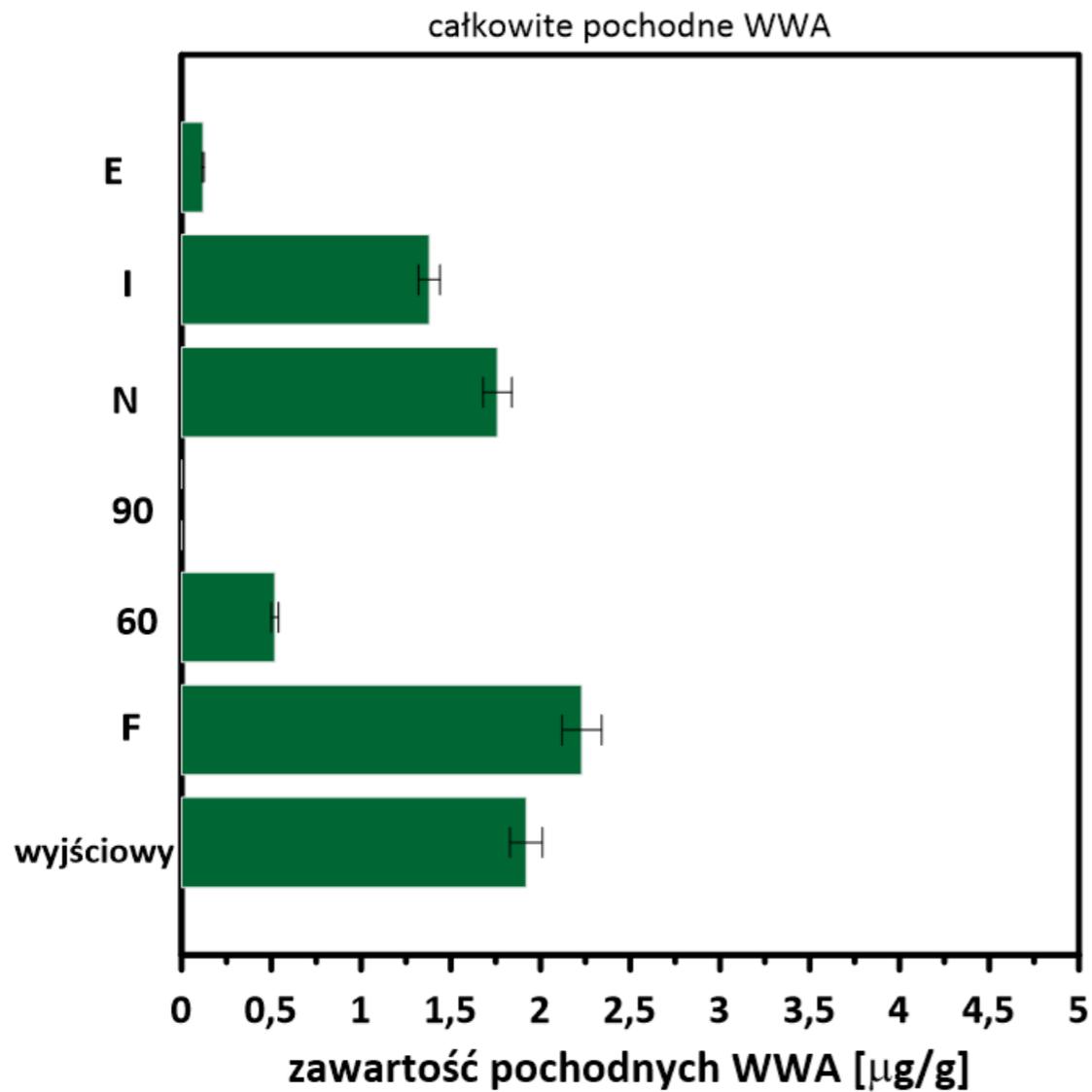


Rys. 37. Zmiany parametrów biowęgla BCZ pod wpływem presji środowiskowej.



