

Wybrane aspekty organizacji i bezpieczeństwa transportu w górnictwie kruszyw naturalnych

dr inż. Dorota ŁOCHAŃSKA¹
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie

TREŚĆ: Transport kruszyw piaskowo-żwirowych stanowi fundamentalny element logistyki w górnictwie odkrywkowym w Polsce, determinując zarówno efektywność ekonomiczną, jak i wpływ sektora na środowisko. Ze względu na charakter wydobywania i rozmieszczenie złóż większość przewozów realizowana jest na krótkich dystansach, co sprawia, że dominującą rolę odgrywa transport samochodowy, szczególnie w regionach o gęstej sieci dróg lokalnych. Transport kolejowy oraz żegluga śródlądowa pełnią funkcję uzupełniającą, znajdując zastosowanie głównie przy przewozach masowych na dłuższych trasach i w rejonach z odpowiednią infrastrukturą. W artykule podkreślono znaczenie tzw. promienia ekonomicznego przewozu, który określa maksymalną odległość opłacalnego transportu kruszyw, oraz czynniki wpływające na koszty, takie jak cena paliwa, opłaty drogowe, stan techniczny dróg czy organizacja pracy kierowców. Omówiono także zastosowanie nowoczesnych technologii informatycznych i telematycznych, umożliwiających optymalizację tras, kontrolę zużycia paliwa i lepsze planowanie dostaw. Zwrócono uwagę na zagrożenia techniczne i organizacyjne towarzyszące procesowi eksploatacji i dystrybucji surowców oraz na konieczność wprowadzenia rozwiązań wspierających bezpieczeństwo i zrównoważony rozwój branży. Wnioski wskazują, że przyszłość rynku kruszyw zależy od integracji różnych środków transportu, cyfryzacji procesów logistycznych oraz wdrażania innowacyjnych technologii zwiększających efektywność i konkurencyjność całego sektora.

SŁOWA KLUCZOWE: transport kruszyw, górnictwo odkrywkowe, bezpieczeństwo pracy, technologia wydobywania

1. Wstęp

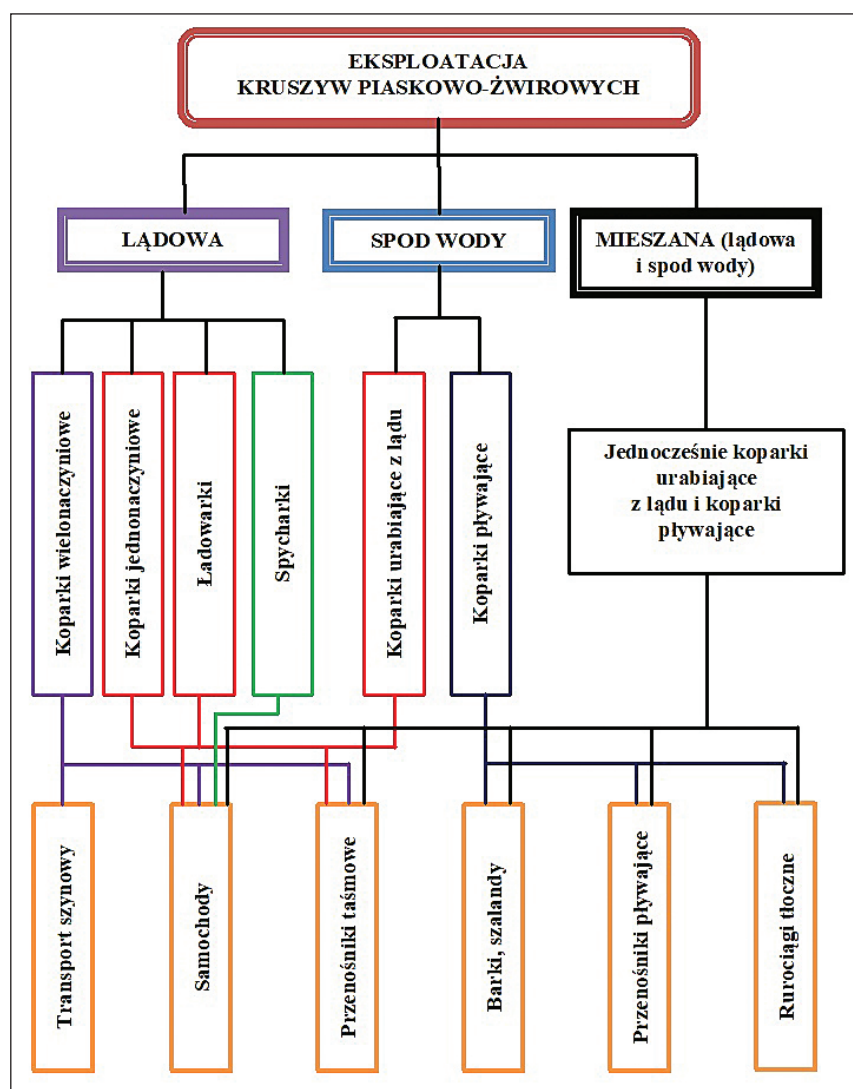
Kruszywa naturalne, w tym piaski i żwiry, stanowią podstawowy surowiec dla budownictwa i infrastruktury transportowej. Ich znaczenie gospodarcze wynika z powszechnego zastosowania w produkcji betonu, zapraw oraz robotach ziemnych i drogowych [1]. Polska należy do największych producentów kruszyw w Europie, a sektor ten ma kluczowe znaczenie dla realizacji inwestycji infrastrukturalnych oraz utrzymania stabilności rynku budowlanego [2].

Eksploatacja złóż piaskowo-żwirowych prowadzona jest metodami odkrywkowymi z zastosowaniem zróżnicowanych technologii urabiania i transportu. Wybór systemu technologicznego zależy od warunków geologicznych, miąższości złoża, a także lokalnych uwarun-

kowań środowiskowych, ekonomicznych i wymogów bezpieczeństwa [3]. W większości przypadków dominują układy oparte na koparkach jednozaczepowych i ładowarkach, przy czym transport kruszywa realizowany jest głównie drogą kołową. Zapewnienie bezpieczeństwa pracy podczas eksploatacji i przewozu kruszyw stanowi jeden z kluczowych elementów organizacji procesu wydobywczego, obejmując zarówno ochronę pracowników, jak i właściwe utrzymanie sprzętu transportowego.

