

„Wdrożenie technologii CCS jest rozwiązaniem pozwalającym na utrzymanie produkcji strategicznych materiałów przemysłowych bez szkody dla klimatu.

Na świecie istnieje już ponadto kilkadziesiąt instalacji składowania dwutlenku węgla i w przypadku żadnej z nich nie donoszono o negatywnych dla ludzkiego życia i zdrowia konsekwencjach składowania”

# CCS KONIECZNY I BEZPIECZNY

Czym są technologie wychwytu i podziemnego składowania dwutlenku węgla oraz jak mogą pomóc powstrzymać zmianę klimatu

Kamil Laskowski



CCS – konieczny i bezpieczny

Autor:  
Kamil Laskowski

Korektor tekstu:  
Magdalena Białek



Fundacja Warszawski Instytut Studiów Ekonomicznych i Europejskich  
ul. Królewska 2/26  
00-065 Warszawa  
[www.wise-europa.eu](http://www.wise-europa.eu)



Sfinansowano ze środków Narodowego Instytutu Wolności –  
Centrum Rozwoju Społeczeństwa Obywatelskiego  
Rządowego Programu Rozwoju Organizacji Obywatelskich  
na lata 2018–2030 PROO



Projekt okładki, skład, łamanie: Crowd Design Sp. z o.o.

Kopiowanie i rozpowszechnianie może być dokonane za podaniem źródła.

© Copyright by WiseEuropa – Fundacja Warszawski Instytut Studiów Ekonomicznych i Europejskich, Warszawa, 2023

ISBN: 978-83-67829-15-1

# CCS konieczny i bezpieczny

Czym są technologie wychwytu i podziemnego składowania dwutlenku węgla oraz jak mogą pomóc powstrzymać zmianę klimatu

Kamil Laskowski

Przy powstawaniu broszury korzystano m.in. z materiałów naukowych upublicznionych przez Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy (PIG-PIB) oraz publikacji autorstwa Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu przy Organizacji Narodów Zjednoczonych i organizacji Global CCS Institute (szczegóły w bibliografii).

Za współpracę i uwagi dziękujemy Michałowi Wendołowskiemu z fundacji Bellona Europa oraz dr Monice Konieczńskiej i dr. inż. Adamowi Wójcickiemu z PIG-PIB. PIG-PIB bierze udział w projekcie unijnym CCUS ZEN, który obejmuje m.in. zagadnienia społecznej akceptacji i percepcji technologii CCS.



## CCS – konieczny i bezpieczny

Atmosfera Ziemi się ogrzewa. Jej ocieplenie, zwane globalnym ociepleniem, pociąga za sobą zmianę warunków, w których żyjemy. Zmiana ta nie oznacza tylko wzrostu temperatury powietrza. Konsekwencją globalnego ocieplenia będzie, a częściowo już jest, zmiana klimatu jako całości. Możemy się więc spodziewać, że ekstremalne zjawiska pogodowe, takie jak fale upałów, powódzie, susze czy nawałnice, będą występować coraz częściej i z większą intensywnością.

### Dlaczego nasz klimat zmienia się właśnie w tym kierunku?

Gazy cieplarniane emitowane do atmosfery działają niczym szklarnia – zatrzymują ciepło wypromieniowywane przez powierzchnię Ziemi i stabilizują temperaturę naszej planety, zapobiegając jej wychłodzeniu. Jednak gdy ich udział w atmosferze jest za wysoki, zatrzymują więcej ciepła i sprawiają, że średnia temperatura atmosfery zaczyna się zwiększać. I tak się właśnie dzieje – gospodarcza działalność człowieka zaburza naturalny obieg gazów cieplarnianych w przyrodzie, powodując ich nadwyżkę, która nie może być pochłonięta w naturalny sposób. W największych ilościach emitowany jest dwutlenek węgla (CO<sub>2</sub>). Pochodzi on najczęściej ze spalania węgla, gazu i ropy, spoczywających wcześniej głęboko pod ziemią i tym samym oddzielonych od atmosfery.

W celu ograniczenia globalnego ocieplenia konieczne jest globalne ograniczenie – a ostatecznie wyeliminowanie – dodatkowej emisji dwutlenku węgla do atmosfery. I to jak najszybciej, aby nie dopuścić do takiego wzrostu globalnej temperatury, który pociągnąłby za sobą skutki, z którymi nie potrafilibyśmy sobie poradzić. Wymaga to jednak głębokiej przemiany zasad funkcjonowania gospodarki oraz zachowań społeczeństwa, a w szczególności sposobu pozyskiwania oraz używania energii. Dlatego coraz intensywniej pozyskujemy ją z odnawialnych źródeł energii (OZE), np. wiatru.

Jednym ze sposobów ograniczenia lub wyeliminowania emisji dwutlenku węgla może się wydawać wyłapywanie dwutlenku węgla przed jego emisją i składowanie go w miejscu, z którego nie miałyby szans na ucieczkę do atmosfery. Choć oddziałuje na wyobraźnię, proces ten jest technologicznie skomplikowany i nieznan tak szeroko jak OZE.

Takie technologie jednak istnieją i są już stosowane, fragmentarycznie również w Polsce, a znane są pod skrótem CCS (z angielskiego Carbon Capture and Storage, czyli „**wychwyt i składowanie dwutlenku węgla**”). Węgiel, jako składnik dwutlenku węgla, wraca więc z ich pomocą tam, skąd tak naprawdę przyszedł – z powrotem pod ziemię.

Technologie CCS będą prawdopodobnie stosowane w Polsce na coraz większą skalę. W związku z tym wymagają przybliżenia społeczeństwu. Zainteresowanie stosowaniem technologii CCS wyrażają działający w kraju producenci cementu. Cementownia w Górażdżach już prowadzi pilotażową instalację wychwytu dwutlenku węgla, a cementownia firmy Lafarge w Piechcinie na Kujawach otrzymała dofinansowanie ze środków unijnych na budowę pełnej, komercyjnej instalacji wychwytu dwutlenku węgla. Lafarge będzie też w szerszym konsorcjum (m.in. z Orlenem) realizować infrastrukturę pozwalającą na transport wychwyconego dwutlenku węgla do podmorskich składowisk w Norwegii. Orlen także zamierza wychwytywać dwutlenek węgla ze swoich zakładów.