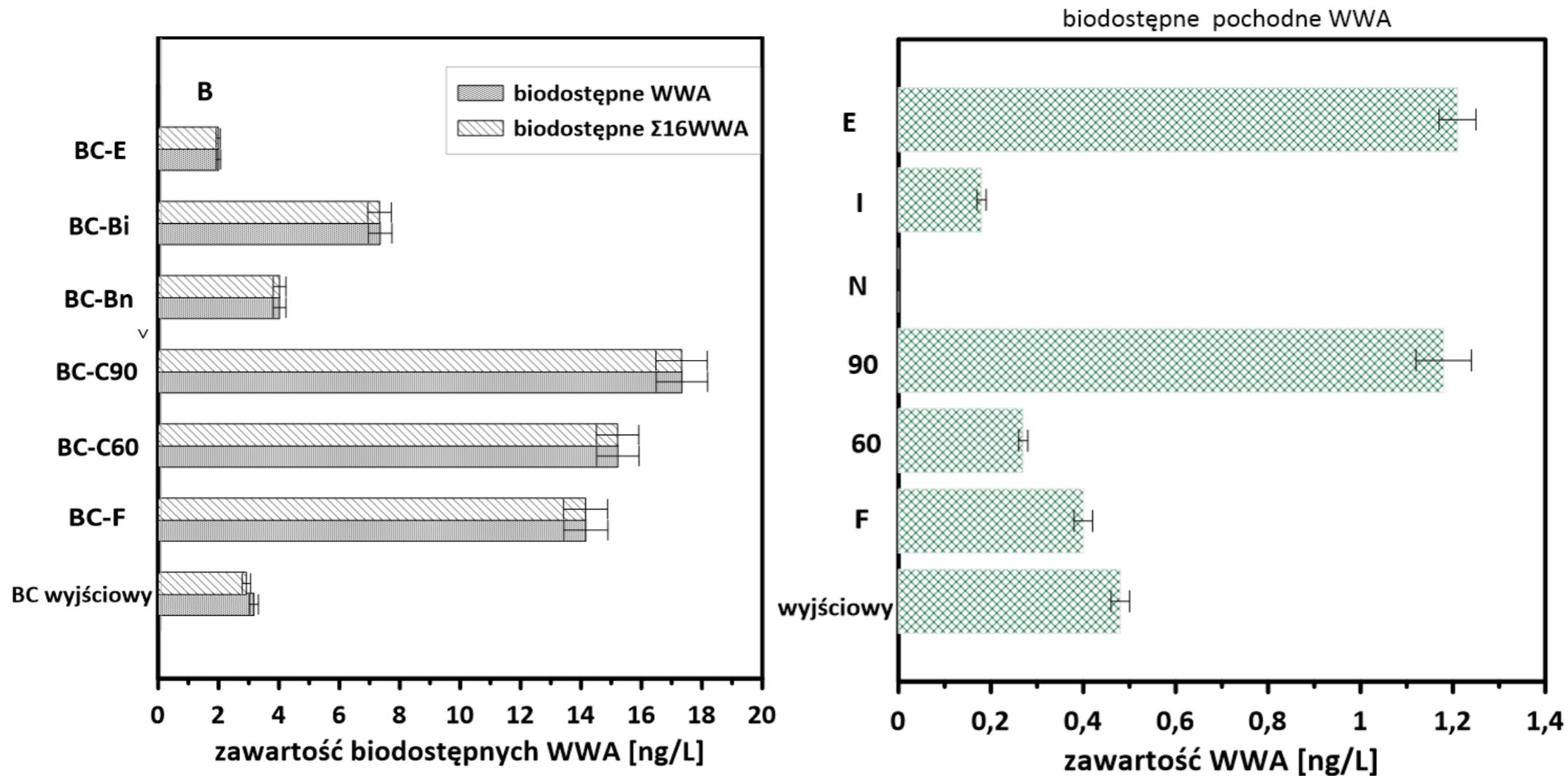
Rys. 38. Zawartość frakcji a) całkowitej i b) biodostępnej WWA w BCZ.

[<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129795>]

