

Possibilities of using pervious concrete for road base courses in concrete pavements

Możliwości zastosowania betonów jamistych do podbudów drogowych nawierzchni z betonu cementowego

DOI: 10.15199/33.2025.10.02

Abstract. Pervious concrete has not been widely used in road construction until now. This article discusses permeable base courses of pervious cement concrete as a possible design solution for rigid road pavement structures. Such pavements can be affected by base erosion – the washing out of fine particles of the upper base layer. This effect may be eliminated through the use of erosion-resistant base courses, including drainage bases of pervious cement concrete. The article presents a review of example structural solutions of concrete pavements with permeable bases and other permeable layers. The results of experimental studies of pervious concrete designed as concrete for draining bases are also discussed.

Keywords: pervious concrete; concrete pavement; base course.

The base course performs several essential functions within the structure of concrete pavements:

- it receives and transfers vehicular loads to the subgrade,
- it provides a uniform and continuous support for the concrete slabs across their entire contact area,
- it enhances the load-bearing capacity of the pavement structure considered as an integrated system,
- it protects the pavement from the effects of frost heave and structural failures,
- it forms a layer resistant to the ingress of water through expansion joints, thereby preventing erosion and water pumping phenomena.

In cement concrete road pavements, a phenomenon known as base erosion [1] may occur. This process poses a serious threat to the durability of the pavement structure. The loads transmitted through vehicle wheels induce slight vertical displacements at the slab edges, allowing rainwater to be drawn beneath the slab. When a wheel passes over the joint between adjacent slabs, the edge of the following slab moves downward while the previously loaded slab edge lifts upward, generating a suction effect that draws in water along with fine mineral particles. This process leads to hydrodynamic water pumping, characterized by high flow velocities that generate erosive forces. Consequently, fine mineral particles detached from the base course are washed out to the pavement surface within the traffic lane (Figure 1). Over

Streszczenie. Betony jamiste nie były do tej pory szeroko stosowane w drogownictwie. W artykule omówiono podbudowy przepuszczalne z betonu cementowego jako jedno z możliwych rozwiązań przy projektowaniu konstrukcji nawierzchni z betonu cementowego. W tego rodzaju nawierzchniach może występować zjawisko erozji podbudowy, tzn. wypłukiwania drobnoziarnistych części z górnej warstwy podbudowy. Można je wyeliminować, stosując podbudowy odporne na erozję, w tym m.in. drenujące podbudowy z wodoprzepuszczalnego jamistego betonu cementowego. Przedstawiono przykłady rozwiązań konstrukcyjnych nawierzchni drogowych z zastosowaniem podbudów oraz innych warstw przepuszczalnych. Omówiono wyniki badań doświadczalnych betonów jamistych zaprojektowanych jako beton do podbudów drenujących.

Słowa kluczowe: beton przepuszczalny; nawierzchnia betonowa; podbudowa.

Podbudowa pełni ważne funkcje w konstrukcji nawierzchni betonowych:

- przejmuje i przenosi obciążenia od pojazdów na podłoże gruntowe;
- tworzy jednorodne i jednolite podparcie płyt betonowych na całej powierzchni ich kontaktu;
- zwiększa nośność układu konstrukcyjnego nawierzchni traktowanego jako integralna całość;
- zabezpiecza nawierzchnię przed skutkami wysadzin i przełomów;
- tworzy warstwę odporną na działanie wody przenikającej przez szczeliny dylatacyjne, zapobiegając jednocześnie zjawiskom erozji i pompowania wody.

W drogowych nawierzchniach z betonu cementowego może pojawiać się zjawisko tzw. erozji podbudowy [1]. Jest ono niebezpieczne ze względu na trwałość konstrukcji. Obciążenia przekazywane przez koła pojazdów powodują nieznaczne pionowe przemieszczenia krawędzi płyty nawierzchni, co skutkuje tym, że woda opadowa może być zasysana pod płytę. W chwili przejeżdżania koła po szczelinie między płytami, krawędź następnej płyty przemieszcza się w dół, podczas gdy krawędź poprzednio obciążonej płyty podnosi się do góry i zasysa wodę, a wraz z nią okruchy materiałów mineralnych. Wówczas dochodzi do tzw. hydrodynamicznego pompowania wody, któremu towarzyszy duża prędkość przepływu, wywołująca siły erozyjne. W efekcie na powierzchnię płyt w obrębie

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów; danuta.beblacz@ibdim.edu.pl

time, this may result in the occurrence of slab faulting, a condition in which adjacent slabs become vertically misaligned.

The phenomenon of base erosion, defined as the washing out of fine-grained particles from the upper layer of the base course, **can be mitigated or eliminated through the application of the following solutions:**

- a base course composed of a hydraulically bound mixture or asphalt concrete,
- a base course made of unbound aggregate,
- the use of a geotextile layer between the base course and the pavement surface [1].

Base courses resistant to erosion include the following materials [2]:

- **lean concrete** with a compressive strength exceeding 15 MPa (hydraulically bound mixtures) and asphalt concrete with an asphalt content greater than 6% – classified as erosion resistance class I,
- **cement-stabilized aggregates** containing a minimum of 4.5% cement, as well as other asphalt concretes with an asphalt content below 6% – classified as erosion resistance class II,
- **cement-stabilized soils** – classified as erosion resistance class III.

An alternative solution involves the use of permeable cement concrete base courses [3, 4], which combine the characteristics of a drainage layer with those of an erosion-resistant structural layer.

Permeable Base Courses

Permeable base courses made of cement concrete have so far been rarely applied in road pavement structures. However, the research described in [5] demonstrated that it is feasible to use mixtures of crushed stone and sand with a cement binder, as well as reclaimed asphalt pavement (RAP) combined with sand and a cement binder, for the construction of permeable cement concrete base courses. According to [5], increasing the sand or cement content in the concrete mixture led to a reduction in both the mixture's porosity and its coefficient of water permeability. For a porosity of approximately 15%, the coefficient of permeability, k_{10} , was found to be around 10^{-3} m/s, which classifies the material as highly permeable. A minimum porosity of 15% was therefore adopted as the design requirement to ensure sufficient water permeability. It was further established that for mixtures with porosity ranging between 15% and 20%, the compressive strength requirement (greater than 12 MPa) was satisfied, rapid water drainage was ensured, and the mixtures exhibited adequate frost resistance (Figure 2).

Permeable base courses were constructed on experimental road sections using selected concrete mixtures. The results of laboratory tests and examinations of cores extracted from the constructed load-bearing layers demonstrated that permeable structural layers meeting strength requirements exhibit adequate frost resistance and, owing to their porosity, ensure rapid

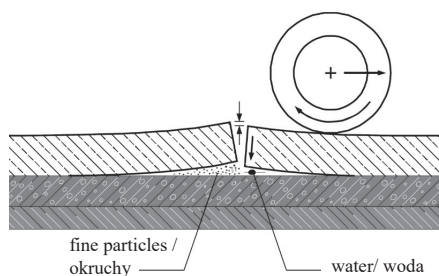


Fig 1. The mechanism of base erosion

Rys. 1. Mechanizm powstawania erozji podbudowy

jezdni wypłukiwane są drobnoziarniste okruchy oderwane z podbudowy (rysunek 1). Może to w konsekwencji doprowadzić do zjawiska tzw. klawiszowania płyt.

Zjawisko erozji podbudowy, czyli wypłukiwanie drobnoziarnistych części z górnej warstwy podbudowy, **można wyeliminować przez zastosowanie:**

- podbudowy z mieszanki związanej spoiwem hydraulicznym lub z betonu asfaltowego;
- podbudowy z kruszywa;
- geowłókniny pomiędzy podbudową a nawierzchnią [1].

