

mgr inż. Natalia Gasik-Kowalska^{1*)}

ORCID: 0009-0008-4972-4487

dr inż. Paweł Grabowski¹⁾

ORCID: 0000-0001-8918-4624

dr Piotr Gryszpanowicz¹⁾

ORCID: 0000-0003-1355-7732

Wstępna analiza wymywalności związków organicznych do wód powierzchniowych z odpadowego destruktu asfaltowego

Preliminary analysis of the leachability of organic compounds into surface waters from waste reclaimed asphalt

DOI: 10.15199/33.2024.06.08

Streszczenie. Rozporządzenie Ministra Środowiska z 2021 r. pozwala na zdjęcie statusu odpadu z destruktu asfaltowego. Materiał taki musi jednak spełniać wytyczne dotyczące m.in. zawartości zanieczyszczeń organicznych, w szczególności wielkocząsteczkowych węglowodorów aromatycznych (WWA). Zastosowanie materiału bez odpowiedniej analizy może wiązać się z wieloma zagrożeniami w stosunku do istniejących ekosystemów, w tym wodnych. W artykule zaprezentowano wyniki analizy wymywalności związków organicznych do ekosystemu wodnego. Przedstawiono wyniki badań próbek destruktu asfaltowego pobranych z 10 ulic w obrębie miasta Płocka. Badania realizowano pod kątem analizy właściwości chemicznych mogących stanowić potencjalne zagrożenie dla środowiska.

Słowa kluczowe: destruktu asfaltowy; środowisko naturalne; status odpadu; zanieczyszczenia.

Abstract. The Regulation of the Minister of the Environment of 2021 allows for the removal of the waste status from reclaimed asphalt. However, such a material must meet guidelines regarding, among others, the content of organic pollutants, in particular polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). Unfortunately, the use of material without analysis may involve a number of threats to existing ecosystems, including aquatic ecosystems. In the article the authors present the results of the analysis of the leachability of organic compounds into the aquatic ecosystem. The results of testing samples of reclaimed asphalt for 10 streets in the city of Płock are presented. The research were carried out to analyze chemical properties that could pose a potential threat to the environment.

Keywords: reclaimed asphalt; natural environment; waste status; pollution.

Zgodnie z normą [1] destruktu asfaltowy to materiał pochodzący ze sfrezowanych warstw asfaltowych lub płyt zerwanych z nawierzchni asfaltowej. Mogą być nim również mieszanki mineralno-asfaltowe (MMA) odrzucone z produkcji lub będące nadwyżką produkcyjną po spełnieniu kryteriów wskazanych przez normę EN 13108-8 [2]. W Polsce do 2021 r. destruktu asfaltowy traktowany był jako odpad. Nie można nim było uzupełniać ubytków w nawierzchniach drogowych lub utwardzać dróg lokalnych. Zniesienie statusu odpadu miało na celu ułatwienie stosowania

go w inwestycjach drogowych. Rozporządzenie [3] określające szczegółowe warunki utraty statusu odpadu w przypadku destruktu asfaltowego definiuje wiele wytycznych, po spełnieniu których przestanie być traktowany jako odpad [4].

Stosowanie destruktu asfaltowego w inwestycjach w drogownictwie daje korzyści ekonomiczne i ekologiczne. Przede wszystkim wtórne wykorzystanie sfrezowanych nawierzchni pozwala na zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych i zużycia energii, szczególnie w aspekcie ograniczenia eksploatacji naturalnych złóż kruszywowych [5 ÷ 7]. Ponadto badania opisane w [8 ÷ 10] potwierdzają, że wprowadzenie destruktu do nowo powstałej mieszanki mineralno-asfaltowej korzystnie wpływa na

parametry wytrzymałościowe kształtowanej nawierzchni. Umożliwia to wykonanie materiałów o porównywalnych lub nawet lepszych właściwościach mechanicznych niż mieszanki pozbawione destruktu. Wśród głównych korzyści ekonomicznych z wbudowania destruktu wyróżnia się zmniejszenie całkowitych kosztów wykonania nawierzchni w porównaniu z mieszanką utworzoną wyłącznie na bazie składników pochodzenia pierwotnego. Ponadto składowanie destruktu generuje koszty, a ponowne wykorzystanie go pozwala na oszczędności [11, 12].