Transport stanowi najbardziej kosztotwórczy element łańcucha dostaw w górnictwie odkrywkowym, a jego udział w całkowitych kosztach dostarczenia surowca może sięgać 40–60% [4]. Efektywność systemu logistycznego zależy od doboru środka transportu, organizacji załadunku i rozładunku, odległości przewozu oraz koordynacji dostaw z popytem. W warunkach polskich dominującą rolę pełni transport samochodowy, który obsługuje ponad 80% przewozów kruszyw, zwłaszcza na dystansach do 100 km [3]. Przy większych odległościach bardziej opłacalny staje się transport kolejowy,

¹ dorota.lochanska@agh.edu.pl



► Rys. 1. Technologie eksploatacji i układy wydobywcze kruszyw piaskowo-żwirowych [3, 12]

► Fig. 1. Sand and gravel aggregate extraction technologies and systems [3, 12]

charakteryzujący się niższym kosztem jednostkowym i mniejszym wpływem na środowisko. Z kolei transport wodny, mimo marginalnego udziału, stanowi potencjalny kierunek rozwoju w kontekście dekarbonizacji i redukcji emisji w sektorze surowcowym [5, 6].

Z punktu widzenia logistyki surowców istotną rolę odgrywa integracja systemów transportowych wspieranych przez technologie teleinformatyczne. Wdrożenie telematyki, systemów GPS i cyfrowych platform monitoringu umożliwia śledzenie pojazdów w czasie rzeczywistym, lepsze planowanie dostaw oraz szybszą reakcję na sytuacje awaryjne, co w efekcie podnosi efektywność operacyjną i poziom bezpieczeństwa transportu [7].

Równie ważne są aspekty bezpieczeństwa pracy, które w górnictwie kruszyw obejmują zarówno transport wewnątrzkopalniany, jak i zewnętrzny. Najczęstsze zagrożenia dotyczą przeciążenia pojazdów, niewłaściwego zabezpieczenia ładunku, a także nieprawidłowej organizacji ruchu w rejonie zakładu [8, 9]. Ocena ryzyka oraz wdrażanie systemów bezpieczeństwa stanowią integralny element zarządzania logistycznego i eksploatacyjnego w kopalniach [10, 11].

Podsumowując, transport w górnictwie kruszyw piaskowo-żwirowych w Polsce to strategiczne ogniwo

łączące proces eksploatacji z rynkiem zbytu. Wymaga on integracji aspektów ekonomicznych, logistycznych i bezpieczeństwa, przy jednoczesnym uwzględnieniu celów zrównoważonego rozwoju. Optymalizacja systemów transportowych, rozwój infrastruktury i cyfryzacja procesów stanowią podstawę zwiększenia efektywności i bezpieczeństwa w sektorze wydobywczym.

2. Technologie eksploatacji kruszyw piaskowo-żwirowych

Eksploatacja kruszyw piaskowo-żwirowych prowadzona jest z wykorzystaniem różnorodnych technologii, których dobór uzależniony jest od warunków geologiczno-górnictwowych, kształtu złoża, jego miąższości oraz lokalnych uwarunkowań środowiskowych i ekonomicznych. Technologie te można podzielić na systemy lądowe, podwodne i mieszane, przy czym wszystkie typy opierają się na zbliżonych zasadach organizacji procesu wydobywania, transportu i przeróbki surowca [12, 13, 14]. Na rysunku 1 przedstawiono technologie eksploatacji i układy wydobywcze kruszyw piaskowo-żwirowych.

Technologie eksploatacji lądowej opierają się na układach technologicznych, w których podstawowymi

maszynami urabiającymi są koparki jednonaczyniowe lub ładowarki kołowe. Urobek transportowany jest najczęściej z wykorzystaniem transportu kołowego, głównie samochodów samowyladowczych. Schematy organizacji pracy są zbliżone do tych, które stosuje się przy produkcji kruszyw łamanych, jednak w przypadku złóż piaskowo-żwirowych maszyny eksploatacyjne pełnią często podwójną funkcję – służą zarówno do urabiania, jak i załadunku urobku. W większości polskich kopalń kruszyw piaskowo-żwirowych wykorzystywane są koparki jednonaczyniowe średniej wielkości, o pojemności łyżki wynoszącej około 1,5 m³ [13]. Tego typu sprzęt zapewnia wystarczającą wydajność przy jednoczesnym zachowaniu mobilności i elastyczności w trudnych warunkach terenowych.

Najprostszym i najczęściej spotykanym układem technologicznym w eksploatacji lądowej jest schemat: koparka (lub ładowarka) – samochód – miejsce wyładunku (rys. 2). Układ ten stosuje się głównie przy wydobywaniu złóż płytko zalegających o niewielkiej miąższości, gdzie zasięg transportu gotowego kruszywa ma charakter lokalny. W takich przypadkach miąższość złoża jest zwykle mniejsza od głębokości urabiania koparki.

Dobór maszyn i organizacja pracy zależą w dużym stopniu od warunków górniczo-geologicznych, charakteru surowca oraz wymagań dotyczących ochrony środowiska [12, 14]. W praktyce oznacza to konieczność dostosowania parametrów technicznych maszyn do rodzaju gruntu, udziału frakcji żwirowych oraz występowania zanieczyszczeń organicznych lub mineralnych.

Eksploatacja spod wody prowadzona jest na złożach o większej miąższości lub tam, gdzie warunki hydrogeologiczne uniemożliwiają prowadzenie robót metodami suchymi. Systemy wybierania kruszyw spod wody są zasadniczo takie same jak w eksploatacji lądowej. Wybór odpowiedniego systemu zależy od warunków zalegania złoża, jego kształtu, a także od organizacji pracy układu technologicznego, obejmującego procesy urabiania, transportu i przeróbki mechanicznej. W przypadku złóż o większym udziale frakcji żwirowych (powyżej 30%) oraz obecności głazów lub większych zanieczyszczeń efektywniejsze okazuje się wykorzystanie maszyn, takich jak koparki jednonaczyniowe podsiębierne, zgarniarki linowe czy koparki chwytakowe [13]. Sprzęt ten lepiej radzi sobie z większymi frakcjami i nierównomiernym rozkładem uziarnienia.

Kompleksowe wydobywanie złóż piaskowo-żwirowych wiąże się z koniecznością ich przeróbki mechanicznej, która ma na celu uzyskanie kruszyw o określonych parametrach jakościowych i granulometrycznych. Podział na frakcje odbywa się w zakładach przeróbki mechanicznej, gdzie surowiec poddawany jest operacjom płukania, klasyfikacji, a w razie potrzeby również rozdrabniania. W zależności od zapotrzebowania rynkowego kruszywa piaskowo-żwirowe sprzedawane są w postaci:

- surowej (bez dodatkowej obróbki),
- po płukaniu i klasyfikacji,
- lub jako kruszywo naturalne łamane, uzyskiwane po procesie rozdrabniania.