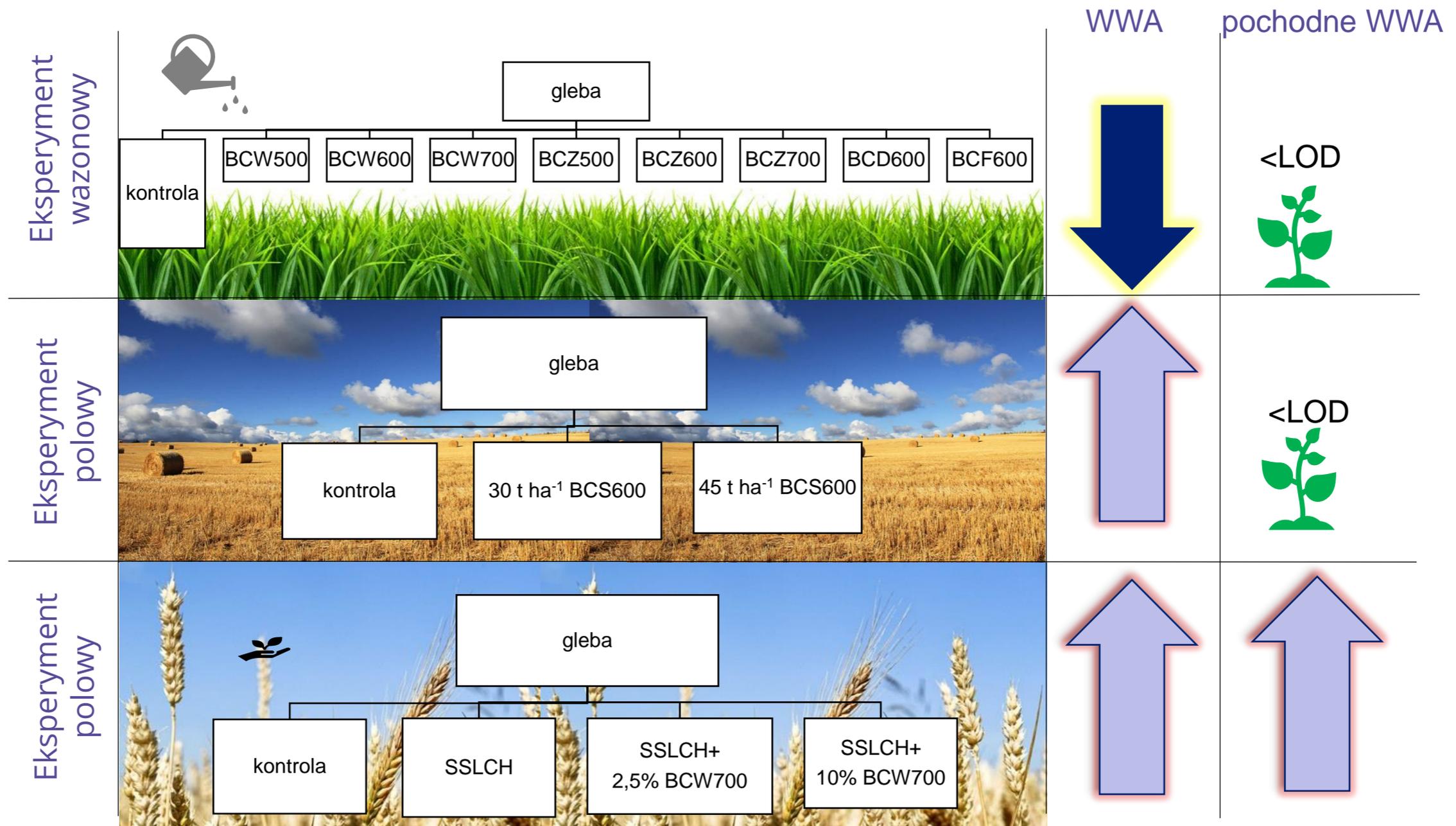


Rys. 39. Zawartość frakcji a) całkowitej i b) biodostępnej pochodnych WWA w BCZ.

Ale...

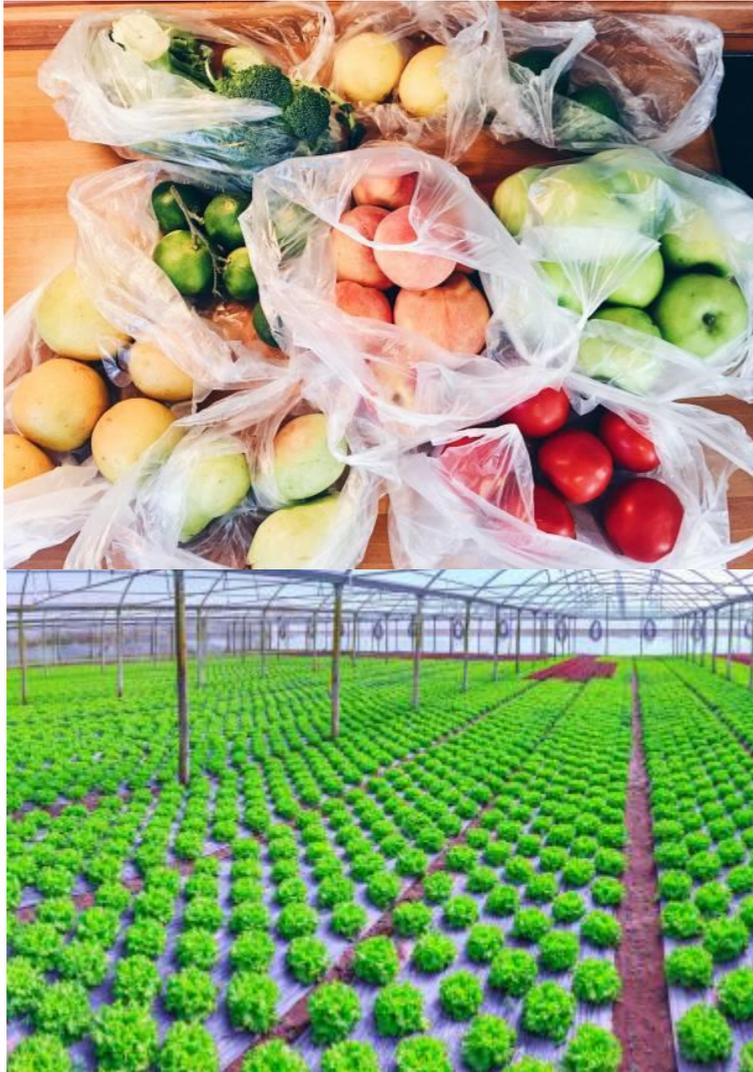


Rys. 40. Zawartość frakcji biodostępnej WWA i ich pochodnych w BCW.



