

## Oddziaływanie wapna hydratyzowanego na trwałość mieszanki mineralno-asfaltowej wytwarzanej w technologii „na półciepło”

### The action of hydrated lime on the durability of asphalt mixture produced in the half warm mix asphalt technology

Mateusz M. Iwański<sup>1,\*</sup>, Zdzisława Owsiak<sup>1</sup>, Eva Remishova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Building Engineering Technologies and Organization, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology, 25-314 Kielce, Poland

<sup>2</sup> Department of Highway and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Žilina, 8 Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovakia

\*corresponding author: M. Iwański, e-mail: [matiwanski@tu.kielce.pl](mailto:matiwanski@tu.kielce.pl)

#### Streszczenie

Głównym priorytetem w drogownictwie jest zmniejszenie energochłonności wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych przeznaczonych na górne warstwy konstrukcji nawierzchni. Najbardziej efektywną w tym zakresie jest technologia z wykorzystaniem asfaltu spienianego wodą. Pozwala ona uzyskać lepszycie spienione wodą, z którego wytwarza się mieszanki mineralno-asfaltowe produkowane w technologii „na półciepło” w temperaturze o 40°C do 60°C mniejszej niż produkcja w tradycyjnej technologii. W badaniach zastosowano beton asfaltowy AC 8S wykonany z asfaltem 50/70. Właściwe parametry spieniania asfaltu 50/70 uzyskano stosując dodatek środka powierzchniowo czynnego. Zastosowano także wapno hydratyzowane jako zamiennik części wypełniacza mineralnego do mieszanki mineralno-asfaltowej. Celem badań było zbadanie trwałości eksploatacyjnej betonu asfaltowego poprzez pomiar właściwości takich jak wytrzymałość na pośrednie rozciąganie w zakresie temperatury od -10°C do +40°C oraz odporność na deformacje trwałe. Wykorzystując funkcję użyteczności Harringtona wyznaczono optymalną zawartość wapna hydratyzowanego i asfaltu spienionego ze względu na wymaganą trwałość betonu asfaltowego. Uzyskany efekt jest konsekwencją synergii wapna hydratyzowanego i asfaltu spienionego w mieszance AC 8S wykonanej w technologii „na półciepło”.

**Słowa kluczowe:** mieszanka mineralno-asfaltowa w technologii na „półciepło”, wapno hydratyzowane, asfalt spieniony, powierzchniowo aktywny środek

#### Summary

The main priority in road construction is to reduce the energy consumption in the production of mineral-asphalt mixtures used for the upper layers of pavement structures. The most effective technology in this regard is the use of water-foamed bitumen. It allows for the production of water-foamed binders from which asphalt mixtures are made using a “half warm mix” technology at temperatures 40 °C to 60 °C lower than traditional production. In the research, AC 8S asphalt concrete was used, made with 50/70 bitumen. The proper foaming of bitumen 50/70 were achieved by using a surface active agent. Hydrated lime was also used as a substitute for part of the mineral filler in the asphalt mixture. The aim of the research was to determine the operational durability parameters of asphalt concrete, such as intermediate tensile strength in the temperature range from -10°C to +40°C, and resistance to permanent deformations. Using Harrington’s utility function, the optimal content of hydrated lime and foamed asphalt was determined based on the required durability of asphalt concrete. The obtained effect is a consequence of the synergy between hydrated lime and foamed bitumen in the AC 8S mixture made using the “half warm mix” technology.

**Keywords:** half warm mix asphalt, hydrated lime, foamed bitumen, surface active agent

## 1. Wprowadzenie

W związku ze zmianami klimatycznymi szczególną uwagę zwraca się na ograniczenie energochłonności w zakresie wytwarzania materiałów budowlanych w tym również materiałów drogowych. Dlatego też w drogownictwie dąży się do wdrażania technologii produkcji materiałów o zmniejszonym zapotrzebowaniu na energię. Istotną uwagę w tym obszarze kieruje się na mieszanki mineralno-asfaltowe przeznaczone na górne warstwy konstrukcji nawierzchni, które wytwarzane są w wysokiej temperaturze w zakresie od 160°C do 180°C w zależności od zastosowanego asfaltu. Należy zaznaczyć, że zmniejszenie energochłonności produkcji mieszanek związane jest z obniżeniem temperatury ich wytwarzania. W związku z tym, w istotny sposób korzystnie wpływa to na ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> oraz innych lotnych związków wydzielających się w procesie produkcyjnym z asfaltu co odgrywa znaczącą rolę w ograniczeniu efektu „cieplarnianego” (1).

Pierwszym etapem w procesie wdrożenia do światowej praktyki drogowej tego rodzaju mieszanek mineralno-asfaltowych było opracowanie ich produkcji w technologii „na ciepło”, która charakteryzuje się zmniejszoną temperaturą wytwarzania o około 30°C do 40°C w porównaniu z tradycyjnym procesem. Aby osiągnąć ten efekt stosuje się do asfaltu różnego rodzaju dodatki zmniejszające lepkość, środki powierzchniowo-czynne, wosk syntetyczny czy też różnego rodzaju środki chemiczne (2, 3), których zadaniem jest obniżenie lepkości technologicznej asfaltu bez konieczności podgrzewania do wysokiej temperatury. Istotnym też efektem było opracowanie technologii asfaltu spienianego zeolitem naturalnym lub sztucznym, który dodawany w procesie wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej obniża temperaturę jej produkcji (4).

Zastosowanie technologii „na półciepło” z asfaltem spienionym wodą pozwala na wytwarzanie najbardziej energooszczędnego materiału na nawierzchnie z betonu asfaltowego, którego temperatura produkcji zawiera się w zakresie od 90°C do 110°C. W związku z tym następuje obniżenie zapotrzebowania na energię o około 20%. Aby właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej w technologii na półciepło były co najmniej tak dobre jak tradycyjnej, należy zwrócić szczególną uwagę na jakość asfaltu spienionego jako lepiszcza (5, 6). Dynamiczny rozwój technologii spieniania asfaltów rozpoczął się na początku XXI wieku (5, 6, 7). W celu zapewnienia odpowiedniego spieniania asfaltu badano wpływ różnego rodzaju dodatków stosowanych przed procesem spieniania lepiszcza oraz dodatków stosowanych do mieszanek mineralno-asfaltowych (8, 9, 10, 11) w celu uzyskania optymalnych wartości parametrów spienienia (maksymalna ekspansja, okres półtrwania).

Wyniki badań wykazały, że substancje powierzchniowo czynne efektywnie zmniejszają lepkość asfaltu, poprawiając tym samym proces spienienia (8). W porównaniu z asfaltem referencyjnym, dodatek środka spieniającego do asfaltu 50/70 podwaja maksymalną ekspansję i okres półtrwania (10). Dzięki temu proces otaczania asfaltem kruszywa przebiega bardziej sprawnie i efektywnie. Zauważono jednak możliwość wystąpienia niekorzystnego wpływu środka spieniającego na normowe właściwości asfaltów, w związku

## 1. Introduction

In light of climate change, special attention is paid to reducing energy consumption in the production of construction materials, including road materials. Therefore, a priority in road construction is the implementation of technologies that produce materials with reduced energy demand. Significant focus in this area is directed towards mineral-asphalt mixtures used for the upper layers of pavement structures, which are traditionally produced at high temperatures ranging from 160 °C to 180 °C, depending on the asphalt used. It should be noted that the reduction in energy consumption in production is associated with lowering the temperature of their manufacture. This, in turn, has a positive impact on reducing CO<sub>2</sub> emissions and other volatile compounds released during the asphalt production process, which plays a significant role in mitigating the greenhouse effect (1).

The first step in introducing this warm mix asphalt into global road practice was the development of its production using the 'warm mix' technology, characterized by a decreased production temperature by approximately 30 °C to 40 °C compared to the traditional process. To achieve this effect, various low-viscosity additives, surfactants, synthetic wax, and various chemical agents were added to the bitumen before the foaming process, reducing the technological viscosity of the bitumen without the need for high-temperature heating (2, 3). Another significant development was the technology of foamed bitumen with natural or artificial zeolite, which, when added during the production process of the asphalt mixture, lowers the temperature of its production (4).

