



**Świat 3W.**  
**Rzeczywistość**  
**i przyszłość**

**W**

Niepewny i zmienny – to dwa przymiotniki, którymi już od jakiegoś czasu określamy otaczający nas świat. Świat wielu kryzysów – klimatycznego, energetycznego, geopolitycznego, żywnościowego i surowcowego – których negatywne skutki kumulują się i są coraz bardziej widoczne w naszej codzienności. Priorytetem staje się więc konieczność kompleksowego rozumienia teraźniejszości, bo to, jak poradzimy sobie z obecnymi wyzwaniami, zdecyduje o świecie, w którym będą żyć nasze dzieci i wnuki.

**Woda** – bez której nie byłoby życia na Ziemi – i bezpieczny do niej dostęp staje się globalnym wyzwaniem, który wymaga odpowiedzialnego i zintegrowanego podejścia ze strony międzynarodowej społeczności. W obliczu wyzwania, jakim jest transformacja energetyczna, rośnie znaczenie gospodarki wodorowej i potencjał **wodoru** jako elementu ekosystemu energetycznego. Jednocześnie, **węgiel pierwiastkowy**, coraz śmielej wykorzystywany w zaawansowanych technologiach np. materiałowych, nadal stoi przed wyzwaniem ograniczonej skali produkcji i wysokich kosztów.

Te obszary wymagają nie tylko ciągłej innowacji, ale także wsparcia systemowego, aby osiągnąć przełom. Głęboko wierzymy w misję dalszej edukacji społecznej, która pozwoli społeczeństwu zrozumieć stojące przed nami wyzwania, a także dostrzec możliwości, jakie niosą ze sobą zasoby 3W.

Zapraszamy do lektury najnowszej edycji raportu idea 3W pt. „**Świat 3W. Rzeczywistość i przyszłość**”, współtworzonego przez organizacje ze świata 3W zaangażowane w tworzenie technologii z obszarów wody, wodoru i węgla pierwiastkowego. Opracowanie, które oddajemy w Państwa ręce, stanowi źródło cennych informacji, umożliwiających lepsze zrozumienie szans i zagrożeń, z jakimi zmagają się globalne społeczeństwo. Poddajemy analizie kluczowe obszary, które są nie tylko niezbędne do zrozumienia dzisiejszych wyzwań, ale także decydują o przyszłości kolejnych pokoleń.

**Beata Daszyńska-Muzyczka**

Prezes Zarządu Banku Gospodarstwa Krajowego



Raport został opracowany przy współpracy:

**W części W jak Woda**

**WODNOSPRAWY**  
PECTORE **ECO**

**Autorzy:**

Agnieszka Hobot, Katarzyna Biegun, Monika Gajda  
Redakcja i korekta - Anna Holeksa

**W części W jak Wodór**



**Łukasiewicz**  
Instytut  
Organizacji  
i Zarządzania  
w Przemśle  
ORGMAZ

**Autorzy:**

Dominik Zieliński, Joanna Grudowska, Adam Rosik, Dr Piotr Lewandowski,  
Dr Katarzyna Iwińska, Jakub Kucharczuk (współpraca)

**W części W jak Węgiel**

Fundacja Wspierania Nanonauk i Nanotechnologii Nanonet



**Autorzy:**

Magdalena Cholewińska-Falarz, Michał Macha, Dorota Kosmalska,  
Marcin Knutelski, Agnieszka Piekara, Agnieszka Kłapcia,  
Wojciech Orłowski, Nel Broda



**Koordinacja i merytoryka ze strony idea 3W, BGK:**

Maciej Malski-Brodzicki, Marek Zieliński

Opracowanie graficzne: Magdalena Małachowska



# SPIS TREŚCI

## WODA

### WPROWADZENIE

PODSUMOWANIE

ZASOBY WODY

ZAPOTRZEBOWANIE NA WODĘ

ZANIECZYSZCZENIA

TECHNOLOGIE OCZYSZCZANIA WODY

DYSTRYBUCJA WODY

RETENCJA

NIEBIESKIE ZŁOTO

CZARNE ŁABĘDZIE

CZY PROBLEM Z WODĄ TO „WYMYSŁ NAUKOWCÓW”?

WODA W TRÓJMORZU (3 SEAS INITIATIVE – „3SI”)

SPOJRZENIE W PRZYSZŁOŚĆ

TRENDY I WYZWANIA

CO MY MOŻEMY ZROBIĆ DLA WODY?

## WODÓR

### WPROWADZENIE

PODSUMOWANIE

WODÓR NA ŚWIECIE

WODÓR W TRÓJMORZU (3 SEAS INITIATIVE – „3SI”)

BADANIA I PATENTY

TRENDY NA GLOBALNYM RYNKU WODOROWYM

WNIOSKI I REKOMENDACJE

## WĘGIEL

### WPROWADZENIE

PODSUMOWANIE

WĘGIEL I JEGO ODMIANY

RYNEK NANOMATERIAŁÓW WĘGLOWYCH

BADANIA I PATENTY

APLIKACJE TECHNOLOGII WĘGLOWYCH

CZY STRATEGIA DLA WĘGLA PIERWIASTKOWEGO JEST POTRZEBNA?

SPOJRZENIE W PRZYSZŁOŚĆ

WNIOSKI I REKOMENDACJE

9

12

15

18

19

21

23

24

27

29

31

33

35

37

38

43

44

45

56

60

62

64

71

72

73

78

81

84

87

89

89



**WODA**

# WPROWADZENIE

**H**istoryczne zdjęcie z 1968 roku wykonane przez członków misji Apollo 8 orbitujących wokół Księżyca przedstawia Ziemię jako białą-błękitną kulę zawieszoną w czarnej przestrzeni. To zdjęcie w symboliczny sposób uwypukla piękno naszej planety oraz jej niezwykłość, która zaowocowała powstaniem życia na Ziemi.

W odróżnieniu od swoich rdzawych sąsiadów (Wenus ze względu na temperaturę powierzchni a Mars w związku z dominacją tlenków żelaza w gruncie), kolor naszej planecie nadaje woda, ale nie dlatego, że odbija błękit nieba, lecz ze względu na swoje ciekawe właściwości. Fale światła o długości odpowiadającej kolorom: czerwony, pomarańczowy i żółty (duża długość fali) są pochłaniane przez wodę silniej niż fale światła odpowiadające kolorowi niebieskiemu (krótka długość fali). Światło słoneczne docierając do wody odbija głównie światło niebieskie, pochłaniając pozostałe.

Woda sprzyjała powstaniu i rozprzestrzenieniu się życia na Ziemi. Woda to nie tylko materiał budulcowy organizmów żywych, kluczowy element procesów życiowych, ale też środowisko bytowania niezliczonych gatunków roślin i zwierząt. Świat, w którym się rodzą, żyją i przekazują swoją energię otoczeniu w niekończącym się cyklu życia i śmierci.

Woda jest wokół nas. Korzystamy z niej w domu, w pracy, spędzając wakacje w górach, nad jeziorem lub nad morzem. Na co dzień wydaje się nam, że ten zasób jest i będzie zawsze dostępny. Czy na pewno?

Znaki zapytania pojawiają się, gdy w naszym otoczeniu wydarzy się coś zaskakującego: podtopienie, powódź, sytuacja zagrożenia dla życia, mienia lub infrastruktury. Gdy wydarzy się coś naprawdę groźnego jak np. katastrofa ekologiczna, bijemy na alarm, bo zaczynamy rozumieć, że wygodne życie z łatwym dostępem do wody nie musi być nam dane na zawsze.

W 2022 roku masowe zatrucie organizmów żyjących w Odrze, w wyniku zakwitów toksycznej algi, uzmysłowiło nam wszystkim, jak wrażliwym środowiskiem życia jest woda i jak wiele musimy zrobić by bezpiecznie i odpowiedzialnie korzystać z jej ograniczonych zasobów. Nasze działania nie mogą koncentrować się wyłącznie na długofalowych celach gospodarczych i społecznych. Musimy rozsądnie korzystać z dostępu do wody, stosować odpowiedzialne i efektywne rozwiązania minimalizujące jej zużycie, dbać o utrzymanie lub przywrócenie jej jakości. Nauka



Źródło: NASA, <https://www.nasa.gov/image-article/this-week-nasa-history-apollo-8-captures-earthrise-dec-24-1968/>

wspiera nas w tych wysiłkach i choć niekiedy koszty stosowanych technologii są wysokie, pamiętajmy, że zasoby wody, z której możemy korzystać nie są nieskończone oraz że pokolenia, które nadejdą po nas, też mają prawo do korzystania z wody.

Na przestrzeni ostatnich lat zmiana klimatu spotęgowała zjawiska ekstremalne, których żadne modele, oparte na szeregach danych z przeszłości, nie były w stanie precyzyjnie przewidzieć. Europa doświadcza to szczególnie mocno. Susza z 2022 roku była najbardziej ekstremalnym tego typu zjawiskiem od 500 lat. Najdotkliwiej odczuła to Hiszpania, Francja, Włochy i Portugalia, ale także Wielka Brytania. Rolnicy tracili uprawy, życie w rzekach wymierało, przemysł walczył z ograniczonym dostępem do wody. Skutki odczuwamy nadal, także w portfelach.

Produkcja żywności to branża wodochłonna. W efekcie suszy, ceny żywności poszybowały w górę.

Woda jest istotna dla każdej gałęzi gospodarki. Bez dostępu do odpowiedniej ilości i jakości tego zasobu pojawiają się bariery i ograniczenia w rozwoju społeczno-gospodarczym. Stąd tak istotne jest wspieranie postępu technologicznego oraz podejmowanie wszelkich inicjatyw, które

będą elementem zintegrowanego rozwoju sektora gospodarki wodnej w kraju, Europie i na świecie.

Problem z wodą jest na tyle globalny – około 2 mld ludzi na świecie nie ma dostępu do odpowiedniej jakości wody pitnej – że w tym roku po raz pierwszy od ponad pół wieku odbyła się konferencja ONZ w pełni poświęcona tej tematyce. Podczas rozmów w Nowym Jorku wyraźnie podkreślono, iż należy pilnie

zająć się narastającym globalnym kryzysem wodnym, aby zrealizować Agendę na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030 i przyspieszyć postęp w związku z ułatwieniem dostępu do wody i poprawą warunków sanitarnych (Cel 6).

Prognozy klimatyczne na kolejne lata nie są optymistyczne. Problemy z wodą będą się pogłębiać. O zasoby wodne musimy zacząć dbać natychmiast.

Równocześnie musimy podjąć szeroko zakrojone działania informacyjne i edukacyjne, by nasze społeczeństwa były świadome skali zagrożeń oraz, co równie ważne, wpływu jaki indywidualne postawy i działania zarówno na poziomie przedsiębiorstw jak i gospodarstw domowych mogą mieć na przyszłość naszą i naszych dzieci.



# PODSUMOWANIE

Gdyby nie woda, życie jakie znamy, nie miałyby szans powstać na Ziemi, nie miałyby szans na rozwój i trwanie. Woda jest kluczowym elementem gwarantującym prawidłowy przebieg podstawowych procesów zachodzących w naszych organizmach i w naszym otoczeniu.

1. Zasoby wodne Ziemi szacuje się na ok. 1,386 mld km<sup>3</sup>, co w porównaniu do objętości kuli ziemskiej<sup>I</sup>, która wynosi ok. 1 083,207 mld km<sup>3</sup>, stanowi zaledwie 0,128% objętości.
2. Zdecydowana większość wody zgromadzona jest w oceanach - wody słone (w tym solanki) stanowią aż 97,5% ziemskich zasobów wody. **Wody słodkie to zaledwie 2,5% zasobów wodnych Ziemi**, są w większości uwięzione w lodowcach (68,7%) lub magazynowane w wodach podziemnych (30,1%). Realnie możemy wykorzystywać mniejszą część zasobów wody słodkiej na Ziemi. Wody powierzchniowe (rzeki, jeziora) to zaledwie ok. 1,2% zasobów wody słodkiej.
3. Największe odnawialne zasoby wody w przeliczeniu na 1 mieszkańca na rok posiada Islandia. Na obywatela przypada aż 463,9 tys. m<sup>3</sup>. W przypadku Polski wskaźnik ten się waha (w zależności od ilości rocznych opadów) od 1,1 tys. m<sup>3</sup> do 1,8 tys. m<sup>3</sup>, średnio jest to ok. 1,6 tys. m<sup>3</sup> na rok i jest to wynik na pograniczu stresu wodnego. Przeciętna dla Europy jest powyżej 4 - 5 tys. m<sup>3</sup>.
4. Wartość globalnego rynku wody stabilnie wzrasta. Rynek ten był wyceniany w 2020 roku na ponad 800 mld dolarów i wg szacunków Raportu Global Water Market 2023, jego wartość wzrośnie do 2028 roku do poziomu ok. 1 470 mld dolarów<sup>II</sup>.
5. Dostępność zasobów wodnych nie oznacza automatycznie, że mieszkańcy mają zapewniony powszechny dostęp do wody pitnej. Zgodnie z Raportem SDG<sup>III</sup> odsetek ludności korzystającej z bezpiecznie zarządzanej dystrybucji wody

pitnej wynosił na świecie 74,3% w 2021 roku, co oznacza wzrost z poziomu 63,4% w 2005 roku. **Ponad 2 mld ludzi ma ograniczony dostęp do wody pitnej lub nie posiada go wcale.**

## 6. Zmiana klimatu potęguje występowanie i intensywność zjawisk ekstremalnych.

Modele oparte na danych historycznych nie są w stanie odpowiednio wcześniej je przewidzieć i precyzyjnie opisać. Anomalie są coraz bardziej zauważalne i odczuwalne. NASA ogłosiła, że minione lato meteorologiczne (czerwiec–sierpień 2023) były najgorętszym latem w historii pomiarów prowadzonych od 1880 roku<sup>IV</sup>.

7. Około 74% klęsk żywiołowych w latach 2001-2018 miało związek z wodą. Wśród nich były zarówno susze, jak i powodzie. Częstotliwość i intensywność takich zdarzeń prawdopodobnie wzrosła wraz z pogłębiającymi się zmianami klimatu<sup>V</sup>.
8. Temperatura wody w oceanach wzrasta i kumuluje ok. 93% ocieplenia planety od lat 50. XX wieku<sup>VI</sup>.
9. Ocieplenie powoduje topnienie lodolodów. Według najnowszego raportu Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA)<sup>VII</sup> tempo utraty lodu na Antarkydzie i na Grenlandii przyspieszyło. Na podstawie danych satelitarnych oszacowano, że od lat 90. XX wieku wzrosło aż pięciokrotnie. Lodowce pokrywają prawie 10% powierzchni lądów. Stopnienie lodowców Grenlandii podniosłoby poziom wody o 7 metrów, a całości lodolodu Antarktydy – o około 60 metrów<sup>VIII</sup>.
10. W ostatnich kilkunastu latach plony polskiego rolnictwa były istotnie mniejsze przez wpływ susz. Przeciętna roczna suma strat w trzech kategoriach upraw (bulwiaste, zboża, oleiste) oszacowana przy użyciu wskaźnika klimatycznego niedoboru wody wynosi ok. 3,9 mld PLN, natomiast straty oszacowane z użyciem znormalizowanego różnicowego wskaźnika wegetacji (NDVI) mogły wynieść nawet 6,5 mld PLN<sup>IX</sup>.

I. NASA: Facts & Figures, [http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile\\_cfm?Object=Earth&Display=Facts&System=Metric](http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile_cfm?Object=Earth&Display=Facts&System=Metric) [dostęp 2023.10.14]

II. Research and Markets: <https://www.researchandmarkets.com/report/water#cat-pos-1> [dostęp 2023.10.14]

III. The Sustainable Development Goals Report 2022, <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/>

IV. NASA: <https://climate.nasa.gov/news/3282/nasa-announces-summer-2023-hottest-on-record/>

V. UNICEF: <https://unicef.pl/co-robimy/aktualnosci/news/woda-i-globalny-kryzys-klimatyczny-10-rzeczy-o-ktorych-musisz-wiedziec> [dostęp 2023.10.14]

VI. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016

VII. Simonsen, SB, Slater, T., Spada, G., Sutterley, TC, Vishwakarma, BD, van Wessem, JM, Wiese, D., van der Wal, W. i Wouters, B.: Bilans masy Grenlandii i pokrywy lodowej Antarktydy w latach 1992-2020, Earth Syst. nauka Dane, 15, 1597–1616, <https://doi.org/10.5194/essd-15-1597-2023>, 2023.

VIII. <https://www.usgs.gov/faqs/how-would-sea-level-change-if-all-glaciers-melted>

IX. PIE: Raport 3/2022, Gospodarcze skutki suszy dla polskiego rolnictwa

11. Według raportu<sup>I</sup> przygotowanego przez organizację Christian Aid, dziesięć najbardziej kosztownych katastrof klimatycznych na świecie przyniosło straty oszacowane na 168,4 mld dolarów. Po raz pierwszy w tym zestawieniu znalazła się także Polska (za sprawą Orkanu Eunice, luty 2022).
12. Za najbardziej zanieczyszczony ocean na świecie uznaje się Północny Pacyfik. **Między Hawajami a Kalifornią znajduje się ogromne skupisko plastikowych odpadów (zwane The Great Pacific Garbage Patch lub Pacific Trash Vortex)**, czyli wielka pacyficzna pływająca wyspa śmieci.

Szacuje się, że zawiera ona ponad 1,8 biliona kawałków plastiku o łącznej wadze przekraczającej 80 000 ton<sup>II</sup> oraz powierzchni ok. 1,6 mln km<sup>2</sup> (ponad dwukrotna powierzchnia Francji)<sup>III</sup>.

13. Według National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) każdego roku do oceanów przedostają się miliardy szkodliwych śmieci<sup>IV</sup>, ścieków oraz wycieków ropy. W oceanach znajduje się obecnie około 50–75 bilionów kawałków i mikrodrobin plastiku<sup>V</sup>. Wg. danych Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska ok. 60% polskich rzek ma umiarkowany stan ekologiczny, 30% zły lub słaby, a zaledwie 10% dobry lub bardzo dobry<sup>VI</sup>.



I. <https://www.christianaid.org.uk/sites/default/files/2022-12/counting-the-cost-2022.pdf>

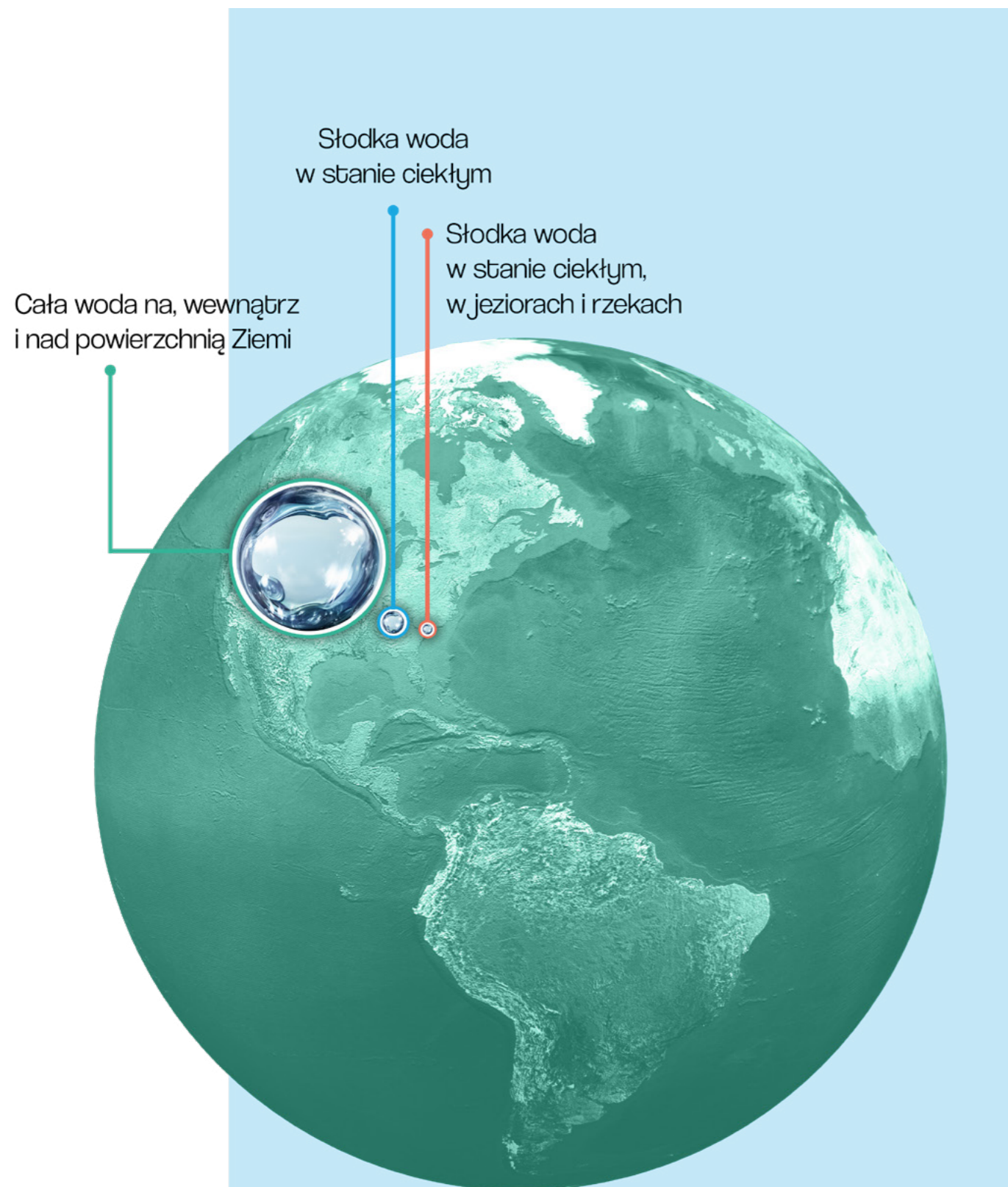
II. <https://theoceancleanup.com/great-pacific-garbage-patch/>

III. Plastic Collective: Blog, <https://www.plasticcollective.co/what-is-the-great-pacific-garbage-patch/> [dostęp 2023.10.14]

IV. <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/ocean-pollution>

V. <https://oceanliteracy.unesco.org/plastic-pollution-ocean/>

VI. <https://www.gov.pl/web/klimat/stop-zanieczyszczaniu-rzek>



Źródła: Howard Perlman, USGS, Jack Cook, Woods Hole Oceanographic Institution, Adam Nieman

Źródło danych: Igor Shiklomanoc, <http://ga.water.usgs.gov/edu/earthhowmuch.html>

# ZASOBY WODY

Określenie błękitna planeta kojarzy się jednoznacznie z Ziemią i jest związane z faktem, iż woda pokrywa znaczącą część powierzchni Ziemi (ok. 71%). Wydawać by się mogło, że w związku z tym, woda jest powszechnie dostępna i to w nieograniczonym zakresie, jednak rzeczywistość odbiega od naszych wyobrażeń. Zasoby wodne Ziemi szacuje się na ok. 1,386 mld  $\text{km}^3$ , co w porównaniu do objętości kuli ziemskiej<sup>I</sup>, która wynosi ok. 1 083,207 mld  $\text{km}^3$ , stanowi zaledwie 0,128% objętości.

Ogół wody na Ziemi stanowi Hydrosferę, na którą składają się wszystkie zasoby wodne zgromadzone na powierzchni, pod ziemią, w atmosferze oraz biosferze, która obejmuje również wszystkie organizmy żywe.

Zdecydowana większość wody zgromadzona jest w oceanach<sup>II</sup>: Spokojnym (660 mln  $\text{km}^3$ ), Atlantyckim (310,4 mln  $\text{km}^3$ ), Indyjskim (264 mln  $\text{km}^3$ ), Południowym (71,8 mln  $\text{km}^3$ ) oraz Arktycznym (18,7 mln  $\text{km}^3$ ). Wody słone (w tym solanki) stanowią aż 97,5% globalnych zasobów, a wody słodkie zaledwie 2,5%.

Wody słodkie są w większości uwięzione w lodowcach (68,7%) lub magazynowane w wodach podziemnych (30,1%). Realnie możemy wykorzystywać mniejszą część zasobów wody słodkiej na Ziemi. Wody powierzchniowe (rzeki, jeziora) to zaledwie ok. 1,2% zasobów wody słodkiej<sup>III</sup>.

Korzystamy głównie z tej części wody, która bierze czynny udział w obiegu (czyli z tzw. zasobów

odnawialnych), a to stanowi zaledwie 0,3% światowych zasobów wody słodkiej<sup>IV</sup>. Należy przy tym pamiętać, że kluczową, z punktu widzenia użyteczności dla ludzi i gospodarki, jest dostępność wody czystej, a ta stanowi ułamek zasobów odnawialnych.

Rozmieszczenie odnawialnych zasobów wody jest nierównomierne między kontynentami. Ich wielkość uzależniona jest od cech klimatu (w szczególności wielkości opadów i temperatury powietrza), budowy geologicznej oraz rzeźby i pokrycia terenu. Obszary deficytowe koncentrują się przede wszystkim w strefie klimatów zwrotnikowych i podzwrotnikowych oraz w głębi kontynentów.

Całkowite odnawialne zasoby wody na świecie<sup>V</sup> wynoszą ok. 42 808  $\text{km}^3$ , przy czym największe są w Ameryce Łacińskiej (32,4%) oraz wschodniej Azji (23,6%).

Co ciekawe, analizując światowe odnawialne zasoby wody, w Australii występuje ich zaledwie 1%, z kolei w 6 państwach (Indie, Chiny, Rosja, USA, Brazylia, Kanada) znajduje się ich aż 40%<sup>VI</sup>.

Odnawialne zasoby wody można przeliczać statystycznie na 1 mieszkańca na rok (tabela 1.1). Ze względu na niewielką gęstość zaludnienia, niektóre suche kraje świata mają wyższe zasoby odnawialne przypadające na 1 mieszkańca na rok niż Polska – czego przykładem może być wspomniana wcześniej Australia.



I. NASA: Facts & Figures, <http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Earth&Display=Facts&System=Metric> [dostęp 2023.10.14]

II. Eakins B.W., Sharman G.F.: Volumes of the World's Oceans from ETOPO1. Boulder, CO: NOAA National Geophysical Data Center, 2010

III. U.S. Geological Survey, Water Science School, <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/where-earths-water>

IV. <https://zpe.gov.pl/a/obszary-nadmiaru-i-niedoboru-wody-na-swiecie/DMcmqVzvD>

V. <https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=2&series=ER.H2O.INTR.K3&country=#>

VI. Śliwiński J., Cieśla M.: Zasoby wodne na świecie a produkcja żywności, SGGW w Warszawie



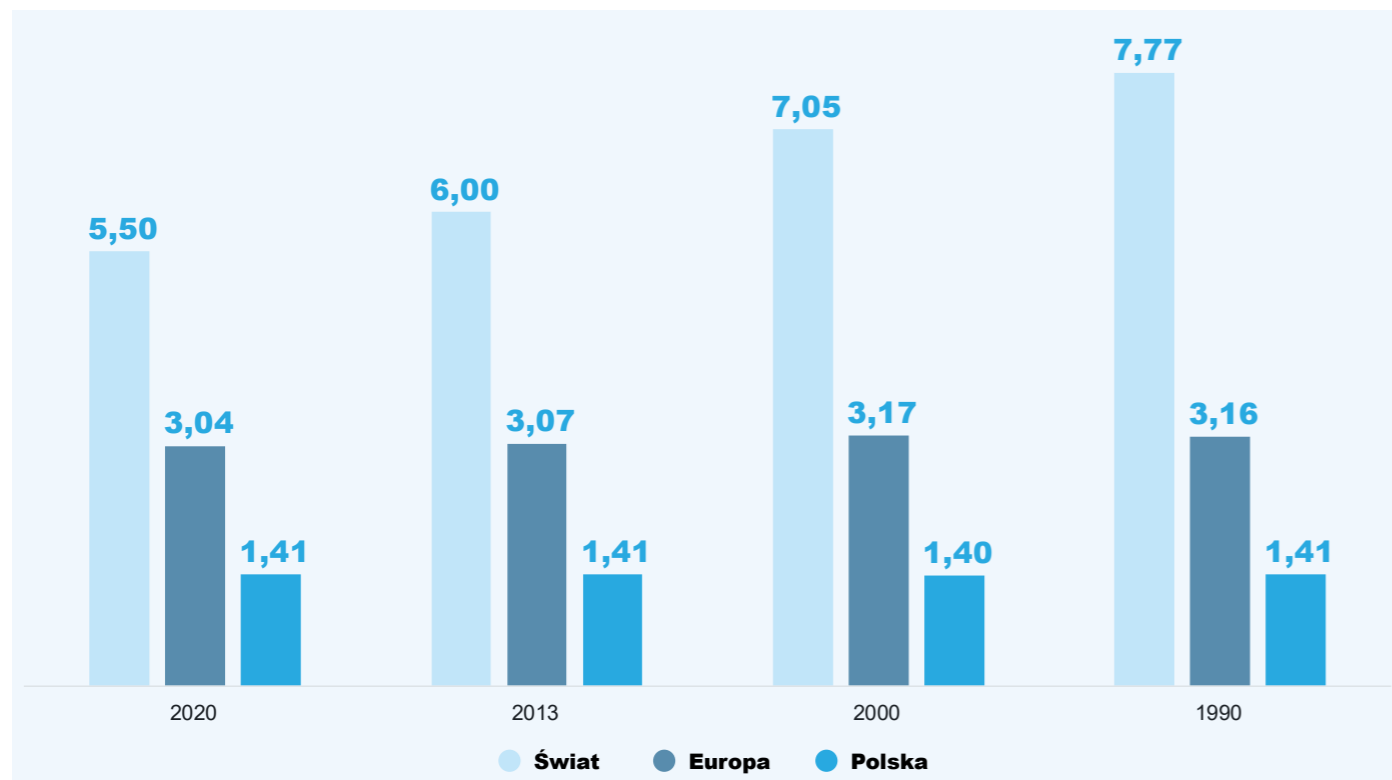
Tabela 1.1 Wielkość odnawialnych zasobów wodnych w ujęciu regionów świata

Region świata	Wielkość odnawialnych zasobów wodnych [mld m <sup>3</sup> ]	Udział w odnawialnych zasobach światowych [proc.]	Wielkość odnawialnych zasobów wodnych przypadających na 1 mieszkańca [m <sup>3</sup> ]
Ameryka Północna	5 668,0	13,3	15 338,87
Ameryka Łacińska i Karaiby	13 867,7	32,4	21 336,6
Afryka Subsaharyjska	3 883,8	9,1	3 373,6
Północna Afryka i Bliski Wschód	230,5	0,5	480,2
Europa i Azja Centralna	7 070,9	16,5	7 684,2
Wschodnia Azja i Pacyfik	10 105,5	23,6	4 335,8
- w tym Australia	492,0	Australia: 1 proc.	Australia: 19 177,3
Południowa Azja	1 982,2	4,6	1 052,9
Świat	42 808,6	100	5 499,5

źródło: <https://databank.worldbank.org/>

Według danych Banku Światowego<sup>1</sup> za 2020 rok, w Polsce wskaźnik przeliczający ilość zasobów odnawialnych wody na jednego mieszkańca na rok wynosił 1,414 tys. m<sup>3</sup>, czyli znacznie poniżej średniej dla Europy, oraz dla świata. Wskaźnik ten jest również niższy niż w przypadku krajów takich jak: Senegal

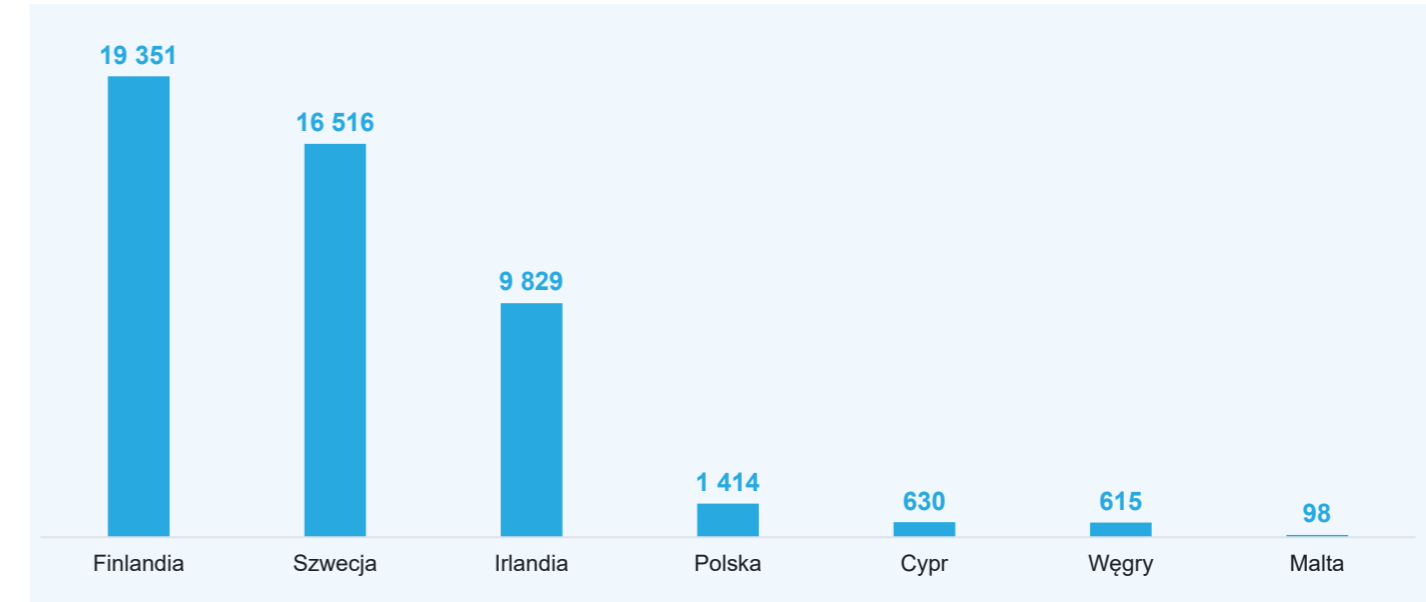
(1,569 tys. m<sup>3</sup>), Mali (2,827 tys. m<sup>3</sup>) lub w porównaniu do obszaru Afryki Subsaharyjskiej (3,373 tys. m<sup>3</sup>). Warto zauważyć, że w 2020 roku jeszcze niższe wskaźniki odnotowano dla krajów takich jak: Czechy (1,229 tys. m<sup>3</sup>) czy Belgia (1,04 tys. m<sup>3</sup>).

Rys. 1.1 Odnawialne zasoby wody słodkiej przypadające na 1 mieszkańca na rok (tys. m<sup>3</sup>)

1. World Development Indicators, <https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=2&series=ER.H2O.INTR.PC&country=#>

Największe zasoby odnawialne w przeliczeniu na 1 mieszkańca na rok posiada Islandia, dla której

wskaźnik wynosi 463,9 tys. m<sup>3</sup>.

Rys. 1.2 Odnawialne zasoby wody słodkiej przypadające na 1 mieszkańca na rok (m<sup>3</sup>)

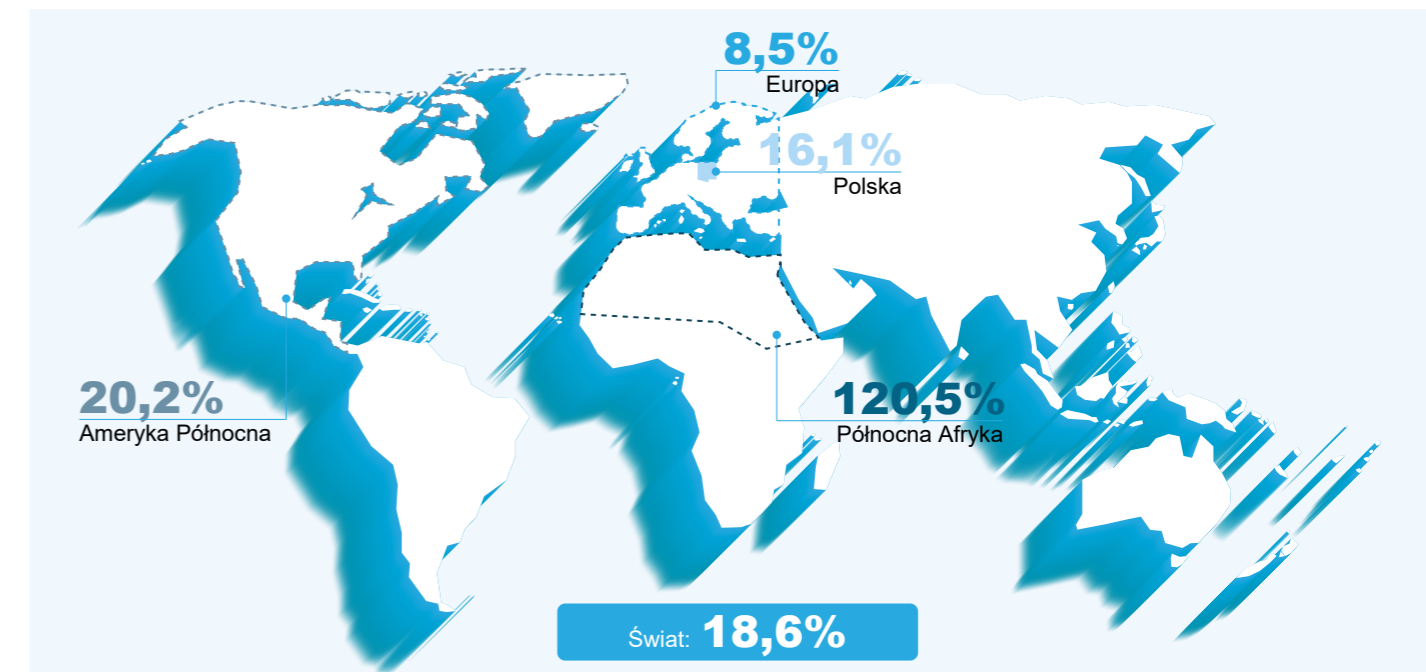
Analizując poziom wskaźników w okresie minionych dekad, można zauważyć trend spadkowy w ilości odnawialnych zasobów wody w przeliczeniu na 1 mieszkańca na rok. Ma to związek z wzrostem populacji i zaczyna to mieć znaczenie z punktu widzenia dostępności wody.

Zjawisko deficytu zasobów wodnych jest wypadkową szeregu czynników takich jak m.in. zmiana klimatu (wzrost nasłonecznienia i parowania), zwiększone

zużycie wody do celów bytowych i przemysłowych, regulacje rzek oraz osuszanie torfowisk.

Powyższe czynniki będą zwiększać stres wodny (niedobór wody lub brak dostępu do wody o odpowiedniej jakości), czyli jedno z wyzwań dla wielu społeczeństw w XXI wieku. Dramatyczna sytuacja ma miejsce w Afryce Północnej, gdzie roczny pobór wody przekracza ilość jej odnawialnych zasobów.

Rys. 1.3 Poziom stresu wodnego (Udział poboru wód w ogólnej wielkości zasobów odnawialnych, 2019)



# ZAPOTRZEBOWANIE NA WODĘ

Zapotrzebowanie na wodę definiuje się jako ilość wody potrzebną użytkownikom do zaspokojenia ich potrzeb. W uproszczeniu: zapotrzebowanie na wodę jest często uważane za równe poborowi, chociaż te dwa terminy nie mają tego samego znaczenia<sup>I</sup>. Zużycie wody, zgodnie z definicją GUS, to ilość wody zużytej na potrzeby gospodarki narodowej i ludności, pochodząca z ujęć własnych bądź z sieci wodociągowej lub zakupiona od innych jednostek.