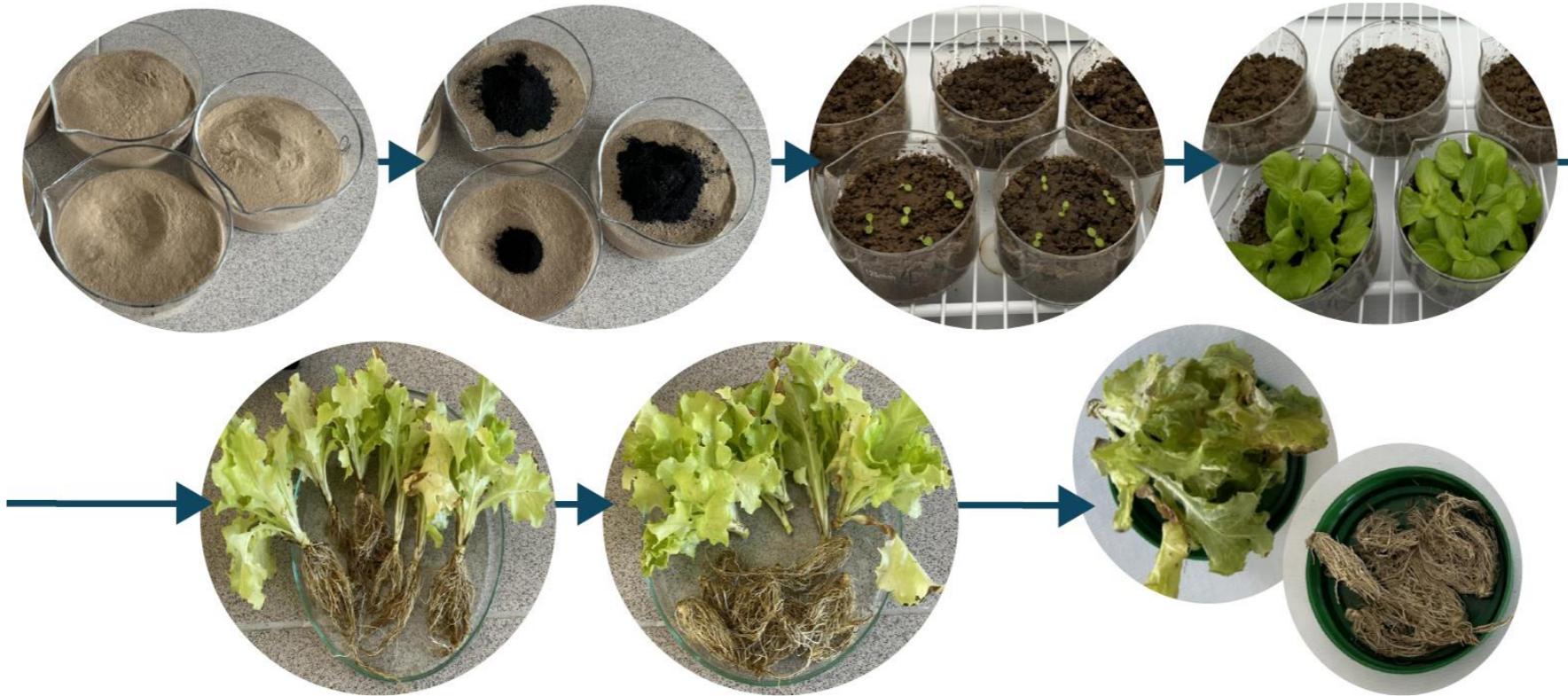
[<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129795>]

Phthalic Acid Esters, PAEs



(Lactuca sativa L.)

1%wt.



6 tygodni

dzień/noc (12:12 h) Conviron GEN100 (22°C/18°C), WHC 65%

WSPÓŁCZYNNIK BIOKONCENTRACJI

Bioconcentration Factor (BAF)