The use of "half warm mix" technology with water-foamed bitumen allows for the production of the most energy-efficient material for asphalt concrete surfaces, with a production temperature ranging from 90 °C to 110 °C. This results in a reduction in energy demand by approximately 20 %. To ensure that the properties of the warm mix asphalt mixture are at least as good as traditional mixtures, particular attention must be paid to the quality of foamed bitumen as a binder (5, 6). The dynamic development of asphalt foaming technology began in the early 21st century (5, 6, 7). To ensure adequate foaming of bitumen, various additives applied before the foaming process of the binder and additives used in mineral-asphalt mixtures (8, 9, 10, 11) were examined for optimal foaming parameters [maximum expansion, half-life time].

Research results showed that surfactants effectively reduce the viscosity of asphalt, thereby improving foaming parameters (8). Compared to reference asphalt, the addition of a foaming agent to 50/70 asphalt doubles the maximum expansion and half-life (10). As a result, the process of coating the aggregate with asphalt proceeds more efficiently. However, the possibility of an adverse effect of the foaming agent on the standard properties of asphalts has been observed, so the asphalt concrete mixture may not achieve the expected properties (12). Since it is essential to provide an asphalt pavement with the required multi-year service life characterized by intermediate tensile strength and resistance

z czym mieszanka betonu asfaltowego może nie uzyskać oczekiwanych właściwości (12). Zapewnienie wymaganej wieloletniej trwałości eksploatacyjnej nawierzchni asfaltowej charakteryzowanej przez wytrzymałość na pośrednie rozciąganie oraz odporność na deformacje trwałe jest niezbędne (12), a rozwiązaniem może być dodatek wapna hydratyzowanego, co udowodniono w przypadku tradycyjnych technologii (13, 14, 15). Wapno hydratyzowane pozytywnie wpływa na właściwości mechaniczne standardowego betonu asfaltowego, takie jak moduł sztywności w szerokim zakresie temperatur oraz odporność na odkształcenia trwałe (16, 17). Dodatkowo spowalniając proces starzenia się lepiszcza, wapno hydratyzowane poprawia trwałość eksploatacyjną mieszanki (18, 19) oraz zapewnia jej odporność na działanie wilgoci i mrozu (19, 20). Analiza eksploatowanych nawierzchni asfaltowych wykonanych z wapnem hydratyzowanym wskazuje na jego pozytywne oddziaływanie na podstawowe i reologiczne właściwości odzyskanego lepiszcza (21, 22).

Na podstawie wstępnych wyników badań można stwierdzić pozytywną rolę wapna hydratyzowanego jako składnika wypełniacza mineralnego na poprawę odporności na wilgoć i mróz oraz moduł sztywności (23, 24), stąd zasadne wydaje się podjęcie badań pozwalających na ocenę jego wpływu na zapewnienie trwałości eksploatacyjnej betonu asfaltowego wytwarzanego w technologii na „pół ciepło”.

Ruch pojazdów jest jednym z głównych czynników oddziałujących destrukcyjnie na konstrukcję nawierzchni, który może powodować powstawanie spękań warstw konstrukcyjnych oraz kolein na nawierzchni. W efekcie następuje obniżenie jej trwałości eksploatacyjnej. Dodatkowo konstrukcja nawierzchni pracuje w szerokim zakresie temperatur od niskich zimowych po wysokie dodatnie, które również mogą wpływać na trwałość konstrukcji nawierzchni. W związku z tym, w pracy podjęto badania wpływu wapna hydratyzowanego i asfaltu spienionego na charakterystyki trwałości takie jak wytrzymałość na pośrednie rozciąganie w zakresie temperatur od ujemnych do dodatnich i odporności na deformacje trwałe betonu asfaltowego wytwarzanego w technologii „na półciepło”.

## 2. Materiały i metody

### 2.1. Materiały

#### 2.1.1. Asphalt

Badania laboratoryjne przeprowadzono dla betonu asfaltowego AC 8S, wytworzonego w technologii „na półciepło”, w którym zastosowano asfalt spieniony 50/70 zgodnie z wymaganiami (25, 26). Zastosowano ilość lepiszcza na czterech poziomach 5,6%, 5,9%, 6,2% i 6,5%. W ten sposób uwzględniono zwiększone zapotrzebowanie na lepiszcze mieszanki mineralno-asfaltowej ze względu na zastosowanie wapna hydratyzowanego, jako częściowego zamiennika mączki mineralnej w składzie AC 8S (17).

Do asfaltu 50/70 przed spienieniem dodawano 0,6% środka powierzchniowo aktywnego [PAS] na bazie amidopoliaminy oleju

to permanent deformation (12), the solution may be the addition of hydrated lime, as has been proven with traditional technologies (13, 14, 15). Hydrated lime has a positive effect on the mechanical properties of standard asphalt concrete, such as the modulus of stiffness over a wide temperature range and resistance to permanent deformations (16, 17). Additionally, by slowing the ageing process of the binder, hydrated lime improves the operational durability of the mixture (18, 19) and provides resistance to moisture and frost (19, 20). The analysis of asphalt surfaces constructed with hydrated lime indicates its positive influence on the fundamental and rheological properties of the recovered binder (21, 22).

Based on preliminary research results, it can be stated that hydrated lime plays a positive role as a mineral filler component in improving moisture and frost resistance, as well as the modulus of stiffness (23, 24). Therefore, it seems reasonable to undertake research to assess its impact on ensuring the operational durability of asphalt concrete produced using “half warm mix” technology.

Vehicle traffic is one of the main factors that can have a detrimental impact on pavement structure, leading to the formation of cracks in structural layers and ruts on the surface. As a result, this can reduce the operational durability of the pavement. Additionally, the pavement structure operates in a wide temperature range, from low winter temperatures to high positive temperatures, which can also affect the durability of the pavement structure. Consequently, this study focuses on the influence of hydrated lime and foamed asphalt on durability characteristics such as intermediate tensile strength in a temperature range from negative to positive values and resistance to permanent deformations of warm mix asphalt concrete produced using “half warm mix” technology.

## 2. Material and methods

### 2.1. Materials

#### 2.1.1. Asphalt

Laboratory tests were conducted for AC 8S asphalt concrete produced using “half warm mix” technology, in which foamed 50/70 asphalt was applied in accordance with the requirements of (25, 26). The amount of binder was used at four levels: 5.6 %, 5.9 %, 6.2 %, and 6.5 %. This accounted for the increased demand for binder in the asphalt mix due to the use of hydrated lime as a partial substitute for mineral filler in the composition of AC 8S (17).

Before foaming, 0.6 % by the mass of a surface active agent [SAA] based on tall oil amidopolyamineson was added to the asphalt 50/70 in relation to the mass of the binder. The amount of SAA was determined based on previous studies (10).

Nine repetitions were performed, from which the expansion coefficient of the foam ER and the half-life period  $t_{1/2}$  were determined (7, 10).

The foaming process was carried out using the Wirtgen WLB-10S foaming equipment by applying different amounts of foaming water:

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI ASFALTU 50/70 I Z DODATKIEM 0,6% POWIERZCHNIOWO AKTYWNEGO ŚRODKA (10)

PROPERTIES OF 50/70 ASPHALT AND ASPHALT WITH THE ADDITION OF 0.6 % SURFACTANT (10)

Właściwość / Property	Jednostka Unit	Metoda Method	Asfalt / Bitumen	
			50/70	50/70 + 0.6 % SAA
Penetracja w 25°C / Penetration at 25 °C	0.1 mm	EN 1426	65.9	70.4
Punkt mięknięcia / Softening point $T_{R\&B}$	°C	EN 1427	50.4	48.8
Temperatura łamliwości w aparacie Fraassa . Fraass breaking point	°C	EN 12593	-15.1	-14.2
Zakres plastyczności / Temperature plasticity range	°C	-	65.5	63.0
Wskaźnik penetracji / Penetration Index	-	EN 12591	-0.6	-0.4
S(60) = 300 (MPa), T(S)60 [°C]	MPa	EN 14771	-19.2	-20.9
m(60) = 0.3, T(m)60 [°C]		EN 14771	-18.1	-19.9
Ekspansja / Expansion ratio ER	-	Wirtgen	10	19
Okres półtrwania / Half-life $t_{1/2}$	s	Wirtgen	8	21
Zawartość wody spieniającej / Foaming water content FWC	%	Wirtgen	2.5	2.5

talowego, w stosunku do masy lepiszcza. Ilość PAS została wyznaczona na podstawie wcześniejszych badań (10). Wykonywano po dziewięć powtórzeń na podstawie których określono współczynnik rozszerzalności piany ER oraz okres półtrwania  $t_{1/2}$  (7, 10).

