

PRACE GEOGRAFICZNE

zeszyt 173, 2023, 87–107

doi: 10.4467/20833113PG.23.024.19545

Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ

Komisja Geograficzna, Polska Akademia Umiejętności

Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego

TERENOWE METODY BADANIA ZANIECZYSZCZENIA RZEK MAKROPLASTYKIEM

Maciej Liro , *Agnieszka Czajka* , *Hanna Hajdukiewicz* ,
Wojciech Haska, *Anna Zielonka* , *Jakub Dzida*, *Paweł Mikuś* ,
Joanna Zawiejska , *Elżbieta Gorczyca* , *Kazimierz Krzemień* ,
Natalia Zaremba

Field methods for studying macroplastic pollution in rivers

Abstract: The pollution of rivers with macroplastics (plastic particles > 5 mm) is a recent environmental issue that emerged in the mid-20th century. The input of macroplastics into river ecosystems poses a threat to living organisms and diminishes the aesthetic appeal of riparian landscapes. Moreover, microplastic particles generated during the fragmentation of macroplastics in rivers can migrate into other environments, reducing the possibility of their removal from the environment and adversely affecting subsequent organisms and human health. The first step enabling the assessment and mitigation of the aforementioned risks is the collection of direct field data on the quantity of macroplastics polluting the river system. While methodological frameworks for conducting such studies have been developed and described in foreign literature for several years, they have not yet been discussed in Polish literature. This article presents the methodology employed for field research on the input, transport, deposition, and remobilization of macroplastics in fluvial environments. Furthermore, it explores how the acquired information can be applied in practical efforts aimed at reducing river pollution by macroplastics.

Keywords: macroplastic, plastic in rivers, illegal dumping sites, anthropocene, anthropopressure

Zarys treści: Zanieczyszczenie rzek makroplastikiem (cząstkami plastiku > 5 mm) jest nowym problemem środowiskowym występującym od połowy ubiegłego stulecia. Dostawa makroplastiku do środowiska rzecznoego zagraża organizmom żywym i obniża estetykę krajobrazu nadrzecznoego. Co istotne, mikrocząstki plastiku powstające w trakcie fragmentacji makroplastiku w rzece mogą migrować do innych środowisk, zmniejszając możliwość jego usuwania ze środowiska oraz negatywnie wpływając na kolejne organizmy oraz zdrowie ludzi. Pierwszym krokiem umożliwiającym ocenę i ograniczenie wyżej wymienionych ryzyk jest zebranie bezpośrednich informacji terenowych o ilości makroplastiku zanieczyszczającego system fluwialny. Podstawy metodyczne umożliwiające przeprowadzenie takich badań są od kilku lat opracowywane i opisywane w literaturze zagranicznej, jednak nie były do tej pory omawiane w literaturze krajowej. W artykule przedstawiono metodykę wykorzystywaną do badań terenowych nad dostawą, transportem, depozycją i remobilizacją makroplastiku w środowisku fluwialnym. Omówiono także, jak zebrane informacje mogą zostać wykorzystane w działaniach praktycznych zmierzających do ograniczenia zanieczyszczenia rzek makroplastikiem.

Słowa kluczowe: makroplastik, plastik w rzekach, nielegalne wysypiska, Antropocen, antropopresja

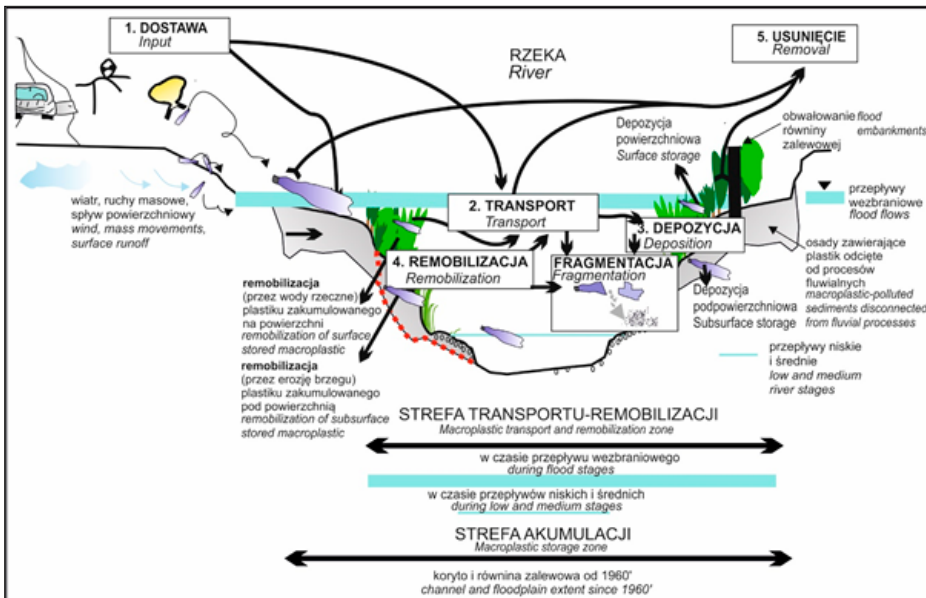
Wstęp

Od połowy ubiegłego stulecia do środowiska w skali świata trafiło łącznie 4,9 mld ton odpadów plastikowych (Geyer i in. 2017), z czego aż połowa w ostatnich kilkunastu latach (Geyer 2022). Obecność odpadów plastikowych potwierdzono do tej pory w większości środowisk wodnych i lądowych (Barnes i in. 2009; Thompson i in. 2009; Jambeck i in. 2015; Zalasiewicz i in. 2016; Hurley i in. 2020), a ich obecność w profilach stratygraficznych (oprócz m.in. obecności pierwiastków promieniotwórczych lub pestycydów) uznano za jeden ze wskaźników epoki antropocenu (Czajka 2007; Waters i in. 2016; Zalasiewicz i in. 2016). Od rozpoczęcia emisji odpadów plastikowych do środowiska, ten nowy materiał jest dostarczany do systemu fluwialnego, w którym podlega depozycji, transportowi i fragmentacji (Lechthaler i in. 2020; van Emmerik, Schwarz 2020; Liro i in. 2020, 2023a, b, 2024; Weber, Lechthaler 2021; van Emmerik i in. 2022, 2023), a w konsekwencji w negatywny sposób oddziałuje na ekosystemy rzeczne (Blettler i in. 2020). Mając na uwadze ciągle rosnącą ilość odpadów plastikowych emitowanych do środowiska (Borelle i in. 2020; Geyer 2022) oraz fakt, iż trwałość makroplastiku w środowisku może sięgać setek, a nawet tysięcy lat (Chamas i in. 2020), opracowanie i wdrożenie metodyki umożliwiającej zdobywanie informacji o tym gdzie i z jaką intensywnością zachodzi w systemie fluwialnym jego dostawa, transport i depozycja, ma fundamentalne znaczenie naukowe i aplikacyjne (van Emmerik i in. 2022; Liro i in. 2023a).

Celem artykułu jest omówienie wypracowanej dotychczas metodyki umożliwiającej systematyczne zbieranie informacji terenowych o typie i ilości makroplastiku dostarczanego, transportowanego, deponowanego i remobilizowanego w obszarze koryta i równiny zalewowej rzeki. Termin „makroplastik” jest rozumiany w pracy jako wszystkie cząstki plastiku większe od 5 mm (van Emmerik, Schwarz 2019).

Terenowe metody badania dostawy, transportu, depozycji i remobilizacji makroplastiku w rzekach

Metodykę umożliwiającą zbieranie informacji o zanieczyszczeniu rzek makroplastikiem omówiliśmy osobno w podziale na zdefiniowane wcześniej procesy: dostawy (ang. *input, delivery*), transportu (ang. *transport, movement*), depozycji (ang. *storage, retention, entrapment*) i remobilizacji (ang. *remobilization*) występujące podczas przemieszczania się makroplastiku przez system fluwialny (Liro i in. 2020) (ryc. 1). Badania terenowe dotyczące procesów dostawy i depozycji makroplastiku opisywane w dalszych podrozdziałach powinny być przeprowadzane w rzekach klimatu umiarkowanego w okresie późnej jesieni lub wczesnej wiosny. W okresach tych



Ryc. 1. Model koncepcyjny przemieszczania się makroplastiku przez system fluwialny. Model wskazuje powiązania pomiędzy procesami dostawy, transportu, depozycji, remobilizacji i usuwania makroplastiku oraz strefy, w których te procesy zachodzą

Fig. 1. Conceptual model of macroplastic transfer through the fluvial system. The model illustrates the relationships between macroplastic input, transport, deposition, remobilization, and removal processes and the zones in which these processes occur

Źródło: Ryc. 2 w: Liro i in., 2020.