Wtórne wykorzystanie sfrezowanego materiału asfaltowego jest związane z potencjalnym niekorzystnym oddziaływaniem materiału na środowisko,

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii

^{*)} Adres do korespondencji: natalia.kowalska@pw.edu.pl

zwłaszcza wodne. Ruch odbywający się na drodze jest bardziej obciążający dla otoczenia niż budowa i utrzymanie drogi przez okres użytkowania [11, 13]. Na skutek oddziaływania promieni słonecznych, wiatru oraz wody opadowej dochodzi do uwalniania się składników mieszanki do wód gruntowych, w tym również toksycznych, szkodliwych związków [14]. Zgodnie z [14, 15] wietrzenie lub starzenie asfaltu wykazało wyraźny efekt redukcji stężenia wymywalnych metali, takich jak As; Cr; Cu; Ca; K; Li; Mg; Mn; V w eksperymentach na kolumnie przepływowej. W wielu pozycjach literaturowych wskazano na zagrożenia związane z wymywaniem przez wodę śladowych ilości metali ciężkich i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA). Ponadto im starsze destrukty, tym stopień wymywania składników jest większy [16, 17]. Ma na to wpływ dynamiczny rozwój technologii wykonywania nawierzchni. Niepożądane substancje mogą powstawać również podczas eksploatacji jezdni i związane jest to m.in. ze zużyciem pojazdów oraz stanem i rodzajem opon [18].

Stosowanie destruktyw asfaltowych na obszarach wcześniej niezabudowanych powoduje ograniczenie infiltracji opadów atmosferycznych do wód gruntowych. W efekcie spływ powierzchniowy miesza się ze związkami chemicznymi zawartymi w materiale nowo powstałej nawierzchni [19]. Szkodliwość gromadzących się zanieczyszczeń wynika m.in. z ich rodzaju, stanu technicznego pojazdów poruszających się po nawierzchni oraz paliw przez nie wykorzystywanych. Dodatkowymi czynnikami wpływającymi na jakość destruktu asfaltowego są lokalne ograniczenia prędkości i dopuszczalnego tonażu pojazdów, metody utrzymania dróg, a także geologia zabudowywanego obszaru [20].

Badania [17, 21, 22] wskazują, że poza rodzajem i sposobem obróbki materiałów asfaltowych na tempo i poziom wymywania związków chemicznych wpływ ma temperatura fazy ciekłej (wody powierzchniowej) oraz fazy stałej (asfalt), a także pH roztworów powstałych z wód opadowych. W opracowaniu [22] wykazano, że największe stężenie

WWA odnotowano w przypadku pH = 4. Środki na bazie chlorku sodu, czyli sole, posiadające odczyn obojętny stosowane do utrzymania dróg w okresie zimowym mogą wpływać na właściwości asfaltu i przyczynić się do przenikania niechcianych związków do wód powierzchniowych. Zgodnie z badaniami [23] rozpuszczanie soli zmniejsza trwałość asfaltu przy długoterminowym użytkowaniu nawierzchni. Niekorzystnie to wpływa na właściwości nawierzchni, ponieważ wywierają one największy wpływ na wodoodporność mieszanek mineralno-asfaltowych, a także na stabilność w wysokiej temperaturze, zaś w mniejszym stopniu na odporność na pękanie w niskiej temperaturze [23].

Pomimo zwiększanych nakładów na remont i budowę nowych dróg w Polsce, odsetek dróg gruntowych, szczególnie gminnych jest wciąż duży. Brak wystarczających środków na budowę dróg zmusza zarządców do podejmowania działań mających na celu utwardzanie dróg gruntowych różnymi materiałami dostępnymi na rynku. W tych okolicznościach szerokie zastosowanie znalazło kruszywo łamane [24]. Największym mankamentem tego rodzaju nawierzchni, poza pyleniem, jest jednak konieczność regularnych zabiegów zapewniających równość nawierzchni. Poszukiwanie trwalszego materiału, bardziej odpornego na powstawanie nierówności sprawiło, że do utwardzania dróg gruntowych zaczęto stosować destrukty asfaltowe, materiał, który w związku z licznymi remontami polskich dróg był łatwo dostępny. Klasyfikowanie destruktu jako odpadu nie przeszkadzało zarządcom w jego stosowaniu przed 2021 r., czyli przed okresem wejścia w życie rozporządzenia [3]. Używane destrukty asfaltowe nie podlegały podstawowym badaniom i obecnie trudno określić, czy po wbudowaniu są one bezpieczne dla środowiska.

Celem badań przedstawionych w artykule była analiza wymywalności związków organicznych stanowiących składnik lepiszcza w destrukcie asfaltowym. Skoncentrowano się na ilościowym oznaczeniu związków rozpuszczających się w różnych środowiskach, co

pozwoło ocenić wpływ warunków atmosferycznych, głównie deszczu, na stosowane destrukty asfaltowe. Materiał do badań pobrano z 10 odcinków dróg utwardzonych destruktem w Płocku. Dokonano oceny potencjalnych zagrożeń dla środowiska związanych z możliwością wymywania przez deszcz związków organicznych do wód powierzchniowych, a wynikającą z wbudowania w nawierzchnię wtórnych materiałów.