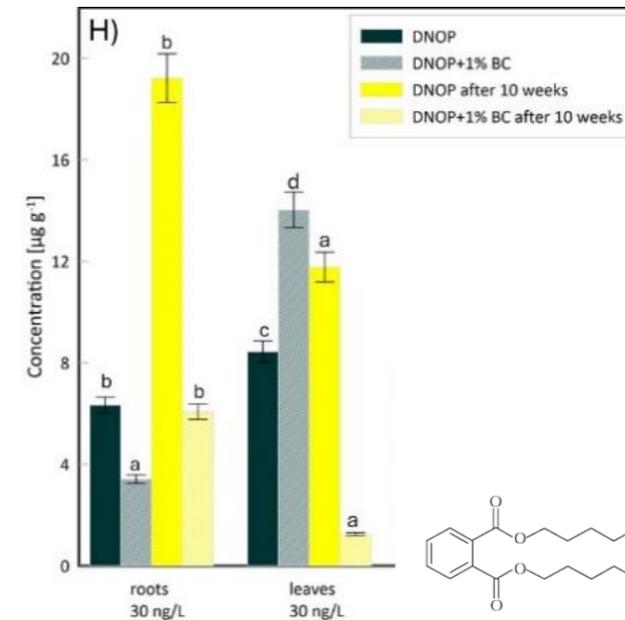
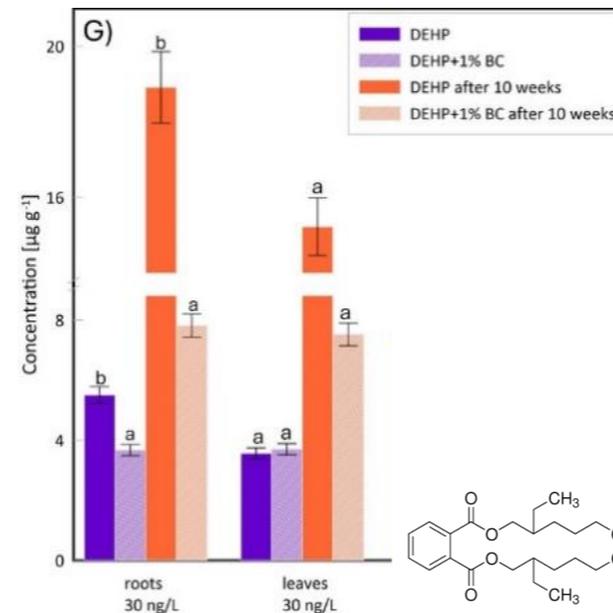
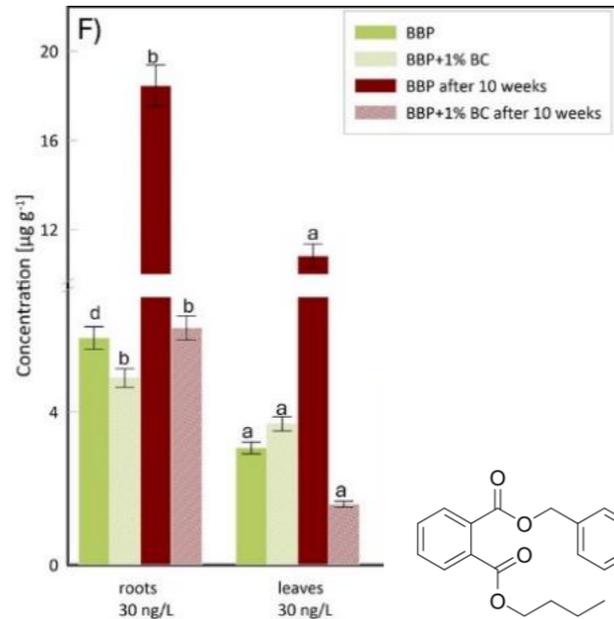
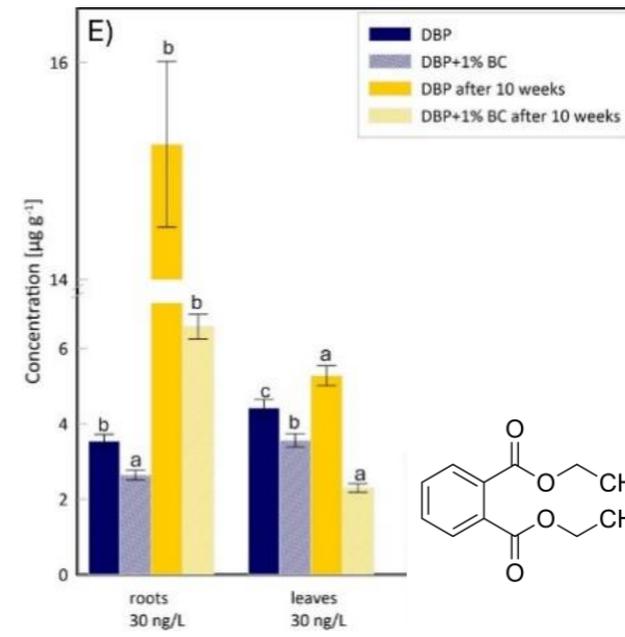
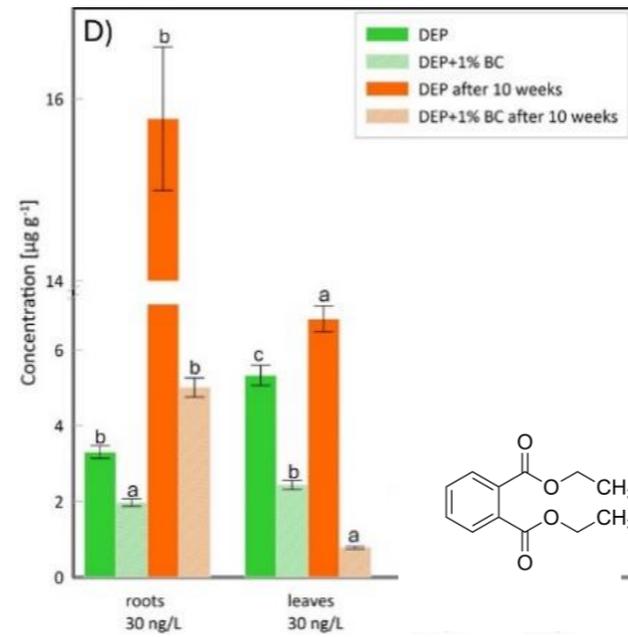
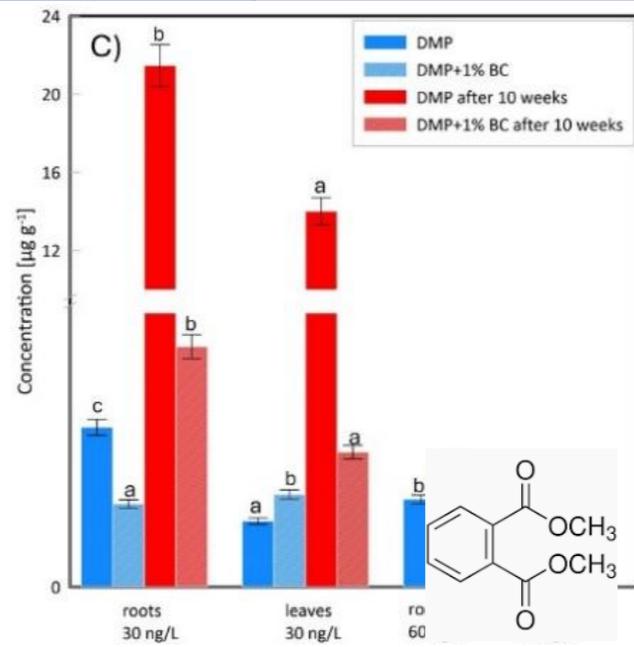
$$BAF = C_{biota} / C_{soil}$$

C_{biota} stężenie PAEs w danym elemencie ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