Wdrażanie technologii CCS jest nieodłącznym elementem scenariuszy ograniczania emisji dwutlenku węgla opracowywanych przez Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu, ciało doradcze Organizacji Narodów Zjednoczonych cieszące się międzynarodowym autorytetem. O technologiach CCS wspominają też polskie rządowe dokumenty strategiczne w obszarze energii i klimatu. Na przełomie sierpnia i września 2023 roku wprowadzono ponadto w naszym kraju pakiet zmian prawnych, które mają ułatwić realizację inwestycji opartych na technologii CCS. Także Unia Europejska przygotowuje strategię rozwoju technologii CCS.



**Najwyższy czas więc wyjaśnić, co w szczegółach oznacza i z czym wiąże się CCS. W niniejszej broszurze znajdziesz odpowiedzi na najważniejsze pytania dotyczące CCS:**

- Czym dokładnie jest CCS i dlaczego mówimy o „technologii CCS” w liczbie mnogiej?
- Dlaczego technologie CCS są w Polsce niezbędne?
- Jakie byłyby korzyści z wdrożenia technologii CCS?
- Gdzie można składować dwutlenek węgla i gdzie może on być składowany w Polsce?
- Co się dzieje z dwutlenkiem węgla pod ziemią?
- Czy transport dwutlenku węgla jest bezpieczny?
- Czy podziemne składowiska dwutlenku węgla są bezpieczne i szczelne?
- Czy na świecie funkcjonują już instalacje CCS i czy działają one bezpiecznie?
- Czy ewentualny wyciek dwutlenku węgla w trakcie transportu lub ze składowiska jest niebezpieczny dla człowieka?
- Czy i jak przeciwdziała się ewentualnemu wyciekowi dwutlenku węgla?
- Jaki jest wpływ technologii CCS na środowisko i krajobraz?
- Czy realizacja inwestycji związanych z technologiami CCS pociąga za sobą wyłączenia?

**CCS jest zespołem technologii pozwalających na wychwyt, transport i permanentne podziemne składowanie dwutlenku węgla.**

### CCS – czy to musi tak enigmatycznie brzmieć?

Skrótowiec CCS nie jest szeroko znany. Może więc nie być automatycznie kojarzony z technologiami pozwalającymi na ograniczenie emisji dwutlenku węgla. Dlatego w celu ułatwienia dyskusji o technologiach CCS zagadnienia dotyczące kwestii wychwytu, transportu i składowania, a także ewentualnego wykorzystania dwutlenku węgla są coraz częściej określane jako *carbon management*, czyli „zarządzanie dwutlenkiem węgla”. Termin ten stosuje już m.in. Unia Europejska.

Mówimy o CCS jako o zespole technologii nie tylko dlatego, że inna technologia jest stosowana do wychwytu, inna do transportu, a jeszcze inna do składowania dwutlenku węgla. Również w każdym z tych obszarów z osobna istnieje kilka rozwiązań technologicznych.

*Czym dokładnie jest CCS i dlaczego mówimy o „technologiach CCS” w liczbie mnogiej?*

Dlaczego jednak technologie CCS, skoro pomagają skutecznie wyeliminować emisję dwutlenku węgla do atmosfery, nie są jeszcze stosowane na szeroką skalę? A może gdybyśmy wyposażyli nasze elektrownie węglowe w instalacje CCS, to nie musielibyśmy ich wygaszać i budować w ich miejsce elektrowni wiatrowych i fotowoltaicznych?

Barierą są przede wszystkim koszty. Wdrożenie pełnego łańcucha wychwytu, transportu i składowania dwutlenku węgla wymaga dużych nakładów inwestycyjnych. W rezultacie koszt zastosowania technologii CCS w polskiej elektrowni na węgiel kamienny może być nawet kilka razy większy niż koszt elektrowni wiatrowej o porównywalnej mocy.

Ponadto nie możemy zatłaczać wychwyconego dwutlenku węgla pod ziemię w nieskończoność. Dwutlenek węgla może być magazynowany w odpowiednich strukturach geologicznych, których liczba i pojemność są skończone.



## Pomimo ich kosztowności i innych ograniczeń technologie CCS są w Polsce nieodzowne.

Energię można pozyskać z odnawialnych źródeł zamiast z paliw kopalnych i w ten sposób w znacznym stopniu zmniejszyć emisję dwutlenku węgla. Jednak nie cała emisja tego gazu pochodzi przecież z produkcji energii. Dwutlenek węgla uwalniany jest również w niektórych procesach przemysłowych, np. w trakcie produkcji cementu.

Wapień i glina, z których powstaje cement, muszą być najpierw wypalone w bardzo wysokiej temperaturze. W trakcie wypalania surowce te rozpadają się na klinkier, z którego powstanie cement, i na dwutlenek węgla. Dwutlenek węgla powstający w tym procesie nie pochodzi więc ze spalania żadnego paliwa, ale z reakcji chemicznej zachodzącej podczas przekształcania surowca (takie emisje gazów cieplarnianych określa się **emisjami procesowymi**). Tym samym dwutlenek węgla będzie nieodłącznym elementem procesu produkcji cementu dopóty, dopóki nie zostanie odkryty sposób bezemisyjnej produkcji cementu z innych surowców. Chociaż prace nad takimi technologiami trwają, nawet z pewnymi sukcesami, to perspektywa ich ewentualnego masowego wdrożenia jest odległa.

*Dlaczego  
technologie CCS  
są w Polsce  
niezbędne?*

Dwutlenku węgla uwalnianego w procesie wypalania wapienia i gliny nie wyeliminujemy odnawialnymi źródłami energii. Jedynym dostępnym obecnie rozwiązaniem pozwalającym na uniknięcie emisji dwutlenku węgla z produkcji cementu są właściwie tylko technologie CCS.

Na jak dużą redukcję emisji dwutlenku węgla pozwoliłoby zastosowanie technologii CCS w polskiej branży cementowej?

Emisja dwutlenku węgla wyłącznie z surowców wypalanych w procesie produkcji cementu odpowiada za ok. 2% całkowitych rocznych emisji dwutlenku węgla w Polsce. Nie oznacza to jednak, że CCS ma marginalne znaczenie. Emisje dwutlenku węgla, które pochodzą z przekształcania surowców, obserwujemy też w innych branżach przemysłu – w produkcji wapna, stali czy nawozów. Branże te, podobnie zresztą jak cementowa, wymagają ponadto dużych temperatur – cement czy stal wytwarzane są w temperaturach przekraczających 1000°C. Takie temperatury są aktualnie osiągane w tych zakładach przemysłowych przede wszystkim poprzez spalanie paliw kopalnych, co wiąże się z wysoką emisją dwutlenku węgla. Dlatego technologie CCS w zakładach przemysłowych mogłyby przy okazji służyć również do eliminacji emisji pochodzących z produkcji ciepła.