Zróżnicowanie układów technologicznych w eksploatacji kruszyw piaskowo-żwirowych wynika głównie z różnorodności stosowanego sprzętu urabiającego



► Rys. 2. Urabianie złoża „Dęborzyn – Wisłoka” (układ koparka – samochód) [3]

► Fig. 2. Mining of the „Dęborzyn – Wisłoka” deposit (excavator – truck system) [3]

oraz lokalnych uwarunkowań geologicznych, a wybór maszyn zależy od:

- udziału grubszych frakcji żwiru i głazów,
- obecności zanieczyszczeń organicznych (np. pni drzew),
- dostępu do złoża i warunków terenowych,
- oraz wymagań dotyczących ochrony środowiska i rekultywacji terenu.

Odpowiedni dobór technologii i sprzętu pozwala na efektywne wykorzystanie złoża oraz minimalizację kosztów wydobywania i przetwarzania kruszywa, co ma kluczowe znaczenie dla konkurencyjności krajowego sektora surowców mineralnych [3, 13, 14].

3. Uwarunkowania logistyczno-ekonomiczne transportu kruszyw naturalnych w Polsce

Transport kruszyw piaskowo-żwirowych stanowi kluczowy element systemu logistycznego, warunkującego sprawność funkcjonowania całego sektora surowcowego. Jego podstawowym zadaniem jest zapewnienie ciągłości dostaw przy jednoczesnej minimalizacji kosztów, ograniczeniu negatywnego wpływu na środowisko oraz zachowaniu bezpieczeństwa pracy i procesów przewozowych [2]. System transportowy w tym obszarze obejmuje planowanie przewozów, dobór środka transportu, organizację załadunku i rozładunku, koordynację dostaw z popytem odbiorców oraz monitoring przepływu materiałów. Bezpieczeństwo pracy w transporcie kruszyw wymaga właściwej organizacji ruchu, utrzymania pojazdów w dobrym stanie technicznym oraz przestrzegania procedur operacyjnych, co stanowi podstawowy warunek niezawodności całego łańcucha logistycznego. Elastyczność systemu, rozumiana jako zdolność do dostosowania się do zmiennych warunków rynkowych, pogodowych i infrastrukturalnych, ma zasadnicze znaczenie w kontekście efektywności przewozów.

W Polsce transport samochodowy kruszyw pełni dominującą rolę, obsługując większość przewozów surowców na krótkich i średnich dystansach. Jego przewaga wynika z wysokiej elastyczności oraz możliwości bezpośredniego dostarczenia kruszywa od producenta do odbiorcy bez konieczności przeładunku. Szacuje

się, że transport drogowy odpowiada za około 80% przewozów kruszyw w kraju [15]. Najczęściej jest wykorzystywany przy zasięgu transportu nieprzekraczającym 70–100 km, ponieważ przy większych odległościach jego koszty stają się relatywnie wysokie [5]. Do głównych wad tego rodzaju transportu zalicza się obciążenie środowiska naturalnego poprzez emisję spalin, hałas oraz degradację dróg lokalnych. Dodatkowym problemem jest przeciążanie pojazdów, które wpływa zarówno na bezpieczeństwo ruchu drogowego, jak i na przyspieszone zużycie infrastruktury.

Drugim istotnym środkiem transportu wykorzystywanym w dostawie kruszyw jest kolej. Choć charakteryzuje się ona mniejszą elastycznością operacyjną, to jednak przy dużych wolumenach ładunków i na długich dystansach (powyżej 100 km) jest znacznie bardziej opłacalna od transportu drogowego. Średnia odległość przewozu kruszyw koleją w Polsce wynosi ok. 240–250 km, a udział transportu kolejowego w całkowitych przewozach kruszyw sięga 15–20% [5]. Transport kolejowy znajduje zastosowanie głównie w dostawach do dużych aglomeracji, takich jak Warszawa, Kraków czy Górny Śląsk, gdzie zapotrzebowanie na materiały budowlane jest szczególnie wysokie [15]. Do zalet kolei należy wyższa efektywność energetyczna oraz mniejszy wpływ na środowisko w przeliczeniu na jednostkę masy przewożonego surowca. Z kolei jej ograniczeniami pozostają konieczność posiadania bocznicy, ograniczona liczba wagonów towarowych oraz wyższe koszty przeładunku.

Marginalne znaczenie w przewozach kruszyw w Polsce ma transport wodny śródlądowy, którego udział nie przekracza 1%. Mimo że charakteryzuje się on najniższym jednostkowym zużyciem energii oraz możliwością przewozu bardzo dużych ładunków, jego rozwój ograniczają uwarunkowania hydrologiczne oraz niedostatecznie rozwinięta infrastruktura portowa. Główne szlaki przewozu kruszyw wodą to rzeki Wisła i Odra, na których żegluga odbywa się przeciętnie przez 200–220 dni w roku. W perspektywie długoterminowej rozwój transportu wodnego, szczególnie w regionach nadodrzańskich i przybrzeżnych, może stanowić istotny czynnik ograniczenia kosztów i emisji w sektorze budowlanym [6]. Jednak niski poziom wód spowodowany zmianami klimatycznymi, długotrwałymi okresami suszy oraz ograniczoną retencją wód powierzchniowych znacząco utrudnia żeglugę, skracając sezon żeglugowy i obniżając efektywność przewozów. Brak spójnej polityki inwestycyjnej w zakresie utrzymania torów wodnych i modernizacji floty dodatkowo ogranicza potencjał wykorzystania tego rodzaju transportu w logistyce kruszyw.

Koszty transportu stanowią jeden z najważniejszych składników całkowitych kosztów pozyskania, dystrybucji i odbioru kruszyw. W ujęciu ekonomicznym ważnym pojęciem jest tzw. promień ekonomiczny przewozu, określający maksymalny dystans, przy którym dany środek transportu pozostaje opłacalny [3]. Dla transportu samochodowego jest to z reguły do 70 km, dla kolejowego powyżej 100 km, a dla wodnego – w przypadku dużych ładunków (powyżej 2000 Mg) i odległości przekraczających 150 km. Promień ten determinuje nie tylko zasięg rynków lokalnych, ale również granice funkcjonalnych regionów surowcowych. Racjonalne bilansowanie podaży i popytu w obrębie regionów po-

zwala minimalizować koszty transportu oraz negatywne skutki środowiskowe.