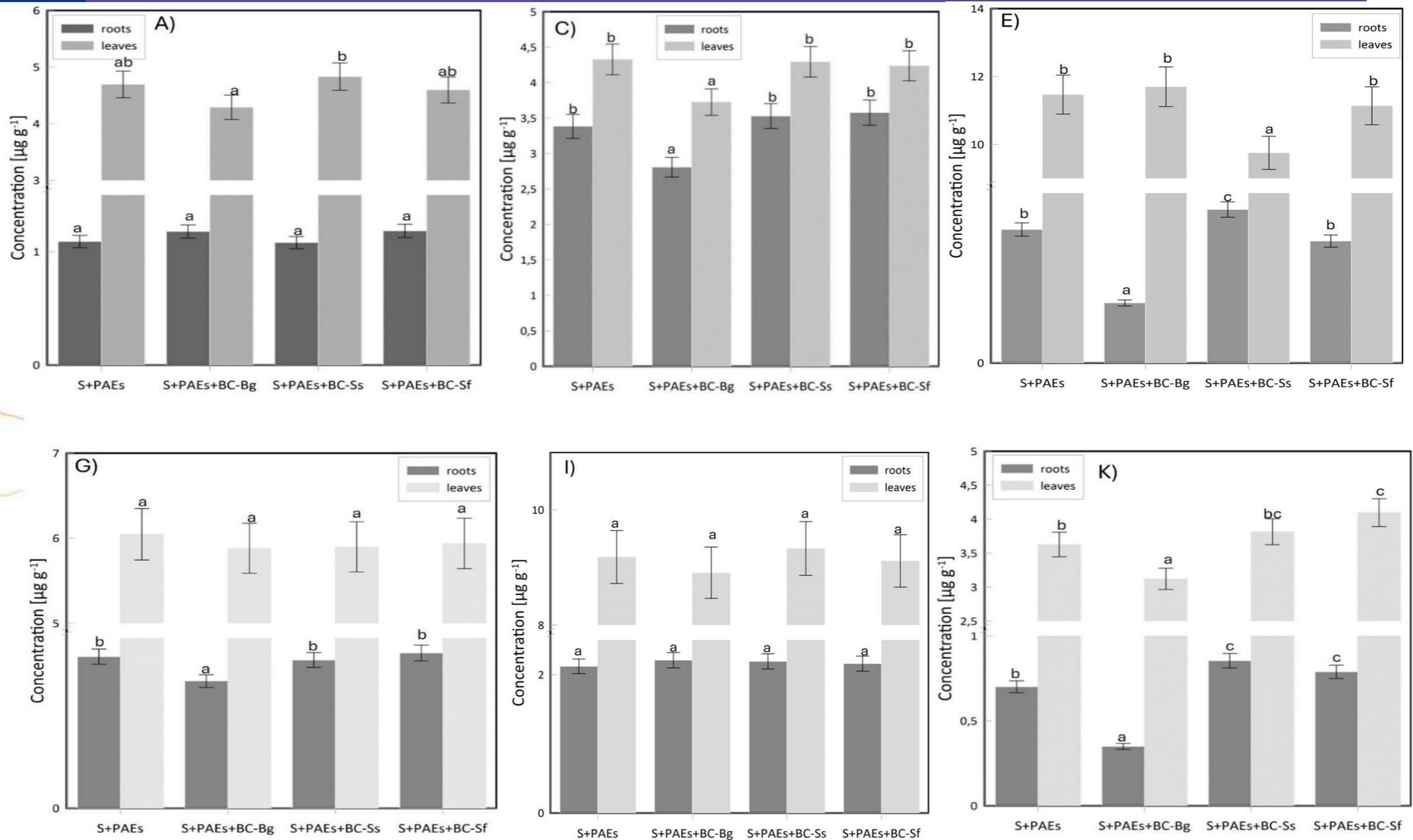
C_{soil} stężenie PAEs w glebie ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

Tabela 4. Wpływ biowęgla na wartości BAF.

	BAF					
	DMP	DEP	DBP	BBP	DEHP	DNOP
korzenie sałaty	0.0333c	0.0668b	0.0764b	0.1223d	0.1261b	0.1466b
liście sałaty	0.0138a	0.1079c	0.0955c	0.0631a	0.0817a	0.1952c
gleba + 1% BC	1.5456c	1.1875d	1.0590c	2.5484e	2.0496c	2.4900e
korzenie sałaty + 1% BC	0.0173a	0.0399a	0.0570a	0.1008b	0.0841a	0.0790a
liście sałaty + 1% BC	0.0193b	0.0494c	0.0769b	0.0760a	0.0848a	0.3244d