Do podbudów odpornych na erozję zalicza się [2]:

- **chudy beton** o wytrzymałości ponad 15 MPa (mieszanki związane hydraulicznie), beton asfaltowy o zawartości asfaltu powyżej 6% – I klasa odporności na erozję;
- **kruszywa stabilizowane cementem** o zawartości min. 4,5% cementu i pozostałe betony asfaltowe o zawartości asfaltu mniejszej niż 6% – II klasa odporności na erozję;
- **grunty stabilizowane cementem** – III klasa odporności na erozję.

Innym rozwiązaniem może być wodoprzepuszczalna podbudowa z betonu cementowego [3, 4], która łączy cechy warstwy przepuszczalnej z warstwą odporną na erozję.

Podbudowy przepuszczalne

Podbudowy przepuszczalne z betonu cementowego były dotychczas rzadko wykonywane w konstrukcjach nawierzchni drogowych. Badania opisane w [5] wykazały, że możliwe jest zastosowanie mieszanki tłucznia i piasku ze spoiwem cementowym oraz destruktu asfaltowego z piaskiem i spoiwem cementowym do wykonania przepuszczalnej podbudowy z betonu cementowego. W [5] stwierdzono także, że ze zwiększeniem zawartości piasku lub cementu w mieszance betonowej zmniejsza się jej porowatość oraz współczynnik wodoprzepuszczalności. W przypadku porowatości rzędu 15% współczynnik wodoprzepuszczalności k_{10} wynosił ok. 10^{-3} m/s i materiał taki sklasyfikowano jako bardzo przepuszczalny. Przyjęto wymaganą porowatość mieszanki nie mniejszą niż 15% w celu zapewnienia wystarczającej przepuszczalności wody. Ustalono, że w przypadku porowatości 15–20% spełnione zostały wymagania dotyczące wytrzymałości na ściskanie (powyżej 12 MPa) i zapewniony jest szybki odpływ wody, a mieszanki takie charakteryzują się wystarczającą mrozoodpornością (rysunek 2).

Z wybranych mieszanek wykonano podbudowy na odcinkach doświadczalnych. Wyniki badań laboratoryjnych i badań przeprowadzonych na rdzeniach pobranych z gotowej warstwy nośnej wykazały, że wodoprzepuszczalne warstwy nośne, które spełniają wymagania w zakresie wytrzymałości, wykazują dostateczną mrozoodporność i dzięki swojej porowatości zapewniają szybkie odwodnienie. Mieszanki betonu przeznaczone do podbudów przepuszczalnych po-

drainage. Concrete mixtures intended for permeable base courses should possess the following properties: maximum aggregate size ranging from 22 to 32 mm, discontinuous grading within the 2/4 mm or 2/8 mm fractions, sand content of approximately 10% of the total aggregate mass, cement content of approximately 200 kg/m³, water–cement ratio (w/c) between 0.40 and 0.45.

The studies discussed in [5] confirmed that a mixture porosity of at least 15% is required to achieve a coefficient of water permeability not lower than 10⁻³ m/s, with a corresponding compressive strength of not less than 12 MPa.

These investigations [5] led to the construction of experimental permeable cement concrete base courses and contributed to the development of design guidelines [6]. According to these guidelines, concrete mixtures for permeable road base layers can be produced using aggregates with a maximum particle size up to 32 mm and discontinuous grading, excluding the 2–4 mm or 2–8 mm fractions. Recycled concrete aggregate was also employed. For coarse fractions (> 8 mm), either crushed stone (chippings) or rounded natural aggregates were used. It was found that the use of crushed stone increased the flexural tensile strength of the material. The cement used for the base courses complied with the PN-EN 197-1:2012 standard [7]. The guidelines [6] provide detailed recommendations regarding the proportions of individual components in porous cement concrete base mixtures (Table 1). In such mixtures, the water–cement ratio (w/c) typically does not exceed 0.40 [6]. Load-bearing layers made of porous concrete exhibit a significant loss of durability even with minor variations in the water content of the concrete mix. Therefore, when recycled concrete aggregate is used, the mix design should incorporate a higher proportion of both water and sand. An increased content of these components enhances the compressive strength of the concrete; however, it simultaneously reduces the void content and, consequently, the water permeability. It should be noted that the void content can be only slightly reduced by increasing the cement content, whereas increasing the sand content leads to a substantial decrease in porosity. This balance between mechanical strength and permeability is thus a critical factor in designing durable permeable cement concrete base courses.

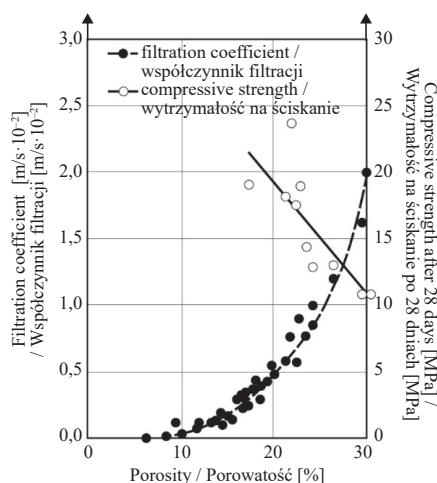


Fig. 2. Relationship between compressive strength, water permeability and porosity of lean concrete [5]

Rys. 2. Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie, wodoprzepuszczalnością a porowatością chudego betonu [5]

Table 1. Recommendations for the composition of porous concrete used for road base courses [6]

Tabela 1. Zalecenia dotyczące składu betonów porowatych stosowanych do podbudowy drogowej [6]

Component / Składnik	Proportion [% by mass] / Udział [% masy]	Proportion [kg/m ³] / Udział [kg/m ³]
Cement	8÷12% of aggregate / 8÷12% kruszywa	150 ÷ 220
Water / Woda	3÷6% of cement + aggregate / 3÷6% cementu + kruszywa	60 ÷ 90
Sand (0/1 or 0/2 mm) / Piasek 0/1 lub 0/2 mm	10% of aggregate / 10% kruszywa	150 ÷ 180
Crushed aggregate (8/22 mm or 8/32 mm) / Kruszywo łamane 8/22 mm lub 8/32 mm	90% of aggregate / 90% kruszywa	1500 ÷ 1600

winny charakteryzować się następującymi właściwościami: maksymalne ziarno 22÷32 mm; uziarnienie nieciągłe 2/4 mm lub 2/8 mm; zawartość piasku ok. 10% całkowitego kruszywa; zawartość cementu ok. 200 kg/m³; wartość wskaźnika w/c 0,40÷0,45.

Badania omówione w [5] potwierdziły, że porowatość mieszanki powinna wynosić co najmniej 15%, aby współczynnik wodoprzepuszczalności był nie mniejszy od 10⁻³ m/s, przy wytrzymałości na ściskanie co najmniej 12 MPa.