Co prawda zarówno dla procesowych emisji dwutlenku węgla z branż poza cementową czy wapienniczą, jak również dla produkcji ciepła o wysokich temperaturach istnieją inne poza technologiami CCS technologiczne możliwości ich ograniczenia. Oparte są one na zastosowaniu wodoru, neutralnej dla klimatu biomasy czy szerszym wykorzystaniu „zielonej” energii elektrycznej. CCS pozostaje jednak konkurencyjny wobec tych technologii.

Technologie CCS mogą stanowić konkurencyjną i skuteczną metodę wyeliminowania co najmniej 10% aktualnych polskich rocznych emisji dwutlenku węgla. Mowa przede wszystkim o emisjach dwutlenku węgla z sektora przemysłu, które byłyby niemożliwe, trudniejsze lub droższe do wyeliminowania bez zastosowania technologii CCS.



Być może w celu ograniczenia emisji dwutlenku węgla z przemysłu najprościej byłoby ograniczyć szkodliwą dla klimatu produkcję przemysłową. Ale tak samo jak nie możemy sobie wyobrazić życia bez energii elektrycznej, tak gospodarka nie może funkcjonować bez cementu, stali i nawozów, dzięki którym budujemy drogi i mieszkania, produkujemy samochody i żywność. Rozwiązaniem pozwalającym na utrzymanie produkcji tych strategicznych materiałów bez szkody dla klimatu jest wdrożenie technologii CCS.

*Jakie byłyby korzyści  
z wdrożenia  
technologii CCS?*

I nie możemy z tym długo zwlekać. Nie tylko z powodu troski o klimat, ale także dlatego, że polski przemysł będzie odczuwał coraz większą ekonomiczną presję na zmniejszenie swojego negatywnego wpływu na środowisko. Regulacje europejskie, m.in. zmiany w unijnym systemie handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych (EU ETS), sprawiają, że emisja dwutlenku węgla przez zakłady przemysłowe będzie coraz bardziej kosztowna. Przedsiębiorstwom działającym w sektorach charakteryzujących się wysokimi emisjami dwutlenku węgla będzie też coraz trudniej o pozyskanie finansowania z banku czy

o przyciągnięcie prywatnych inwestorów. Ponadto produkty przemysłowe wiążące się z niższą emisją dwutlenku węgla będą preferowane przez ich odbiorców na rynku – firmy budowlane czy motoryzacyjne będą chętniej kupować „zielony” cement i „zieloną” stal, by w ten sposób ograniczyć swój szeroko rozumiany negatywny wpływ na środowisko i zwiększyć swoją rynkową atrakcyjność (w szczególności w związku z rosnącym znaczeniem walki ze zmianą klimatu dla konsumentów). Z uwagi na rosnące koszty emisji dwutlenku węgla „zielone” materiały będą też ostatecznie tańsze w porównaniu do materiałów wytwarzanych w procesach, w których emisje dwutlenku węgla nie zostaną ograniczone. Opłatami za emisje dwutlenku węgla będą też niebawem objęte materiały importowane spoza Unii Europejskiej, gdzie koszty ich wytworzenia bywają niższe, ale za to emisyjność ich produkcji jest większa. Technologie CCS pozwoliłyby więc na nawiązanie przez polskich wytwórców konkurencji na rynku europejskim z globalnymi graczami.

Jeżeli polskie zakłady przemysłowe zaniedbają kwestie związane z obniżeniem emisji dwutlenku węgla, to mogą zostać wyparte z rynku przez zagraniczne przedsiębiorstwa, które poważniej potraktują wyzwania związane ze zmianą klimatu. Skutkiem mogłaby być utrata co najmniej kilkudziesięciu tysięcy miejsc pracy w polskim przemyśle i inne negatywne dla regionów przemysłowych konsekwencje społeczno-ekonomiczne.

Inwestycje obejmujące cały łańcuch technologii CCS (wychwyt dwutlenku węgla, jego transport i składowanie) charakteryzują się jednak długim czasem realizacji, szacowanym nawet na 9 lat. Dlatego o technologiach CCS należy zacząć myśleć już teraz i usunąć przeszkody, które hamują ich rozwój.

### CCS – czy naprawdę tylko dla przemysłu?

Bezpieczeństwo energetyczne Polski może wymagać zastosowania technologii CCS w niewielkiej skali także w sektorze energetyki. Wiemy już, że emisje dwutlenku węgla z produkcji energii elektrycznej taniej i prościej jest ograniczyć poprzez budowę elektrowni wiatrowych i słonecznych oraz równoległe





wygaszanie elektrowni wykorzystujących paliwa kopalne. Elektrownie wiatrowe i słoneczne są jednak zależne od warunków pogodowych. Skąd brać prąd, gdy wiatr nie wieje, a słońce nie świeci? Wówczas niedobór prądu mógłby być uzupełniany przez elektrownie wykorzystujące gaz ziemny, które w przeciwieństwie do elektrowni węglowych można szybko uruchomić w razie wystąpienia deficytu energii elektrycznej. Spalanie gazu generuje ponadto o połowę mniejsze emisje dwutlenku węgla na jednostkę produkcji energii niż spalanie samego węgla, dlatego wyposażenie takich „rezerwowych” elektrowni gazowych w instalacje CCS byłoby tańsze i efektywniejsze niż w przypadku elektrowni węglowych.

Zastosowanie technologii CCS w elektrowniach węglowych (w bardzo ograniczonym zakresie) też nie jest jednak całkowicie wykluczone. Aby nie marnować nakładów finansowych na kilka nowo wybudowanych lub zmodernizowanych bloków w elektrowniach węglowych i ich nie wygaszać, dyskutuje się o wyposażeniu ich w instalacje CCS.

Nie należy jednak liczyć na to, że technologie CCS pomogą zachować polskie górnictwo węglowe w obecnym kształcie. Stosowanie technologii CCS w celu tak zwanego czystego (czyli bezemisyjnego) spalania węgla nie jest tak opłacalne jak odnawialne źródła energii. Ponadto dysponujemy w Polsce dużymi, ale jednak skończonymi możliwościami podziemnego składowania dwutlenku węgla – lepiej w jak największym zakresie zostawić je dla tych emisji dwutlenku węgla, których nie da się wyeliminować w inny sposób, w przeciwieństwie do emisji z elektrowni węglowych.

Co więcej, warto też zachować pewną część podziemnych składowisk na przyszłość. Być może będziemy magazynować w nich dwutlenek węgla wychwycony bezpośrednio z atmosfery, gdy już będziemy potrafili prowadzić taki wychwyt na masową skalę i gdy stanie się on efektywny ekonomicznie. Takie technologie funkcjonują w ograniczonej skali już teraz i znane są pod skrótem DAC (z angielskiego Direct Air Capture, czyli bezpośredni wychwyt dwutlenku węgla z powietrza).