Zapotrzebowanie na wodę na świecie wzrasta. Najnowszy Raport Wody na Świecie<sup>II</sup> (koordynowany przez UNESCO), wskazuje, że w ciągu ostatnich 40 lat zużycie wody wzrastało o około 1% rocznie. Większość tego wzrostu koncentruje się w krajach o średnich i niskich dochodach, głównie w gospodarkach wschodzących. Głównymi powodami są: wzrost populacji (czego konsekwencją jest zwiększone zapotrzebowanie na wodę do celów bytowo-gospodarczych, rolnictwa i produkcji żywności), rozwój społeczno-gospodarczy (dostęp do wody) oraz zmiana wzorców konsumpcyjnych.

Do regionów o najwyższym poborze wody na mieszkańca na świecie należą Ameryka Północna (np. Stany Zjednoczone 1 342 m<sup>3</sup>/rok) i Ameryka Południowa (np. Gujana 1 837 m<sup>3</sup>/rok) oraz Azja Środkowa (np. Turkmenistan 4 352 m<sup>3</sup>/rok). W Polsce wartość ta kształtowała się na poziomie 243 m<sup>3</sup> w 2020 roku<sup>III</sup> oraz 256 m<sup>3</sup> w 2021 roku. To wskaźniki poniżej średniej dla Europy wynoszącej 440 m<sup>3</sup>/rok oraz poniżej średniej dla 30 krajów należących do OECD wynoszącej 735 m<sup>3</sup>/rok<sup>IV</sup>.

Zużycie wody w Polsce w 2021 roku wynosiło łącznie 8 845 hm<sup>3</sup>. Najwięcej pochłonęły cele przemysłowe (w tym energetyka) (72%), eksploatacja sieci wodociągowej (18,5%) oraz napełnianie i uzupełnianie stawów rybnych (9,5%). Należy zaznaczyć, iż zużycie wody w rolnictwie nie jest (poza napełnianiem stawów rybnych) ujmowane w statystyce GUS. Na tle innych krajów zauważalne jest bardzo wysokie zużycie wody na cele przemysłowe, w którym największy udział

ma energetyka oparta na węglu. Taki stan wynika zarówno z technologii wydobycia i przeróbki węgla, jak i procesów chłodzenia w elektrowniach nim opalanych.

Woda z eksploatacji sieci wodociągowej w Polsce w niemal 80% zużywana jest przez gospodarstwa domowe (reszta trafia na cele produkcyjne i inne, związane np. z działalnością usługową). Na 1 mieszkańca gospodarstwa domowego w 2021 roku przypadają w naszym kraju średnio 34 m<sup>3</sup> wody (93 l/os/dzień), co stanowi wzrost względem roku 2010, kiedy to wartość ta wynosiła 31 m<sup>3</sup>. Rozkład zużycia wody w przeliczeniu na mieszkańca jest nierównomierny między województwami, z powszechnym trendem wzrostowym.

Na tle innych krajów Europy, zużycie wody na 1 mieszkańca w gospodarstwach domowych w Polsce jest niskie. Najwyższe występuje w Szwajcarii – 300 l/os/dzień, we Włoszech – 220 l/os/dzień oraz w Portugalii – 204 l/os/dzień. Najniższe zużycie wody odnotowuje się w gospodarstwach domowych na Słowacji (79 l/os/dzień) i na Malcie (77 l/os/dzień)<sup>V</sup>.

Analizując zużycie wody w Polsce, należy mieć na uwadze eksploatację wód podziemnych zarówno przez gospodarkę komunalną jak i rolnictwo. Pobór z wód podziemnych w 2021 roku, wg danych GUS, stanowił ok. 19%. Szacunki Państwowego Instytutu Geologicznego wskazują, iż pobór wód podziemnych w ramach zwykłego korzystania (poza rejestracją) zawiera się pomiędzy 0,3 i 1,6 km<sup>3</sup>/rok<sup>VI</sup>.

I. <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/water-demand>

II. Partnerships and cooperation for water, The United Nations World Water Development Report 2023, <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384655>

III. Aquastat, <https://data.apps.fao.org/aquastat/?lang=en>

IV. OECD (2023), Water withdrawals (indicator). doi: 10.1787/17729979-en (Accessed on 23 June 2023)

V. <https://smartwatermagazine.com/news/locken/water-ranking-europe-2020>; <https://www.eureau.org/resources/publications/eureau-publications/5219-the-governance-of-water-services-in-europe-2020-edition/file>

VI. <https://www.pgi.gov.pl/dokumenty-przegladarka/psh/artykuly-psh/4637-ocena-poboru-rzeczywistego/file.html>

# ZANIECZYSZCZENIA

Zanieczyszczenie wód ma miejsce, kiedy różne czynniki powodują niekorzystne zmiany w ich właściwościach biologicznych, chemicznych i fizycznych. Jest wiele klasyfikacji rodzajów zanieczyszczeń wody np. substancje organiczne lub nieorganiczne; naturalne (np. substancje rozkładu gleb i skał) oraz antropogeniczne; nierozkładalne, trwałe (pozostające w wodzie przez długi czas) lub rozkładalne. Bez względu na sposób klasyfikowania, głównym źródłem zanieczyszczeń są czynniki związane z działalnością człowieka. Najczęstsze źródła zanieczyszczeń to:

- zanieczyszczenia komunalne (ponad 80% światowych ścieków<sup>I</sup> trafia do wód bez odpowiedniego oczyszczania);
- zanieczyszczenia przemysłowe;
- zanieczyszczenia rolnicze.

Według National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) każdego roku do oceanów przedostają się miliardy szkodliwych śmieci<sup>II</sup>, ścieków oraz wycieków ropy. W oceanach znajduje się obecnie około 50–75 bilionów kawałków i mikrodrobin plastiku<sup>III</sup>. Za najbardziej zanieczyszczony ocean na świecie uznaje się Północny Pacyfik. Między Hawajami a Kalifornią znajduje się ogromne skupisko plastikowych odpadów (zwane The Great Pacific Garbage Patch lub Pacific Trash Vortex), czyli wielka pacyficzna pływająca wyspa śmieci. Szacuje się, że zawiera ona ponad 1,8 biliona kawałków plastiku o łącznej wadze przekraczającej 80 000 ton<sup>IV</sup> oraz powierzchnię ok. 1,6 mln km<sup>2</sup> (ponad dwukrotna powierzchnia Francji)<sup>V</sup>.



I. [https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2018/10/WaterFacts\\_water\\_and\\_watewater\\_sep2018.pdf](https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2018/10/WaterFacts_water_and_watewater_sep2018.pdf)

II. <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/ocean-pollution>

III. <https://oceanliteracy.unesco.org/plastic-pollution-ocean/>

IV. <https://theoceancleanup.com/great-pacific-garbage-patch/>

V. Plastic Collective: Blog, <https://www.plasticcollective.co/what-is-the-great-pacific-garbage-patch/> [dostęp 2023.10.14]



Północny Pacyfik jest zanieczyszczany nie tylko plastikowymi odpadami, ale także ropą. Z tankowca Exxon Valdez w 1989 roku wyciekło ok. 40 mln litrów ropy naftowej, co zanieczyściło ocean oraz ponad 2 tys. km wybrzeży Alaski (wyciekła wtedy równowartość ok. 12 basenów olimpijskich wypełnionych ropą).

Również europejskie wody morskie są zanieczyszczone. Raport EEA (Europejska Agencja Środowiska) ujawnił szeroko rozpowszechnione zanieczyszczenia we wszystkich czterech morzach regionalnych. W przypadku Morza Bałtyckiego problem dotyczy 96% powierzchni, Morza Czarnego 91%, Morza Śródziemnego 87% oraz 75% powierzchni północno-wschodniego Atlantyku<sup>I</sup>. Głównymi źródłami zanieczyszczeń są syntetyczne chemikalia oraz metale ciężkie.

Raport EEA diagnozuje ogólny stan wód w Europie podając, że jedynie 44% wód powierzchniowych osiąga dobry lub bardzo dobry stan ekologiczny<sup>II</sup>. Stan wód podziemnych jest nieco lepszy, gdyż około 75% wykazuje dobry stan chemiczny.

Wg. danych Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska ok. 60% polskich rzek ma umiarkowany stan ekologiczny, 30% zły lub słaby, a zaledwie 10% dobry lub bardzo dobry<sup>III</sup>. Silne zanieczyszczenie polskich rzek wynika z różnych czynników, w tym dopływu ścieków przemysłowych, komunalnych oraz spływów powierzchniowych z obszarów wiejskich.

I. <https://www.eea.europa.eu/publications/contaminants-in-europes-seas/>

II. <https://www.eea.europa.eu/pl/syigna142y/sygnaly-2020/articles/zapewnienie-czystych-wod-ludziom-i-przyrodzie>

III. <https://www.gov.pl/web/klimat/stop-zanieczyszczaniu-rzek>

# TECHNOLOGIE OCZYSZCZANIA WODY

Woda może zawierać liczne zanieczyszczenia fizyczne, chemiczne i mikrobiologiczne, które czynią ją niezdadną do bezpośredniego spożycia. W celu zapewnienia ludziom dostępu do wody o odpowiedniej jakości, wykorzystuje się różne sposoby jej oczyszczania. Wybór technologii uzależniony jest od poziomu i rodzaju zanieczyszczeń występujących w wodzie, kosztów oraz przeznaczenia oczyszczanej wody.

Wyróżnia się trzy rodzaje technologii oczyszczania wody słodkiej: fizyczne (stosowanie ultradźwięków, promieniowania UV), chemiczne (polegające na wprowadzaniu do wody silnych utleniaczy, w większości krajów, także w Polsce, stosuje się najczęściej chlor gazowy) oraz biologiczne (wykorzystujące aktywność organizmów żywych). Poniżej kilka przykładów takich technologii:

**Filtracja:** to jeden z kluczowych procesów fizycznego uzdatniania wody, wychwytyjący cząstki i zanieczyszczenia stałe. Może przebiegać jedno- lub wielostopniowo. Filtracja stosowana jest jako jeden z etapów oczyszczania wody w przedsiębiorstwach wodociągowych (np. proces filtracji piaskowej).

**Flokulacja:** wykorzystywana zwykle przed filtracją do przedwstępnego oczyszczania ścieków, sprawdza się podczas filtracji wody pod kątem zawiesiny i mętności oraz w procesach zagęszczania i odwadniania osadów w ściekach komunalnych oraz przemysłowych.

**Dezynfekcja:** polega na zabiciu lub usunięciu z wody drobnoustrojów takich jak bakterie i wirusy. Najczęściej stosowaną metodą jest dodawanie chloru.

**UV-C:** promieniowanie ultrafioletowe jest używane do zabijania mikroorganizmów w wodzie eliminując konieczność stosowania środków chemicznych.

**Ozonowanie:** służy utlenianiu i dezynfekcji wody, pomaga w eliminacji zanieczyszczeń organicznych i mikroorganizmów.

**Destylacja:** podgrzewanie wody do wrzenia, wytworzona para wodna jest zbierana i skraplana, wolna od większości zanieczyszczeń.

**Osmoza odwrócona:** proces polegający na przepuszczeniu wody przez membrany osmotyczne, które zatrzymują związki organiczne (takie jak np. pestycydy, leki, detergenty i in.), sole mineralne (np. fluor, chlor, sód i in.) oraz bakterie i wirusy.

Powiększający się obszar objęty stresem wodnym skutkuje ograniczeniem lub wprost brakiem dostępu do dobrej jakościowo wody pitnej. W najbiedniejszych krajach wdrażane są projekty zmierzające do uzdatnienia biologicznie skażonej wody słodkiej m.in. przy wykorzystaniu energii słonecznej<sup>I</sup>.

W wielu miejscach poprawa zaopatrzenia w wodę słodką może się odbywać na bazie odsalania wody

I. <https://cordis.europa.eu/article/id/415839-using-the-sun-for-water-disinfection-in-africa/pl>





morskiej np. w Zjednoczonych Emiratach Arabskich, Izraelu czy Singapurze.

Do odsalania wody morskiej (lub słonej) stosowane są coraz częściej technologie wykorzystujące zjawisko odwróconej osmozy. Proces ten jest wprawdzie kosztowny i energochłonny lecz również wysoce efektywny. Jako efekt uboczny pozostawia solankę, która może być szkodliwa dla środowiska.

Za europejski przykład zastosowania tej technologii może służyć największy w Europie zakład odsalania wody w Barcelonie, który po uruchomieniu w 2009 roku był praktycznie nieużywany, a obecnie pracuje z maksymalną wydajnością<sup>I</sup>. Naukowcy wciąż poszukują efektywniejszych i jednocześnie zrównoważonych metod odsalania<sup>II</sup>.

Na szczególną uwagę zasługują biologiczne technologie oczyszczania wody, bazujące na wykorzystaniu aktywności przyrody żywej -

umiejętności oczyszczania wody w naturalnych procesach (w środowisku naturalnym gleby, w stawach, jeziorach, wewnątrz złóż biologicznych, komór fermentacji ścieków lub komór osadu czynnego). Systemy hydrofitowe wykorzystuje się do oczyszczania ścieków szarych, wód opadowych, odzysku fosforu ze ścieków czy związków biogenych z osadów ściekowych w celu ich ponownego ich wykorzystania np. w rolnictwie. Technologia hydrofitowa stanowi również spójną i ważną część idei systemów błękitno-zielonej infrastruktury<sup>III</sup> oraz ma bardzo duży potencjał w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym.

I. <https://wodnesprawy.pl/barcelona-stawia-na-odsalenie-wody-by-zlagodzic-sku/>

II. Przełomowa technologia oczyszczania wody w sposób inspirowany naturą, [https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:h\\_6qfzek8mcj:https://cordis.europa.eu/article/id/428488-bringing-nature-s-own-technology-to-the-fore-of-the-clean-water-revolution/pl&cd=21&hl=pl&ct=clnk&gl=pl](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:h_6qfzek8mcj:https://cordis.europa.eu/article/id/428488-bringing-nature-s-own-technology-to-the-fore-of-the-clean-water-revolution/pl&cd=21&hl=pl&ct=clnk&gl=pl)

III. Kłodowska I.: „Systemy hydrofitowe przyjazne środowisku”, Warmińsko-Mazurski ODR, Olsztyn 2021 r.

# DYSTRYBUCJA WODY

Dystrybucja wody to zaopatrywanie ludności w wodę, czyli działalność polegająca na ujmowaniu, uzdatnianiu i dostarczaniu wody przez przedsiębiorstwo wodociągowo-kanalizacyjne<sup>I</sup>.

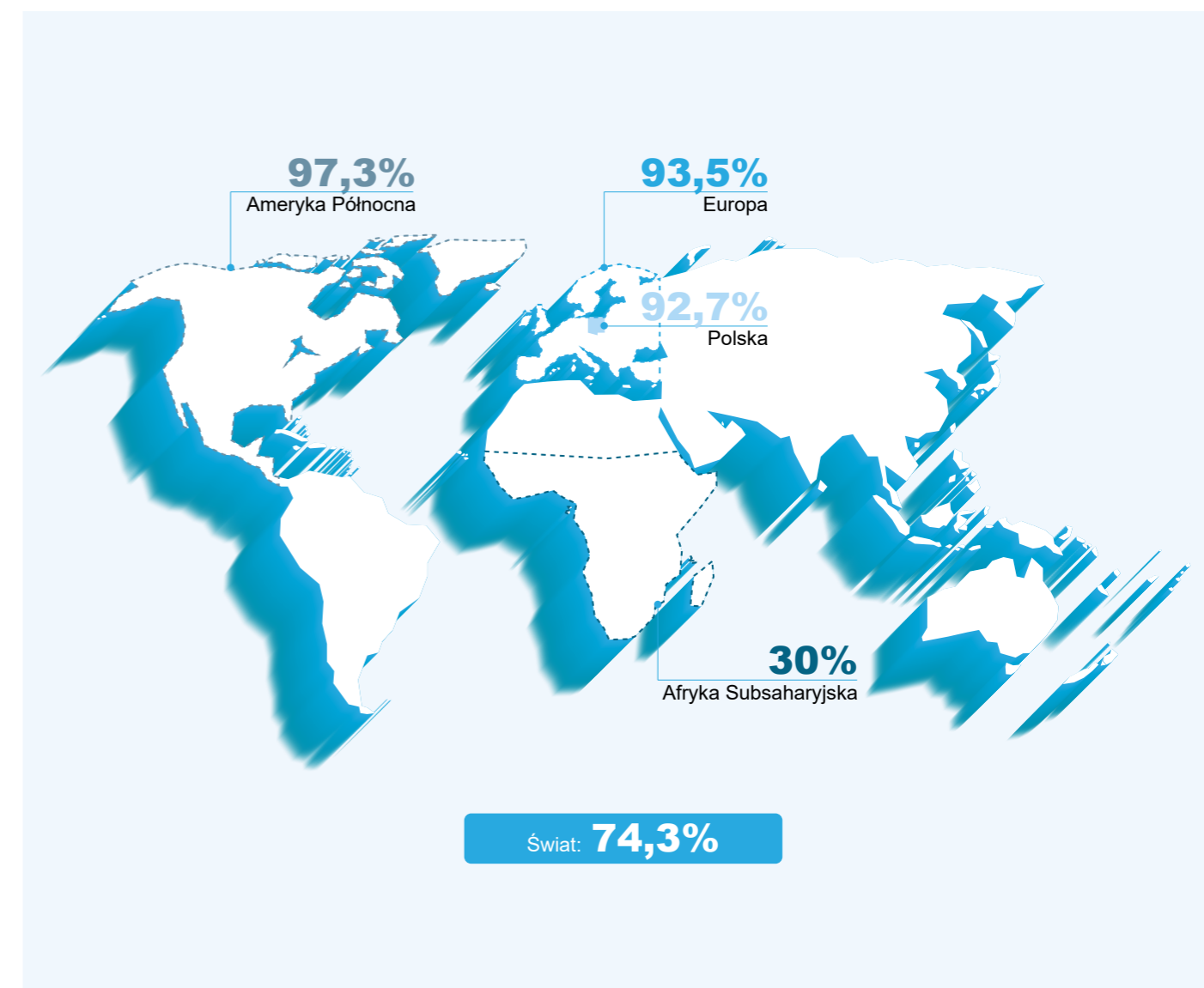
Dostępność zasobów wodnych nie oznacza automatycznie, że mieszkańcy mają zapewniony powszechny dostęp do wody pitnej. Zgodnie z Raportem SDG<sup>II</sup> odsetek ludności korzystającej z bezpiecznie zarządzanej dystrybucji wody pitnej wyniósł na świecie 74,3% w 2021 roku, co oznacza wzrost z poziomu 63,4% w 2005 roku. Nadal ponad 2 mld ludzi ma ograniczony dostęp do wody pitnej lub nie

posiada go wcale.

Lepszą sytuację mają mieszkańcy miast (85% ma dostęp do sieci wodociągowej), na terenach wiejskich tylko 53%<sup>III</sup> korzysta z bezpiecznie zarządzanej dystrybucji wody pitnej.

Amerika Północna zapewnia tę dostępność na poziomie 97,3%, a Europa 93,5%. W najtrudniejszej sytuacji są mieszkańcy Afryki Subsaharyjskiej, gdzie odsetek ludności z zagwarantowanym dostępem do wody zdanej do picia był w 2021 roku najniższy i wyniósł 30%.

Rys. 1.4 Udział ludności korzystającej z sieci wodociągowej do ludności ogółem, 2020.



I. Ustawa o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków (tj. Dz.U. z 2023 r. poz. 537)

II. The Sustainable Development Goals Report 2022, <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/>

III. <https://raportsdg.stat.gov.pl/2020/cel6.html>

# RETENCJA

Retencja to zatrzymanie wody w miejscu, w którym spadła w postaci opadu. Możemy to robić w sposób naturalny; gromadząc wodę w dolinach rzecznych niezmiennych przez działalność człowieka, w lasach, na wilgotnych łąkach, mokradłach oraz w sposób sztuczny; m.in. przegradzając rzeki zaporami i tworząc zbiorniki wodne. Oba sposoby mają swoją specyfikę, mogą dawać korzyści, ale mają również swoje ograniczenia. Dlatego nie mogą być stosowane zamiennie, gdyż nie każdy służy tym samym celom.

Naturalna retencja – obejmuje działania, które zwiększają potencjał magazynowania wody w glebie, krajobrazie lub warstwach wodonośnych. To nic innego, jak przywracanie ekosystemom ich naturalnych właściwości poprzez renaturyzację rzek i terenów zalewowych, rekultywację jezior, odtwarzanie i utrzymywanie łąk i pastwisk, tworzenie pasów buforowych, stosowanie dobrej praktyki rolniczej. Na terenach zurbanizowanych to m.in.: likwidacja piętrzeń, stosowanie przepuszczalnych nawierzchni, ogrodów deszczowych i wiele innych.

Wymieniając sposoby naturalnej retencji warto zwrócić uwagę na korzyści z takich działań. Utrzymanie biologicznego przepływu w rzekach i łagodzenie skutków zmian klimatu, poprawa mikroklimatu poprawa jakości wód i ochrona bioróżnorodności to tylko część z nich. Aspekt społeczny – turystyka, gospodarczy – dostępność naturalnie oczyszczanej wody, czy wreszcie kulturowy – zabezpieczenie

otoczenia na potrzeby kolejnych pokoleń, są równie ważne. Naturalna retencja może mieć także negatywny efekt np. ograniczenie gospodarczego wykorzystania zasobów wodnych poprzez brak uregulowanych szlaków spławnych itp. Nie zapewnia także bezpośredniego dostępu do poboru wody.

Sztuczna retencja - to głównie działania hydrotechniczne i melioracyjne. W zakresie sztucznej retencji rozróżniamy również tzw. małą retencję i dużą retencję. Ta pierwsza polega przede wszystkim na tworzeniu niewielkich zbiorników wodnych (np. stawów śródpolnych i śródleśnych), a jej negatywne oddziaływanie na środowisko naturalne jest nieznaczne. Korzystnych efektów jest za to więcej:

- ograniczenie skutków suszy (np. do nawodnień w rolnictwie i leśnictwie),
- zaspokajanie potrzeb ludności (ujęcia wody pitnej),
- ochrona przed powodzią (poldery, suche zbiorniki),
- produkcja energii elektrycznej (małe elektrownie wodne),
- rekreacja (np. kąpieliska, stawy wędkarskie),
- wsparcie bioróżnorodności (np. na obszarach chronionych, które utraciły swoje naturalne zdolności ekosystemowe),
- poprawa bilansu wodnego (najczęściej stosowane, służące ograniczeniu erozji, retencji spływu powierzchniowego czy zasilaniu podziemnych warstw wodonośnych).



Tzw. duża sztuczna retencja, czyli duże zbiorniki wodne, pełni często kompleksowe (wielozadaniowe) funkcje. Służy m.in.: ochronie przeciwpowodziowej, pozyskiwaniu energii, poborowi wody do celów komunalnych, zapobieganiu skutkom suszy, regulowaniu odpływu lub nawodnienia. W wyniku przegradzenia rzeki zaporą, zmienia się rola doliny. Powstaje nowy, sztucznie utworzony ekosystem, a zmiany są nieodwracalne!

Do największych budowli tego typu na świecie należą: Jinping-I w Chinach (zapora – 305 m wysokości, pojemność zbiornika: 7 760 mln m<sup>3</sup>), Nurek w Tadżykistanie (zapora – 300 m, pojemność: 10 500 mln m<sup>3</sup>). W Europie największą zaporą jest Grande Dixence we Francji (zapora – 285 m wysokości,

pojemność: 400 mln m<sup>3</sup>). Największą polską budowlą jest zapora na Solinie (zapora – 81,8 m wysokości, pojemność: 472 mln m<sup>3</sup>).

Od kilkunastu lat na świecie obserwujemy trend związany z rezygnacją lub rozbiórką tych ogromnych obiektów hydrotechnicznych ze względu na koszty środowiskowe, społeczne i finansowe (koszty budowy i utrzymania). Już w 2014 r. rząd Chile anulował plan budowy pięciu zapór na rzekach Patagonii. Natomiast w 2018 r. rząd Brazylii ogłosił koniec polityki budowy dużych zapór w Amazonii. Największym na świecie zrealizowanym projektem demontażu były dwie zapory wodne (Glines Canyon Dam o wysokości 64 m i Elwha Dam o wysokości 32 m) na rzece Elwha w USA, które zostały zdemontowane w latach 2011 – 2013.



### Retencja – ciekawe światowe trendy:

Miasta gąbki (ang. sponge cities) to nowoczesne metropolie zaprojektowane w celu skutecznego zarządzania wodą deszczową i łagodzenia skutków ekstremalnych zjawisk pogodowych, takich jak susze czy powodzie. Miasta są projektowane tak, aby w jak największym stopniu przypominać naturalne

ekosystemy. Mają pochłaniać i zatrzymywać wodę w czasie deszczów, a następnie uwalniać ją powoli w trakcie suszy. Bazują na tzw. błękitno-zielonej infrastrukturze, wykorzystując rozwiązania takie jak ogrody deszczowe, zielone dachy, zielone ściany, czy przepuszczalne chodniki. Koncepcję stosują miasta na całym świecie: Szanghaj, Singapur, Rotterdam, a w Polsce – dobrym przykładem jest Bydgoszcz.

#### Zdjęcie: Bydgoszcz



Tunele i kanały o dużych średnicach to specjalnie zaprojektowane podziemne konstrukcje służące do zarządzania przepływem deszczówki. Są w stanie przechwycić duże ilości wody, co jest szczególnie przydatne w miejscach o dużym natężeniu przepływu, takich jak miejskie systemy kanalizacyjne czy obszary podatne na powódzie miejskie. Ciekawym przykładem takiego zastosowania jest Stormwater Management And Road Tunnel (SMART) w stolicy Malezji - Kuala Lumpur. Innowacyjny projekt dwupoziomowego tunelu o długości blisko 10 km i średnicy 13 metrów, pełniący funkcję zarówno drogi, jak i kanału do odprowadzania wód. W przypadku intensywnych opadów, woda jest kierowana do tunelu, chroniąc autostradę przed zalaniem. Jeśli zagrożenie powodzią rośnie, tunel drogowy jest również zamykany, umożliwiając większy przepływ wody.

Parki przyrodnicze np. Park Billancourt w pobliżu Paryża, zajmujący prawie 5 hektarów, jest kluczowym elementem systemu zarządzania wodami deszczowymi w rewitalizowanej dzielnicy. Dzięki przepuszczalności gruntu i jego zdolności do magazynowania wody park filtruje wody deszczowe, których część jest ponownie używana do nawadniania. Park został

zaprojektowany tak, aby obejmował tereny o różnym stopniu wilgotności. Główny zbiornik do gromadzenia wody deszczowej składa się z mokradeł, torfowisk i piaszczystych dolin, wyższe partie parku są pokryte łąkami kwietnymi. W sytuacji zagrożenia powodzią, system zastawek pozwala na przekształcenie parku w zbiornik retencyjny.

Przepuszczalne nawierzchnie - w Stanach Zjednoczonych w latach 70-tych zaczęto budować pierwsze nawierzchnie drenażowe. Zostały one specjalnie zaprojektowane, aby skutecznie odprowadzać wodę z powierzchni. Dzięki porowatej strukturze i specjalnym materiałom, takim jak przepuszczalny beton czy asfalt, woda deszczowa szybko przenika przez nawierzchnię do niższych warstw lub specjalnych systemów drenażowych. W Kopenhadze zakończono w 2020 roku testy nowych przepuszczalnych płyt chodnikowych. Woda deszczowa przepływa przez nie i gromadzi się pod nimi w utworzonej warstwie wodonośnej. Stamtąd nadmiar wody może zostać skierowany do pobliskiego ogrodu, pola lub zostać zmagazynowany.

# NIEBIESKIE ZŁOTO

Dostęp do wody jest gwarancją zdrowia społeczeństwa i rozwoju gospodarczego. Branża wodna, wraz z powiązanymi z nią gałęziami, tworzy dziś ciągle rozwijający się sektor Blue Market, gdzie woda stanowi główny obszar zainteresowania, badań naukowych i działań rozwojowo-inwestycyjnych. Również coraz więcej podmiotów z innych branż dostrzega możliwość zaangażowania się w przedsięwzięcia związane z obrotem wodą. Rynki finansowe nie są wyjątkiem. Sektor ten opracował szereg instrumentów w postaci indeksów wodnych, funduszy ETF oraz kontraktów futures. Dzięki nim inwestorzy mają możliwość zabezpieczenia się przed ryzykiem niedoborów, ale też uczestniczenia w długoterminowym wzroście wartości firm związanych z zarządzaniem wodą<sup>I</sup>.

Wartość globalnego rynku wody stabilnie wzrasta. Rynek ten był wyceniany w 2020 roku na ponad 800 mld dolarów i wg szacunków Raportu Global Water Market 2023, jego wartość wzrośnie do 2028 roku do poziomu ok. 1 470 mld dolarów<sup>II</sup>. Kluczowe czynniki wzrostu to przede wszystkim: niedobory wody, pogarszająca się jakość wody, rosnąca populacja, szybko rozwijające się gospodarki wschodzące i wzrost poziomu życia społeczeństw.

Czynniki te wpływają na pobudzenie inwestycji w branży wodnej. Największe na świecie firmy

prześcigają się w tworzeniu innowacji i unikalnych technologii związanych z pozyskiwaniem wody, optymalizacją jej transportu, uzdatnianiem, oczyszczaniem ścieków, optymalizacją zużycia itp.

Ciekawe przykłady obrazujące trendy i dynamiczny rozwój:

#### Sztuczna inteligencja na usługach branży wodociągowej

- straty wody na skutek jej wycieku z sieci wodociągowej sięgają nawet 40% Brytyjska firma FIDO Tech opracowała nowy standard w wykrywaniu wycieków wody dzięki zastosowaniu sztucznej inteligencji (AI), która automatycznie identyfikuje wycieki, ich rozmiar i dokładną lokalizację na podstawie analizy plików tworzonych przez rejestratory akustyczne i hydrofony.

**Woda z atmosfery** - system wytwarzania wody atmosferycznej (ang. Atmospheric Water Generation Technology – AWG)<sup>III</sup> to technologia, która umożliwia produkcję wody pitnej z powietrza. Generatory AWG mogą mieć przeznaczenie domowe i produkować od 1 do 20 litrów wody dziennie lub przeznaczenie komercyjne o wydajności od 1 tysiąca do ponad 10 tysięcy litrów dziennie. Woda wytworzona przez generatory AWG jest zazwyczaj poddawana procesom oczyszczania i dezynfekcji, aby spełnić standardy



I. <https://wodnesprawy.pl/blue-market-niedoceniane-na-swiatowych-rynkach-nieb/>

II. Research and Markets: <https://www.researchandmarkets.com/report/water#cat-pos-1> [dostęp 2023.10.14]

III. <https://www.epa.gov/>

bezpieczeństwa i jakości dla wody pitnej. System AWG zużywa dużo energii i jest kosztowny w eksploatacji.

**Akwaponika** – to bezglebowa forma uprawy, system produkcji żywności łączący konwencjonalną akwakulturę (hodowlę wodnej fauny w zbiornikach) z hydroponiką (uprawą roślin w wodzie). Fauna i flora tworzą tzw. symbiotyczne środowisko. Rośliny wykorzystują zanieczyszczenia wytwarzane przez zwierzęta, dzięki temu ryby czy raki mogą żyć w oczyszczonym, zdrowym środowisku. Działanie tego systemu to naśladowanie procesów zachodzących w naturalnych zbiornikach wodnych, jego główne zalety to:

- produkcja czystej, bogatej w wartości odżywcze żywności;
- uprawa trwająca przez cały rok, bez względu na warunki atmosferyczne;
- oszczędność wody w stosunku do upraw w rolnictwie tradycyjnym (nawet o 90%);
- wymagane mniejsze powierzchnie na potrzebę uprawy roślin niż w rolnictwie tradycyjnym;
- redukcja odpadów trafiających do środowiska, większość składników jest wykorzystywana w obiegu zamkniętym;
- retencja i zagospodarowanie wód opadowych z zielonego dachu.

Pierwsza tego typu inwestycja pod nazwą Miejska AquaFarma została zrealizowana we Wrocławiu

I. <https://aqfarm.eu>

II. <https://wodnesprawy.pl/oczyszczanie-sciekow-pozza-aglomeracjami-systemy-pas/>



w marcu 2023 roku<sup>I</sup> i jest również miejscem edukacji na temat zmian klimatu.

**Systemy pasywne** - oczyszczanie ścieków na terenach wiejskich, o rozproszonej zabudowie, wiąże się z wieloma wyzwaniami. Według raportu: Stan techniki stacji zlewnych w Polsce, wydany w kwietniu br. przez firmę Ścieki Polskie w partnerstwie z Ideą 3W oraz BGK, ponad 10,5 mln Polaków nie jest podłączonych do systemu kanalizacji zbiorczej. Jednym z możliwych rozwiązań są pasywne systemy, do których zaliczamy oczyszczalnie hydrofitowe, które odwzorowują procesy naturalnie zachodzące w ekosystemach bagiennych. Mikroorganizmy degradują i asymilują związki węgla, zatrzymują związki fosforu i metale ciężkie, odpowiadają też za przyswajanie i ulatnianie związków azotu. Taki obiekt funkcjonuje już ponad dwie dekady w Czechach, w miejscowości Velka Jassenice. W Polsce przykładem takiego rozwiązania może być pasywny system oczyszczania ścieków w miejscowości Udrzynek (gmina Brańszczyk). Oczyszczalnia została zaprojektowana i wybudowana przez spółkę RDLS – spin off Uniwersytetu Warszawskiego<sup>II</sup>.

# CZARNE ŁABĘDZIE

Zmiany klimatu powodują narastanie ekstremalnych zjawisk w naszym otoczeniu, których potencjalne wystąpienie oraz intensywność zwykle jest nieprzewidywalne i zaskakujące. Efekty społeczne i gospodarcze są zwykle gigantyczne. Według UNICEF aż 74% klęsk żywiołowych na świecie w latach 2001–2018 miało związek z wodą. Wśród nich były zarówno susze, jak i powodzie<sup>I</sup>. Inne nieprzewidziane zjawiska i wydarzenia, takie jak: pandemia Covid-19 czy agresja Rosji na Ukrainę, całkowicie zmieniły podstawy naszego życia, a ich wpływ na losy regionów czy państw jest ogromny.

Nasilenie się zjawisk ekstremalnych - zmiana klimatu potęguje występowanie i intensywność tych zjawisk, których modele oparte na danych historycznych nie są w stanie przewidzieć i opisać. Anomalie są coraz bardziej zauważalne i odczuwalne. NASA ogłosiła, że minione lato meteorologiczne (czerwiec–sierpień 2023) były najgorętszym latem w historii pomiarów prowadzonych od 1880 roku. Temperatura ta była również wyższa o 1,2 °C od średniej z okresu 1951-1980<sup>II</sup>.

Europa odczuła to szczególnie mocno w ubiegłym roku. Niedobory wody i susza dotknęły znaczną jej część. W sierpniu, w północnej części Niemiec, odnotowano w niektórych miejscach drogi wodnej na Renie, poziom wody poniżej 40 cm, co stanowi historycznie najniższe odczyty w tych miejscach. We Włoszech na rzece Pad odnotowano poziom wody niższy o 7 m od średniej z wielolecia. We Francji walciono z najgorszą w historii tego kraju suszą, ponad 100 gmin cierpiało z powodu braku wody pitnej.

Według Climate Reanalyzer University of Maine<sup>III</sup> na początku lipca 2023 roku padł rekord średniej temperatury powietrza na poziomie gruntu dla całej Ziemi. Międzyrządowy Zespół ds. Zmiany Klimatu (IPCC)<sup>IV</sup> ogłosił, że globalne temperatury nie były tak wysokie od 125 000 lat.

Nie tylko susza jest problemem w Europie. Powodzie, które nawiedziły w 2021 roku Niemcy, a w 2023 roku Włochy były największymi od ponad 100 lat. Najbardziej ucierpiała dolina rzeki Ahr. Zginęło wówczas ponad 170 osób, a 17 tys. zostało bez dachu nad głową.

Zjawiska ekstremalne występują również w pozostałych regionach świata. W 2022 roku powódź w Pakistanie doprowadziła do śmierci blisko 2 tys. osób i zmusiła do migracji 7 mln Pakistańczyków. Tragiczna w skutkach była również ubiegłoroczna powódź w prowincji KwaZulu-Natal na wschodnim wybrzeżu RPA. Zginęło 459 osób, a straty oszacowano na 3 mld euro. W lipcu 2023 roku w Indiach i Pakistanie walciono ze skutkami nawalnych deszczy, które wywołały powodzie i lawiny błotne. Chociaż sezon monsunów na Półwyspie Indyjskim to nic wyjątkowego, to opady były szczególnie intensywne – w Delhi odnotowano największe wartości od ponad 40 lat. Według raportu<sup>V</sup> przygotowanego przez organizację Christian Aid, dziesięć najbardziej kosztownych katastrof klimatycznych na świecie przyniosło straty oszacowane na 168,4 mld dolarów. Po raz pierwszy w tym zestawieniu znalazła się także Polska (za sprawą Orkanu Eunice, luty 2022).

W Polsce zjawiska ekstremalne to przede wszystkim powodzie błyskawiczne oraz susze. Powodzie opadowe, tzw. flash floods, są najczęściej konsekwencją zjawisk burzowych i nawalnych deszczy na obszarze miasta. Najbardziej narażone są obszary o dużej gęstości tkanki miejskiej (uszczelnionych zlewniach). Zgodnie z danymi statystycznymi GUS, w 2021 roku zarejestrowano blisko 30 tys. interwencji straży pożarnej w związku z nadmiernymi opadami deszczu i podtopieniami.

Susza w Polsce w ostatnich latach jest szczególnie dotkliwa. W 2023 roku zagrażała uprawom w ponad 65 proc. gmin. Duże niedobory wody odnotowano też na Pojezierzach Pomorskim, Mazurskim i Wielkopolskim. Prawie 170 gmin apelowało do swoich mieszkańców, by oszczędzali wodę z powodu występujących niedoborów. W opublikowanym w ubiegłym roku raporcie Polskiego Instytutu Ekonomicznego: „Gospodarcze koszty suszy dla polskiego rolnictwa” oszacowano, że co roku tracimy plony o wartości nawet 6,5 mld złotych<sup>VI</sup>. W tym samym raporcie PIE prognozuje, że wzrost średniej temperatury o 2 °C spowoduje spadek plonów o co najmniej 14%.

**Pandemia Covid-19** przyniosła światu ogromne wyzwania społeczne, gospodarcze, polityczne, ale także środowiskowe. Co ciekawe, dla środowiska

I. UNICEF: <https://unicef.pl/co-robimy/aktualnosci/news/woda-i-globalny-kryzys-klimatyczny-10-rzeczy-o-ktorych-musisz-wiedziec> [dostęp 2023.10.14]

II. NASA: <https://climate.nasa.gov/news/3282/nasa-announces-summer-2023-hottest-on-record/>

III. <https://climatereanalyzer.org/>

IV. <https://www.ipcc.ch/>

V. <https://www.christianaid.org.uk/sites/default/files/2022-12/counting-the-cost-2022.pdf>

VI. PIE: Raport 3/2022, Gospodarcze skutki suszy dla polskiego rolnictwa



była chwilą oddechu, związaną z powszechną izolacją (ang. lockdown), zmniejszeniem liczby lotów (spadek ruchu biznesowego i turystycznego) czy ograniczeniem aktywności społeczeństw. Poprawiła się jakość powietrza, odnotowano poprawę jakości wód. W Gangesie, który należy do najbardziej zanieczyszczonych rzek świata, po ośmiotygodniowym okresie *lockdown* dla przemysłu, na odcinku miast Rishikesh i Haridwar woda z rzeki nadawała się do picia<sup>I</sup>.