Proces spieniania wykonywano z użyciem urządzenia spieniającego Wirtgen WLB-10S poprzez zastosowanie różnych ilości wody spieniającej: 1,5%, 2,0%, 2,5%, 3,0% i 3,5% wagowo w stosunku do asfaltu 50/70 zgodnie z (7). Wyniki wybranych właściwości asfaltu 50/70 i z dodatkiem 0,6% powierzchniowo aktywnego środka zestawiono w tablicy 1 (10).

Charakterystykę spienienia asfaltu 50/70 i z 0,6% powierzchniowo aktywnego środka przedstawiono na rys. 1.

Zastosowanie środka powierzchniowo czynnego w ilości 0.6% m/m do asfaltu spowodowało znaczącą poprawę spienia lepiszcza. Współczynnik ekspansji zwiększył się z 10 do 19 a okres półtrwania z 9 do 21.

Asfalt 50/70 z 0,6% środka aktywnego powierzchniowo bardzo dobrze się spienia, co powinno zapewnić właściwe otoczenie ziaren kruszywa mieszanki mineralno-asfaltowej.

1.5 %, 2.0 %, 2.5 %, 3.0 %, and 3.5 % by mass in relation to the asphalt 50/70, as per (7). The results of selected properties of 50/70 asphalt, both with and without the addition of 0.6 % of the surfactant additive, are presented in Table 1 (10).

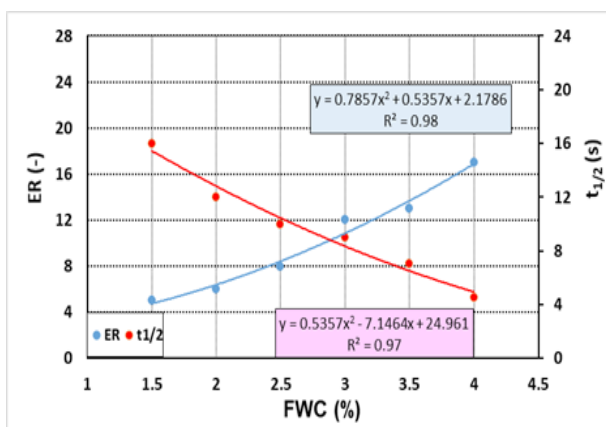
The foaming characteristics of 50/70 bitumen and bitumen with 0.6% surface active agent are shown in Fig. 1.

The use of a surfactant in the amount of 0.6 % m/m to bitumen resulted in a significant improvement in the foaming characteristics of the binder. The Expansion Ratio parameter increased from 10 to 19 and Half-life from 8 to 21.

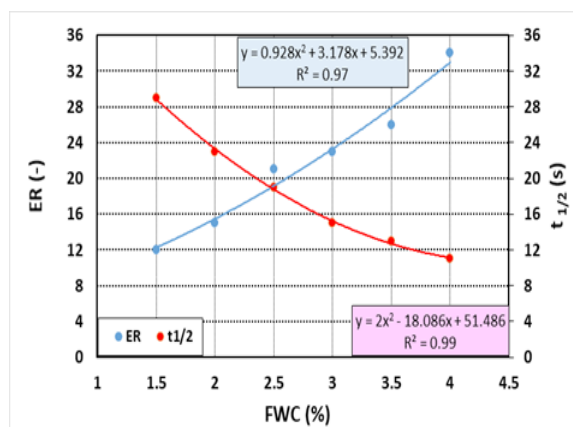
Bitumen 50/70 modified with 0.6 % SAA is characterized by very high foaming parameters, which should ensure that the aggregate grains of the asphalt mixture are properly surrounded.

### 2.1.2. Hydrated lime

According to the experimental plan, hydrated lime that met the requirements of EN 459-1 was used in the research. Its qualitative phase composition was determined roentgenographically using



(a)

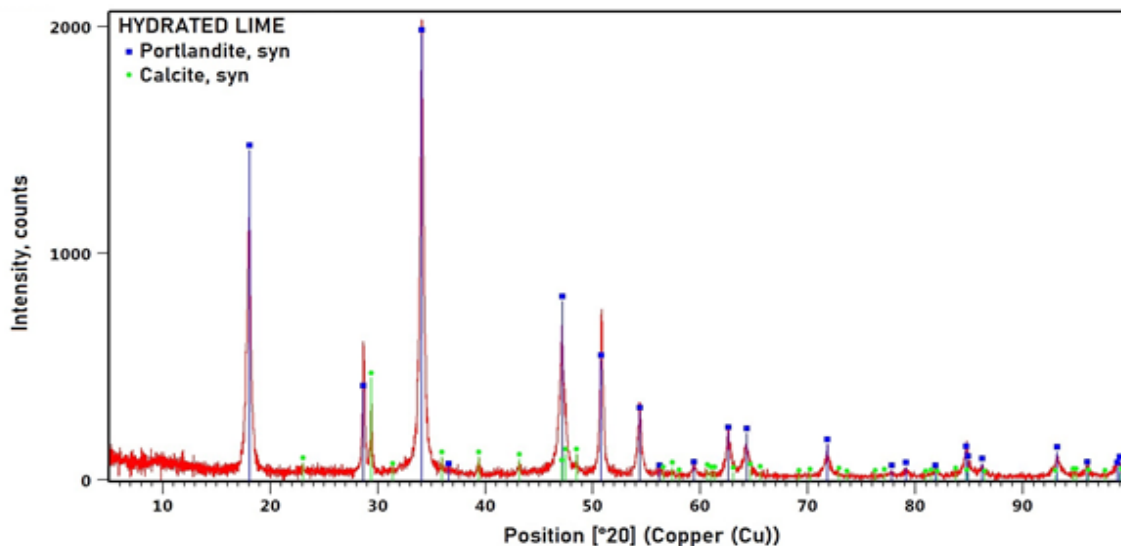


(b)

Rys. 1. Charakterystyki spienienia asfaltu: a) 50/70 i b) z 0,6% środka aktywnego powierzchniowo (10).

Fig. 1. Foaming characteristics of bitumen: a) 50/70 and b) with 0.6 % surfactant (10).





Designations: P – portlandite, C – calcite

Rys. 2. Charakterystyka dyfrakcyjna wapna hydratyzowanego [HL].

Fig. 2. Diffraction characteristics of hydrated lime [HL].

### 2.1.2. Wapno hydratyzowane

W badaniach zastosowano wapno hydratyzowane, które spełniało wymagania EN 459-1. Jakościowy skład fazowy wapna oznaczano rentgenograficznie za pomocą dyfraktometru EMPYREAN firmy PANalytical. Dyfraktogram wapna przedstawiono na rys. 2.

Skład fazowy stosowanego w badaniach wapna hydratyzowanego określony metodą Rietvelda jest następujący: portlandyt 92.8%, kalcyt 7.2%.

Analizę granulometryczną wapna hydratyzowanego wykonano metodą dyfrakcji laserowej w dyfraktometrze laserowym Hellos KR, a skład ziarnowy przedstawiono na rys. 3.

Wyniki badań wykazały, że wapno hydratyzowane posiada uziarnienie, które zawiera się w przedziale od 0 do 100  $\mu\text{m}$ , a ziarna od 0.1 do 45  $\mu\text{m}$  stanowią 90% jego składu.

W procesie wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej zastępowano część mączki wapiennej dozując wapno hydratyzowane w ilości 15%, 30% i 45% wagowo oraz homogenizując.

### 2.1.3. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej

W mieszance mineralnej do betonu asfaltowego AC 8S przeznaczonego na warstwę ścieralną nawierzchni obciążonej ruchem KR3-4 (25) zastosowano kruszywo łamane granulowane o ciągłym uziarnieniu: wapień o wielkości ziaren 0/2 mm, gąbry o uziarnieniu 2/5 mm oraz gąbry o uziarnieniu 4/8 mm oraz mączkę wapienną. Zastosowane kruszywa w mieszance mineralnej spełniały wymagania w zakresie właściwości fizycznych i mechanicznych zgodnie z wymaganiami WT-1 2014 (28). Skład ziarnowy mieszanki mineralnej do betonu asfaltowego AC 8S przedstawiono graficznie na rysunku 4.