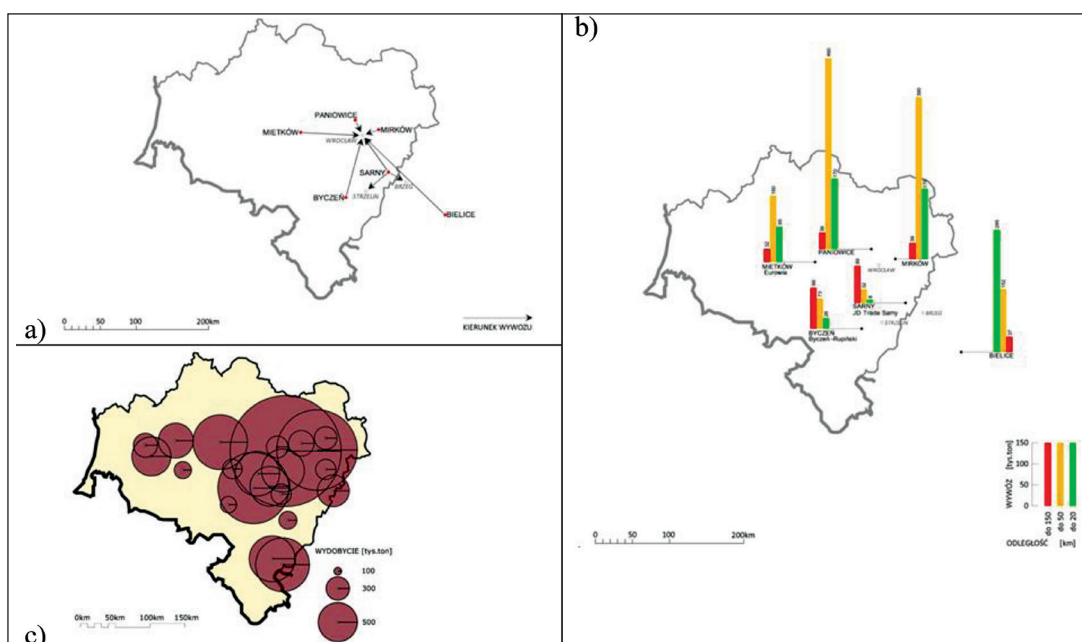
Z logistycznego punktu widzenia skuteczne zarządzanie transportem w górnictwie kruszyw wymaga planowania przewozów, monitoringu ładunków, koordynacji dostaw z zapotrzebowaniem odbiorców oraz optymalizacji tras. Coraz częściej wprowadzane są rozwiązania oparte na systemach GPS i telematyce, które umożliwiają bieżące śledzenie transportów oraz analizę efektywności przewozów [7]. W zakresie bezpieczeństwa szczególną uwagę zwraca się na właściwą organizację ruchu w obrębie zakładów wydobywczych, kontrolę stanu technicznego pojazdów oraz przestrzeganie dopuszczalnych mas całkowitych.

Podsumowując, transport kruszyw piaskowo-żwirowych w Polsce jest systemem złożonym, w którym dominują przewozy samochodowe, natomiast transport kolejowy i wodny stanowi uzupełnienie w przypadku większych dystansów i ładunków. Zrównoważony rozwój sektora wymaga inwestycji w infrastrukturę logistyczną, integracji różnych gałęzi transportu oraz wdrażania nowoczesnych technologii zarządzania przewozami. Racjonalizacja struktury transportu może przyczynić się nie tylko do obniżenia kosztów jednostkowych i poprawy bezpieczeństwa, ale także do zmniejszenia wpływu oddziaływania górnictwa na środowisko.

4. Regionalizacja i transport kruszyw piaskowo-żwirowych

Struktura podaży i popytu na kruszywa piaskowo-żwirowe w Polsce jest ściśle związana z regionalnym charakterem ich pozyskiwania, wynikającym z przestrzennego rozmieszczenia złóż, warunków geologicznych oraz dostępności infrastruktury transportowej. Regionalizacja, rozumiana jako proces wydzielania obszarów o podobnych cechach gospodarczych, geologicznych i komunikacyjnych, odgrywa kluczową rolę w bilansowaniu rynków surowcowych oraz w kształtowaniu kosztów dostaw.

Pojęcie regionu w literaturze występuje w wielu znaczeniach, zależnych od dziedziny nauki. Według Słownika wyrazów obcych [16] region to obszar wyróżniający się charakterystycznymi cechami geograficznymi, fizycznymi lub kulturowymi. Z kolei Berezowski [17] definiuje region jako wydzielony, jednorodny obszar różniący się od otoczenia określonymi cechami naturalnymi lub nabytymi. W ujęciu gospodarki przestrzennej region stanowi narzędzie organizacji działalności człowieka w przestrzeni, sprzyjające stabilizacji i trwałości rozwoju. Thomas [18] zauważył, że region to pojęcie intelektualne, ułatwiające zrozumienie przestrzennego rozmieszczenia zjawisk fizycznych, biotycznych i społecznych. W górnictwie surowców skalnych region oznacza obszar, w którym występują złoża i zakłady eksploatujące te surowce, powiązane z lokalnym rynkiem odbiorców. Regionalizacja w tym ujęciu polega na wyodrębnieniu obszarów o podobnych cechach geologicznych i gospodarczych, z uwzględnieniem lokalizacji kopalń, sieci transportowej, powiązań produkcyjnych i bilansu podaży oraz popytu [17]. Regiony surowcowe charakteryzują się względną samowystarczalnością – lokalna produkcja zaspokaja większość



► Rys. 3. Wyniki badań regionalizacji kruszyw piaskowo-żwirowych w województwie dolnośląskim, obejmujące: a) analizę kierunków dystrybucji, b) określenie wielkości i odległości transportu kruszyw, c) identyfikację głównych ośrodków wydobywania o produkcji powyżej 100 tys. Mg/rok [3]

► Fig. 3. Results of research on the regionalisation of sand and gravel aggregates in the Lower Silesian Province, including: a) analysis of distribution directions, b) determination of the volume and distance of aggregate transport, c) identification of the main extraction centres with production exceeding 100,000 Mg/year [3]

potrzeb odbiorców w obrębie regionu, ograniczając konieczność transportu z odległych źródeł.

Regiony w produkcji kruszyw mogą być analizowane w aspekcie ekonomicznym, terytorialnym i gospodarczym, skupiając się na lokalnej produkcji i jej udziale w rynku międzyregionalnym [19]. W przypadku kruszyw piaskowo-żwirowych głównym celem regionalizacji jest zbilansowanie podaży i popytu na danym obszarze przy minimalizacji kosztów transportu oraz ograniczeniu zależności od dostaw z innych regionów [3, 20]. Struktura zasobów kruszyw piaskowo-żwirowych w Polsce pozwala wyróżnić dwa główne obszary surowcowe: niżowy, obejmujący osady pochodzenia lodowcowego i wodnolodowcowego, oraz karpacko-sudecki, charakteryzujący się złożami o genezie rzecznej. Podziały te zostały rozwinięte w badaniach Radwanek-Bąk [21] oraz Szuby [22], którzy wskazali na silne zróżnicowanie jakości surowców w zależności od ich pochodzenia geologicznego. Zmienność litologiczna, procesy wietrzenia i szczelinowatość skał wpływają na właściwości kruszyw oraz ich przydatność w budownictwie [3]. W przeszłości funkcjonowało pojęcie „okręgu górniczego”, definiowanego jako jednostka geograficzno-geologiczna, w której występują złoża wymagające koordynacji działań eksploatacyjnych [23]. Obecnie termin ten zastępuje się określeniem „grupy kopalń”, obejmującym zakłady działające w sąsiedztwie, posiadające koncesje na eksploatację zbliżonych złóż i powiązane logistycznie.