Różnorodność biologiczna w naturalnych ekosystemach od zawsze pomagała powstrzymać zaraźliwe patogeny przed przekształceniem się w pandemię poprzez naturalne systemy kontroli i utrzymywania równowagi<sup>II</sup>. Wynikająca głównie z zanieczyszczeń i dynamicznej urbanizacji utrata obszarów chronionych i naturalnych siedlisk to poważane zagrożenia, ograniczające naturalne zdolności prewencyjne natury, z których korzystamy również jako ludzkość w skali globalnej.

Ważnym odkryciem z okresu pandemii Covid-19 było zastosowanie analizy ścieków do diagnozy poziomu i kierunku rozprzestrzeniania się epidemii. Nie tylko można było potwierdzić występowanie wirusa, ale również zbadać jego typ i poziom stężenia, co pozwalało tworzyć modele tempa wzrostu zakażeń. Na bazie zdobytych doświadczeń, monitoring wody pod kątem obecności wirusa staje się standardem. W Polsce przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne prowadzą takie badania, przykładem może być aglomeracja warszawska<sup>III</sup>.

**Agresja Rosji na Ukrainę** to niewyobrażalna w realiach XXI wieku katastrofa humanitarna. Działania wojenne powodują śmierć, cierpienie i zniszczenie. W obszarach bezpośrednich walk oraz w miejscach ataków rakietowych Rosji, ludzie tracą dach nad głową i dobytek całego życia. By przetrwać muszą uciekać,

skala migracji jest bezprecedensowa, ponad 6 milionów Ukraińców opuściło swój kraj w związku z wojną. Ponad 93% trafiło do Europy, z czego ponad 25% zawnioskowało o azyl lub ochronę czasową w Polsce<sup>IV</sup>.

Konsekwencje tej wojny są tragiczne również dla środowiska m.in. w efekcie pożarów wywołanych ostrzałami, czy na skutek stosowania amunicji zawierającej wysokie stężenia toksycznych metali, takich jak ołów, rtęć i arsen. Przemieszczające się wojska niszczą torfowiska i tereny podmokłe, ograniczając ich funkcje ekosystemowe.

Wysadzenie zapory w Nowej Kachowce, uwolniło gigantyczną ilość wody ze zbiornika, który zajmował powierzchnię 2 155 km<sup>2</sup> i gromadził 18,2 mln m<sup>3</sup> wody. W efekcie pod wodą znalazło się ok. 120 tys. hektarów ziemi. Ucierpieli ludzie, zwierzęta i cały ekosystem zlewni Dniepru. Ukraina bezpowrotnie straciła część obszarów chronionych.

Tocząca się wojna spowodowała przyspieszenie transformacji energetycznej Europy. Również w Polsce przyspieszono działania zmierzające do budowy instalacji produkujących energię z atomu. Okazuje się, że będzie to mieć duże znaczenie dla zasobów wodnych. Elektrownie jądrowe wymagają stałego dostępu do stabilnego źródła wody, która stanowi chłodziwo rdzenia reaktora, medium przenoszenia ciepła z reaktora do turbiny oraz jest wykorzystywana do innych procesów.

W elektrowniach tradycyjnych, np. węglowych, woda jest wykorzystywana do wytwarzania pary napędzającej turbinę, a po schłodzeniu wraca do źródła (np. rzeki). W elektrowni jądrowej woda służy do przenoszenia ciepła. Po schłodzeniu wraca do elektrowni w celu jej ponownego użycia. Elektrownie jądrowe mogą wykorzystywać do chłodzenia wodę słodką lub słoną.

I. <https://www.india.com/viral/ganga-in-rishikesh-becomes-fit-for-drinking-and-shines-like-diamond-in-haridwar-netizens-share-stunning-pictures-3999338/>

II. Everard et al. The role of ecosystems in mitigation and management of Covid-19 and other zoonoses, 2020

III. ????

IV. Biuro Wysokiego Komisarza ds. Uchodźców: Operational Data Portal, <https://data2.unhcr.org/en/situations/ukraine> [dostęp 2023.10.14]

# CZY PROBLEM Z WODĄ TO „WYMYSŁ NAUKOWCÓW”?

Pomimo zauważalnej poprawy, około 2 miliardów ludzi wciąż nie ma dostępu do bezpiecznie zarządzanej dystrybucji wody pitnej, a wśród nich aż 771 milionów nie ma podstawowego dostępu do wody pitnej<sup>I</sup>. Wg szacunków The World Resources Institute, zapotrzebowanie na świeżą wodę przekroczy jej dostępność w 2030 roku aż o 56%<sup>II</sup>. Z kolei wzrost globalnego zapotrzebowania na wodę szacowany jest na 30% w perspektywie do 2050 roku<sup>III</sup>.

W świadomości społeczeństw wzrasta zrozumienie, że świat wokół nas podlega przemianom, w dużym stopniu spowodowanym efektami działalności człowieka. Wzrost populacji i „konsumpcjonizmu”, pogoń za

wzrostem produkcji czy wreszcie efekty zmiany klimatu wywołują generując nowe zjawiska w obszarze wody, które są zauważalne już dzisiaj, a których intensywność będzie w przyszłości wzrastać.

Wiedza o skali problemów np. o niewystarczającej dostępności zasobów wodnych oraz o niekorzystnych trendach w tym zakresie, wzrasta, lecz jest wciąż niewystarczająca. Prognozy wskazują, że do 2025 roku połowa populacji będzie żyć w regionach cierpiących na niedobór wody<sup>IV</sup>. Bez podjęcia zdecydowanych globalnych działań konflikty wynikające z rywalizacji o wodę będą się nasilać<sup>V</sup>.



I. Worldbank: <https://blogs.worldbank.org/opendata/world-water-day-two-billion-people-still-lack-access-safely-managed-water> [dostęp 2023.10.14]

II. World Resources Institute: <https://www.wri.org/research/setting-enterprise-targets-modeling-downstream-water-use-consumption> [dostęp 2023.10.14]

III. World Resources Institute: <https://www.wri.org/water> [dostęp 2023.10.14]

IV. <https://www.afro.who.int/health-topics/water>

V. <https://wodnesprawy.pl/zmiany-klimatyczne-a-rosnace-ryzyko-wystepowania-ko/>



W dniach 22–24 marca 2023 roku w siedzibie ONZ w Nowym Jorku odbyła się Konferencja Wodna. Jej głównym celem było przyjęcie programu działań na rzecz wody (Water Action Agenda). Podczas wydarzenia przedstawiono ponad 700 dobrowolnych zobowiązań złożonych przez wielostronne partnerstwa. Stanowią one pierwszą odpowiedź na wyzwania związane z wodą i klimatem na świecie. Poniżej wybrane przykłady takich inicjatyw<sup>I</sup>:

- Stany Zjednoczone przeznaczają 49 mld dolarów na inwestycje wspierające infrastrukturę oraz usługi wodne i sanitarne odporne na zmianę klimatu;
- Japonia planuje przyczynić się do rozwiązania problemów społecznych związanych z wodą, które dotyczą region Azji i Pacyfiku, rozwijając wysokiej jakości infrastrukturę i zapewniając pomoc finansową (3,65 mld dolarów) w ciągu najbliższych pięciu lat;
- Wietnam opracuje politykę zarządzania głównymi dorzeczami do 2025 roku oraz zapewnienia wszystkim gospodarstwom domowym dostępu do czystej, bieżącej wody do 2030 roku;
- ponad 50 wiodących globalnych firm (m.in. DANONE, Starbucks, Ecolab, Gap Inc. Xylem) będzie współpracować przy realizacji SDG 6 (szóstego celu zrównoważonego rozwoju dotyczącego zapewnienia czystej wody i warunków sanitarnych dla wszystkich).

Kwestie zapewnienia dobrej jakości wody dla ludności i ochrony istniejących zasobów wodnych są



w szerokim zakresie uwzględniane w prawodawstwie Unii Europejskiej. W ostatnich 30 latach państwa członkowskie UE poczyniły znaczne postępy na rzecz poprawy jakości wody, przyjmując m.in. ramową dyrektywę wodną (RDW)<sup>II</sup>, dyrektywę dotyczącą oczyszczania ścieków komunalnych<sup>III</sup>, dyrektywę w sprawie wody pitnej<sup>IV</sup> oraz rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie ustanowienia ram ułatwiających zrównoważone inwestycje (tzw. Taksonomia)<sup>V</sup>.

W lutym i marcu br. w Polsce przyjęto zaktualizowane plany gospodarowania wodami dla obszarów poszczególnych dorzeczy. Będą one obowiązywały w kolejnym cyklu planistycznym<sup>VI</sup>.

Europejski Komitet Ekonomiczno-Społeczny (EKES) pracuje nad Niebieskim Ładem (Blue Deal), czyli strategią określającą kierunki zmian i inwestowania w gospodarkę wodną. Ma ona uwzględniać kwestie związane z gospodarowaniem wodą, poprawą jej dostępności, a także ochroną zasobów z powodu deficytów występujących w całej Europie. 26 września 2023 r. Komisja Konsultacyjna ds. Przemian w Przemśle (CCMI) przyjęła tzw. opinię parasolową w sprawie Blue Deal. Kolejnym krokiem będzie przedstawienie Komisji Europejskiej przez EKES rekomendacji „Niebieskiego Ładu”.

# WODA W TRÓJMORZU (3 SEAS INITIATIVE – „3SI”)

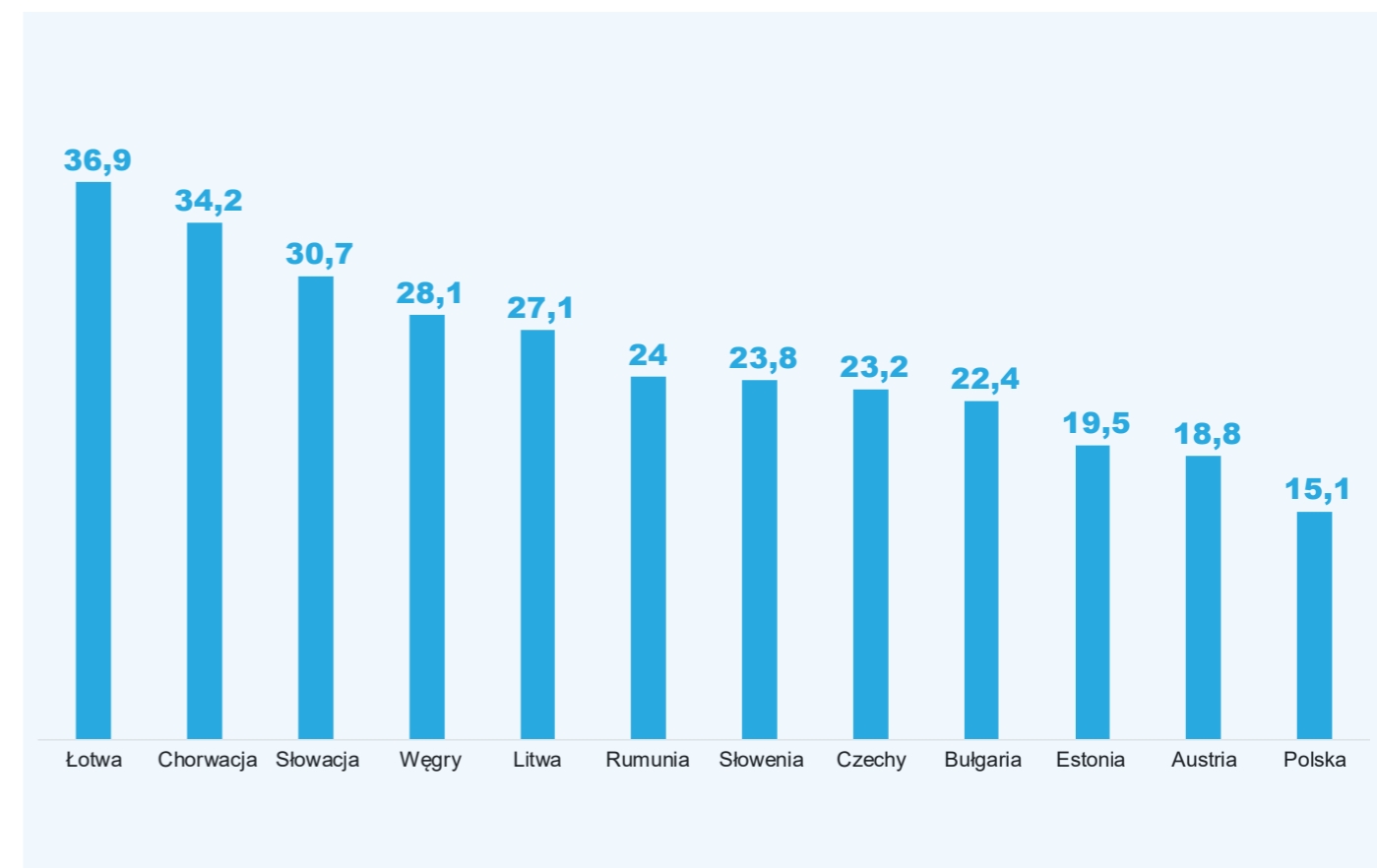
Inicjatywa Trójmorza powstała w 2015 roku. Do niedawna, uczestniczyło w niej 12 państw: Austria, Bułgaria, Chorwacja, Czechy, Estonia, Litwa, Łotwa, Polska, Rumunia, Słowacja, Słowenia i Węgry. We wrześniu 2023 roku, podczas szczytu w Bukareszcie (6-7 września), ogłoszono oficjalnie akcesję Grecji.

Inicjatywa Trójmorza obejmuje problematykę sektorową: transportu, energetyki i komunikacji cyfrowej. Wychodząc naprzeciw wyzwaniom rozwojowym oraz zmianie klimatycznej, działania

3SI mogłyby obejmować również pozostałe sektory. **Mogłyby, ale czy tak się dzieje?**

Różne potencjały ekonomiczne i polityczne państw tworzących 3SI mogą mieć wpływ na stopień zaangażowania ekonomicznego, politycznego i finansowego w ten format współpracy. Najnowsze dane w tym zakresie wskazują, że w 2021 roku udział wzajemnej wymiany handlowej państw 3SI w wymianie handlowej ogółem wynosił odpowiednio<sup>I</sup>,<sup>II</sup>:

Rys. 1.5 Udział obszaru 3SI w wymianie handlowej danego państwa, 2021



Z ekonomicznego punktu widzenia, wymiana handlowa w ramach 3SI jest bardzo ważna dla Chorwacji i Łotwy, gdyż stanowi ponad 1/3 ich wymiany handlowej ogółem. Na drugim krańcu znajduje się Polska, dla której wymiana handlowa z krajami 3SI stanowi nieco

powyżej 1/7 wymiany handlowej ogółem.

Najważniejszymi partnerami Polski w wymianie w ramach 3SI są bezpośredni sąsiedzi, czyli Litwa, Czechy i Słowacja.

I. <https://sdgs.un.org/conferences/water2023>

II. [https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-framework-directive\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-framework-directive_en)

III. [https://environment.ec.europa.eu/topics/water/urban-wastewater\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/water/urban-wastewater_en)

IV. [https://environment.ec.europa.eu/topics/water/drinking-water\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/water/drinking-water_en)

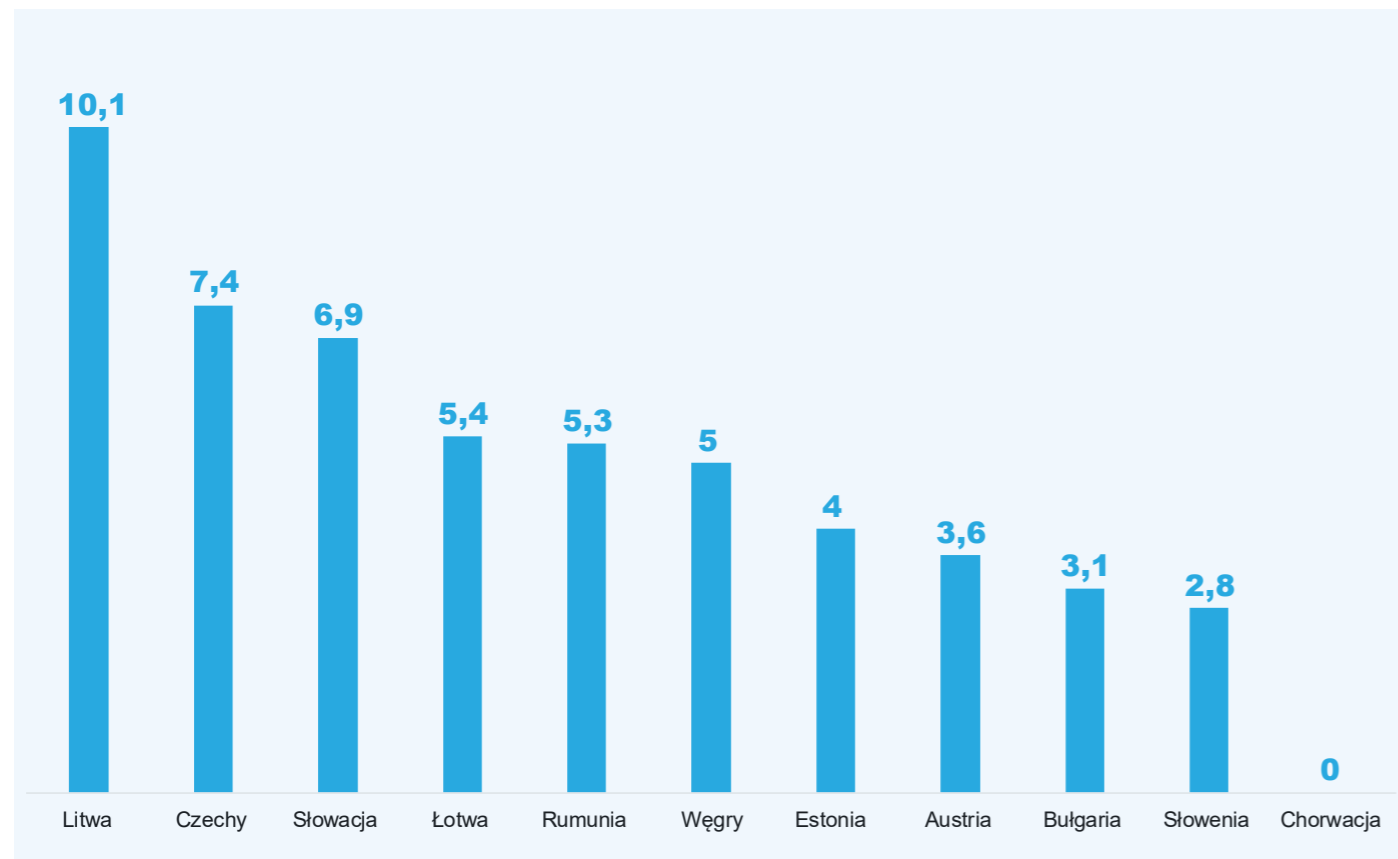
V. <https://ec.europa.eu/sustainable-finance-taxonomy/>

VI. <https://wodnesprawy.pl/komplet-rozporzadzen-w-sprawie-planow-gospodarowani/>

I. [https://ies.lublin.pl/komentarze/nowe-szanse-rozwoju-dla-europy-srodkowej-wspolpraca-gospodarcza-w-ramach-inicjatywy-trojmorza/#\\_ftn1](https://ies.lublin.pl/komentarze/nowe-szanse-rozwoju-dla-europy-srodkowej-wspolpraca-gospodarcza-w-ramach-inicjatywy-trojmorza/#_ftn1)

II. [www.trademap.org](http://www.trademap.org)

Rys. 1.6 Udział wymiany handlowej danego państwa 3SI z Polską, 2021



Pomimo faktu, iż wymiana handlowa w ramach 3SI stanowi mniejszą część polskiego handlu międzynarodowego, Polska przyjmuje rolę inicjatora wielu działań, w tym w szczególności w zakresie projektów przyspieszających rozwój gospodarczy, np. poprzez budowę infrastruktury Północ-Południe: szlaki drogowe Via Carpatia i Via Baltica, połączenie kolejowe Rail Baltica oraz korytarz wodny Dunaj-Odra-Łaba. Podobne stanowisko w zakresie korzyści gospodarczych z przynależności do Inicjatywy prezentują także państwa bałtyckie oraz Rumunia i Bułgaria.

Po przeciwnej stronie znajduje się Austria, która nie uczestniczy w żadnym projekcie strategicznym. Również Czechy, Słowacja i Węgry wykazują mniejsze zaangażowanie; Czechy zaangażowały się w tylko jeden projekt priorytetowy – korytarz wodny Dunaj-Odra-Łaba<sup>I</sup>.

**Korytarz wodny Dunaj-Odra-Łaba** miał za zadanie połączyć Polskę, Czechy oraz Słowację za pomocą 450-cio kilometrowego kanału, dzięki czemu powstałaby sieć wodnych ciągów transportowych i w efekcie możliwość połączeń drogą wodną dla portów morskich w całym regionie. Planowano sfinansować inwestycję ze środków utworzonego w 2019 roku 3SI Investment Fund, którego celem jest polepszenie połączeń między regionami oraz przyspieszenie inwestycji w projekty infrastrukturalne regionów.

Projekt budowy korytarza wodnego znalazł się również wśród polskich priorytetów inwestycyjnych zgłoszonych w ramach Szczytu Inicjatywy Trójmorza 16–19 września 2018 roku obok projektów Via Carpatia i Via Baltica. Niestety w 2023 roku Rząd Republiki Czeskiej **uchwalił zniesienie** rezerwy terytorialnej dla połączenia

I. <https://3seas.eu/about/progressreport>

kanałów Dunaj-Odra-Łaba, tym samym po stronie czeskiej nastąpiła rezygnacja z realizacji projektu.

Co ciekawe, w żadnych oficjalnych wystąpieniach czy też dokumentach przekrojowych dotyczących Trójmorza nie wspomina się o projektach gospodarowania wodą w szeroko rozumianym przemyśle. Ani w kontekście wykorzystania, ani w zakresie jej oszczędzania, czyli dostosowania gospodarki do technologii obiegu zamkniętego.

Widoczny jest zdecydowanie większy nacisk na sprawy i projekty związane z infrastrukturą, energetyką i bezpieczeństwem energetycznym, co wynika z pierwotnych założeń, jakie przyświecały utworzeniu 3SI. Obecnie tematyka wody oraz wyzwań w tym obszarze zyskuje na znaczeniu i bez wątpienia inicjatywa rozciągająca się geograficznie pomiędzy trzema morzami powinna podjąć te wyzwania i poszerzyć katalog priorytetów o inwestycje wodne.

# SPOJRZENIE W PRZYSZŁOŚĆ

Dostęp do wody determinuje możliwość funkcjonowania człowieka na Ziemi, zaburzenia cyklu obiegu wody mogą być groźne, a nawet katastrofalne dla naszej dalszej egzystencji. Miniona dekada była najcieplejsza od czasu rozpoczęcia pomiarów w XIX wieku i obejmowała 9 z 10 najcieplejszych lat, jakie kiedykolwiek zarejestrowano. Temperatura wody w oceanach wzrasta i kumuluje ok. 93% ocieplenia planety od lat 50. XX wieku<sup>I</sup>.

Ocieplenie jest wynikiem emisji gazów cieplarnianych (ang. GHG – Greenhouse Gases). Coraz większa ilość energii słonecznej zostaje „uwięziona” w atmosferze i przekazana otoczeniu.

Spada pH wód, oceany zakwaszają się powodując nieodwracalne zmiany w faunie i florze. Ciepła woda ma mniejszą pojemność magazynowania CO<sub>2</sub>. Dalszy wzrost temperatury spowoduje, że oceany zaczną pozbywać się tego gazu. Roślinność, przy przesuwniu się stref klimatycznych, karczowaniu lasów i niedoborach wody będzie miała ograniczoną możliwość pochłaniania CO<sub>2</sub>.

Wyższa temperatura i wyższa wilgotność powietrza spowodowana parowaniem, przyspieszy procesy gnicia i uwalniania węgla i metanu, co dodatkowo wzmacnia efekt cieplarniany. Roztopianie się wiecznej zmarzliny spowoduje uwolnienie do atmosfery kolejnej porcji gazów cieplarnianych w ilości 10-100 % emisji z paliw kopalnych. Jeśli taki scenariusz się ziści, być może jeszcze w naszym stuleciu lądy staną się źródłem emisji, a nie jej magazynem<sup>II</sup>.

Topnienie wiecznej zmarzliny może mieć także inne, katastrofalne skutki w postaci uwolnienia się uśpionych i nieznanych dotąd człowiekowi wirusów. Wyniki badań są alarmujące. Naukowcy udowodnili, pobierając wirusy sprzed 30 tys. lat, że możliwe jest przywrócenie ich aktywności<sup>III</sup>.

Ocieplenie powoduje topnienie lodolodów. Według najnowszego raportu Europejskiej Agencji Kosmicznej

I. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016

II. <https://naukaoklimacie.pl/aktualnosci/czy-i-dlaczego-klimat-ziemi-sie-zmienia-4/>

III. <https://przystaneknauka.us.edu.pl/artukul/zarazliwe-wirusy-z-wiecznej-zmarzliny>

IV. Simonsen, SB, Slater, T., Spada, G., Sutterley, TC, Vishwakarma, BD, van Wessem, JM, Wiese, D., van der Wal, W. i Wouters, B.: Bilans masy Grenlandii i pokrywy lodowej Antarktydy w latach 1992-2020, Earth Syst. nauka Dane, 15, 1597–1616, <https://doi.org/10.5194/essd-15-1597-2023>, 2023.

V. <https://www.usgs.gov/faqs/how-would-sea-level-change-if-all-glaciers-melted>

VI. [https://scnat.ch/en/uid//2e076759-0234-567e-9bfb-2cdf6bd6ff34-Worse\\_than\\_2003\\_Swiss\\_glaciers\\_are\\_melting\\_more\\_than\\_ever\\_before](https://scnat.ch/en/uid//2e076759-0234-567e-9bfb-2cdf6bd6ff34-Worse_than_2003_Swiss_glaciers_are_melting_more_than_ever_before)

VII. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Water/page3.php>

(ESA)<sup>IV</sup> tempo utraty lodu na Antarktydzie i na Grenlandii przyspieszyło. Na podstawie danych satelitarnych oszacowano, że od lat 90. XX wieku wzrosło aż pięciokrotnie. Należy pamiętać, że lodowce pokrywają prawie 10% powierzchni lądów (głównie Grenlandia i Antarktyda). Stopnienie lodowców Grenlandii podniosłoby poziom wody o 7 metrów, a całości lodolodu Antarktydy – o około 60 metrów<sup>V</sup>.

Analogicznemu procesowi podlegają lodowce górskie. Całkowite zaniknięcie lodowca w górach powoduje utratę źródeł zasilania rzek, co pogłębia zjawisko suszy. Przykładem mogą być najliczniejsze w Europie lodowce szwajcarskie, dla których rok 2022 był rekordowy pod względem szybkości topnienia. Jak podała Szwajcarska Akademia Nauk – lodowce straciły aż 6% swojej objętości całkowitej<sup>VI</sup>.

Kluczowym elementem zmiany klimatu jest wpływ na cykl hydrologiczny, czyli na całość procesów, dzięki którym następuje powtarzający się, zamknięty obieg wody, utrzymujący globalny zasób na równym poziomie. Najnowsze modele klimatyczne jednoznacznie wskazują, że opady staną się bardziej zmienne oraz nastąpi wzrost ryzyka wystąpienia suszy lub powodzi<sup>VII</sup>.

W marcu 2023 roku zakończono prace nad AR6 Synthesis Report – ostatnią, podsumowującą częścią raportu Międzyrządowego Zespołu ds. Zmiany Klimatu. Został on opracowany na podstawie ponad stu tysięcy recenzowanych artykułów naukowych. Sekretarz generalny ONZ António Guterres nazwał dokument „przewodnikiem przetrwania dla ludzkości”.

Raport przypisuje człowiekowi odpowiedzialność za zmianę klimatu oraz stwierdza, iż zmiana klimatu postępuje i jest coraz bardziej problematyczna. Zgodnie z raportem, dalsze globalne ocieplenie oznacza nasilenie ekstremalnych i coraz bardziej niebezpiecznych zjawisk pogodowych, w tym powodzi i suszy. Ocieplenie powyżej 1,5°C spowoduje, że życie w niektórych regionach świata stanie się niemożliwe.

### Szósty raport IPPC w liczbach!



**od 3,3 do 3,6 mld ludzi**  
jest narażonych na negatywne konsekwencje zmiany klimatu;



**54% emisji CO<sub>2</sub> z ostatnich 10 lat,**

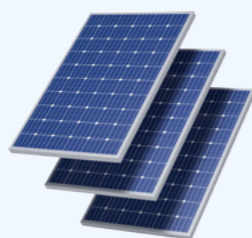
wynikającej z działalności człowieka pochłonęła przyroda:

**31%** – ekosystemy lądowe; **23%** – morza i oceany;



**ok. 1/3 emisji**

gazów cieplarnianych pochodzi z sektora żywności;



**o 85%** spadły koszty pozyskiwania energii słonecznej,

**o 55%** spadły koszty pozyskiwania energii z wiatru w latach 2010–2019.

Energia z tych OZE jest tańsza i łatwiej dostępna niż kiedykolwiek.

# TRENDY I WYZWANIA

Zapotrzebowanie na wodę stale wzrasta, sukcesywnie o 1% od 40 lat, co potwierdza AR6 Synthesis Report. Niedobory wody wynikają z nadmierowego zużycia, skutków zmiany klimatu, zanieczyszczenia wód, których zdolności do samooczyszczania spada.

Rozwój przemysłu, rolnictwa i wzrost populacji powoduje, że sytuacja nie ulega poprawie. Każdego dnia odprowadzanych jest do wód ok. 2 mln ton ścieków, odpadów rolniczych i przemysłowych. Szacuje się, że aż 80% nie jest odpowiednio oczyszczone.

Zdaniem naukowców ilość wytwarzanych ścieków wzrośnie o 50% do 2050 roku, a po tej dacie nastąpi gwałtowne pogorszenie jakości wody na świecie. Problemy nieoczyszczonych ścieków to również brak dostępu ludności do urządzeń sanitarnych – dotyczy to aż 6 na 10 osób na świecie. Konsekwencją jest rozprzestrzenianie się szeregu chorób wywołanych przez bakterie i pasożyty.

Inteligentne systemy zarządzania wodą będą jedną z odpowiedzi na ograniczenie zużycia wody. Wykorzystując czujniki i odpowiednie algorytmy możemy spodziewać się, że wzrośnie efektywność wykorzystania wody w rolnictwie. Dostosowując jej zużycie do wilgotności gleby, temperatury, nasłonecznienia, etapu wzrostu plonów i wielu innych czynników, które odpowiednio przeliczy AI.

Wdrażanie rozwiązań tzw. Gospodarki Obiegu Zamkniętego, pozwalające odzyskiwanie zużytej wody

oraz wykorzystywanie wody o niższych parametrach do zastosowań, dla których jakość wody jest odpowiednia.

Ograniczenie strat wody w sieciach wodno-kanalizacyjnych, poprzez modernizację systemów oraz monitoring z wykorzystaniem AI. Intensyfikacja inwestycji w oczyszczalnie ścieków nie tylko w krajach rozwiniętych, ale przede wszystkim w rozwijających się.

Odpowiednie zarządzanie odpływem wód opadowych, wykorzystywanie w miastach błękitnej i zielonej infrastruktury do zatrzymywania wody. Rozwój nowoczesnych, opartych na wynikach modelowania, form retencji ze szczególnym naciskiem na retencję małą.

Odejście od budowy dużych obiektów hydrotechnicznych – zbiorników wodnych, w tym dokonanie niezbędnych rozbiórek.

Ochrona bioróżnorodności na znacznie szerszą skalę niż to ma miejsce obecnie, renaturyzacja cieków, pozostawianie dolin ich naturalnym procesom.

Stopniowe wycofywanie dopłat do nawozów w poszczególnych krajach. Dopłaty powodują nadmierne stosowanie zamienników oraz nierównomierne dawkowanie nawozów. Potęgują sploty biogenów do wód.



# CO MY MOŻEMY ZROBIĆ DLA WODY?

W najbliższych latach prognozowana jest zwiększona ilość opadów w okresie zimowym, co jednak nie oznacza, że pozbędziemy się problemu suszy latem.

Jeśli nie zatrzymamy wody, to szybko odpłynie rzekami do morza. Pamiętajmy, że woda z opadu jest darmowa, a ta pobrana z wodociągu już nie. Jako użytkownicy możemy włączyć się w retencjonowanie wody oraz jej oszczędzanie. Co możemy zrobić?

**Gromadzenie wody opadowej** – wykonać szczelny zbiorniki na deszczówkę, oczko wodne, staw, zapewnić by woda opadowa z naszego dachu nie spływała wyłącznie do sieci kanalizacyjnej;

**Zrezygnować z uszczelniania powierzchni** – nie betonować lub nie utwardzać (np. kostką) miejsc, które tego absolutnie nie potrzebują, pozwólmy wodzie opadowej wsiąknąć w glebę, w której woda ta może dłużej pozostać i być dostępna dla otaczającego ją ekosystemu;

**Łąki w miejsce trawników** – w wielu wypadkach zastąpienie trawników (które wymagają częstszego podlewania i szybciej odparowują wodę) przez łąki jest uzasadnione. Łąki nie tylko utrzymują dłużej wilgoć i stwarzają naturalne środowisko dla wielu owadów i zwierząt, ale nieodpowiednio utrzymywane mogą być obszarem sprzyjającym rozprzestrzenianiu się np. kleszczy;

**Ograniczyć ślad wodny** - m.in. poprzez kupowanie produktów lokalnych, niewymagających długich łańcuchów dostaw, zrezygnować z wody butelkowanej na rzecz kranówki, nie marnować żywności, korzystać z toreb wielokrotnego użytku i wiele innych.

Nasza indywidualna inicjatywa i zaangażowanie jest ważne, ale nie można zapominać o konieczności podejmowania działań na większą skalę; na osiedlach, w dzielnicach, w mieście czy w kraju. Działania adaptacyjne do zmiany klimatu muszą stać się priorytetem, a wśród nich kluczowa jest retencja, która skutecznie łagodzi jej skutki. Nie wolno nam również zapominać o edukacji i konieczności budowania kapitału społecznego również w tym zakresie.





**WODÓR**

# WPROWADZENIE

**W**odór jest najbardziej powszechnym pierwiastkiem w kosmosie i nieprzypadkowo staje się coraz częściej przedmiotem zainteresowania naukowców poszukujących rozwiązań wspierających transformację energetyczną. Łatwo wchodzi w reakcję z tlenem generując energię i parę wodną. Wydaje się być właściwą odpowiedzią na wyzwania klimatyczne oraz bezpieczeństwa energetycznego. W dobie niestabilnych łańcuchów dostaw, może wreszcie pozwolić na zerwanie z uzależnieniem od paliw kopalnych i geopolitycznych uwarunkowań.

W środowisku branżowym obserwowany jest rosnący poziom optymizmu związany z rozwojem gospodarki wodorowej. Wzrasta zainteresowanie technologiami wodorowymi na całym świecie, powstają nowe inwestycje, wzrasta efektywność ciągle ulepszanych technologii. Potrafimy wytwarzać wodór w przyjazny dla środowiska sposób, wiemy i rozumiemy ograniczenia związane z jego dystrybucją, magazynowaniem i specyfiką zużycia.

Bez wątpienia konieczna jest dekarbonizacja globalnej gospodarki i wodór ma wszelkie szanse by stać się odpowiedzią na to wyzwanie. Departament Energii (USA) ogłosił w 2022 roku *National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap*<sup>1</sup>, z której wynika że produkcja czystego wodoru osiągnie w Stanach Zjednoczonych 10 mln ton rocznie do 2030 roku. W tym samym czasie Chiny zamierzają osiągnąć szczyt swoich emisji CO<sub>2</sub>. Ponad 30 państw odpowiadających za ponad 70% światowego PKB stworzyło krajowe strategie wodorowe.

Czy świat jest już gotowy na większą produkcję i szersze wykorzystanie czystego ekologicznie surowca? Czy jako państwo potrafimy zorganizować się i zbudować gospodarkę opartą o niskoemisyjny wodór? Czy na tle regionu trójmorskiego mamy szansę stać się krajem nie tylko tranzytowym, ale również eksportującym zaawansowane technologie wodorowe?

Ta część raportu przedstawia podsumowanie stanu wiedzy w zakresie rozwoju ekosystemu wodorowego w odniesieniu do poziomu globalnego, krajowego oraz inicjatywy trójmorskiej. Szukając odpowiedzi na zadane pytania, zapraszamy do lektury.