PANalytical's EMPYREAN diffractometer. XRD pattern is shown in Fig. 2.

The phase composition of the hydrated lime used in the research, determined using the Rietveld method, is as follows: portlandite is present at 92.8 % and calcite at 7.2 %.

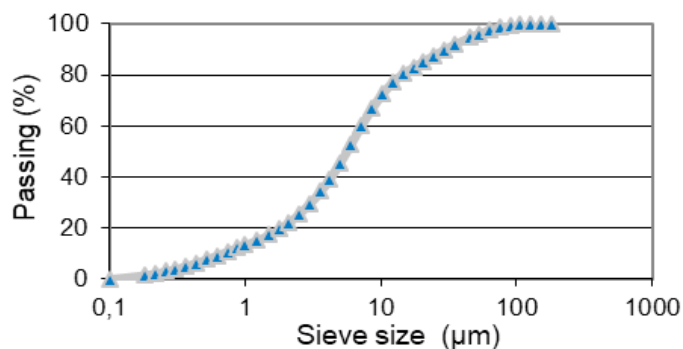
Granulometric analysis of hydrated lime was performed by laser diffraction in a Hellos KR laser diffractometer, and the grain size distribution is shown in Figure 3.

The research results showed that the hydrated lime has a particle size distribution ranging from 0 to 100  $\mu\text{m}$ , with particles from 0.1 to 45  $\mu\text{m}$  constituting 90% of its composition.

In the process of producing the asphalt mixture, a portion of the limestone powder was replaced by dosing hydrated lime in amounts of 15 %, 30 %, and 45 % by mass, followed by homogenization.

### 2.1.3. Composition of the mineral and asphalt mixture

The following were left in the mineral mixture for AC 8S asphalt concrete intended for the wearing course of pavement subject to



Rys. 3. Uziarnienie wapna hydratyzowanego.

Fig. 3. Grain size distribution of hydrated lime.

Mieszankę AC 8S sporządzono w ogrzewanym 60-litrowym mieszalniku mechanicznym, zaopatrzonym w system kontroli temperatury z dokładnością do 1°C. W pierwszej kolejności do mieszalnika dozowano składniki mineralne a następnie dodano asfalt spieniony wytwarzany w instalacji WLB-10S. Składniki mieszanki mineralno-asfaltowej mieszano w temperaturze 115°C, a próbki zagęszczano w temperaturze 105°C. Do każdego badania wykonywano po 9 próbek z mieszanki mineralno-asfaltowej.

## 2.2. Plan eksperymentu

Zastosowano dwuczynnikowy plan eksperymentu (29, 30). Jedną zmienną  $x_1$  była ilość asfaltu 50/70 o zawartości na czterech poziomach od 5,6% do 6,5%, a drugim czynnikiem  $x_2$  była zawartość wapna hydratyzowanego w wypełniaczu od 0 do 45%. Opracowany plan eksperymentu przedstawiono na rysunku 5.

Wyniki badań betonu asfaltowego AC 8S poddano analizie statystycznej za pomocą analizy wariancji [ANOVA], której celem było określenie istotności wpływu badanych czynników: zawartość wapna hydratyzowanego i asfaltu spienionego na daną właściwość (29, 30). Za istotne czynniki wpływające na analizowane właściwości betonu asfaltowego AC 8S przyjęto zawartość wapna hydratyzowanego i asfaltu spienionego, gdy wartość  $p$  była niższa od przyjętego poziomu istotności  $\alpha = 0,05$ . W celu kompleksowego opisu zmiany wartości badanego parametru [A] w AC 8S dla zawartości wapna hydratyzowanego i asfaltu spienionego 50/70 z dodatkiem 0,6% preparatu spieniającego przyjęto model statystyczny wykorzystujący wielomian drugiego stopnia (29, 30):

$$A = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_1 \cdot x_2 + b_4 \cdot x_1^2 + b_5 \cdot x_2^2 \quad [1]$$

gdzie:

$x_1$  = asfalt spieniony – FB, %,

$x_2$  = wapno hydratyzowane – HL, %,

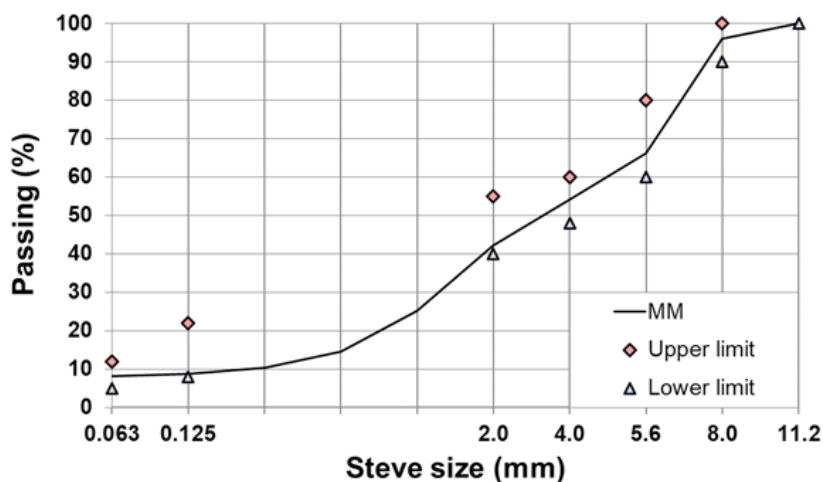
$b_0$ - $b_5$  – współczynniki regresji, -.

Dla poszczególnych zależności wyznaczono współczynnik determinacji  $R^2$ , a wyniki badań opracowano z wykorzystaniem programu Statistica (31). Ocenę istotności wpływu efektu danego składnika [asfalt spieniony, wapno hydratyzowane] oraz jego siły wpływu na analizowany parametr modelu [betonu asfaltowego AC 8S] oraz kierunku trendu lub też interakcji pomiędzy nimi określono wykorzystując wykres Pareto (32).

## 2.2. Metody badań

Każdą właściwość mieszanki mineralno-asfaltowej określano na reprezentatywnej liczbie próbek wyznaczonych zgodnie z (29, 30) stosując podejście optymalizacyjne Harringtona (33).

Beton asfaltowy AC 8S poddano badaniom: wytrzymałości na pośrednie rozciąganie w zakresie temperatury od -10°C do +40°C,



Rys. 4. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej AC 8S z punktami granicznymi wg (25).

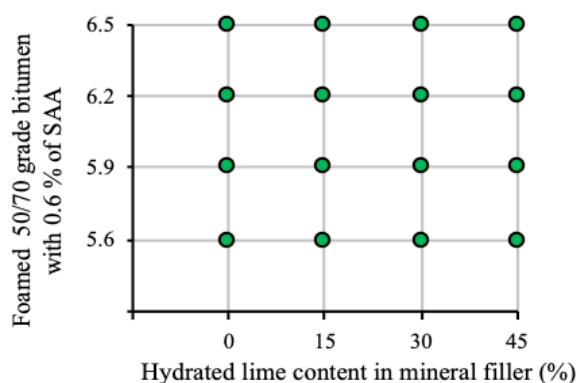
Fig. 4. Grain size distribution curve of the AC 8S mineral mixture with boundary points according to (25).

KR3-4 traffic (25) granulated crushed aggregates with a continuous grain size: 0/2 mm limestone, 2/5 mm gabbro, 4/8 mm gabbro and ground limestone. The aggregates used in the mineral mixture met the physical and mechanical properties as required by WT-1 2014 (28). The grain composition of the mineral mix for AC 8S asphalt concrete is shown in graphical form in Figure 4.

The AC 8S mixture was prepared in a heated 60 liter mechanical mixer equipped with a temperature control system that was accurate to 1 °C. Initially, the mineral components were dosed into the mixer, followed by the addition of foamed asphalt produced in the WLB-10S plant. The components of the asphalt mixture were mixed at 115 °C and the samples were compacted at 105 °C. For each test, 9 samples were made from the asphalt mixture.

## 2.2. Experiment plan

A two-factor experiment plan was employed (29, 30). One variable,  $x_1$ , was the content of 50/70 bitumen with levels ranging from 5.6 %, increasing by 0.3 % at each level. The second factor,  $x_2$ , was the content of hydrated lime in the filler, ranging from 0 % to 45 %. The developed experiment plan is presented in Fig. 5.



Rys. 5. Plan eksperymentu (10).