## Jak w szczególności wygląda proces wychwytu, transportu i składowania dwutlenku węgla oraz czy jest bezpieczny dla ludzi i środowiska, czyli CCS krok po kroku.

W ramach każdego z elementów łańcucha technologii CCS istnieje paleta możliwości do wyboru. Zaczyna się już od wychwytu dwutlenku węgla, do którego można wykorzystać różne procesy fizyczne lub chemiczne, np. oddzielając dwutlenek węgla od spalin poprzez ich bardzo duże schłodzenie, co powoduje skroplenie dwutlenku węgla, lub przepuszczając spaliny przez roztwory, które odłączają cząsteczki dwutlenku węgla.

Tak wyodrębniony dwutlenek węgla nie może jednak przecież pozostać w instalacji wychwytu, lecz musi być umieszczony w miejscu, z którego nie ulotni się do atmosfery. A najpierw musi być do tego miejsca przetransportowany.

Do transportu dwutlenku węgla można wykorzystać właściwie wszystkie środki transportu: drogowy, kolejowy, rzeczny i morski. W przypadku regularnego transportu dużych ilości dwutlenku węgla najbardziej efektywny jest jednak transport specjalnie do tego celu przeznaczonym rurociągiem. Budowa rurociągu jest niestety bardzo kosztowna, a jej koszt bardzo istotnie rośnie wraz ze wzrostem odległości źródła emisji dwutlenku węgla od składowiska. Dlatego dwutlenek węgla powinien być składowany jak najbliżej instalacji, z której się wydostaje.



*Gdzie można  
składować dwutlenek  
węgla i gdzie może on  
być składowany  
w Polsce?*

Najbezpieczniejszym i odpowiednio pojemnym miejscem, w którym dwutlenek węgla może być składowany, są naturalne podziemne magazyny, czyli odpowiednie formacje geologiczne, które przyjmą dwutlenek węgla i zatrzymają go pod ziemią. Wśród takich podziemnych struktur wyróżniamy:

- głębokie wodonośne warstwy solankowe;
- wyczerpane lub bliskie wyczerpania złoża ropy naftowej i gazu ziemnego;
- głębokie, nieeksploatowane pokłady węgla.

Największym potencjałem charakteryzują się wodonośne warstwy solankowe. W Polsce odpowiadają za ponad 90% całkowitego potencjału podziemnego składowania dwutlenku węgla. Ponadto do tej pory są niezagospodarowane, a poza możliwością składowania w nich dwutlenku węgla czy innych substancji są często bezużyteczne dla człowieka.

### Technologie CCS konkurencją dla energii geotermalnej i działalności uzdrowiskowej?

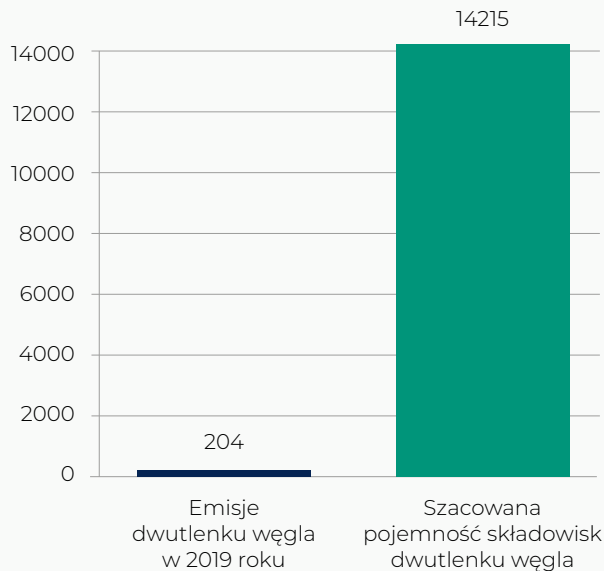
Lokalne społeczności mogą się obawiać, że budowa infrastruktury CCS ograniczy inne korzystne dla nich możliwości zagospodarowania warstw solankowych. Zdarza się bowiem, że charakteryzują się one szczególnymi właściwościami leczniczymi. Solanki takie występują jednak rzadko i w określonych lokalizacjach. Dużo powszechniej warstwy solankowe mogłyby być wykorzystane w geotermii, ale budowa i funkcjonowanie zakładu geotermalnego są w Polsce opłacalne w przypadku, gdy istnieje odpowiednio duży lokalny odbiorca energii geotermalnej. Warunek ten rzadko bywa spełniony, co minimalizuje ewentualny konflikt z infrastrukturą CCS. Ponadto rozwijane są technologie jednoczesnego wykorzystania danej struktury solankowej jako składowiska dwutlenku węgla oraz źródła energii ciepła ziemi.

Podziemne składowiska dwutlenku węgla mogą znajdować się zarówno na lądzie, jak i pod dnem morskim. Niektóre kraje, na przykład Norwegia, mają duże możliwości składowania dwutlenku węgla w strukturach podmorskich i już je wykorzystują. W przypadku Polski zdecydowana większość potencjału składowania ulokowana jest na lądzie. Zgodnie z prawem w Polsce nie można jednak na razie składować dwutlenku węgla na lądzie, co znacząco ogranicza rozwój technologii CCS w naszym kraju. Jest to więc przeszkoda, która powinna być usunięta w pierwszej kolejności.



## Składowanie dwutlenku węgla w Polsce – możliwości i potrzeby

Nadające się do wychwycenia roczne emisje dwutlenku węgla w Polsce a szacowany potencjał składowania.

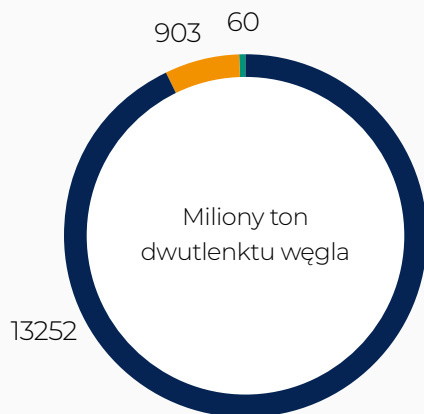


Wychwytni dwutlenku węgla mogą podlegać emisje z elektrowni, ciepłowni, elektrociepłowni (154 miliony ton w 2019r.) oraz emisje z zakładów przemysłowych, zarówno emisje procesowe, jak i emisje ze spalania paliw (50 milionów ton w 2019 r.).