1. <https://www.hydrogen.energy.gov/library/roadmaps-vision/clean-hydrogen-strategy-roadmap>

# PODSUMOWANIE

- Zainteresowanie wodorem, a w szczególności wodorem nisko- i zeroemisyjnym wzrasta szczególnie od drugiej dekady XXI wieku.
- Pod względem charakterystyki największych podmiotów na rynku wodoru można wyróżnić dwa główne sektory zastosowań wodoru w przemyśle: chemiczny (w tym głównie nawozy) oraz rafineryjny i petrochemiczny.
- Przewidywany jest wzrost zastosowania wodoru w obszarach transportu (kolej, autobusy, samochody osobowe i ciężarowe), przemyśle stalowego (zastąpienie strumieni technologicznych pochodzących ze źródeł kopalnych wodorem w procesie produkcji), przemyśle metali "kolorowych" (głównie otrzymywanie miedzi i srebra), magazynowania energii (wodór jako nośnik energii) i ciepłownictwa.
- Dla Europy wodór ma być narzędziem, które pozwoli ograniczyć emisję CO<sub>2</sub>. Z racji na wysokie zapotrzebowanie, Europa będzie musiała wodór dodatkowo importować.
- W 2022 roku globalne zużycie wodoru wyniosło około 95 milionów ton.
- Nakład na rozwój innowacyjnych technologii opartych na wodrze stale rośnie. Przewiduje się, że w 2021 roku wydatki wzrosły w porównaniu z 2020 o 35%, przy czym Europa te wydatki podwoiła. Patrząc na szerszy kontekst dekarbonizacji, technologie oparte na wodrze stanowią 5% wszystkich wydatków na "czyste innowacje".
- Rynek wodorowy przyciąga duże inwestycje na produkcję, sprzedaż, badania, rozwój i edukację. Wartość światowego rynku wodorowego w 2022 roku, według PIE, szacuje się na około 600 mld złotych. Jego wartość do 2050 roku może się potroić w wyniku dekarbonizacji światowej gospodarki.
- Program RePowerUE zakłada, że przez obszar państw 3SI będą przechodzić dwa ważne korytarze przesyłowe wodoru.
- Szczególną rolę w zakresie bezpieczeństwa, rozwoju innowacji i współpracy pełnią doliny wodorowe. Państwa 3SI podejmują inicjatywy o charakterze regionalnym z innymi państwami europejskimi, czego przykładem jest Bałtycka Dolina Wodorowa. Uczestniczą w niej interesariusze reprezentujący branże technologiczne czy energetyczne z Finlandii, Estonii (lider projektu), Polski, Danii, Szwecji, Niemiec, Norwegii, Litwy i Łotwy.
- Wspólna strategia rozwoju technologii i gospodarki wodorowej wśród państw 3SI może być trudna do wypracowania, niemniej warto by państwa te wypracowały pewne pryncypia, takie jak: priorytety dla wspólnej polityki regionalnej w obszarze rozwoju technologii wodorowych, wzmacnianie mechanizmów rozwoju innowacyjności w obszarze bezpieczeństwa energetycznego, działania na rzecz integracji rynku wodorowego.
- Polska posiada szczególny potencjał do rozwoju światowej gospodarki wodorowej. Rocznie wytwarzane jest w kraju 1,3 mln ton wodoru. Jest trzecim producentem wodoru w Unii Europejskiej (po Niemczech – 2,5 mln ton i Holandii – 1,5 mln ton). W skali świata, Polska jest piątym producentem wodoru.
- Najwięcej wodoru w Polsce produkuje Grupa Azoty S.A. (rocznie 190 tys. ton w Puławach, 77 tys. ton w Kędzierzynie Koźlu i 88 tys. ton w Policach).
- Sektor energetyczny można podzielić na dwie główne gałęzie - produkcję energii elektrycznej oraz energii cieplnej. Wodór może znaleźć zastosowanie w Polsce w obydwu tych obszarach - pod warunkiem zapewnienia odpowiednich mocy OZE czy energii jądrowej, wspierając uniezależnienie od paliw kopalnych i zmniejszając emisję gazów cieplarnianych. Warto podkreślić, że obydwie te obszary są synergiczne - produkcja energii może generować zarówno prąd, jak i ciepło (kogeneracja).
- Aby obniżyć emisję CO<sub>2</sub> w sektorze stalowym, węgiel i koks należy zastąpić wodorem niskoemisyjnym. Duży potencjał do dekarbonizacji sektora hutnictwa stali z wykorzystaniem wodoru wykazują technologie wielkiego pieca hutniczego.
- W 2022 roku Polska spożytkowała ok. 31 TWh wodoru<sup>I</sup>. Prognozy zapotrzebowania na 2030 rok wskazują na 46 TWh, a w 2040 roku – 89 TWh<sup>II</sup>. Prognozowany wzrastający popyt na wodór, wymaga pobudzenia jego podaży w zakresie produkcji krajowej oraz importu.

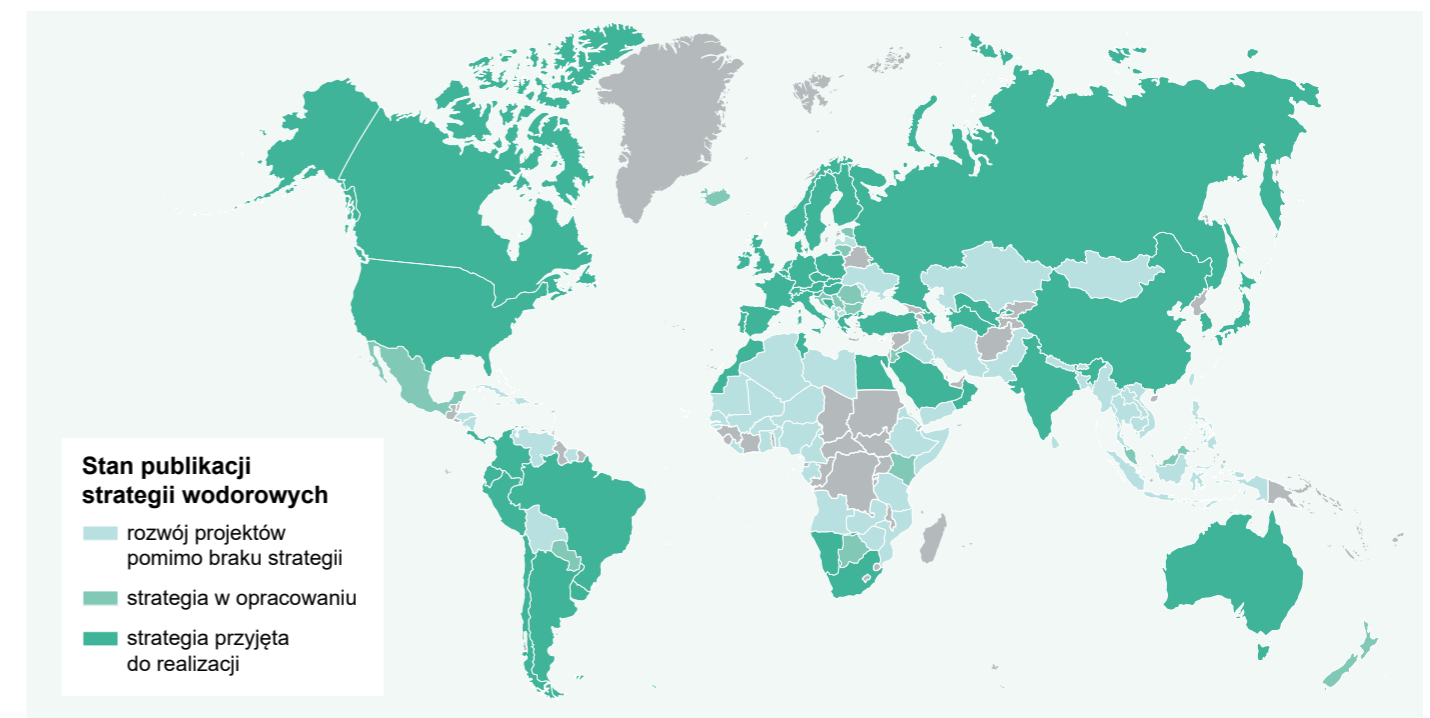
I. Obliczone na podstawie: Fuel Cells and Hydrogen Observatory, Chapter 2. 2022 Hydrogen Supply Capacity and Demand [31.07.2023].  
II. Dolnośląski Instytut Studiów Energetycznych, <http://psew.pl/raport-zielony-wodor/>, 2023 [dostęp dn. 31.07.2023].

# WODÓR NA ŚWIECIE

Zainteresowanie wodorem, a w szczególności wodorem nisko- i zeroemisyjnym wzrasta szczególnie od drugiej dekady XXI wieku. Wiodącymi graczami na rynku technologii wodorowych są Stany Zjednoczone i Kanada. W Ameryce Łacińskiej przoduje Chile, a prace nad strategią ogłosiły Brazylia, Kolumbia i Urugwaj. Swoje strategie opublikowały także Australia i Nowa Zelandia. W Azji prym wiodą Japonia i Korea Południowa, a „gonią” je Chiny i Singapur. Oficjalne dyskusje wokół wodoru odbywają się także

w Afryce - Egipt i Maroko w 2021 roku zadeklarowały pracę nad narodową strategią wodorową. Na Bliskim Wschodzie pracę zadeklarowały Oman i Arabia Saudyjska<sup>I</sup>. Warto zauważyć, że rozwinięta produkcja wodoru nie zawsze wiąże się z zaawansowaniem technologii wodorowych, zwłaszcza opartych na wodrze niskoemisyjnym – produkcja wodoru może być związana z zastosowaniami ściśle przemysłowymi, a nie np. dekarbonizacyjnymi.

Rys. 2.1 Globalna mapa krajowych strategii wodorowych (stan na 17.07.2023)



źródło: opracowanie własne.

Priorytety poszczególnych krajów mogą się różnić. Dla Europy wodór ma być narzędziem, które pozwoli ograniczyć emisję CO<sub>2</sub>, a więc "zdekarbonizować" przemysł i transport. Australia planuje oprzeć się o wodór zeroemisyjny, podczas gdy Kanada zamierza ograniczyć się do wodoru niskoemisyjnego. Francja chce produkować wodór na eksport, podczas gdy Holandia planuje stać się centrum dystrybucji w Europie, przekształcając swój słynny port w Rotterdamie w największy hub wodorowy.

Japonia i Korea Południowa, z racji ograniczonego dostępu do zasobów naturalnych, zamierzają wykorzystać wodór z Australii do uwolnienia się od dostaw energii z Rosji. Duży potencjał upatrują

także w pojazdach napędzanych ogniwami wodorowymi. Australia jako istotny uczestnik na rynku energetycznym, również postrzega produkcję wodoru przede wszystkim jako szansę na ekspansję na zagraniczne rynki. UE i Kanada podchodzą do gospodarki wodorowej w inny sposób - planują wytworzyć najpierw zapotrzebowanie wewnątrz swojego terytorium, a dopiero w dalszej kolejności myśleć o eksporcie. Można jednak przypuszczać, że Europa, z racji na wysokie zapotrzebowanie, będzie musiała dodatkowo importować wodór<sup>II</sup>.

Polska znajduje się wśród najbardziej rozwiniętych wodorowych gospodarek w Europie. Konkurencja staje się jednak coraz większa, ponieważ wraz z ogłoszoną

I. World Energy Council, Working Paper | National Hydrogen Strategies. Hydrogen on the horizon: ready, almost set, go?, 2021 [31.07.2023].  
II. Tamże.

strategią wodorową UE, niemal cały kontynent zaangażował się w prace nad rozwojem gospodarki wodorowej. W najbliższych latach i dekadach możemy być świadkami olbrzymiego wzrostu i rozwoju technologii wodorowych<sup>I</sup>.

## Globalny rynek wodoru

W 2020 roku wartość światowego eksportu wodoru przekroczyła 450 mln zł (na podstawie niepełnych danych dotyczących handlu zagranicznego, pochodzących z 37 krajów). W poprzedzającym roku było to około 670 mln złotych (na podstawie danych dot. handlu pochodzących z 65 krajów). Wśród największych eksporterów znajdują się Kanada, Holandia, Belgia, Stany Zjednoczone, Niemcy, Słowacja oraz Polska. Kluczowi importerzy to: Stany Zjednoczone, Holandia, Niemcy, Kanada, Meksyk i Czechy. Polska znajduje się pod tym względem na 14 pozycji<sup>II</sup>.

Jeśli jednak zestawimy te dane z powiązaniem między krajami i infrastrukturą transportu i przesyłu wodoru, okaże się, że nie jest to ranking przypadkowy. Jak twierdzą eksperci odpowiedzialni za PSW, wodór produkowany jest głównie na własne potrzeby, a eksport wodoru odbywa się stosunkowo rzadko; „podczas gdy globalna produkcja wodoru wynosi 100-120 mln ton rocznie, w obrocie znajduje się ok. 100-150 tys. ton<sup>III</sup>, czyli zaledwie ok. 0,1% całkowitej produkcji.

Mając to na uwadze, łatwiej zrozumieć, dlaczego Chiny – jako największy producent wodoru, nie znajdują się w czołówce eksporterów i importerów. Stany Zjednoczone - największy importer - kupuje wodór od sąsiedniej Kanady - największego eksportera. Pokazuje to także, że kraje europejskie, dzięki bliskiemu położeniu względem siebie, łatwiej mogą transportować wodór między granicami.

Nakłady na rozwój innowacyjnych technologii wodorowych stale rosną. Przewiduje się, że w tym aspekcie Europa i Stany Zjednoczone. Globalnie, w roku 2021 wydatki wzrosły w porównaniu z 2020 roku o 35%, przy czym Europa te wydatki podwoiła. Patrząc na szerszy kontekst dekarbonizacji, technologie wodorowe stanowią 5% wszystkich wydatków na „czyste innowacje”<sup>IV</sup>.

Co próbują osiągnąć poszczególne kraje?  
Najpopularniejsze cele wskazywane w narodowych

- I. Instytut Energetyki, Wydział Zarządzania Uniwersytetu Warszawskiego, Instytut Ekologii Terenów Uprzemysłowionych, Analiza potencjału technologii wodorowych w Polsce do roku 2030 z perspektywą do 2040 roku, 2020 [31.07.2023].
- II. Instytut Energetyki, Wydział Zarządzania Uniwersytetu Warszawskiego, Instytut Ekologii Terenów Uprzemysłowionych, Analiza potencjału technologii wodorowych w Polsce do roku 2030 z perspektywą do 2040 roku, 2020 [31.07.2023].
- III. Instytut Energetyki, Wydział Zarządzania Uniwersytetu Warszawskiego, Instytut Ekologii Terenów Uprzemysłowionych, Analiza potencjału technologii wodorowych w Polsce do roku 2030 z perspektywą do 2040 roku, 2020 [31.07.2023].
- IV. International Energy Agency, Hydrogen. Energy system overview, 2022 [31.07.2023].
- V. Instytut Energetyki, Wydział Zarządzania Uniwersytetu Warszawskiego, Instytut Ekologii Terenów Uprzemysłowionych, Analiza potencjału technologii wodorowych w Polsce do roku 2030 z perspektywą do 2040 roku, 2020 [31.07.2023].
- VI. MKiŚ, Kolejny etap prac nad „Konstytucją dla wodoru”, 2023 [31.07.2023].
- VII. Esperis, Analiza instrumentów wsparcia finansowego dla rozwoju rynku wodoru w Polsce. Streszczenie zarządcze, 2023 [31.07.2023].

strategiach wodorowych, to:

- Zmniejszanie emisji,
- Dekarbonizacja przemysłu ciężkiego,
- Zeroemisyjny transport,
- Dywersyfikacja kierunków dostaw energii,
- Wspieranie wzrostu gospodarczego,
- Wspieranie rozwoju krajowych technologii,
- Integracja odnawialnych źródeł energii,
- Rozwój wodoru na eksport<sup>V</sup>.

W listopadzie 2021 roku przyjęto „Polską strategię wodorową do roku 2030 z perspektywą do roku 2040” (dalej: PSW). Stawia się w niej sześć głównych celów:

- Wdrożenie technologii wodorowych w energetyce i ciepłownictwie,
- Wykorzystanie wodoru jako paliwa alternatywnego w transporcie,
- Wsparcie dekarbonizacji przemysłu,
- Produkcja wodoru w nowych instalacjach,
- Sprawny i bezpieczny przesył, dystrybucja oraz magazynowanie wodoru,
- Stworzenie stabilnego otoczenia regulacyjnego.

Wskazano również cele ilościowe do których należą m.in.:

- 50 MW zainstalowanej mocy wszystkich urządzeń do produkcji wodoru do 2025 r. i 2 GW do 2030 r.,
- 100-250 autobusów wodorowych do 2025 r., 800-1000 autobusów wodorowych do 2030 r.,
- Min. 32 stacje tankowania wodoru do 2025 r.,
- 5 dolin wodorowych do roku 2030 r.

W krajowym kontekście istotną rolę będzie odgrywać tzw. konstytucja dla wodoru<sup>VI</sup>, czyli pakiet legislacyjny, mający uregulować i wesprzeć budowę gospodarki wodorowej w Polsce. Zgodnie z przeprowadzoną analizą<sup>VII</sup>, najkorzystniejszym mechanizmem wsparcia dla rynku wodoru byłby wodorowy kontrakt różnicowy. Zaproponowano również mechanizm aukcji dla wytwórców i odbiorców wodoru, co zminimalizuje ryzyko niezbilansowania podaży i popytu na wodór.

## Kolory wodoru

Potocznie przyjęło się używać kolorów, aby wskazać rodzaj i sposób wytwarzania wodoru. Najczęściej używa się następującej typologii:

- **Zielony:** Wytwarzany w procesie elektrolizy wody z wykorzystaniem energii odnawialnej (a perspektywnie np. fotolizy). Wodór odnawialny może być również wytwarzany w procesie reformingu biogazu / biochemicznego przekształcania biomasy.
- **Żółty:** Wytwarzany w procesie elektrolizy wody z wykorzystaniem energii słonecznej; często klasyfikowany jako jeden z podtypów wodoru zielonego.
- **Fioletowy:** Wytwarzany w procesie elektrolizy wody z wykorzystaniem energii elektrycznej produkowanej w elektrowniach atomowych.
- **Niebieski:** Wytwarzany w procesach wykorzystujących paliwa kopalne, uzupełnione o technologie wychwytywania, składowania lub przetwarzania CO<sub>2</sub> (czasami nazywany też różowym).
- **Szary:** Wytwarzany w procesie reformingu gazu ziemnego lub innych węglowodorów powstałych w procesie rafinacji ropy naftowej.
- **Brązowy:** Wytwarzany w procesie gazyfikacji węgla brunatnego.
- **Czarny:** Wytwarzany w procesie gazyfikacji węgla kamiennego.
- **Turkusowy:** Wytwarzany w procesie pirolizy metanu lub przetwarzania odpadowych tworzyw sztucznych.
- **Biały:** Pochodzący z naturalnych źródeł geologicznych.

Warto zaznaczyć, że odchodzi się od nomenklatury



bazującej na kolorach wodoru na rzecz precyzyjnego określania emisyjności poszczególnych technologii.

## Klasyfikacja sposobów pozyskiwania wodoru

- Wodór elektrolityczny: wodór wytwarzany za pośrednictwem technologii elektrolizy wody. Technologia elektrolizy wody polega na wytwarzaniu wodoru w elektrolizerze zasilanym energią elektryczną niezależnie od jej źródła pochodzenia. Emisje uwarunkowane są sposobem wytwarzania energii elektrycznej, która została wykorzystana do procesu.
- Wodór odnawialny/czysty/zeroemisyjny: wodór wytwarzany w elektrolizie wody, z tą różnicą, że energia elektryczna wykorzystywana w procesie pochodzi z OZE. Emisje są bardzo niskie, stąd mówi się też o nim jako „zeroemisyjny”. Wykorzystywana może być energia słoneczna, wiatrowa w instalacjach lądowych (ang. onshore) lub morskich (ang. offshore), a w przyszłości być może również z wykorzystaniem energii jądrowej.
- Wodór z paliw kopalnych (nieodnawialny): wodór produkowany przy użyciu konwencjonalnych źródeł energii, głównie w procesie reformingu parowego. Jest to rodzaj wodoru niezrównoważonego środowiskowo ze względu na emisję CO<sub>2</sub> podczas jego produkcji. Aktualnie jest to główny rodzaj wodoru jaki jest produkowany i użytkowany.
- Wodór z paliw kopalnych z wychwytem CO<sub>2</sub>: wodór



produkowany przy użyciu konwencjonalnych źródeł energii, jak paliwa kopalne, natomiast w procesie produkcji stosuje się pirolizę lub technologie wychwytywania, składowania i użytkowania CO<sub>2</sub> (CCS - Carbon Capture and Storage i CCUS - Carbon Capture, Usage/Utilization and Storage). Ten rodzaj wodoru postrzegany jest jako rozwiązanie przejściowe w drodze do pełnej dekarbonizacji sektora wodorowego.

- Wodór niskoemisyjny: wodór produkowany przy użyciu konwencjonalnych źródeł energii, jednak cechuje się niższym poziomem emisji. Może być produkowany z paliw kopalnych z technologią CCS, OZE lub w procesie elektrolizy wody niezależnie od źródła pochodzenia energii elektrycznej. Kluczowe jest to, że ten wodór charakteryzuje się znacznym ograniczeniem emisji gazów cieplarnianych w porównaniu z produkcją wodoru z wykorzystaniem paliw kopalnych. Ten rodzaj wodoru postrzegany jest jako rozwiązanie przejściowe w drodze do pełnej dekarbonizacji sektora wodorowego.
- Paliwa syntetyczne: paliwa gazowe i ciekłe oparte o wodór i CO<sub>2</sub>. Paliwo syntetyczne powstaje

z odnawialnego wodoru i CO<sub>2</sub> wychwytywanego w procesach petrochemicznych, w którym powstają syntetyczne węglowodory. Rozważane są jako potencjalne alternatywne paliwa, które mogą zredukować emisje gazów cieplarnianych.

Docelowo w powszechnie panującej nomenklaturze pozostaną dwie kategorie wodoru tj. wodór zeroemisyjny oraz niskoemisyjny.

### Globalny łańcuch wartości

Globalny łańcuch wartości to grupa powiązanych ze sobą elementów, które muszą wzajemnie współpracować, aby zapewnić użytkownikom dostęp do wodoru. Elementy łańcucha można podzielić na 5 obszarów<sup>1</sup>:

- Produkcja,
- Przesył, dystrybucja i transport,
- Magazynowanie,
- Zastosowania transportowe,
- Zastosowania stacjonarne.

Rys. 2.2 Uproszczony łańcuch wartości wodoru



Źródło: opracowanie własne na podstawie IEn, Analiza potencjału technologii wodorowych w Polsce do roku 2030 z perspektywą do 2040 roku, 2020.

I. Tamże.

### Produkcja

Wodór może być produkowany z paliw kopalnych i biomasy, a także wody. Główne obecne i potencjalne metody produkcji to:

- Reforming parowy,
- Reforming w procesach rafineryjnych,
- Elektroliza wody,
- Zgazowanie paliw stałych (węgla, biomasy, odpadów i innych).

Alternatywą dla powyższych metod może być produkcja biologiczna, gdyż wodór produkowany jest także w trakcie naturalnych procesów, m.in. w procesie fermentacji. Naukowcy opracowali połączenie procesów fotosyntezy i fermentacji wykorzystując algi i sinice, które w określonych warunkach mogą rozkładać cząsteczki wody na wodór i tlen. Obecnie trwają prace nad zwiększeniem wydajności metod biologicznych<sup>1</sup>.

Na całym świecie zużywa się około 95 mln ton wodoru rocznie (dane na rok 2022) i liczba ta rośnie przeciętnie o 3% rok do roku. 99% to wodór nieodnawialny (produkowany z paliw kopalnych i odpowiadający za 900 Mt emisji CO<sub>2</sub><sup>2</sup>). Taka ilość odpowiada za kilka procent światowego popytu na energię i wystarczy, by zasilić np. całe Niemcy<sup>3</sup>. Największym producentem wodoru są Chiny<sup>4</sup>, produkując około 32 mln ton wodoru rocznie<sup>5</sup>.

Przewiduje się, że produkcja wodoru odbywać się będzie w myśl dwóch głównych modeli: centralnego i rozproszonego. Produkcja centralna zogniskowana będzie wokół dużych farm wiatrowych lub fotowoltaicznych, natomiast rozproszona będzie składała się z lokalnych instalacji zlokalizowanych w pobliżu mniejszych miejscowości, miast i aglomeracji.

Udział niskoemisyjnego wodoru w 2022 roku wyniósł poniżej 1% globalnej produkcji wodoru<sup>6</sup>, przy czym większość produkowana była z energii słonecznej, z energii wiatru (wyjątkiem jest Chile, które niemal całość zielonego wodoru wytwarza dzięki energii wiatrowej), a znikoma ilość - z morskich farm wiatrowych<sup>7</sup>.

I. Wodorowy świat, Biologiczne metody pozyskiwania wodoru, 2021 [31.07.2023].

II. International Energy Agency, Hydrogen. Energy system overview, 2023 [11.10.2023].

III. International Renewable Energy Agency, Hydrogen, 2022 [31.07.2023].

IV. Center for Strategic and International Studies, China's Hydrogen Industrial Strategy, 2022 [31.07.2023].

V. International Energy Agency, Hydrogen. Energy system overview, 2023 [11.10.2023].

VI. International Energy Agency, Hydrogen. Energy system overview, 2022 [31.07.2023].

VII. International Energy Agency, How much will renewable hydrogen production drive demand for new renewable energy capacity by 2027? 2022 [31.07.2023].

VIII. International Energy Agency, The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities, 2019 [31.07.2023].

IX. International Energy Agency, Electrolysers. Technology deep dive, 2022 [31.07.2023].

X. Rada UE, Państwa członkowskie ustaliły stanowisko w sprawie przyszłego rynku gazu i wodoru, 2023 [31.07.2023].

XI. Wysokienapięcie.pl, Polska energetyka gaz zastąpi wodorem? To nie takie proste, 2023 [31.07.2023].

XII. Instytut Energetyki, Wydział Zarządzania Uniwersytetu Warszawskiego, Instytut Ekologii Terenów Uprzemysłowionych, Analiza potencjału technologii wodorowych w Polsce do roku 2030 z perspektywą do 2040 roku, 2020 [31.07.2023].

XIII. Reuters, World's first hydrogen tanker to ship test cargo to Japan from Australia, 2022 [11.10.2023].

Wzrost ilości wytwarzanego nisko- i zeroemisyjnego wodoru wymaga produkcji elementów infrastruktury zdolnych do jego wytwarzania, przede wszystkim elektrolizerów. Rozwój potencjału produkcji nisko- i zeroemisyjnego wodoru zaczął szczególnie szybko wzrastać w drugiej dekadzie XXI wieku. Podczas, gdy globalne zdolności produkcyjne w 2005 roku nie przekraczały 5 MW, w 2010 roku było to już ponad 40 MW, w 2015 roku niemal 100 MW, a w 2020 – 304 MW<sup>8</sup>. W 2022 roku wartość ta przekroczyła 1000 MW (1 GW), a pod koniec 2023 roku prognozuje się zdolności na poziomie 5 517 MW (ponad 5,5 GW)<sup>9</sup>.

### Dystrybucja

Sposób dostarczania wodoru zależy przede wszystkim od odległości i ilości wodoru, która jest transportowana np.:

- Butle i małe zbiorniki,
- Transport kołowy (na bliższe i dalsze odległości),
- Rurociągi (przy bardzo dużym zapotrzebowaniu),
- Transport morski.

Wykorzystanie rurociągów zakłada dwa główne scenariusze: budowę "wodorociągów" lub wykorzystanie już istniejących gazociągów poprzez mieszanie wodoru z gazem ziemnym. W Niemczech dopuszcza się do 10% wodoru w gazach (nie dotyczy to gazu ziemnego, tu przepisy UE rekomendują 2% objętości wodoru w gazie ziemnym<sup>10</sup>), natomiast charakterystyka wodoru stwarza wyższe wymogi pod kątem szczelności i ciśnienia<sup>11</sup>). Gdyby pomysł ten sprawdził się na szerszą skalę, nie trzeba byłoby budować rozbudowanej sieci rurociągów dedykowanych wodorowi. Największą europejską sieć obsługuje firma Air Liquide. Rurociągi o długości około 1 000 km, rozciągającą się od północnej Francji po Rotterdam, łączącą kilka zakładów produkcyjnych i klientów w północnej Francji, Belgii i południowo-zachodniej Holandii<sup>12</sup>.

Transport morski odgrywa obecnie marginalną rolę, ale jego znaczenie może wzrosnąć z uwagi na plany rozwoju międzynarodowego rynku wodorowego. Uważa się, że pierwsza jednostka morska przetransportowała wodór w 2021 roku, z Australii do Japonii. Statek zbudowany na potrzeby współpracy tych dwóch krajów przewozi wodór w stanie ciekłym<sup>13</sup>.

## Magazynowanie

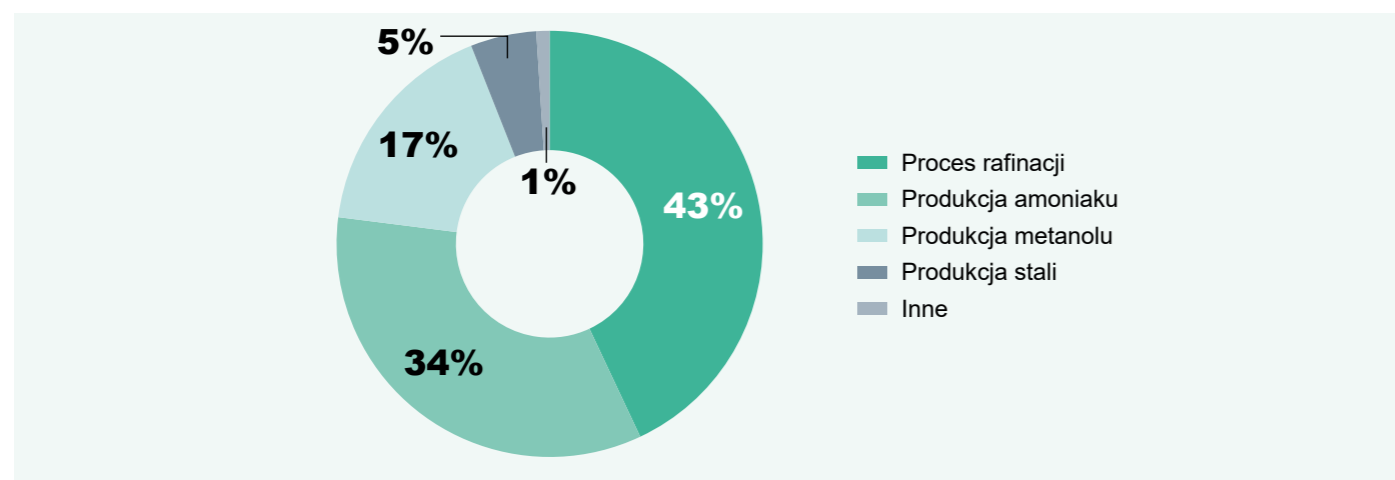
Metody magazynowania wiążą się z metodami dystrybucji. Stalowe butle i małe zbiorniki służą głównie w zastosowaniach badawczych i przy mniejszych wolumenach produkcji. Większe zbiorniki, np. na stacjach paliw lub w pojazdach transportu ciężkiego wykonuje się w innej technologii.

Przechowywanie wodoru stwarza znaczące wyzwania. W stanie gazowym wodor należy utrzymywać w relatywnie podwyższonym wysokim ciśnieniu, nawet do 970 barów. Utrzymanie wodoru w stanie ciekłym wymaga znaczących nakładów energetycznych związanych z zapewnieniem temperatury około -250 °C. Zmiana stanu skupienia wodoru wpływa znacznie na jego objętość. Dla przykładu 4 kg wodoru w stanie ciekłym zajmują 57 litrów, podczas gdy wodor pod ciśnieniem 200 barów ma objętość 110 litrów<sup>I</sup>.

Magazyny podziemne (w tym kawerny solne) są optymalne do przechowywania dużych ilości wodoru. Kawerna solna, to pusta przestrzeń w złożach soli, która - jeśli spełnia odpowiednie wymagania - poddawana zostaje ługowaniu i szczelinowaniu, po czym włącza się do niej gaz.

Rozmiar kawern może być imponujący, na przykład magazyn Aces Delta w Utah w Stanach Zjednoczonych ma 800 metrów głębokości i szerokości. Tak duży zbiornik mógłby pomieścić zapas wodoru zdolny do zasilania 150 000 domów przez cały rok. W Polsce aktywnie wykorzystuje się dwie kawerny solne: Mogilno i Kosakowo. Aktualnie, przechowuje się w nich gaz ziemny o objętości 880 mln m<sup>3</sup>. Łącznie pojemność tych magazynów wystarcza, by zaspokoić około 5% rocznego zużycia gazu ziemnego w Polsce<sup>II, III</sup>.

**Rys. 2.3 Obszary zastosowania wodoru na świecie w 2022 roku**



Źródło: opracowanie własne na podstawie International Energy Agency, Hydrogen. Energy system overview, 2023 [11.10.2023].

I. Züttel A., Hydrogen-storage materials for mobile applications, "Nature" (414)6861, 2001, s. 353-358 [31.07.2023].  
 II. Polski Instytut Ekonomiczny, <https://pie.net.pl/wp-content/uploads/2020/06/PIE-WP7.pdf>, 2019 [dostęp dn. 31.07.2023].  
 III. PGNiG, <https://pgnig.pl/podziemne-magazyny-gazu>, 2023 [dostęp dn. 31.07.2023].  
 IV. International Energy Agency, Hydrogen. Energy system overview, 2023 [11.10.2023].

## Zastosowania wodoru

O wodorze często mówi się jako o nośniku energii, który pozwoli zmniejszyć negatywny wpływ człowieka na środowisko. Obecnie wykorzystuje się wodor przede wszystkim jako surowiec w przemyśle technicznym. Zapotrzebowanie na wodor generują przede wszystkim zastosowania przemysłowe. Dwa główne obszary jego wykorzystania w 2022 roku to<sup>IV</sup>:

- Chemia (51%):
  - Produkcja nawozów sztucznych,
  - Produkcja kwasu azotowego,
  - Procesy uwodornienia inne niż produkcja amoniaku oraz procesy rafinerijne),
- Rafinerie (43%):
  - Produkcja oleju napędowego i paliwa odrzutowego,
  - Hydrrafinacja – oczyszczanie produktów i półproduktów z przeróbki ropy naftowej.

Pozostałe zastosowania:

- Metalurgia:
  - produkcja stali (wodor, jako czynnik redukujący rudę żelaza do formy stali),
  - obniżanie zawartości fosforu i siarki w stali (co zmienia jej właściwości),
- Transport,
- Produkcja energii elektrycznej (w tym współspalanie wodoru w turbinach gazowych),
- Produkcja materiałów budowlanych (głównie w cementowniach),
- Ciepłownictwo,
- Wytwarzanie paliw syntetycznych,
- Przemysł spożywczy.

Przewidywany jest wzrost zastosowania wodoru w obszarach transportu (kolej, autobusy samochodowe osobowe i ciężarowe, transport morski), przemysłu stalowego (zastąpienie strumieni technologicznych pochodzących ze źródeł kopalnych wodorem w procesie produkcji), przemysłu metali "kolorowych" (głównie otrzymywanie miedzi i srebra), magazynowania energii (wodor jako nośnik energii) i ciepłownictwa.

## Kraje Europejskie

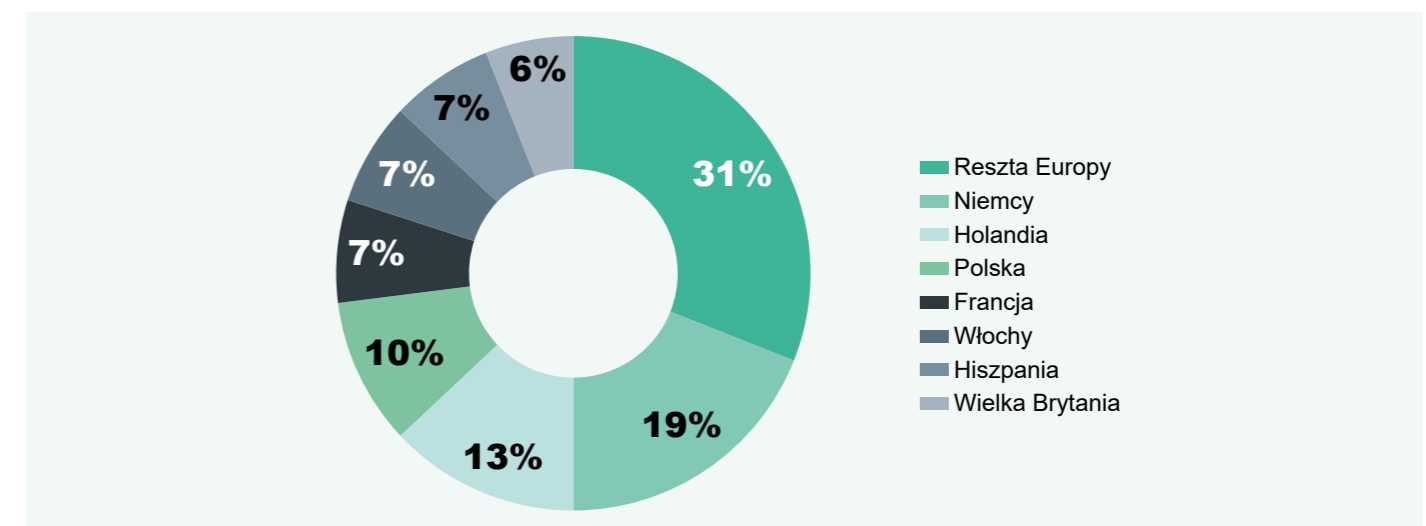
Analizując kontekst europejski, widać wyraźnie, że

Polska jest jednym z ważniejszych graczy na rynku wodorowym. Dane wskazują, że 5 największych producentów wodoru w Europie, to:

- Niemcy,
- Holandia,
- Polska,
- Włochy,
- Francja.

Kraje europejskie wprodukowały w 2022 roku około 11,4 milionów ton wodoru, czyli niemal 31 ton wodoru dziennie<sup>I</sup>.

**Rys. 2.4 Udział w produkcji wodoru w Europie (% z 11,4 mln ton wodoru w 2020 roku)**



Źródło: opracowanie własne na podstawie Fuel Cells and Hydrogen Observatory, Chapter 2. 2022 Hydrogen Supply Capacity and Demand [31.07.2023].

Strategia wodorowa dla Europy neutralnej dla klimatu koncentruje się na dwóch podstawowych sektorach: przemyśle i transporcie oraz na założeniu, że produkcja wodoru będzie oparta na elektrolizie. Jest to wizja przyszłości - w 2022 roku niskoemisyjne (CCS/CCU) i zeroemisyjne metody produkcji wodoru (elektroliza z OZE) stanowiły około 1% całkowitych zdolności wytwórczych. Zdolności te jednak są sukcesywnie powiększane. Dynamika przyrostu mocy instalacji elektrolizy w latach 2018-2021 w Europie przekraczała 30-50% rocznie<sup>II</sup>.

Rozwój w krajach europejskich odbywa się w stosunkowo szybkim tempie. Według ekspertów FleishmanHillard, Francja posiada najbardziej rozwinięty system prawny odnośnie wodoru w Europie, a Holandia prowadzi największą liczbą

wielkoskalowych projektów wodorowych. W swoim rankingu, do krajów "biegnących na czele maratonu", firma zakwalifikowała aż 15 krajów, w tym Polskę. 10 krajów (np. Włochy, Irlandia) zostało ocenionych jako "deweloperzy", a Cypr, Łotwa, Malta i Słowenia określono mianem "guzdrzących się"<sup>III</sup>.

Rynek wodorowy przyciąga duże inwestycje na produkcję, sprzedaż, badania, rozwój i edukację. Wartość światowego rynku wodorowego w 2022 roku, według PIE, szacuje się na około 600 mld złotych<sup>IV</sup>. Jego wartość do 2050 roku może się potroić w wyniku dekarbonizacji światowej gospodarki<sup>V</sup>.

Popyt na wodor rośnie. W 2000 roku wynosił ok. 60 mln ton, w 2020 roku około 90 mln ton<sup>VI</sup>, a w 2030 roku prognozuje się zapotrzebowanie na poziomie około 150 mln ton wodoru<sup>VII</sup>.

I. Fuel Cells and Hydrogen Observatory, Chapter 2. 2022 Hydrogen Supply Capacity and Demand [31.07.2023].

II. Instytut Energetyki, Wydział Zarządzania Uniwersytetu Warszawskiego, Łańcuch wartości gospodarki wodorowej w Polsce, 2023 [31.07.2023].

III. FleishmanHillard, National Hydrogen Strategies In The Eu Member States. A FleishmanHillard overview of national hydrogen strategies, 2022 [31.07.2023].