Source: Figure 2 in: Liro et al., 2020.

widoczność makroplastiku w terenie jest znacznie lepsza niż w innych porach roku, kiedy występuje pokrywa śnieżna lub gęsta roślinność.

Dostawa makroplastiku do systemu fluwialnego

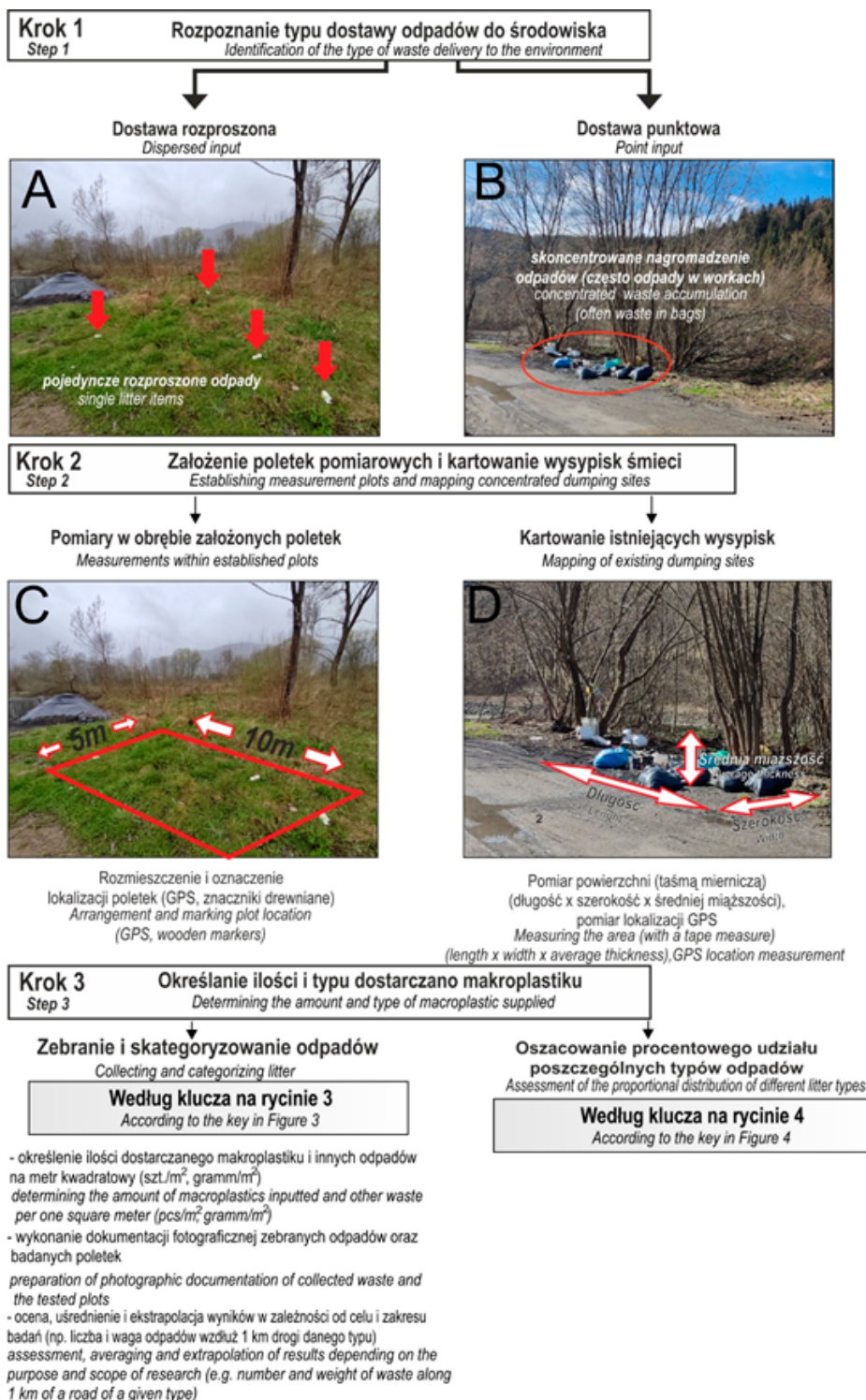
Procesem poprzedzającym przemieszczanie makroplastiku w systemie fluwialnym jest jego dostawa do strefy nadrzecznej (ryc. 1 i 2). Proces ten został zdefiniowany jako dostarczenie makroplastiku do środowiska w obszarze zalewowym rzeki lub w jego bezpośrednim sąsiedztwie (np. zaśmiecanie lub nieprawidłowe składowanie odpadów na terasie zalewowej sąsiadującej z korytem rzeki), lub jako przemieszczenie makroplastiku na obszar równiny zalewowej, wynikające z działania procesów naturalnych (np. wiatru, spływu powierzchniowego, erozji brzegów rzeki, ruchów masowych) (Liro i in. 2020). Taka definicja procesu dostawy makroplastiku do systemu fluwialnego zakłada, że emisja śmieci plastikowych do środowiska w dowolnym miejscu w zlewni rzeki (np. na stoku) może doprowadzić do jego dostawy do systemu fluwialnego na skutek działania procesów naturalnych (np. spływu powierzchniowego). Ma to istotne znaczenie w wyborze miejsc wykonania badań terenowych nad makroplastikiem z uwagi na to, że miejsca jego dostawy do środowiska często nie znajdują się bezpośrednio w obrębie systemu fluwialnego (rozumianego jako koryto i równina zalewowa rzeki), lecz w jego bezpośrednim sąsiedztwie (np. na skarpie terasy nadzalewowej). Ma to szczególne znaczenie w przypadku rzek górskich, gdzie zabudowa i sieć drogowa (stanowiące źródła emisji odpadów) koncentrują się we względnie płaskich (w porównaniu do stoków) dnach dolin rzecznych (Liro i in. 2023b). Określenie wielkości dostawy makroplastiku do środowiska fluwialnego ma kluczowe znaczenie dla lepszego zrozumienia procesów jego transportu i depozycji w rzece, szczególnie w miejscach, gdzie obszary emisji makroplastiku (np. osiedla i drogi) współwystępują z uwarunkowaniami naturalnymi (np. dużym nachyleniem powierzchni terenu, występowaniem osuwisk czy silnego wiatru) sprzyjającymi przemieszczaniu się odpadów ze stoku w obręb równiny zalewowej. Można założyć, że takie przemieszczenie makroplastiku w kierunku równiny zalewowej i koryta będzie szczególnie intensywne w trakcie występowania ekstremalnych opadów i wzbrań, sprzyjających destabilizacji stoków (np. w wyniku erozji bocznej koryta rzecznego u ich podnóża) oraz uruchomieniu transportu materiału skalnego i odpadów w kierunku koryta (np. poprzez spływ powierzchniowy lub ruchy masowe).



Ryc. 2. Schemat postępowania w trakcie badań terenowych dostawy makroplastiku do środowiska

Fig. 2. Quantification of the input of macroplastics into the environment: design of a stepwise field study

Źródło: opracowanie własne. / Source: own study.