Rozwój infrastruktury krajowej, w tym sieci drogowej i kolejowej, a także zwiększenie liczby inwestycji budowlanych powodują stały wzrost zapotrzebowania na kruszywa naturalne. Największe ośrodki konsumpcji kruszyw w Polsce to aglomeracje: warszawska, poznańska, wrocławska, krakowska, katowicka, lubelska i szczecińska,

które generują gros krajowego popytu [24]. Zróżnicowanie regionalne podaży i popytu jest jednak znaczne – regiony centralne i silnie zurbanizowane wykazują trwałe deficyt kruszyw żwirowych, który uzupełniany jest dostawami z obszarów południowych i północno-wschodnich, wynikającymi z miejsc ich występowania. Popyt na kruszywa jest silnie skorelowany z liczbą ludności oraz poziomem inwestycji budowlanych. Największe zużycie obserwuje się w regionach o intensywnym rozwoju urbanistycznym, gdzie produkcja nie nadąża za zapotrzebowaniem. Stryszewski [25] zaproponował metodę szacowania popytu na podstawie proporcjonalności względem liczby mieszkańców, która pozostaje użyteczna w analizach przestrzennych rynku kruszyw. Lokalizacja kopalń kruszyw piaskowo-żwirowych ma przede wszystkim charakter surowcowy, ale czynniki transportowe decydują o ich ekonomicznej efektywności. Koszty transportu mogą stanowić nawet 40–60% całkowitych kosztów wytworzenia kruszywa [4], dlatego minimalizacja odległości przewozu jest kluczowa dla rentowności produkcji. Promień ekonomiczny przewozu kruszyw wynosi przeciętnie około 100 km, z wahaniami w przedziale od 18,5 do 221 km, w zależności od rodzaju transportu i uwarunkowań terenowych. Na rysunku 3 przedstawiono wyniki badań regionalizacji eksploatacji kruszyw piaskowo-żwirowych dla województwa dolnośląskiego, obejmujące określenie kierunków przepływu surowca oraz wielkości i zasięgu jego dystrybucji w skali regionalnej [3].

Do najważniejszych czynników wpływających na koszty transportu należą: odległość między miejscem wydobywania a odbiorcą, rodzaj środka transportu (drogowy, kolejowy, wodny), dostępność infrastruktury, ceny paliw, sezonowość prac budowlanych oraz sposób orga-

nizacji przewozu (własny lub zewnętrzny). W ostatnich latach coraz większą uwagę poświęca się wykorzystaniu transportu kolejowego i wodnego jako bardziej zrównoważonych alternatyw wobec transportu drogowego. Transport kolejowy pozwala ograniczyć emisję CO₂ i koszty jednostkowe przewozu na duże odległości, natomiast żegluga śródlądowa staje się perspektywicznym kierunkiem dla przewozu masowych surowców wzdłuż głównych dolin rzecznych. Transport stanowi zatem ważny element łączący regionalizację wydobycia z rozmieszczeniem popytu. Sieć transportowa determinuje realny zasięg rynków zbytu, a jej stan techniczny i przepustowość wpływają na bilansowanie podaży i popytu między regionami. Efektywna organizacja transportu umożliwia powstawanie regionalnych centrów produkcyjno-dystrybucyjnych, integrujących procesy eksploatacji, przeróbki i dostaw kruszyw. Rozwój infrastruktury transportowej, w tym modernizacja dróg, linii kolejowych i portów rzecznych, jest zatem jednym z istotnych czynników zapewniających zrównoważony rozwój rynku kruszyw piaskowo-żwirowych w Polsce.

Regionalizacja rynku kruszyw, wsparta nowoczesnym i racjonalnie planowanym systemem transportowym, stanowi fundament zrównoważonego gospodarowania zasobami nieodnawialnymi. Pozwala na efektywne wykorzystanie lokalnych złóż, minimalizację kosztów logistycznych i redukcję wpływu transportu na środowisko, a także poprawia konkurencyjność krajowych producentów surowców mineralnych.

5. Zróżnicowanie zagrożeń w procesie eksploatacji złóż oraz dystrybucji piasków i żwirów

Zagadnienie bezpieczeństwa pracy w procesach eksploatacji i transportu kruszyw piaskowo-żwirowych nabiera szczególnego znaczenia w kontekście rosnącej skali produkcji i intensywności przewozów w górnictwie odkrywkowym. W sektorze tym w Polsce w 2024 roku odnotowano spadek liczby wypadków w porównaniu z rokiem poprzednim – z 51 do 44 zdarzeń, co stanowi redukcję o około 14%. W analizowanym okresie miały miejsce dwa wypadki śmiertelne, przy braku wypadków ciężkich. Zdarzenia te dotyczyły głównie transportu kołowego oraz niewłaściwej eksploatacji maszyn i urządzeń, co wskazuje, że dominujące zagrożenia mają charakter techniczny i organizacyjny. Wskaźnik częstości wypadków ogółem wyniósł 1,3 na 1000 zatrudnionych i pozostaje znacząco niższy niż w górnictwie podziemnym. Obserwowany trend spadkowy jest wynikiem systematycznego rozwoju i doskonalenia zarządzania bezpieczeństwem w zakładach odkrywkowych, jednak utrzymanie tego kierunku wymaga dalszego doskonalenia procedur, szkolenia personelu oraz konsekwentnego wdrażania działań prewencyjnych [8].

Proces eksploatacji złóż piasków i żwirów prowadzony metodą odkrywkową charakteryzuje się stosunkowo prostą organizacją robót, jednak ze względu na zmienne warunki geologiczno-górniczne oraz różnorodność stosowanych technologii nie jest wolny od zagrożeń mogących wpływać na bezpieczeństwo pracowników, sprzętu i środowiska. Identyfikacja potencjalnych zagrożeń stanowi kluczowy etap budowy modelu oceny bezpieczeństwa, ponieważ pozwala określić obszary

o podwyższonym ryzyku i dobrać odpowiednie środki prewencyjne [1, 10, 11, 26].

