

**COMPARATIVE ANALYSIS OF SLUDGE UTILIZATION
IN AGRICULTURE IN BULGARIA
AND SELECTED EUROPEAN UNION COUNTRIES**

**ANALIZA PORÓWNAWCZA WYKORZYSTANIA OSADÓW W ROLNICTWIE
NA PRZYKŁADZIE BUŁGARII I WYBRANYCH KRAJÓW UNII EUROPEJSKIEJ**

BOZHIDAR IVANOV
DANIELA TSVYATKOVA
HRABIN BACHEV

Citation: Ivanov, B., Tsvyatкова, D., & Bachev, H. (2024). Comparative Analysis of Sludge Utilization in Agriculture in Bulgaria and Selected European Union Countries / Analiza porównawcza wykorzystania osadów w rolnictwie na przykładzie Bułgarii i wybranych krajów Unii Europejskiej. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej / Problems of Agricultural Economics*, 378(1), 50–68. <https://doi.org/10.30858/zer/181135>

Funding statement

This paper is part of research project “Socio-economic effects from the use of sewage sludge from WWTP in agriculture” funded by the Bulgarian Science Fund under the contract KII-06-H36/11.

Oświadczenie o dofinansowaniu

Niniejsza praca jest częścią projektu badawczego „Skutki społeczno-ekonomiczne wykorzystania osadów ściekowych z oczyszczalni ścieków w rolnictwie” finansowanego przez bułgarski fundusz naukowy w ramach kontraktu KII-06-H36/11.

Abstract

The purpose of this study is to illustrate the convergence of sludge utilization in Bulgaria and other selected European Union countries (Hungary, Poland, Czechia, and Romania) and examine by correlation and asymmetric analysis how and to what extent the transaction costs and sludge utilization impact the use of sludge and inorganic fertilizers in agriculture. The usage of sludge from wastewater plants in the agriculture is still a widespread way of sludge utilization, even though the trend in the recent years shows a gradual regress and visible growth in other wastewater outlets. The correlation and asymmetric analyses were carried out to give insights about the role of transaction costs in sludge use and the effect

Bozhidar Ivanov, PhD, Institute of Agricultural Economics; Geo Milev, Boulevard „Tsarigradsko shose” 125, бн. 1, 1113 Sofia, Bulgaria. (bozhidar_ivanov@yahoo.co.uk). <https://orcid.org/0000-0002-5520-548X>
Daniela Tsvyatкова, PhD, Institute of Agricultural Economics; Geo Milev, Boulevard „Tsarigradsko shose” 125, бн. 1, 1113 Sofia, Bulgaria. (daniela_80@abv.bg). <https://orcid.org/0009-0007-0044-2086>
Hrabrin Bachev, PhD, Prof, Institute of Agricultural Economics; Geo Milev, Boulevard „Tsarigradsko shose” 125, бн. 1, 1113 Sofia, Bulgaria. (hrabrin.bachev@gmail.com). <https://orcid.org/0000-0003-0555-7468>

of sludge disposal in agriculture to supplement the mineral fertilizers. It is noted that the agriculture is still a leading outlet of sludge disposal, the eventual transaction costs incurred by farmers to use it are not changing during last years, whereas the prices of mineral fertilizers were not perceived to boost sludge demand in agriculture. In countries such as Hungary and Poland, there is a relatively considerable symmetry between the increase in the use of inorganic fertilizers and the shrink in the sludge use in agriculture, while in Bulgaria the persistent trend of using inorganic fertilizers is supplemented by a temperate growth in sludge agriculture disposal. In turn, in Romania there is a strong asymmetry between the use of inorganic nitrogen and sludge in agriculture, however, it is attributed to lack of sludge application in agriculture in the first half of the period under consideration.

Keywords: sludge, agriculture, convergence, transaction costs, inorganic fertilizers.

JEL codes: Q10, Q14, Q18.

Abstrakt

Celem badania jest zilustrowanie wykorzystania osadów w rolnictwie bułgarskim oraz porównanie z wybranymi krajami Unii Europejskiej (Węgrami, Polską, Czechami i Rumunią), jak również zbadanie, poprzez analizę korelacji i asymetryczności, w jaki sposób i w jakim stopniu koszty transakcyjne oraz utylizacja osadów wpływają na stosowanie osadów i nawozów nieorganicznych w rolnictwie. Wykorzystanie osadów z oczyszczalni ścieków w rolnictwie jest w dalszym ciągu powszechnym sposobem wykorzystania osadów, choć tendencja w ostatnich latach wskazuje na stopniowy regres i wyraźny wzrost w pozostałych punktach odprowadzania ścieków. Przeprowadzono analizę korelacyjną i asymetryczną, aby uzyskać wgląd w rolę kosztów transakcyjnych w wykorzystaniu osadów oraz wpływ usuwania osadów w rolnictwie w celu uzupełnienia nawozów mineralnych. Należy zauważyć, że rolnictwo w dalszym ciągu jest wiodącym miejscem utylizacji osadów. Ostateczne koszty transakcyjne ponoszone przez rolników w związku z ich wykorzystaniem nie zmieniały się w ostatnich latach. Natomiast nie obserwuje się, aby ceny nawozów mineralnych zwiększały popyt na osady w rolnictwie. W krajach takich jak Węgry i Polska stwierdzono stosunkowo wysoką symetrię pomiędzy wzrostem stosowania nawozów nieorganicznych a zmniejszeniem wykorzystania osadów w rolnictwie, natomiast w Bułgarii utrzymującej się tendencji nawożenia nieorganicznego towarzyszy umiarkowany wzrost utylizacji osadów z rolnictwa. Okazuje się, że z kolei w Rumunii występuje duża asymetria pomiędzy wykorzystaniem azotu nieorganicznego a zastosowaniem osadów w rolnictwie, ale przypisuje się to brakowi stosowania osadów w rolnictwie w pierwszej połowie obserwowanego okresu.

Słowa kluczowe: osady, rolnictwo, konwergencja, koszty transakcyjne, nawozy nieorganiczne.

Kody JEL: Q10, Q14, Q18.

Introduction

The wastewater utilization is an important and perpetual topic not only in terms of the environment, but also in terms of economics. The extraction of the wastewater sludge from wastewater treatment plants can be bound to different outlets, which through the time have changed their share but the agricultural use remains a relatively stable predominant disposal of sludge. It should be underlined that agriculture has been a natural designation of sludge utilization for many decades. Regarding the environmental and pollution issues, the European Union (EU) enacted special legislation for sludge use. The Sewage Sludge Directive 86/278/EEC was set up to encourage the use of sewage sludge in agriculture and to regulate its use in such a way as to prevent harmful effects on soil, vegetation, animals, and human beings (European Union, 2020). According to Jaramillo and

Wstęp

Zagospodarowanie ścieków jest tematem ważnym i stałym, nie tylko z punktu widzenia ochrony środowiska, ale także ekonomii. Ekstrakcja osadów ściekowych z oczyszczalni ścieków może być prowadzona do różnych miejsc, które z biegiem czasu zmieniały swój udział, ale wykorzystanie rolnicze pozostaje stosunkowo stabilne i dominujące w usuwaniu osadów. Należy podkreślić, że rolnictwo jest naturalnym przeznaczeniem utylizacji osadów przez wiele dziesięcioleci. Jeśli chodzi o kwestie ochrony środowiska i zanieczyszczeń, Unia Europejska (UE) przyjęła specjalne przepisy dotyczące wykorzystania osadów. Dyrektywa Rady Wspólnot Europejskich z 1986 r. w sprawie osadów ściekowych została ustanowiona w celu zainteresowania wykorzystaniem osadów ściekowych w rolnictwie i regulowania ich stosowania w taki sposób, aby zapobiegać szkodliwemu

Restrepo (2017, p. 2) “wastewater reuse was a global concern due to the associated risks to public health and the environment.” In this respect, it is noticed that the impact of agriculture on soil degradation processes is due to, *inter alia*, improper practices such as crop rotation and fertilization, agrotechnical treatments, depletion, etc. (Sulewski & Gołaś, 2019). From the very beginning, it was clear that the reuse of wastewater is a good opportunity to increase the efficiency in agriculture but it cannot be done directly without any control or regulation. The technological progress expands the possibilities and scales in terms of recycling economy and profound exploration of the resources, which leads to new goals oriented in improving sustainable resource management in wastewater treatment (Gude, 2015). The Food and Agriculture Organization (2010) promotes the recycling of urban wastewater as an essential component of integrated water resource management, contribute to which is thought to bring benefits to urban environmental management, water saving, and water supply to farmers. Marinova (2001, p. 74) claims that “sludge is a biomass and is an organic reserve in relation with the shortage of organic sources in our country. They can be used in practice complying with certain conditions, according to the legislation.” The issue of sludge utilization in agriculture is sensitive in terms of pollution hazards that may be transmitted to soil and indirectly to food (Sarov & Tsvyatкова, 2021). The concentration levels and types of pathogens and chemical substances present in wastewater vary not only in terms of a wastewater treatment plant, but also time and week days, which is explained by random circumstances. The concentration of viruses, protozoa, and parasites in wastewater can be 10–1000 times higher in developing countries than in developed countries (Jiménez et al., 2010). Regardless the biological agents and pathogens, there is also a risk of presence of various elements of heavy metals, especially when the household and small industrial sewerage are not separated.