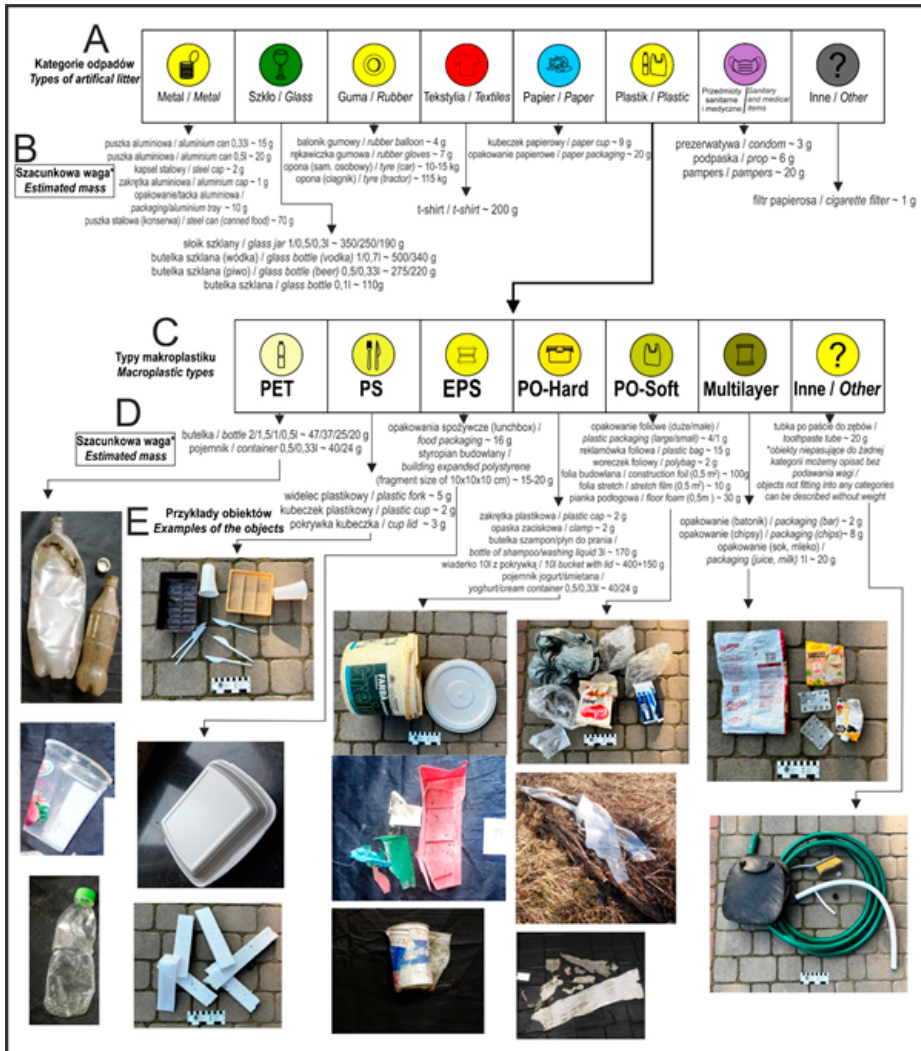
Rozproszona i punktowa dostawa makroplastiku do środowiska

Dotychczasowe badania terenowe pokazują, że w kontekście przestrzennym dostawa makroplastiku do systemu fluwialnego (i środowiska w ogóle) może zachodzić w sposób punktowy (np. nielegalne wysypisko śmieci) (fot. 1) lub rozproszony (np. emisja pojedynczych śmieci wzdłuż dróg, infrastruktury lub zabudowań mieszkalnych) (fot. 2). Często te dwa typy dostawy współwystępują w jednym miejscu, na przykład w otoczeniu przystanku autobusowego zlokalizowanego przy drodze. W związku z różną specyfiką dostawy punktowej i rozproszonej inne są metody badań terenowych tych dwóch sposobów dostawy. Należy jednak podkreślić, że miejsca dostawy punktowej (np. nielegalne wysypiska śmieci) na skutek działania procesów naturalnych (np. wiatru) mogą stać się źródłem rozproszonej dostawy makroplastiku (i innych odpadów) do środowiska. Zasięg przestrzenny takiej rozproszonej dostawy w otoczeniu miejsc dostawy punktowej może być analizowany m.in. poprzez umiejscowione w różnych odległościach od miejsca dostawy punktowej poletka do badania dostawy rozproszonej.

Dostawa rozproszona

Aby oszacować ilość makroplastiku dostarczonego do obszaru nadrzecznego w wyniku dostawy rozproszonej dokonuje się ręcznego liczenia makroplastiku w obrębie poletek o określonej powierzchni, zlokalizowanych w sąsiedztwie potencjalnego źródła dostawy odpadów (ryc. 2A). Przykładowo, jeżeli celem jest określenie ilości makroplastiku dostarczanego do środowiska wzdłuż drogi, wyznaczamy poletka pomiarowe o określonej wielkości (np. 8×4 m) w jej bezpośrednim sąsiedztwie (ryc. 2C). Następnie, należy policzyć znajdujące się w obrębie poletka odpady plastikowe, dokładnie je opisać i przyporządkować do odpowiedniej kategorii (typ makroplastiku) (ryc. 3). Podobną metodykę możemy zastosować w celu monitoringu wielkości dostawy makroplastiku do środowiska w danym okresie czasu (np. w czasie sezonu letniego lub w związku z konkretnym wydarzeniem społeczno-kulturalnym). W takim wypadku, założone poletka badawcze znakujemy w terenie (np. przy użyciu kołków drewnianych) i usuwamy całość widocznego na nich makroplastiku (lub całość odpadów). Następnie, po określonym czasie (np. po wystąpieniu wydarzenia lub zjawiska będącego potencjalnym źródłem emisji makroplastiku do środowiska), ponownie liczymy makroplastik dostarczony na obszar poletka.

Nasze dotychczasowe doświadczenia terenowe pokazują, że określanie masy obiektów w terenie może być problematyczne i mało efektywne w przypadku ich zabrudzenia oraz dużej liczby obiektów. W takiej sytuacji sugerujemy określanie masy



Ryc. 3. Klucz do oznaczania poszczególnych typów odpadów i składu makroplastiku oraz do szacowania ich wagi

Fig. 3. A guide for determining different types of artificial debris, macroplastic types and composition, and for estimating their weight

Źródło: opracowanie własne.

Source: own study.

obiektów przy użyciu klucza przedstawionego na rycinie 3. Klucz ten jest szczególnie przydatny do określania masy obiektów zabrudzonych (np. folie budowlane), wypełnionych płynami (np. butelki, pojemniki) lub niebezpiecznych (odpady sanitarne, szkło), dla których terenowy pomiar wagi jest niemożliwy lub obciążony dużym błędem. Zaproponowany klucz może być w przyszłości uzupełniany o specyficzne typy odpadów występujące w danym obszarze, w oparciu o dane dotyczące masy danego typu odpadów dostępne na stronach internetowych.

Wielkość poletka oraz jego umiejscowienie względem miejsca potencjalnej dostawy odpadów do środowiska zależy od uwarunkowań lokalnych (np. nachylenia i budowy nasypu drogowego, pokrycia roślinnością) i celu badań. Istotne jest, aby poletka pomiarowe lokalizować w miejscach, gdzie uwarunkowania te umożliwiają bezpieczne i niezaburzone (innymi czynnikami) wykonanie pomiaru. Poletka lokalizujemy w obrębie powierzchni o jednorodnym pokryciu terenu (np. beton, nasyp kamienny, trawa, roślinność krzewiasta, roślinność drzewiasta). Poletka wyznaczamy w bezpośrednim sąsiedztwie źródła emisji makroplastiku do środowiska (np. droga, przystanek autobusowy, zabudowa). Wielkość i kształt poletka dobieramy tak, aby możliwie dokładnie rejestrowało ono dostawę makroplastiku z ustalonego w terenie źródła emisji (np. drogi) i jednocześnie umożliwiało efektywne i bezpieczne wykonanie zliczania odpadów. Przykładowo, wyznaczając poletko pomiarowe w sąsiedztwie drogi z utwardzonym poboczem o dużym nachyleniu, powinniśmy dobrać odpowiednią wielkość poletka w ten sposób, aby odpady rejestrowane w poletku jak najdokładniej reprezentowały dostawę odpadów z tej drogi. Dotychczasowe prace przeprowadzone przez nasz zespół w Karpatach pokazują, że najbardziej skutecznym sposobem wyznaczenia poletka jest jego umieszczenie równoległe do liniowego lub dużego punktowego źródła emisji odpadów (Haska i in., 2024). Szerokość poletek w zależności od lokalnych uwarunkowań wynosi przeważnie od 2 do 3 m (w przypadku ścieżek i małych dróg polnych bez skarpy drogowej) do 8–10 m (w przypadku dróg wojewódzkich z nasypem drogowym o dużym spadku), natomiast długość poletek wynosi 8–10 m. Lokalizacja poletek służących pomiarom rozproszonej dostawy makroplastiku jest ściśle uzależniona od celu badań i uwarunkowań lokalnych (tj. np. sąsiedztwa przystanków autobusowych, parkingów, nielegalnych wysypisk śmieci). Istotne jest jednak, aby liczba poletek wyznaczonych w obrębie miejsc o różnych uwarunkowaniach była wystarczająca, by móc określić ich statystyczne znaczenie jako czynników kontrolujących proces dostawy makroplastiku do środowiska.