Potencjał składowania dwutlenku węgla w Polsce jest więc tak duży, że teoretycznie, przy obecnym poziomie emisji dwutlenku węgla, pozwoliłby na ich składowanie nawet przez 70 lat.

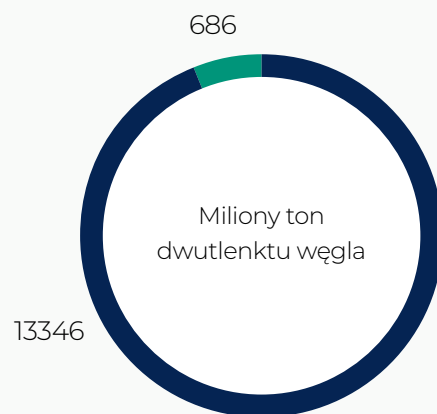
Źródło: WiseEuropa na podstawie danych Europejskiej Agencji Środowiska i Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego (PIG-PIB)

### Potencjał składowania według rodzaju struktury geologicznej.



- Głębokie wodonośne warstwy solankowe (93%)
- Wyczerpane lub bliskie wyczerpania złoża ropy naftowej i gazu ziemnego (6,5%)
- Głębokie, nieeksploatowane pokłady węgla (0,5%)

### Potencjał składowania na lądzie i morzu.



- Pojemność podziemnych składowisk lądowych (96%)
- Pojemność składowisk podmorskich (6%)

Źródło: WiseEuropa na podstawie danych PIG-PIB



*Co się dzieje  
z dwutlenkiem węgla  
pod ziemią?*

Jak dwutlenek węgla trafia do takiego podziemnego składowiska? Poprzez odwiert jest zatłaczany do głęboko położonej struktury geologicznej, co najmniej 800 metrów pod ziemię, gdyż dopiero poniżej takiej głębokości panują odpowiednie warunki dla składowania. W tym czasie zmieniają się właściwości dwutlenku węgla. Bardzo duże ciśnienie wywierane przez skały znajdujące się nad podziemnym składowiskiem sprawia, że dwutlenek węgla zmienia swój stan i staje się płynem o właściwościach gazu (przechodzi w tak zwaną fazę nadkrytyczną). W tej postaci dwutlenek węgla jest zwarty i gęsty jak ciecz, ale lotny jak gaz, lecz nie na tyle, aby mógł swobodnie przemieszczać się poza (ponad) składowisko. Dzięki temu w sposób kontrolowany rozprzestrzenia się po składowisku, ale zajmuje mniejszą jego część i pozostawia więcej miejsca dla kolejnych porcji dwutlenku węgla.

*Czy transport  
dwutlenku węgla  
jest bezpieczny?*

Na każdym z etapów, a szczególnie w trakcie transportu i składowania dwutlenku węgla istnieje ryzyko związane głównie z wyciekami dwutlenku węgla. W przypadku transportu czy zatłaczania umiemy sobie z nim radzić dzięki doświadczeniom zdobytym w związku z transportem innych substancji, transportem rurociągowym gazu ziemnego czy zatłaczania jesteśmy lepiej przygotowani, by sobie z nim radzić, dzięki wiedzy nabytej w trakcie przemysłowego wydobywania ropy i gazu.

Najwięcej obaw społecznych może budzić szczelność podziemnych składowisk dwutlenku węgla i długoterminowe bezpieczeństwo jego składowania, zwłaszcza w składowiskach lądowych. Na świecie istnieje już jednak kilkadziesiąt instalacji składowania dwutlenku węgla i w przypadku żadnej z nich nie donoszono o wyciekach skutkujących negatywnymi konsekwencjami dla ludzkiego życia i zdrowia. Nawet w samej Polsce w ciągu ostatnich 30 lat bezpiecznie zatłoczono pod ziemię tysiące ton dwutlenku węgla. W Borzęcinie w województwie dolnośląskim eksploatowane jest niewielkie złożo gazu ziemnego, które jest już bliskie wyczerpania. Gaz ziemny wydobywany z Borzęcina jest jednak zanieczyszczony, m.in. dwutlenkiem węgla. Dwutlenek węgla jest więc oddzielany od gazu ziemnego, a od 1996 roku dodatkowo zatłaczany z powrotem do złoża, gdzie wytwarza dodatkowe ciśnienie i „wypycha” resztki gazu ziemnego. Tym samym pozwala na nieznaczne zwiększenie jego wydobywania.

Z kolei w latach 2004 i 2005 w Kaniowie w ramach projektu badawczego zmagazynowano prawie 800 ton dwutlenku węgla w głębokich, nieeksploatowanych pokładach węgla.



*Czy podziemne  
składowiska  
dwutlenku węgla są  
bezpieczne i szczelne?*

W obu przypadkach nie są obserwowane wycieki dwutlenku węgla. Sprzyja temu sama geologia. Weźmy za przykład składowanie w złożach gazu, tak jak w Borzęcinie, czy w złożach ropy. Surowce te przez miliony lat spoczywały w tych złożach. Pomimo dużego ciśnienia (i jak w przypadku gazu – dużej lotności) w zasadzie nie przemieszczały się i nie wydostawały się na powierzchnię, zanim człowiek nie zaczął ich wydobywać. Dwutlenek węgla, mniej lotny niż gaz ziemny, także powinien być skutecznie uwięziony w tych warunkach geologicznych.

Odmiennymi warunkami geologicznymi charakteryzują się głębokie wodonośne warstwy solankowe, czyli pokłady słonej wody, w których prawdopodobnie będzie głównie składowany dwutlenek węgla w Polsce – wyeksploatowane złoża ropy i gazu oraz pokłady węgla nie zapewniają bowiem wystarczającej pojemności dla milionów ton dwutlenku węgla, które będą musiały być zatłaczane pod ziemię. W przypadku pokładów słonej wody jako miejsca składowania preferowane są układy warstw geologicznych stanowiące naturalne pułapki (podobnie są zbudowane złoża ropy i gazu). Są one przykryte co najmniej jedną warstwą nieprzepuszczalnych skał, które skutecznie zabezpieczają słoną wodę przed przesiąkaniem do wyższych warstw, w tym do pokładów wody pitnej. Równie skutecznie uszczelniają one składowisko przed ucieczką dwutlenku węgla. Dwutlenek węgla, zatłoczony do formacji skalnych ze słoną wodą, będzie się ponadto gromadził w drobnych, międzyskalnych porach lub szczelinach, wypierając z nich słoną wodę. Szczeliny te będą dla niego swoistą pułapką. Część dwutlenku węgla rozpuści się także w słonej wodzie, a po setkach i tysiącach lat składowania dwutlenek węgla będzie się stopniowo wiązał ze skałą, tworząc nowe minerały. Teoretycznie raz zatłoczony pod ziemię dwutlenek węgla powinien tam pozostać na zawsze, zawieść może jednak infrastruktura techniczna. Niemniej, według Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu przy Organizacji Narodów Zjednoczonych nawet przy uwzględnieniu wszystkich ryzyk prawdopodobieństwo, że ponad 99% zatłoczonego dwutlenku węgla pozostanie w podziemnym składowisku przez 100 lat, wynosi blisko 99%. W przeciągu 1000 lat prawdopodobieństwo to sięga 90%.