Fig. 5. Experiment plan (10).

wg. EN 12697-23 oraz odporności na deformacje trwałe wg. WT-2 2014 (25).

### 3. Wyniki doświadczalne i dyskusja

#### 3.1. Oddziaływanie wapna hydratyzowanego na wytrzymałość na rozciąganie pośrednie betonu asfaltowego AC 8S w funkcji temperatury

Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie jest istotną właściwością mieszanki mineralno-asfaltowej, która analizowana w aspekcie temperaturowym pozwala na prognozowanie jej trwałości w warunkach eksploatacji konstrukcji nawierzchni. Parametr ten badano w następujących temperaturach:  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $+13^{\circ}\text{C}$ ,  $+25^{\circ}\text{C}$  i  $+40^{\circ}\text{C}$ , które odpowiadają średniej temperaturze pracy nawierzchni asfaltowej w okresie zimy, temperaturze ekwiwalentnej, średniej temperaturze okresu wiosennego oraz lata. Kompleksowy wpływ wapna hydratyzowanego i asfaltu spienionego na wytrzymałość na rozciąganie pośrednie betonu asfaltowego AC 8S określono za pomocą analizy ANOVA (31, 34) opracowując model regresji według (1) wykorzystując założenia Piepela (32).

Poziom działania danego składnika oraz wpływ interakcji składnika na wytrzymałość na rozciąganie pośrednie w przyjętych temperaturach określono za pomocą analizy ANOVA (31, 34).

Analizę siły wpływu badanego składnika w mieszance mineralno-asfaltowej oraz interakcji pomiędzy nimi na zmienność wytrzymałości na rozciąganie pośrednie w formie graficznej przedstawiono w postaci wykresu Pareto [rys 6 a, c, e, g]. Opracowany model regresyjny w postaci powierzchni odpowiedzi relacji pomiędzy analizowanymi składnikami mieszanki mineralno-asfaltowej a wytrzymałością na rozciąganie pośrednie przedstawiono na rysunku 6 [b, d, f, h].

Na podstawie analizy wykresu Pareto przedstawionego na rys. 6a, c, e, g można stwierdzić, że istotny wpływ na wytrzymałość na pośrednie rozciąganie betonu asfaltowego AC 8S analizowanych składników [asfalt spieniony, wapno hydratyzowane] uzależniony jest od temperatury badania. W temperaturze  $-10^{\circ}\text{C}$  zanotowano, że najbardziej istotny wpływ ma interakcja asfaltu spienionego i wapna hydratyzowanego. Efekt ten można wytłumaczyć tym, że wapno hydratyzowane w ujemnej temperaturze wpływa usztywniająco na właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej a asfalt spieniony przeciwdziała temu procesowi. Podobne zachowanie obserwuje się w przypadku oddziaływania lepiszcza i wapna hydratyzowanego w tradycyjnych mieszankach mineralno-asfaltowych wytwarzanych w technologii „na gorąco” (12). Asfalt spieniony odgrywa istotną rolę w kształtowaniu tej właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej w ujemnej temperaturze. Natomiast w zakresie temperatur dodatnich istotny wpływ na wytrzymałość na pośrednie rozciąganie mieszanki AC 8S ma asfalt spieniony, co jest też zgodne z tendencją występującą w zakresie wytwarzanych na „gorąco” mieszanek mineralno-asfaltowych. W temperaturze  $+13^{\circ}\text{C}$  i  $+25^{\circ}\text{C}$  istotny wpływ na zawartość wolnych przestrzeni

The results of the AC 8S asphalt concrete research were subjected to statistical analysis using analysis of variance [ANOVA], the goal of which was to determine the significance of the influence of the tested factors: contents of hydrated lime and foamed bitumen, on a given property (29, 30). For significant factors affecting the analyzed properties of AC 8S asphalt concrete, the content of hydrated lime and foamed bitumen was considered significant when the  $p_{\text{-value}}$  was lower than the adopted significance level  $\alpha = 0.05$ . To comprehensively describe the change in the value of the studied parameter (A) in AC 8S for the content of hydrated lime and foamed 50/70 bitumen with the addition of 0.6 % surface active agent, a statistical model using a second-degree polynomial was adopted (29, 30):

$$A = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_1 \cdot x_2 + b_4 \cdot x_1^2 + b_5 \cdot x_2^2 \quad [1]$$

where:

$x_1$  = foamed bitumen – FB, %,

$x_2$  = hydrated lime – HL, %,

$b_0$ - $b_5$  – regression coefficients.

For each of the relationships, the coefficient of determination  $R^2$  was calculated, and the research results were analyzed using the Statistica program (31). The assessment of the significance of the effect of each component (foamed bitumen, hydrated lime) and its strength of influence on the analyzed parameter of the model (AC 8S asphalt concrete), as well as the direction of the trend or interactions between them, was determined using a Pareto chart (32).

#### 2.3. Test methods

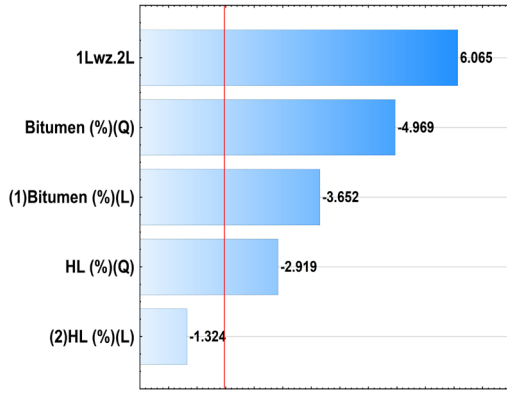
Each property of the asphalt mixture was determined on a representative number of samples as specified in (29, 30), using Harrington's optimization approach (33).

AC 8S asphalt concrete was subjected to tests for intermediate tensile strength in the temperature range from  $-10^{\circ}\text{C}$  to  $+40^{\circ}\text{C}$  according to EN 12697-23, as well as resistance to permanent deformation according to WT-2 2014 (25).

### 3. Experiment results and discussion

#### 3.1. Influence of hydrated lime on the indirect tensile strength of AC 8S asphalt concrete as a function of temperature

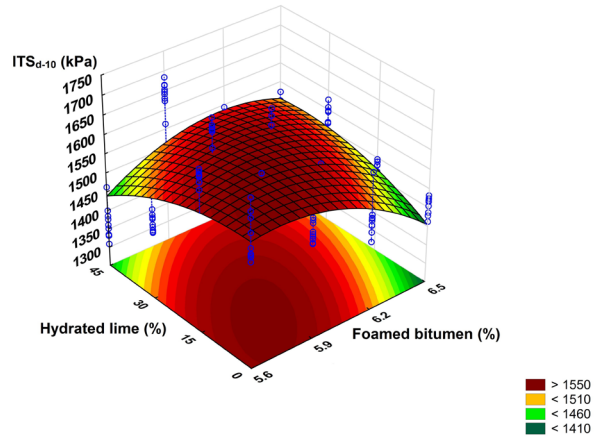
Indirect tensile strength is a crucial parameter of the asphalt mixture, and its analysis in terms of temperature allows for predicting its durability under the conditions of pavement construction. This parameter was examined at the following temperatures:  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $+13^{\circ}\text{C}$ ,  $+25^{\circ}\text{C}$ , and  $+40^{\circ}\text{C}$ , corresponding to the average working temperature of asphalt pavement during winter, the equivalent temperature, the average temperature during the spring period, and summer. The comprehensive impact of hydrated lime and foamed bitumen on the intermediate tensile



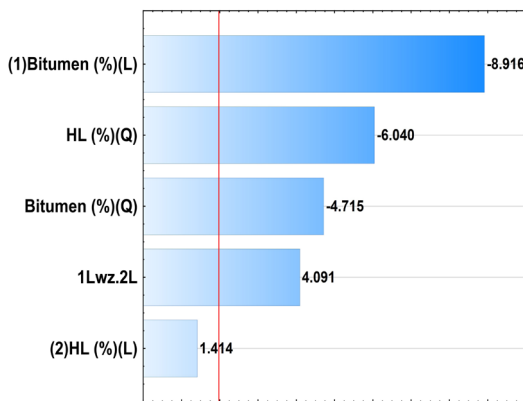
p=0.05  
Standardized Effect Estimate (Absolute Value)

$$ITS_{d-10} = 1577.69 - 53.29 \cdot FB - 121.60 \cdot FB^2 - 19.32 \cdot HL - 71.42 \cdot HL^2 + 118.73 \cdot FB \cdot HL, R^2=0.581$$