Przykładowo, jeśli chcemy określić znaczenie dostawy rozproszonej z drogi wojewódzkiej biegnącej przez obszar zalewowy pokryty różnego rodzaju roślinnością, powinniśmy wyznaczyć i wykonać pomiary na odpowiedniej liczbie poletek (minimalnie 8–12) reprezentujących wszystkie typy tych powierzchni. Jeżeli analizowana droga wojewódzka biegnie przez obszary porośnięte lasem dojrzałym, krzewami

i trawą oraz przez tereny o powierzchni nieprzepuszczalnej (np. pokrytej betonem) to podobną liczbę poletek wyznaczamy w każdym z ww. typów pokryć w takiej samej odległości od drogi. Podobne podejście metodyczne stosujemy w przypadku analizy wielkości dostawy makroplastiku do środowiska fluwialnego wzdłuż innych typów źródeł dostawy rozproszonej. Wstępne wyniki badań przeprowadzonych przez nas wzdłuż rzek karpackich sugerują, że na ilość dostarczanego do systemu fluwialnego makroplastiku istotnie wpływa rodzaj i funkcja drogi (np. gruntowe, utwardzone, główne i lokalne) (Haska i in. 2024). Biorąc pod uwagę te uwarunkowania, liczba poletek wyznaczonych wzdłuż dróg różnego typu lub innych analizowanych źródeł emisji makroplastiku (np. przystanków autobusowych) powinna być dobrana tak, aby pozwolić na późniejszą ocenę statystyczną potencjalnych różnic w dostawie makroplastiku pomiędzy dostawą ze źródeł różnego typu (minimalna liczba poletek w danej kategorii drogi nie powinna być niższa niż 8–12). Dzięki takiemu podejściu, ostatecznie możemy obliczyć wartość średnią i inne miary statystyczne dostawy makroplastiku (wyrażone w g/m^2) dostarczanego z danego źródła emisji. W zależności od celu i zakresu badań, wyniki zebrane w opisywany sposób można dalej dowolnie analizować w kontekście potencjalnych czynników warunkujących natężenie tego procesu (np. pokrycia terenu, odległości od zabudowy, lokalnych uwarunkowań społeczno-ekonomicznych). Podstawowym celem wykonywania przedstawionych badań jest dostarczenie bezpośredniej informacji terenowej o wielkości dostawy makroplastiku do różnych elementów systemu fluwialnego. Z naukowego punktu widzenia takie informacje mogą być wykorzystane do zrozumienia czynników wpływających na proces dostawy makroplastiku w danym miejscu oraz do weryfikacji regionalnych i globalnych modeli jego dostawy do środowiska (Liro i in. 2023c). Z praktycznego punktu widzenia, dostarczone informacje mogą być podstawą opracowania lokalnych strategii ograniczania i zapobiegania zanieczyszczeniu plastikiem (np. planowania i zwiększania efektywności zorganizowanych akcji sprzątania).

Dostawa punktowa

Dostawę punktową od rozproszonej odróżnia wyraźna koncentracja przestrzenna odpadów. Dostawa punktowa jest identyfikowana przez występowanie worków wypełnionych odpadami komunalnymi, odpadów wielkogabarytowych (np. lodówki, części samochodowe), dużych nagromadzeń odpadów budowlanych oraz organicznych. W odróżnieniu od dostawy rozproszonej, dla dostawy punktowej możemy dodatkowo określić powierzchnię oraz miąższość wysypiska śmieci (ryc. 2). Wśród czynników decydujących o dostawie punktowej, kluczowe są te związane z intencjonalnym działaniem człowieka (tj. lokalizacja nielegalnych wysypisk śmieci), a jej występowanie w wyniku działania czynników naturalnych wydaje się mieć znacznie

mniejsze znaczenie. Badania terenowe dostawy punktowej makroplastiku (np. nielegalne wysypiska, nieefektywnie działające składowiska odpadów) polegają na zebraniu informacji o lokalizacji takiego wysypiska (np. GPS, smartfon, mapa), pomiarze jego powierzchni i miąższości (np. taśmą mierniczą lub szacunkowo w przypadku większych form) oraz oszacowaniu udziału poszczególnych typów odpadów w obrębie zlokalizowanego wysypiska (ryc. 4). W ocenie wielkości dostawy punktowej makroplastiku do systemu fluwialnego szczególnie istotne jest określenie liczby, wielkości i typu wysypisk zlokalizowanych bezpośrednio w korycie lub na równinie zalewowej rzeki, ponieważ prawdopodobieństwo ich dalszego transportu i fragmentacji w korycie rzeczonym jest najwyższe. Dlatego, w ogólnym ujęciu, terenowe kartowanie wysypisk odpadów makroplastikowych należy przeprowadzić wzdłuż osi doliny rzecznej. Przed wykonaniem kartowania zalecane jest wcześniejsze wyznaczenie obszarów, w których najczęściej dochodzi do nielegalnego wyrzucania śmieci. W ujęciu regionalnym do wytypowania takich miejsc mogą posłużyć mapy potencjalnej emisji odpadów do środowiska (np. Liro i in. 2023d). W ujęciu lokalnym szczególnie istotne jest przeprowadzenie badań odcinków dróg

Kategorie odpadów / Waste categories					
	Komunalne / Municipal	Budowlane / Buildings	Organiczne / Organic	Popiół / Ash	Inne / Others
Orientacyjna zawartość makroplastiku* / Estimated macroplastic content*	Wysoka / High	Średnia / Medium	Brak / No	Brak / No	Niska / Low

Ryc. 4. Typy odpadów kategoryzowane w obrębie miejsc dostawy punktowej oraz udział plastiku w poszczególnych kategoriach odpadów (*na przykładzie wstępnych badań wykonanych w polskich Karpatach)

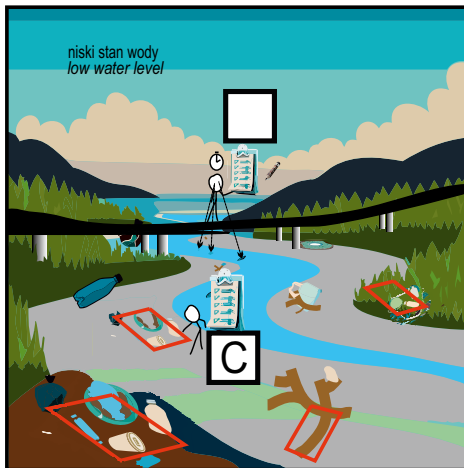
Fig. 4. Waste types classified within point input sites and typical share of plastic in category (*based on preliminary studies in the Polish Carpathians)



Ryc. 5. Schemat postępowania terenowego w trakcie badania procesu transportu (A, B), depozycji (C) i remobilizacji (D) makroplastiku

Fig. 5. Field procedure for studying the processes of transport (A, B), deposition (C) and remobilization (D) of macroplastic

Źródło: opracowanie własne. / Source: own study.



C. DEPOZYCJA MAKROPLASTYKI C. MACROPLASTIC DEPOSITION

- Ręczne zbieranie odpadów widocznych w obrębie poletek rozmieszczonych na różnych typach powierzchni (np. osady nieporośnięte, roślinność zielna, drzewiasta)*

- Manual collection of waste visible within plots distributed on different types of surfaces (e.g., bare sediments, herbaceous, woody vegetation)*

- Zliczanie i kategoryzowanie odpadów widocznych na powierzchni poletek

- Counting and categorizing waste visible within plots

- Ważenie lub szacowanie masy odpadów (gram)

- Estimating the mass of macroplastic waste (gram)

Według klucza na rycinie 3

According to the key in Fig. 3

- Określenie ilości zdeponowanego makroplastiku i innych odpadów na metr kwadratowy (szt./m², gram/m²)

- Quantifying the amount of deposited plastic and other waste per square meter (items/m², grams/m²)

- Wykonanie dokumentacji fotograficznej zebranych odpadów oraz badanych poletek

- Preparation of photographic documentation of collected waste and investigated plots



- Ocena, uśrednienie i ekstrapolacja wyników w zależności od celu i zakresu badań (np. depozycja w obrębie określonej formy lub pokrycia terenu)

- Evaluation, averaging and extrapolation of results depending on the purpose and scope of the study (e.g., deposition within a specific form or land cover)

* Jeżeli planowany jest monitoring remobilizacji makroplastiku, obiekty są zliczane, kategoryzowane i fotografowane w obrębie poletek bez ich usuwania

If monitoring of macroplastic remobilization is planned, objects are counted, categorized and photographed within plots without their removal.