Metody badań

W Polsce wytyczne dotyczące wbudowania destruktu asfaltowego w konstrukcję nawierzchni zdefiniowano w Rozporządzeniu Ministra Klimatu i Środowiska [3]. Należy podkreślić, że jest wiele warunków, koniecznych do spełnienia, aby odzyskany materiał asfaltowy nie był kwalifikowany do odpadów. Wśród zapisów zawartych w rozporządzeniu znajdują się wymagania dotyczące zawartości zanieczyszczeń innych niż powstałe podczas produkcji, stosowania i użytkowania mieszanek mineralno-asfaltowych, obecności wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych. Wskazano też normy określające metody pobierania próbek do badań oraz wymagania dotyczące granulatów asfaltowych.

W ramach programu badawczego próbki poddano badaniu na obecność wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (zgodnie z wytycznymi zawartymi w Załączniku nr 2 rozporządzenia [3]) oraz oznaczono stężenie związków organicznych, wykorzystując roztwory o kwaśnym, obojętnym i zasadowym odczynie. Próbkę pobrano metodą wiercenia z zagęszczonej warstwy zgodnie z normą PN-EN 12697-27. Za pomocą wiertnicy wywiercono próbki rdzeniowe o średnicy 100 mm i wysokości obejmującej pełną grubość analizowanej warstwy nawierzchni [25].

Pobór próbek do badania prowadzono na ulicach, znajdujących się w granicach Płocka, gdzie do utwardzenia nawierzchni gruntowych użyto destruktu asfaltowego. W ramach prac badawczych w porozumieniu z Miejskim Zarządem Dróg w Płocku (instytucją za-

rzządzającą drogami publicznymi w granicach administracyjnych Płocka) zinventaryzowano wszystkie drogi, które w latach 2018 – 2023 zostały utwardzone destruktem asfaltowym. Lokalizację poszczególnych ulic Płocka, z których pobrano próbki, przedstawiono na rysunku 1. Odpowiednio przygotowane



Rys. 1. Mapa Płocka z zaznaczonymi ulicami, z których pobierano próbki do badań; ulica: 1 – Zajęcza; 2 – Jeziorna; 3 – Nizinna; 4 – Boryszewska; 5 – Browarna; 6 – Krakówka; 7 – Parcele; 8 – Powiśle; 9 – Janówek; 10 – Urodzajna

Fig. 1. Map of Płock with marked streets where samples were taken for testing; streets: 1 – Zajęcza; 2 – Jeziorna; 3 – Nizinna; 4 – Boryszewska; 5 – Browarna; 6 – Krakówka; 7 – Parcele; 8 – Powiśle; 9 – Janówek; 10 – Urodzajna

próbki wtórnego materiału asfaltowego o masie 10 g zalano jednym z trzech roztworów – zasadowym (NaOH), kwaśnym (HNO₃) i obojętnym (H₂O), co ma odpowiadać różnym warunkom eksploatacji nawierzchni. Stopień wymywalności związków organicznych analizowano po upływie jednego, trzech i pięciu miesięcy od przygotowania próbek. Następnie po upływie określonego czasu badano fazę wodną, w której umieszczone były próbki w celu określenia poziomu wymywalności związków organicznych. Analizę wykonano w analizatorze TOC-L. Próbkę wyciągów wodnych umieszczono w automatycznym podajniku próbek i poddano analizie TC (węgiel całkowity). Na skutek spalania TC w rurze tworzył się dwutlenek węgla, który po schłodzeniu i odwodnieniu prze-

mieszczał się przez skrubler halogenów prowadzący do jego detekcji w detektorze NDIR (nierozpraszającej podczerwieni). Analogowy sygnał detekcji NDIR tworzył pik, którego pole jest proporcjonalne do stężenia TC w próbce. Na podstawie krzywych kalibracji wyznaczono procentową zawartość związków organicznych w badanych destruktach asfaltowych.

Badanie na obecność wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych wykonano z wykorzystaniem metody uproszczonej, zgodnie z wytycznymi zawartymi w rozporządzeniu [3]. Przed przystąpieniem do badania próbkę wysuszone i oczyszczone z drobin naniesionych podczas poboru oraz transportu. Następnie powierzchnię próbki pokryto preparatem PAK DETECTOR SPRAY, który ułatwia identyfikację obecności smoły na nawierzchniach dróg przez wykrywanie związków wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA). Na skutek występowania WWA o stężeniu 0,5 – 25 mg/kg preparat zmienia kolor z białego na żółty. Badanie przeprowadzano w świetle dziennym oraz w ciemnym pomieszczeniu doświetlanym promieniami UV. Konieczność przeprowadzenia badania w świetle UV wynika z wytycznych zawartych w Załączniku 2 rozporządzenia [3], gdzie w przypadku braku zmiany koloru preparatu w świetle dziennym, próbki należy doświetlić promieniowaniem ultrafioletowym.