(a)



(b)

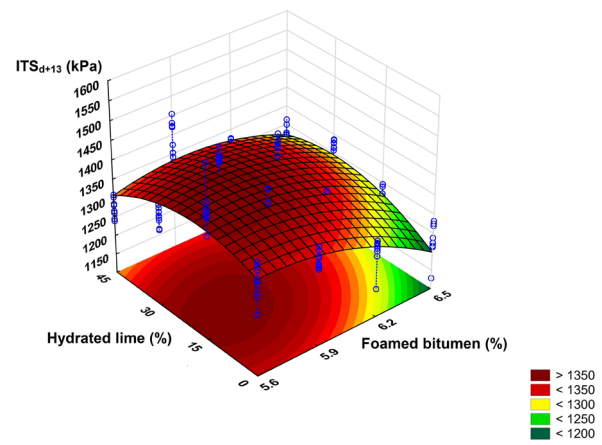


p=0.05  
Standardized Effect Estimate (Absolute Value)

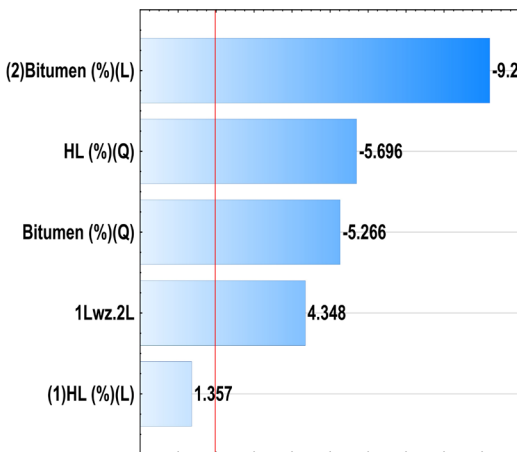
$$ITS_{d+13} = 1376.31 + 14.86 \cdot FB + 106.45 \cdot FB^2 - 93.71 \cdot HL - 83.11 \cdot HL^2 + 57.68 \cdot FB \cdot HL$$

R<sup>2</sup>=0.532

(c)



(d)

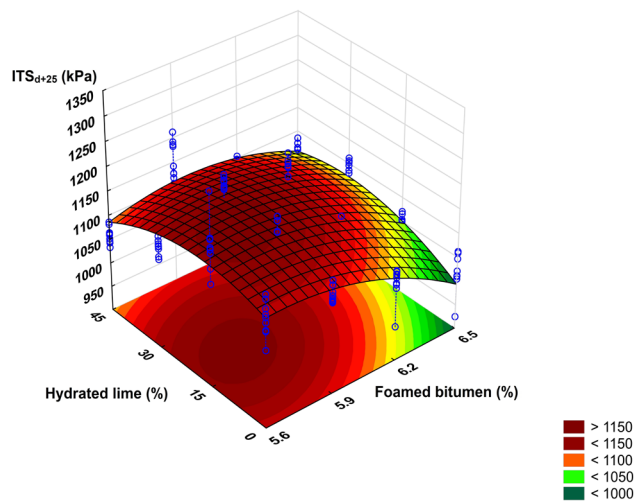


p=0.05  
Standardized Effect Estimate (Absolute Value)

$$ITS_{d+25} = -4950.47 + 2144.17 \cdot FB - 189.18 \cdot FB^2 - 11.18 \cdot HL - 0.08 \cdot HL^2 + 2.50 \cdot FB \cdot HL$$

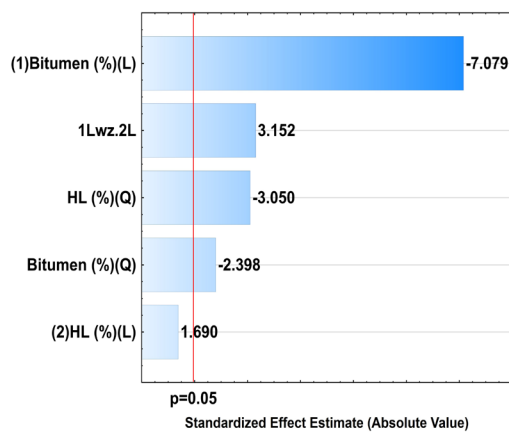
R<sup>2</sup>=0.545

(e)



(f)

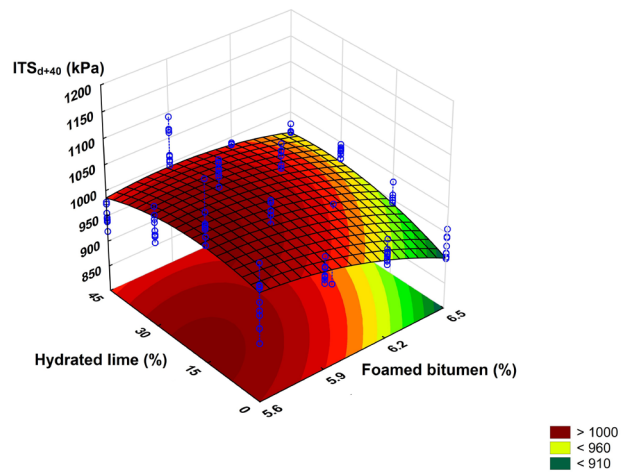




$$ITS_{d+40} = 1007.78 - 68.59 \cdot FB - 38.97 \cdot FB^2 + 16.381 \cdot HL - 49.56 \cdot HL^2 + 40.987 \cdot FB \cdot HL$$

$$R^2 = 0.561$$

(g)



(h)

Rys. 6. Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie  $ITS_d$  betonu asfaltowego AC 8S w funkcji temperatury w zależności od zawartości wapna hydratyzowanego i asfaltu spienionego: a), c), e), g) diagram Pareto w temperaturze:  $-10^\circ\text{C}$ ,  $+13^\circ\text{C}$ ,  $+25^\circ\text{C}$  i  $+40^\circ\text{C}$ ; b) powierzchnia odpowiedzi w temperaturze:  $-10^\circ\text{C}$ ,  $+13^\circ\text{C}$ ,  $+25^\circ\text{C}$  i  $+40^\circ\text{C}$ .

Fig. 6. Indirect tensile strength  $ITS_d$  of AC 8S asphalt concrete as a function of temperature, depending on the content of hydrated lime and foamed bitumen: a), c), e), g) Pareto chart at temperatures:  $-10^\circ\text{C}$ ,  $+13^\circ\text{C}$ ,  $+25^\circ\text{C}$ , and  $+40^\circ\text{C}$ ; b) response surface at temperatures:  $-10^\circ\text{C}$ ,  $+13^\circ\text{C}$ ,  $+25^\circ\text{C}$ , and  $+40^\circ\text{C}$ .

ma wapno hydratyzowane, które powoduje również usztywnienie mieszanki. W temperaturze  $+40^\circ\text{C}$  obserwuje się istotny wpływ na wytrzymałość na pośrednie rozciąganie interakcji wapna hydratyzowanego i asfaltu spienionego. Asfalt spieniony w wysokiej temperaturze eksploatacyjnej nawierzchni wpływa na pogorszenie analizowanej charakterystyki mieszanki mineralno-asfaltowej a ujawnia się usztywniająca rola wapna hydratyzowanego, która w tej temperaturze wpływa korzystnie na wytrzymałość na pośrednie rozciąganie mieszanki AC 8S.

Dokonując ilościowej analizy wpływu asfaltu spienionego oraz wapna hydratyzowanego na właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej można stwierdzić, że w zakresie temperatury  $-10^\circ\text{C}$  obserwuje się korzystne oddziaływanie tych składników w zakresie od 5.6% do 6.2% asfaltu spienionego oraz od 0% do 30% wapna hydratyzowanego. Natomiast w zakresie temperatur dodatnich najkorzystniej wpływa na wytrzymałość na pośrednie rozciąganie zawartość asfaltu spienionego w zakresie od 5.6% do 5.9% oraz wapna hydratyzowanego w ilości od 15% do 30%.