Omawiane badania [5] przyczyniły się do realizacji doświadczalnych podbudów przepuszczalnych z betonu cementowego i opracowania wytycznych [6], z których wynika, że mieszanki betonowe przeznaczone do przepuszczalnych podbudów drogowych można wykonywać z kruszywa o uziarnieniu nieciągłym do 32 mm bez frakcji 2–4 mm lub 2–8 mm. Wykorzystywano także kruszywo betonowe z recyklingu. W przypadku grubszego uziarnienia (> 8 mm) stosowano kruszywo łamane (grys) lub kruszywo o ziarnach okrągłych. Stwierdzono, że grys zwiększał wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu. Do podbudów stosowano cement zgodny z PN-EN 197-1:2012 [7]. Wytyczne [6] podają zalecenia dotyczące ilości poszczególnych składników porowatych podbudów betonowych (tabela 1). W takich mieszankach wartość współczynnika w/c zazwyczaj nie przekracza 0,40 [6]. Warstwy nośne z betonu jamistego reagują znaczną utratą trwałości nawet przy niewielkiej zmianie zawartości wody w mieszance betonowej. W związku z tym, jeśli stosowane jest kruszywo z betonu poddanego recyklingowi, to w składzie mieszanki należy uwzględnić większą zawartość wody i piasku, co powoduje wzrost wytrzymałości na ściskanie, ale zmniejsza zawartość pustych przestrzeni i przepuszczalność dla wody. Należy zwrócić uwagę, że zawartość pustych przestrzeni może zostać tylko nieznacznie zmniejszona przez większą zawartość cementu, ale zwiększenie zawartości piasku prowadzi do znacznego zmniejszenia porowatości.

Technology of Constructing Permeable Cement Concrete Base Courses

Permeable concrete mixtures can be produced either in a stationary mixing plant (mixed-in-plant) or directly on-site through in-place mixing (mixed-in-place). During on-site construction of the base course, the components – coarse aggregate, sand, and cement – are dosed sequentially. The materials are then blended by means of a reclaimer–stabilizer (soil milling machine) while water is simultaneously added. To achieve the designed thickness of the base layer, a technological trial should be conducted to determine the exact proportions of coarse aggregate and sand. The prepared mixture is compacted using a pneumatic-tire roller without vibration. Placement of the permeable concrete layer is typically carried out with graders or reclaimer–stabilizers. Producing the mixture directly on-site requires specialized equipment for the milling machine. Particular attention should be paid to the effective delivery of water to the freshly placed dry mixture, as the grading of the permeable concrete allows for rapid water outflow. Therefore, it is recommended that water be sprayed through nozzles positioned above the rotating drum of the milling machine, ensuring that the concrete mixture is adequately moistened before placement. The ambient temperature during mixture production should range between 5°C and 25°C. When the air temperature is $\geq 25^\circ\text{C}$, the temperature of the mixture must be monitored and should not exceed $+30^\circ\text{C}$. Initial compaction is performed using a vibrating screed, followed by final compaction with a smooth roller without vibration. The finished mixture must be protected both from premature drying and from rainwater infiltration.

To prevent drying, the permeable concrete base layer should be covered immediately after placement. It is recommended to apply a curing layer that reduces water evaporation (e.g. a geotextile or jute mat kept moist) or a foil. The foil must be secured against displacement. Concrete curing should be carried out for at least three days. Curing by spraying water on the concrete is only permissible in exceptional cases. For the first seven days after construction, the permeable concrete base layer should be protected against frost. When laying the permeable concrete base layer during rainfall, it is advisable to use special additives or admixtures that prevent separation of the mortar from the aggregate. This is only possible when the mixture is produced in a concrete batching plant.

In the fresh base layer, longitudinal and transverse contraction joints are made. The cuts should be executed so that the joint pattern of the base corresponds to that of the subsequent layer. When constructing a base for a concrete block pavement, it is recommended that the spacing between the cuts does not exceed 5 m. To prevent clogging of the voids, no construction vehicles should drive over the completed base layer. It should also be protected against water penetration if there is a long time gap between the placement of the permeable concrete base layer and the upper pavement layer, due to the risk of washout of the layer located beneath the permeable concrete base by rainwater.

Technologia wykonywania podbudów przepuszczalnych z betonu cementowego

Mieszanka betonu przepuszczalnego może być wytwarzana w wytwórni stacjonarnej (mixed-in-plant) lub na budowie w bezpośrednim procesie mieszania (mixed-in-place). Podczas wykonywania podbudowy bezpośrednio na budowie dozuje się kolejno: kruszywo grube, piasek, cement. Następnie składniki poddawane są procesowi mieszania (frezowanie) przy użyciu gruntofrezarki z jednoczesnym dozowaniem wody. W celu osiągnięcia planowanej grubości warstwy podbudowy należy wykonać próbę technologiczną i ustalić dokładne proporcje kruszywa grubego i piasku. Gotową mieszankę zagęszcza się za pomocą walca z ogumieniem pneumatycznym bez wibracji. Warstwy z betonu przepuszczalnego układa się najczęściej za pomocą równiarek lub gruntofrezarek. Wykonywanie mieszanki bezpośrednio na budowie wymaga specjalnego wyposażenia gruntofrezarki. Należy zwrócić uwagę na problem z efektywnym dostarczeniem wody do ułożonej suchej mieszanki, ponieważ uziarnienie warstwy z betonu przepuszczalnego umożliwia swobodny odpływ wody. Z tego powodu zaleca się doprowadzenie wody za pomocą dysz powyżej wału obrotowego gruntofrezarki tak, aby zwilżona została mieszanka betonowa jeszcze przed rozłożeniem. Temperatura powietrza podczas wykonywania mieszanki powinna wynosić $5\div 25^\circ\text{C}$. Przy temperaturze powietrza $\geq 25^\circ\text{C}$ należy kontrolować temperaturę mieszanki, która nie powinna przekraczać $+30^\circ\text{C}$. Zagęszczanie wstępne wykonuje się za pomocą listwy wibracyjnej, a zagęszczenie właściwe walcem gładkim bez wibracji. Gotową mieszankę należy chronić przed wysuszeniem oraz przed wodą opadową.

W celu ochrony przed wysychaniem warstwę podbudowy z betonu przepuszczalnego przykrywa się bezpośrednio po rozłożeniu. Zalecane jest nałożenie powłoki pielęgnacyjnej zatrzymującej parowanie wody (np. utrzymywanie w stanie wilgotnym geowłókniny lub maty jutowej) lub folii. Folię należy zabezpieczyć przed przemieszczaniem. Pielęgnacja betonu powinna być prowadzona przez min. 3 doby. Pielęgnacja przez spryskiwanie betonu wodą jest możliwa tylko w wyjątkowych przypadkach. Przez pierwsze 7 dni od wykonania warstwę podbudowy z betonu przepuszczalnego należy chronić przed działaniem mrozu. Podczas układania warstwy podbudowy z betonu przepuszczalnego w okresie opadów atmosferycznych wskazane jest zastosowanie specjalnych dodatków lub domieszek zapobiegających oddzielaniu zaprawy od kruszywa. Możliwe jest to tylko w przypadku wytwarzania mieszanki w wytwórni betonu.

W świeżej warstwie podbudowy wykonuje się szczeliny dylatacyjne podłużne i poprzeczne, w taki sposób, aby siatka nacięć podbudowy pokrywała się z siatką nacięć kolejnej ułożonej warstwy. W przypadku wykonywania podbudowy pod nawierzchnią z kostki brukowej zaleca się, by nacięcia były w odstępach maksymalnie co 5 m. Aby nie dopuścić do zabrudzenia pustych przestrzeni, po wykonanej podbudowie nie powinny poruszać się pojazdy z budowy. Należy ją zabezpieczyć także przed penetracją wody, jeżeli pomiędzy ułożeniem warstwy nośnej z betonu przepuszczalnego a ułożeniem warstwy wierzchniej jest długi odstęp czasowy, ze względu na ryzyko wypłukania warstwy znajdującej się pod warstwą nośną z betonu przepuszczalnego przez wodę opadową.