Wyniki

Wyniki badań na obecność wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (tabela) wskazują, że w przypadku dwóch z dziesięciu analizowanych ulic (Nizinnej i Browarnej), zaobserwowano zmianę koloru preparatu pokrywającego powierzchnię próbek

Wyniki badań (metodą uproszczoną) obecności wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych

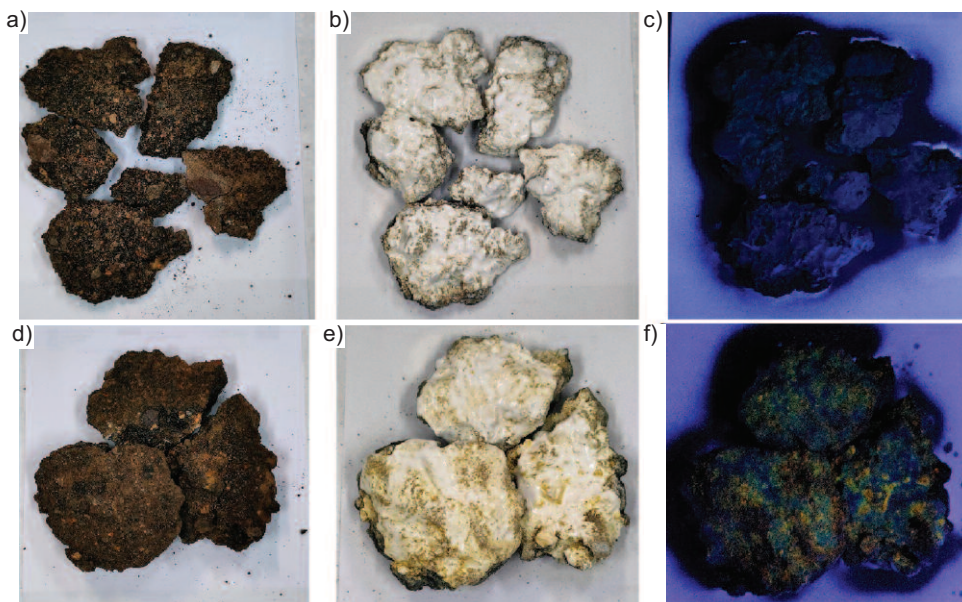
Test results (simplified method) for the presence of polycyclic aromatic hydrocarbons

Ulica	Zmiana koloru w świetle dziennym	Zmiana koloru w świetle UV
Zajęcza	brak zmian	brak zmian
Jeziorna	brak zmian	brak zmian
Nizinna	zmiana na kolor żółty	zmiana na kolor żółty
Boryszewska	brak zmian	brak zmian
Browarna	zmiana na kolor żółty	zmiana na kolor żółty
Krakówka	brak zmian	brak zmian
Parcele	brak zmian	brak zmian
Powiśle	brak zmian	brak zmian
Janówek	brak zmian	brak zmian
Urodzajna	brak zmian	brak zmian

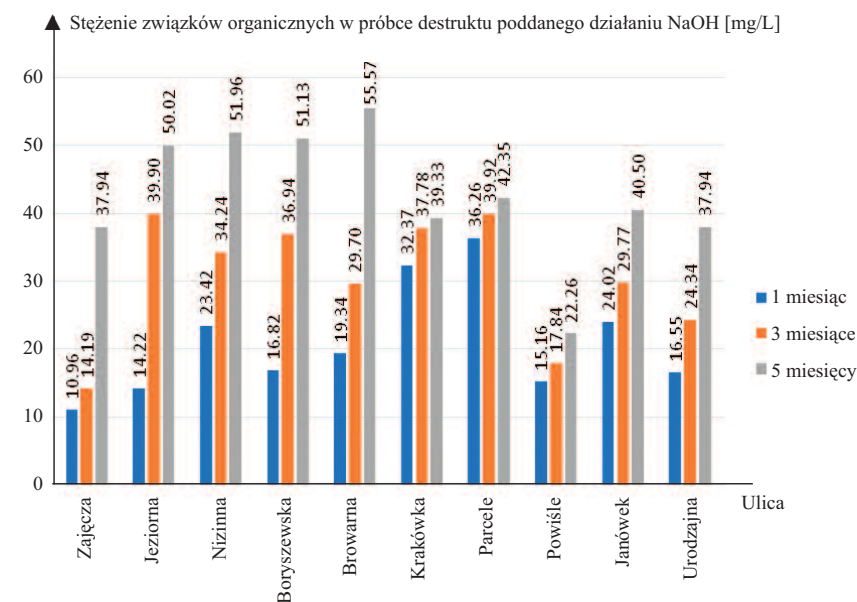
z białego na żółty, zarówno w świetle dziennym, jak i w UV (fotografia). Oznacza to, że w strukturze materiału zawarte są niepożądane związki WWA. Uproszczona metoda badania umożliwia jedynie wykazanie obecności wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych w destrukcie asfaltowym.