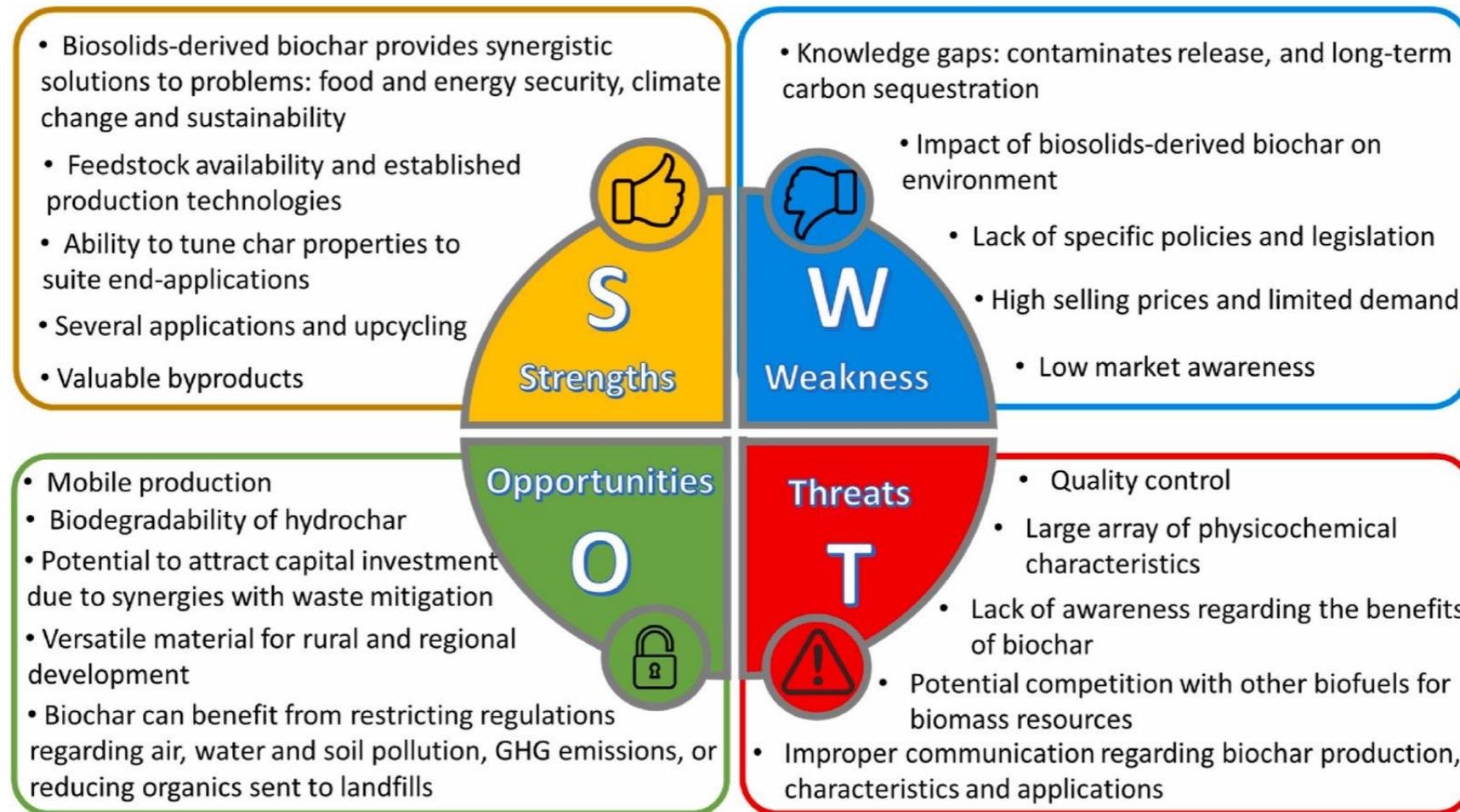


Rys. 41. Wpływ dodatku biowęgla w czasie: C) DMP; D) DEP; E) DBP; F) BBP; G) DEHP; H) DNOP



Rys. 42. Wpływ dodatku biowęgla na: A) DMP; B) DEP; C) DBP; D) BBP; E) DEHP; F) DNOP.