### Dotychczasowe awarie infrastruktury CCS

W przeszłości dochodziło do nielicznych wycieków dwutlenku węgla z infrastruktury CCS, jednak żaden z nich nie okazał się groźny dla człowieka. Największą tego typu awarią był wyciek ze składowiska Sheep Mountain w Stanach Zjednoczonych w 1982 roku. Dwutlenek węgla z przemysłowych składowisk CO<sub>2</sub> był tam wtłaczany do złoża ropy naftowej w celu zwiększenia wydobywania tego surowca (przypadek podobny do polskiego Borzęcina). Prawdopodobnie z powodu usterki aparatury utrzymującej odpowiednie ciśnienie w złożu dwutlenek węgla nagle zaczął w dużych ilościach uciekać ze złoża poprzez odwiert. Awaria trwała tydzień, a w jej trakcie dziennie ulatniało się kilkanaście tysięcy ton dwutlenku węgla. Wyciek nastąpił jednak z dala od zabudowań, był też skutecznie monitorowany i kontrolowany. Dzięki temu uniknięto negatywnych dla ludzkiego życia i zdrowia konsekwencji usterki.



Najpoważniejszą dotychczasową awarią infrastruktury CCS było jednak pęknięcie rurociągu transportującego dwutlenek węgla w miejscowości Satartia w Stanach Zjednoczonych w 2020 roku. W ciągu kilku godzin z pękniętego rurociągu wydostało się kilka ton dwutlenku węgla. Z pobliskich terenów ewakuowano ok. 200 osób, a hospitalizowano 45. Nie było żadnych śmiertelnych ofiar wycieku, sporadycznie donosi się o przypadkach odczuwania długotrwałych dolegliwości przez osoby dotknięte awarią, tj. przebywające przez dłuższy czas w chmurze dwutlenku węgla, który wydostał się z rurociągu. Do wymienianych dolegliwości należą bóle głowy, problemy z koncentracją i pogłębienie chorób płuc.

Do awarii doprowadziło naprężenie rurociągu wywołane osunięciem się ziemi po długotrwałych opadach deszczu. W dokumentacji rurociągu w niewystarczający sposób uwzględniono bowiem ryzyko związane z osuwiskami. Ponadto nie doszacowano wielkości obszaru potencjalnie objętego wyciekami dwutlenku węgla oraz nie przygotowano lokalnych służb ratowniczych do radzenia sobie ze skutkami wycieku dwutlenku węgla.

Oba wypadki miały miejsce w Stanach Zjednoczonych. Europejskie i polskie regulacje odnoszące się do transportu i składowania dwutlenku węgla są jednak bardziej restrykcyjne, niewykluczone więc, że w Europie prawdopodobieństwo podobnych awarii jest dużo niższe. Ponadto historia tych awarii pokazała, jak lepiej zarządzać ryzykiem związanym z infrastrukturą CCS.

*Czy na świecie  
funkcjonują już  
instalacje CCS  
i czy działają one  
bezpiecznie?*

W składowaniu dwutlenku węgla na skalę milionów ton w warstwach solankowych mamy mniejsze doświadczenie niż w przypadku złóż ropy i gazu, jednak jak pokazuje norweskie stanowisko Sleipner, w którym dwutlenek węgla jest zatłaczany do warstw solankowych pod dnem morza od 1996 roku, również w tego typu strukturach dwutlenek węgla może być skutecznie uwięziony. Podobne wnioski wynikają też z projektów realizowanych od kilku lat na lądzie w USA i Kanadzie (projekty: Boundary Dam, Illinois Industrial Carbon Capture and Storage, Quest).

Owszem, ryzyka wycieku nie da się ograniczyć do zera. Dwutlenek węgla zawsze może napotkać na niewykryte wcześniej szczeliny, którymi ucieknie ze składowiska. Przepisy prawa unijnego i polskiego przewidują jednak odpowiednie kryteria doboru magazynu dwutlenku węgla, aby dalece zminimalizować takie ryzyko, a tym samym w jak największym stopniu zapewnić szczelność składowiska.

Geologia nie jest jednak niezmienna i wraz z aktywnością sejsmiczną może dojść do powstania nowych pęknięć i uskoków, którymi dwutlenek węgla wydostanie się na powierzchnię. Terytorium Polski należy wprawdzie do obszarów mało aktywnych sejsmicznie, jednak takich zdarzeń nie da się całkowicie wykluczyć.



*Czy ewentualny  
wyciek dwutlenku  
węgla w trakcie  
transportu  
lub ze składowiska  
jest niebezpieczny  
dla człowieka?*

Ale czy wyciek dwutlenku węgla faktycznie jest tak bardzo niebezpieczny? Dwutlenek węgla towarzyszy nam przez cały czas – otacza nas w powietrzu, wydychamy go w trakcie wymiany gazowej. Choć przyczynia się do zmiany klimatu, to w niewielkich stężeniach nie jest niebezpieczny dla człowieka. Jest gazem niepalnym, bezbarwnym i bezwonny. Jest jednak cięższy od powietrza, dlatego jeśli nawet wydostanie się ze składowiska na powierzchnię, to będzie gromadził się przy gruncie. Na płaskim obszarze zostałby szybko rozproszony, nawet przez słaby wiatr. Dwutlenek węgla mógłby jednak dłużej pozostawać w zagłębieniach terenu. Gdyby jego stężenie w powietrzu przekroczyło 5% (normalnie wynosi ono 0,04%, więc ulotnieniu ze składowiska musiałyby ulec naprawdę duże ilości dwutlenku

węgla), mógłby powodować bóle i zawroty głowy oraz mdłości. Dopiero zbyt długie przebywanie w powietrzu o takim stężeniu dwutlenku węgla może doprowadzić do śmierci przez uduszenie