Zgodnie z rozporządzeniem [3], aby destrukc mógł zostać pozbawiony statusu odpadu, zawartość benzo(a)pirenu (BaP) oraz łączna zawartość WWA nie może przekraczać maksymalnego dopuszczalnego stężenia wskazanego w dokumencie. W związku z tym, że preparat nie spowodował wyraźnej zmiany barwy na całej powierzchni próbki, a jedynie na jej fragmencie, nie podjęto analizy ilościowej zawartości poszczególnych WWA.

Na skutek wymywania związków węgla z próbek destruktu w roztworze NaOH stężenie związków organicznych jest różne w zależności od miejsca poboru materiału oraz czasu przechowywania próbki (rysunek 2). Po miesiącu stężenie wynosiło 10 – 37 mg/L, po trzech miesiącach wyniki zwiększyły się od 10% (próbki z ul. Parcele), do 180% (próbki z ul. Jeziornej) w porównaniu ze stanem po miesiącu. Po pięciu miesiącach odnotowano kolejne zwiększenie stężenia od 4 (ul. Kra-



Próbki do badań na obecność wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA): a i d – materiał do badań przed pokryciem białym preparatem; b i e – badanie w świetle dziennym; c i f – badanie w świetle UV; a ÷ c – destrukc pobrany na ul. Boryszewskiej – brak zmian koloru; d – e – próbki pobrane na ul. Nizinnej – wyraźna zmiana koloru na żółty
Samples for testing for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a and d – material for testing before covering with white preparation; b and e – examination in daylight; c and f – examination under UV light; a ÷ c – reclaimed sample taken at Boryszewska – no color changes; d – e – samples taken at Nizinna – clear color changed to yellow



Rys. 2. Wyniki badań stężenia związków organicznych w próbkach destruktu przechowywanego w roztworze NaOH o pH = 10 przez jeden, trzy i pięć miesięcy
Fig. 2. Results of testing the concentration of organic compounds in samples of reclaimed material stored in NaOH solution at pH = 10 for one, three and five months

kówka) do 167% (ul. Zajęcza) względem badania poprzedzającego.

Z badań wymywania związków organicznych z destruktu po przechowywaniu próbek w roztworze zasadowym wynika, że najmniejszą podatnością na wymywanie w analizowanym

okresie charakteryzują się próbki z ul. Powisłe. W przypadku ulic Krakówka i Parcele, pomiędzy stopniem wymywania po miesiącu a po pięciu miesiącach oddziaływania roztworu na destrukc, zaobserwowano stosunkowo niewielkie zmiany (do 7%). Wraz

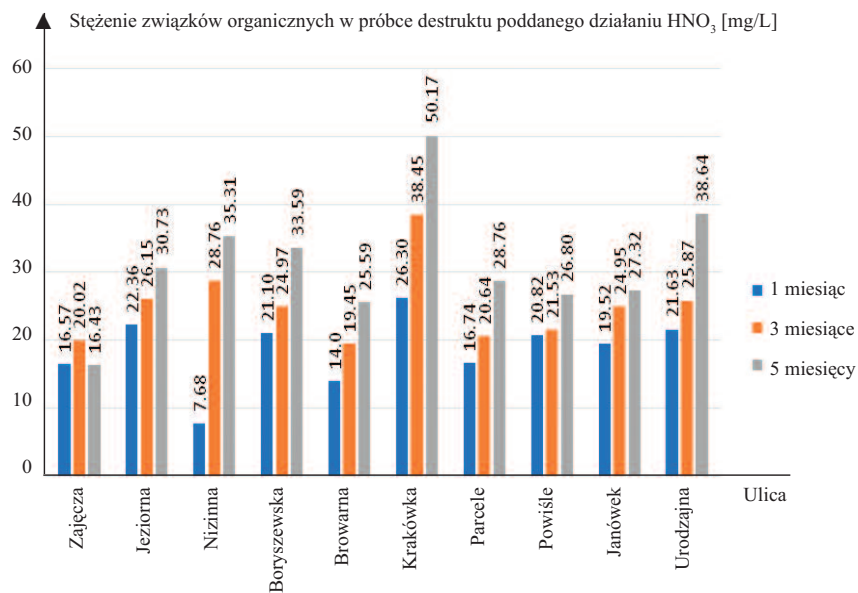
z upływem czasu najszybciej przyrastał stopień wymywania z próbek z ulic – Zajęcza, Jeziorna, Boryszewska (ponadtrzykrotne zwiększenie stężenia po pięciu miesiącach wymywania w NaOH względem wyników po miesiącu).