### 3.2. Wpływ wapna hydratyzowanego na deformacje trwałe betonu asfaltowego AC 8S

Odporność na deformacje trwałe betonu asfaltowego AC 8S zawierającego zalecane ilości asfaltu spienionego 50/70 [5,6%] z 0.6% powierzchniowo aktywnego środka oraz wapna hydratyzowanego w ilości 0%, 15%, 30% i 45% oceniono zgodnie z wymaganiami określonymi przez WT-2 2014 (25), według których beton asfaltowy AC 8S powinien spełniać następujące kryteria: prędkość przyrostu koleiny  $WTS_{AIR} < 0.15$  i proporcjonalną głębokość koleiny  $PRD_{AIR} < 9$  (25).

strength of AC 8S asphalt concrete was determined using ANOVA analysis (31, 34), developing a regression model according to (1) using Piepel's assumptions (32).

The effect of each component and the influence of the interaction of the components on indirect tensile strength at the specified temperatures were determined using ANOVA analysis (31, 34).

The strength of the influence of the studied component in the asphalt mixture and the interactions between them on the variability of indirect tensile strength were graphically represented in the form of a Pareto chart in Figs. 6a, c, e, g. The developed regression model in the form of a response surface representing the relationship between the analyzed components of the asphalt mixture and indirect tensile strength is presented in Figs. 6b, d, f, h.

Based on the Pareto chart presented in Figs. 6a, c, e, g, it can be concluded that the significant influence on the indirect tensile strength of AC 8S asphalt concrete of the analyzed components [foamed bitumen, hydrated lime] is dependent on the test temperature. At  $-10^\circ\text{C}$ , the most significant influence is observed to be the interaction of foamed bitumen and hydrated lime. This effect can be explained by the fact that hydrated lime stiffens the asphalt mixture at negative temperatures, while foamed bitumen counteracts this process. Similar behavior is observed in the interaction between the binder and hydrated lime in traditional asphalt mixtures produced using the "hot mix" technology (12). Foamed bitumen plays a significant role in shaping this property of the asphalt mixture at negative temperatures. On the other hand, at positive temperatures, foamed bitumen has a significant influence on the intermediate tensile strength of AC 8S, which is in line with the trend observed in mixtures produced using the

Kompleksowy wpływ wapna hydratyzowanego i asfaltu spienionego na odporność na deformacje trwale charakteryzowane przez prędkość przyrostu koleiny i proporcjonalną głębokości koleiny mieszanki AC 8S dokonano na podstawie opracowanego za pomocą analizy ANOVA (31, 34) modelu regresji według (1) wykorzystując założenia Piepela (32).

Analizę siły wpływu danego składnika AC 8S oraz interakcji pomiędzy nimi na zmienność prędkości przyrostu koleiny i proporcjonalną głębokość koleiny w formie graficznej przedstawiono w postaci wykresu Pareto na rys. 7a i 8a. Opracowany model regresyjny w postaci powierzchni odpowiedzi relacji pomiędzy rodzajem spoiwa a prędkością przyrostu koleiny i proporcjonalną głębokością koleiny przedstawiono na rys. 7b i 8b.

Na podstawie analizy diagramu Pareta przedstawionego na rys. 7a można stwierdzić, że najbardziej istotny wpływ na zmianę prędkości przyrostu koleiny miała zawartość wapna hydratyzowanego a w mniejszym stopniu asfalt spieniony. Natomiast w przypadku parametru proporcjonalnej głębokości koleiny [rys. 8a] zaistniała odmienna zależność, ponieważ to asfalt spieniony z 0.6% powierzchniowo aktywnego środka w istotny sposób kształtuje wartości tej właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej AC 8S. W mniejszym stopniu choć wciąż istotnym obserwuje się oddziaływanie wywołane wapnem hydratyzowanym na proporcjonalną głębokość koleiny. Taki efekt wpływu asfaltu spienionego oraz wapna hydratyzowanego stosowanego zamiennie w mące wapiennej AC 8S jest korzystny. Wapno hydratyzowane spełnia rolę usztywniającą w mieszance mineralno-asfaltowej zwiększając jej odporność na deformacje trwale charakteryzowanej przez parametr prędkości przyrostu głębokości koleiny.

Dokonując analizy oddziaływania wapna hydratyzowanego na prędkość przyrostu koleiny można jednoznacznie stwierdzić,

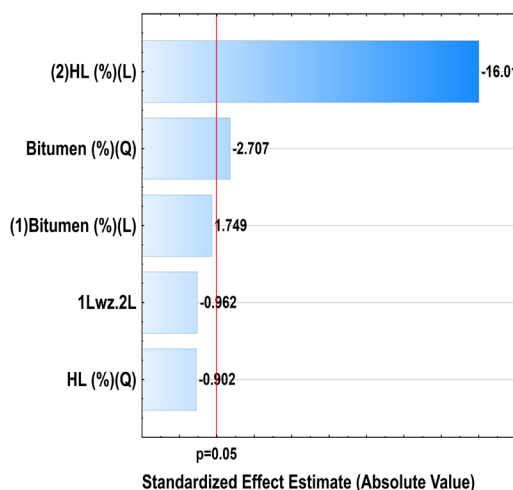
“hot mix” technology. At +13 °C and +25 °C, hydrated lime has a significant impact on the void content, causing stiffening of the mixture. At +40°C, there is a significant influence on the indirect tensile strength from the interaction between hydrated lime and foamed bitumen. Foamed bitumen at high temperatures in the pavement’s operation reduces the analyzed characteristic of the asphalt mixture, while the stiffening role of hydrated lime becomes evident, positively affecting the intermediate tensile strength of AC 8S at this temperature.

Quantitatively analyzing the impact of foamed bitumen and hydrated lime on the properties of the asphalt mixture, it can be concluded that at -10 °C, a favorable effect of these components is observed in the range from 5.6 % to 6.2 % of foamed bitumen and from 0 % to 30 % of hydrated lime. In the case of positive temperatures, the most beneficial influence on the indirect tensile strength is found with foamed bitumen content in the range of 5.6 % to 5.9 % and hydrated lime content from 15 % to 30 %.

### 3.2. Influence of hydrated lime on the permanent deformation of AC 8S asphalt concrete

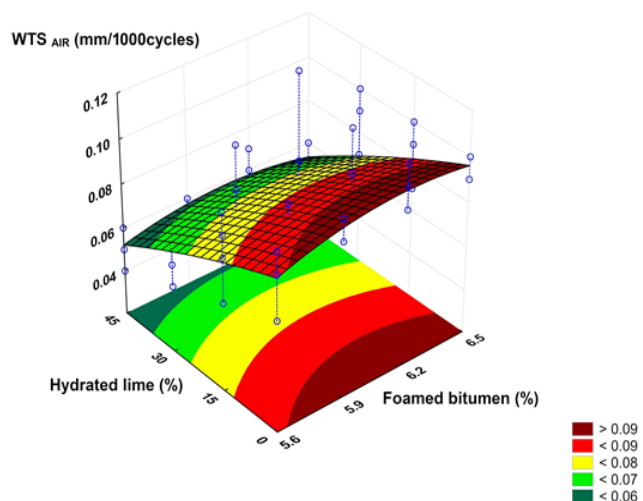
The impact of hydrated lime on the permanent deformation of AC 8S asphalt concrete containing recommended levels of foamed 50/70 asphalt [5.6 %] with 0.6 % surface active agent and hydrated lime at levels of 0 %, 15 %, 30 %, and 45 % was assessed according to the requirements specified in WT-2 2014 (25). According to these requirements, AC 8S asphalt concrete should meet the following criteria: wheel tracking slope  $WTS_{AIR} < 0.15$  and proportional rut depth  $PRD_{AIR} < 9$  (25).