Podczas eksploatacji złóż piasków i żwirów występują zagrożenia wydobywcze, które można podzielić na trzy główne grupy: zagrożenia techniczne, organizacyjne oraz środowiskowe [1, 10, 11, 26]. Dodatkowo, ze względu na znaczący udział transportu w całym łańcuchu logistycznym dostaw kruszyw, coraz większe znaczenie zyskują zagrożenia transportowo-logistyczne, obejmujące zarówno przewozy wewnętrzne (na terenie kopalni), jak i zewnętrzne (do odbiorców).

5.1. Zagrożenia techniczne

Do najczęściej występujących zagrożeń technicznych w górnictwie odkrywkowym należą awarie maszyn i urządzeń górniczych, których przyczyną mogą być błędy eksploatacyjne, niewłaściwa konserwacja, przeciążenie lub wady konstrukcyjne [1, 10, 11, 26]. Szczególnie niebezpieczne są uszkodzenia układów hydraulicznych, napędowych i elektrycznych w maszynach podstawowych, takich jak: koparki, ładowarki, przenośniki czy kruszarki.

W kontekście transportu zagrożenia techniczne obejmują m.in. niesprawność pojazdów ciężarowych, niewłaściwe mocowanie ładunku, awarie układów hamulcowych i ogumienia, a także nieprawidłowe funkcjonowanie systemów monitorowania masy i prędkości pojazdów [9]. Pojazdy eksploatowane w trudnych warunkach terenowych kopalni narażone są na intensywne zużycie, co wymaga ścisłego przestrzegania harmonogramów przeglądów technicznych.

Innym istotnym zagrożeniem technicznym jest utrata stateczności skarp i zboczy wyrobiska, wynikająca z błędnej oceny parametrów geotechnicznych lub niekorzystnych warunków wodnych. Zjawiska te mogą prowadzić do przemieszczeń mas ziemnych i zawałów, stwarzając zagrożenie także dla pojazdów poruszających się po drogach technologicznych.

Charakterystyka zagrożeń technicznych jest ściśle związana z typem złoża oraz przyjętą technologią urabiania. W przypadku złóż podwodnych szczególnie istotnymi czynnikami są stabilność dna eksploatacyjnego oraz stan infrastruktury odwadniającej. Natomiast w kopalniach suchych najczęściej obserwuje się awarie układów mechanicznych oraz błędy wynikające z przeciążenia sprzętu roboczego.

5.2. Zagrożenia organizacyjne i transportowo-logistyczne

Zagrożenia organizacyjne wynikają głównie z nieprawidłowego planowania, nadzoru i organizacji pracy. Należą do nich: niewłaściwe rozmieszczenie maszyn w polu roboczym, brak skutecznego nadzoru, błędy komunikacyjne między pracownikami oraz nieprzestrzeganie procedur bezpieczeństwa [9–11].

Ważnym elementem bezpieczeństwa jest organizacja transportu wewnętrznego i zewnętrznego. Niewłaściwe planowanie tras przejazdowych, brak oznakowania dróg technologicznych, nieprzestrzeganie ograniczeń prędkości czy przeciążanie pojazdów stanowią istotne źródła ryzyka [9]. W procesach wydobycia i transportu

kruszyw naturalnych bezpieczeństwo pracy operatorów maszyn oraz kierowców to kluczowy element ograniczania ryzyka wypadków. W przypadku operatorów koparek, ładowarek i wozideł istotne znaczenie ma utrzymanie odpowiedniej sprawności psychofizycznej, gdyż zmęczenie, monotonia pracy i obniżona koncentracja mogą prowadzić do utraty kontroli nad maszyną i zdarzeń kolizyjnych. Podobne zagrożenia dotyczą kierowców transportu kopalnianego i zewnętrznego, gdzie długotrwała jazda, praca zmianowa oraz presja czasu wpływają na zwiększone ryzyko błędów ludzkich i wypadków drogowych. Dlatego w zakładach górniczych rośnie znaczenie systematycznych badań lekarskich, kontroli trzeźwości oraz szkoleń z zakresu ergonomii, zarządzania zmęczeniem i kultury bezpieczeństwa (wykaz prac i stanowisk, przy których wykonywaniu jest wymagana szczególna sprawność psychofizyczna, np. kierowcy, operatorzy maszyn ciężkich – znajduje się w rozporządzeniu [27]). W praktyce odnotowuje się liczne zdarzenia związane z kolizjami pomiędzy maszynami ładującymi a środkami transportu, szczególnie w strefach załadunku i rozładunku.

Z punktu widzenia dystrybucji zewnętrznej zagrożenia dotyczą także bezpieczeństwa transportu drogowego – w tym ryzyka wypadków z udziałem ciężarówek przewożących kruszywa, które często poruszają się po wąskich drogach lokalnych. Niezabezpieczony lub źle rozmieszczony ładunek może stanowić zagrożenie dla uczestników ruchu, a pylenie z nieszczelnych skrzyń ładunkowych – dla środowiska i mieszkańców terenów przykopalnianych [28]. Bezpieczna logistyka transportu kruszyw wymaga stosowania systemów wspomagania (GPS, radiokomunikacja, czujniki cofania, rejestratory prędkości) oraz wdrożenia standardów BHP dotyczących załadunku, ważenia i utrzymania pojazdów. Ważną rolę odgrywa także kontrola dopuszczalnych mas całkowitych pojazdów (DMC), co bezpośrednio przekłada się na bezpieczeństwo transportu oraz trwałość infrastruktury drogowej [9].

5.3. Zagrożenia środowiskowe

Eksploatacja złóż piasków i żwirów oddziałuje również na środowisko przyrodnicze, co może generować pośrednie zagrożenia dla bezpieczeństwa prowadzenia robót i transportu. Do najczęściej występujących należą: zmiany stosunków wodnych, erozja gleb, zapylenie, hałas oraz wibracje [1, 26, 28]. Zmiany stosunków wodnych, będące wynikiem odwadniania złoża lub zaburzenia naturalnych przepływów wód gruntowych, mogą prowadzić do degradacji siedlisk wodno-błotnych oraz przesuszenia gleb na terenach sąsiednich. W konsekwencji zjawiska te wpływają na stabilność skarp i wyrobisk, zwiększając ryzyko ich osuwania. W niektórych przypadkach obserwuje się także wtórne zalewanie wyrobisk, co utrudnia eksploatację i może stanowić bezpośrednie zagrożenie dla pracowników [26].

Erozja gleb i przekształcenia morfologiczne terenu to kolejne istotne czynniki oddziaływania środowiskowego. Zdejmowanie nadkładu i prowadzenie robót w warstwach powierzchniowych prowadzi do utraty warstwy próchnicznej oraz pogorszenia zdolności retencyjnych gruntu. Zjawiska te mają charakter długofalowy i utrudniają rekultywację terenów poeksploatacyjnych.