Wyniki badań próbek, które przebywały w roztworze HNO₃ charakteryzują się mniejszą różnicą względem próbek zanurzonych w roztworze NaOH (rysunek 3). Po miesiącu stężenie wyniosło 7 – 26 mg/L, po trzech miesiącach zwiększyło się od 3% (ul. Powisłe), do 270% (ul. Nizinna) w porównaniu ze stanem sprzed miesiąca. Po pięciu miesiącach odnotowano kolejne zwiększenie stężenia od 10% (ul. Janówek) do 50% (ul. Urodzajna) względem badania po trzech miesiącach. Ponadto w przypadku próbek destruktu z ul. Zajęczej po pięciu miesiącach wymywania nastąpiło

zmniejszenie stężenia wymywanych związków względem badania przeprowadzonego po trzech miesiącach. Oznacza to, że wypłukano znajdujące się w próbce związki organiczne.

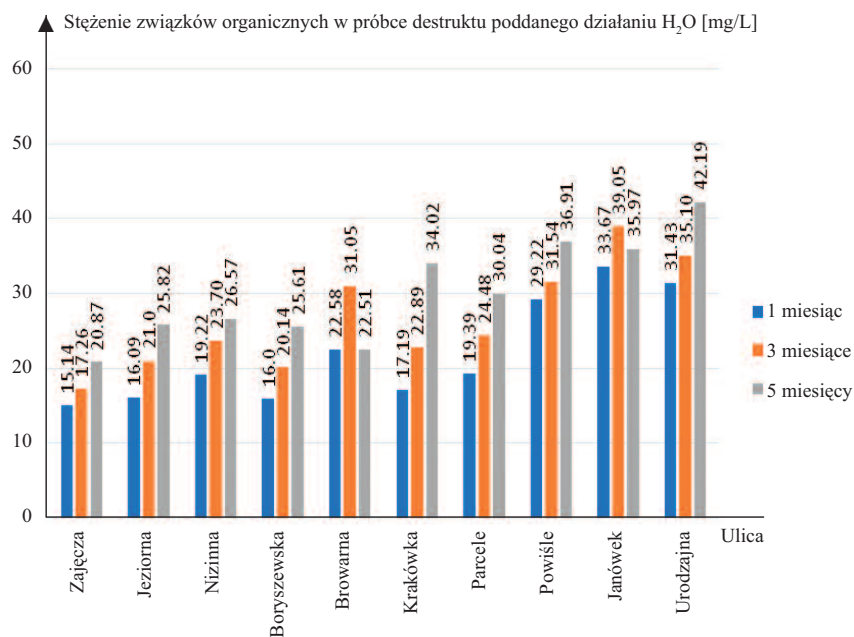
Z oznaczenia stężenia związków organicznych w destruktach po przechowywaniu próbek w roztworze kwaśnym wynika, że największą podatnością na wymywanie charakteryzuje się próbka pobrana z ul. Krakówka. W próbce z ul. Nizinnej nastąpiło prawie pięciokrotne zwiększenie stężenia związków organicznych po pięciu miesiącach wymywania w HNO₃. Wraz z upływem czasu najwolniej przyrastał stopień wymywania z próbek z ulic Powisłe i Zajęczej.

Oznaczenie stężenia związków organicznych w destruktach przechowywanych w wodzie destylowanej, czyli środowisku obojętnym, charakteryzują się najmniejszym rozrzutem wyników spośród trzech analizowanych środowisk (rysunek 4). Stężenie związków organicznych po miesiącu wynosiło 15 – 34 mg/L, a po trzech miesiącach zwiększyło się w stosunku do stanu po miesiącu od 8% (ul. Powisłe) do 38% (ul. Browarna). Po pięciu mie-



Rys. 3. Wyniki badań stężenia związków organicznych w próbkach destruktu przechowywanego w roztworze HNO_3 o $\text{pH} = 4$ przez jeden, trzy i pięć miesięcy

Fig. 3. Test results for the concentration of organic compounds in samples of reclaimed material stored in a solution of HNO_3 at $\text{pH} = 4$ for one, three and five months



Rys. 4. Wyniki badań stężenia związków organicznych w próbkach destruktu przechowywanego w wodzie destylowanej (H_2O) o $\text{pH} = 7$ przez jeden, trzy i pięć miesięcy

Fig. 4. Test results for the concentration of organic compounds in samples of reclaimed material stored in distilled water (H_2O) at $\text{pH} = 7$ for one, three and five months

siącach w przypadku dwóch próbek (ul. Browarna i ul. Janówek) uzyskano zmniejszenie zawartości związków organicznych względem wyników oznaczeń prowadzonych po trzech miesiącach przechowywania próbek w wodzie (po upływie trzech miesięcy przechowywania destruktu w wodzie

wymywanie związków organicznych ustąpiło). Najmniej podatny na wymywanie destruktu pochodził z ulicy Zajęczej. Woda na przestrzeni analizowanych pięciu miesięcy najdynamiczniej wymywała związki organiczne w próbkach pobranych na ulicy Krakówka.