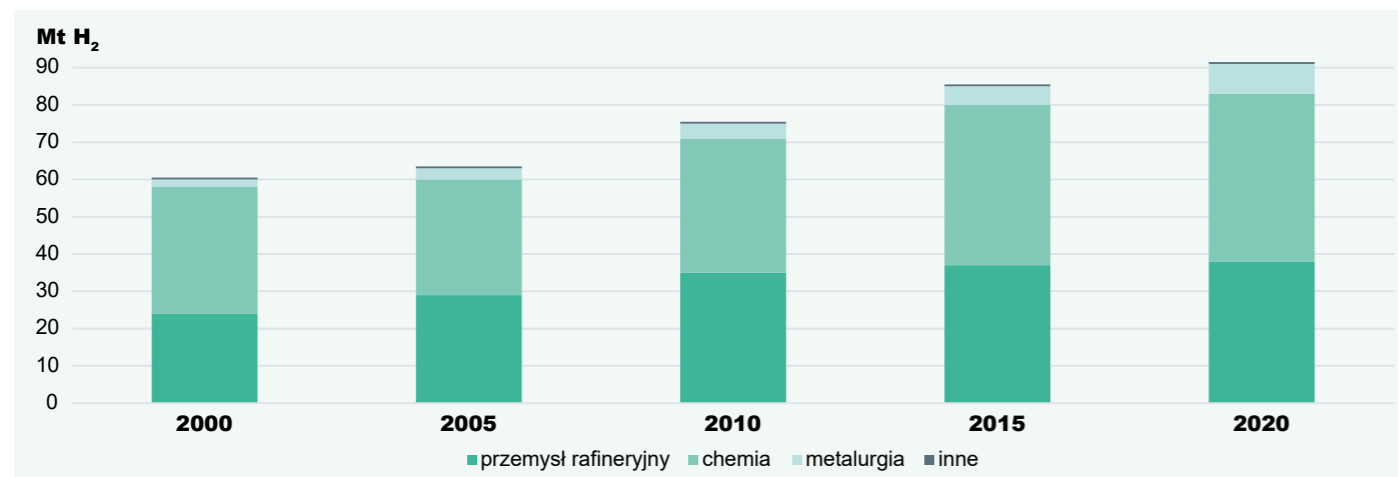
IV. Centrum Informacji o Rynku Energii, PIE: w 2022 r. wartość światowego rynku wodoru osiągnie 600 mld zł, 2020 [31.07.2023].

V. Centrum Informacji o Rynku Energii, Wartość rynku produkcji wodoru wzrośnie trzykrotnie do 2050 roku, 2021 [31.07.2023].

VI. Deloitte, Hydrogen. Making it happen, 2023 [31.07.2023].

VII. International Energy Agency, Hydrogen. Energy system overview, 2022; McKinsey & Company, Global Hydrogen Flows: Hydrogen trade as a key enabler for efficient decarbonization, 2022 [31.07.2023].

Rys. 2.5 Zapotrzebowanie na wodór według sektorów



Źródło: opracowanie własne na podstawie International Energy Agency, *Hydrogen. Energy system overview, 2023* [11.10.2023].

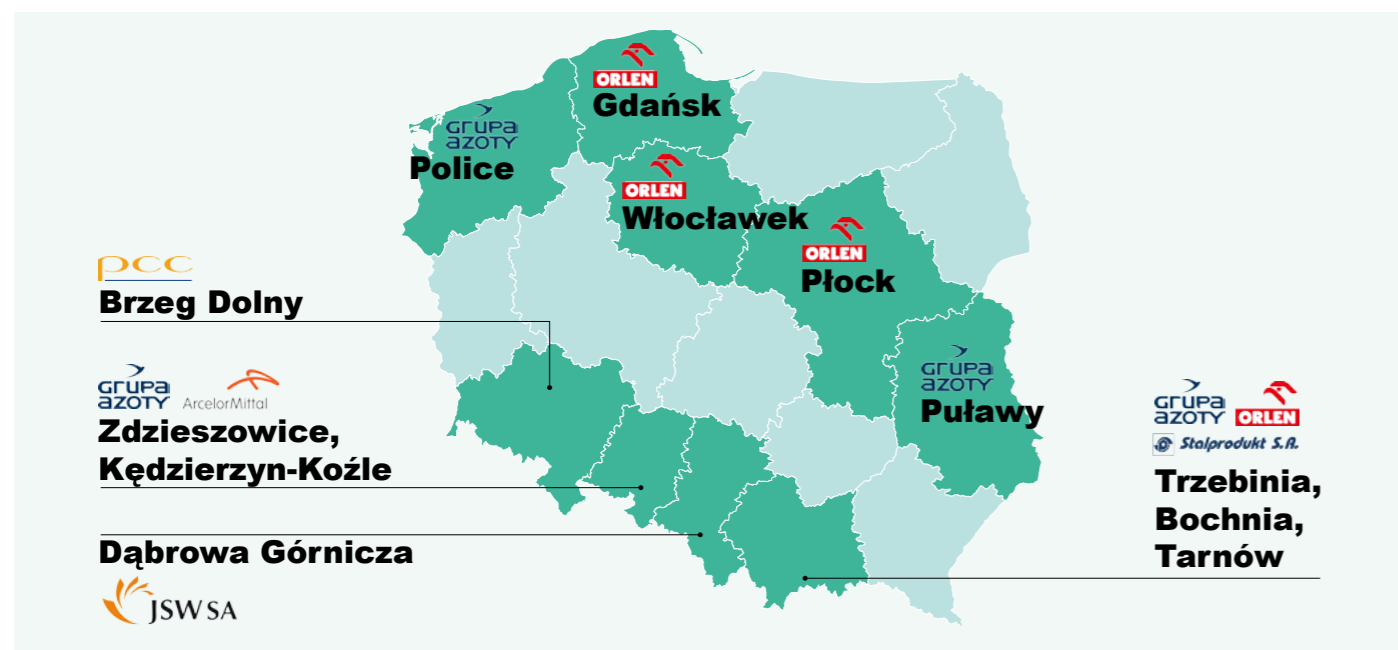
## Krajowy rynek wodorowy

Polska posiada szczególny potencjał do rozwoju gospodarki wodorowej. Rocznie wytwarzane jest w kraju 1,3 mln ton wodoru. To trzeci wynik w Unii Europejskiej (po Holandii – 1,5 mln ton i Niemczech – 2,5 mln ton). W skali świata, Polska jest piątym producentem wodoru<sup>I</sup>.

Najwięcej wodoru rocznie produkuje się w Grupie Azoty S.A. (190 tys. ton w Puławach, 77 tys. ton w Kędzierzynie-Koźlu i 88 tys. ton w Policach). Jeśli

spojrzymy na przemysł petrochemiczny najwięcej wodoru rocznie produkuje Orlen S.A. – ok. 140 tys. ton oraz Grupa Lotos (aktualnie należąca do Orlen) – ok. 59 tys. ton. Dwie największe koksownie w Polsce – Zdzeszowice i Przyjaźń – łącznie wytwarzały 149 tys. ton wodoru (dane na rok 2015)<sup>II</sup>. Zdecydowana większość produkowanego w Polsce wodoru pochodzi z paliw kopalnych i jest wykorzystywana do procesów przemysłowych - w procesach rafineryjnych do produkcji nawozów oraz metanolu.

Rys. 2.6 Najwięksi producenci i konsumenci wodoru w Polsce



Źródło: opracowanie własne na podstawie EY, *Hynfra, Zielony wodór - rewolucja czy przejściowa moda? Szanse i wyzwania dla polskiej gospodarki, 2023* [31.07.2023].

I. BOŚ Bank, *Wodór na rynku krajowym i zagranicznym, 2021* [31.07.2023].

II. Polski Instytut Ekonomiczny, *Kierunki rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce. Working Paper 7/2019*, [31.07.2023].

## Interesariusze polskiej gospodarki wodorowej

Najważniejsze podmioty i instytucje, które zaangażowane w tworzenie polskiego rynku wodorowego można podzielić na kilka głównych kategorii:

- Przemysł - firmy, w tym Spółki Skarbu Państwa,
- Organizacje naukowe i badawcze,
- Agencje rządowe,
- Organizacje wspierające,
- Aktorzy przemysłowi,
- Sieci i stowarzyszenia,
- Doliny wodorowe.

### Sieci

Podmioty działające w ramach gospodarki wodorowej tworzą własne struktury, aby ułatwić współpracę, zdobywanie inwestorów, pozyskiwanie zleceń, czy wpływanie na politykę państwa.

Wśród europejskich sieci, do których należą polskie podmioty, wskazać możemy:

- Hydrogen Europe,
- Hydrogen Europe Research,
- European Energy Research Alliance, Fuel Cells and Hydrogen,
- International Energy Agency, Annex 32 Advanced Fuel Cells,
- European Clean Hydrogen Alliance.

Ogólnopolskie sieci to przede wszystkim:

- Izba Gospodarcza Gazownictwa,
- Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej,
- Polska Izba Paliw Płynnych,
- Polska Izba Magazynowania Energii,
- Polskie Stowarzyszenie Paliw Alternatywnych,
- Krajowa Izba Gospodarcza,
- Polska Izba Przemysłu Chemicznego.

Wśród lokalnych sieci wskazać możemy:

- Gdański klaster wodorowy,
- Wieluński klaster energii,
- Stowarzyszenie Polski Wodór,
- Doliny Wodorowe.

### Doliny wodorowe

Doliny wodorowe, to regiony, które zostały wybrane na stworzenie lokalnych rynków gospodarki wodorowej. Pozwalają skupić w jednym miejscu wysiłki samorządu, przedstawicieli rządu, lokalnych przedsiębiorców i lokalnej społeczności. Założeniem doliny wodorowej

jest utrzymanie całego „cyklu życia” wodoru w danym regionie tzn. powinien być lokalnie produkowany i lokalnie zużywany.

W dolinach wodorowych mają być tworzone demonstratory polskich technologii wodorowych powstałe w wyniku współpracy regionalnych podmiotów i interesariuszy, w tym jednostek naukowych i przedsiębiorstw. Doliny wodorowe będą spełniać ważną rolę w mobilizacji prywatnych środków na zielone inwestycje Europejskiego Zielonego Ładu<sup>III</sup>.

Aktualnie (wg stanu na wrzesień 2023) w całej Polsce rozwija się 9 dolin wodorowych:

- Dolnośląska Dolina Wodorowa,
- Mazowiecka Dolina Wodorowa,
- Centralna Dolina Wodorowa,
- Śląsko-małopolska Dolina Wodorowa,
- Podkarpacka Dolina Wodorowa,
- Pomorska Dolina Wodorowa,
- Bursztynowa Dolina Wodorowa,
- Wielkopolska Dolina Wodorowa,
- Zachodniopomorska Dolina Wodorowa.



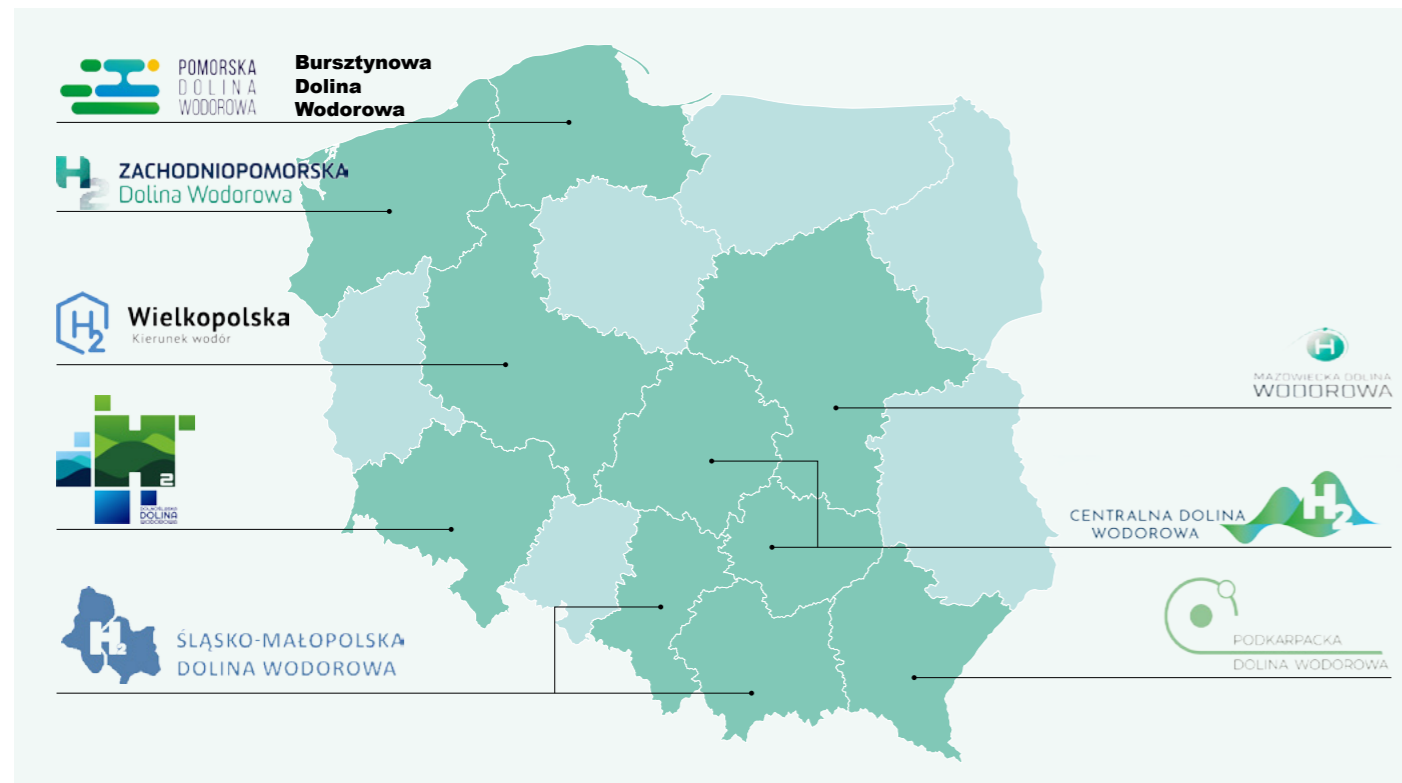
Dodatkowo, należy wspomnieć o międzynarodowej dolinie wodorowej - Bałtyckiej Dolinie Wodorowej. Dolnośląska Dolina Wodorowa dołączyła do konsorcjum, które łączy 37 podmiotów z basenu Morza Bałtyckiego<sup>II</sup>. Natomiast Bursztynowa Dolina Wodorowa jest jedną w Polsce certyfikowaną doliną wodorową, która została utworzona do wdrażania pełnego ekosystemu wodorowego w województwie pomorskim<sup>III</sup>.

I. Agencja Rozwoju Przemysłu, <https://arp.pl/pl/jak-dzialamy/doliny-wodorowe/>, 2023 [dostęp dn. 31.07.2023].

II. Tamże.

III. Money.pl, <https://www.money.pl/gospodarka/wodor-w-grupie-ornen-6908937632307840a.html>, 2023 [dostęp dn. 31.07.2023].

Rys. 2.7 Mapa dolin wodorowych w Polsce (18.07.2023)



źródło: opracowanie własne.

### Agencje rządowe

Zaangażowanie instytucji publicznych w rozwój gospodarki wodorowej odbywa się na kilku poziomach. Najbardziej widocznym efektem tej pracy jest opublikowana już PSW. Nad jej opracowaniem czuwał Międzyresortowy Zespół ds. gospodarki wodorowej, w którego skład weszli przedstawiciele Ministerstwa Aktywów Państwowych, Ministerstwa Klimatu i Środowiska, Ministerstwa Rozwoju, Ministerstwa Infrastruktury i Ministerstwa Edukacji i Nauki<sup>I</sup>. Z inicjatywy Ministerstwa Klimatu i Środowiska od 14.10.2021 roku funkcjonuje Porozumienie sektorowe na rzecz rozwoju gospodarki wodorowej, którego sygnatariuszami są interesariusze rozwoju polskiej gospodarki wodorowej. Porozumienie to jest kontynuacją prac rozpoczętych przez MKiŚ w 2020 roku wraz z podpisaniem listu intencyjnego o ustanowieniu partnerstwa na rzecz budowy gospodarki wodorowej i zawarcia sektorowego porozumienia wodorowego<sup>II</sup>.

### Organizacje naukowo-badawcze

W prace wokół wodoru zaangażowane są instytuty z całej Polski zajmujące się przede wszystkim chemią i energetyką. Za główną instytucję zaangażowaną w polskie działania badawczo-rozwojowe w obszarze wodoru uważa się Instytut Energetyki (IEn). W strukturach jednostki funkcjonuje Centrum

Technologii Wodorowych (CTH2), które było pierwszym centrum tego typu w Polsce (powstało w 2020 roku). Pracownicy CTH2 odpowiedzialni są m.in. za prace badawcze i rozwój wysokotemperaturowych elektrolizerów, dostawę instalacji elektrolizy i ich integrację z obiektami przemysłowymi i siłowniami jądrowymi, palnikami do spalania i współspalania wodoru oraz technologiami towarzyszącymi. W strukturach polskich uczelni funkcjonują podobne jednostki. W Politechnice Warszawskiej istnieje Centrum Wodoru i Ogniw Paliwowych, w Politechnice Wrocławskiej zaś Centrum Technologii Wodorowych i Odnawialnych Źródeł Energii (CTW\_OZE), natomiast w Politechnice Gdańskiej – Centrum Technologii Wodorowych.

Z ramienia Polskiej Akademii Nauk prace prowadzą m.in. Instytut Fizyki Molekularnej PAN, Instytut Inżynierii Chemicznej PAN oraz Instytut Chemii Fizycznej PAN. W Sieci Badawczej Łukasiewicz w rozwój wodoru zaangażowane są m.in. Łukasiewicz - Instytut Chemii Przemysłowej (np. produkcja wodoru z odpadów, ogniwa paliwowe), Łukasiewicz - Instytut Elektrotechniki (np. ogniwa paliwowe), Łukasiewicz - Instytut Nowych Syntezy Chemicznych (produkcja nisko- i zeroemisyjnego wodoru w zakładach Grupy Azoty) czy Łukasiewicz - Poznański Instytut Technologiczny (zastosowanie wodoru w pojazdach szynowych). Wśród aktywnych instytucji należy także wymienić

I. Polski Instytut Ekonomiczny, [https://pie.net.pl/wp-content/uploads/2021/01/PIE-PP\\_Wodor.pdf](https://pie.net.pl/wp-content/uploads/2021/01/PIE-PP_Wodor.pdf), 2020 [dostęp dn. 31.07.2023].

II. MKiŚ, <https://www.gov.pl/web/klimat/podpisano-porozumienie-sektorowe-na-rzecz-rozwoju-gospodarki-wodorowej-w-polsce>, 2023 [dostęp dn. 31.07.2023].

Główny Instytut Górniczo - Instytut Badawczy, Instytut Nafty i Gazu, Instytut Technologii Paliw i Energii oraz Instytut Wysokich Ciśnień<sup>I</sup>.

### Przykładowe projekty wodorowe w Polsce

#### Projekt HYDROGIN – drugie życie Elektrociepłowni Elbląg<sup>I</sup>

Projekt ma na celu nadać nową rolę jednostkom wytórczym centralnie dysponowanym (JWCD) poprzez magazynowanie nadmiaru energii w wodorze. JWCD są podstawowymi obiektami krajowej energetyki, ale ich praca jest poddawana regularnemu obniżaniu mocy i częstym zatrzymaniom (rocznie od kilkudziesięciu do ponad stu). Częste zatrzymania przyspieszają zużycie komponentów elektrowni i powodują wzrost wskaźników emisyjnych.

Kotły bloków energetycznych opalanych węglem, biomasą (jak w przypadku bloku BB20p w Elektrociepłowni Elbląg) lub innymi paliwami mają za zadanie wytworzenie dużej ilości pary, która napędza turbinę generującą energię elektryczną. W przypadku obniżania obciążenia bloku, ilość pary maleje, a jednostka wytwarza mniej mocy. Wartością graniczną obniżania mocy bloku jest tzw. minimum techniczne - poniżej minimum blok zostaje zatrzymany.

Alternatywną możliwością, jest przekierowanie nadmiarowej pary i/lub wykorzystanie energii elektrycznej do zasilania wysokotemperaturowego elektrolizera. Rozwiązanie takie umożliwia znaczącą poprawę elastyczności bloku energetycznego, który zamiast zatrzymania może kontynuować pracę w warunkach optymalnych a wytwarzana w nim para i/lub energia elektryczna zasila elektrolizer. W przypadku stosowania biomasy, co miało miejsce w projekcie HYDROGIN, wytwarzany w elektrolizerze stałotlenkowym wodor pozbawiony był śladu węglowego. Dodatkową funkcjonalnością tej unikatowej, pierwszej na świecie instalacji łączącej elektrolizer z elektrociepłownią, była możliwość przełączenia elektrolizera (klasy 10kW) do trybu pracy ogniwa paliwowego (SOFC). Umożliwia to zwiększenie mocy układu hybrydowego (elektrociepłownia + ogniwo paliwowe) w momentach zwiększonego zapotrzebowania na moc elektryczną. Paliwem dla SOFC w przypadku tej instalacji był wytwarzany wcześniej wodor, magazynowany na miejscu.

I. Polski Instytut Ekonomiczny, [https://pie.net.pl/wp-content/uploads/2021/01/PIE-PP\\_Wodor.pdf](https://pie.net.pl/wp-content/uploads/2021/01/PIE-PP_Wodor.pdf), 2020 [dostęp dn. 31.07.2023].

II. Przedsięwzięcie dofinansowane ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Realizowane przez Centrum Badawczo Rozwojowe im. Faraday, Energa S.A., Grupa Orlen w konsorcjum z Instytutem Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk im. Szewalskiego oraz we współpracy z Instytutem Energetyki – Instytutem Badawczym, którego zespół był autorem koncepcji, zaprojektował i wybudował instalację wraz z dostawą stosów stałotlenkowych ogniw elektrochemicznych własnej produkcji.

III. Wspólne przedsięwzięcie PKP, ORLEN i PESA. Rozwiązanie to jest efektem współpracy wielu podmiotów, w tym firm ABB, Ballard (dostawca stosów ogniw paliwowych), Worthington, Luccini, Rawag, TSA oraz CADD.

IV. Centrum dystrybucji o znacznych rozmiarach.

#### Lokomotywa wodorowa PESA<sup>III</sup>

Lokomotywy elektryczne są eksploatowane na liniach zelektryfikowanych a lokomotywy spalinowe stosuje się w przypadku linii nieelektryfikowanych. Brak elektryfikacji odcinków sieci kolejowych wymusza angażowanie krajowego taboru kolejowego na silnikach spalinowych, co wywołuje emisje CO<sub>2</sub>.

Alternatywą może być napęd elektryczny oparty na pokładowym generatorze energii elektrycznej z ogniwami paliwowymi zasilanymi wodorem. Opracowana została własna konstrukcja lokomotywy (SM42-6Dn), przedstawiona po raz pierwszy w roku 2021. Lokomotywa manewrowa PESA posiada stos ogniw paliwowych o mocy 170 kW i zbiorniki mogące zmagazynować do 175 kg wodoru. Napęd lokomotywy stanowi zespół czterech silników trakcyjnych o łącznej mocy 720 kW sprzężonych z baterią trakcyjną. Pod koniec 2022 roku – jako pierwszy na świecie pojazd tego typu - z powodzeniem zakończył testy homologacyjne. Lokomotywa w pierwszej kolejności będzie eksploatowana w Petrochemii ORLEN w Płocku.

Zakłada się, że doświadczenia zdobyte w ramach tworzenia lokomotywy SM42-6Dn będą mogły być wykorzystane w horyzoncie 5 lat do opracowania hybrydowych pojazdów wodorowych dla transportu pasażerskiego. Wprowadzenie lokomotywy SM42-6Dn do eksploatacji na terenie instalacji petrochemicznej pozwala również stworzyć lokalny ekosystem wodorowy, który objąłby komponenty od wytwarzania paliwa, poprzez jego magazynowanie i wykorzystania dla potrzeb zdekarbonizowanego transportu w ramach jednego obiektu przemysłowego.

#### Projekt Hydrogen Eagle – niskoemisyjna sieć transportowa

Koncern ORLEN S.A. w 2021 roku rozpoczął realizację projektu Hydrogen Eagle. Jest to kilkietapowy projekt infrastrukturalny, w ramach którego powstaje międzynarodowa sieć hubów<sup>IV</sup> wodorowych zasilanych z OZE oraz obiekty przetwarzające odpady komunalne w niskoemisyjny wodor. Projekt przewiduje również budowę ponad 100 stacji tankowania wodoru dla transportu indywidualnego, publicznego i cargo. Całość jest powiązana z planami obejmującymi stacje tankowania wodoru w Polsce, Czechach, Słowacji i Niemczech. Wodor ma być pozyskiwany poprzez transformację energii wiatrowej oraz odpadów komunalnych.

# WODÓR W TRÓJMORZU

## (3 SEAS INITIATIVE – „3SI”)

Dla państw 3SI technologie wodorowe stanowią jeden z elementów polityki bezpieczeństwa energetycznego, a także szansę na realizację polityki klimatycznej, dekarbonizację czy wzrost bezpieczeństwa dostaw energii. Szczególnie obecnie wodór zyskuje na znaczeniu w zmieniających się warunkach geopolitycznych regionu. Znaczenia nabiera polityka bezpieczeństwa energetycznego państw 3SI w obliczu agresji rosyjskiej na Ukrainę. Wodór jako nośnik energii zyskuje w wymiarze przyspieszenia rozwoju OZE i poprawy efektywności energetycznej.

Podczas szóstego szczytu 3SI w Sofii w 2021 roku, wskazano, że wodór jest rozpatrywany w szerokiej perspektywie bezpieczeństwa energetycznego ze szczególnym uwzględnieniem trzech strategii jego rozwoju:

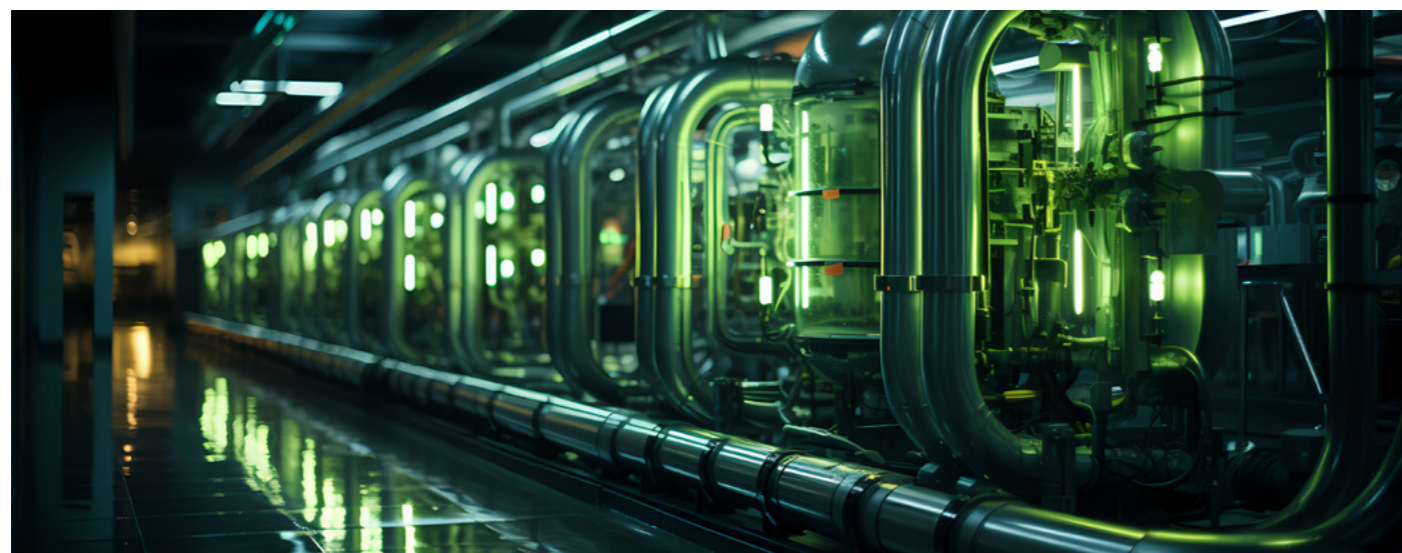
- Zapewnienie ciągłości dostaw energii,
- Dywersyfikacja źródeł energii,
- Realizacja celów transformacji na rzecz neutralności klimatycznej<sup>I</sup>.

W deklaracji państw 3SI wskazano, że państwa

członkowskie będą dążyć do rozwoju technologii wodorowych pozwalających na pozyskiwanie tego pierwiastka z OZE. Projekty te traktowane są jako wspierające i realizujące unijną politykę klimatyczną i bezpieczeństwa energetycznego.

### Wodór w projektach 3SI

Krajowe projekty rozwoju technologii wodorowych oraz międzynarodowe działania na rzecz modernizacji infrastruktury energetycznej służącej do tranzytu energii są projektami priorytetowymi. Znaczenie państw 3SI w zapewnieniu bezpieczeństwa energetycznego Europie zostało podkreślone w marcu 2023 roku w The Partnership for Transatlantic Energy and Climate Cooperation (P-TECC)<sup>II</sup>. Państwa członkowskie upatrują możliwości uniezależnienia całego regionu od rosyjskich dostaw w perspektywie dwóch dekad poprzez wzmocnienie technologii geotermalnych i wodorowych. W przypadku wodoru zakłada się silne wsparcie finansowe w integrację infrastruktury przesyłowej.



I. Wspólna deklaracja VI Szczytu Inicjatywy Trójmorza (Sofia, 8-9 lipca 2021) [31.07.2023].

II. U.S. Department of Energy, The Partnership for Transatlantic Energy and Climate Cooperation (P-TECC) Statement of Principles – 2023 [31.07.2023].

Przykładem realizacji polityki państw 3SI w odniesieniu do technologii wodorowych są pierwsze projekty realizowane międzynarodowo lub przy współpracy z aktorami zewnętrznymi jak np.: *Projects Launching a Hungarian-American pilot project in Hungary*. Projekt zakłada badanie wykorzystania wodoru na Węgrzech przy współpracy z sektorem nowych technologii wodorowych pochodzącym ze Stanów Zjednoczonych. Projekt zakłada: otwarcie centrum badań nad wodorem i utworzenie koncernu produkującego wodór na Węgrzech, które będą realizować politykę klimatyczną i dywersyfikacyjną w tym państwie. Zgodnie z węgierską strategią energetyczną do 2030 roku ma powstać 6000 MW mocy z elektrowni słonecznych. Wodór będzie pełnił funkcję magazynu energii oraz będzie bilansował system energetyczny. Założenia tego projektu wpisują się w działania na rzecz: bezpieczeństwa, dywersyfikacji oraz rozwoju wodoru jako nośnika i źródła energii. Uzależnienie Węgier od rosyjskich dostaw węglowodorów jest dużym zagrożeniem zarówno w skali kraju, jak i regionu. Działania państw 3SI wskazują solidarną pomoc w tym zakresie<sup>I</sup>.

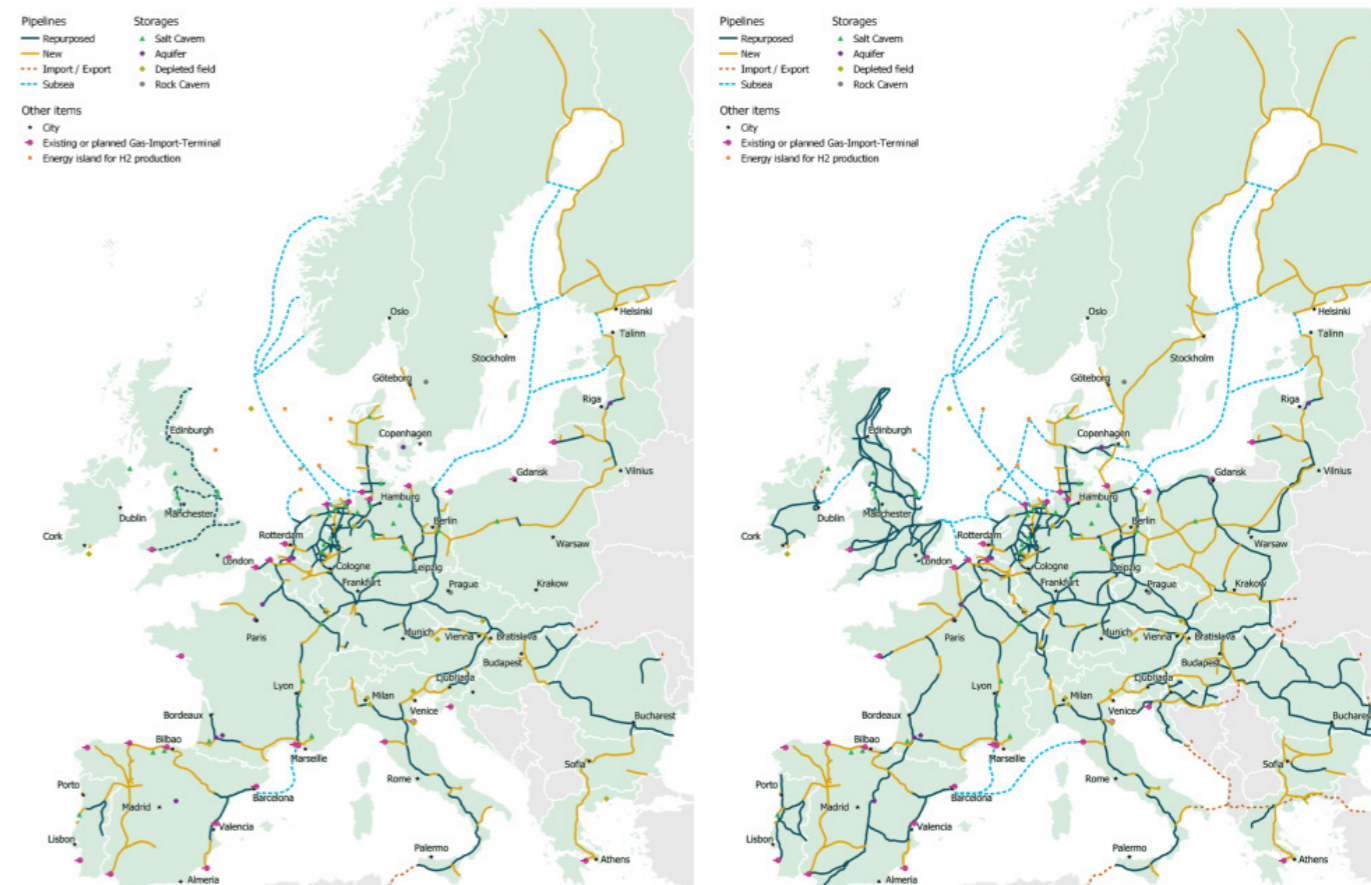
Innym przykładem rozwoju technologii wodorowych w obszarze 3SI jest zawarcie porozumienia między

rumuńskim Transgaz, a 3SI Investment Fund na rozwój infrastruktury przesyłu gazu z integracją transportu wodorowego. Wartość projektu szacuje się na 2,7 mld zł<sup>II</sup>.

### Znaczenie państw 3SI dla rozwoju technologii wodorowych

Znaczenie państw 3SI dla rozwoju technologii wodorowych stale wzrasta i jest to podyktowane zmianami geopolitycznymi oraz wymogami bezpieczeństwa energetycznego, a także zmianami technologicznymi w zakresie pozyskiwania i wykorzystania wodoru w energetyce. European Hydrogen Backbone Initiative dokonała aktualizacji mapy przyszłego rozwoju rurociągów przesyłowych wodoru. Zmiany w zakresie rurociągów wodoru wynikają z krajowych i regionalnych polityk rozwoju technologii wodorowych. Uwzględnienie ich w okresie od połowy 2022 do 2023 roku pozwoliło autorom European Hydrogen Backbone Initiative na aktualizację wizji rozwoju wodoru w całej Europie. Główne zmiany w intensywności rozwoju technologii wodorowych pojawiają się w obszarze 3SI: w Polsce, Czechach, Rumunii, Bułgarii.

Rys. 2.8 Aktualizacja mapy infrastruktury EHB zgodnej z wizją rozwoju EHB



Źródło: European Hydrogen Backbone, EHB Infrastructure Maps Update February – including latest feasibility estimates and PCI submissions, 2023 [31.07.2023].

I. 3seas, Launching a Hungarian-American pilot project in Hungary [31.07.2023].

II. Transgaz, Three Seas Initiative Investment Fund signs agreement to invest in greenfield gas infrastructure in Romania [31.07.2023].

Rys. 2.9 Korytarze przesyłowe EHB



Źródło: European Hydrogen Backbone, EHB publishes five potential hydrogen supply corridors to meet Europe's accelerated 2030 hydrogen goals, 2022, [31.07.2023].

Program RePowerUE zakłada, że przez obszar państw 3SI będą przechodzić dwa ważne korytarze przesyłowe wodoru: z regionu nordyckiego i bałtyckiego oraz z Europy Wschodniej i Południowo-Wschodniej do Niemiec. Wszystkie korytarze przesyłowe prowadzą w jednym kierunku - do Niemiec, jednak dopiero po odpowiednim wysyceniu zapotrzebowania gospodarek regionalnych około 2030 roku<sup>1</sup>.

Z polskiej perspektywy szczególnie istotny jest korytarz nordycko-bałtycki, który będzie obsługiwał wodór pochodzący z lądowych i morskich farm wiatrowych. W tym obszarze wodór będzie odgrywać szczególną rolę w procesach dekarbonizacji, rozwoju produkcji stali, e-paliwach i przemyśle chemicznym. W przypadku południowych państw 3SI wodór będzie pochodził z energii słonecznej i będzie stanowić nośnik energii dla odbiorców przemysłowych jak i indywidualnych. Do obszaru państw 3SI będzie docierać także wodór z Afryki Północnej, którego

dostępność będzie stanowić wyzwanie dla państw regionu w zakresie konkurencyjności lokalnego odpowiednika<sup>2</sup>. Może okazać się, że projekt 3SI zakładający łączenie gospodarek na osi północ-południe będzie na tyle energochłonny, że wodór powstający w tym regionie posłuży do rozwoju regionalnych gospodarek zamiast wspierać gospodarkę niemiecką. Procesy dekarbonizacji i dywersyfikacji mogą wymusić zwiększenie zaangażowania wodoru jako nośnika stabilizującego bilans energetyczny poszczególnych państw.

### 3 Seas Hydrogen Council

Dla zabezpieczenia interesów państw 3SI w zakresie energetyki wodorowej powołano 3SI Hydrogen Council<sup>3</sup>. Porozumienie w tej sprawie zostało podpisane w Poznaniu w 2023 roku przez przedstawicieli organizacji wodorowych z Polski,

I. European Hydrogen Backbone, Five hydrogen supply corridors for Europe in 2030. Executive Summary, 2022, [31.07.2023].

II. CIRE, Inicjatywa 2 x 40 GW szansą dla dekarbonizacji Europy [31.07.2023].

III. Klaster Technologii Wodorowych, 3 Seas Hydrogen Council. A hydrogen council is established, consisting of Central European and Baltic states, 2023 [31.07.2023].

Czech, Estonii, Litwy, Łotwy, Słowacji, Słowenii, Węgier i Ukrainy. Zadaniem 3SI HC jest uzupełnianie kompetencji biznesowych, technologicznych i politycznych członków, a szczególnie: międzynarodowa współpraca biznesowa państw sygnatariuszy, prowadzenie dialogu i wypracowywanie wspólnego stanowiska wobec Komisji Europejskiej, Rady i Parlamentu Europejskiego.