Examples of the Application of Permeable Base Courses

The first experimental road section in Germany featuring a built-in draining base course was constructed on an internal road at a gravel pit in Neubeuern, which also served as a maneuvering area for heavy trucks [8]. The section was 50 meters long and had a slight cross and longitudinal slope of 0.5%. The draining base served as the load-bearing layer beneath a composite block pavement. The block pavement, 10 cm thick, had joints filled with 0/2 mm sand and was laid on a 4 cm thick layer of coal dust and 2/5 mm chippings, which was separated from the draining base by a geotextile. The purpose of the geotextile was to prevent fine particles from the joint filling from being washed into the draining base layer. The draining base itself had a thickness of 15 m.

The draining base was made from a mixture with the following composition: Portland cement (equivalent to the current 32.5 class) – 205 kg; natural sand 0/4 mm – 92 kg; crushed sand 0/4 mm – 91 kg; rounded aggregate 8/16 mm – 1480 kg; water – 82 kg. The water–cement ratio (w/c) was 0.40. The concrete achieved the following parameters: compressive strength of approximately 16 MPa, flexural tensile strength of approximately 2.85 MPa, and porosity of about 20%.

After three years of service, several paving blocks were removed from the pavement to inspect the condition of the underlying layers. It was found that some of the sand from the block joint filling had penetrated into the mixture of coal dust and chippings; however, the geotextile effectively prevented any further migration. The geotextile showed no signs of damage. Visual inspection of the pavement revealed no rutting or loosening of the paving blocks, despite the significant torsional forces caused by the turning of heavy vehicles. Based on these observations, it was concluded that a pavement structure consisting of concrete paving blocks laid on a permeable cement concrete base is suitable for heavy traffic conditions and for areas where rainwater drainage is difficult [8].

Tests involving the use of a draining cement concrete base were also carried out during the construction of the A30 motorway in Salzbergen [5]. A 1.5 km section of concrete pavement was constructed, consisting of two traffic lanes and a hard shoulder with a total width of 11 m, beneath which a draining base layer was installed. The base was produced partly using a mixture prepared in a stationary batching plant and partly through on-site mixing.

The composition of the plant-produced mixture was as follows: Portland cement (equivalent to the current 32.5 class) – 200 kg; natural sand 0/2 mm – 180 kg; crushed aggregate 8/16 mm – 810 kg; crushed aggregate 16/22 mm – 810 kg; water – 90 kg.

The water–cement ratio (w/c) of this mixture was 0.45. The draining base had a thickness of 20 cm and was placed on a 20 cm layer of cement-stabilized soil. The surface layer consisted of a 24 cm thick cement concrete pavement. A chain finisher was used during the placement of the mix-

Przykłady zastosowania podbudowy przepuszczalnej

Pierwszy odcinek doświadczalny nawierzchni drogowej w Niemczech z wbudowaną podbudową drenującą wykonano na drodze wewnętrznej w żwirowni w Neubeuern, która służyła także jako miejsce manewrowania samochodów ciężarowych [8]. Odcinek ten miał długość 50 m i charakteryzował się niewielkim spadkiem poprzecznym i podłużnym – 0,5%. Podbudowa drenująca stanowiła warstwę nośną pod zespoloną nawierzchnią brukową. Nawierzchnia z kostki brukowej o grubości 10 cm z wypełnieniem fug piaskiem 0/2 mm, została ułożona na warstwie z miazgi węglowej i grysu 2/5 mm o grubości 4 cm, która została oddzielona od warstwy drenującej geowłókniną. Zadaniem geowłókniny było uniemożliwienie splukiwania do podbudowy drenującej drobnych części pochodzących z wypełnienia fug. Podbudowa drenująca miała grubość 15 cm.

Podbudowę drenującą wykonano z mieszanki o następującym składzie: cement portlandzki (odpowiednik obecnej klasy 32,5) 205 kg; piasek naturalny 0/4 mm 92 kg; piasek łamany 0/4 mm 91 kg; kruszywo otoczkowe 8/16 mm 1480 kg; woda 82 kg. Współczynnik w/c wynosił 0,40. Uzyskano następujące parametry betonu: wytrzymałość na ściskanie ok. 16 MPa; wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu ok. 2,85 MPa; porowatość ok. 20%.

Po trzech latach użytkowania wyjęto kostkę brukową z nawierzchni w celu obserwacji stanu dolnych warstw. Okazało się, że część piasku pochodząca z fugowania kostek przedostała się do mieszanki miazgi węglowej i grysu, ale geowłóknina skutecznie zapobiegła jego dalszemu przemieszczaniu się. Geowłóknina nie nosiła śladów uszkodzeń. Podczas oględzin nawierzchni nie stwierdzono kolein ani poluzowania się kostek, chociaż na skutek zawracania ciężkich pojazdów występują duże siły skręcające. Na tej podstawie stwierdzono, że konstrukcja nawierzchni z betonowej kostki brukowej ułożonej na podbudowie przepuszczalnej z betonu cementowego nadaje się do zastosowania pod ruch ciężki i dodatkowo na powierzchniach, z utrudnionym odpływem wód opadowych [8].

Próby z zastosowaniem betonowej podbudowy drenującej miały także miejsce podczas budowy autostrady A30 w Salzbergen [5]. Wykonano wówczas odcinek nawierzchni betonowej długości 1,5 km składający się z dwóch pasów jezdni i pasa postojowego o łącznej szerokości 11 m, pod którą ułożono podbudowę drenującą. Podbudowę wykonano częściowo z mieszanki wytwarzanej w wytwórni, a częściowo w procesie mieszania na budowie. Skład mieszanki wykonanej w wytwórni: cement portlandzki (odpowiednik obecnej klasy 32,5) 200 kg; piasek naturalny 0/2 mm 180 kg; kruszywo łamane 8/16 mm 810 kg; kruszywo łamane 16/22 mm 810 kg; woda 90 kg.

Współczynnik w/c tej mieszanki wynosił 0,45. Podbudowa drenująca miała grubość 20 cm i została ułożona na gruncie stabilizowanym cementem o grubości 20 cm. Wierzchnią warstwę stanowiła nawierzchnia z betonu cementowego o grubości 24 cm. Przy wbudowywaniu mieszanki zastosowano wykańczarkę łańcuchową. Następnie warstwa została zagęszczona walcem gładkim bez wibracji. Po opadach deszczu woda

ture, followed by compaction with a smooth roller without vibration. After rainfall, water was observed to accumulate on the cement-stabilized subgrade but not on the draining base layer. When the base was produced using the mixed-in-place method, the process involved the following steps: placement of a mixture of 8/22 mm chippings with a grader, light compaction using a smooth roller without vibration, addition of cement and simultaneous mixing with the addition of water, followed by compaction with a pneumatic-tire road roller and a 10-ton smooth roller (three passes).

Longitudinal and transverse cuts were made while the concrete was still wet. On two lanes, fine material deposits were observed across the entire base layer, which was attributed, among other factors, to uneven mixing of the components. It was therefore concluded that the in-place mixing method requires further improvement.

During the extension of the A7 motorway between Hanover and Hildesheim, a draining base course was also constructed beneath the hard shoulders [5], partly using a plant-produced mixture and partly through on-site mixing. The mixture produced in the batching plant had the following composition: Portland cement (equivalent to the current 32.5 class) – 195 kg; natural sand 0/2 mm – 140 kg; recycled concrete aggregate 8/32 mm – 1460 kg; water – 100 kg.