Although in recent years the trends in the EU have been towards reducing the use of sludge in agriculture, this practice is still predominant in terms of its utilization. About 50% of wastewater and sludge is used for agricultural soils, 28% is incinerated, and 18% is still landfilled (Report from the Commission, 2017). According to many studies, sludge benefit for the agriculture include “ensuing the availability of phosphates in the sludge extracted from wastewater” (Ivanov & Bachev, 2021, p. 293). Phosphorus has no substitute in crop production and today about 90% of the phosphorus derived from mineral phosphate rock is used as a fertilizer (Cordel, 2010; Davis, 2006).

wpływowi na glebę, roślinność, zwierzęta i ludzi (European Commission, 2020). Według Jaramillo i Restrepo (2017) ponowne wykorzystanie ścieków stanowi problem globalny ze względu na związane z nim ryzyko dla zdrowia publicznego i środowiska. W tym samym zakresie zauważa się, że wpływ rolnictwa na procesy degradacji gleb wynika m.in. z niewłaściwych praktyk, takich jak płodozmian i nawożenie, zabiegi agrotechniczne, zubożenie itp. (Sulewski i Gołaś, 2019). Od samego początku było jasne, że ponowne wykorzystanie ścieków jest dobrą szansą na zwiększenie efektywności w rolnictwie, jednak nie można tego dokonać bezpośrednio, bez jakiegokolwiek kontroli i regulacji. Postęp technologiczny poszerza możliwości i skalę w zakresie gospodarki recyklingowej i głębokiej eksploracji zasobów, co prowadzi do powstania nowych celów zorientowanych na poprawę zrównoważonego gospodarowania zasobami w oczyszczaniu ścieków (Gude, 2015). Organizacja Narodów Zjednoczonych do spraw Wyżywienia i Rolnictwa (FAO, 2010) promuje recykling ścieków komunalnych jako istotny element zintegrowanego zarządzania zasobami wodnymi, który – jak się uważa – jest korzystny w zakresie zarządzania środowiskiem miejskim, a także przyczynia się do oszczędzania wody i zapewniania wody rolnikom. Marinova (2001) zauważa, że osad jest biomasą i stanowi rezerwę organiczną w związku z niedoborem źródeł organicznych w Bułgarii. Można go wykorzystywać w rolnictwie, spełniając określone warunki, zgodnie z obowiązującymi przepisami. Zagadnienie zagospodarowania osadów w rolnictwie jest drażliwe ze względu na zagrożenie zanieczyszczeniami, które mogą przenosić się do gleby i pośrednio przedostawać się do żywności (Sarov i Tsvyatкова, 2021). Poziomy stężenie oraz rodzaje patogenów i substancji chemicznych występujących w ściekach różnią się nie tylko w zależności od konkretnej oczyszczalni, ale także w różnych porach i dniach tygodnia, co tłumaczy się okolicznościami losowymi. Stężenie wirusów, pierwotniaków i pasożytów w ściekach może być 10–1000 razy wyższe w krajach rozwijających się niż w krajach rozwiniętych (Jiménez i in., 2010). Niezależnie od czynników biologicznych i patogenów identyfikowane jest również ryzyko obecności różnych pierwiastków metali ciężkich, szczególnie w przypadku, gdy kanalizacja przydomowa i mała przemysłowa nie są oddzielone.

Choć w ostatnich latach w UE występuje tendencja do ograniczania wykorzystania osadów ściekowych w rolnictwie, praktyka ta w dalszym ciągu jest wiodąca i zajmuje dominujące miejsce w ich zagospodarowaniu. Około 50% ścieków i osadów aplikowane jest do gleb rolniczych, 28% jest

Maaß (2019, p. V) argues that “the reuse of treated wastewater and sludge results in the development of linked regional value chains with lower costs of wastewater treatment and sludge disposal, higher profitability, and added-value in crop production value”. In the same study, Maaß (2019, p. VI) attempts to reveal the triangle relationship within the value chain of crop production, wastewater treatment, and the governance structure concluding that the increasing need for “aligning governance structures with transactions and interdependences contributes to efficiently governing transactions and interdependences between linked value chains of wastewater treatment and crop production.” Thus, it is accurately identified that in order for some transactions to be made, the governance matters. Therefore, it is not only barriers and obstacles hindering economic activities, but also costs affecting economic efficiency.

The use of sludge in agriculture is a function of both the agricultural technology and the availability of sufficient demand in specific periods (Ivanov & Bachev, 2021). At the same time, it should be noted that regulations and governance for sludge use are also a key factor for the scope of sludge use in agriculture. This economic influence of the institutions on the sludge agricultural use is evinced through transaction costs. The transaction costs are a wide explored concept in the economic literature defined firstly by Williamson (1979) and for the purpose of this study a specific notion has been adopted. These costs are envisaged in two main aspects: the costs incurred by agents to govern the process of deal movement seeking for value creation and the costs related to adjusting to the institutional rules (Ivanov, 2023).

The purpose of this paper is to compare sludge production and its utilization in agriculture in Bulgaria with four close Eastern European countries (Hungary, Poland, Czechia, and Romania) applying convergence coefficient and explore the role of transaction costs on the sludge agricultural use and relationship between sludge disposal to agriculture and the level of inorganic fertilizers application. The convergence analysis is implemented by comparing Bulgaria separately with a single selected country, which allows for illustrating how all countries perform. It is interesting to determine what is the practical contribution of sludge nutrition in substituting the mineral fertilizers and if it can play a more crucial balancing role in provisioning soil and crop nutrients. The study uses convergence and asymmetric analyses, which are different from classical ones, which is regarded as a good method for verifying their relevance and compatibility.

spalane, a 18% nadal składowane (Report from the Commission, 2017). Według większości badań korzyści osadów dla rolnictwa można znaleźć w zapewnianiu dostępności fosforanów w osadach ekstrahowanych ze ścieków (Ivanov i Bachev, 2021). Fosfor nie ma substytutu w produkcji roślinnej i obecnie około 90% fosforu pochodzącego z minerałów fosforytowych wykorzystuje się jako nawóz (Cordell, 2010; Davis, 2006).

Maaß (2019) twierdzi, że ponowne wykorzystanie oczyszczonych ścieków i osadów skutkuje rozwojem powiązanych regionalnych łańcuchów wartości z niższymi kosztami oczyszczania ścieków i usuwania osadów, wyższą rentownością i wartością dodaną w produkcji roślinnej. W tym samym badaniu Maaß próbuje pokazać trójstronną relację w łańcuchu wartości produkcji roślinnej, oczyszczania ścieków i struktury zarządzania, stwierdzając, że rosnąca potrzeba dopasowania struktur zarządzania do transakcji i współzależności przyczynia się do skutecznego zarządzania transakcjami i współzależnościami pomiędzy powiązаныmi łańcuchami wartości oczyszczania ścieków i produkcji roślinnej. Zatem trafnie wskazano, że aby możliwe było zawarcie niektórych transakcji, istotne jest zarządzanie. W związku z tym znaczenie mają nie tylko bariery i przeszkody utrudniające działalność gospodarczą, lecz również koszty wpływające na efektywność ekonomiczną.

Wykorzystanie osadów w rolnictwie jest funkcją zarówno technologii rolniczej, jak i dostępności wystarczającego zapotrzebowania w określonych okresach (Ivanov i Bachev, 2021). Jednocześnie należy zauważyć, że regulacje i samo zarządzanie dotyczące wykorzystania osadów stanowią także kluczowy czynnik określający zakres rolniczego wykorzystania osadów w rolnictwie. Ekonomiczny wpływ instytucji na rolnicze wykorzystanie osadów zauważa się w kosztach transakcyjnych. Koszty transakcyjne są pojęciem szeroko eksplorowanym w literaturze ekonomicznej, zdefiniowanym po raz pierwszy przez Williamsona (1979), i na potrzeby tego badania przyjęto pojęcie konkretne. Koszty te rozpatrywane są w dwóch głównych aspektach: koszty ponoszone przez pośredników dla zarządzania procesem ruchu transakcji w celu tworzenia wartości oraz koszty ponoszone w związku z dostosowaniem się do zasad instytucjonalnych (Ivanov, 2023).

Celem artykułu jest porównanie produkcji osadów i ich wykorzystania w rolnictwie bułgarskim z czterema krajami Europy Wschodniej (Węgrami, Polską, Czechami i Rumunią) przy zastosowaniu współczynnika konwergencji oraz zbadanie roli kosztów transakcyjnych na wykorzystanie osadów w rolnictwie

The selected four Eastern Europe countries (Hungary, Czechia, Poland, and Romania) are considered in the analyses due to similarities in their socio-economic development as a former post-socialistic countries, new EU members, and possessing common challenges in agriculture in terms of the share of agricultural land and the need to increase their agricultural production resource efficiency in order to become more competitive. The other criteria for the choice of these countries are related to the availability of data regarding the treatment of wastewater from the treatment plants and data on sludge disposal in agriculture available in Eurostat, so that it is comparable and consistent.

Methods

The convergence is a method, which allows for analyzing and measuring the closeness and differences existing between a set of countries or other entities, which is done through qualitative changes that occurred in these countries within a certain timeline. In the study, the convergence analysis includes the comparison of Bulgaria with Czechia, Hungary, Poland, and Romania in terms of variables related to sludge extraction, sludge disposal, and sludge disposal in agriculture. The study was based on Eurostat data from 2007–2020. To a great extent, this method of convergence estimation introduced by Ivanov (2020), and specifically is applied by Ivanov and Bacheva (2021) in their study on wastewater convergence, is created to reveal mostly convergence not as a timeline process but as a state reflecting the relative changes and absolute values through the time. In general, the convergence analysis (see Barro & Sala-i-Martin, 1992; Mankiw et al., 1992) are posted on the neoclassical economic comprehension, where β convergence is anticipated as a negative correlation and β coefficient demonstrates convergence among the region set. The absolute

oraz zależności pomiędzy odprowadzaniem osadów do rolnictwa oraz poziomem stosowania nawozów nieorganicznych. Analizę konwergencji przeprowadzono, porównując Bułgarię oddzielnie z jednym wybranym jej krajem, co pozwala zilustrować, jak wszystkie kraje radzą sobie w porównaniu z innymi. Interesujące jest również to, jaki może być praktyczny wkład nawożenia osadami w zastępowanie nawozów mineralnych i czy może on odgrywać ważniejszą rolę równoważącą w dostarczaniu glebie i roślinom składników odżywczych. W badaniu zastosowano odmienne od klasycznych analizy konwergencji i asymetryczności, co uznano za dobrą metodę sprawdzenia ich trafności i porównywalności.

Wybrane cztery kraje (Węgry, Czechy, Polska i Rumunia), położone w Europie Wschodniej, zostały uwzględnione w analizach ze względu na podobieństwa w ich rozwoju społeczno-gospodarczym w porównaniu z byłymi krajami postsocjalistycznymi, nowymi członkami UE i posiadającymi wspólne wyzwania w rolnictwie pod względem udziału gruntów rolnych i konieczności zwiększania efektywności wykorzystania zasobów produkcji rolnej, aby stać się bardziej konkurencyjnymi. Pozostałe kryteria wyboru tych krajów związane są z dostępnością danych dotyczących oczyszczania ścieków z oczyszczalni oraz danych na temat wykorzystania osadów w rolnictwie dostępnych w Eurostatie, tak aby były one porównywalne i spójne.