*Czy i jak  
przeciwdziała się  
ewentualnemu  
wyciekowi dwutlenku  
węgla?*

Tak duży wyciek dwutlenku węgla z podziemnego składowiska jest jednak niezwykle mało prawdopodobny. Wymagałby on kombinacji odpowiedniego ukształtowania terenu, nagłych zmian geologicznych i bezwietrznej pogody. Do takich konsekwencji wycieku nie mogłoby dojść z jeszcze jednego powodu – składowisko musi być stale monitorowane pod kątem szczelności (przez całą dobę, nawet po jego zamknięciu). Składowisko musi posiadać też zatwierdzony plan reakcji na wyciek dwutlenku węgla. Obowiązek ten przewidują regulacje unijne i polskie. Operator składowiska z góry wiedziałby więc o ulatnianiu się dwutlenku węgla i w porę mu zapobiegł, między innymi ostrzegając

okoliczną społeczność. Unikanie wycieku jest też w ekonomicznym interesie operatora – za każdą tonę dwutlenku węgla, która ulatnia się do atmosfery, w Unii Europejskiej musiałby po prostu dodatkowo zapłacić, a ponadto ponieść koszty usunięcia negatywnych skutków takiego wycieku. W przypadku groźnego wycieku zostałaby mu ponadto odebrana koncesja na składowanie wraz z wszystkim związanymi z tym konsekwencjami, nie mówiąc o negatywnych skutkach wizerunkowych. Zapewnienie jak najlepszego systemu bieżącego monitorowania leży więc w dobrym interesie operatora składowiska.



## Czy wychwycony dwutlenek węgla musi być składowany pod ziemią? I to w Polsce?

Obawy związane z wyciekami każą zapytać, czy istnieje inna możliwość bezpiecznego zagospodarowania dwutlenku węgla.

Po pierwsze, dwutlenek węgla może być wykorzystywany do produkcji tak zwanych paliw syntetycznych. Mogą one być stosowane jako paliwo w samochodach i samolotach zamiast benzyny czy paliwa lotniczego, których spalanie generuje duże emisje dwutlenku węgla.

Drugim sposobem wykorzystania dwutlenku węgla jest zastosowanie go w produkcji przemysłowej – już jest zresztą w tych celach wykorzystywany, np. do produkcji napojów gazowanych w przemyśle spożywczym. Dwutlenek węgla do tego procesu jest dziś w Polsce wychwytywany z produkcji nawozów i bezpiecznie transportowany do zakładów produkcyjnych.

Niestety obie drogi wykorzystywania dwutlenku węgla mają swoje wady. Pierwsza jest bardzo energochłonna i wymaga transformacji także innych sektorów, między innymi transportu. Ponadto prowadzi do ograniczenia emisji dwutlenku węgla, ale nie do jej całkowitego wyeliminowania – pozwala na uniknięcie emisji ze spalania benzyny czy paliwa lotniczego, ale kosztem przekierowania do pojazdów emisji z zakładów przemysłowych i energetycznych. W dużym skrócie: komin zostaje zastąpiony rurą wydechową. Przy spalaniu paliw syntetycznych z samochodu wciąż ucieka dwutlenek węgla, ale jest to dwutlenek węgla wcześniej wychwycony w zakładach przemysłowych i energetycznych.

Produkcja przemysłowa nie oferuje z kolei możliwości zagospodarowania całego dwutlenku węgla, który potrzebujemy wychwycić, a jedynie jego nieznacznej części.

Dlatego składowanie pod ziemią, i to najlepiej w Polsce, pozostaje optymalnym rozwiązaniem. Mamy wystarczająco duży potencjał, który pozwala nam ograniczać koszty składowania i transportu dwutlenku węgla w porównaniu do scenariusza, w którym musielibyśmy go eksportować na znaczne odległości, na przykład do Norwegii. Ponadto możemy wykorzystywać swoją regionalną przewagę w tym obszarze i składować w Polsce dwutlenek węgla z krajów sąsiednich, które nie mają odpowiedniego potencjału geologicznego. Wiązałoby się to z dodatkowymi korzyściami ekonomicznymi. Szanse takie dostrzega i zamierza wykorzystywać Dania, również Norwegia pozwala innym krajom eksportować dwutlenek węgla do swoich składowisk.





*Jaki jest wpływ  
technologii CCS  
na środowisko  
i krajobraz?*

Poza niewielkim ryzykiem wycieku dwutlenku węgla technologie CCS niekoniecznie wiążą się z zauważalną ingerencją w środowisko czy krajobraz. Duża część infrastruktury będzie się przecież znajdować pod ziemią. Najszerszej zakrojone prace budowlane będą prowadzone przy instalacji rurociągu do transportu dwutlenku węgla. Będą one wymagały prac ziemnych polegających na wkopaniu rurociągu, w tym w prywatne działki, przez które siłą rzeczy rurociąg będzie także przebiegał. Wówczas ustanawiane będzie ograniczenie korzystania z nieruchomości za odszkodowaniem.

*Czy realizacja  
inwestycji związanych  
z technologiami CCS  
pociąga za sobą  
wywłaszczenia?*

W przeważającej większości przypadków budowa rurociągu nie będzie się jednak wiązać z wywłaszczeniami. Wyjątki dotyczą budowy nielicznych naziemnych stacji kompresorowych utrzymujących odpowiednie ciśnienie w rurociągu i tym samym zapewniających swobodny przepływ dwutlenku węgla. Część terenu musi być też zarezerwowana na naziemne instalacje zatłaczania dwutlenku węgla pod ziemię wraz z systemem stałego monitoringu.

Jak z każdą działalnością człowieka, również z technologiami CCS wiążą się więc pewne niedogodności i ryzyka. Jeżeli jednak istnieje wystarczająco istotny interes społeczny, to takie ryzyko jest podejmowane.

Spójrzmy na przypadek podobny do podziemnych składowisk dwutlenku węgla, a mianowicie na podziemne magazyny gazu ziemnego. W Polsce od kilkudziesięciu lat magazynujemy ten surowiec, również w strukturach geologicznych (w wyeksploatowanych złożach gazu ziemnego i w kawernach solnych). Mimo że gaz ziemny jest o wiele groźniejszy dla człowieka niż dwutlenek węgla z uwagi na swoje wybuchowe właściwości (a jest także bardziej lotny niż składowany dwutlenek węgla i co za tym idzie – bardziej podatny na ucieczkę), nikt nie domaga się zaprzestania jego magazynowania. Zwłaszcza że przez kilkadziesiąt lat, pomimo istnienia takiego ryzyka, nie doszło w Polsce do groźnego wycieku. Ponadto w trakcie zatłaczania dwutlenku węgla i dziesiątki lat po jego zakończeniu prowadzony jest, zgodnie z obowiązującymi regulacjami unijnymi i polskimi, kompleksowy i drobiazgowy monitoring składowiska, wód podziemnych i powierzchniowych, o wiele rozleglejszy i o daleko ostrzejszych wymaganiach niż w przypadku magazynów gazu, w praktyce eliminujący ryzyko groźnego wycieku.