The water-cement ratio (w/c) of this mixture was 0.51. As aggregate, concrete from the demolition of a cement concrete pavement was used, containing a small proportion of material from the bituminous layer. The material was crushed, and fractions smaller than 8 mm were screened out. The draining base had a thickness of 20 cm and was placed on a 20 cm layer of cement-stabilized soil. The surface layer consisted of a 26 cm thick cement concrete pavement. During placement, a chain finisher was used. The layer was then compacted with a tandem roller once statically and twice with vibration.

When the base was produced using the mixed-in-place method, the process included the following steps: placement of a mixture of 8/22 mm chippings with a grader, light compaction using a smooth roller without vibration, addition of cement and water, mixing (milling) of the components, and final compaction. Water was added before milling and was not properly retained by the material. As in the previously described case, the deposition of fine particles in streaks was observed, which locally reduced the permeability of the layer.

Examples of the use of draining cement concrete base courses can also be found in France. As part of repair works at Charles de Gaulle Airport in Paris, a permeable concrete base was applied to facilitate the drainage of surface water infiltrating through the joints [3]. In 2007, on the A51 motorway, in the du Sinard tunnel (980 m long, located at an altitude of 800 m above sea level), a cement concrete pavement was constructed on a draining base layer [9]. The 15 cm thick draining base was made from a mixture with the following composition: cement CEM II/A-LL 42.5 R – 200 kg; natural sand 0/4 mm – 550 kg; gravel 12.5/20 mm – 1450 kg; water – 78 kg; plasticizing admixture – 0.7% by weight of cement.

piętrzyła się na gruncie zagęszczonym cementem, ale nie na podbudowie drenującej. Podczas wykonywania podbudowy w procesie mieszania na miejscu prace obejmowały: wbudowanie równiarką mieszanki grys o uziarnieniu 8/22 mm; lekkie zagęszczenie walcem gładkim bez wibracji; dodanie cementu i wymieszanie przy równoczesnym dodawaniu wody; zagęszczenie walcem drogowym na oponach pneumatycznych i walcem 10-tonowym gładkim (trzykrotny przejazd).

Nacięcia podłużne i poprzeczne zostały wykonane na moko. Na dwóch pasach stwierdzono odkładanie się na całej warstwie podbudowy części drobnych, co było spowodowane m.in. nierównomiernym przemieszaniem składników. Uznano więc, że metoda wykonywania podbudowy metodą mieszania na miejscu wymaga udoskonalenia.

W ramach rozbudowy autostrady A7 pomiędzy Hanowem a Hildesheim wykonano podbudowę drenującą pod pasami postojowymi [5], częściowo z mieszanki wytwarzanej w wytwórni, a częściowo w procesie mieszania na budowie. Mieszanka wykonana w wytwórni miała następujący skład: cement portlandzki (odpowiednik obecnej klasy 32,5) 195 kg; piasek naturalny 0/2 mm 140 kg; kruszywo z recyklingu betonu 8/32 mm 1460 kg; woda 100 kg.

Współczynnik w/c tej mieszanki wynosił 0,51. Jako kruszywo użyto betonu z rozbiórki nawierzchni betonowej z niewielkim udziałem materiału z warstwy bitumicznej. Materiał poddano kruszeniu, a następnie odsiano frakcje poniżej 8 mm. Podbudowa drenująca miała grubość 20 cm i została ułożona na gruncie stabilizowanym cementem o grubości 20 cm. Wierzchnią warstwę stanowiła nawierzchnia z betonu cementowego o grubości 26 cm. Przy wbudowywaniu mieszanki zastosowano wykańczarkę łańcuchową. Następnie warstwa została zagęszczona walcem tandemowym, raz statycznie i dwa razy z wibracją.

Podczas wykonywania podbudowy, w procesie mieszania na budowie, prace przebiegały w następujący sposób: wbudowanie równiarką mieszanki grys o uziarnieniu 8/22 mm; lekkie zagęszczenie walcem gładkim bez wibracji; dodanie cementu i wody; przemieszanie (frezowanie) składników; zagęszczenie. Woda została dodana przed frezowaniem i nie została dobrze zatrzymana przez materiał. Podobnie jak w opisanym wcześniej zastosowaniu, także w tym przypadku zauważono odkładanie się drobnych części pasami, co miejscowo zmniejszały przepuszczalność warstwy.

Przykłady zastosowania podbudów drenujących z betonu cementowego można również znaleźć we Francji. W ramach prac naprawczych na lotnisku Charles'a de Gaulle'a w Paryżu zastosowano podbudowę z betonu przepuszczalnego, aby łatwiej odprowadzić wodę powierzchniową wsiąkającą w szczeliny [3]. W 2007 r. w ciągu autostrady A51 w tunelu du Sinard o długości 980 m na wysokości 800 m n.p.m. wykonano nawierzchnię z betonu cementowego na podbudowie drenującej [9]. Podbudowę drenującą grubości 15 cm wykonano z mieszanki o następującym składzie: cement CEM II/A-LL 42,5 R 200 kg; piasek naturalny 0/4 mm 550 kg; żwir 12,5/20 mm 1450 kg; woda 78 kg; domieszka uplastyczniająca 0,7% m.c. Jej wierzchnią warstwę stanowiła nawierzchnia z betonu cementowego o grubości 20 cm.

Its surface layer consisted of a 20 cm thick cement concrete pavement.

In France, porous concretes are also used for the drainage of pavements on parking lanes [10]. Permeable concrete base courses are also applied in Asian countries. The occurrence of heavy rainfall necessitates the development of solutions that enable rapid drainage of stormwater. In Indonesia, permeable concrete base courses have proven to be an effective solution for pavements made of precast elements [11]. Reference [12] identified porous concrete as one of the possible solutions for pavement structures in tunnels. In China, heavy rainfall combined with high traffic volumes can cause erosion of the surface layer and the base courses. As part of the Sponge City project [13], a series of studies were conducted in sixteen cities to develop measures preventing this phenomenon. Permeable concrete pavements and base courses proved to be an effective solution for increasing pavement durability [14].

In Poland, porous concrete was used for the first time in the pavement structure of the tunnel on connector Ł1 of national road S79A at km 1 +665 in Warsaw [15]. It was applied as a filtration layer. The porous concrete was made using the following materials: blast-furnace cement CEM II/A 42.5 N-LH/HSR/NA; granite chippings 2/8 mm; air-entraining admixture; plasticizing and superplasticizing admixtures; and water. The concrete parameters were as follows: class C16/20; splitting tensile strength approximately 2 MPa; flexural strength approximately 3 MPa; frost resistance F100; permeability 22 mm/s.

The adopted solution was optimal in terms of rapid water drainage, ensuring adequate strength, and preventing pavement rutting. The use of a porous concrete filtration layer eliminated the problem of water penetrating through the base slab and improved road safety in the tunnel by preventing surface water accumulation and icing.

Recommendations for the Composition of Permeable Concrete

Own research on the influence of aggregate grading on the strength and porosity parameters of porous concrete intended for road base courses [16] showed that the grading of the aggregate affects the obtained values of compressive strength, porosity, and frost resistance, even when the amount of cement paste remains constant. A total of 66 different mixtures were tested. In all mixtures, identical quantities of cement, sand 0/2 mm, water, air-entraining admixture, and the total amount of coarse aggregate (gravel fractions 8/16 mm, 16/22.4 mm, and 22.4/31.5 mm) were used. The variable factor was the proportion of individual coarse aggregate fractions in the aggregate blend.