D. REMOBILIZACJA MAKROPLASTYKI D. MACROPLASTIC REMOBILIZATION

- Powtórzenie zliczania i kategoryzowania makroplastiku widocznego w obrębie wcześniej badanych poletek

- Repeated counting and categorization of visible macroplastics within previously surveyed plots

- Wykonanie zdjęć obiektów w miejscu depozycji

- Taking photographs of deposited macroplastics

- Wyliczenie zmian liczby (szt.) i masy odpadów i makroplastiku remobilizowanego z 1 metra kwadratowego poletki (szt./m², gram/m²)

- Quantification of the number (item) and mass of waste and macroplastic remobilized from 1 square meter of the plot (items/m², gram/m²)

A-B. TRANSPORT MAKROPLASTYKI A-B. MACROPLASTIC TRANSPORT

- Zliczanie i kategoryzowanie odpadów pływających po powierzchni wody

- Counting and categorizing waste floating on the water surface

Według klucza na rycinie 3

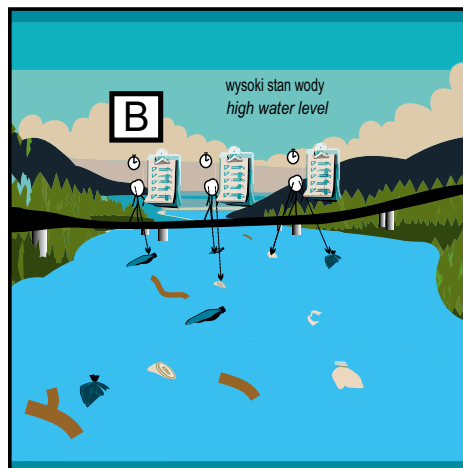
According to the key in Figure 3

- Obliczenie liczby obiektów transportowanych na powierzchni wody w jednostce czasu (godzina, dzień, rok) (np. 10 szt. makroplastików/godzina)

- Calculation of the number of objects transported on the water surface per unit of time (hour, day, year) (e.g., 10 macroplastics/hour)

- Ocena, uśrednienie i ekstrapolacja wyników w zależności od celu i zakresu badań (godzina, doba, rok) (np. 125 szt. makroplastików/doba)

- Assessment, averaging, and extrapolation of results depending on the research objectives and scope (hour, day, year) (e.g., 125 macroplastic items/day)



prowadzących bezpośrednio do koryta rzeki. Nasze dotychczasowe badania sugerują bowiem, że to tam koncentruje się duża część nielegalnych wysypisk śmieci (Haska i in. 2024). Dla każdego zlokalizowanego wysypiska odpadów należy określić jego objętość, dokonując pomiarów jego powierzchni i miąższości. Następnym krokiem jest oszacowanie udziału poszczególnych rodzajów odpadów w danym wysypisku według typów wskazanych na rycinie 4. Największy udział makroplastiku mają odpady komunalne, zawierające znaczny udział opakowań jednorazowego użytku (np. opakowania foliowe, butelki PET) (ryc. 3). Makroplastik znajdujący się także wśród odpadów budowlanych, gdzie dominują większe opakowania (np. wiaderka HDPE), styropian (EPS) oraz folia. Określenie objętości oraz typu odpadów w obrębie kartowanych wysypisk pozwala wskazać te, które mogą w danym obszarze dostarczać do rzeki największą ilość makroplastiku.

Transport makroplastiku w rzece

Proces transportu makroplastiku w rzece definiowany jest jako przemieszczanie się makroplastiku dostarczonego do obszaru zalewowego rzeki w wyniku działania wody płynącej. Proces ten może zachodzić w obrębie koryta rzecznoego (w czasie niskich i średnich przepływów) lub całego obszaru zalewowego rzeki, obejmującego koryto i równinę zalewową (w czasie przepływów wezbraniowych) (ryc. 1) (Liro i in. 2020).

Prostą metodą terenową umożliwiającą określanie wielkości transportu makroplastiku jest zliczanie oraz określanie typu obiektów (ang. *visual counting*) przepływających przez rzekę w danym czasie (González-Fernández, Hanke 2017; Tasseron i in. 2023)¹. Pomiaru takiego dokonuje się najczęściej z mostów, dających dobrą widoczność na lustro wody, w określonych interwałach czasowych (np. co 5 minut). Nasze doświadczenia sugerują, że na niewielkich ciekach (szerokość do ~20 m) pomiar może wykonywać jedna osoba. W przypadku większych rzek, pomiar na jednym moście może wykonywać równocześnie kilka osób. W takim wypadku każda osoba prowadzi obserwacje w wyznaczonym segmencie koryta. Zaletą tej metody jest możliwość wykonywania pomiarów zarówno podczas przepływów niskich jak i wysokich, co daje możliwość oceny wpływu zjawisk hydrologicznych na wielkość transportu makroplastiku (van Emmerik i in. 2023). Podczas pomiaru zlicza się zidentyfikowane obiekty w danych kategoriach odpadów i makroplastików analogicznie jak przy badaniach dostawy rozproszonej (szt./czas) (ryc. 3). Ze względu

¹ Innymi metodami terenowymi określania wielkości transportu mikroplastiku w rzekach jest na przykład pomiar przy użyciu specjalnych siatek (ang. *nets*) lub montowanych barier (ang. *booms*) (przegląd metod w Hurley i in. 2023).

na specyfikę metody badania transportu, zliczaniu podlegają tylko makroplastiki większe niż 2,5–5 cm (van Emmerik i in. 2018; Tasseron i in. 2023). Pomimo ograniczeń opisanej metodyki (ang. *visual counting*) wynikającej z faktu rejestrowania tylko plastiku i innych odpadów transportowanych na powierzchni wody, metoda ta pozwalała do tej pory precyzyjnie określać dzienne, tygodniowe, miesięczne i sezonowe zmiany wielkości transportu makroplastiku w rzekach (van Emmerik i in. 2018, 2023).

Depozycja i remobilizacja makroplastiku w rzece

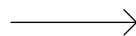
Proces depozycji makroplastiku w systemie fluwialnym jest definiowany jako zaleganie makroplastiku w obszarze zalewowym rzeki, w następstwie jego naturalnej lub antropogenicznej dostawy do tej strefy lub epizodu wcześniejszego transportu (Liro i in. 2020). Na przebieg tego procesu wpływają zarówno czynniki antropogeniczne (np. ograniczenie przestrzenne strefy akumulacji w obwałowanych równinach zalewowych i jej poszerzenie w strefach cofek zbiorników zaporowych), jak i naturalne (np. morfologia koryta) (Liro i in. 2020; van Emmerik i in. 2021).

Proces remobilizacji zachodzi wtedy, gdy zdeponowany makroplastik jest ponownie unoszony przez wody rzeczne np. w wyniku procesów erozyjnych (np. przez erozję brzegów), a następnie transportowany w obrębie koryta lub równiny zalewowej. Remobilizacja może obejmować zarówno makroplastik zdeponowany na powierzchni terenu (tzw. depozycja powierzchniowa, ang. *surface storage*), jak i pod powierzchnią (tzw. depozycja podpowierzchniowa, ang. *subsurface storage*) (ryc. 1) (Liro i in. 2020). Remobilizacja uprzednio zdeponowanego makroplastiku zachodzi podczas wezbrań, dlatego badanie tego procesu powinno być prowadzone w czasie niskich przepływów występujących przed i po wezbraniu. Remobilizacja makroplastiku zdeponowanego pod powierzchnią terenu może wystąpić jednocześnie z remobilizacją makroplastiku zdeponowanego na jego powierzchni, na przykład podczas wezbrań, kiedy to dochodzi do nasilenia procesów erozji w korycie rzeki (ryc. 1). Zakres czasowy i intensywność występowania transportu i remobilizacji w określonej części systemu fluwialnego zależy od liczby i wielkości wezbrań oraz złożoności danego systemu (Liro i in. 2020). Czynniki te decydują zarówno o możliwości długodystansowego transportu makroplastików (np. Weideman i in., 2020), jak i czasie ich akumulacji (Tramoy i in. 2020). Niektóre prace sugerują, że w obrębie systemów złożonych i o wysokim potencjale do akumulacji osadów (np. ujścia rzeki), cykl remobilizacji-depozycji makroplastiku może trwać kilkaset lat (Tramoy i in. 2020).

W dolinie rzecznej można precyzyjnie wyróżnić strefę, w której mogą zachodzić procesy depozycji (tzw. strefa akumulacji makroplastiku, ang. *macroplastic storage zone*) i remobilizacji (ang. *macroplastic remobilization zone*) (ryc. 1). Pierwsza z nich jest

wyznaczana przez zasięg wód wezbraniowych występujących od lat 60. XX wieku, kiedy to rozpoczęła się masowa produkcja plastiku i możliwość jego dostawy do systemu fluwialnego (ryc. 6). Drugą jest natomiast określana jako część strefy depozycji makroplastiku, która może ulegać erozji na skutek oddziaływania wód rzecznych, umożliwiając ponowny transport zakumulowanego wcześniej makroplastiku (Liro i in. 2020).