W czasie kryzysu energetycznego wywołanego rosyjską inwazją na Ukrainę, z uwagi na zagląające w oczy europejskich społeczeństw niebezpieczeństwo niedoboru gazu ziemnego, właściwie przy braku społecznego sprzeciwu dążono do zmagazynowania jak największej ilości tego surowca, także w Polsce. Wówczas najważniejsze było bowiem bezpieczeństwo energetyczne, nawet za cenę ryzyka groźnego wycieku gazu ziemnego, które zresztą potrafimy skutecznie zminimalizować. Podobnie jest w przypadku składowania dwutlenku węgla – **być może w obliczu zmiany klimatu i zagrożeń dla konkurencyjności polskiej gospodarki oraz naszego bezpieczeństwa energetycznego warto podjąć statystycznie niewielkie ryzyko związane z technologiami CCS.**



## Bibliografia

Na podstawie jakich źródeł powstała niniejsza publikacja i gdzie przeczytasz więcej o...

### ...szacowanym potencjale Polski w zakresie podziemnego składowania dwutlenku węgla:

- Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, *Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO<sub>2</sub> wraz z ich programem monitorowania*, online:  
<https://skladowanie.pgi.gov.pl/twiki/pub/CO2/WebHome/sekwpods.pdf>  
[data dostępu 17.10.2023].

### ...bezpieczeństwie podziemnego składowania dwutlenku węgla:

- Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, *Podziemne składowanie CO<sub>2</sub> – czym jest tak naprawdę?*, online:  
[https://skladowanie.pgi.gov.pl/twiki/pub/CO2/WebHome/Sklad\\_CO2\\_-\\_drugie\\_wydanie.pdf](https://skladowanie.pgi.gov.pl/twiki/pub/CO2/WebHome/Sklad_CO2_-_drugie_wydanie.pdf) [data dostępu 17.10.2023].
- Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, *Czy można bezpiecznie składować CO<sub>2</sub> pod ziemią?*, online:  
[https://skladowanie.pgi.gov.pl/twiki/pub/CO2/WebHome/Broszura\\_bezpieczne\\_skladowanie.pdf](https://skladowanie.pgi.gov.pl/twiki/pub/CO2/WebHome/Broszura_bezpieczne_skladowanie.pdf) [data dostępu 17.10.2023].

### ...diagnozie technologii CCS autorstwa Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu przy Organizacji Narodów Zjednoczonych:

- Intergovernmental Panel on Climate Change, *Carbon Dioxide Capture and Storage*, online:  
[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs\\_wholereport-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf)  
[data dostępu 17.10.2023].

### ...bieżącym stanie technologii CCS w Polsce oraz o tym, co zrobić, aby przyspieszyć ich wdrażanie:

- WiseEuropa, *Assessment of current state, past experiences and potential for CCS deployment in the CEE region – Poland*, online:  
<https://ccs4cee.eu/wp-content/uploads/2021/11/CCS4CEE-Poland.pdf>  
[data dostępu 17.10.2023].
- WiseEuropa, *CCS National Roadmap – Poland*, online:  
[https://ccs4cee.eu/wp-content/uploads/2022/07/CCS-Roadmap\\_Poland.pdf](https://ccs4cee.eu/wp-content/uploads/2022/07/CCS-Roadmap_Poland.pdf)  
[data dostępu 17.10.2023].
- WiseEuropa, *Podsumowanie projektu CCS4CEE – Polska*, online:  
[https://ccs4cee.eu/wp-content/uploads/2023/04/Poland\\_final\\_summary.pdf](https://ccs4cee.eu/wp-content/uploads/2023/04/Poland_final_summary.pdf)  
[data dostępu 17.10.2023].

### ...bieżącym statusie technologii CCS na świecie:

- Global CCS Institute, *Global Status of CCS 2022*, online:  
[https://status22.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2023/03/GCCSI\\_Global-Report-2022\\_PDF\\_FINAL-01-03-23.pdf](https://status22.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2023/03/GCCSI_Global-Report-2022_PDF_FINAL-01-03-23.pdf)  
[data dostępu 17.10.2023].

### ...projektach CCS w Europie:

<https://zeroemissionsplatform.eu/about-ccs-ccu/css-ccu-projects/>  
[data dostępu 17.10.2023].

### ...projektach CCS na świecie:

<https://www.sccs.org.uk/resources/global-ccs-map>  
[data dostępu 17.10.2023].



CCS – konieczny i bezpieczny

Czym są technologie wychwytu i podziemnego składowania dwutlenku węgla oraz jak mogą pomóc powstrzymać zmianę klimatu



## Program Energia i Klimat

Polska, Europa i świat stoją obecnie przed niespotykanymi w historii wyzwaniami środowiskowymi i zasobowymi. Uniknięcie groźnych zmian klimatu, poprawa zdrowia publicznego oraz wzrost bezpieczeństwa surowcowego wymaga głębokiej transformacji gospodarczej. Wykorzystanie szans i uniknięcie pułapek rozwojowych z tym związanych wymaga dogłębnej oceny krótko- i długoterminowych skutków polityki ochrony środowiska oraz gospodarowania zasobami naturalnymi. W ramach Programu Energia, Klimat i Środowisko przygotowujemy kompleksowe analizy sektorowe oraz makroekonomiczne poświęcone szeroko rozumianej niskoemisyjnej transformacji gospodarki w Polsce i poza jej granicami. Jesteśmy aktywni w takich obszarach, jak: polska oraz unijna polityka energetyczno-klimatyczna, krajowa polityka surowcowa, poprawa efektywności zasobowej gospodarki, ochrona środowiska oraz zdrowia publicznego poprzez ograniczenie szkodliwych emisji, zrównoważona polityka transportowa.

Inne publikacje:

„Zielona odbudowa, Od kryzysu do realnej zmiany”,  
Maciej Bukowski (red), WiseEuropa, Warszawa 2020

„Orzeł z popiołów. Gospodarka po COVID-19”,  
Maciej Bukowski (red), WiseEuropa, Warszawa 2020

„Nowe otwarcie. Polska na drodze do zeroemisyjnej gospodarki”,  
Maciej Bukowski (red.), Warszawa 2019.