The general composition of the concrete mixture was as follows: cement – 200 kg; sand 0/2 mm – 170 kg; gravel 8/16 mm, 16/22.4 mm, 22.4/31.5 mm – 1600 kg; water – 90 kg; air-entraining admixture – 0.2% by weight of cement.

All concretes were subjected to the following tests:

- compressive strength according to PN-EN 12390-3 [17],

We Francji betony porowate stosuje się również do odwadniania nawierzchni na pasach postojowych [10]. Betonowe podbudowy przepuszczalne stosowane są również w krajach azjatyckich. Zjawisko ulewnych opadów deszczu zmusza do szukania rozwiązań umożliwiających szybkie odprowadzanie wód opadowych. W Indonezji podbudowy z betonu przepuszczalnego okazały się dobrym rozwiązaniem w przypadku nawierzchni z prefabrykatów [11]. W [12] wskazano beton porowaty jako jedno z możliwych rozwiązań w przypadku nawierzchni w tunelach. W Chinach zdarza się, że ulewne deszcze w połączeniu z dużym natężeniem ruchu powodują erozję warstwy ścieralnej oraz podbudów. W ramach projektu Sponge City [13] w szesnastu miastach przeprowadzono wiele badań nad poszukiwaniem rozwiązań, zapobiegających występowaniu tego zjawiska. Przepuszczalne betonowe nawierzchnie oraz podbudowy okazały się skutecznym rozwiązaniem zwiększającym trwałość nawierzchni [14].

W Polsce beton jamisty po raz pierwszy zastosowano w konstrukcji nawierzchni drogowej tunelu w ciągu łącznicy Ł1 drogi krajowej S79A w km 1 +665 w Warszawie [15]. Został on użyty jako warstwa filtracyjna. Do wykonania betonu jamistego zastosowano: cement hutniczy CEM II/A 42,5 N-LH/HSR/NA; grys granitowy 2/8 mm; domieszkę napowietrzającą; domieszkę upłynniającą i uplastyczniającą; wodę. Parametry betonu były następujące: klasa C16/20; wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu ok. 2 MPa; wytrzymałość na zginanie ok. 3 MPa; odporność na działanie mrozu F100; przepuszczalność 22 mm/s.

Przyjęte rozwiązanie było optymalne pod względem szybkiego odprowadzania wody, zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości oraz zapobiegania koleinowaniu nawierzchni. Zastosowanie warstwy filtracyjnej z betonu jamistego wyeliminowało problem wody przenikającej przez płytę denną oraz pozwoliło na poprawę bezpieczeństwa ruchu drogowego w tunelu poprzez eliminację wody i oblodzenie nawierzchni.

Zalecenia dotyczące składu betonu przepuszczalnego

Badania własne nad wpływem uziarnienia na parametry wytrzymałości i porowatości betonu jamistego do podbudów drogowych [16] wykazały, że uziarnienie kruszywa ma wpływ na uzyskiwane wyniki wytrzymałości na ściskanie, porowatości i odporności na działanie mrozu, pomimo stałej ilości zaczynu cementowego. Badaniom poddano 66 różnych mieszanek. W przypadku wszystkich mieszanek przyjęto taką samą ilość cementu, piasku 0/2 mm, wody, domieszki napowietrzającej oraz sumaryczną ilość kruszywa grubego (żwir frakcji 8/16 mm, 16/22,4 mm, 22,4/31,5 mm). Zmienną był udział poszczególnych frakcji kruszywa grubego w stosie okuchowym.

Ramowy skład mieszanki betonowej: cement 200 kg; piasek 0/2 mm 170 kg; żwir 8/16 mm, 16/22,4 mm, 22,4/31,5 mm 1600 kg; woda 90 kg; domieszka napowietrzająca 0,2% m.c.

Wszystkie betony zostały poddane następującym badaniom:

- wytrzymałości na ściskanie wg PN-EN 12390-3 [17];

- porosity determined using image analysis software ImageJ,
- calculated porosity based on density according to PN-EN 12390-7 [18],
- frost resistance for grade F25 according to PN-B-06265, Annex O [19].

Ten selected concretes that achieved frost resistance grade F25 were additionally tested for:

- filtration coefficient according to PN-B-04492:1955 [20],
- indirect tensile strength according to PN-EN 13286-42 [21],
- modulus of elasticity according to PN-EN 12697-26 [22].

The tested concretes exhibited the following properties:

- compressive strength – 5.3 MPa to 11.0 MPa,
- calculated porosity – 18.0% to 27.6%,
- porosity determined by image analysis – 17.2% to 44.1%,
- bulk density – 1.81 g/cm³ to 2.05 g/cm³,
- 47 out of 66 concretes achieved frost resistance grade F25,

- filtration coefficient of concretes with frost resistance grade F25 – 6.4×10^{-3} m/s to 12.8×10^{-3} m/s,

- modulus of elasticity of concretes with frost resistance grade F25 – 10.6 GPa to 21.6 GPa.

Concrete specimens achieved compressive strength values ranging from 5.3 MPa to 17.2 MPa (Figure 3). The majority of results were recorded within the ranges 6.7–8.4 MPa, 8.4–10.1 MPa, and 11.8–13.5 MPa. Twenty-one series of specimens achieved compressive strength values exceeding 10 MPa, including four samples with strength values above 15 MPa. The concrete specimens exhibited a calculated porosity ranging from 18.0% to 27.6% (Figure 4), and porosity determined by image analysis ranging from 11.3% to 34.5%. The majority of calculated porosity results were recorded within the range of 22.7% to 25.1%. Table 2 presents a summary of the test results for selected concretes that achieved frost resistance grade F25.

- porowości – metoda analizy obrazu za pomocą oprogramowania ImageJ;

- porowości obliczeniowej na podstawie gęstości wg PN-EN 12390-7 [18];

- odporności na działanie mrozu dla stopnia F25 wg PN-B-06265 Zał. O [19].

Dziesięć wybranych betonów, które uzyskały stopień mrozoodporności F25 poddano badaniom:

- współczynnika filtracji wg PN-B-04492:1955 [20];

- wytrzymałości na rozciąganie pośrednie wg PN-EN 13286-42 [21];

- modułu sprężystości wg PN-EN 12697-26 [22].

Zbadane betony charakteryzowały się następującymi właściwościami:

- wytrzymałość na ściskanie – $5,3 \div 17,2$ MPa;

- porowość obliczeniową – $18,0 \div 27,6\%$;

- porowość na podstawie analizy obrazu – $17,2 \div 44,1\%$;

- gęstość objętościowa – $1,81 \div 2,05$ g/cm³;

- 47 z 66 betonów uzyskało stopień mrozoodporności F25;

- współczynnik filtracji betonów o stopniu mrozoodporności F25 – $6,4 \cdot 10^{-3} \div 12,8 \cdot 10^{-3}$ m/s;

- moduł sprężystości betonów o stopniu mrozoodporności F25 – $10,6 \div 21,6$ GPa.

Próbki betonowe uzyskały wytrzymałość na ściskanie $5,3 \div 17,2$ MPa (rysunek 3). Najwięcej wyników odnotowano w przedziałach $6,7 \div 8,4$ MPa, $8,4 \div 10,1$ MPa oraz $11,8 \div 13,5$ MPa. 21 serii próbek uzyskało wytrzymałość na ściskanie większą niż 10 MPa, w tym 4 powyżej 15 MPa. Próbki betonowe charakteryzowały się porowością obliczeniową $18,0 \div 27,6\%$ (rysunek 4). Porowość na podstawie analizy obrazu wynosiła $11,3 \div 34,5\%$. Najwięcej wyników porowości obliczeniowej odnotowano w przedziałach $22,7 \div 25,1\%$. W tabeli 2 zestawiono wyniki badań wybranych betonów o stopniu mrozoodporności F25.