Metodyka prowadzenia badań nad depozycją i remobilizacją makroplastiku jest podobna do tej stosowanej w dostawie rozproszonej. Najpierw wyznaczamy w obrębie równiny zalewowej i wynurzonych powierzchni w korycie poletka o danej wielkości (np. 4×5 m). Następnie, przy użyciu odbiornika GPS, smartfonu lub mapy zbieramy informacje o położeniu tych poletek oraz ich charakterystykach (np. odległość od koryta, typ pokrycia, wysokość nad koryto). Dalej, wykonujemy ręczne zliczanie odpadów makroplastiku (lub wszystkich odpadów), znajdujących się w obrębie poletka przy użyciu klucza przedstawionego na rycinie 3. Podobnie, jak w przypadku badania dostawy rozproszonej, poletka powinny być wyznaczone tak, aby możliwie jak najdokładniej dokumentowały różne uwarunkowania procesu depozycji makroplastiku w miejscu badań. Ich liczba powinna być dobrana tak, aby umożliwić wykonywanie późniejszej analizy statystycznej potencjalnych różnic w depozycji makroplastiku pomiędzy poletkami o różnych charakterystykach



Ryc. 6. Orientacyjny czas początku produkcji różnych tworzyw sztucznych

Fig. 6. Approximate onset of production of various plastics

Objaśnienia: ABS – żywica termoplastyczna; CA – octan celulozy; EPS – polistyren ekspandowany; EVA (PEVA) – poli(etylen-co-octan winylu); HDPE – polietylen o wysokiej gęstości; LDPE – polietylen o niskiej gęstości; Nomex (poli(izoftalano-1,3-fenyloamid)); PA – poliamid; PC – poliwęglan (polycarbon); PE – polietylen; PET – politereftalan etylenu; POM – polioksymetylen, poli(tlenek metylenu); PP – polipropylen; PVC (PCW) – polichlorek winylu, PU, PUR – poliuretan, Nomex – (poli(izoftalano-1,3-fenyloamid)).

Explanations: ABS – thermoplastic resin; CA – cellulose acetate; EPS – expanded polystyrene; EVA (PEVA) – poly(ethylene-co-vinyl acetate); HDPE – high-density polyethylene; LDPE – low-density polyethylene; Nomex (poly(isophthalano-1,3-phenylenediamide)); PA – polyamide; PC – polycarbonate; PE – polyethylene; PET – polyethylene terephthalate; POM – polyoxymethylene, poly(methylene oxide); PP – polypropylene; PVC (PCW) – polyvinyl chloride, PU, PUR – polyurethane, Nomex – (poly(isophthalano-1,3-phenylenediamide))

Zródło: opracowanie własne na podstawie: https://www.bpf.co.uk/Plastipedia/Plastics_History/Default.aspx (dostęp: 22.01.2024).

Source: own study based on: https://www.bpf.co.uk/Plastipedia/Plastics_History/Default.aspx (accessed: January 22, 2024).

(np. typy pokrycia roślinnego terenu) (minimalna liczba poletek w danej kategorii nie powinna być niższa niż 8–12). Stosując takie podejście, ostatecznie możemy wyliczyć wartość średnią i inne miary statystyczne depozycji makroplastiku (wyrażoną w g/m^2) deponowanego na powierzchni danego typu (np. osadach nieporośniętych

Rodzaje tworzyw sztucznych z przykładami artefaktów <i>Plastic types with artifact examples</i>	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010	2020
celuloid (klisze fotograficzne), <i>celluloid (photographic film)</i>										
wiskoza (tkaniny), <i>viscose (textiles)</i>										
bakelit (wykorzystywany w elektrotechnice), <i>bakelite (used in electrical engineering)</i>										
winił PVC (płyty gramofonowe), <i>vinyl (gramophone records)</i>										
polietylen PE (worki foliowe, zakrętki do butelek PET, żyłki wędkarskie), <i>polyethylene (plastic bags, PET bottle caps, fishing lines)</i>										
nylon PA (struny gitarowe, włosie szczoteczki do zębów), <i>nylon (guitar strings, toothbrush bristles)</i>										
butelki LDPE, <i>bottles</i>										
octan celulozy CA (filtry papierosowe), <i>(cigarette filters)</i>										
polichlorek winiłu PVC, PCW (strzykawki, wykładziny podłogowe, siding), <i>polyvinyl chloride (syringes, floor coverings, siding)</i>										
polistyren EPS (styropian, pierwszy budynek w Polsce ocieplony w 1970), <i>(styrofoam, first building in Poland insulated in 1970)</i>										
karty kredytowe PVC, <i>credit cards</i>										
lycra (tekstylia elastyczne spandex), <i>lycra (spandex elastic textiles)</i>										
torby polietylenowe (tzw. reklamówki) PE, <i>polyethylene bags (so-called advertising bags)</i>										
długopisy BIC crystal PP, <i>BIC crystal pens</i>										
tkanina non-iron (fartuchy kuchenne), <i>non-iron fabric (kitchen aprons)</i>										
rzepy (Velcro) Nomex, PA, PE, <i>Velcro</i>										
polipropylen PP (meble ogrodowe, wieczka opakowań np. TicTac), <i>polypropylene (garden furniture, packaging lids such as TicTac)</i>										
poliwęglan PC (zadaszenia, szklarnie, płyty komorowe), <i>polycarbonate (canopies, greenhouses, polycarbonate chamber boards)</i>										
klocki Lego ABS, <i>Lego</i>										
lalka Barbie (PVC, EVA, ABS), <i>Barbie doll</i>										
zapalniczki BIC POM, <i>BIC lighters</i>										
butelki PET, <i>bottles</i>										
okna PVC, <i>window frames</i>										
płyty CD PC, <i>CDs</i>										
butelki i pojemniki na żywność HDPE, <i>bottles and food containers</i>										

Wprowadzenie trójkątnych oznaczeń typów plastiku od 1988
Triangular plastic types markings using since 1988



roślinnością, roślinności zielnej, krzewach, roślinności drzewiastej) (Liro i in. 2022). W zależności od celu i zakresu badań, wyniki zebrane w opisywany sposób można dalej dowolnie analizować w kontekście potencjalnych uwarunkowań depozycji (np. odległości od koryta, wysokości nad korytem, hydrodynamiki ciek). Wyniki zebrane w poletkach rozmieszczonych w obrębie odcinka rzeki można także ekstrapolować na cały odcinek, wyliczając jednostkową depozycję na takim odcinku (np. kg/km biegu rzeki) (Liro i in. 2022). Uproszczoną metodą wykonania ww. pomiarów, na przykład przez wolontariuszy, może być wykonanie dokumentacji fotograficznej miejsc prowadzenia pomiarów wraz z zebraną próbą przy użyciu aplikacji online (szczegóły w Liro i in. 2023d).

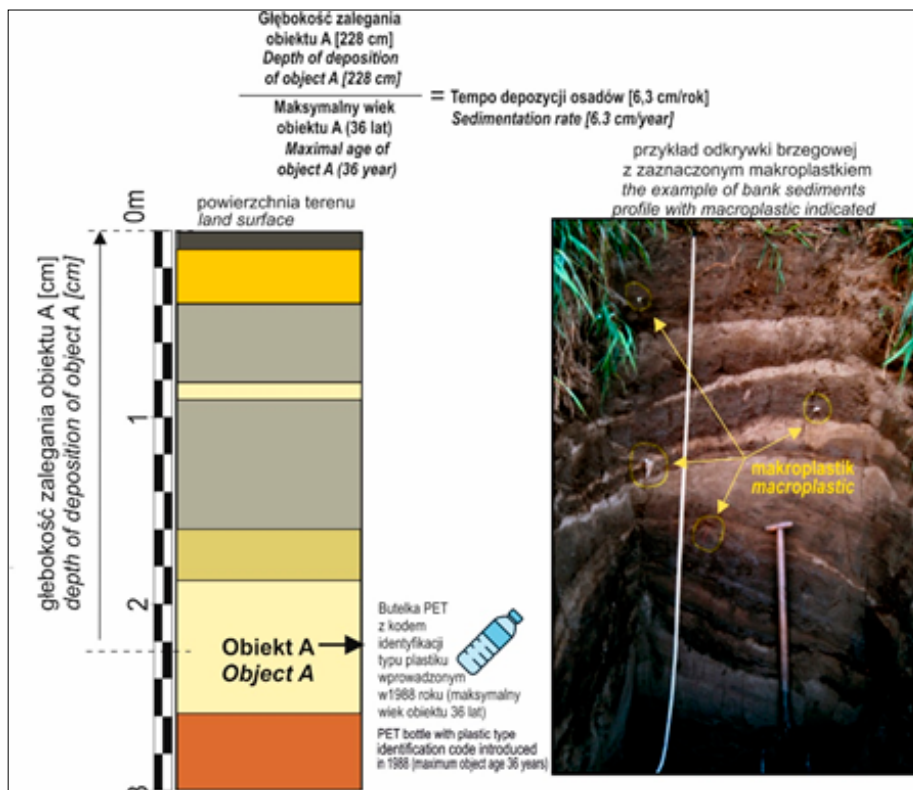
W przypadku badania remobilizacji makroplastiku, poletka pomiarowe, założone w sposób analogiczny jak te do badania depozycji, znakujemy w terenie, zliczamy zdeponowany na ich powierzchni makroplastik, jednak pozostawiamy go w miejscu depozycji. Następnie, po określonym czasie (np. po wystąpieniu wezbrania), ponownie zliczamy makroplastik uruchomiony przez wody wezbraniowe z powierzchni poletka. Podobnie jak miało to miejsce w przypadku badania depozycji, wyniki zebrane w opisywany sposób można dalej dowolnie analizować w kontekście potencjalnych czynników wpływających na wielkość remobilizacji w danym miejscu (np. odległości od koryta, wysokości nad koryto, danych dotyczących hydrodynamiki ciek). Wyniki zebrane w poletkach rozmieszczonych w obrębie odcinka rzeki można także ekstrapolować na cały odcinek, wyliczając łączną ilość makroplastiku remobilizowanego z powierzchni odcinka w czasie wezbrania danej wielkości (np. kg/km biegu rzeki).