Metodyka

Konwergencja to metoda, która pozwala analizować i mierzyć bliskość i różnice istniejące pomiędzy zbiorem krajów lub innymi podmiotami, co dokonuje się poprzez zmiany jakościowe zachodzące w tych krajach w określonym przedziale czasowym. W badaniu konwergencji dokonano porównania Bułgarii z Czechami, Węgrami, Polską i Rumunią pod względem zmiennych związanych z pozyskaniem osadów, ich usuwaniem i wykorzystaniem w rolnictwie. Wykorzystano dane Eurostatu z lat 2007–2020. W dużej mierze metoda szacowania konwergencji wprowadzona przez Ivanova w 2020 r., a konkretnie stosowana przez Ivanova i Bacheva (2021) w analizie konwergencji ścieków, została stworzona, aby ujawnić głównie konwergencję nie jako proces odnoszący się do przedziału czasu, ale jako stan odzwierciedlający zmiany względne i wartości bezwzględne w czasie. Ogólnie rzecz biorąc, analizy konwergencji, takie jak Barro i Sala-i-Martin (1992) oraz Mankiw i in. (1992), opierają się na neoklasycznym rozumieniu ekonomii, gdzie konwergencja β jest przewidywana jako ujemna korelacja, a współczynnik β jako wykazujący konwergencję

convergence conjectures that the above-mentioned pattern will lead to negative value of β , which means the growth in income or GDP will diminish with its amount across the countries. It can be expressed by the following formula:

$$\ln \frac{(y_{it})}{(Y_{i0})} = \alpha + \beta \times \ln(y_{i,0}) + u_{it} \quad (1)$$

where: $0 < \beta < 1$, the convergence is confirmed, while α is a constant, u_{it} is a standard error, which is assumed theoretically for 0; Y_{it} – the variable result obtained as a difference between the selected country with the compared region in the period t ; Y_{i0} – the variable result obtained as a difference between the selected country with the compared region in the initial period. Besides the β convergence, which is designated to reveal in a selected set of regions whether during a certain period the lagged countries manage to catch up the advanced countries, the trend of variation and deviation assumed as σ convergence is also applied. The dispersion through the time of a certain indicator among regions when it is noted to decrease over time is considered as σ convergence based on the coefficient of variation.

According to Sala-i-Martin (1995), β convergence is a more interesting concept, since it can be used to show whether there exists any convergence pattern among different economies, how fast the convergence process is, whether the convergence is conditional or unconditional, and whether there is partial or total convergence. The authors also show that β convergence is a necessary but not a sufficient condition for σ convergence.

Between β and σ there is a significant difference, which indicates that the coefficient of β convergence is lower, thus the outcome for σ is higher, which means the lack of correlation leads to the elevation of σ deviation. The σ convergence is judged by the changes in the coefficient of variation (CV), which might be compared across the regions and countries, which is perceived as a way to assess the convergence. If $CV_{t+1} < CV_t$ or $\sigma_{t+1} < \sigma_t$, i.e., it is assumed that there is a convergence and vice versa, the opposite proportion denotes the absence of convergence.

In addition to the described classical way of calculating convergence, Ivanov (2020) and Ivanov and Bachev (2021) offer a different way of calculating, which is an attempt to combine the two above-mentioned indices for revealing and assessing the convergence. "This method takes into account both the ratio between the absolute levels in

między zbiorami regionów. Konwergencja absolutna zakłada, że poniższy wzór doprowadzi do ujemnej wartości β , co oznacza, że wzrost dochodów lub PKB, lub zupełnie innego wskaźnika będzie się zmniejszał wraz z jego wielkością w poszczególnych krajach. Można to wyrazić za pomocą następującego wzoru:

gdzie: $0 < \beta < 1$ to konwergencja jest potwierdzona, natomiast α jest stałą, u_{it} jest błędem standardowym, który teoretycznie przyjmuje się dla 0; Y_{it} – zmienna wyniku uzyskanego jako różnica między wybranym krajem a porównywanym regionem w okresie t ; Y_{i0} – zmienna wyniku uzyskanego jako różnica między wybranym krajem a porównywanym regionem w początkowym okresie. Poza konwergencją β , która ma za zadanie ujawnić się w wybranym zbiorze obszarów, czy w pewnym okresie krajom opóźnionym udaje się dogonić kraje rozwinięte, stosuje się także trend zmienności i odchyłeń przyjęty jako konwergencja σ . Rozproszenie w czasie określonego wskaźnika pomiędzy regionami, w przypadku gdy zauważa się, że zmniejsza się on w czasie, uważa się za konwergencję σ w oparciu o współczynnik zmienności.

Według Sala-i-Martin (1994) konwergencja β jest bardziej interesującą koncepcją, ponieważ można ją wykorzystać do pokazania, czy istnieje wzór konwergencji pomiędzy różnymi gospodarkami, jak szybki jest proces konwergencji, czy konwergencja jest warunkowa czy bezwarunkowa, oraz czy występuje częściowa czy całkowita konwergencja. Autorzy pokazują również, że konwergencja β jest warunkiem koniecznym, ale nie wystarczającym dla konwergencji σ .

Pomiędzy β i σ występuje znacząca różnica, co wskazuje, że mniejszy jest współczynnik konwergencji β , a zatem wyższy jest wynik dla σ , a to z kolei oznacza, że brak korelacji prowadzi do zwiększenia odchylenia σ . Konwergencję σ ocenia się na podstawie zmian współczynnika zmienności (CV), a CV można porównywać w różnych regionach i krajach, co jest postrzegane jako sposób oceny konwergencji. Jeżeli zakłada się, że przy $CV_{t+1} < CV_t$ lub $\sigma_{t+1} < \sigma_t$ ma miejsce konwergencja i odwrotnie, to przeciwna proporcja oznacza brak konwergencji.

Oprócz opisanego klasycznego sposobu obliczania konwergencji Ivanov (2020) oraz Ivanov i Bachev (2021) proponują inny sposób obliczania, który próbuje połączyć dwa wspomniane wskaźniki w celu ujawnienia i oceny konwergencji. Metoda ta uwzględnia zarówno stosunek bezwzględnych poziomów produkcji, udziału utylizacji osadów w rolnictwie na

the levels of production, the disposal share of sludge in agriculture per capita in countries under comparison, and takes into account the dynamic change of these indicators in the t and $t-1$ periods, as well as this component works and measures the magnitude in absolute values of the changes. The equation for obtaining the convergence coefficient is:

$$K_{CNV} = \frac{\frac{IV_{subST}^t}{IV_{BscST}^t} + \left(\frac{(IV_{subST}^t - IV_{subST}^{t-1}) - (IV_{BscST}^t - IV_{BscST}^{t-1})}{(IV_{subST}^{t-1} + IV_{BscST}^{t-1})} \right) \times \frac{IV_{subST}^t}{IV_{BscST}^t} + \frac{IV_{subST}^{t-1}}{IV_{BscST}^{t-1}}}{2} \quad (2)$$

The closer this coefficient is to 1, the closer and more similar the countries are in terms of the selected indicator (Ivanov, Marinova et al., 2021; Kusz, 2019). The convergence coefficient is denoted by K_{CNV} and can take values from 0 and greater than 1. The variables involved are IV_{subST} – this is the indicator value, which in this case is the amount of sludge per capita in three main indicators covered in the study: the production of sludge from the wastewater treatment plants, the use of sludge for various purposes per capita in the selected countries, where Bulgaria is the subject, whereas other countries are counterparts, and the use of sludge for agricultural purposes per capita. On the other hand, IV_{BscST} is the related indicator of the baseline counterpart country, with which the comparison is made” (Ivanov & Bachev, 2021, p. 292).

Along with the convergence analysis, the study investigates the relationship between the application of sludge in agriculture and the use of inorganic fertilizers. There are various methods to analyze this issue. For the purpose of this study an analysis of asymmetry is applied. In economics, the asymmetry occurs when the characteristics of certain system are heterogeneous. It is common to conduct the asymmetric price transmission analysis, which is targeted to trace up discrepancies in value chain stream. Different approaches are known to verify price asymmetric transmission (Brock et al., 1996; European Commission, 2010) and in the case of this study a specific estimation method was applied, which is based on relative changes unrelated to time lag rather than the average values of the variable sets shown in equation (3).

mieszkańca w porównywanych krajach, jak również uwzględnia dynamiczną zmianę tych wskaźników w okresach t i $t-1$, komponent ten działa również i mierzy wielkość zmian w wartościach bezwzględnych. Równanie pozwalające uzyskać współczynnik konwergencji wygląda następująco:

Im współczynnik ten jest bliższy 1, tym znacznie bliższe i podobne są kraje pod względem wybranego wskaźnika (Ivanov, Marinova i in., 2021; Kusz, 2019). Współczynnik konwergencji jest oznaczany przez K_{CNV} i może przyjmować wartości od 0 do większych niż 1. Uwzględniane zmienne to IV_{subST} – jest to wartość wskaźnika, czyli w tym przypadku ilość osadu na mieszkańca w trzech głównych wskaźnikach objętych badaniem: produkcja osadów z oczyszczalni ścieków, wykorzystanie osadów do różnych celów w przeliczeniu na mieszkańca w wybranych krajach, gdzie przedmiotem jest Bułgaria, natomiast inne kraje są odpowiednikami, oraz wykorzystanie osadów do celów rolniczych w przeliczeniu na mieszkańca. Z kolei IV_{BscST} jest powiązaniem wskaźnikiem kraju będącego punktem odniesienia, z którym dokonuje się porównania.

Celem pracy, oprócz analizy konwergencji, jest zbadanie zależności pomiędzy wykorzystaniem osadów w rolnictwie a poziomem zużycia nawozów nieorganicznych. Istnieją różne metody analizy tego zagadnienia. W celu przeprowadzenia niniejszego badania wykorzystano analizę asymetrii. Powszechnie przyjmuje się, że asymetria w ekonomii zachodzi w przypadku występowania heterogeniczności cech pewnego systemu. Często przeprowadza się analizę asymetrycznej transmisji cen, której celem jest śledzenie konwergencji w strumieniu łańcucha wartości. Znane są różne podejścia do sprawdzania asymetrycznej transmisji cen (Brock i in., 1996; European Commission, 2010), a w przypadku tego badania zastosowano określony sposób szacowania, który bazuje na względnych zmianach niezwiązanych z opóźnieniem czasowym, a nie na średnich wartościach zbiorów zmiennych przedstawionych w równaniu (3).

$$APT_t = \frac{\frac{(FU_t^{NS} - FU_{AV}^{NS})}{FU_{AV}^{NS}}}{\frac{(SU_t^{NS} - SU_{AV}^{NS})}{SU_{AV}^{NS}}} \quad (3)$$

The main variables to calculate the asymmetric movement are the use of fertilizers in terms of nitrogen and phosphorous in each year (FU_t^{NS}) and its average value (FU_{AV}^{NS}) for the whole 2007–2020 period. The above ratio is divided to the counterpart sludge use in the timeline represented by SU_t^{NS} and SU_{AV}^{NS} . It should be noted that the division order does not determine the asymmetric results, where due to the normalization actions reverse orders of operation in equation (3) yields the same final result of APT_t . Through normalization computation APT_t is obtained, the sum of which is divided to the number of observations (N) in formula (4).

$$APT_{FN} = \frac{\sum_{t=1}^{N=48} (APT_t)}{N} \quad (4)$$

The APT_{FN} index may vary from 0 to 1, where APT_{FN} is close to 1 means that both variables are asymmetric. It means that they move in opposite directions in the given period or change by different margin, even though they move in the same direction. Since APT_{FN} is close to 0, the changes of these variables are insignificant and their annual values are symmetric compared to the average.