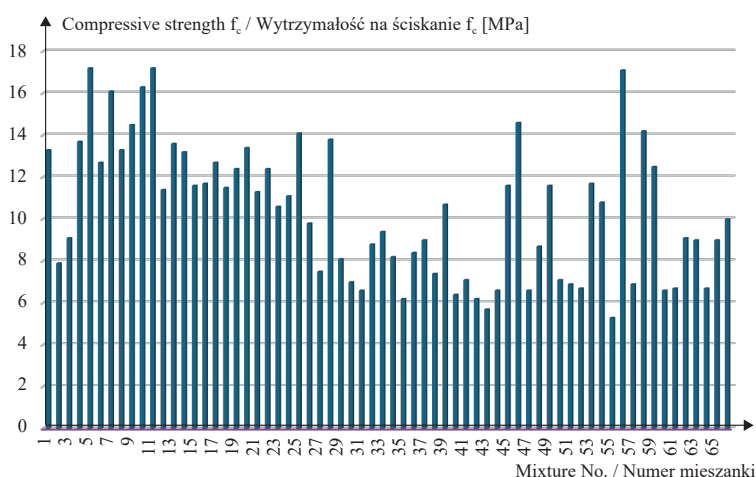


Fig. 3. Compressive strength of pervious concrete [16]

Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie betonu jamistego [16]

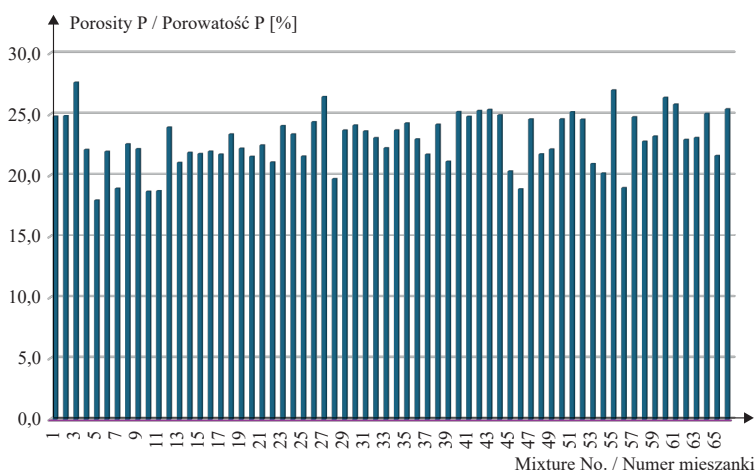


Fig. 4. Calculated porosity of pervious concrete [16]

Rys. 4. Porowość obliczeniowa betonu jamistego [16]

The structure of the concretes that achieved a compressive strength of $10 \text{ MPa} \leq f_c \leq 20 \text{ MPa}$ and an elastic modulus $E \geq 15,000 \text{ MPa}$ (15 GPa) – corresponding to the parameters of a cement-bound mixture of class C8/10 – is shown in Photograph 1. These concretes were also characterized by frost resistance grade F25.

The structure of the concretes with a compressive strength of $6 \text{ MPa} \leq f_c \leq 10 \text{ MPa}$ and an elastic modulus $E \geq 7,200 \text{ MPa}$ (7.2 GPa) – corresponding to the parameters of a cement-bound mixture of class C5/6 – is shown in Photograph 2. These concretes were also characterized by frost resistance grade F25.

Table 2. Test results for selected concrete

Tabela 2. Wyniki badań wybranych betonów

Mixture No. / Numer mieszanki	Compressive strength / Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Indirect tensile strength Rit / Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie Rit [MPa]	Permeability coefficient k_{10} / Współczynnik filtracji k_{10} [m/s]	Elastic modulus / Moduł sprężystości [GPa]
5	17.2	0.58	$6.4 \cdot 10^{-3}$	18.9
11	17.2	0.42	$9.2 \cdot 10^{-3}$	13.8
17	12.7	0.40	$12.8 \cdot 10^{-3}$	15.6
25	14.1	0.47	$8.1 \cdot 10^{-3}$	10.6
32	8.8	1.22	$8.8 \cdot 10^{-3}$	20.3
39	10.7	0.45	$8.8 \cdot 10^{-3}$	12.9
46	14.6	0.37	$9.4 \cdot 10^{-3}$	14.7
55	5.3	0.37	$10.2 \cdot 10^{-3}$	11.7
58	14.2	1.03	$8.8 \cdot 10^{-3}$	21.6
63	9.0	0.98	$8.1 \cdot 10^{-3}$	13.6

The analysis of the obtained test results made it possible to formulate recommendations for the design of porous concretes intended for road base courses, particularly regarding the selection of aggregates for these concretes. The recommended aggregate composition is as follows: the aggregate blend should consist of three fractions:

- 8/16 mm, 16/22.4 mm, and 22.4/31.5 mm,
- the content of any single fraction should not exceed 80%,
- for concretes with a strength class of C5/6, the content of the 8/16 mm fraction $\leq 50\%$, and the 16/22.4 mm fraction $\leq 40\%$, for concretes with a strength class of C8/10,
- the content of the 8/16 mm fraction $\leq 50\%$, and the 22.4/31.5 mm fraction $\leq 50\%$.

Strukturę betonów, w przypadku których uzyskano wytrzymałość na ściskanie $10 \text{ MPa} \leq f_c \leq 20 \text{ MPa}$ oraz moduł sprężystości $E \geq 15,000 \text{ MPa}$ (15 GPa), co odpowiada parametrom mieszanki związanej cementem klasy C8/10, przedstawiono na fotografii 1. Betony te charakteryzują się odpornością na działanie mrozu F25.

Strukturę betonów o wytrzymałości na ściskanie $6 \text{ MPa} \leq f_c \leq 10 \text{ MPa}$ oraz module sprężystości $E \geq 7200 \text{ MPa}$ (7,2 GPa), co odpowiada parametrom mieszanki związanej cementem klasy C5/6, przedstawiono na fotografii 2. Charakteryzują się one odpornością na działanie mrozu F25.

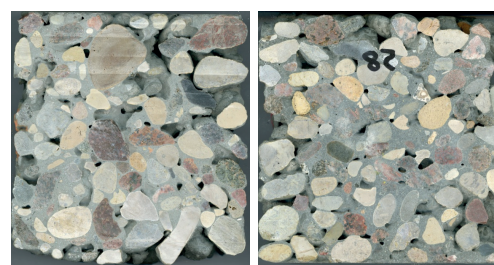


Photo 1. Structure of concrete with compressive strength $10 \text{ MPa} \leq f_c \leq 20 \text{ MPa}$ and modulus of elasticity $E \geq 15,000 \text{ MPa}$

Fot. 1. Struktura betonów o wytrzymałości na ściskanie $10 \text{ MPa} \leq f_c \leq 20 \text{ MPa}$ oraz module sprężystości $E \geq 15,000 \text{ MPa}$

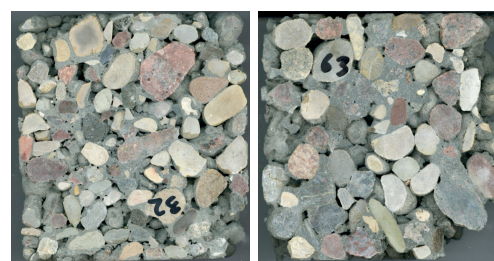


Photo 2. Structure of concrete with compressive strength $6 \text{ MPa} \leq f_c \leq 10 \text{ MPa}$ and modulus of elasticity $E \geq 7200 \text{ MPa}$