Depozycja podpowierzchniowa

Depozycja makroplastiku w osadach podpowierzchniowych daje możliwość datowania osadów rzecznych zdeponowanych od lat 60. XX wieku (Weber, Lechthaler 2021). Osady przykorytowe i zdeponowane w nich materiały pochodzenia antropogenicznego (np. węgle drzewne) były już wcześniej wykorzystywane jako archiwum działalności człowieka w zlewniach rzek (Kukulak 2004; Wójcicki, Nita, 2004; Mishra i in. 2007). Fragmenty plastikowych przedmiotów pogrzebane w cyklicznie zdeponowanych osadach powodziowych mogą być precyzyjnymi wskaźnikami wieku tych osadów (Zalasiewicz i in. 2018), umożliwiającym odróżnienie osadów antropocenicznych od starszych osadów holocenicznych (Waters i in. 2016; Weber, Lechthaler 2021). Co więcej, biorąc pod uwagę fakt, że znany jest czas początku produkcji poszczególnych tworzyw sztucznych, można wskazać maksymalny wiek warstwy osadów zawierających makroplastik zbudowany z tych tworzyw (ryc. 6).

Datowanie osadów z zastosowaniem przedmiotów pochodzenia antropogenicznego (tzw. artefaktów) polega na oszacowaniu okresu depozycji poszczególnych warstw zawierających artefakty, a następnie na podzieleniu miąższości osadów pomiędzy wydatowanymi warstwami przez liczbę lat jaka upłynęła pomiędzy zdeponowaniem jednej i drugiej warstwy (ryc. 7).

Ograniczeniem prezentowanej metody jest fakt, że makroplastik nie zalega w osadach w postaci ciągłych warstw i nie da się przewidzieć, czy znajdziemy artefakty w wykonanym odsłonięciu. Wybór miejsca wykonania odsłonięcia osadów brzegowych możemy jednak poprzedzić datowaniem danej części brzegu wykonanym przy użyciu map i zdjęć lotniczych (Czajka 2000; Liro 2012). Należy jednak pamiętać, że z całą pewnością możemy określić jedynie maksymalny wiek warstwy zawierającej



Ryc. 7. Schemat szacowania tempa przyrostu osadów rzecznych

Fig. 7. Diagram for estimating the rate of accumulation of river sediments

Źródło: opracowanie własne.

Source: own study.

artefakt o znanej dacie produkcji. Dlatego, przy rekonstrukcji depozycji osadów zawierających makroplastik niezwykle ważny jest wybór odsłonięcia. Dobrym miejscem mogą być odsłonięcia brzegów wykonane w paleokorytach o znanym okresie funkcjonowania (np. potwierdzonym przy użyciu zdjęć lotniczych), odległości od koryta umożliwiającej częstą depozycję powodziową oraz niskim potencjale erozji (np. starorzecza położone w sąsiedztwie koryta) (Liro 2012). Przy stosowaniu opisywanej metody datowania osadów musimy także na uwadze, że makroplastik widoczny w odsłonięciach mógł w przeszłości podlegać remobilizacji. Dlatego, datowanie osadów z wykorzystaniem obecnych w nich plastikowych artefaktów powinno być zatem połączone z zastosowaniem innej skutecznej metody datowania współczesnych osadów, takiej jak np. analiza zawartości radionuklidów (Ciszewski, Czajka 2009), czy makroskopowa ocena obecności miału węglowego (Czajka 2007). Przy takiej próbie datowania istotna jest również wiedza na temat czasu przeprowadzenia wszystkich prac hydrotechnicznych prowadzonych w interesującym nas odcinku rzeki.

Zakładając, że w odsłonięciu osadów brzegowych na głębokości 228 cm stwierdzamy obecność butelki PET posiadającej kod identyfikacji typów plastiku wprowadzony w 1988 r., możemy oszacować zarówno maksymalny wiek formy (np. wału przykorytowego), w której wykonaliśmy to odsłonięcie (36 lat) oraz tempo depozycji osadów zalegających nad butelką na 6,3 cm/rok (ryc. 7).

Podsumowanie

W istniejącej literaturze krajowej brak opracowań przybliżających metodykę wykonywania badań terenowych dotyczących zanieczyszczenia rzek i osadów fluwialnych makroplastikiem. W niniejszym artykule omówiliśmy podstawowe metody umożliwiające przeprowadzenie ilościowych badań procesów dostawy, transportu, depozycji i remobilizacji makroplastiku w korytach i na równinach zalewowych rzek. Opisane metody pozwalają na wykonanie niskobudżetowych i nieskomplikowanych badań terenowych pozwalających dostarczyć bezpośrednich danych terenowych o ww. nowych procesach. Lepsze zrozumienie tych procesów może być z kolei podstawą do planowania działań mających na celu usuwanie makroplastiku z rzek w przyszłości.

Podziękowania

Artykuł został wykonany ramach projektu nr 2020/39/D/ST10/01935 pt. *Makroplastik w rzece górskiej i pogórskiej*, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w Krakowie. Dziękujemy dwóm anonimowym recenzentom za uwagi do manuskryptu.

Literatura

- Barnes D.K.A., Galgani F., Thompson R.C., Barlaz M., 2009, *Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments*, Philosophical Transactions of the Royal Society, Biological Science, 364, 1985–1998.
- Blettler M.C.M., Mitchell, C., 2021, *Dangerous traps: macroplastic encounters affecting freshwater and terrestrial wildlife*, Science of The Total Environment, 798, 149317.
- Borelle S.B., Ringma J., Law K.L., Monnahan C.C., Lebreton L., McGivern A., Murphy E., i in., 2020, *Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution*, Science, 369, 1515–1518.
- Chamas A., Moon H., Zheng J., Qiu Y., Tabassum T., Jang J.H., Abu-Omar M., Scott S.L., Suh S., 2020, *Degradation Rates of Plastics in the Environment*, ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 8(9), 3494–3511.
- Ciszewski D., Czajka A., 2009, *Akumulacja osadów na równinach zalewowych rzek silnie zmienionych antropogenicznie: górna Wisła i Odra*, Przegląd Geologiczny, 57(7), 576–583.
- Czajka A., 2000, *Sedymentacja pozakorytowa aluwioów w strefie międzywala Wisły w Kotlinie Oświęcimskiej*, Przegląd Geologiczny, 48(3), 263–267.
- Czajka A., 2007, *Środowisko sedymentacji osadów przykorytowych rzek uregulowanych na przykładzie górnej Odry i górnej Wisły*, Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
- Geyer R., 2020, *Production, use, and fate of synthetic polymers*, [w:] T.M. Letcher (red.), *Plastic Waste and Recycling*, Academic Press, Londyn, 13–32.
- Geyer R., Jambeck J., Lavender Law K., 2017, *Production, use, and fate of all plastics ever made*, *Science Advances*, 3, e1700782.
- González-Fernández D., Hanke G., 2017, *Toward a Harmonized Approach for Monitoring of Riverine Floating Macro Litter Inputs to the Marine Environment*, *Frontiers in Marine Science*, 4(86). DOI: 10.3389/fmars.2017.00086s.
- Haska W., Liro M., Mikuś P., Gorczyca E., 2024, *Road system and pollution of mountain rivers with household waste, the case of the Kamienica Gorczańska stream*, European Geosciences Union General Assembly, Vienna (Austria), 14–19 April 2024.
- Hurley R., Horton A., Lusher A., Nizzetto L. 2020, *Plastic waste in the terrestrial environment*, [w:] T.M. Letcher (red.), *Plastic Waste and Recycling*, Academic Press, Londyn, 163–193.
- Hurley R., Braaten H.F.V., Nizzetto L., Steindal E.H., Lin Y., Clayer F., van Emmerik T., Buenaventura N.T., Eidsvoll D.P., Økelsrud A., 2023, *Measuring riverine macroplastic: methods, harmonisation, and quality control*, *Water Research*, 235, 119902. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119902.
- Jambeck J.R., Geyer R., Siegler T., Perryman M., Anrady A., Narayan R., Lavender Law K., 2015, *Plastic waste inputs from land into the ocean*, *Science*, 347, 768–771.
- Kukulak J., 2004, *Zapis skutków osadnictwa i gospodarki rolnej w osadach rzeki górskiej: na przykładzie aluwioów dorzecza górnego Sanu w Bieszczadach Wysokich*, Prace Monograficzne - Akademia Pedagogiczna im. Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie, 381, Kraków.