Emisja pyłu podczas załadunku, przesiewania i przewożenia kruszyw wpływa nie tylko na środowisko, lecz także na bezpieczeństwo ruchu drogowego, ograniczając widoczność i powodując degradację nawierzchni. Pyły mineralne, zawierające drobne frakcje kwarcu, mogą być również szkodliwe dla zdrowia pracowników i mieszkańców terenów przyległych. Dlatego coraz częściej stosuje się rozwiązania ograniczające emisje wtórne, takie jak zraszanie dróg wewnętrznych, używanie plandek na skrzyniach ładunkowych, a także tworzenie pasów zieleni izolacyjnej pełniących funkcję biologicznego filtra powietrza.

Hałas i wibracje generowane przez pracujące maszyny, kruszarki oraz transport samochodowy stanowią kolejne źródło oddziaływania środowiskowego. Nadmierny poziom hałasu wpływa negatywnie na faunę, zakłócając procesy migracyjne i rozrodcze, a w przypadku terenów mieszkaniowych – na komfort życia ludności. Wibracje natomiast mogą powodować uszkodzenia infrastruktury technicznej, szczególnie w przypadku dróg o słabej nośności lub w pobliżu budynków.

Czynniki środowiskowe mają istotny wpływ również na trwałość dróg technologicznych i bezpieczeństwo pracy operatorów. Zmienna pogoda, w tym intensywne opady, może prowadzić do rozmyć dróg, a tym samym zwiększać ryzyko przewrócenia pojazdu czy utraty przyczepności. Okresowe wahania temperatury sprzyjają także powstawaniu zastoisk błota lub oblodzeń, co utrudnia utrzymanie płynności transportu. W kontekście eksploatacji kopalń odkrywkowych ważne jest zatem bieżące monitorowanie warunków atmosferycznych i odpowiednie dostosowywanie harmonogramów robót.

Kompleksowa identyfikacja zagrożeń w procesie eksploatacji i dystrybucji kruszyw jest podstawą opracowania skutecznego systemu zarządzania bezpieczeństwem. Ujęcie procesów transportowych w analizie ryzyka pozwala na ocenę prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń inicjujących, takich jak kolizje, awarie pojazdów czy błędy operatorów, oraz opracowanie scenariuszy awaryjnych [11]. Współczesne modele oceny ryzyka coraz częściej integrują dane przestrzenne (GIS) dotyczące lokalizacji kopalń, tras przewożenia i punktów dystrybucji, co umożliwia określenie tzw. stref podwyższonego ryzyka transportowego. Pozwala to na planowanie działań prewencyjnych, takich jak optymalizacja tras, zwiększenie nadzoru w strefach załadunku czy szkolenie kierowców w zakresie bezpiecznej obsługi materiałów sypkich [9]. Ponadto coraz większe znaczenie zyskuje wdrażanie koncepcji zrównoważonej eksploatacji surowców mineralnych, zgodnej z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ). Obejmuje ona m.in. ograniczanie zużycia wody technologicznej, recykling frakcji drobnych, a także rekultywację terenów pogórnich z uwzględnieniem aspektów przyrodniczych i krajobrazowych. Takie podejście pozwala nie tylko minimalizować negatywne skutki środowiskowe, lecz także zwiększać akceptację społeczną działalności wydobywczej.

6. Podsumowanie

Transport kruszyw piaskowo-żwirowych odgrywa fundamentalną rolę w systemie logistycznym górnictwa

odkrywkowego w Polsce. Jako ogniwo łączące proces wydobywania z rynkiem odbiorców końcowych decyduje o sprawności dostaw, kosztach jednostkowych i poziomie bezpieczeństwa operacyjnego. Analiza struktury przewozów wskazuje, że dominującą pozycję zajmuje transport samochodowy, co wynika z jego wysokiej elastyczności i dostępności. Jednakże przy rosnących kosztach paliwa, obciążeniu infrastruktury drogowej oraz rosnących wymaganiach środowiskowych konieczne staje się większe wykorzystanie alternatywnych środków transportu – zwłaszcza kolejowego i wodnego – które zapewniają wyższą efektywność energetyczną oraz niższe koszty przewozu na długich dystansach.

Z logistycznego punktu widzenia efektywne funkcjonowanie systemu transportu kruszyw wymaga integracji planowania przewozów z procesami magazynowania, załadunku i dystrybucji. Coraz większe znaczenie odgrywa cyfryzacja procesów logistycznych – wdrożenie nowoczesnych narzędzi telematycznych, systemów GPS oraz cyfrowych platform zarządzania transportem umożliwia bieżące monitorowanie pojazdów, optymalizację tras i minimalizację opóźnień [7]. Technologie te przyczyniają się również do zwiększenia poziomu bezpieczeństwa, ograniczając ryzyko błędów ludzkich i umożliwiając szybką reakcję w sytuacjach awaryjnych, takich jak przeciążenie pojazdu, awaria czy wypadek.

W kontekście bezpieczeństwa przewozu i dystrybucji kruszyw szczególne znaczenie mają przestrzeganie zasad technicznego utrzymania pojazdów, kontrola mas całkowitych oraz właściwa organizacja ruchu w obrębie kopalń i miejsc rozładunku. Opracowanie i wdrożenie procedur bezpieczeństwa, regularne szkolenia kie-

rowców oraz stosowanie systemów wspomagających ocenę ryzyka mogą znacząco zmniejszyć liczbę zdarzeń niebezpiecznych w transporcie surowców masowych.

Z ekonomicznego punktu widzenia ważne jest dążenie do równowagi między kosztami transportu a dostępnością surowców. Optymalizacja tzw. promienia ekonomicznego przewozu, zrównoważony rozwój infrastruktury transportowej oraz integracja różnych gałęzi transportu mogą istotnie ograniczyć koszty logistyczne i poprawić efektywność łańcucha dostaw. Dodatkowo, w kontekście polityki surowcowej i klimatycznej Polski, promowanie niskoemisyjnych form transportu wpisuje się w realizację celów zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym.

Podsumowując, dalszy rozwój transportu w sektorze kruszyw wymaga:

1. Integracji transportu drogowego, kolejowego i wodnego w ramach regionalnych systemów logistycznych;
2. Cyfryzacji procesów przewozowych poprzez telematykę, GPS i automatyczne systemy raportowania;
3. Zwiększenia standardów bezpieczeństwa w oparciu o analizy ryzyka, monitoring techniczny i edukację pracowników;
4. Inwestycji w infrastrukturę transportową oraz wspierania inicjatyw zmniejszających wpływ przewozów na środowisko.

Realizacja tych kierunków umożliwi nie tylko obniżenie kosztów jednostkowych transportu, ale również podniesienie poziomu bezpieczeństwa i konkurencyjności w sektorze górnictwa kruszyw w Polsce.