Podsumowanie

Destrukty asfaltowe wbudowane na terenie Płocka przed 2021 r. nie zostały pozbawione statusu odpadu. Materiał ten wykorzystywano na przestrzeni kilku lat i nie jest obecnie możliwe określenie dokładnej daty wbudowania badanych destruktyw. Problematyczne jest również wskazanie miejsca wbudowania, czyli miejsca, z którego pobrano destruktu, i wieku pierwotnie wytworzonego materiału. Różny skład mieszanek mineralno-asfaltowych, ich czas budowy oraz lokalizacja – zarówno pierwotna, jak i ponownego wbudowania destruktyw asfaltowych mają bezpośredni wpływ na wyniki badań stężenia związków organicznych w analizowanych roztworach. W zależności od natężenia ruchu, rodzaju jeżdżących po drodze pojazdów zmienia się struktura nawierzchni i jej podatność na wymywanie. Ponadto opady atmosferyczne czy środki odśnieżające wykorzystywane w okresie zimowym wpływają na zmianę zawartości związków organicznych, co wskazano przez zastosowanie w badaniach roztworów o odczynie silnie zasadowym, kwaśnym oraz obojętnym. W badaniu nie było próbki destruktu, która w każdym z tych trzech roztworów generowałaby podobne stężenie. Wynika z tego, że w zależności od wszystkich wcześniej wspomnianych czynników i warunków eksploatacji, konkretne destrukty są mniej lub bardziej podatne na wymywanie związków organicznych. Jak wynika z przeprowadzonych badań, największe wymywanie związków węgla zaobserwowano w środowisku zasadowym. Wskazuje to na brak wymywania węglanów, które w tym środowisku występują w postaci soli. Duże zwiększenie zawartości węgla całkowitego w odciekach po wymywanym świadczy o wymywanym związków powstających podczas utleniania, czyli najprawdopodobniej kwasów organicznych o złożonej i skomplikowanej budowie [26]. Wymywanie w środowisku kwaśnym oraz obojętnym wskazuje na niewielką ilość wymywanych związków.

W celu oceny potencjalnych zagrożeń dla środowiska należy przeprowadzić analizę chemiczną substancji wymywanych z próbek destruktu

oraz weryfikację stężeń związków WWA na obszarze dwóch ulic, gdzie metoda uproszczona umożliwiła ich wykrycie, ale jedynie o stężeniu poniżej 25 mg/kg, co wskazuje, że zgodnie z rozporządzeniem [3] destrukty nie powinny być kwalifikowane jako odpad. WWA jako węglowodory aromatyczne nie ulegają łatwemu utlenianiu w warunkach otoczenia, nawet w wysokiej temperaturze w okresie letnim [27, 28]. Najprawdopodobniej więc wymywanymi będą związki pochodzące z lepischer asfaltowych stosowanych w okresie powstawania dróg, z których destrukty zostały pobrane.

Na podstawie badań można stwierdzić, że największa wymywalność związków organicznych z destruktyw asfaltowych występowała w przypadku zastosowania roztworu silnie alkalicznego. Oznaczenie prowadzone po miesiącu dało wyniki $10 \div 37$ mg/L, po trzech miesiącach zwiększyły się do nawet 180%, a po pięciu miesiącach odnotowano kolejne zwiększenie od 10 do 167%. Oznaczenie prowadzone na próbkach poddanych oddziaływaniu kwasu o pH = 4 po miesiącu dało wyniki $7 \div 26$ mg/L, po trzech miesiącach zwiększyły się one od 3 do 270%, a po pięciu miesiącach odnotowano kolejne zwiększenie od 10 do 50%. Najmniejszy rozrzut wyników zaobserwowano w przypadku destruktyw poddanych oddziaływaniu wody destylowanej. Po miesiącu stężenie związków organicznych wynosiło od 15 do 34 mg/L. Po trzech miesiącach stężenie związków organicznych zwiększyło się w stosunku do stanu po miesiącu do maksymalnie 38%, a po pięciu miesiącach do 49%. Odczyn wód opadowych oscylował od pH = 4 do pH = 7, zatem wymywanie związków organicznych z destruktyw asfaltowych do wód powierzchniowych na skutek opadów atmosferycznych nie stanowi tak dużego zagrożenia dla środowiska, jak w przypadku roztworów silnie zasadowych. Roztwory o pH = 4 oraz pH = 7 generują zwiększenie stężenia związków organicznych wymywanych z destruktu na przestrzeni czasu znacznie mniej dynamicznie niż w przypadku roztworu o pH = 10.