- Lechthaler S., Waldschläger K., Stauch G., Schüttrumpf H., 2020, *The Way of Macroplastic through the Environment*, *Environments*, 7, 73.
- Liro M., 2012, *Wpływ regulacji koryta na warunki sedymentacji osadów na równinie zalewowej dolnego Dunajca*, *Przegląd Geologiczny*, 60(7), 380–386.
- Liro M., van Emmerik T., Wyźga B., Liro J., Mikuś P., 2020, *Macroplastic Storage and Remobilization in Rivers*, *Water*, 12(2055), 1–14. DOI: 10.3390/w12072055.
- Liro M., Mikuś P., Wyźga B., 2022, *First insight into the macroplastic storage in a mountain river: The role of in-river vegetation cover, wood jams and channel morphology*, *Science of the Total Environment*, 838, 156354. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156354.
- Liro M., Zielonka A., van Emmerik T.H.M., 2023a, *Macroplastic fragmentation in rivers. Environment International*, *Environment International*, 180, 108186. DOI: 10.1016/j.envint.2023.108186
- Liro M., van Emmerik T.H., Zielonka A., Gallitelli L., Mihai F.C., 2023b, *The unknown fate of macroplastic in mountain river*, *Science of The Total Environment*, 865, 161224. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161224.
- Liro M., Zielonka A., van Emmerik T.H.M., Grodzińska-Jurczak M., Kiss T., Liro J., Mihai F. C., 2023c, *Mountains of plastic: Mismanaged plastic waste along the Carpathians watercourses*, *Science of The Total Environment*, 888, 164058. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164058.
- Liro M., Zielonka A., Hajdukiewicz H., Mikuś P., Haska W., Gorczyca E., Krzemień K., Kieniewicz M., 2023d, *Litter selfie: A citizen-science guide to photorecording data on macroplastic deposition along mountain rivers using smartphone*, *Water*, 15(17), 3116. DOI: 10.3390/w15173116.
- Liro M., Zielonka A., Mikuś P., 2024, *First attempt to measure macroplastic fragmentation in rivers*, *Environment International*, 191, 108935. DOI: 10.1016/j.envint.2024.108935.
- Mishra S., White M.J., Beaumont P., Antoine P., Bridgland D.R., Limondin-Lozouet N., Santisteban J.I., Schreve D.C., Shaw A.D., Wenban-Smith F.F., Westaway R.W.C., White T.S., 2007, *Fluvial deposits as an archive of early human activity*, *Quaternary Science Reviews*, 26(22–24), 2996–3016. DOI: 10.1016/j.quascirev.2007.06.035.
- Tasseron P., Begemann F., Joosse N. i in., 2023, *Amsterdam urban water system as entry point of river plastic pollution*, *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 73590–73599. DOI: 10.1007/s11356-023-26566-5.
- Thompson R.C., Swan S.H., Moore C.J., vom Saal F.S., 2009, *Our plastic age*, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, B, 364.
- Tramoy R., Gasperi J., Colasse L., Tassin B., 2020, *Transfer dynamic of macroplastics in estuaries—New insights from the Seine estuary: Part 1. Long term dynamic based on date-prints on stranded debris*, *Marine Pollution Bulletin*, 152, 110894. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.110894.
- van Emmerik T., Schwarz A., 2020, *Plastic debris in rivers*, *WIREs Water*, 7, e1398.
- van Emmerik T.H.M., Frings R.M., Schreyers L.J., Hauk R., de Lange S.I., Mellink Y.A.M., 2023, *River plastic transport and deposition amplified by extreme flood*, *Water*, 1, 514–522. DOI: 10.1038/s44221-023-00092-7.

- van Emmerik T., Mellink Y., Hauk R., Waldschlager K., Schreyers, L., 2022, *Rivers as plastic reservoirs*, Water, 3, 786936. DOI: 10.3389/frwa.2021.786936.
- van Emmerik T., Kieu-Le T.C., Loozen M., van Oeveren K., Strady E., Bui X.T., Egger M., Gasperi J., Lebreton L., Nguyen P.D., Schwarz A., Slat B., Tassin B., 2018, *A Methodology to Characterize Riverine Macroplastic Emission into the Ocean*, Frontiers in Marine Science 372(5). DOI: 10.3389/fmars.2018.00372.
- Waters C.N., Zalasiewicz J., Summerhayes C., Barnosky A.D., Poirier C., Gałuszka A., Cearreta A., Edgeworth M., Ellis E.C., Ellis M., Jeandel C., Leinfelder R., McNeill J.R., Richter D.B., Steffen W., Syvitski J., Vidas D., Wagemann M., Williams M., Zhisheng A., Grinevald J., Odada E., Oreskes N., Wolfe A.P., 2016, *The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene*, Science, 351(6269). DOI: 10.1126/science.aad2622.
- Weber C.J., Lechthaler S., 2021, *Plastics as a stratigraphic marker in fluvial deposits*, Anthropocene, 36, 100314. DOI: 10.1016/j.ancene.2021.100314.
- Weideman E.A., Perold V., Ryan P.G., 2020, *Limited long-distance transport of plastic pollution by the Orange-Vaal River system*, Science of The Total Environment, 727, 138653. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138653.
- Wójcicki K., Nita M., 2004, *Dolina dolnej Kłodnicy w dobie pradziejowego i wczesnośredniowiecznego osadnictwa – zapis w formach i osadach*, [w:] D. Abłamowicz, Z. Śnieszko (red.), *Zmiany środowiska geograficznego w dobie gospodarki rolno-hodowlanej*, Studia z obszaru Polski, Muzeum Śląskie, Katowice, 253–270.
- Zalasiewicz J., Waters C.N., Do Sul J.A.I., Corcoran P.L., Barnosky A.D., Cearreta A., Edgeworth M., Gałuszka A., Jeandel C., Leinfelder R., McNeill J.R., Steffen W., Summerhayes C., Wagemann M., Williams M., Wolfe A.P., Yonan Y., 2016, *The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene*, Anthropocene, 13, 4–17. DOI: 10.1016/j.ancene.2016.01.002.
- Zalasiewicz J., Waters C., Williams M., Aldridge D.C., Wilkinson I.P., 2018, *The stratigraphical signature of the Anthropocene in England and its wider context*, Proceedings of the Geologists' Association, 129(3), 482–491. DOI: 10.17863/CAM.33371.
- https://www.bpf.co.uk/Plastipedia/Plastics_History/Default.aspx (dostęp: 22.01.2024).

Maciej Liro, Hanna Hajdukiewicz, Paweł Mikuś
Polska Akademia Nauk
Instytut Ochrony Przyrody
al. Mickiewicza 33, 31-120 Kraków
liro@iop.krakow.pl

Agnieszka Czajka, Jakub Dzida
Uniwersytet Śląski
Wydział Nauk o Przyrodniczych
ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec

Wojciech Haska, Anna Zielonka, Elżbieta Gorczyca,
Kazimierz Krzemień
Uniwersytet Jagielloński
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej
ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków

Joanna Zawiejska, Natalia Zaremba
Uniwersytet Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie
Instytut Biologii i Nauk o Ziemi
ul. Podchorążych 2, 30-084 Kraków