3SI HC uwypukla główne deficyty, zależności i zbieżne cele państw 3SI w zakresie gospodarki wodorowej. Są one podyktowane uwarunkowaniami takimi jak:

- Wspólna przeszłość i doświadczenie państw 3SI,
- Porównywalną strukturę energetyczną,
- Zbliżone warunki klimatyczne,
- Sezonowy wzrost zapotrzebowania na energię i ciepło,
- Regionalne i światowe znaczenie produkcyjne państw 3SI.

Państwa 3SI posiadają wysoki potencjał zmian, które 3SI Hydrogen Council ma realizować poprzez:

- Działania na rzecz zmniejszenia udziału paliw kopalnych w krajowym bilansie energetycznym,
- Promocję polityki restrukturyzacji rynku pracy,
- Promocję krajowych i regionalnych rozwiązań, firm i technologii wodorowych,
- Kreowanie zmian prawnych w UE ze szczególnym uwzględnieniem i poszanowaniem specyfiki

regionu państw 3SI,

- Wspieranie inicjatyw finansujących powstanie wspólnego ekosystemu wodorowego,
- Pełnienie funkcji platformy wymiany wiedzy i doświadczeń i dobrych praktyk,
- Wypracowanie sprawnej transgranicznej gospodarki wodorowej w regionie,
- Zrównoważenie regionalnego systemu energetycznego,
- Rozwój innowacyjności technologii energetycznych.

## Wodór w dokumentach strategicznych państw 3SI

### Strategie

Państwa 3SI nie posiadają spójnej strategii na rzecz rozwoju gospodarki wodorowej. Wszystkie państwa 3SI deklarują realizację celów europejskiej polityki określonej w Europejskiej Strategii Wodorowej. Działania państw 3SI otwierają się na współpracę bilateralną i rozwój transgranicznego przesyłu wodoru w perspektywie lat 2030-2040.

Nie wszystkie państwa 3SI posiadają strategię, programy lub mapy drogowe rozwoju technologii wodorowych do 2030 roku. Poniższa mapa prezentuje zaawansowanie prac nad strategią wodorową w poszczególnych krajach 3SI.

Rys. 2.10 Mapa strategii wodorowych wśród państw 3SI (stan na 17.07.2023)



Źródło: opracowanie własne.

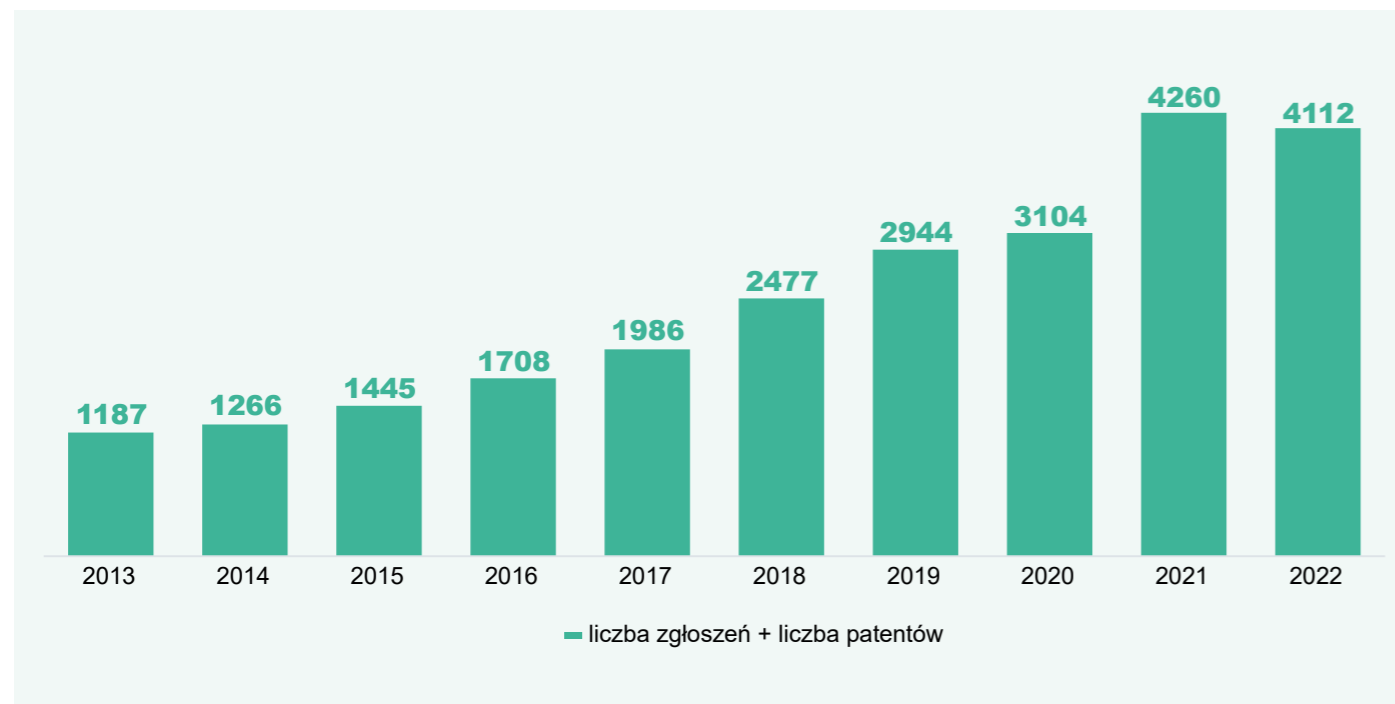
# BADANIA I PATENTY

Porównanie różnic pomiędzy poszczególnymi obszarami geograficznymi (świat, 3SI, Polska) pozwala ocenić ogólny poziom innowacyjności w zakresie technologii wodorowych. Aktywność

patentowa (rozumiana jako suma wszystkich zgłoszeń patentowych oraz udzielonych patentów) wskazuje na istotne różnice między państwami w zakresie produkcji wodoru, magazynowania i transportu.

## Aktywność patentowa w ujęciu globalnym

Rys. 2.11 Świat - aktywność patentowa w tematyce technologii wodorowych



Źródło: opracowanie własne na podstawie PatSnap® Analytics

Światowa aktywność patentowa w zakresie technologii wodorowych wzrasta dynamicznie od 10 lat. W 2020 roku aktywność patentowa w technologiach wodorowych przekroczyła wartość 3 tysięcy zgłoszeń i patentów rocznie, co pozwala stwierdzić, że

technologie wodorowe stały się obszarem istotnego zainteresowania wynalazców na świecie!

Poniższa tabela przedstawia wartość wszystkich patentów wodorowych na świecie, uznanych w latach



I. We wszystkich bazach patentowych, liczby patentów przyznanych (stany na koniec 2021 i 2022 r.) są mniejsze od rzeczywistych, w związku z trwającym nadal procesowaniem zgłoszeń patentowych. Liczby te są aktualizowane wstecznie w dniu uznania/odrzućcia prawa do patentu.

2013-2020. To szacunkowa wycena<sup>1</sup> narzędzia analitycznego PatSnap, dokonana na podstawie szeregu czynników ekonomicznych, tj. kondycji

finansowej i wartości podmiotów patentujących, a także trendów na rynkach oraz stopnia komercjalizacji patentów.

Tabela 2.1 Świat - szacunkowe wartości patentów w poszczególnych obszarach technologicznych

obszar	całkowita wartość patentów	średnia wartość patentu
produkcja	523 996 400 \$	59 282 \$
magazynowanie	306 533 700 \$	70 081 \$
transport	15 480 500 \$	123 844 \$
<b>Łącznie/średnia:</b>	<b>846 010 600 \$</b>	<b>63 429 \$</b>

źródło: opracowanie własne na podstawie PatSnap® Analytics

Średnia wartość patentów dot. produkcji wodoru jest najmniejsza, lecz ich całkowita wartość przekracza 500 mln dolarów, co stanowi 2/3 wartości rynku. Z kolei średnia wartość - nielicznej grupy - patentów „transportowych”, jest aż dwa razy większa niż „produkcyjnych”, co potwierdza ich atrakcyjność

z punktu widzenia zastosowań komercyjnych.. Można zakładać, że patenty te są atrakcyjne nie tylko w aspekcie sprzedaży własności IP, ale przede wszystkim komercjalizacji (wdrożenia technologii) patentu.

Tabela 2.2 Świat - ranking TOP5 państw wg liczby zgłoszeń

pozycja	kraj pochodzenia (ang. Country of Origin)	liczba zgłoszeń
1	Chiny	10 562
2	Japonia	1 987
3	USA	1 032
4	Korea	950
5	Francja	224
15	<b>Polska</b>	<b>45</b>

Źródło: opracowanie własne na podstawie PatSnap® Analytics

Liderem innowacji „wodorowych” są Chiny, z których w latach 2013-2022 pochodziło aż 2/3 wszystkich patentów na świecie. Francja jest jedynym krajem europejskim w ścisłej czołówce. Polska w tym rankingu

zajmuje wysokie 15-te miejsce, wyprzedzając takie państwa rozwinięte jak Izrael, Szwecja czy Kanada.

I. PatSnap dokonuje szacunków za pomocą algorytmów uczących (AI) o nieznannej doskonałości, lecz wycena taka jest wystarczająca do wyliczenia i zestawienia ze sobą wartości średnich dla produkcji, magazynowania i transportu wodoru.

# TRENDY NA GLOBALNYM RYNKU WODOROWYM

## Spółeczno-Ekonomiczne

- **Koszty produkcji wodoru:** zależne od wielu czynników (koszt produkcji elektrolizerów, kryzys energetyczny, dostęp do OZE, skala produkcji wodoru, ceny gazu ziemnego i energii elektrycznej, zmiany w regulacjach). Koszty technologiczne maleją, a skala produkcji regularnie rośnie również obniżając koszty, ale uwarunkowania makroekonomiczne trudno jednoznacznie przewidzieć.
- **Inwestycje w technologie wodorowe:** regularnie wzrastają. Inwestycje przechodzą z fazy planowania do działań wdrożeniowych (metody produkcji, infrastruktura). Rynek wymaga integratorów, podmiotów podejmujących ryzyko (duże przedsiębiorstwa i samorządy). Cykl inwestycyjny w sektorze czystej energii trwa ok. 25 lat, a więc większość inwestycji energetycznych odbędzie się w bieżącej dekadzie.
- **Popyt na wodór:** plany gospodarcze uwzględniające wodór publikują największe mocarstwa na świecie, większość prognoz przewiduje wzrost popytu. Wodór może być konkurencyjny szczególnie w lokalnych łańcuchach wartości.
- **Korzyści z wdrożenia technologii wodorowych:** w skali światowej nawet 30 milionów miejsc pracy, 1 mln w Europie.
- **Produkty związane z wodorem:** auta wodorowe jako produkt komplementarny dla "elektryków".
- **Rozwój współpracy:** nowe technologie wodorowe umożliwiają rozwój międzynarodowej oraz międzysektorowej współpracę wielu państw.
- **Podnoszenie świadomości społecznej:** rozwój technologii wodorowych wpływa na wzrost świadomości energetycznej i zaangażowania w oszczędzanie energii.

## Technologiczne

- **Dekarbonizacja:** wodór z elektrolizy wspiera dekarbonizację, dlatego znalazł zastosowanie w różnych sektorach, takich jak produkcja cementu, amoniaku, huty (szkła, żelaza, stali), oraz w transporcie (żegluga, kolej, komunikacja miejska, pojazdy komunalne) i ogrzewaniu budynków.
- **Wąskie gardło w rozwoju produkcji wodoru:** zainteresowanie wodorem przekroczyło dostępność np. elektrolizerów. Realizacja zamówień na elektrolizery jest aktualnie opóźniona około 3-4 lata. Ma to wpływ na rozbudowę infrastruktury.
- **System energetyczny:** wodór wykorzystywany będzie jako nośnik lub magazyn nadmiaru prądu z OZE, a elektrolizery będą instalowane obok punktów popytu, takich jak rafinerie, huty stali i kompleksy chemiczne. W razie potrzeby, wodór będzie służył jako bufor, umożliwiając transport energii na dalsze dystanse lub przesunięcie jej wykorzystania w czasie.
- **Technologie produkcji wodoru:** rozwój w obszarach fermentacji beztlenowej, zgazowania biomasy, elektrolizy z wykorzystaniem energii pochodzącej z OZE, metod foto-biologicznych.
- **Infrastrukturalne perspektywy:** transport wodoru możliwy jest przez jego mieszanie z gazem ziemnym. Infrastruktura tankowania wodoru w Europie to obecnie 120 stacji, planowana jest jej ekspansja, do 2025 roku ma zostać rozszerzona sześciokrotnie. Magazynowanie wodoru odbywa się w mniejszych butlach, cysternach oraz w większych zbiornikach podziemnych, takich jak kawerny solne.

## Polityczno-regulacyjne

- **Finanse:** zwrot ku finansowaniu zielonych inwestycji (np. Taksonomia UE). Technologie wodorowe będą wymagały znacznego zwiększenia środków finansowych, w tym wsparcia ze środków publicznych, na inwestycje (600 mld zł do 2030 roku), badania i rozwój czy standaryzację wodoru.
- **Cele zrównoważonego rozwoju:** wodór jest aktualnie głównym narzędziem politycznym,

które może pozwolić na rozwiązanie problemu zmian klimatu, konkurencyjności gospodarek i bezpieczeństwa zasobów.

- **Rynek międzynarodowy:** dominujące kraje dążą do utworzenia międzynarodowego rynku handlu wodorem. Zawijają międzykontynentalne umowy o współpracy, skupiające się na handlu, inwestycjach i rozwoju naukowym. W przypadku UE współpraca ma obejmować także Ukrainę i Bałkany Wschodnie oraz Afrykę Północną.
- **Strategia energetyczna:** zarządzanie energią ma odbywać się w ramach strategii "Sector coupling", czyli łączenia sektorów. Przepływ energii ma odbywać się przede wszystkim między przemysłem, transportem i budownictwem.
- **Oczekiwanie na regulacje:** kształtowane są definicje odnośnie gospodarki wodorowej, np. dotyczące piaskownic regulacyjnych, czyli środowisk pozwalających testować produkty dotychczas nieuregulowane prawnie. Oczekiwanie na regulacje zwiększa ryzyko inwestycyjne.

## Środowiskowe

- **Czystsze powietrze:** wykorzystanie wodoru zmniejszy zanieczyszczenie powietrza, szczególnie w miastach.
- **Zmniejszenie emisji:** Celem Unii Europejskiej jest uczynienie systemu energetycznego neutralnym dla klimatu – m.in. dzięki wodorowi i OZE.
- **Zagospodarowanie odpadów:** Odpady stałe – produkcja wodoru z pirolizy. Ścieki komunalne mogą znaleźć zastosowanie w produkcji wodoru z ich elektrolizy oraz jako pożywka do fermentacji beztlenowej, pirolizy lub zgazowania osadu czynnego.
- **Zwiększone wydobycie surowców:** Wzrost wykorzystania surowców krytycznych w urządzeniach do produkcji wodoru.
- **Dominacja paliw kopalnych:** w pierwszej połowie 2023 roku, pomimo wzrostu wykorzystania OZE, ponad 90% wodoru produkowane jest z paliw kopalnych.





# WNIOSKI I REKOMENDACJE

## Podsumowanie

Zbieżność celów i wielu różnych krajowych działań powoduje, że z dużą pewnością można przewidywać przyspieszenie rozwoju technologii wodorowych.

Wyraźna jest konieczność rozwijania synergii w gospodarce wodorowej. Jest ona wielowymiarowym działaniem o charakterze lokalnym i międzynarodowym. W przypadku lokalnych działań synergia zakłada koordynację zasobów i potencjałów poszczególnych państw w produkcji wodoru i jego użytkowaniu. Międzynarodowy wymiar synergii

zakłada wsparcie w kreowaniu projektów o charakterze transnarodowym. Przykładem takich działań jest Bałtycka Dolina Wodorowa czy North Adriatic Hydrogen Valley (Chorwacja, Słowenia, Włochy) <sup>I</sup>.

Inicjowanie i wspieranie takich działań jest niezbędne do dalszego rozwoju technologii i gospodarki wodorowej państw 3SI. Dużą rolę w kreowaniu



I. NAHV, <https://www.clean-hydrogen.europa.eu/system/files/2023-03/2.%20North%20Adriatic%20cross-border%20Hydrogen%20Valley%20%28NAHV%29.pdf>, 2023 [dostęp dn. 31.07.2023].

II. Hydrogen Europe, <https://hydrogeneurope.eu/clean-hydrogen-monitor2022/>, 2022 [dostęp dn. 31.07.2023].

kierunków rozwoju strategii dla państw Inicjatywy Trójmorza ma Fundusz Trójmorza, którego współzałożycielem jest Bank Gospodarstwa Krajowego i który wspiera projekty wodorowe w poszczególnych państwach<sup>II</sup>.

W wielu przypadkach funkcjonują różne modele rozwoju gospodarki wodorowej: scentralizowane (głównie w państwach małych) lub zdecentralizowane (np. Polska). Niektóre państwa nie posiadające strategii, nie definiują modelu rozwoju (np. Słowenia).

## Priorytety dalszego rozwoju w obszarze wodoru w Polsce

Wyniki badania delfickiego przeprowadzonego w 2023 roku w ramach projektu „Strategia bezpieczeństwa technologii wodorowych dla Polski na lata 2022-2030” wskazują na trzy kluczowe czynniki, które mogą znacząco wpłynąć na rozwój gospodarki wodorowej w Polsce:



### 1. Legislacja obniżająca ryzyko inwestycyjne w obszarze wodoru do 2030 roku;

Eksperti uznają to za kluczowy element, który może przyspieszyć rozwój produkcji niskoemisyjnego wodoru. Ważne będzie stworzenie stabilnego otoczenia regulacyjnego dla niskoemisyjnego wodoru, co pomoże zminimalizować ryzyko inwestycyjne, przyspieszy budowę łańcucha wartości i dostaw oraz poprawi bilans popytu i podaży. Ponadto krajowe regulacje powinny pozwalać na działania pilotażowe w zakresie wykorzystania poszczególnych technologii wodorowych w różnych sektorach gospodarki (np.: transport, przemysł, ciepłownictwo). Wyjątkowym sukcesem mogą wkrótce okazać się wszelkiego rodzaju inicjatywy o charakterze lokalnym np. w postaci tzw. dolin wodorowych.

### 2. Instrumenty finansowe wspierające polskie firmy do 2030 roku;

Ustanowienie odpowiednich instrumentów finansowych, takich jak Europejski Bank Wodorowy, może istotnie przyspieszyć rozwój rynku wodoru. Brak środków finansowych utrudnia polskim firmom samodzielny start na rynku niskoemisyjnego wodoru. Ważne jest określenie strategicznych kierunków i poziomu finansowania przedsięwzięć oraz oczekiwanych, wymiernych efektów w perspektywie do roku 2030-2035. Brak klarownego kierunku działania – z potencjalnymi zmianami wywołanymi czynnikami politycznymi i rynkowymi – limituje wolę wielu podmiotów do inicjowania i realizowania przedsięwzięć dużego

kalibru, które mogą mieć realne przełożenie na gospodarkę i tworzenie ekosystemu wodorowego.

### 3. Zabezpieczenie środków publicznych na transformację energetyczną do 2030 roku;

To istotny aspekt dla rozwoju gospodarki wodorowej. Eksperti podkreślają potrzebę wsparcia finansowego, szczególnie dla pierwszych projektów. Jednak istnieje obawa, że wielkość dostępnych środków publicznych może być niewystarczająca, a konflikt z UE i brak porozumienia wewnętrznego w kierunkach transformacji mogą stanowić ryzyko dla pełnego zabezpieczenia tych środków.

Zarówno regulacje, jak i wsparcie finansowe są kluczowe dla przyspieszenia rozwoju sektora wodorowego w Polsce. Konieczne jest podjęcie działań w celu zapewnienia odpowiednich warunków inwestycyjnych i finansowych, aby Polska mogła skutecznie wykorzystać potencjał technologii wodorowych dla dekarbonizacji gospodarki.

Ponadto, istotne są:

#### • Synergia z politykami klimatycznymi i krajowymi

Wodór jako zasób przyszłości postrzegany jest przez pryzmat szerszych kontekstów gospodarczych, którymi są: dekarbonizacja, zielona transformacja czy walka ze zmianami klimatycznymi. Wodór spaja szereg inicjatyw politycznych i społecznych w tym zakresie i znajduje się w szeregu różnych strategii politycznych. Wyodrębnienie i ujednoczenie polityk wodorowych na poziomach krajowych i regionalnych

pozwole pełniej wykorzystywać i unaoczniać zmiany jakie zachodzą w środowisku lokalnym i globalnym pod wpływem technologii wodorowych.

#### • Dostęp do surowców mineralnych i analizy

Rekomenduje się wykonanie analiz w zakresie dostępności surowców mineralnych wystarczająco zasadowych do celów sekwestracji CO<sub>2</sub> oraz wykonanie analiz opłacalności wykorzystania takich surowców. Jeżeli z takich analiz wynikają szanse w zakresie istotnej dostępności oraz potencjalnych szans ekonomicznych, wtedy następnym krokiem powinno być opracowanie programów badawczych dotyczących: w pierwszym etapie analizy możliwości wykorzystania surowców do celów sekwestracji CO<sub>2</sub>, a następnie opracowania i wdrożenia wynikających z nich technologii.

Dodatkowo zaleca się analizę całkowitego śladu węglowego wytwarzania mocznika w różnych scenariuszach.

#### • Stworzenie programów badawczych i rozwojowych

Kontynuowanie badań naukowych i działań rozwojowych w dziedzinie technologii wodorowych jest kluczowe. Potrzebny jest stały monitoring rozwoju z analizą wyzwań, szans i zagrożeń związanych z wodorem w obszarach technologicznym, politycznym i społeczno-kulturowym. Ponadto, konieczne będzie zwiększenie inwestycji w nowe innowacje, optymalizacja procesów i poszukiwanie bardziej efektywnych rozwiązań technologicznych. W szczególności rekomenduje się stworzenie programów w zakresie:

- wsparcia projektów technologii związanych z wykorzystaniem wodoru do redukcji rud miedzi,
- rozwoju tanich metod oczyszczania wód pochodzących z rzek do poziomu wymaganego w technologiach elektrolizy wody,
- przeprowadzenie analiz oraz stworzenie programu pozwalającego na określenie i, w razie potrzeby, opracowanie oraz wdrożenie technologii wykorzystania tlenu powstającego w procesach elektrolizy (lub w przyszłości fotolizy) wody, ze szczególnym uwzględnieniem czynników logistycznych,
- ustanowienie programu związanego z fotolizą wody w zakresie wszystkich wymaganych elementów, ze szczególnym uwzględnieniem komplementarności zapotrzebowania aparaturowych z zakresem wymaganych prac badawczych.

#### • Rozwój możliwości produkcji elektrolizerów w Polsce i plan zwiększenia ich dostępności w polskiej gospodarce

Dostępność elektrolizerów – w szczególności czas oczekiwania na nie – stanowi wyzwanie już dzisiaj. Długi czas oczekiwania, opóźnienia w dostawach mogą negatywnie wpływać na rozwój inwestycji i tempo rozwoju gospodarki wodorowej. Ważne pod tym kątem jest przeprowadzenie analizy możliwości

stworzenia mocy produkcyjnych elektrolizerów na polskie potrzeby oraz opracowania planu organizacji dostępu do tych urządzeń.

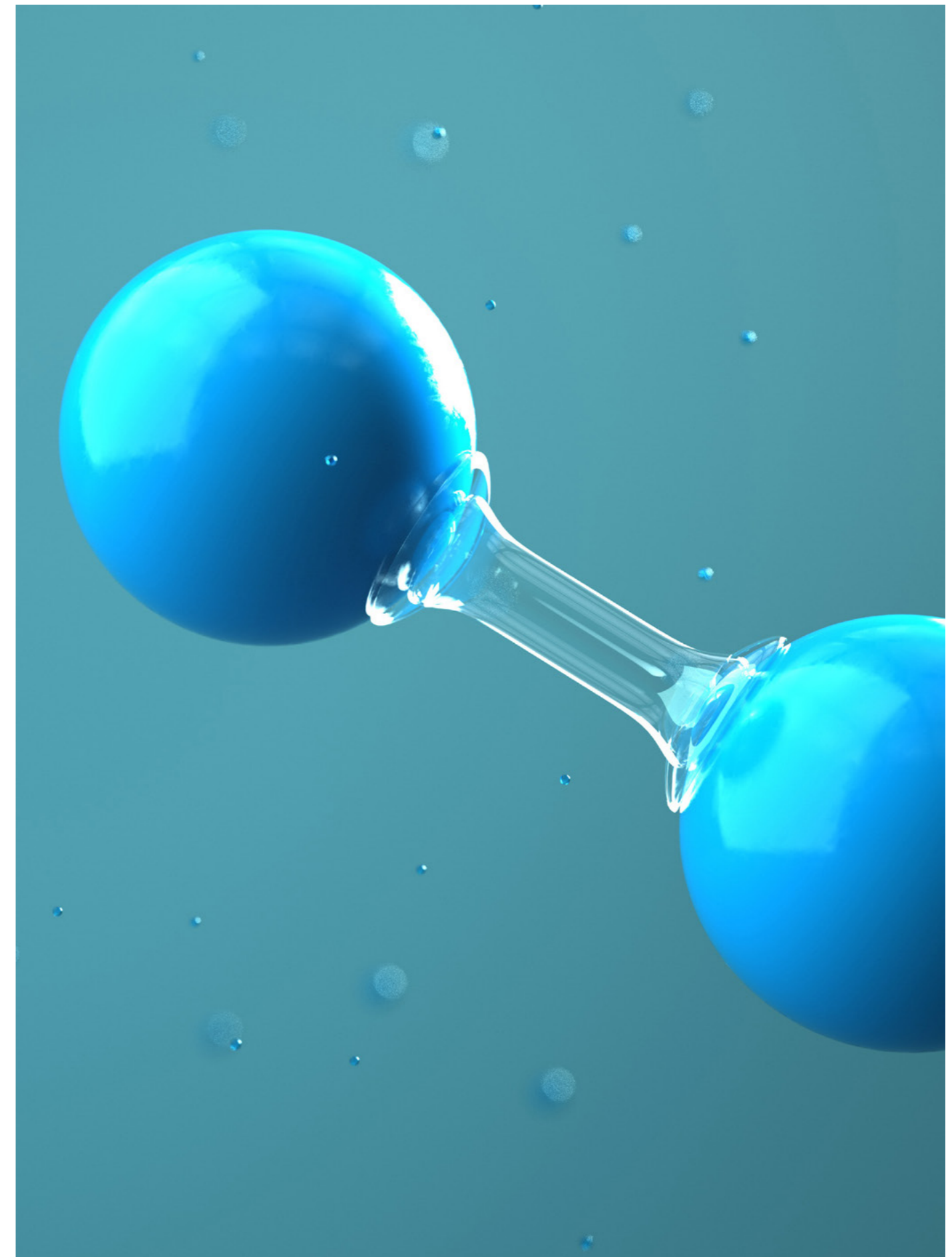
#### • Rozwój sektora “zielonej” stali w Polsce

Sektor stali jest tym, w którym dekarbonizacja jest trudna i kosztochłonna, ale bardzo potrzebna. Ważne jest stworzenie warunków, w których zagraniczne koncerny będą skłonne do inwestowania w wykorzystanie wodoru w produkcji stali wcześniej niż w innych konkurujących krajach, w których mają swoje instalacje. Może to przyczynić się do zwiększenia międzynarodowej konkurencyjności tego sektora polskiej gospodarki i zapobiec zamykaniu oddziałów zagranicznych koncernów w Polsce.

### Jakie działania podjąć w kontekście multistrategii dla 3W?

Najważniejsze i najpilniejsze potrzeby działania:

1. Uspójnienie i powiązanie strategii krajów Unii Europejskiej tak, aby określały główne realistyczne cele, by uwzględniały one potencjały i możliwości poszczególnych gospodarek, dostępność odpowiednich zasobów i środków.
2. Budowanie partnerstw międzynarodowych oraz współpraca w zakresie realizacji strategii regionalnych na rzecz wzmocnienia gospodarki i technologii wodorowych.
3. Realizacja działań sektorowych, uwzględniających rolę wodoru w poszczególnych obszarach gospodarki (energetyka, ciepłownictwo, transport itd.) z ich uwzględnieniem synergii i działań na jej rzecz w zakresie rozwoju wodoru.
4. Rozwój B+R oraz projektów pilotażowych w poszczególnych państwach i sektorach gospodarki w celu weryfikacji potencjału technologii i rozwiązań wodorowych.
5. Edukowanie różnych grup społecznych, w szczególności budowanie świadomości społeczeństwa o technologiach wodorowych; działania edukacyjne i informacyjne są ważne dla akceptacji i rozwoju tej branży. Informowanie społeczeństwa o zaletach i potencjale wodoru jako zielonego paliwa pomoże zdobyć większe wsparcie i zainteresowanie.





**WEĞIEL**

# WPROWADZENIE

Zapytani o węgiel w pierwszej kolejności myślimy o surowcu kopalnym (ang. coal), czyli skale osadowej, która powstała z przeobrażenia się szczątków roślinnych i zawiera m.in. węgiel pierwiastkowy, tlen, wodór, azot oraz siarkę. Surowiec ten uczestniczył w rewolucji przemysłowej i od wielu dekad towarzyszy ludzkości jako nośnik energii, ale również, co dostrzegamy coraz wyraźniej, jako jedna z przyczyn zmian klimatu i zanieczyszczeń środowiska w którym żyjemy.

Węgiel pierwiastkowy (ang. carbon) i jego liczne odmiany, znajduje zastosowania m.in. w technologiach wspierających zrównoważony rozwój a także pozwalających redukować niektóre negatywne efekty spowodowane rozwojem cywilizacyjnym, w tym również powszechnym wykorzystaniem paliw kopalnych. Paradoksalnie, gdyby nie zła konotacja z kopalnią, mówilibyśmy dzisiaj o węglu jako nadziei na nowoczesne i czyste jutro dla nas i dla następujących pokoleń.

Węgiel pierwiastkowy, to wciąż nowy i perspektywiczny przedmiot badań i nowych zastosowań m.in. w technologiach materiałowych, ale nie tylko. Komerccjalizacji odkryć jest coraz więcej i wielokrotnie nie zdajemy sobie sprawy, że przedmioty życia codziennego zawierają w sobie elementy węglowe związane z nowymi odkryciami. Dotychczasowe osiągnięcia napawają dużym optymizmem i wciąż odkrywamy nowe cechy węgla pierwiastkowego

otwierające kolejne potencjalne kierunki badań i zastosowań.

Różnorodność właściwości węgla pierwiastkowego umożliwia jego wszechstronne stosowanie w praktycznie każdym aspekcie globalnej ekonomii; od budownictwa np. jako dodatek do cementu, przez elektronikę przy produkcji wyświetlaczy, medycynę jako nośnik leku w terapii celowanej, po przemysł kosmiczny, wojskowy a nawet przy produkcji sprzętu sportowego.

Przekłada się to wyraźnie na zainteresowanie nowoczesnymi technologiami węglowymi w najbardziej zaawansowanych gospodarkach świata, co potwierdzają liczne patenty oraz na arenie międzynarodowej, co widać m.in. w licznych inicjatywach łączących zespoły badawcze z różnych krajów. Również Polska ma w tym procesie swój wkład, ma również potencjał, by nowa branża stała się katalizatorem dynamicznego wzrostu.

W niniejszym raporcie, ze względu na wyjątkową głębokość pojęcia "rynek technologii węglowych", nie bierzemy pod uwagę przemysłu związanego z wydobywaniem i przetwórstwem węgla oraz z metalurgią i odlewnictwem. Przez pojęcie "technologie węglowe" rozumiemy zatem pozostałe zastosowania i technologie wykorzystujące węgiel w jednej z jego molekularnych i chemicznych postaci, a także materiały kompozytowe zawierające alotropowe formy węgla.



# PODSUMOWANIE

Większość form węgla pierwiastkowego pojawiło się w naszym otoczeniu stosunkowo niedawno. Badanie ich właściwości wymaga środków finansowych, odpowiedniego zaplecza laboratoryjnego i czasu, co czyni ten obszar wiedzy wciąż świeżym, perspektywicznym ale również angażującym.

1. Nauka wciąż odkrywa nowe alotropowe odmiany węgla. Do diamentu i grafitu dołączyły fulereny, nanorurki węglowe, grafen i cyklokarbon. Naukowcy przewidzieli i opisali charakterystyki kolejnych odmian węgla (np. graphidyne (GDY), który podobnie jak grafen będzie mieć strukturę „dwuwymiarową”), ponad 500 kolejnych hipotetycznych odmian węgla bazujących na nieskończonych sieciach 3D czeka na syntezę<sup>I</sup>.
2. Grafen to wyjątkowy materiał zbudowany z atomów węgla tworzących arkusze o grubości zaledwie jednego atomu. Jest prawie przezroczysty a arkusz, który przykryłby powierzchnię 1 km<sup>2</sup>, waży mniej niż 1 kg.
3. Elektrony poruszają się w grafenie 200 razy szybciej niż w krzemie. To otwiera nowe perspektywy rozwoju elektroniki i sprzętu komputerowego. Dotąd, by tranzystor działał szybciej, trzeba go było zmniejszyć. Grafenowe tranzystory nowej generacji będą szybsze z definicji i w przyszłości zastąpią silikon<sup>II</sup>.
4. Fuleren C<sub>60</sub> i jego pochodne mają potencjalne działanie przeciwwirusowe np. w leczeniu zakażenia HIV. Obserwacje eksperymentalne potwierdziły hamujący wpływ C<sub>60</sub> na HIV-P, a jego skuteczność przypisuje się właściwościom antyoksydacyjnym i strukturze molekularnej wywołującej oddziaływanie hydrofobowe z miejscem aktywnym wirusa<sup>III</sup>.
5. Według analiz prowadzonych przez Precedence Research<sup>IV</sup> wartość światowego rynku nanomateriałów węglowych w 2022 roku wynosiła ok. 3,6 mld dolarów. Spodziewany jest dalszy dynamiczny wzrost, który w latach 2023–2032 ma rozwijać się w tempie CAGR<sup>V</sup> wynoszącym 27,5%, osiągając w 2032 roku wartość około 40,71 mld dolarów.
6. Obszar Azji i Pacyfiku miał 38% udziału w globalnej wartości tego rynku w 2022 roku, na kolejnych miejscach znalazły się: Europa (29%), Ameryka Północna (23%) oraz Ameryka Łacińska (6%)<sup>VI</sup>.
7. Światowa produkcja betonu generuje ok. 8% globalnej emisji CO<sub>2</sub>. Gdyby te emisje przyrównać do emisji generowanych przez poszczególne państwa, „beton stałby się trzecim co do wielkości emitentem na świecie”, zaraz za Chinami i Stanami Zjednoczonymi<sup>VII</sup>. Globalne wprowadzenie nowego betonu do użycia może spowodować redukcję światowej emisji CO<sub>2</sub> o ok. 2%.
8. USA i Chiny, jako dwie największe gospodarki świata, konkurują o przewagę technologiczną i innowacyjność w tej dziedzinie. Nowym liderem od 2017 roku są Chiny. Rywalizacja może prowadzić do wzrostu inwestycji w R&D oraz skutkować większą liczbą patentów.
9. Europejska Agencja Chemikaliów (ECHA) przeprowadziła w maju 2022 roku analizę obejmującą Europejski Obszar Gospodarczy oraz Szwajcarię<sup>VIII</sup>. Na jej podstawie rynek nanomateriałów, definiowany zgodnie z zaleceniem Komisji Europejskiej został oszacowany w 2020 roku wolumenowo na 140 tys. ton oraz na 5,2 mld euro pod względem wartości.
10. Polska jest czwartym europejskim rynkiem i największym rynkiem regionu Europy Środkowo-Wschodniej, dzięki czemu może pretendować do roli lidera w zakresie technologii nanowęglowych.

I. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 2021, Vol.94, No.3, 798-811, (<https://www.journal.csj.jp/doi/10.1246/bcsj.20200345>)

II. Aranca: <https://www.aranca.com/knowledge-library/articles/ip-research/is-graphene-the-new-silicon>

III. <https://www.cd-bioparticles.com/>

IV. Kanadyjsko-indyjska firma specjalizująca się w strategicznych analizach rynkowych, z siedziba w Ottawie.

V. Skumulowany roczny wskaźnik wzrostu – wskaźnik wykorzystywany do obliczeń średniego rocznego wzrostu pewnej wielkości w badanym okresie

VI. Ibidem

VII. <https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/25/concrete-the-most-destructive-material-on-earth>

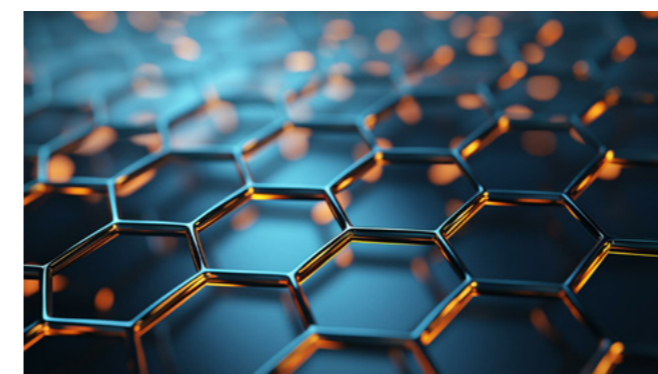
VIII. ECHA (European Chemicals Agency): Study of the EU market for nanomaterials, including substances, uses, volumes and key operators, May 2022

# WEGIEL I JEGO ODMIANY

Niezwykła różnorodność właściwości fizycznych i chemiczny przyciąga uwagę naukowców i biznesu w kierunku węgla pierwiastkowego. Posiada on bowiem ciekawą cechę zwaną alotropią, czyli jako pierwiastek chemiczny może występować w tym samym stanie skupienia w różnych odmianach.

**Najpowszechniej rozpoznawalna alotropia dotyczy gazowych postaci tlenu: dwuatomowej, którą oddychamy oraz trójatomowej (ozon), która ma właściwości silnie utleniające fotochemicznie, antyseptyczne, ale również toksyczne. Odmiany alotropowe pierwiastka mogą różnić się między sobą strukturą krystaliczną lub liczbą atomów w cząsteczce.**

Drobne różnice powodują, że ten sam węgiel może być wyjątkowo twardy jako diament, a przy nieco inaczej zorganizowanej strukturze - tworząc grafit - może być bardzo miękki i łatwo się kruszyć.



**Grafen** (ang. Graphene) to niezwykle materiał, który został odkryty w 2004 roku przez grupę fizyków z Uniwersytetu w Manchesterze. Przewidywano możliwość istnienia grafenu wcześniej, jednak zakładano, że ze względu na jej jednoatomową „grubość” będzie on niestabilny i przez to trudny do wyprodukowania. Andre Geim oraz Konstantin Novoselov wykorzystując grafit oraz taśmę Scotch doprowadzili poprzez wielokrotne „odklejanie” kolejnych warstw grafitu do pozostania tylko jednej warstwy atomów węgla, która była grafenem<sup>I</sup>.

I. U.S. Energy, Office of Science, <https://science.osti.gov/Science-Features/News-Archive/Featured-Articles/2011/03-25-11>

II. <https://materialyinzynierskie.pl/>

III. Aranca: <https://www.aranca.com/knowledge-library/articles/ip-research/is-graphene-the-new-silicon>

Odkrycie grafenu zaowocowało przyznaniem jego odkrywcom Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki “za przełomowe eksperymenty dotyczące dwuwymiarowego grafenu materiałowego” w 2010 roku. Odkrycie to otworzyło nowe możliwości dla projektowania i produkcji ultralekkich i ultramocnych materiałów.