Literatura

- [1] PN-EN 13108-8:2016-07 Bituminous mixtures – Material specifications – Part 8: Reclaimed asphalt.
- [2] Alenowicz J. Czym jest obecnie „destrukty asfaltowy”? Zmiany w normie EN 13108-8. Drogownictwo. 2017.
- [3] Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z 23 grudnia 2021 r. w sprawie określenia szczegółowych warunków utraty statusu odpadów dla odpadów destruktu asfaltowego.
- [4] Król J. Nowe rozporządzenie w sprawie utraty statusu odpadów destruktu asfaltowego. Drogownictwo. 2021.
- [5] Zhao S, Huang B, Shu X, Woods M. Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.010>.
- [6] Guo N, You Z, Zhao Y, Tan Y, Diab A. Laboratory performance of warm mix asphalt containing recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.002>.
- [7] Yousefi A, Behnood A, Nowruzi A, Haghshenas H. Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP). *Construction and Building Materials*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121200>.
- [8] Zhang K, Huchet F, Hobbs A. A review of thermal processes in the production and their influences on performance of asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement (RAP). *Construction and Building Materials*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.057>.
- [9] Giani MI, Dotelli G, Brandini N, Zampori L. Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. *Resources, Conservation and Recycling*. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.006>.
- [10] Hasan MRM, You Z, Yang X. A comprehensive review of theory, development, and implementation of warm mix asphalt using foaming techniques. *Construction and Building Materials*. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.135>.
- [11] Vidal R, Moliner E, Martínez G, Rubio MC. Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. *Resources, Conservation and Recycling*. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.02.018>.
- [12] Williams Brett A, Willis J. Richard, Shacat J. Asphalt pavement industry survey on recycled materials and warm-mix asphalt usage: 2019, 2020. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21946.82888>.
- [13] Yu B, Lu Q. Life cycle assessment of pavement: Methodology and case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.03.004>.
- [14] Yang Q, Yin H, He X, Chen F, Ali A, Mehta Y, Yan B. Environmental impacts of reclaimed asphalt pavement on leaching of metals into groundwater. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102415>.
- [15] Chen J, Wu J, Wang H, Xu G. Evaluation of asphalt effect on water quality using leaching test and molecular simulation. *Journal of Testing and Evaluation*, 46 (5), 2121-2129. 2018. <https://doi.org/10.1520/JTE20170010>
- [16] Brantley AS, Townsend TG. Leaching of pollutants from reclaimed asphalt pavement”. *Environmental Engineering Science*. 1999. <https://doi.org/10.1089/ees.1999.16.105>
- [17] Birgisdottir H, Gamst J, Christensen TH. Leaching of PAHs from hot mix asphalt pavements. *Environmental Engineering Science*. 2007. <https://doi.org/10.1089/ees.2005.0135>.
- [18] Spreadbury CJ, Clavier KA, Lin AM, Townsend TG. A critical analysis of leaching and environmental risk assessment for reclaimed asphalt pavement management. *Science of the Total Environment*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145741>.
- [19] Liu J, Borst M. Performances of metal concentrations from three permeable pavement infiltrates. *Water research*. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.02.050>.
- [20] Legret M, Odie L, Demare D, Jullien A. Leaching of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons from reclaimed asphalt pavement. *Water Research*. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.06.017>.
- [21] Xu M, Zhang Y. Analysis of leachate contaminants metals in polyphthalamide-modified asphalt and their environmental effects. *Journal of Cleaner Production*. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123239>.
- [22] Brandt HCA, De Groot PC. Aqueous leaching of polycyclic aromatic hydrocarbons from bitumen and asphalt. *Water research*. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00216-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00216-0).
- [23] Guo R, Zhang H, Tan Y. Influence of salt dissolution on durable performance of asphalt and Self-ice-melting asphalt mixture. *Construction and Building Materials*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128329>.
- [24] Koziół W, Ciepliński A, Borec A. Kruszywa w budownictwie. Cz. 1. Kruszywa naturalne. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*. 2015; (4): 98-100.
- [25] PN-EN 12697-27:2017-07 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań – Część 27: Pobieranie próbek. Bituminous mixtures – Test methods – Part 27: Sampling.
- [26] Mill T, Tse D, Loo B, Yao C, Canavesi E. Oxidation pathways for asphalt. *Prepr. ACS Div. Fuel Chem*, 37 (3). 1992.
- [27] Ferrarese E, Andreottola G, Oprea IA. Remediation of PAH-contaminated sediments by chemical oxidation. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.080>.
- [28] Rivas FJ. Polycyclic aromatic hydrocarbons sorbed on soils: a short review of chemical oxidation based treatments. *Journal of Hazardous Materials*. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.048>.

Przyjęto do druku: 22.05.2024 r.