The study analyzes the relationship between the production of sludge and its utilization in agriculture in selected countries, which is a premise to argue that regulation framework in selected countries impacts the level of transaction costs, which is an important factor in determining the sludge use in agriculture. It is projected that there will be a low correlation between sludge production and its utilization in agriculture when the latter is relatively low, which can imply that transaction costs for dealing with the institutional restrictions for sludge utilization are relatively high, while if we find high correlation between sludge production and sludge use in agriculture, the transaction costs are more likely not to be key determinant affecting the agricultural disposal.

Results

The level of use of wastewater solid in the agriculture in Eastern European countries is relatively lower compared to old Member States and precipitates in the last two decades. It is driven mainly by two factors, first to mitigate the pressure from the rising volumes of wastewater sludge yielded in the wastewater treatment plants as well as from the property of the sludge to be used as a nutrient instead of fertilizers. The data

Głównymi zmiennymi pozwalającymi obliczyć przesunięcie asymetryczne jest zużycie nawozów w ujęciu azotu i fosforu w każdym roku (FU_t^{NS}) oraz jego średnia wartość (FU_{AV}^{NS}) dla całego obserwowanego okresu 2007–2020. Powyższa relacja jest podzielona na odpowiadające mu zużycie osadów na osi czasu reprezentowane przez SU_t^{NS} i SU_{AV}^{NS} . Należy zauważyć, że kolejność dzielenia nie determinuje wyników asymetrycznych, w wyniku działań normalizacyjnych odwrotne sposoby obliczeń równania (3) dają ten sam wynik końcowy APT_t . Poprzez normalizację uzyskuje się APT_t , których sumę dzieli się na liczbę obserwacji (N) przedstawioną we wzorze (4).

Indeks APT_{FN} może zmieniać się w przedziale od 0 do 1, gdzie wartość APT_{FN} zbliżona do 1 oznacza, że obie zmienne są asymetryczne. Oznacza to, że poruszają się one w przeciwnych kierunkach w danym okresie lub zmieniają się z różnym marginesem, chociaż w tym samym kierunku. Ponieważ wartości APT_{FN} są bliskie 0, zmiany tych zmiennych są nieistotne, a symetryczne są ich wartości roczne w stosunku do średniej.

W analizie zbadano związek pomiędzy produkcją osadów a ich rolniczym wykorzystaniem w wybranych krajach, co stanowi przesłankę do stwierdzenia, że ramy regulacyjne w wybranych krajach wpływają na poziom kosztów transakcyjnych i są ważnym czynnikiem determinującym wykorzystanie osadów rolniczych. Przewiduje się niską korelację między produkcją osadów a ich wykorzystaniem w rolnictwie, gdy jest ona stosunkowo niska, może oznaczać, że koszty transakcyjne związane z radzeniem sobie z instytucjonalnymi ograniczeniami dotyczącymi wykorzystania osadów są stosunkowo wysokie. Natomiast jeśli stwierdzimy wysoką korelację pomiędzy produkcją osadów a wykorzystaniem osadów w rolnictwie, koszty transakcyjne raczej nie są kluczowym czynnikiem wpływającym na zmianę sposobu usuwania odpadów w rolnictwie.

Wyniki

Poziom wykorzystania stałych ścieków w rolnictwie w krajach Europy Wschodniej jest stosunkowo niższy w porównaniu ze starymi krajami członkowskimi i zwiększa się w ciągu ostatnich dwóch dekad. Wynika to głównie z dwóch czynników, po pierwsze, ograniczenia presji wynikającej z rosnącej ilości osadów ściekowych wytwarzanych w oczyszczalniach ścieków oraz, po drugie, właściwości osadów

from Eurostat for the phosphorus balance between 2015 and 2019 shows that Bulgaria and Czechia have a shortage in providing phosphorous balance in their cropping practices, as for Bulgaria the annual phosphorus disappearance per hectare exceeds the input (-0.8 kg/ha for Czechia and -0.2 kg/ha for Bulgaria). The most dramatic is the phosphorous balance in Romanian agriculture, where for five years is 5.6 kg/ha. The situation in Hungary is very similar to that in Czechia as the shortage amounts to -0.8 kg/ha on an annual basis.

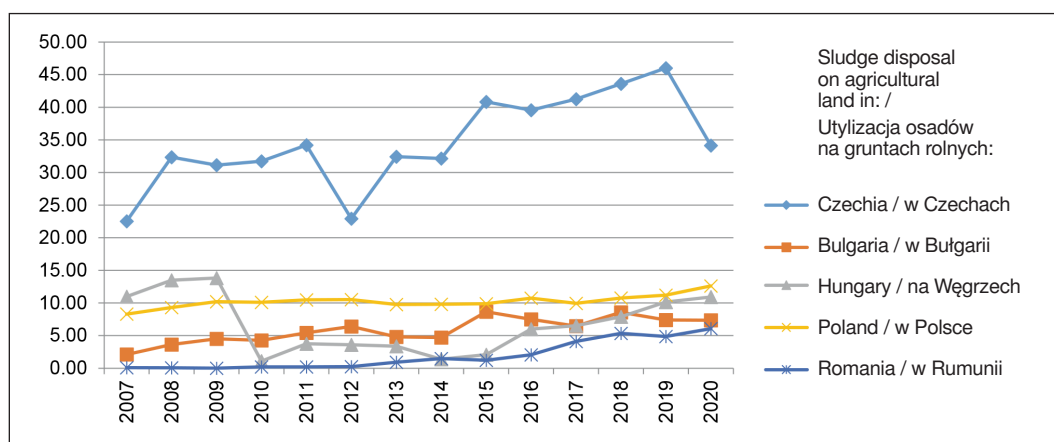
According to report prepared for European Commission (2010), in the national waste management plan (NWMP) of Poland, it was assumed that until 2020, approximately 30% of the volume of produced sewage sludge would be used in agriculture. Sewage sludge management is one of the most important environmental problems in Poland (Przydatek & Wota, 2020). The highest volume of sludge utilization on agricultural land from 2007 and 2020 in Czechia is about 35 kg/ha yearly, whereas the smallest amount is observed in Romania – less than 2 kg/ha (Figure 1). Besides, the Czech agriculture is characterized by the largest usage of inorganic nitrogen 104 kg/ha, whereas in Romania it is 40 kg/ha, which implies. It implies for a low substitution behavior practiced by producers in both countries to use sludge instead of chemical fertilizers in order to maintain soil nutrition balance.

umożliwiających ich wykorzystanie jako składnika odżywczego zamiast nawozów. Dane Eurostatu za bilans fosforu w latach 2015–2019 pokazują, że Bułgaria i Czechy mają niedobory w zapewnianiu równowagi fosforu w swoich praktykach uprawnych, gdyż w przypadku Bułgarii roczny zanik fosforu na hektar przekracza napływ (odpowiednio $-0,8$ kg/ha dla Czech i $-0,2$ kg/ha dla Bułgarii). Najbardziej negatywny jest bilans fosforu w rolnictwie rumuńskim, gdzie w ciągu pięciu lat wynosi $5,6$ kg/ha. Sytuacja na Węgrzech jest bardzo podobna do tej w Czechach, gdzie niedobory mierzone są na poziomie $-0,8$ kg/ha w skali roku.

Według raportu przygotowanego dla Komisji Europejskiej (European Commission, 2010) w krajowym planie gospodarki odpadami (KPGO) Polski założono, że do roku 2020 około 30% objętości wytwarzanych osadów ściekowych będzie wykorzystywane w rolnictwie. Zagospodarowanie osadów ściekowych jest jednym z najważniejszych problemów środowiskowych w Polsce (Przydatek i Wota, 2020). Największą ilość wykorzystania osadów na gruntach rolnych w tym czasie notuje się w Czechach – średnio około 35 kg/ha rocznie (2007–2020), a najmniejszą w Rumunii – poniżej 2 kg/ha (wykr. 1). Poza tym czeskie rolnictwo charakteryzuje się największym zużyciem azotu nieorganicznego wynoszącego 104 kg/ha, podczas gdy Rumunia znajduje się po przeciwnej stronie i zużycie to wynosi 40 kg/ha. Oznacza to niską substytucyjność praktykowaną przez producentów w obydwu krajach w zakresie stosowania osadów zamiast nawozów chemicznych w celu utrzymania żyzności gleby.

Figure 1. Sludge disposal on arable land in Bulgaria and other selected EU countries (kg/ha)

Wykres 1. Zagospodarowanie osadów na gruntach ornych w Bułgarii, Czechach, Polsce, Rumunii i na Węgrzech (kg/ha)



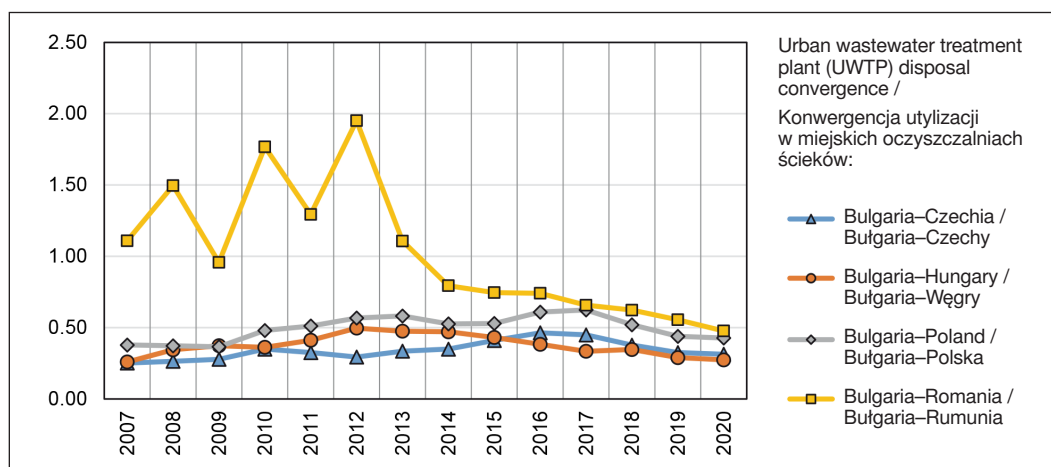
Source: authors' own calculations based on Eurostat data (2023).