Grafen ma kształt plastra miodu z sześciokątnymi oczkami, którego grubość stanowi zaledwie 1 warstwa atomów węgla. Jest wyjątkowo lekki (1 km<sup>2</sup> powierzchni waży mniej niż 1 kg), jest twardszy od diamentu, nawet 200-krotnie wytrzymalszy od stali, przewodzi doskonale ciepło i elektryczność. Można go rozciągać o 20% bez uszkodzenia struktury, jest prawie przezroczysty, odporny na przecięcie i ścieranie. Dzięki tym właściwościom mechanicznym, jest idealnym materiałem konstrukcyjnym lub składnikiem tego typu struktur. Dodanie grafenu do betonu zwiększa jego wytrzymałość na obciążenia, obniża wagę i redukuje negatywny wpływ branży na środowisko.

Grafen może być z sukcesem stosowany w:

- produkcji przezroczystych, zwijanych wyświetlaczy dotykowych, czułych przetworników obrazu, energooszczędnych źródeł światła (LED),
- produkcji wydajniejszych ogniw fotowoltaicznych, wysokowydajnych akumulatorów zwiększając ich pojemność i szybkość ładowania,
- medycynie przy tworzeniu sztucznych tkanek, które są tolerowane przez organizm ludzki, mając przy tym właściwości przeciwbakteryjne i antyoksydacyjne,
- nadawaniu tworzywom sztucznym nowych cech - grafen może je przekształcić w przewodniki a połączony z aluminium może służyć do budowy nowoczesnych sieci energetycznych<sup>II</sup>.

Elektrony poruszają się w grafenie 200 razy szybciej niż w krzemie. Umożliwia to stworzenie przełomowych urządzeń elektronicznych. Dotąd, by tranzystor działał szybciej, trzeba go było zmniejszyć. Grafenowe tranzystory nowej generacji będą szybsze z definicji i w przyszłości zastąpią silikon<sup>III</sup>. Tranzystory oparte na grafenie to rewolucyjne urządzenia jednoelektronowe, działające na skali nanometrycznej, które pozwalają na przepływ tylko jednego elektronu na raz.

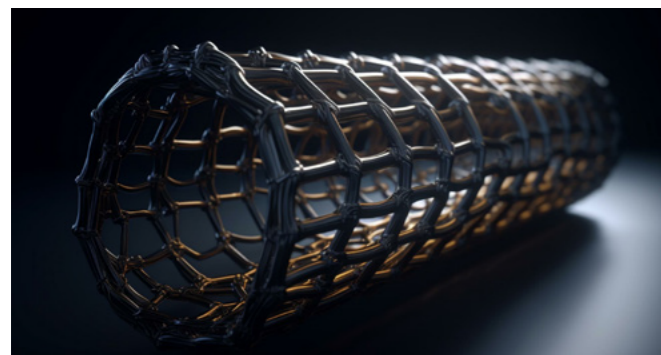
Grafen, z uwagi na swoją doskonałą przewodność elektryczną, wysoki współczynnik kształtu oraz zdolność do efektywnego rozpraszania cząstek, przewyższa tradycyjne materiały stosowane w katodach może być wykorzystywany w bateriach litowo-jonowych, litowo-siarkowych, superkondensatorach oraz innych komponentach energetycznych.

Kompozyty na bazie nanowęgla (np. grafenu) odgrywają coraz większą rolę w nowoczesnych branżach. Są one wykorzystywane szczególnie tam, gdzie wytrzymałość i waga mają kluczowe znaczenie np. w przemyśle lotniczym.

Membrana z utlenionego grafenu nie przepuszcza gazów, nawet atomów helu, a równocześnie jest całkowicie przenikalna przez wodę ( $H_2O$ ). Daje to możliwość zastosowania jej do filtracji w temperaturze pokojowej.

Czujniki z wykorzystaniem grafenu potrafią rejestrować zjawiska na poziomie cząsteczkowym, co można wykorzystywać m.in. w monitoringu – szczególnie w ochronie środowiska.

Grafen to materiał, który ma potencjał zmiany naszej teraźniejszości i przyszłości. Nie minęły jeszcze dwie dekady od odkrycia, a potencjalnych zastosowań są tysiące. Należy przy tym zaznaczyć, że produkcja grafenu jest kosztowna. Kawałek grafenu o wymiarach 10x10 cm i grubości 10  $\mu m$  kosztuje ponad 13 euro<sup>1</sup>.



**Nanorurki węglowe** (CNT, ang. Carbon Nanotubes) to struktury przypominające puste w środku walce (cylindry), nie posiadają „szwu”, składają się z cienkich ścianek węglowych o średnicy rzędu kilku nanometrów i długości od kilku mikrometrów do kilku milimetrów. Ściankę stanowi zwinięty grafen, powierzchnia ścianki w nanorurce węglowej ma strukturę plastra miodu z oczkami w kształcie sześciokątów i pięciokątów.

Za ich wynalazcę uznaje się powszechnie japońskiego naukowca Sumio Iijima, który w 1991 roku opublikował w *Nature*<sup>II</sup> pracę poświęconą węglowym nanorurkom. Odkrycia dokonał badając materiał wyekstrahowany

I. <https://nanografi.com/graphene/graphene-sheet/> [dostęp 20.10.2023]

II. Iijima, Sumio (1991), „Helical microtubules of graphitic carbon”, *Nature*, 354 (6348): 568, Bibcode:1991Natur.354...561, doi:10.1038/354056a0, S2CID 4302490

III. <https://biotechnologia.pl/technologie/swiace-klik-nanorurki-pomoga-diagnozowac-choroby-serca-i-nowotwory,21907>

z ciał stałych, które powstały na końcach elektrod węglowych po wyładowaniu w warunkach tworzenia się  $C_{60}$ . Należy zaznaczyć, że nanorurki były znane w świecie naukowców kilka dekad wcześniej.

Nanorurki węglowe należą do najbardziej fascynujących struktur węglowych, posiadających unikatowe właściwości mechaniczne, elektryczne i magnetyczne. Wyróżniamy nanorurki jednościenne (SWCNT, ang. single-walled carbon nanotubes) oraz wielościenne (MWCNT, ang. multi-walled carbon nanotubes), czyli rurki, których ścianki mają więcej niż jedną warstwę.

Nanorurki węglowe to materiały o właściwościach hydrofobowych, które cechują się niejednorodnym rozprzestrzenianiem się w środowiskach biologicznych, jednak nadanie odpowiednich cech ich powierzchni może przewyciężyć to ograniczenie. Pod wpływem czynników utleniających, tworzą powierzchnie karboksylowane. Karboksylowane CNT są materiałami, które można napełniać lekami.

Specjalna i stabilna porowata struktura nanorurek węglowych ma szeroki zakres potencjalnych zastosowań np. jako membrany do usuwania zanieczyszczeń z wody m.in. w procesie adsorpcji metali ciężkich, antybiotyków czy ropy naftowej. Filtry zawierające CNT mogą skutecznie zatrzymywać i dezaktywować bakterie i wirusy. CNT można również stosować do usuwania środków powierzchniowo czynnych.

Nanorurki węglowe charakteryzują się dużą powierzchnią właściwą, porównywalną do powierzchni właściwej węgla aktywnego, co umożliwia ich zastosowanie w filtrach, do magazynowania gazów lub w monitoringu – w czujnikach parametrów środowiskowych wykrywające np. amoniak.

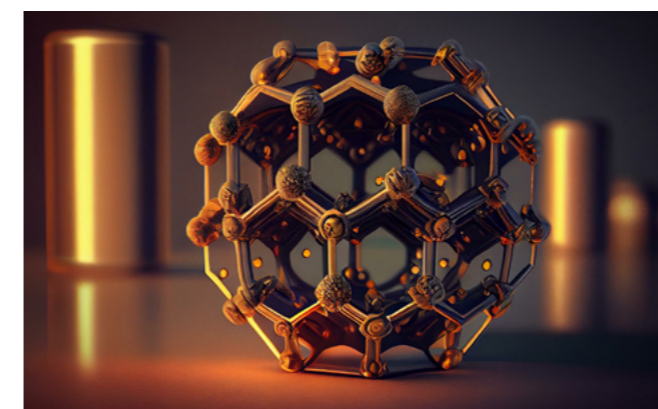
W medycynie nanorurki węglowe mogą być stosowane przy wprowadzaniu do organizmu leków w ramach terapii celowanych. Mogą przenikać przez błony komórkowe i dostarczać substancje lecznicze do konkretnych miejsc, co ma ogromne znaczenie dla skuteczności leczenia oraz ograniczenia niepożądanych skutków ubocznych np. w chemioterapii. CNT mogą również wspierać diagnostykę, poprzez zastosowanie celowo zmodyfikowanych nanorurek. Po uzyskaniu nowych właściwości – np. świecenie predefiniowanym kolorem – mogą pomagać przy wskazywaniu miejsc gdzie pojawiły się np. markery nowotworowe<sup>III</sup>.

W elektronice nanorurki mogą być wykorzystywane do produkcji nanoprzewodników i nanodiod. Posiadając właściwości półprzewodnikowe i magnetyczne, mogą być stosowane do produkcji pamięci komputerowych i sensorów. Bardzo dobra właściwość przewodnictwa

elektrycznego nanorurek jest wykorzystywana w antenach, co zwiększa wydajność około 20 razy w porównaniu z antenami konwencjonalnymi. Ta sama właściwość jest wykorzystywana do ekranowania promieniowania elektromagnetycznego.

Baterie wykorzystujące nanorurki jako elektrody zwiększają gęstość energii 10-krotnie, a także wytrzymują ekstremalne temperatury.

Właściwości elektronowe CNT mają ogromne znaczenie dla ich zastosowań w różnorodnych gałęziach przemysłu: chemicznego, elektronicznego, spożywczego, włókienniczego, jak również w farmacji, medycynie, budownictwie, rolnictwie, lotnictwie oraz obronności<sup>I</sup>.



**Fuleren** (ang. Fullerene) to kolejna odmiana alotropowa węgla, charakteryzująca się parzystą liczbą atomów oraz trójwymiarową formą w kształcie zamkniętej i pustej w środku bryły. Fulereny są czarnymi ciałami stałymi o metalicznym połysku. Zostały odkryte w połowie lat 80-tych XX wieku przez dwa niezależnie działające zespoły naukowców z Uniwersytetu Sussex w Brighton (Wielka Brytania) oraz Uniwersytetu Rice'a w Houston (Stany Zjednoczone, Teksas), za co naukowcy zostali uhonorowani Nagrodą Nobla w dziedzinie chemii w 1996 roku<sup>II</sup>.

Najbardziej rozpoznawalnym przykładem tej odmiany węgla jest Fuleren  $C_{60}$  składająca się z łańcuchów w kształcie pięcio- i sześciokątów, przypominający piłkę nożną.

Struktura fulerenu jest wyjątkowa, ponieważ nie posiada wiszących wiązań ani niesparowanych elektronów. Te cechy odróżniają fuleren od innych struktur krystalicznych, takich jak grafit czy diament, które mają krawędzie z wiszącymi wiązaniami i ładunkami elektrycznymi. Fuleren jest reaktywny

chemicznie i można go dodawać do struktur polimerowych, tworząc nowe kopolimery o określonych właściwościach fizycznych i mechanicznych<sup>III</sup>.

**Nazwa fuleren wywodzi się od nazwiska amerykańskiego architekta Buckminstera Fullera, który wymyślił pokrycia hal w postaci tak zwanych kopuł, z kratownicami w kształcie wielokątów foremnych. Co ciekawe, na tym schemacie bazował również, zatwierdzony przez FIFA i używany przez 36 lat (1970–2006), wzór piłki nożnej (Buckminster Ball).**

Fuleren  $C_{60}$  i jego pochodne mają potencjalne działanie przeciwwirusowe np. w leczeniu zakażenia wirusem HIV. Obserwacje eksperymentalne potwierdziły hamujący wpływ  $C_{60}$  na HIV-P, a skuteczność przypisuje się właściwościom antyoksydacyjnym i strukturze molekularnej wywołującej oddziaływanie hydrofobowe z miejscem aktywnym wirusa<sup>IV</sup>.

Przedmiotem intensywnych badań i poszukiwań jest bezpieczny nośnik leków lub genów, zdolny dostarczyć je w dokładnie określone miejsce organizmu. Fulereny mogą być rozpuszczane w wodzie i mogą przenosić leki i geny by dostarczyć je bezpośrednio do komórek. Udało się zsyntetyzować peptyd na bazie fulerenów i zaobserwowano jego zdolność do penetracji skóry<sup>V</sup>. Mogą więc łatwo przenikać przez błony komórkowe i ściany komórkowe i służyć jako systemy dostarczania leków.

Sprężone fulereny mogą być stosowane do miejscowego dostarczania leków, co pozwala uniknąć uszkodzenia innych narządów ciała. Ibuprofen jest powszechnie przepisywanym lekiem przeciwbólowym i przeciwzapalnym ale może wywoływać efekty uboczne. Trwają badania nad zastosowaniem fulerenów jako nośnika ibuprofenu, dzięki czemu zminimalizowane zostanie ryzyko wystąpienia niepożądanych efektów.

Fuleren jest silnym przeciwutleniaczem, który łatwo i szybko reaguje z wolnymi rodnikami, które mogą być przyczyną uszkodzenia lub śmierci komórek.

Wypełnione odpowiednim ładunkiem (np. jony metali) fulereny mogą mieć ogromne znaczenie dla diagnostyki. Przeprowadzono badania radioaktywnego znacznika do obrazowania chorych narządów i zabijania guzów nowotworowych. W ich efekcie okazało się, że powłoka węglowa jest stabilna

I. [1] Robert W., Kellsall R.W., Hamley I.W., Georhegan M. (red.), tłum.: Kurzydłowski K., *Nanotechnologie*, PWN, Warszawa, 2009. [2] Cademartiri L., Ozin G.A., tłum: Klonkowski A.M., *Nanochemia. Podstawowe Koncepcje*, PWN, Warszawa 2011. [3] Pietrasz A., Zastosowanie nanorurek węglowych w medycynie, w: Wawer I., Trziszka T. (red.), *Zioloecznictwo, biokosmetyki i żywność funkcjonalna. Materiały naukowe I Międzynarodowej Konferencji Konferencji „Zioloecznictwo, biokosmetyki i żywność funkcjonalna”*, Krosno 18–19 kwietnia 2013, s. 57

II. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Laureaci\\_Nagrody\\_Nobla\\_w\\_dziedzinie\\_chemii](https://pl.wikipedia.org/wiki/Laureaci_Nagrody_Nobla_w_dziedzinie_chemii)

III. <https://www.cd-bioparticles.com/>

IV. <https://www.cd-bioparticles.com/>

V. Rouse, J. G., Yang, J., Ryman-Rasmussen, J. P., Barron, A. R., & Monteiro-Riviere, N. A. (2007). Effects of mechanical flexion on the penetration of fullerene amino acid-derivatized peptide nanoparticles through skin. *Nano letters*, 7(1), 155-160.

i odporna na metabolizm człowieka, a radioaktywny metal spełnił swoją rolę oznaczając komórki nowotworowe. Stwierdzono również, że fulereny metali są nietoksyczne, utrzymują się w organizmie przez około godzinę i mogą pomagać przy obrazowaniu układu krążenia<sup>I</sup>.



**Włókna węglowe** (CF, ang. Carbon Fibers) produkowane są m.in. w procesie pirolizy np. poliakrylonitrylu<sup>II</sup> (PAN) i występują zazwyczaj w postaci tkanin plecionych z pojedynczych włókien, co nadaje im niezwykle, prestiżowy wygląd. Znany i wykorzystujemy je od ponad półtora wieku; już w 1880 roku Thomas Edison używał ich jako żarniki żarówek elektrycznych<sup>III</sup>. Większą popularność zawiązywały szerokim zastosowaniom w przemyśle zbrojeniowym (lotnictwo) i kosmicznym w latach 60-tych XX wieku.

Włókna węglowe mają na ogół doskonałe właściwości rozciągające, niską gęstość, wysoką stabilność termiczną i chemiczną przy braku utleniaczy, dobrą przewodność cieplną i elektryczną. Są stosowane w kompozytach w postaci tkanek tekstyliów, włókien ciągłych i włókien ciętych. Części kompozytowe można wytwarzać poprzez nawijanie włókien, nawijanie taśmy, formowanie płynne i in.<sup>IV</sup> Wzmocnione włókno węglowe może być nawet 5 razy mocniejsze od stali mając zaledwie 1/5 jej masy.

Do ważniejszych zastosowań włókien węglowych zaliczamy:

- przemysł lotniczy – konstruowanie części samolotów np. skrzydła, kadłuby, ogony. Zmniejszenie masy samolotu oznacza oszczędności w zużyciu paliwa,
- sprzęt sportowy – tworzenie lekkiego i trwałego sprzętu, takiego jak rakietki tenisowe, kije golfowe, wędki i rowery, a przede wszystkim jachty i łodzie wycieczkowe. Zmniejszenie masy sprzętu umożliwia osiągnięcie lepszych wyników,
- sprzęt medyczny – wytwarzanie np. protez kończyn

I. NANOTECHNOLOGY FOR TARGETED DELIVERY IN CANCER THERAPEUTICS, <https://studylib.net/doc/13307993/editorial-article-nanotechnology-for-targeted-delivery-in...>

II. Proces rozkładu polimeru przebiegający w wysokiej temperaturze bez dostępu tlenu

III. <https://dragonplate.com/a-brief-history-of-carbon-fiber>

IV. National Center for Biotechnology Information, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5513585/#B1-materials-02-02369>

V. Clean Energy, Volume 7, Issue 1, February 2023, Pages 190–216, <https://doi.org/10.1093/ce/zkad021>

VI. <https://www.compositesworld.com/articles/infinite-composites-type-v-tanks-for-space-hydrogen-automotive-and-more>

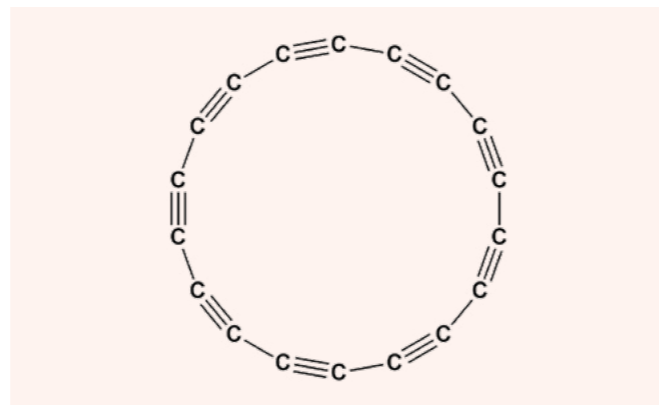
czy aparatów ortodontycznych. Kluczowym parametrem jest tu również lekkość i wytrzymałość.

Eksploracja kosmosu to jedna z branż, w których szybki postęp technologiczny jest absolutnie konieczny. Dzięki stosowaniu nowych technologii czy materiałów przesuwamy granice odkrytego, dając jednocześnie impuls do powstawania rozwiązań ułatwiających nasze codzienne życie.

Węglowe kompozyty są powszechnie stosowane przy budowie rakiet. NASA wykorzystuje w swoich statkach kosmicznych łopatki silnikowe oraz poszycia kadłubów z kompozytu węglowego. Kompozyty węglowe są wykorzystywane również do wytwarzania osłon termicznych stosowanych w łazikach. Wysoka odporność na temperatury i duża wytrzymałość włókien węglowych czynią je doskonałym materiałem ochronnym podczas nagrzewania się w trakcie przelotu przez atmosferę.

Węgiel może być również stosowany w produkcji zaawansowanych kosmicznych komponentów elektronicznych np. węgiel krzemu jest stosowany do wytwarzania diod elektroluminescencyjnych, które są wykorzystywane we wskaźnikach i systemach oświetleniowych na pokładzie statków kosmicznych.

Warto wspomnieć o synergicznym (z punktu widzenia wykorzystania zasobów 3W) zastosowaniu włókien węglowych w budowie zbiorników ciśnieniowych na wodór. Włókna węglowe są tam wykorzystywane jako element wzmacniający, owijany wokół zbiornika w precyzyjnie określony sposób<sup>V</sup>. Zbiorniki ciśnieniowe typu V charakteryzują się najlżejszą wagą i mają w pełni kompozytową konstrukcję wzmocnioną głównie włóknom węglowym<sup>VI</sup>.



**Cyklokarbon** składa się z n-atomów węgla i ma kształt pierścienia. Każdy atom węgla łączy się jedynie z dwoma sąsiadującymi atomami z naprzemiennie występującymi wiązaniami potrójnymi i pojedynczymi. Badacze od lat próbowali uzyskać taką strukturę

w fazie stałej, ale udało się to dopiero w 2019 roku zespołowi naukowców z Uniwersytetu Oksfordzkiego i IBM Research – Zürich, który po raz pierwszy zsyntetyzował i scharakteryzował pierścień składający się z n=18 atomów węgla<sup>I</sup>. Co warto odnotowania, w badaniach nad wytworzeniem nowej odmiany węgla brał udział Polak - dr Przemysław Gawel z Uniwersytetu Oksfordzkiego<sup>II</sup>.

Badania nad jego strukturą wskazują, że działa jak półprzewodnik, co może oznaczać potencjalne zastosowanie w elektronice, co w kolejnym etapie może pozwolić na dalszą miniaturyzację rozwiązań. Cyklokarbon udało się na razie uzyskać tylko w ściśle kontrolowanych warunkach przy bardzo niskiej temperaturze pięciu kelwinów, czyli ok. minus 268 stopniach Celsjusza. Nie jest pewne, czy związek ten będzie stabilny w wyższych temperaturach. Ze względu na młody wiek ta odmiana węgla nie jest jeszcze dobrze rozpoznana.



**Diament** to chyba najbardziej rozpoznawalna alotropowa odmiana węgla, głównie ze względu na swój wyjątkowy wygląd wzbudzający pożądanie bez względu na granice geograficzne i różnice kulturowe. Wokół diamentów narosło mnóstwo mitów, jednak bez wątplenia ta odmiana węgla ma również niezwykle cechy czyniące ją atrakcyjną nie tylko dla branży jubilerskiej. Do najważniejszych, poza branżą jubilerską, zastosowań diamentów należą<sup>III</sup>:

- zastosowania przemysłowe - większość wydobywanych diamentów posiada jakość niewystarczającą by stać się kamieniem szlachetnym, aż 80% wydobywania trafia do zastosowań przemysłowych. Ze względu na swoją twardość (10 w skali twardości Mohsa)<sup>IV</sup>, diamenty są od dawna używane do cięcia, wiercenia i polerowania. Bardzo małe cząstki diamentów są osadzone w brzeszczotach pił, wiertłach i tarczach szlifierskich, aby zwiększyć ich zdolność do

I. <https://www.sci.news/physics/cyclocarbon-07503.html>

II. <https://www.gov.pl/web/edukacja-i-nauka/diament-grafen-grafit-fulereny-i-cyklokarbon-zaobserwowano-nowa-odmiane-wegla>

III. Minerals Council South Africa: <https://www.miningforschools.co.za/lets-explore/diamond/uses-of-diamonds>

IV. Skala twardości Mohsa opiera się na skali od 1 do 10, przy czym diament jest najtwardszym materiałem o najwyższej wartości 10. Materiały są testowane względem siebie, a jeśli jeden zarysuje drugi, nada to materiałowi wyższą wartość.

V. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 2021, Vol.94, No.3, 798-811, (<https://www.journal.csj.jp/doi/10.1246/bcsj.20200345>)

cięcia twardych materiałów. Proszek diamentowy przerobiony na pastę diamentową służy do polerowania lub bardzo dokładnego szlifowania. W branży produkcji samochodów, piły i wiertła diamentowe tną i wykańczają elementy karoserii i silnika, a tarcze szlifierskie z powłoką diamentową fazują i polerują szyby w oknach.

- zastosowania w przemyśle optycznym - okna diamentowe wykonane są z bardzo cienkich membran diamentowych i służą do zakrywania otworów w laserach, komorach próżniowych i aparatach rentgenowskich. Membrany diamentowe są bardzo trwałe, odporne na ciepło i ścieranie oraz są przezroczyste.
- zastosowania medyczne – wyniki badań wskazują, że nanodiamenty (małe cząstki diamentu) mogą być wskaźnikiem skuteczności leków przeciwnowotworowych, umożliwiając lekarzom monitorowanie rozwoju komórek. Naukowcy rozważają także wykorzystanie diamentów do pomocy osobom niedowidzącym i testują diamenty jako potencjalny materiał do bionicznych oczu i implantów oka. Wiele narzędzi stomatologicznych zawiera końcówki diamentowe, które pomagają np. wiercić z maksymalną wydajnością i bez obawy o uszkodzenie wiertła.
- przemysł muzyczny - diamenty są bardzo sztywnym materiałem mogącym szybko wibrować, nie odkształcając się, co zostało wykorzystane w wysokiej klasy głośnikach. Diamenty są również używane w igłach gramofonów i sprzęcie DJ-skim.
- przyszłe zastosowania - dzięki ciągłym badaniom naukowcy znajdują kolejne, bardziej wyrafinowane zastosowania dla nanodiamentów np. w superlaserach, narzędziach chirurgicznych, urządzeniach medycznych i komputerach nowej generacji.

Rodzina alotropowych odmian węgla wyraźnie rośnie w siłę. Do znanych nam od wieków: diamentu i grafitu dołączyły w ciągu minionych dekad fulereny, nanorurki węglowe, grafen i cyklokarbon. Naukowcy opisali charakterystyki kolejnych odmian węgla (np. graphidyne (GDY), który będzie kolejnym dwuwymiarowym węglowym alotropem). Ponad 500 hipotetycznych odmian węgla bazujących na nieskończonych sieciach 3D czeka na syntezę<sup>V</sup>.

# RYNEK NANOMATERIAŁÓW WĘGLOWYCH

Branża nanomateriałów węglowych odnotowuje w ostatnich latach dynamiczny wzrost. Jest to konsekwencja zwiększającej się liczby zastosowań zarówno dla tych materiałów jak i technologii z nimi związanych.

Według analiz prowadzonych przez Precedence Research<sup>I</sup> wartość światowego rynku nanomateriałów węglowych w 2022 roku wynosiła ok. 3,6 mld dolarów. Spodziewany jest dalszy wzrost, który w latach 2023–2032 ma, w ujęciu CAGR<sup>II</sup>, wynieść 27,5%, osiągając w 2032 roku wartość około 40,71 mld dolarów.

Obszar Azji i Pacyfiku miał 38% udziału w globalnej wartości tego rynku w 2022 roku, na kolejnych miejscach znalazły się: Europa (29%), Ameryka Północna (23%) oraz Ameryka Łacińska (6%). Dominacja obszaru Azji i Pacyfiku wynika z coraz powszechniejszego stosowania nanomateriałów węglowych w branżach: motoryzacyjnej (w celu obniżenia wagi pojazdów oraz na potrzeby akumulatorów i baterii w samochodach elektrycznych), lotniczej (wg szacunków amerykańskiego Boeinga - Chiny w perspektywie do 2042 roku będą potrzebować 8 560 nowych samolotów)<sup>III</sup>, energetycznej, a także przy produkcji wyświetlaczy, telefonów i szeroko rozumianej elektroniki.

Ta sama analiza szacuje wartość globalnego rynku nanorurek węglowych na 2 mld dolarów w 2022 roku i przewiduje, że do 2032 r. osiągnie on około 7,71 mld dolarów, przy wzroście CAGR na poziomie 14,50% w latach 2023–2032.

Wielkość globalnego rynku grafenu w 2022 roku wyceniono na 175,9 mln dolarów i oczekuje się, że

w latach 2023 – 2030 będzie rosła przy złożonej rocznej stopie wzrostu (CAGR) wynoszącej 46,6%. Wzrost będzie napędzany przemysłem elektronicznym w gospodarkach wschodzących oraz zastosowaniami kompozytowymi. Oczekuje się, że produkcja grafenu odnotuje znaczny wzrost również ze względu na rosnące zapotrzebowanie na cele badawczo-rozwojowe<sup>IV</sup>.

Według raportu Grand View Research za 2022 rok, prawie 70% wartości rynku grafenu wygenerował obszar Azji i Pacyfiku (m.in. Chiny, Indie, Korea Płd., Japonia i Australia). Grafen był stosowany głównie przy produkcji elektroniki (ok. 37%), kompozytów (ok. 35%), rozwiązań w obszarze energii (ok. 13%) oraz innych.

W najbliższych dekadach przewidywany jest także dynamiczny wzrost rynku nanomateriałów węglowych z zastosowaniami w obszarze medycznym m.in. przy precyzyjnym podawaniu leków, diagnostyce oraz tworzeniu specjalistycznych terapii wykorzystujących właściwości różnych odmian węgla (m.in. antyoksydacyjne, elektryczne, optyczne itp.).

Jednym z wyzwań w szacowaniu rynku nanomateriałów jest zdefiniowanie czym dokładnie jest materiał „nano”. W tym celu wykorzystuje się zwykle zalecenie Komisji Europejskiej z 2011 roku (2011/696/EU)<sup>V</sup>, na którego podstawie zidentyfikowano 92 materiały, substancje i mieszaniny wpisujące się w definicję nanomateriałów. 19 z nich, czyli ponad 20%, bazuje na węglu i są to materiały zawierające odpowiednio: fulereny (6), grafen (5), węgliki (3), bazowane na węglu (2), diamenty (1), inne (2).

Europejska Agencja Chemikaliów (ECHA) przeprowadziła w maju 2022 roku analizę obejmującą

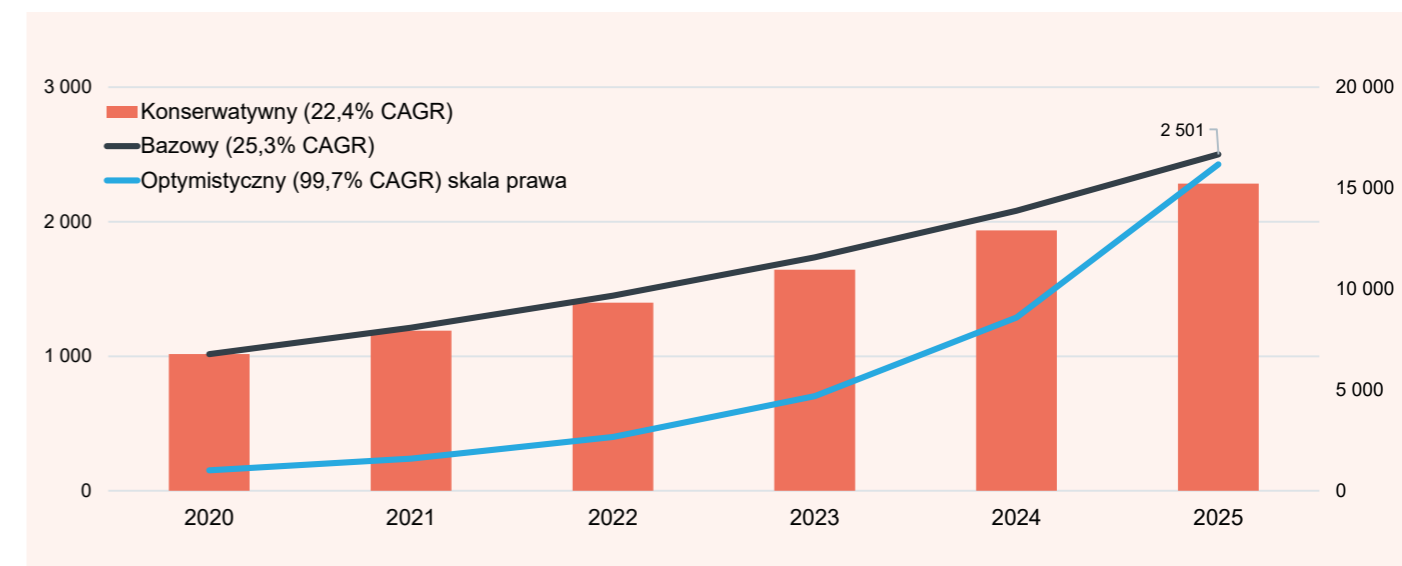
Europejski Obszar Gospodarczy oraz Szwajcarię<sup>I</sup>. Na jej podstawie rynek nanomateriałów (definiowany zgodnie z zaleceniem Komisji Europejskiej) został oszacowany wolumenowo w 2020 roku na 140 tys. ton oraz na 5,2 mld euro wartości. Ponad 14% wartości stanowią nanomateriały węglowe.

W 2020 roku wyprodukowano w Europie 790 ton nanorurek węgla, co pozwala oszacować wartość rynku na poziomie ok. 452,47 mln euro. Rynek grafenu został

oszacowany na 40 ton, co odpowiada 92,9 mln euro, natomiast rynek fulerenów na 20 ton i ok. 470 mln euro<sup>II</sup>.

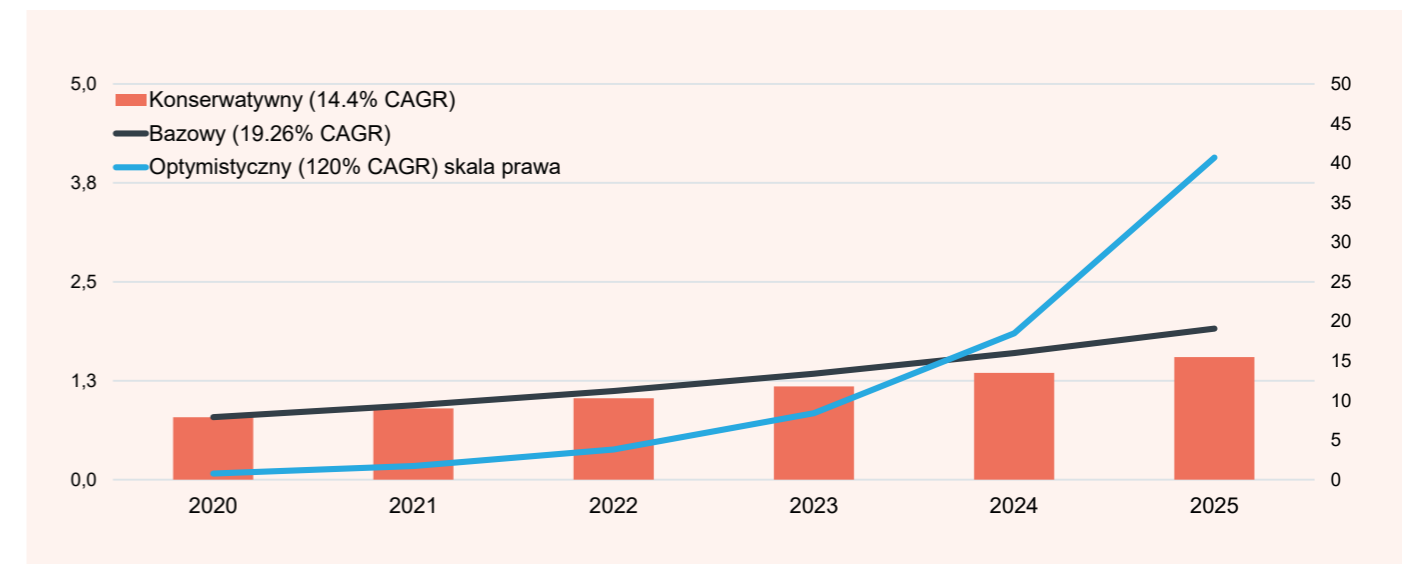
W perspektywie 2025 roku zakładając bazowe scenariusze wzrostu rynku nanomateriałów węglowych w Europie (nanorurki węglowe, grafen i fulereny), wielkość produkcji wyniesie 2 150 ton a wartość przekroczy 2,5 mld euro.

**Rys. 3.1 Szacunkowa produkcja nanomateriałów na bazie węgla w UE w okresie 2021-2025 (tys. ton) (nanorurki węglowe, grafen, fullereny)**



Źródło: ECHA: Study of the EU market for nanomaterials, including substances, uses, volumes and key operators, May 2022

**Rys. 3.2 Szacunkowa wartość produkcji nanomateriałów na bazie węgla w UE w okresie 2021-2025 (mln. euro) (nanorurki węglowe, grafen, fullereny)**



Źródło: ECHA: Study of the EU market for nanomaterials, including substances, uses, volumes and key operators, May 2022

I. ECHA (European Chemicals Agency): Study of the EU market for nanomaterials, including substances, uses, volumes and key operators, May 2022

II. Ibidem

I. Precedence Research: Carbon Nanotubes Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook, and Forecast 2023 – 2032, September 2023

Kanadyjsko-indyjska firma specjalizująca się w strategicznych analizach rynkowych, z siedzibą w Ottawie.

II. Skumulowany roczny wskaźnik wzrostu – wskaźnik wykorzystywany do obliczeń średniego rocznego wzrostu pewnej wielkości w badanym okresie

III. <https://www.reuters.com/business/aerospace-defense/boeing-says-china-will-need-8560-new-planes-over-next-20-years-2023-09-20/>

IV. GRAND VIEW RESEARCH: Graphene Market Size, Share, Growth & Trends Report, 2030

V. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX%3A32011H0696>

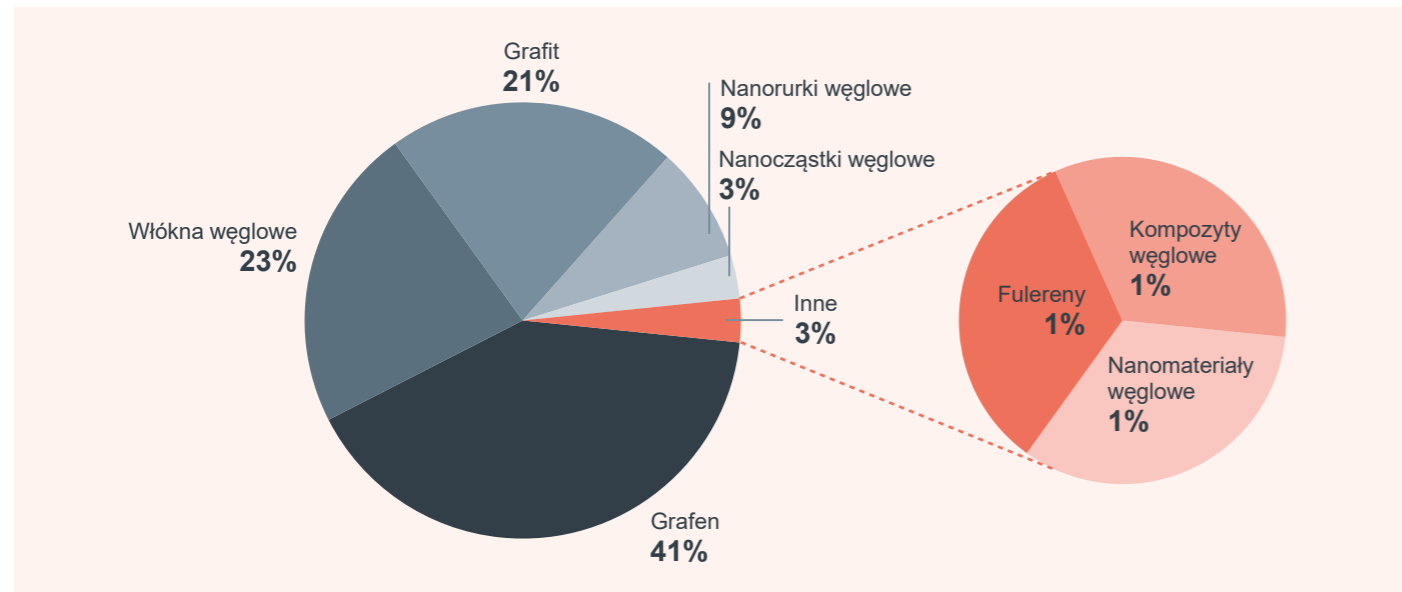


## Charakterystyka Polskiego rynku technologii węglowych.

W pierwszym kwartale 2023 roku funkcjonowało w Polsce ok. 90 spółek prowadzących projekty

z wykorzystaniem lub przy wsparciu technologii na bazie odmian węgla (w tym nanowęgla)<sup>I</sup>. Spośród tych przedsiębiorstw, tylko 20 specjalizuje się bezpośrednio w obszarze węgla pierwiastkowego i rozwija technologie w tym zakresie. Są to głównie małe i średnie przedsiębiorstwa oraz startupy.