Selected aspects of transport organisation and safety in natural aggregate extraction

Abstract: The transport of sand and gravel aggregates is a fundamental element of logistics in opencast mining in Poland, determining both the economic efficiency and the environmental impact of the sector. Due to the nature of extraction and the location of deposits, most transport is carried out over short distances, which means that road transport plays a dominant role, especially in regions with a dense network of local roads. Rail and inland waterway transport play a complementary role, mainly for bulk transport over longer distances and in areas with adequate infrastructure. The article highlights the importance of the so-called economic transport radius, which determines the maximum distance for cost-effective transport of aggregates, and factors affecting costs, such as fuel prices, road tolls, road conditions and the organisation of drivers' work. The use of modern information and telematics technologies, which enable route optimisation, fuel consumption control and better delivery planning, is also discussed. Attention is drawn to the technical and organisational risks associated with the exploitation and distribution of raw materials and to the need to introduce solutions that support the safety and sustainable development of the industry. The conclusions indicate that the future of the aggregates market depends on the integration of various means of transport, the digitisation of logistics processes and the implementation of innovative technologies that increase efficiency and competitiveness.

Literatura

1. Kozioł W., Baic I., Góralczyk S. et al., Środowiskowe aspekty eksploatacji kruszyw żwirowo-piaskowych spod wody w Polsce. *Rocznik Ochrona Środowiska* (19), 2017, s. 731–744.
2. Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce 2024. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, www.pgi.gov.pl/surowce/strona-glowna (dostęp: 24.09.2025).
3. Łochańska D., Metoda dostosowania regionalnego wydobycia kruszyw piaskowo-żwirowych do struktury popytu. Praca doktorska (niepublikowana), 2014.
4. Stryszewski M., Łochańska D., Optymalizacja bilansowania podaży z popytem na kruszywa naturalne. „Przegląd Górniczy”, 70(10), 2014, s. 36–40.
5. Raport roczny 2024. Warszawa: PKP CARGO S.A., www.pkpcargo.com/raporty-okresowe/raport-roczny-2024/ (dostęp: 20.08.2025).
6. Wierzbicka A., Aleksander A., Horzela-Miś A., Przeptywy towarów w żegludze śródlądowej w Polsce. *Zeszyty Naukowe Akademii Górnośląskiej* (19), 2024, s. 107–116, <http://dx.doi.org/10.53259/2024.07.10>.
7. Król A., Rokicki T., Telematyka w zarządzaniu flotą samochodową. *Ekonomika i Organizacja Logistyki*, 4(6), 2021, s. 49–57, <https://doi.org/10.22630/EIOL.2021.6.4.28>.
8. Ocena stanu bezpieczeństwa pracy, ratownictwa górniczego oraz bezpieczeństwa powszechnego w związku z działalnością górniczo-geologiczną w 2024 roku. Katowice 2025, Wyższy Urząd Górniczy.
9. Tytko A., Wójcik M. (red.), Bezpieczeństwo pracy urzędów transportowych w górnictwie. Monografia. Łódź 2016, Wyd. CBiDGP.
10. Baghaei Naeini S.A., Badri A., Identification and categorization of hazards in the mining industry: A systematic review of the literature. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 15 (1), 2024, s. 1–19, <https://doi.org/10.1556/1848.2023.00621>.
11. Burtan Z., Schmidt-Polończyk N., Nowak-Senderowska D., Wykorzystanie modelu drzewa zdarzeń do tworzenia scenariuszy zagrożeń w górnictwie. „Inżynieria Mineralna”, 18(2), 2017, s. 163–170, <https://doi.org/10.29227/IM-2017-02-18>.
12. Bęben A., Bogusz P., Głapa W., Marianowski J., Maszyny i urządzenia do odkrywkowego urabiania surowców skalnych wybranymi technologiami. Skrypty Uczelniane 1130, Kraków 1988, Wydawnictwo AGH.
13. Kozioł W., Machniak Ł., Podwodne kopanie: rozwój technologii wydobycia kruszyw żwirowo-piaskowych spod wody. „Surowce i Maszyny Budowlane” (3), 2011, s. 20–26.
14. Stryszewski M., Eksploatacja selektywna kruszyw tamanych i piaskowo-żwirowych w dostosowaniu do zmiennego górotworu. *Kruszywa: produkcja, transport, zastosowanie* (1), 2017, s. 42–49.
15. GUS. Transport drogowy w Polsce 2024 – dane roczne, <https://stat.gov.pl> (dostęp: 24.09.2025).
16. Kopaliński W., Słownik wyrazów obcych i zwrotów obcojęzycznych. Warszawa 1985, Wyd. Wiedza Powszechna.
17. Berezowski S., Wstęp do regionalizacji gospodarczej. Warszawa 1964, Wydawnictwo Szkoły Głównej Planowania i Statystyki.
18. Thomas M.D., Concept of the Region in Geography. Oxford University Press, 1961.
19. Fajferek A., Ekonomia regionu. Warszawa 1966, PWN.
20. Jankowska A., Regiony gospodarcze Polski a rozwój surowcowy. Warszawa 1974, Wyd. Geol.
21. Radwanek-Bąk B., Regiony surowcowe naturalnych kruszyw żwirowo-piaszczystych w Polsce. „Surowce i Maszyny Budowlane” (4), 2007, s. 1–7.
22. Szuba J., Ocena jakości wybranych kruszyw w funkcji rejonu występowania. „Surowce i Maszyny Budowlane” 5 (365), 2007, s. 18–23.
23. Olszewski S. et al., Okręgi górnicze w Polsce – koncepcja organizacyjna. Warszawa 1989, PWN.
24. Kozioł W., Machniak Ł., Borcz A., Baic I., Górnictwo kruszyw w Polsce – szanse i zagrożenia. „Inżynieria Mineralna” 17(2), 2016, s. 175–182, <https://doi.org/10.29227/IM2016-nr2-vol1>.
25. Stryszewski M., Metoda bilansowania popytu i podaży kruszyw naturalnych – uwarunkowania ekonomiczne. *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej* (108), 2004, s. 153–162.
26. Kłojzy-Karczmarczyk B., Staszczak J., Rozpoznanie lokalizacji wyrobisk piasków i żwirów względem granic GZWP oraz cieków powierzchniowych na obszarze województwa śląskiego. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* (475), 2019, s. 93–100, doi:10.7306/BPIG.11.
27. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 28 maja 1996 r. w sprawie rodzajów prac wymagających szczególnej sprawności psychofizycznej (Dz.U. 1996 nr 62 poz. 287, z późn. zm.).
28. Bendixen M., Iversen L.L., Best J. et al., Sand, gravel, and UN Sustainable Development Goals: Conflicts, synergies, and pathways forward. *One Earth*, 4(8), 2021, s. 1095–1111, <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.07.008>.