Fot. 2. Struktura betonów o wytrzymałości na ściskanie $6 \text{ MPa} \leq f_c \leq 10 \text{ MPa}$ oraz module sprężystości $E \geq 7200 \text{ MPa}$

Analiza uzyskanych wyników badań pozwoliła na sformułowanie zaleceń dotyczących projektowania betonów jamistych przeznaczonych na podbudowy drogowe, m.in. pod kątem doboru kruszyw:

- mieszanka kruszywowa skomponowana z trzech frakcji: 8/16 mm, 16/22,4 mm, 22,4/31,5 mm;
- zawartość pojedynczej frakcji nie może przekraczać 80%;
- w przypadku betonów o wytrzymałości C5/6 zawartość frakcji 8/16 mm $\leq 50\%$, a zawartość frakcji 16/22,5 mm $\leq 40\%$;
- w przypadku betonów o wytrzymałości C8/10 zawartość frakcji 8/16 mm $\leq 50\%$, a zawartość frakcji 22,4/31,5 mm $\leq 50\%$.

Summary

A draining base course provides adequate strength and effective water drainage, preventing pavement erosion caused by rainfall. Experience with the use of such base layers demonstrates that they can successfully enhance the resilience of road infrastructure to extreme events, such as rapid water flow. Possible application areas of porous concrete as a base course include:

- rigid pavements with traffic categories from KR1 to KR5,
- permeable pavements (made of precast elements or porous cement concrete),
- sports surfaces.

A base course made of porous concrete, when combined with a permeable surface layer, represents a solution consistent with the principles of sustainable urban development. It aligns with programs such as Low Impact Development (LID) [23], Water Sensitive Urban Design (WSUD) [24], [25], Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) [26], [27], and the European initiative Blue Deal.

Received: 09.06.2025

Revised: 11.08.2025

Published: 23.10.2025

Podsumowanie

Podbudowa drenująca zapewnia odpowiednią wytrzymałość oraz odprowadzenie wody, zapobiegając erozji nawierzchni wywołanej wodami opadowymi. Doświadczenia z zastosowania takich podbudów pokazują, że z powodzeniem mogą być one stosowane w celu zwiększenia odporności infrastruktury drogowej na zjawiska ekstremalne, np. szybki przepływ wody. Możliwe obszary zastosowania betonu jamistego jako podbudowy to:

- nawierzchnie sztywne o kategorii ruchu KR1÷KR5;
- nawierzchnie przepuszczalne (z prefabrykatów, z betonu cementowego jamistego);
- nawierzchnie sportowe.

Podbudowa z betonu jamistego w połączeniu z nawierzchnią przepuszczalną stanowi rozwiązanie wpisujące się w trendy zrównoważonego rozwoju terenów zurbanizowanych, m.in. w programy: *Zabudowa o niskim oddziaływaniu na środowisko* (Low Impact Development, LID) [23], *Planowanie miasta ukierunkowane na wodę* (Water Sensitive Urban Design, WSUD) [24, 25] *System zrównoważonego zagospodarowania wód opadowych* (Sustainable Urban Drainage Systems, SUDS) [26, 27] oraz w europejską inicjatywę Blue Deal.

Artykuł wpłynął do redakcji: 09.06.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 11.08.2025 r.

Opublikowano: 23.10.2025 r.

Literatura

- [1] Szydło A. Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego. Polski Cement, Kraków 2004.
- [2] Chaussées en béton. Guide technique. LCPC, SETRA, 2000.
- [3] Birmann D. Drain-HGT als wasserdurchlässige Tragschicht im Verkehrswegebau. Bau und Bewertung, Straße und Autobahn 4/1994, s. 200-209.
- [4] Rafalski L.: Podbudowy drogowe, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 2007.
- [5] Eickschen E, Siebel E. Drain-HGT als wasserdurchlässige Tragschicht im Verkehrswegebau. Technologische Untersuchungen, Straße und Autobahn 4/1994, s. 193-199.
- [6] Merkblatt für Dränbetontragschichten (DBT), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 1996.
- [7] PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [8] Leykauf G, Birmann D. Verkehrsflächen mit Betonverbundsteinpflaster und Drain-HGT, beton 4/94, s. 198-201.
- [9] Chevalier C. i inni: Tunnel du Sinaid. Une chaussée durable en béton sur A51, Routes 2007 nr 862 s. 39-41.
- [10] Nissoux J-L, Merrien P. Les bandes d'arrêt d'urgence en béton poreux – Étude du Matériau, Chaussées Nr. 92, Nov./Dez. 1977 s. 142-148.
- [11] Care FRAM, Subagio BS, Rahman H. Porous concrete basic property criteria as rigid pavement base layer in Indonesia (2018) MATEC Web of Conferences, 147, art. no. 02008, DOI: /10.1051/mateconf/201814702008.
- [12] Feng X, Liang F, Jiang H, Yuan J. Mixture Ratio Design of a Porous Concrete Base in a Tunnel Pavement Based on the Orthogonal Test, Geotechnical Special Publication, 2016-January, s. 91-99, <https://doi.org/10.1061/9780784480090.012>.
- [13] Xu W, Shen W, Huo X, Yang Z, Wang J, Zhang W, Ji X. Investigation on the properties of porous concrete as road base material, Construction and Building Materials 158, 2018, s. 141-148, DOI: /10.1016/j.conbuildmat.2027.09.151.
- [14] Yang Z, Ma W, Shen W. The aggregate gradation for the porous concrete pervious road base material, Materials Science Edition, Vol. 23, s. 391–394, 2008, DOI: /10.1007/s11595-007-3391-4.
- [15] Banaś A, Kałużński M, Kuryłowicz A. Zastosowanie betonu jamistego jako warstwy nawierzchni obiektów inżynierskich, Materiały Budowlane 2024;12(628):245-249.
- [16] Beblacz D. Właściwości betonu przepuszczalnego do podbudów drogowych w konstrukcji nawierzchni z betonu cementowego, Roads and Bridges – Drogi i Mosty, 2021;20:359-378, <https://doi.org/10.7409/rabdim.021.021>.
- [17] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [18] PN-EN 12390-7:2019-08 Badania betonu – Część 7: Gęstość betonu.
- [19] PN-B-06265:2018-10 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206 +A1:2016-12.
- [20] PN-B-04492:1955 Grunty budowlane – Badania właściwości fizycznych – Oznaczanie wskaźnika wodoprzepuszczalności.
- [21] PN-EN 13286-42:2005 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym – Część 42: Metoda oznaczania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym.
- [22] PN-EN 12697-26:2018-08 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań – Część 26: Sztywność.
- [23] Reducing stormwater costs through Low Impact Development (LID) strategies and practices, EPA, Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2007.
- [24] Donofrio J, Kuhn Y, McWalter K, Winsor M. Water Sensitive Urban Design: An emerging model in sustainable design and comprehensive water cycle management, Environmental Practice, Vol. 11, no. 3, 2009, s. 179–189.
- [25] Yang Z, Ma W, Shen W. The aggregate gradation for the porous concrete pervious road base material, Materials Science Edition, volume 23, s. 391–394, 2008.
- [26] Hoang L. System interactions of stormwater management using sustainable urban drainage systems and green infrastructure, Urban Water Journal, 13 (7), 2016, s. 739–758, DOI: /10.1080/1573062X.2015.1036083.
- [27] <https://www.bgs.ac.uk/geology-projects/suds/>.