Rys. 3.3 Projekty związane z nanomateriałami węglowymi realizowane w Polsce w 2022 roku.



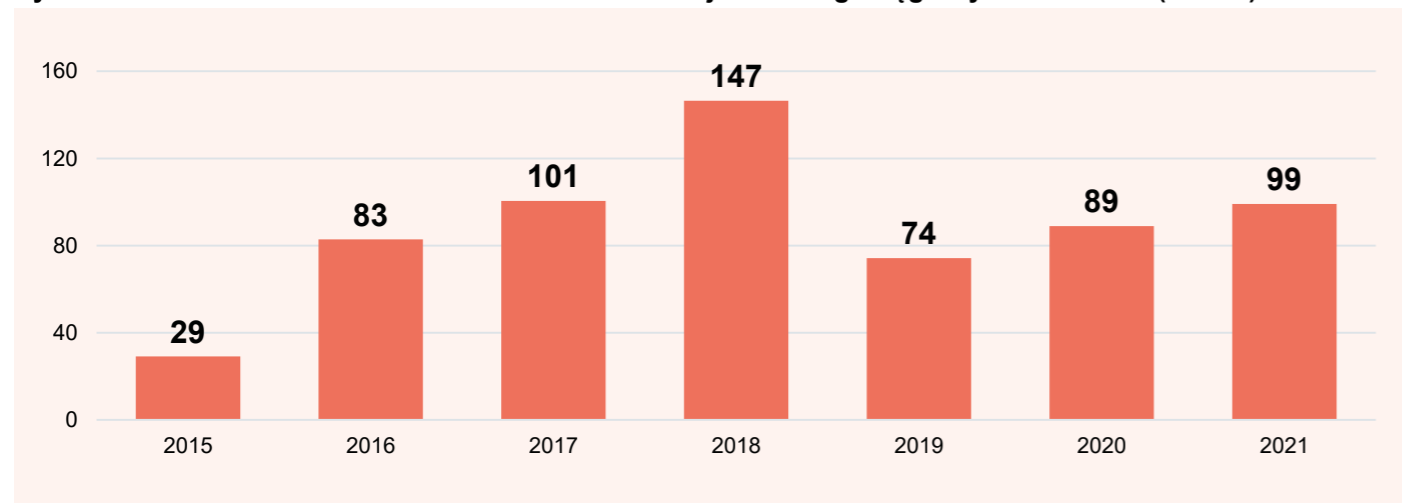
Źródło: Opracowanie własne Nanonet

Większość firm skupia się na syntezie i produkcji surowców węglowych takich jak płatki grafenu w postaci proszku lub zawiesiny, nanorurki węglowe, grafitu, diamentu lub węgla amorficznego. Wykazują dużą aktywność w prowadzeniu badań nad innowacjami w procesie produkcji nanomateriałów węglowych. Z kolei rynek włókien węglowych i kompozytów na bazie włókna węglowego, ze względu na względną dojrzałość, koncentruje się na sprzedaży produktu i w mniejszym stopniu na projektach

R&D. Produkowane w Polsce kompozyty znajdują zastosowanie m.in. w branży samochodowej, lotniczej, konstrukcyjnej i budowlanej.

Na podstawie danych Polskiej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości (PARP), Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) oraz danych statystycznych publikowanych w kanałach informacyjnych poszczególnych spółek, szacunkowa wartość nakładów R&D na rozwój technologii węglowych wyniosła w 2021 roku ok. 100 mln zł<sup>II</sup>.

Rys. 3.4 Szacunkowa wartość nakładów R&D na rozwój technologii węglowych 2015-2021 (mln. zł)



I. Na podstawie: Raport Idea 3W 2023, Nanonet: Węgiel

II. Na podstawie: Raport Idea 3W 2023, Nanonet: Węgiel - opracowanie danych z Ministerstwa Funduszy i Polityki Regionalnej, NCBR i PARP

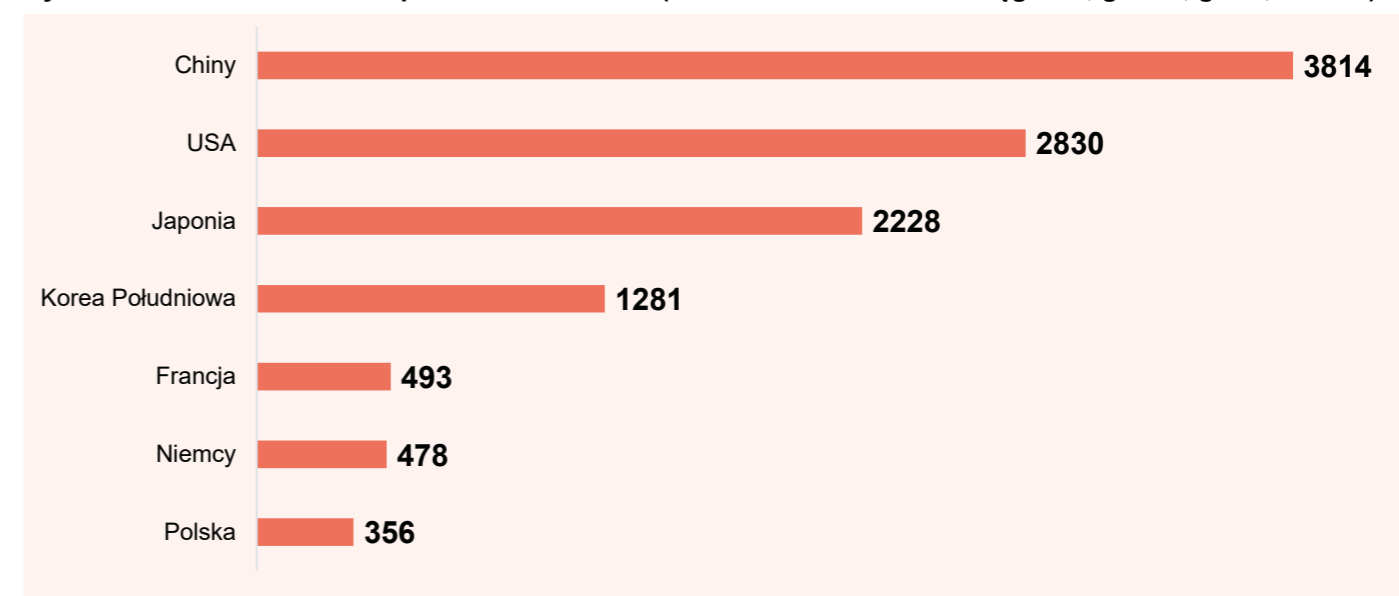
# BADANIA I PATENTY

Geopolityka odgrywa znaczącą rolę w kształtowaniu się konkurencji i współpracy między krajami w dziedzinie nanomateriałów węglowych. USA i Chiny, jako dwie największe gospodarki świata, konkurują o innowacyjność i przewagę technologiczną w tej dziedzinie. Współzawodnictwo to może prowadzić do zwiększenia inwestycji w badania i rozwój oraz

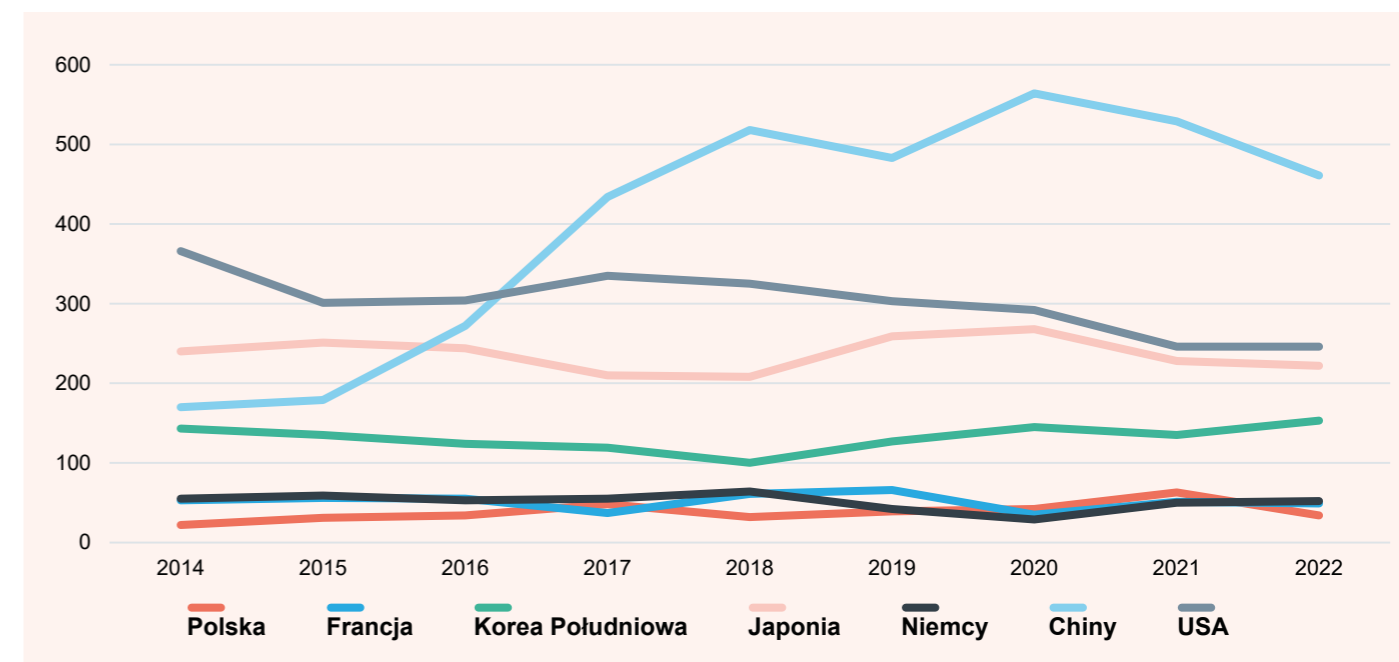
przełożyć się na większą liczbę patentów.

Stany Zjednoczone od wielu lat odgrywały wiodącą rolę w zakresie rejestrowanych patentów w dziedzinie nanotechnologii węglowych, jednak od 2017 roku pierwsze miejsce zajmują Chiny. W ciągu ostatnich dziesięciu lat liczba patentów w tej dziedzinie uległa wyraźnemu wzrostowi<sup>I</sup>.

Rys. 3.5 Skumulowana liczba patentów 2014-2023 (nanorurki i nanowłókna węglowe, grafen, grafit, fuleren)



Rys. 3.6 Liczba patentów rocznie w okresie 2014-2022



I. Ibidem

Do światowej czołówki należą również Japonia i Korea Południowa, a w Europie kluczową rolę odgrywają Francja i Niemcy. Pozycja Polski jest wysoka, jednak pod względem liczby patentów w tej dziedzinie znajduje się wyraźnie za tymi krajami, rejestrując przeciętnie 30-40 patentów rocznie. Należy zauważyć, że liczba patentów z Europy jest wyraźnie niższa niż z Azji, co koreluje z przywołanymi wcześniej statystykami ekonomicznymi.

Zgodnie z raportem przygotowanym przez StatNano! Polska jest 21 krajem na świecie pod względem liczby publikacji nanotechnologicznych w 2023 roku. W Europie oznacza to siódme miejsce - za Niemcami, Wielką Brytanią, Francją, Hiszpanią, Włochami i Rosją. Ilość publikacji jest silnie związana z poziomem rozwoju technologii w kraju.

Bazą referencyjną do monitorowania liczby polskich publikacji poruszających konkretny temat stanowi Polska Bibliografia Naukowa. Biorąc pod uwagę hasło „grafen”, w 2023 roku liderem pod względem liczby publikacji był do września Uniwersytet Warszawski

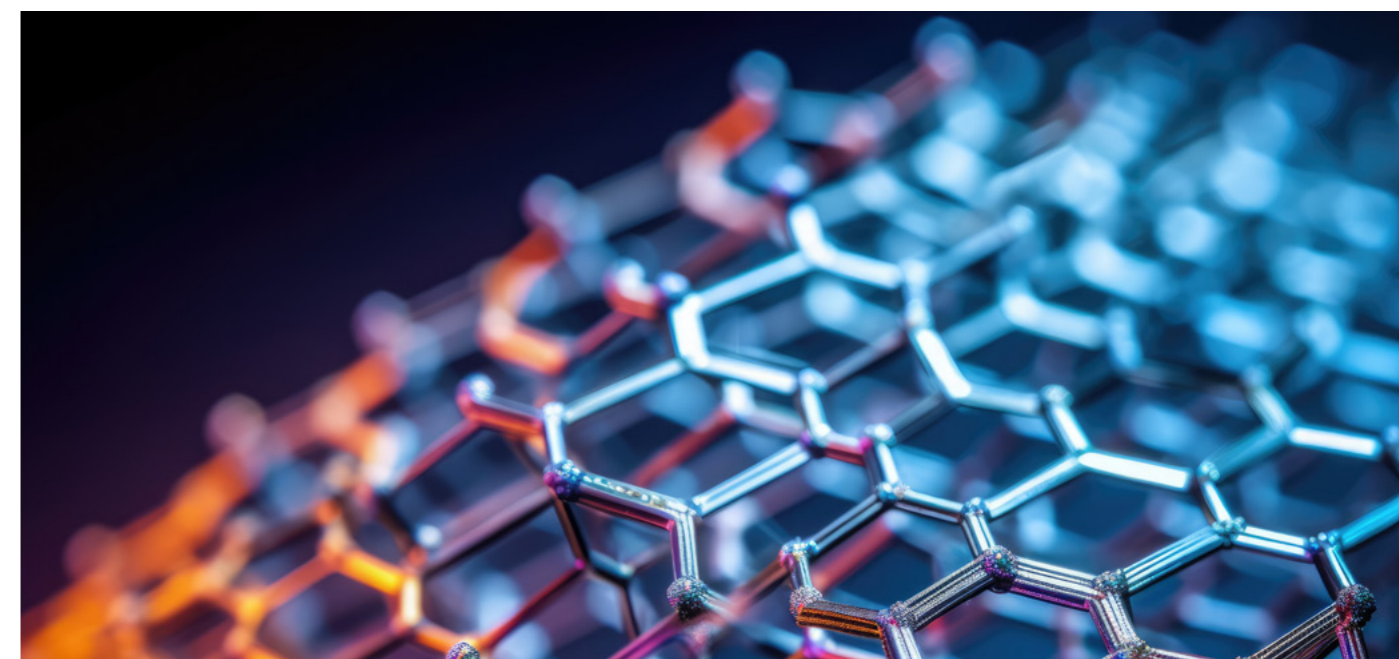
(Wydział Chemii) oraz Państwowa Akademia Nauk (jednak w przypadku PAN artykuły były publikowane przez różne instytuty - Katalizy i Fizykochemii, Chemii Fizycznej, Centrum Materiałów Polimerowych i Węglowych PAN, Wysokich Ciśnień).

Wiele polskich uczelni angażuje się w rozwój nanotechnologii węglowych (w szczególności grafenu). Uniwersytet Łódzki jest jedną z takich uczelni – w 2022 roku był głównym organizatorem konferencji „Grafen i inne materiały dwuwymiarowe”. Współorganizatorem konferencji był Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Poprzednie edycje organizowały: Uniwersytet Wrocławski i Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie. Ważniejszymi ośrodkami prowadzącymi badania nad grafenem jest Politechnika Warszawska wraz z utworzonym Laboratorium Grafenowym oraz Politechnika Łódzka.

Poza uczelniami aktywne badania prowadzą także instytuty naukowe Polskiej Akademii Nauk i Sieci Badawczej Łukasiewicz.



# APLIKACJE TECHNOLOGII WĘGLOWYCH



Nanotechnologia w ciągu ostatniej dekady doświadczyła niezwykłego postępu, przynosząc szeroki zakres zastosowań w różnych sektorach gospodarki. Coraz więcej rozumiemy i wiemy na temat właściwości alotropowych odmian węgla, co przekłada się na efektywniejsze wykorzystanie ich fizycznych i chemicznych cech, do których należą m.in. przewodnictwo, aktywność elektryczna, wytrzymałość, rozciągliwość i wiele innych. Jakże konkretnie zastosowania znajdują nanomateriały?

Przede wszystkim materiały węglowe są wykorzystywane w branży elektroniki i sensorów (produkcja wydajnych układów elektronicznych, sensory do detekcji gazów), lotnictwie i kosmosie (produkcja lekkich i wytrzymałych konstrukcji), przemyśle samochodowym (powłoki antykorozyjne, wzmacniane konstrukcje), energetyce przy produkcji i magazynowaniu energii (ogniwa fotowoltaiczne, baterie), medycynie (dostarczanie leków, terapie celowane, diagnostyka), ochronie środowiska (oczyszczanie wody i powietrza), technologiach

1. Próbkę DNA ze starożytnej cegły | Nauka w Polsce

przyrostowych i materiałach funkcjonalnych (elektronika drukowana, produkcja materiałów o określonych właściwościach).

## Ciekawe wdrożenia technologii węglowych

**Grafenowy beton** - już w starożytności zorientowano się, że dodawanie do cegieł różnych składników np. słomy, zwiększa ich wytrzymałość i parametry termiczne. Ówczesni budowniczcy wykorzystując słomę (de facto celulozę, która składa się z pierwiastków węgla, wodoru i tlenu), stosowali pierwsze swego rodzaju włókna węglowe. Wiedzę tę zdobyli empirycznie, eksperymentując z dostępnymi wtedy materiałami. Nie podejrzewali, że kilka tysięcy lat później ich technologia zostanie na nowo zastosowana w nowoczesnym i ekologicznym budownictwie!

Wspólne przedsięwzięcie specjalistów od grafenu z Uniwersytetu w Manchesterze i prowadzonej przez

absolwentów firmy budowlanej Nationwide Engineering opracowało produkt, który może zrewolucjonizować przemysł produkcji betonu i zmniejszyć jego negatywny wpływ na środowisko.

Jako pierwsze na świecie rozwiązanie w tej branży, zespół położył płytę podłogową nowej sali gimnastycznej w Amesbury w Wiltshire z betonu wzmocnionego grafenem, usuwając 30% materiału i całe zbrojenie stalowe, co dało około 20% oszczędności użytych surowców<sup>I</sup>.

**Światowa produkcja betonu generuje ok. 8% globalnej emisji CO<sub>2</sub>. Gdyby te emisje przyrównać do emisji generowanych przez poszczególne państwa, „beton stałby się trzecim co do wielkości emitentem na świecie”, zaraz za Chinami i Stanami Zjednoczonymi<sup>II</sup>.**

Dodanie niewielkich ilości grafenu wzmacnia beton o około 30%, co oznacza, że do osiągnięcia równoważnych właściwości konstrukcyjnych potrzeba znacznie mniej betonu. Według naukowców globalne wprowadzenie nowego betonu do użycia może spowodować redukcję światowej emisji CO<sub>2</sub> o ok. 2%.



**Boeing 787** wykorzystuje w konstrukcji materiały kompozytowe stopniu większym niż jakikolwiek poprzedni komercyjny samolot Boeinga. Inżynierowie Boeinga określili optymalne materiały do konkretnych zastosowań. W rezultacie powstał samolot składający się prawie w połowie z tworzywa sztucznego wzmocnionego włóknem węglowym i in. kompozytami. To zapewniło zmniejszenie masy o ok. 20% w porównaniu z konwencjonalnymi konstrukcjami aluminiowymi. Ponadto doświadczenia z wcześniejszym modelem (Boeing 777) wykazały, że

I. <https://www.manchester.ac.uk/discover/news/greener-and-cheaper-graphenemanchester-solves-concretes-big-problem/>

II. <https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/25/concrete-the-most-destructive-material-on-earth>

III. [https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr\\_4\\_06/article\\_04\\_2.html](https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html)

IV. <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2017-08-composites-airbus-continues-to-shape-the-future>

struktury kompozytowe wymagają mniej planowanych przeglądów niż struktury pozbawione kompozytów<sup>III</sup>.



**Airbus A350** – francuski producent samolotów po raz pierwszy zastosował materiały kompozytowe w stateczniku pionowym samolotu A300 ponad 50 lat temu. Obecnie A350 XWB składa się z kompozytów w ponad 50% swojej konstrukcji. Przykładem zastosowanego kompozytu jest tworzywo sztuczne wzmocnione włóknem węglowym (CFRP), w którym mikroskopijne włókna węglowe są połączone z żywicą. Większa część skrzydła (łącznie z górną i dolną osłoną) składa się z lekkich kompozytów węglowych. Mając wymiary: 32 metry długości i 6 metrów szerokości, są jednymi z największych pojedynczych części lotniczych, jakie kiedykolwiek wykonano z wykorzystaniem włókna węglowego<sup>IV</sup>.



Źródło: <https://www.wbgroup.pl/produkt/bezalogowy-system-powietrzny-klasy-taktycznej-flysar/>

**FlySAR** - to z kolei efekt polskiej myśli technologicznej, który przybrał postać bezzałogowego systemu powietrznego klasy taktycznej, o uproszczonej logistyce i obsłudze. Jest dedykowany do przenoszenia

ładunku i sensorów o zwiększonych gabarytach i masie<sup>I</sup>. Lekka konstrukcja z włókien węglowych pozwala na uzyskanie stosunkowo niskiej masy przy jednoczesnej wysokiej odporności na przeciążenia generowane podczas lotu.

Technologie bezzałogowe są rozwijane od wielu lat i spodziewany jest dalszy wzrost zastosowań nie tylko o charakterze militarnym, ale również cywilnym. Waga jest kluczowym parametrem wpływającym na czas i zasięg lotu. Wykorzystanie lekkich nanomateriałów węglowych lub kompozytów będzie oczywistym wyborem konstruktorów.

Nanomateriały węglowe wykorzystane są do przechowywania i transportu wodoru. Dzięki dużej powierzchni struktury, mogą służyć jako nośnik, co przyczynia się do zwiększenia pojemności i efektywności magazynowania. Ponadto, mogą być stosowane jako katalizatory w reakcjach związanych z wodorem, takich jak elektroliza wody czy reakcje redukcji.



Źródło: <https://3dprinting.com/wp-content/uploads/image3-67.png>

**Zbiorniki na wodór typu V** - Firma Infinite Composites (Stany Zjednoczone, Oklahoma) dostarcza zbiorniki o pojemności od 5 do 325 litrów, które są stosowane m.in. w statkach kosmicznych, lotnictwie i transporcie naziemnym. Firma posiada zbiorniki certyfikowane dla systemów kosmicznych i prowadzi dalsze prace nad zbiornikami typu V. Stosuje głównie wzmocnienia włóknami węglowymi np. japońskie włókna Toray T800 i T1100<sup>II</sup>.

W dziedzinie wody - nanomateriały węglowe mają zastosowanie w procesach oczyszczania i dezynfekcji. Dzięki swojej dużej powierzchni, mogą efektywnie absorbować i usuwać zanieczyszczenia, takie jak metale ciężkie, pestycydy czy związki organiczne. Ponadto, ich właściwości antybakteryjne mogą być

I. <https://www.wbgroup.pl/produkt/bezalogowy-system-powietrzny-klasy-taktycznej-flysar/>

II. <https://www.compositesworld.com/articles/infinite-composites-type-v-tanks-for-space-hydrogen-automotive-and-more>

III. Ochrona Środowiska (2017, Nr 2), Marzena Czubaszek, Jerzy Choma: Adsorpcja wybranych barwników z roztworów wodnych na nanoporowatych materiałach węglowych otrzymanych z prekursorów polimerowych

IV. <https://www.cas.org/resources/cas-insights/sustainability/supercapacitor-technologies-graphene-finally-living-its-full>

V. <https://p.lodz.pl/uczelnia/aktualnosci/grafen-z-pl-w-technologie-uzdatniania-wody>

wykorzystane do dezynfekcji wody, eliminacji bakterii i patogenów.

**Oczyszczanie wody z chemicznych zanieczyszczeń** - barwniki stanowią bardzo liczną i różnorodną grupę związków, które produkują się w ilościach sięgających milionów ton rocznie. Oczyszczanie wody zanieczyszczonej barwnikami może odbywać się przy zastosowaniu nowych nanoporowatych materiałów węglowych (NPC), otrzymanych z różnych prekursorów polimerowych. Wyniki badań, są bardzo obiecujące, gdyż materiały te charakteryzują się dużymi wartościami powierzchni właściwej osiagającymi często 1000 m<sup>2</sup>/g, a w niektórych przypadkach nawet 2000 m<sup>2</sup>/g<sup>III</sup>.

**Superkondensatory** - są często ogłaszane zamiennikiem akumulatorów litowo-jonowych. Oferujące szereg istotnych zalet, w tym zwiększone bezpieczeństwo, szybsze ładowanie/rozładowywanie i dłuższą żywotność. Klasyczne baterie charakteryzują się dużą gęstością energii, ale niską gęstością mocy (wolniejsze rozładowywanie), dzięki czemu nadają się do długotrwałych zastosowań. Superkondensatory mają niższą gęstość energii, ale wyższą gęstość mocy (szybsze rozładowywanie), dzięki czemu nie mogą magazynować tyle energii co baterie, mogą być ładowane i rozładowywane znacznie szybciej. Ta właściwość umożliwia stosowanie superkondensatorów tam gdzie potrzebne są szybkie impulsy energii i gdzie można je łatwo naładować np. jako uzupełniające urządzenia do magazynowania energii, szczególnie w sektorze transportu<sup>IV</sup>.

**Polski grafen w technologii uzdatniania wody** – naukowcy z Instytutu Inżynierii Materiałowej Politechniki Łódzkiej, opracowali innowacyjną technologię otrzymywania elektrod grafenowych do uzdatniania wody. Elektrody kompozytowe wykonane z włókien węglowych pokrytych usieciowanym, zredukowanym tlenkiem grafenu wykazują dużą odporność na degradację związaną z wydzielaniem się gazów na katodzie i anodzie, a także dużą stabilność chemiczną i elektrochemiczną w szerokim zakresie pH oraz odporność na utlenianie. Cechują się niską rezystancją, szybką sorpcją oraz desorpcją jonów, jak również niską podatnością na zanieczyszczenia organiczne. Co więcej, wykorzystanie preimpregnatów z włókna węglowego jako podłoża nośnego zapewnia większą trwałość oraz daje możliwość formowania i zachowania uformowanych kształtów elektrod przez polimeryzację żywicy epoksydowej bez konieczności stosowania dodatkowych form<sup>V</sup>.

# CZY STRATEGIA DLA WĘGLA PIERWIASTKOWEGO JEST POTRZEBNA?

Postęp technologiczny uzależniony jest w dużej mierze od pierwiastków ziem rzadkich (REE, ang. Rare Earth Elements), które zyskują miano surowców strategicznych. Rynek tych materiałów stanowi niewielki odsetek w ujęciu wydobycia, jednak odgrywa kluczową rolę związaną z ich zastosowaniem m.in. w elektronice, procesach transformacji energetycznej oraz na potrzeby obronności.

Nierównomierny rozkład tych pierwiastków na Ziemi może w okresie napięć politycznych powodować trudności z ich dostępnością. Konieczne staje się poszukiwanie alternatywnych rozwiązań, które uniezależnią postęp technologiczny od geopolityki. Węgiel pierwiastkowy i materiały na nim bazujące mogą być tworzone lokalnie i niejednokrotnie przewyższają swoimi właściwościami pierwiastki ziem rzadkich.

Polska jest ważnym europejskim rynkiem i największym rynkiem w regionie Europy Środkowo-Wschodniej, dzięki czemu ma potencjał do odgrywania znaczącej roli w rozwoju technologii węglowych. Konieczne jest jednak opracowanie strategii uwzględniającej potencjał naukowy i badawczy polskich ośrodków naukowych a także usprawniającej procesy komercjalizacji dokonywanych odkryć.

Opracowanie strategii dla węgla pomoże wskazać najbardziej obiecujące kierunki rozwoju, posiadające potencjał budowy przewagi konkurencyjnej Polski w regionie i globalnie. Strategia taka powinna określić konkretne cele i wskaźniki, które pozwolą skutecznie rozwijać materiały węglowe.

Pod uwagę powinny być wzięte również najaktualniejsze trendy związane z transformacją energetyczną, bezpieczeństwem energetycznym oraz zrównoważonym rozwojem i celami UE w tym zakresie.

Ważnym aspektem strategii powinno być wsparcie dla działalności badawczo-rozwojowej i innowacyjnej. Konieczne jest zdefiniowanie programów wsparcia finansowego oraz pozafinansowych form wsparcia dla projektów rozwijających technologie węglowe. Istotne jest skoncentrowanie się na projektach o wysokiej gotowości wdrożeniowej oraz potencjale do rynkowej komercjalizacji. To obejmuje także promowanie tworzenia i rozwoju startupów oraz spin-offów, które mogą przyspieszyć proces innowacji w sektorze.

Jednym z celów strategii musi stać się zwiększenie konkurencyjności polskich rozwiązań technologicznych na arenie międzynarodowej. To może obejmować promocję polskich osiągnięć, współpracę międzynarodową np. poprzez udział w międzynarodowych projektach badawczych. Strategia dla węgla powinna wpisywać się i akcentować znaczenie zrównoważonego rozwoju, co oznacza uwzględnienie równowagi między rozwojem gospodarczym a ochroną środowiska.

Wdrażanie takiej strategii może przyczynić się do transformacji sektora węglowego w Polsce i przynieść korzyści zarówno dla gospodarki, jak i dla środowiska naturalnego.

# SPOJRZENIE W PRZYSZŁOŚĆ

Kolejne odkrycia powodują, że świat nauki i biznesu angażują swoje zasoby by dokładnie zbadać nową wiedzę i ocenić jej możliwe wykorzystanie, np. pod kątem dalszych badań oraz pod kątem potencjalnych zastosowań komercyjnych. Proces ten jest żmudny, jednak w pewnym momencie następuje przełom i efekt odkrycia konwertuje się na nowe produkty, technologie, innowacje. Jako przykład mogą posłużyć technologie komputerowe, które jeszcze 50 lat temu były domeną centrów badawczych, zostały skomercjalizowane i są wszechobecne.

**Nanotechnologia jest nauką wschodzącą, w przypadku której oczekuje się szybkiego i silnego rozwoju w przyszłości. Przewiduje się, że w nadchodzących dziesięcioleciach w znaczący sposób przyczyni się ona do wzrostu gospodarczego i tworzenia nowych miejsc pracy w UE<sup>1</sup>.**

Bez wątplenia nanotechnologie węglowe, ze względu na różnorodność właściwości różnych postaci alotropowych węgla, będą kluczowym elementem postępu w nanotechnologiach. Dostępne procedury medyczne uzyskują dużo wyższą skuteczność, powstaną nowe terapie skutecznie leczące choroby obecnie nieuleczalne. Pojawiają się nowe instrumenty medyczne pokryte grafenem, wykazujące właściwości antybakteryjne, grafen będzie również wykorzystywany w produkcji implantów chirurgicznych<sup>2</sup>.

Możemy się spodziewać intensywniejszego stosowania nanotechnologii węglowych w budownictwie. Nie tylko w celu zmniejszenia masy konstrukcji, ale również w celu podniesienia wytrzymałości, sprężystości i trwałości. Już teraz projektowane są długie mosty, które będą zawieszane na linach wykonanych z nanorurek węglowych (CNT). Z kolei japońska firma Obayashi Corporation planuje zbudować





do 2050 roku windę kosmiczną sięgającą 36 tys. km nad powierzchnię Ziemi<sup>I</sup>, która będzie funkcjonować wykorzystując kabel wykonany z nanorurek węglowych.

Elektronika będzie głównym beneficjentem rozwoju technologii nanowęglowych. Grafen zastąpi silikon i w efekcie dokona się dalsza miniaturyzacja, przyspieszenie procesorów, a także zmniejszenie zapotrzebowania na energię w urządzeniach elektronicznych itp.<sup>II</sup>

Dzięki dużej powierzchni, przewodności elektrycznej i wytrzymałości mechanicznej grafenu powstaną efektywniejsze urządzenia do magazynowania energii. Możliwa stanie się produkcja superkondensatorów i akumulatorów o dużej gęstości, które zapewniają szybkie ładowanie, dłuższą żywotność i spowodują transformację branży magazynowania energii.

Wrażliwość grafenu na bodźce zewnętrzne sprawia, że może być z powodzeniem stosowany w rozwiązaniach sensorycznych, takich jak monitorowanie środowiska czy diagnostyka biomedyczna, oferując możliwość wykrywania subtelnych zmian środowiskowych z wyjątkową precyzją i czułością.

Zastosowania środowiskowe będą bez wątpienia kolejnym ważnym wyzwaniem, któremu nanomateriały węglowe z pewnością sprostają. Grafen jest już z powodzeniem stosowany w czujnikach

zanieczyszczeń wody oraz w procesach uzdatniających wodę (np. filtry). W przyszłości pojawią się efektywniejsze i powszechnie dostępne rozwiązania, umożliwiające badanie i uzdatnianie wody na żądanie w dowolnym miejscu<sup>III</sup>.

Przemysł kosmiczny wykorzysta grafen do budowy satelitów, elementów pojazdów kosmicznych (w tym napędów), ochrony przed promieniowaniem oraz w systemach podtrzymywania życia w kosmosie i wielu innych<sup>IV</sup>.

W najbliższych dekadach czeka nas z pewnością rewolucja na poziomie nanomateriałów, gdzie bardzo ważne miejsce zajmują alotropowe odmiany węgla. Nie sposób wyobrazić sobie, jak dalece zmieni to nasze życie. Z pewnością będzie mieć pozytywny wpływ na otoczenie i pozwoli m.in. przyspieszyć globalną transformację energetyczną i podnieść jakość życia ludzi zmagających się z poważnymi zdrowotnymi wyzwaniami.

Wcześniej naukowcy muszą rozwiązać problemy związane z efektywnością i kosztową stroną produkcji grafenu i innych alotropowych odmian węgla. Producenci z kolei stoją przed poważnymi wyzwaniami związanymi przede wszystkim z zapewnieniem wysokiej jakości materiału na dużą skalę, niskim kosztem i gwarantowaną powtarzalnością dostaw.

# WNIOSKI I REKOMENDACJE

Obserwowane statystyki i trendy potwierdzają, że Świat rozpoznał potencjał drzemący w technologiach węglowych. Odważne prognozy wzrostu i ambitne przedsięwzięcia badawcze i biznesowe są tego niezbitym dowodem. Wzrost aktywności badawczej w kluczowych gospodarczo państwach gwarantuje dobre perspektywy dla zastosowań alotropowych odmian węgla.

O węgla mówi się coraz częściej i coraz głośniej pomimo faktu, że rozwój tych technologii trwa zaledwie od kilku dekad. To oczywiste, że młody rynek napotyka na szereg ograniczeń takich jak m.in. wysokie koszty jednostkowe produkcji związane z jej niską skalą oraz wciąż niedoskonałe technologie wytwarzania poszczególnych odmian węgla. Jednak już teraz widać, że dynamika wzrostu rynku będzie spektakularna i zaczyna się właśnie dokonywać.

Współpraca ekosystemie innowacji – współpraca między interesariuszami na poziomie międzynarodowym pozwala na wymianę wiedzy i najlepszych praktyk. Dzięki temu możliwy jest szybszy postęp technologiczny oraz zwiększenie potencjału aplikacyjnego w przemyśle.

Węgiel dzięki swojej wszechstronności staje się nie tylko ważnym, ale również przyszłościowym materiałem. Polska wyróżnia się w regionie w prowadzeniu badań nad rozwojem materiałów węglowych i ich zastosowań oraz ma możliwość budowy silnej przewagi konkurencyjnej nie tylko w Europie, ale również na świecie.

Węgiel pierwiastkowy ma niewątpliwie ogromny potencjał badawczy i ekonomiczny, których właściwe wykorzystanie będzie miało ogromne znaczenie dla jakości i długości życia w przyszłości oraz m.in. dla przyspieszenia procesów transformacji energetycznej, motoryzacyjnej czy np. przyspieszenia eksploracji kosmosu.

Konieczne jest odpowiednie zdefiniowanie kluczowych wyzwań i stworzenie ram systemowych umożliwiających ich podjęcie. Nanotechnologie węglowe powinny stać się ważnym elementem krajowej agendy badawczej, co powinno zostać potwierdzone odpowiednimi programami wsparcia a przede wszystkim stworzeniem strategii dla węgla pierwiastkowego.

Równie ważna jest edukacja i świadomość społeczna. Podmioty publiczne powinny podjąć to wyzwanie i promować wykorzystanie technologii węglowych w codziennym życiu, upowszechniać wynalazki opracowywane w polskich jednostkach naukowych i przedsiębiorstwach poprzez realizację kampanii edukacyjnych i informacyjnych.

Przedsiębiorstwa prowadzące działalność badawczo-rozwojową w zakresie technologii i materiałów węglowych powinny w większym stopniu wykorzystywać istniejące lub tworzyć nowe sieci współpracy do wymiany wiedzy i doświadczenia, wspólnego poszukiwania rozwiązań dla napotkanych wyzwań, a także integracji środowiska.

Pomimo licznych zachęt do podejmowania współpracy przedsiębiorstw z jednostkami naukowymi w postaci dedykowanych programów wsparcia finansowanych ze środków publicznych czy też dodatkowych punktów podczas oceny projektów dla przedsiębiorstw współpracujących z jednostkami naukowymi, poziom i zakres tej współpracy wciąż są na niewystarczającym poziomie. Należy rozwijać dodatkowe mechanizmy współpracy i transferu wiedzy. Przykładem narzędzia zachęcającego do podejmowania współpracy jest inicjatywa Sieci Badawczej Łukasiewicza - „Wyzwania Łukasiewicza”, w której oferowane jest bezpłatne wsparcie w postaci pomysłów i rekomendacji ekspertów dla problemów technologicznych zgłaszanych przez przedsiębiorstwa.

Prowadzone badania naukowe powinny w większym stopniu uwzględniać aplikacyjną stronę projektów. Już na początkowych etapach badań potencjalne praktyczne zastosowania w gospodarce powinny być zdefiniowane klarownie i stanowić jeden z głównych celów projektów badawczych.

I. [https://www.obayashi.co.jp/en/news/detail/the\\_space\\_elevator\\_construction\\_concept.html](https://www.obayashi.co.jp/en/news/detail/the_space_elevator_construction_concept.html)

II. <https://www.fierceelectronics.com/electronics/beyond-silicon-exploring-new-materials-future-electronics>

III. <https://graphene-flagship.eu/materials/sustainability/>

IV. <https://www.siliconrepublic.com/machines/uses-of-graphene-space-wearables>



3W 