Źródło: obliczenia autora na podstawie danych Eurostatu (2023).

Except for the beginning of the reviewed period under consideration (2007–2013), Bulgaria rates higher in terms of production of wastewater output per capita compared to Romania (Figure 2). In the last programming period of the European Union (2014–2020), Bulgarian sludge production relatively lags behind and the convergence coefficient is even decreasing, which is indicative for divergence. Interestingly, Hungary and Czechia have the best performance in terms of this indicator, which, on one hand illustrates the level of urbanization and the coverage by wastewater treatment plants, whereas on the other hand, the levels of production and extraction of sludge become a prerequisite for the development of new economic cycles related to sludge designations. In Poland and Romania, which rather belong to medium-sized EU countries in terms of population and territory, the production of sludge per capita are in approximate boundaries in recent years and is about 15 kg/per person. According to the data from Eurostat on 2020, Poland in recent years has managed to provide the sewage system for 75% of the population connected to wastewater treatment plants, with Czechia and Hungary being covered in 86% and 83%, respectively. Only 54% of the whole Romania's population is connected to sewage systems in 2019, i.e. 10.5 million inhabitants, according to data from the National Statistics Institute (Romanian Insider, 2020). Altogether, it seems to be likely that the low level of sludge use in agriculture in Romania for the first years after 2007 can be explained by a significant share of landfill disposal.

Bułgaria, w przeliczeniu na mieszkańca, poza początkiem analizowanego okresu obejmującego lata 2007–2013, w porównaniu z Rumunią, plasuje się wyżej pod względem produkcji ścieków (wykr. 2). W ostatnim okresie programowania UE na lata 2014–2020 produkcja osadów w Bułgarii jest stosunkowo opóźniona, a współczynnik konwergencji nawet maleje. Co ciekawe, najlepsze wyniki w ramach tego wskaźnika osiągają Węgry i Czechy, co z jednej strony ilustruje poziom urbanizacji i zakres wykorzystywania oczyszczalni ścieków, natomiast z drugiej strony poziom produkcji i ekstrakcji osadów staje się warunkiem wstępnym na rzecz opracowania nowych cykli gospodarczych związanych z przeznaczeniem osadów. W Polsce i Rumunii, które pod względem liczby ludności i terytorium należą raczej do średnich krajów UE, produkcja osadów na mieszkańca kształtuje się w ostatnich latach w przybliżeniu na poziomie około 15 kg/osobę. Według danych Eurostatu za rok 2020, Polsce w ostatnich latach udało się objąć usługami kanalizacji 75% populacji podłączonej do oczyszczalni ścieków, a Czechom – 86% i Węgom – 83%. Tylko 54% całej populacji Rumunii było podłączonych do kanalizacji w 2019 r., czyli 10,5 mln mieszkańców, powołując się na dane Narodowego Instytutu Statystycznego (Romanian Insider, 2020). W sumie okazuje się prawdopodobne, że niski poziom wykorzystania osadów w rolnictwie w Rumunii w pierwszych latach po 2007 r. można wytłumaczyć znacznym udziałem składowania na wysypiskach.

Figure 2. Convergence of sludge production per capita in Bulgaria and other selected EU countries
Wykres 2. Konwergencja produkcji osadów na mieszkańca pomiędzy Bułgarią, Czechami, Polską, Rumunią i Węgrami



Source: authors' calculations based on Eurostat data (2023).

Źródło: obliczenia autora na podstawie danych Eurostatu (2023).

The use of sludge in agriculture within the EU is currently regulated mainly by limits on heavy metals (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn) listed in Council Directive No. 86/278/EEC of 12 June 1986, which is outdated and does not reflect the current needs of ensuring the safety of sludge application in agriculture (Hudcová et al., 2019). It is ascertained that sewage sludge consists of valuable resources (25–35% in dry solids), nitrogen (4–5% in dry solids), phosphorus (2–3%), oxygen (20–25% in dry solids) and other residuals (EurEau, 2021). It is pointed out that regardless of the decline and restrictions about the usage of sludge in agriculture, it still constitutes a predominant share in the sludge outlets within EU. It is observed that in Europe around 48% of sludge is related to agriculture and in 2021 27% were incinerated. According to Marin & Rusănescu (2023, p. 16) “sewage sludge applied to agricultural soil has improved the physical, chemical and biological properties of the soil and can be used as a fertilizer for degraded soils.”

The selected Member States have a divergent share of sludge used in agriculture out of total sludge production. In 2020, Bulgaria reached up to 58% utilization of sludge out of derived quantities, while in Hungary after 2009 its use in agriculture sharply dropped, which in 2020 was estimated at 19%. In Poland, the agricultural sludge use is 24%, in Czechia – 39%, and Romania – 21%. Although, Bulgaria lagged behind selected countries in terms of convergence related to sludge production and its common disposal, it demonstrates higher convergence and even exceeds the agricultural utilization per hectare compared to Romania and Hungary for most of the period under consideration. The entire trend in the convergence of the agricultural use of sludge in Bulgaria compared to selected countries can be divided into a growth during the first half of the period and a notable divergence after 2015 (Figure 3). It turns out independently that in Bulgaria, the use and recycling of sludge from wastewater treatment plants through soils and agricultural land is one of the most designated methods (Ivanov, Marinova et al., 2021). The convergence in agricultural use in Bulgaria compared to similar Eastern European countries is ranked after Czechia, Poland, and Hungary in the last years due to slow progress in sludge production and increasing the size of arable lands by 15% for the whole period, with Czechia recording an 18% decrease. The lack of progress in agricultural sludge use in terms of the convergence of Bulgaria in relation to the aforementioned countries is reported in terms of the prevalence of alternative sludge application compared to conventional mineral fertilization (Ivanov, 2020).

Wykorzystanie osadów w rolnictwie na terenie UE regulowane jest obecnie głównie ograniczeniami limitów zawartości metali ciężkich (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb i Zn) wymienionych w dyrektywie Rady nr 86/278/EWG z 12 czerwca 1986 r., która jest przestarzała i nie odzwierciedla aktualnej potrzeby zapewnienia bezpieczeństwa stosowania osadów w rolnictwie (Hudcová i in., 2019). Stwierdzono, że osady ściekowe składają się z cennych surowców (25–35% w suchej masie), azotu (4–5% w suchej masie), fosforu (2–3%), tlenu (20–25% w suchej masie) i innych (EurEau, 2021). Wskazano, że pomimo spadku i ograniczeń w wykorzystaniu osadów w rolnictwie nadal stanowią one dominującą część osadów w UE. Na poziomie europejskim obserwuje się, że około 48% osadów trafia do rolnictwa, a w 2021 r. 27% osadów trafiło do spalania. Osad ściekowy zastosowany do gleby rolniczej poprawia właściwości fizyczne, chemiczne i biologiczne gleby, i może być stosowany jako nawóz do gleb zdegradowanych (Marin i Rusănescu, 2023).

Wybrane w badaniu państwa członkowskie charakteryzują się zróżnicowanym poziomem wykorzystania osadów. W 2020 r. Bułgaria osiągnęła aż 58% wykorzystania osadów z ilości pochodnych, natomiast na Węgrzech po 2009 r. wykorzystanie w rolnictwie gwałtownie spadło, w 2020 r. szacuje się je na 19%. W Polsce wykorzystanie osadów rolniczych wynosi 24%, w Czechach – 39%, w Rumunii – 21%. Choć Bułgaria pozostaje w tyle za wybranymi krajami pod względem konwergencji w zakresie produkcji osadów i wspólnego usuwania osadów, to jednak wykazuje większą konwergencję, a nawet przekroczenie poziomu wykorzystania rolniczego na hektar w porównaniu z Rumunią i Węgrami przez większą część omawianego okresu. Całość tendencji konwergencji rolniczego wykorzystania osadów w Bułgarii w porównaniu z wybranymi krajami można podzielić na wzrost w pierwszej połowie tego okresu i wyraźną konwergencję po 2015 roku (wykr. 3). Okazuje się, że w Bułgarii wykorzystanie i recykling osadów z oczyszczalni ścieków przez gleby i grunty rolne należy do najbardziej uznanych metod (Ivanov, Marinova i in., 2021). Konwergencja w zakresie wykorzystania w rolnictwie Bułgarii w porównaniu z podobnymi krajami Europy Wschodniej plasuje się w ostatnich latach po Czechach, Polsce i Węgrzech ze względu na spowolnienie w produkcji osadów ściekowych i wzrost powierzchni gruntów ornych o 15% w całym okresie, podczas gdy w Czechach spada o 18%. Taka sytuacja braku postępu w konwergencji wykorzystania osadów rolniczych w Bułgarii z wyżej wymienionymi krajami jest odnotowywana w zakresie rozpowszechnienia alternatywnego stosowania osadów w porównaniu ze stosowaniem konwencjonalnych nawozów mineralnych (Ivanov, 2020).

The large discrepancies in the use of sludge in agriculture in Hungary can be explained by transforming quantities disposed into agriculture, but in certain years this is directly in the form of a dried substance, and in others as compost. Interestingly, the lack of agricultural use of sludge in Romania in the first years of the period proves the convergence predominance of Bulgaria, which probably resulted from later acceleration of this application in Romania in that period followed in next years by very fast convergence.