Analiza SWOT

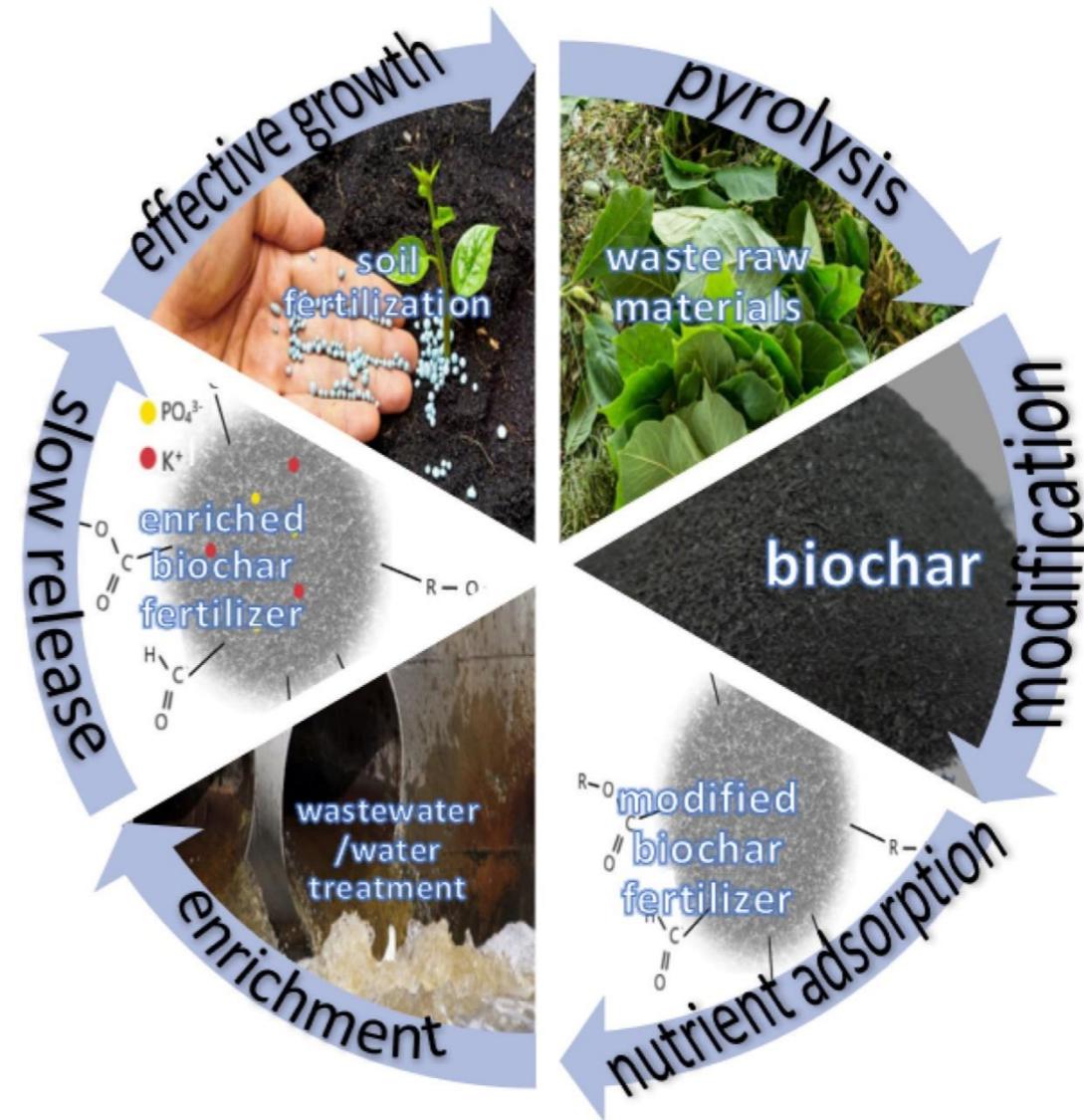


Perspektywy i kierunki badań

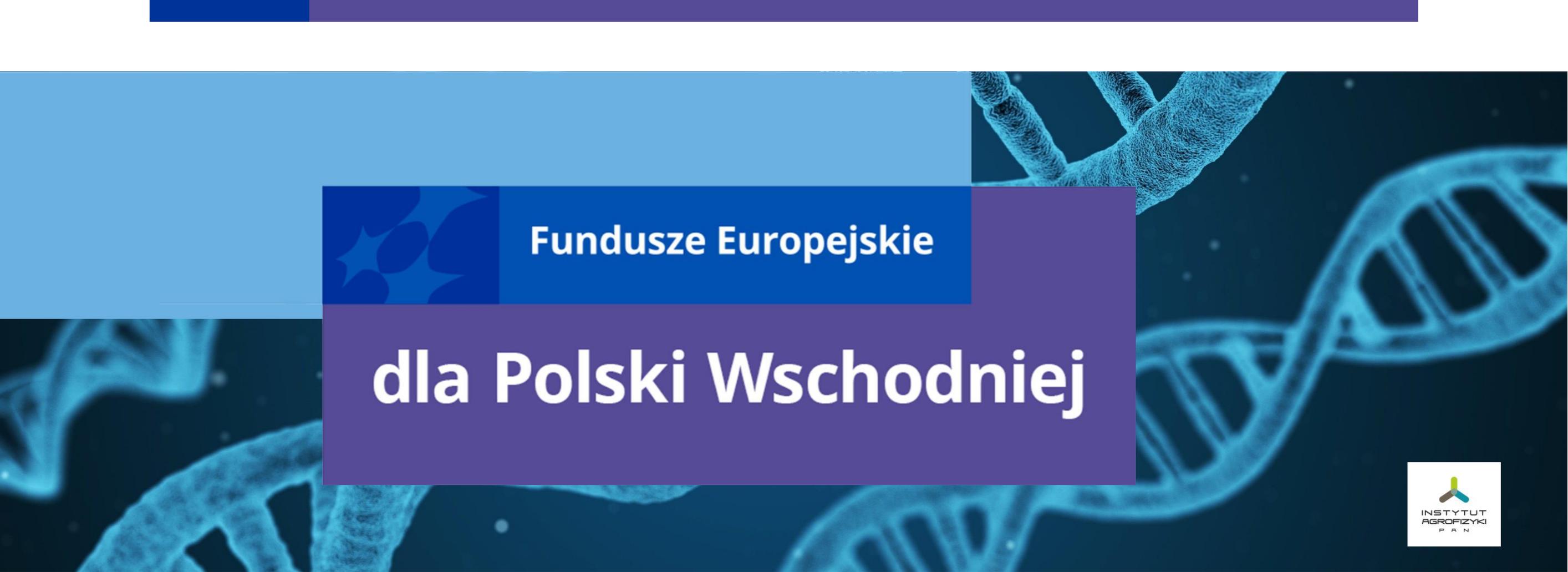
- Długoterminowe badania terenowe
- Optymalizacja surowców pochodzących z odpadów
- Rozwiązywanie problemów bezpieczeństwa (toksyczność, wypłukiwanie zanieczyszczeń)
- Biowęgiel jako element gospodarki o obiegu zamkniętym i rolnictwa przyjaznego klimatowi

Quo vadis?

- Dopasowanie właściwości do konkretnych zastosowań
- Sprzęganie z układami mikrobiologicznymi/ enzymatycznymi



[<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151588>]



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Dziękuję za uwagę.

Zapraszamy na stronę:

<https://bioroznorodnosc.ipan.lublin.pl/>



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską