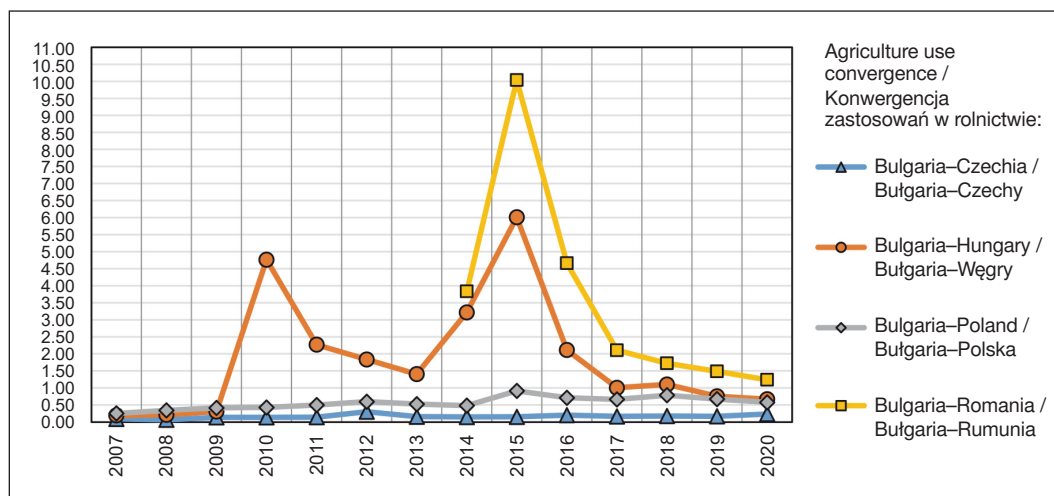
The significance of the analysis is also designated in seeking on relationship between the level of mineral fertilizers application over the years in the selected countries and the quantities of wastewater sludge utilization in agriculture. This is done by calculating the coefficient of asymmetric transmission (ATP), which can range from 0 to 1. The aim of such analysis is to examine how far and in what way the mineral fertilizers used in agriculture are impacted by sludge adoption. When the coefficient is equal to 1, this means an absolute asymmetry in the movement of the two variables during all years covered, which indicates full discrepancies in variables changes. When the coefficient is equal to 0, this means a perfect symmetry between the two variables, where the directions and the rate of variables' changes are exactly the same. As it can be observed, both ends of the ATP measurement are only theoretical options.

Do wyjaśnienia dużych różnic w wykorzystaniu osadów w rolnictwie na Węgrzech może pomóc przekształcenie ilości osadów w rolnictwie, w niektórych latach ma to miejsce w postaci suszu, a w innych kompostu (European Commission, 2010). Interesujący jest także brak rolniczego wykorzystania osadów w Rumunii w pierwszych latach omawianego okresu, co świadczy o przewadze konwergencji Bułgarii, która prawdopodobnie wynikała z późniejszego przyspieszenia tego zastosowania w Rumunii w tym okresie, po którym w kolejnych latach nastąpiła bardzo szybka konwergencja.

Wskazano także znaczenie analizy w poszukiwaniu zależności pomiędzy poziomem stosowania nawozów mineralnych na przestrzeni lat w wybranych krajach a wielkością wykorzystania osadów ściekowych w rolnictwie. Dokonuje się tego poprzez obliczenie współczynnika asymetrycznej transmisji (ATP), który może przyjmować wartości od 0 do 1. Celem takiej analizy jest określenie, w jakim stopniu i w jaki sposób nawozy mineralne stosowane w rolnictwie wpływają na wchłanianie osadów. Gdy współczynnik ten wynosi 1, oznacza to bezwzględną asymetrię w ruchu obu zmiennych we wszystkich objętych badaniem latach, co wskazuje na rozbieżności w zmianach zmiennych. Gdy współczynnik jest równy 0, oznacza to doskonałą symetrię pomiędzy obiema zmiennymi, przy czym kierunki i tempo zmian zmiennych są dokładnie takie same. Jak można zauważyć, oba końce pomiaru ATP są jedynie opcjami teoretycznymi.

Figure 3. Convergence dynamics of sludge use in agriculture in Bulgaria, Czechia, Poland, Romania, and Hungary per hectare

Wykres 3. Dynamika konwergencji rolniczego wykorzystania osadów ściekowych w Bułgarii z Czechami, Polską, Rumunią i Węgrami w przeliczeniu na hektar



Source: authors' calculations based on Eurostat data (2023).

Źródło: obliczenia autora na podstawie danych Eurostatu (2023).

Table 1. Asymmetric transmission of inorganic nutrients to sludge used in agriculture in Bulgaria, Czechia, Poland, Romania and Hungary**Tabela 1. Asymetryczna transmisja nieorganicznych składników odżywczych do osadów wykorzystywanych w rolnictwie w Bułgarii, Czechach, Polsce, Rumunii i na Węgrzech**

Specific coefficients by selected countries / Konkretne współczynniki według wybranych krajów	Inorganic nitrogen – sludge in agriculture, use, asymmetric coefficient / Azot nieorganiczny – osady w rolnictwie, zastosowanie, współczynnik asymetryczny	Correlation coefficient in using inorganic nitrogen to sludge / Współczynnik korelacji wykorzystania azotu nieorganicznego do osadu	Inorganic phosphorous – sludge in agriculture, use asymmetric coefficient / Fosfor nieorganiczny – osady w rolnictwie, zastosowanie, współczynnik asymetryczny	Correlation coefficient in using inorganic phosphorous to sludge / współczynnik korelacji zużycia nieorganicznego fosforu do osadów
Bulgaria / Bułgaria	0.35	0.80	0.40	0.78
Czechia / Czechy	0.54	0.66	0.55	0.52
Hungary / Węgry	0.74	0.03	0.66	0.14
Poland / Polska	0.65	0.04	0.70	-0.27
Rumunia / Rumunia	0.71	0.96	0.69	0.95

Source: authors' calculations based on Eurostat data (2023).

Źródło: obliczenia autora na podstawie danych Eurostatu (2023).

The results of the asymmetric analysis show that there are certain differences between countries, as Bulgaria is the only country, where there is an insignificant asymmetric dependence between the use of sludge and the application of nitrogen and phosphorus through mineral fertilizer (Table 1).

The *ATP* is estimated at 0.35 and 0.40 with regard to nitrogen and phosphorus fertilizer use, respectively. Interesting results are found for Romania, where *ATP* is 0.71 and 0.69 in the case of nitrogen and phosphorus fertilization, respectively, which allows for an assumption that there is some substitution when using the two alternatives of agricultural nutrition. Regardless of the situation in Romania from 2007 to 2020, where one can observe a noticeable increase in the use of sludge in agriculture and mineral fertilizers, there is a certain asymmetry between both volumes, as the years with a higher relative use of sludge in agriculture are characterized by a relatively lower application of mineral fertilizers. The most illustrative example of such a situation is Hungary, where there is a tendency to a lower use of sludge in agriculture, while inorganic fertilization has been used to a greater extent in recent years. In Poland and Czechia, the use of sludge in agriculture increases to a small degree over time, as the mineral fertilizers use increases insignificantly. The asymmetry is from medium to high (Poland is dependent on phosphorus), which shows that there is a certain substitution effect of sludge, as a nutrition substance of the inorganic fertilizers, which might be considered as one of the feasible options to reduce the use of mineral fertilizers. The asymmetric index in selected

Wyniki analizy asymetrycznej pokazują, że istnieją pewne różnice pomiędzy krajami, gdyż Bułgaria jest jedynym krajem, w którym występuje niewielka asymetryczna zależność pomiędzy wykorzystaniem osadów a zastosowaniem azotu i fosforu poprzez nawozy mineralne (tab. 1).

Wartość *ATP* szacuje się na 0,35 w odniesieniu do nawozów azotowych i 0,40 w przypadku stosowania fosforu. Interesujące wyniki uzyskano dla Rumunii, gdzie *ATP* wynosi 0,71 przy zależności od nawożenia azotem i 0,69 przy stosowaniu fosforu, co pozwala przypuszczać, że przy stosowaniu obu alternatyw nawożenia rolniczego występuje pewna substytucja. Niezależnie od sytuacji w Rumunii w latach 2007–2020, gdzie notuje się zauważalny wzrost wykorzystania osadów w rolnictwie oraz wzrost stosowania nawozów mineralnych, istnieje pewna asymetria pomiędzy obydwooma wielkościami, gdyż lata o większym względnym wykorzystaniu osadów w rolnictwie charakteryzują się stosunkowo mniejszym zastosowaniem nawozów mineralnych. Najbardziej ilustrującym przykładem takiej sytuacji są Węgry, gdzie obserwuje się tendencję do zmniejszenia wykorzystania osadów w rolnictwie, przy jednoczesnym wzroście w ostatnich latach nawożenia nieorganicznego. W Polsce i Czechach zużycie osadów w rolnictwie z biegiem lat w niewielkim stopniu wzrasta, gdyż także w niewielkim stopniu wzrasta zużycie nawozów mineralnych. Występuje asymetria, od średniej do dużej (Polska uzależniona od fosforu), co pokazuje, że istnieje pewien efekt substytucyjny osadów jako substancji odżywczej nawozów nieorganicznych, co można uznać za jedną

countries related to the application of inorganic fertilizers and sludge in agriculture demonstrate that the significance of wastewater sludge is relatively limited during the period and farmers increase the use of mineral fertilizers, whereas the sludge grows relatively slight. It can be attributed to regulatory and other constraints as well as to the market situation, where the price of mineral fertilizers in the past, which did not stimulate producers to look for different plant nutritious alternatives.

z możliwych opcji na rzecz ograniczenia stosowania nawozów mineralnych. Wskaźnik asymetryczności w wybranych krajach w zakresie stosowania nawozów nieorganicznych i osadów ściekowych w rolnictwie wskazuje, że znaczenie osadów ściekowych jest w tym okresie stosunkowo ograniczone, a rolnicy zwiększają zużycie nawozów mineralnych, natomiast ilość osadów przyrasta stosunkowo nieznacznie. Można to przypisać ograniczeniom regulacyjnym i innym, a także sytuacji rynkowej, gdzie ceny nawozów mineralnych w przeszłości nie stymulowały producentów do poszukiwania innych alternatyw nawożenia roślin.

Table 2. The impact of transaction costs for institutional adaptation on sludge use in agriculture in Bulgaria, Poland, Romania, and Hungary

Tabela 2. Wpływ kosztów transakcyjnych adaptacji instytucjonalnej na wykorzystanie osadów rolniczych w Bułgarii, Czechach, Polsce, Rumunii i na Węgrzech

Correlation between sludge production and agricultural use / Korelacja między produkcją osadów a ich wykorzystaniem w rolnictwie	Correlation coefficients / Współczynniki korelacji	Anticipated impact of institutional driven transaction costs on sludge use in agriculture / Przewidywany wpływ instytucjonalnych kosztów transakcyjnych na wykorzystanie osadów
Sludge utilization in agriculture in Czechia / Wykorzystanie osadów w rolnictwie w Czechach	-0.54	Probably transactional costs of using sludge in agriculture do not increase over time. / Prawdopodobnie koszty transakcyjne wykorzystania osadów rolniczych nie wzrastają z biegiem czasu.
Sludge utilization in agriculture in Bulgaria / Wykorzystanie osadów w rolnictwie w Bułgarii	0.47	The transaction costs of using sludge in agriculture are tangible and bearable at the cost of wastewater treatment plants. / Koszty transakcyjne wykorzystania osadów w rolnictwie są wymierne i możliwe do poniesienia w ramach kosztów oczyszczalni ścieków.
Sludge utilization in agriculture in Hungary / Wykorzystanie osadów w rolnictwie na Węgrzech	0.19	Transaction costs are relatively high for agricultural disposal along with a likely stimulus for other applications. / Koszty transakcyjne w przypadku usuwania odpadów rolnych są stosunkowo wysokie, co wiąże się z prawdopodobnym bodźcem do innego ich przeznaczenia.
Sludge utilization in agriculture in Poland / Wykorzystanie osadów w rolnictwie w Polsce	0.35	Transaction costs do not change over years, as at the same time they are ranked with moderate burden. / Koszty transakcyjne nie zmieniają się na przestrzeni lat, gdyż jednocześnie zaliczane są do grupy o umiarkowanym obciążeniu.
Sludge utilization in agriculture in Romania / Wykorzystanie osadów w rolnictwie w Rumunii	0.84	Transaction costs of using sludge by farmers are extremely high in the early years and have significantly dropped in recent years, but they still cannot be ignored. / Koszty transakcyjne wykorzystania osadów przez rolników są w pierwszych latach niezwykle wysokie, a w ostatnich latach znacząco spadły, lecz nadal nie można ich pominąć.

Source: authors' calculations based on Eurostat data (2023).

Źródło: obliczenia autora na podstawie danych Eurostatu (2023).

Although various factors affect the use of sludge in agriculture, it is assumed that transaction costs are a not minor factor. Transaction costs are supposed to change the situation in the distribution outlet of wastewater sludge from one side but also shape the business model in the utilization chain. It is

Choć przyczyny obserwowanej sytuacji w zakresie wykorzystania osadów w rolnictwie są różne, przyjmuje się, że koszty transakcyjne nie są czynnikiem drugorzędym. Koszty transakcyjne mają z jednej strony zmienić sytuację na wylocie dystrybucji osadów ściekowych, ale także ukształtować

reported that certain alignment of the governance structures can emerge related to the transactions and interdependences created when seeking for wastewater reuse (Jiménez i in., 2020). Correlation analysis shows that Czechia has a negative correlation between sludge production and agricultural use, which means that as sludge production increases, agricultural use decreases with a correlation coefficient of -0.54 (Table 2). It is likely that the obstacles to use sludge in agriculture are increasing, while the incentives to designate sludge in other directions are growing. It can be assumed that the transaction costs for agricultural use will slightly rise during the period, but are not a major obstacle to maintain this application and interest in other applications is gradually growing, probably due to incentives or commitments.

In terms of production and use of sludge in agriculture, the correlation coefficient for Bulgaria is estimated at 0.47 , which means that the relationship is rather weak. Therefore, the data analysis shows that the transaction costs of using sludge in agriculture are bearable and cannot be identified as a serious obstacle. In Hungary and Poland, the correlation between production and use of sludge in agriculture is insignificant, and from the share of sludge input in agriculture, it can be argued that transaction costs in Hungary are relatively high, while in Poland they do not change over the years, as at the same time they are regarded as moderate burden. Meanwhile, it is concluded that in Poland the “costs related to documentation and filling out applications had the largest share in the structure of estimated private transaction costs” (Kusz, 2019, p. 63).

The highest correlation coefficient is found in Romania, which is 0.84 , which coincides with a noticeable increase in sludge production and an increase in its application in agriculture. This implies that the transaction costs of using sludge by farmers are extremely high in the early years of the period, but have significantly dropped in recent years, but they still cannot be ignored.

Conclusions

The aim of the study was to compare the Bulgarian convergence of sludge utilization with other close EU countries and by correlation and asymmetric analysis to study how and to what extent transaction costs and sludge utilization impact the use of sludge and inorganic fertilizers in agriculture. This issue is

model biznesowy w tym łańcuchu utylizacji. Może pojawić się pewne uzgodnienie struktur zarządzania w związku z transakcjami i współzależnościami powstałymi w związku z ponownym wykorzystaniem ścieków (Jiménez i in., 2020). Analiza korelacji pokazuje, że w Czechach występuje ujemna korelacja pomiędzy produkcją osadów a ich wykorzystaniem w rolnictwie, co oznacza, że wraz ze wzrostem produkcji osadów wykorzystanie w rolnictwie maleje ze współczynnikiem korelacji wynoszącym $-0,54$ (tab. 2). Prawdopodobne jest, że przeszkody w wykorzystaniu osadów w rolnictwie nasilają się przy jednoczesnym zwiększeniu zachęt do wykorzystywania osadów w innych kierunkach. Można założyć, że koszty transakcyjne dotyczące wykorzystania rolniczego nieznacznie wzrosną w tym okresie, ale nie stanowią poważnej bariery w utrzymaniu tego przeznaczenia, a zainteresowanie innymi zastosowaniami stopniowo wzrasta, prawdopodobnie w wyniku zachęt lub zobowiązań.

Współczynnik korelacji dla Bułgarii w zakresie produkcji i wykorzystania osadów w rolnictwie wynosi $0,47$, co oznacza, że zależność jest raczej słaba. Zatem na podstawie analizy wszystkich danych można założyć, że koszty transakcyjne wykorzystania osadów w rolnictwie są do udźwignięcia i nie można ich uznać za poważną przeszkodę. Na Węgrzech i w Polsce korelacja pomiędzy produkcją a wykorzystaniem osadów w rolnictwie jest niewielka, a z udziału osadów wsadowych w rolnictwie można ocenić, że koszty transakcyjne są na Węgrzech stosunkowo wysokie, podczas gdy w Polsce nie zmieniają się w ciągu lat, gdyż jednocześnie zaliczane są do obciążeń umiarkowanych. Tymczasem stwierdza się, że w Polsce największy udział w strukturze szacunkowych kosztów transakcji prywatnych miały koszty związane z dokumentacją i wypełnieniem wniosków (Kusz, 2019).

Najwyższy współczynnik korelacji występuje w Rumunii i wynosi $0,84$, co zbiega się z zauważalnym wzrostem produkcji osadów i wzrostem ich stosowania w rolnictwie. Sugeruje to, że koszty transakcyjne wykorzystania osadów przez rolników są niezwykle wysokie we wczesnych latach tego okresu, ale ostatnio znacznie spadły, choć nadal nie można ich zignorować.

Wnioski

Celem badania było porównanie bułgarskiej konwergencji wykorzystania osadów z wybranymi krajami UE oraz poprzez analizę korelacji i asymetryczności zbadanie, w jaki sposób i w jakim stopniu koszty transakcyjne i wykorzystanie osadów wpływają na zakres wykorzystania osadów i wykorzystanie

interesting and its relevance increases due to the new contemporary realities connected to impetus for climate change mitigation, higher environmental protection, and better utilization of the natural and economic resources (Communication, 2021). The convergence analysis is presented by an index method, indicating the timeframe and subject matter as well as changes of selected EU countries in each year of the period under consideration, not just to summarize if those countries are integrated and to what extent in terms of sludge production and agricultural disposal from 2007 to 2020. This convergence analysis is fulfilled, as the indicators for Bulgaria are used as a basis to conduct this comparative study, which clearly demonstrates that agricultural utilization of sludge is still a primary and relevant utilization outlet for near and mid-term future as well. All of the selected countries show greater or poorer progress in switching their sewerage system to wastewater treatment plants, which is supposed to boost the environmental improvement measures and the potential for regeneration and biomass reuse. It should be noted that Czechia, Hungary, and Poland have very good indicators for the production of sludge and its disposal in agriculture, not only compared to Bulgaria, but also compared to the average level for the EU. The accession of these countries to the EU in 2004 has become one of the main factors for the positive outcomes and this is not entirely attributable to the European and public funding, but rather is mainly explained by the needs to achieve ambitious European goals. The results achieved in Romania during the second period of implementation of the European structural policy under operational programs since 2014 are also noteworthy due to accelerated catching up and approximation to the average European levels in terms of sludge production and its use in agriculture.

Although the benefits of using wastewater sludge in agriculture are perceived to be considerable, there are critical questions as to what are the main factors that determine it and why there are different levels of sludge disposal in agriculture in different countries. In Bulgaria, transaction costs are defined as a highly substantial and critical factor which determines what part of sludge is used in agriculture and determine the demand for its biomass among agricultural producers. Agriculture may develop and operate without sludge utilization and it is unfeasible to conclude that a major substitution of mineral fertilizers might be attained by sludge application. Wastewater treatment plants are interested in agriculture more than vice versa, because there is pressure on possible disposal of wastewater sludge outlets in terms of constraints of outlet channels and needs from high

nawozów nieorganicznych. Zagadnienie to jest interesujące, a jego aktualność wyznaczają nowe współczesne realia, związane z impulsem do łagodzenia zmian klimatycznych, wyższą ochroną środowiska i lepszym wykorzystaniem zasobów naturalnych i gospodarczych (Communication, 2021). Analiza konwergencji ma na celu przedstawienie metodą wskaźnikową, gdzie i jaka jest sytuacja oraz zmiany w wybranych krajach UE w każdym odrębnym roku obserwowanego okresu, a nie tylko podsumowanie, czy i jaki jest związek integracji tych krajów w zakresie produkcji osadów i utylizacji osadów w latach 2007–2020. Niniejsza analiza konwergencji została spełniona, ponieważ wskaźniki dla Bułgarii wykorzystano jako podstawę do przeprowadzenia niniejszego badania porównawczego, które wyraźnie pokazuje, że wykorzystanie osadów w rolnictwie jest nadal głównym i właściwym sposobem wykorzystania także na przyszłość bliższą i średnio-terminową. Wszystkie wybrane kraje wykazują mniejszy lub większy postęp w kierowaniu ścieków do oczyszczalni ścieków, co ma przyspieszyć działania na rzecz poprawy stanu środowiska i zwiększyć potencjał regeneracji i ponownego wykorzystania biomasy. Należy zauważyć, że Czechy, Węgry i Polska mają bardzo dobre wartości wskaźników w zakresie produkcji osadów i ich utylizacji w rolnictwie, nie tylko w porównaniu z Bułgarią, ale także w odniesieniu do średniego poziomu dla UE. Przystąpienie tych krajów do UE w 2004 r. stało się jednym z głównych czynników dobrych wyników i nie jest to w pełni przypisywane finansowaniu europejskiemu i publicznemu, ale głównie tłumaczone jest potrzebą osiągnięcia wysoko postawionych celów europejskich. Wyniki osiągnięte w Rumunii w drugim okresie wdrażania europejskiej polityki strukturalnej w ramach programów operacyjnych od 2014 r. są również godne uwagi, połączone przyspieszonym nadrabianiem zaległości i zbliżaniem się do średnich poziomów europejskich w zakresie produkcji osadów i ich wykorzystania w rolnictwie.

Chociaż korzyści wynikające z wykorzystania osadów ściekowych w rolnictwie są postrzegane jako mocna strona, pojawiają się krytyczne pytania dotyczące głównych czynników, które o tym decydują i dlaczego w rolnictwie w różnych krajach występują różne poziomy usuwania osadów. Koszty transakcyjne w Bułgarii określane są jako bardzo wysokie i decydujące o tym, jaka część osadów zostanie wykorzystana w rolnictwie, i determinują zapotrzebowanie producentów rolnych na biomasę. Rolnictwo może rozwijać się i funkcjonować bez wykorzystania osadów, dlatego nie można założyć, że zastosowanie osadów umożliwiłoby znaczne

capital investments for new treatment technologies. It is quite challenging for small wastewater treatment plants and plants located in rural areas, which by economic efficiency may hardly afford to invest and return the capital assets.

The asymmetric analysis found out that the potential of wastewater sludge to complement and reduce the dependency of mineral fertilizers in agriculture is really possible but it is not sufficient for a major supplementation. It is quite possible that in the future, once regulations to reduce the use of mineral fertilizers are implemented, the role of sludge as a substitute will grow. Therefore, sludge should be regarded as a bioresource, capable to bring merit and position as a valuable product in the recycling economy. It will contribute to the change of perception of sludge, which is perceived as a waste and risky environmental substances for decades into a resource bringing opportunity for a bioeconomy-based reality.

zastąpienie nawozów mineralnych. Oczyszczalnie są bardziej zainteresowane rolnictwem niż odwrotnie, ponieważ występuje presja na możliwe usuwanie wylotów osadów ściekowych ze względu na ograniczenia kanałów wylotowych i potrzeby wynikające z wysokich inwestycji kapitałowych w nowe technologie oczyszczania. Jest to dość trudne dla małych oczyszczalni ścieków i tych na obszarach wiejskich, które ze względu na efektywność ekonomiczną z trudem mogą sobie pozwolić na inwestycje i zwrot aktywów kapitałowych.

Analiza asymetryczna wykazała, że potencjał osadów ściekowych do uzupełniania i zmniejszania zależności od nawozów mineralnych w rolnictwie jest rzeczywiście możliwy, ale nie jest wystarczający do znaczącej suplementacji. Jest to całkiem możliwe, że w przyszłości, gdy wprowadzone zostaną regulacje ograniczające zużycie nawozów mineralnych, wzrośnie rola osadów jako substytutu. Dlatego też osady powinny zostać uznane za biozasoby, które mogą przynieść korzyści i zapewnić pozycję cennego produktu w gospodarce recyklingowej. Przyczyni się to do zmiany postrzegania osadów, które przez dziesięciolecia były uważane za odpady i niebezpieczne substancje dla środowiska, w zasób stwarzający szansę dla rzeczywistości bazującej na biogospodarce.

References / Bibliografia

- Barro, R.J., & Sala-i-Martin, X. (1992). Convergence. *Journal of Political Economy*, 100(2), 223–251. <http://nrs.harvard.edu/urn-3:HUL.InstRepos:3451299>
- Brock, W.A., Scheinkman, J.A., Dechert, W.D., & LeBaron, B. (1996). A Test for Independence Based on the Correlation Dimension. *Econometric Reviews*, 15(3), 197–235. <https://doi.org/10.1080/07474939608800353>
- Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions Empty. Forging a Climate-Resilient Europe – the New EU Strategy on Adaptation to Climate Change. COM(2021) 82 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2021%3A82%3AFIN>
- Cordell, D. (2010). *The Story of Phosphorus: Sustainability Implications of Global Phosphorus Scarcity for Food Security*. [Doctoral thesis, Linköping University]. Linköping Studies in Arts and Science, 509. Linköping University Electronic Press. <https://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:291760/FULLTEXT01.pdf>
- Davis, R.D. (2006). The Perception of Biosolids Use in Agriculture: Summary of Survey Findings. WRc Report UC7181/ to Water UK.
- Dyrektorywa Rady z dnia 12 czerwca 1986 r. w sprawie ochrony środowiska, w szczególności gleby, w przypadku wykorzystywania osadów ściekowych w rolnictwie (Dz.U. L 181). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX:31986L0278>
- EurEau. (2021). *Waste Water Treatment – Sludge Management*. Briefing Note. <https://www.eureau.org/resources/briefing-notes/5629-briefing-note-on-sludge-management/file>
- European Commission. (2010). *Environmental, Economic and Social Impacts of the Use of Sewage Sludge on land. Final Report. Part II: Report on Options and Impacts*. Risk & Policy Analysis (RPA), Milieu, WRc (DG ENV.G.4/ETU/2008/0076r). <https://op.europa.eu/it/publication-detail/-/publication/c969374b-01a5-11ec-8f47-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF>
- Eurostat. (2023). *Sewage Sludge Production and Disposal*. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/product/page/env_ww_spd
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2010). *The Wealth of Waste. The Economics of Wastewater Use in Agriculture*. FAO Water Reports, 35. <https://www.fao.org/policy-support/tools-and-publications/resources-details/en/c/1508052/>
- Gude, V.G. (2015). Energy and Water Autarky of Wastewater Treatment and Power Generation Systems. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 45, 52–68. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.055>
- Hudcová, H., Vymazal, J., & Rozkošný, M. (2019). Present Restrictions of Sewage Sludge Application in Agriculture within the European Union. *Soil and Water Research*, 14(2), 104–120. <https://doi.org/10.17221/36/2018-SWR>
- Ivanov, B. (2020). Konvergirane na Balgarkoto zemedelie v selskoto stopanstvo na EC. *Science*, XXX, 5, 10–15. <http://spisanie-nauka.bg/arhiv/5-2020.pdf>
- Ivanov, B., & Bachev, H. (2021). Convergence Analysis of Waste Water Practices among EU Countries. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 27(2), 289–296. <https://www.researchgate.net/publication/351478274>
- Ivanov, B., Marinova, S., Bachev, H., & Georgieva, V. (2021). *Economic and Ecological Effects from Wastewater Use in Agriculture*. <https://www.researchgate.net/publication/349519553>
- Ivanov, B. (2023). Rolya i znachenie na trasaction razhodi za upotrebata na utaikite v zemedeliето. In: Ivanov, B., Bashev, H., Marinova-Garvanska, S., Banov, M., Georgieva, V., Georgieva, R., Tsvyatkov, D., Tachev, Y., Stoychev, W., Paunova, G., & Stankova, D. *Aspekti pri upotrebata na utaike ot otpadachni vodi v zemedeliето* (pp. 121–142). Institute of Agricultural Economics. <https://www.researchgate.net/publication/375990045>
- Jaramillo, M.F., & Restrepo, I. (2017). Wastewater Reuse in Agriculture: A Review about Its Limitations and Benefits. *Sustainability*, 9(10), 1734. <https://doi.org/10.3390/su9101734>
- Jiménez, B., Mara, D., Carr, R., & Brissaud, F. (2010). Wastewater Treatment for Pathogen Removal and Nutrient Conservation: Suitable Systems for Use in Developing Countries. In: A. Bahri, P. Drechsel, L. Raschid-Sally & M. Redwood (Eds.), *Wastewater Irrigation and Health: Assessing and Mitigating Risk in Low-Income Countries* (pp. 149–169). Routledge. <https://publications.iwmi.org/pdf/H042608.pdf>
- Kusz, D.A. (2019). The Local Institutions and Transaction Costs of Public Aid in the Process of Agricultural Modernization. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej / Problems of Agricultural Economics*, 359(2), 43–68. <https://doi.org/10.30858/zer/109922>
- Maaß, O. (2019) *Analyzing Transactions in Linked Value Chains of Wastewater Treatment and Crop Production*. [Doctoral dissertation, Humboldt University of Berlin]. <https://edoc.hu-berlin.de/handle/18452/20917>.
- Mankiw, N.G., Romer, D., & Weil, D.N. (1992). A Contribution to the Empirics of Economic Growth. *Quarterly Journal of Economics*, 107(2), 407–437. <https://doi.org/10.2307/2118477>

- Marin, E., & Rusănescu, C.O. (2023). Agricultural Use of Urban Sewage Sludge from the Wastewater Station in the Municipality of Alexandria in Romania. *Water*, 15(3), 458. <https://doi.org/10.3390/w15030458>
- Marinova, S. (2001). Content of Organic Pollutants in Sludge from WWTP. *Bulgarian Journal of Soil Science, Agrochemistry and Ecology*, 35, (1–3), 74–75.
- Przydatek, G., & Wota, A.K. (2020). Analysis on the Comprehensive Management of Sewage Sludge in Poland. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22, 80–88. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00937-y>
- Report from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Ninth Report on the Implementation Status and the Programmes for Implementation (as required by Article 17) of Council Directive 91/271/EEC Concerning Urban Waste Water Treatment. SWD(2017) 445 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX:52017DC0749>
- Romanian Insider (2020, June 26). *Only 54% of Romania's population had access to sewage systems in 2019*. <https://www.romania-insider.com/romania-population-sewage-2019>
- Sala-i-Martin, X.X. (1994). *Regional Cohesion: Evidence and Theories of Regional Growth and Convergence*. CEPR Discussion Paper, 1075. Centre for Economic Policy Research (CEPR).
- Sarov, A., & Tsvyatкова, D. (2021). Opolzotvoryavane na utaikite ot prechistvatelny stanzii za otpadni vodi v zemeelieto kato agroecosystem usluga. In: H. Bachev (Eds.), *Mechanism i formi na upravlenie na agrosystem usluga v Bulgaria*. (pp. 95–105). Institute of Agricultural Economics.
- Sulewski, P., & Gołaś, M. (2019). Environmental Awareness of Farmers and Farms' Characteristics. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej / Problems of Agricultural Economics*, 361(4), 55–81. <https://doi.org/10.30858/zer/115186>
- Williamson, O.E. (1979). Transaction-Cost Economics: The Governance of Contractual Relations. *The Journal of Law and Economics*, 22(2), 233–261.

Submission date / Data nadesłania: 4.08.2023.

Final revision date / Data ostatniej recenzji: 17.10.2023.

Acceptance date / Data akceptacji: 12.01.2024.

© 2024 Ivanov, B., Tsvyatкова, D., & Bachev, H. This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Autorskie prawa osobiste: Ivanov, B., Tsvyatкова, D. i Bachev, H. (2024). Niniejszy artykuł został opublikowany w otwartym dostępie na licencji Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