The comprehensive impact of hydrated lime and foamed asphalt on permanent deformation characterized by wheel tracking slope and proportional rut depth of AC 8S mixture was analyzed based



$$WTS_{AIR} = 0.08 + 0.004 \cdot FB - 0.011 \cdot FB^2 - 0.034 \cdot HL - 0.003 \cdot HL^2 - 0.003 \cdot FB \cdot HL \quad R^2 = 0.660$$

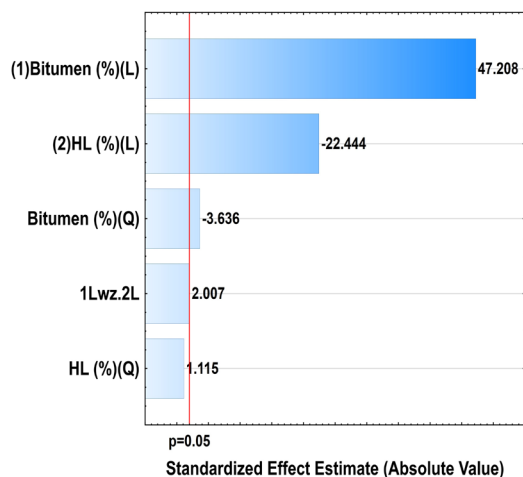
(a)



(b)

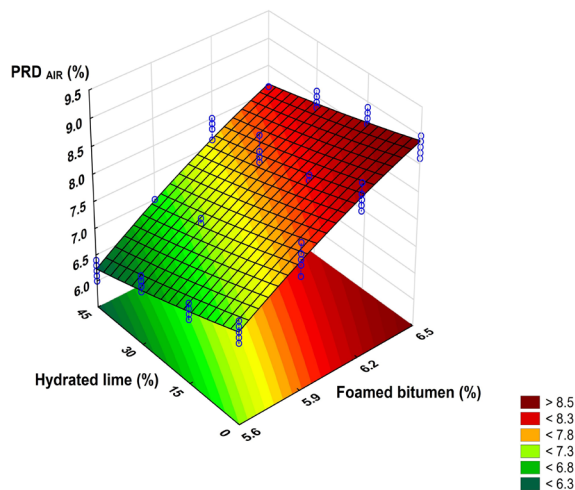
Rys. 7. Odporność na deformacje trwale charakteryzowane przez nachylenie wykresu koleinowania  $WTS_{AIR}$  betonu asfaltowego AC 8S a zawartością wapna hydratyzowanego i asfaltu spienionego z dodatkiem 0,6 % powierzchniowo aktywnego środka; a) diagram Pareto; b) powierzchnia odpowiedzi.

Fig. 7. Resistance to permanent deformation characterized by the slope of the  $WTS_{AIR}$  rutting plot of AC 8S asphalt concrete in relation to the content of hydrated lime and foamed bitumen with 0.6% surface active agent; (a) Pareto chart; (b) response surface.



$$PRD_{AIR} = -24.508 + 8.903 \cdot FB - 0.578 \cdot FB^2 - 0.053 \cdot HL + 0.005 \cdot FB \cdot HL, R^2 = 0.952$$

(a)



(b)

Rys. 8. Odporność na deformacje trwałe charakteryzowane przez proporcjonalną głębokość koleiny  $PRD_{AIR}$  betonu asfaltowego AC 8S a zawartością wapna hydratyzowanego i asfaltu spienionego z dodatkiem 0,6 % powierzchniowo aktywnego środka; a) diagram Pareto; b) powierzchnia odpowiedzi.

Fig. 8. Resistance to permanent deformation characterized by the proportional rut depth  $PRD_{AIR}$  of AC 8S asphalt concrete in relation to the content of hydrated lime and foamed bitumen with the addition of 0.6% surface active agent; a) Pareto chart; b) response surface.

że wraz ze zwiększeniem jego zawartości następuje wzrost odporności mieszanki AC 8S na powstawanie deformacji trwałych. Natomiast zwiększanie zawartości asfaltu spienionego wpływa w sposób nieznaczny na prędkości przyrostu koleiny. W przypadku proporcjonalnej głębokości koleiny wraz ze zwiększeniem zawartości wapna hydratyzowanego następuje zmniejszenie wartości tego parametru, co jest efektem korzystnym. W odmienny sposób oddziałuje asfalt spieniony, którego zwiększenie zawartości w AC 8S powoduje niekorzystny wzrost wartości proporcjonalnej głębokości koleiny. Ponieważ jednak siła oddziaływania wapna hydratyzowanego jest większa niż asfaltu spienionego, to nie obserwuje się niekorzystnego oddziaływania wapna hydratyzowanego i asfaltu spienionego na zmianę proporcjonalnej głębokości koleiny mieszanki AC 8S.

Analizy wyników badań przedstawionych na rysunku 8 wykazały, że wapno hydratyzowane istotnie wpływa na odporność na deformacje trwałe mieszanki asfaltowej AC 8S wykonanej w technologii „na pół ciepło”. Bardziej intensywny wpływ wapna hydratyzowanego obserwuje się na proporcjonalną głębokość koleiny, gdy zawartość wapna hydratyzowanego stosowanego zamiennie za część mączki mineralnej wzrasta do 45%. Znaczący wpływ na tę właściwość ma wapno hydratyzowane o przedziale zawartości od 15% i 30%. Zwiększenie jego ilości do 45% powoduje tylko nieznaczny wzrost prędkości przyrostu koleiny.

### 3.3. Określenie zalecanej zawartości wapna hydratyzowanego i asfaltu spienionego

Jak wykazano we wcześniejszych analizach, zarówno asfalt spieniony jak i wapno hydratyzowane w różny sposób wpływały na wybrane właściwości betonu asfaltowego AC 8S w technologii na „półciepło”. Dokonano próby optymalizacji składu projektowanego betonu asfaltowego ze względu na zawartość asfaltu spienionego

on a regression model developed using ANOVA analysis (31, 34), following Piepel's assumptions (32).

The analysis of the influence of each component of AC 8S and their interaction on the variability of wheel tracking slope and proportional rut depth is presented in graphical form in Pareto charts [Figs. 7a and 8a]. The developed regression model in the form of response surface plots showing the relationship between the type of binder and the wheel tracking slope and proportional rut depth variables is presented in Figs. 7b and 8b.

Based on the Pareto chart analysis presented in Fig. 7a, it can be concluded that the most significant influence on the wheel tracking slope change was the content of hydrated lime, with foamed bitumen having a somewhat lesser impact. However, in the case of the parameter proportional rut depth [Fig. 8a], the opposite relationship occurred. Foamed bitumen with 0.6 % surface active agent significantly influenced this property of the AC 8S asphalt mixture, while the impact of hydrated lime on proportional rut depth, although still significant, was somewhat less pronounced. Such an effect of foamed bitumen and hydrated lime, used interchangeably in the limestone filler of AC 8S, is advantageous. Hydrated lime plays a stiffening role in the asphalt mixture, increasing its resistance to permanent deformations characterized by the wheel tracking slope parameter.

Analyzing the impact of hydrated lime on wheel tracking slope, it can be unequivocally stated that an increase in its content leads to an increase in the resistance of the AC 8S mixture to permanent deformations. On the other hand, increasing the content of foamed bitumen has a slightly negative effect on wheel tracking slope. Concerning the proportional rut depth, an increase in hydrated lime content leads to a reduction in this parameter, which is a favorable effect. Foamed bitumen, on the other hand, has a different impact,

i wapna hydratyzowanego tak, aby jego właściwości odpowiadały ustalonym kryteriom. W tym celu zastosowano funkcje użyteczności DF (33, 35, 37).

Pierwszym etapem dotyczącym analizy funkcji użyteczności właściwości betonu asfaltowego AC 8S w zależności od ilości asfaltu spienionego oraz wapna hydratyzowanego stosowanego zamiennie w mączce wapiennej była ocena istotności wpływu tych parametrów na optymalizację jego składu, która wykonana została z wykorzystaniem analizy ANNOVA a efekty obliczeń przedstawiono w Tabeli 4.

Na podstawie analizy uzyskanych danych przedstawionych w tabelicy 4 stwierdzono, że wszystkie poddane analizie właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej AC 8S zależą istotnie od badanych czynników, ponieważ  $p_{\text{value}}$  jest mniejsze od 0.05.

Następnie użyteczność AC 8S oceniono poprzez przypisanie wartości 1 najbardziej pożądanym wartościom odpowiedzi, a wartości 0 najmniej pożądanym wartościom odpowiedzi analizowanych właściwości przy użyciu programu Statistica (31). Wartości pośrednie wynosiły od 0 do 1 w zależności liniowej (33, 35). Wyniki analizy dla mieszanki mineralno-asfaltowej AC 8S w odniesieniu do ilości wapna hydratyzowanego i asfaltu spienionego przedstawiono na rys. 9.

Wyniki wykonanej analizy pokazują zróżnicowany wpływ ilości wapna hydratyzowanego i asfaltu spienionego na oceniane właściwości betonu asfaltowego. Istotny wpływ ilości asfaltu spienionego 50/70 i wapna hydratyzowanego obserwuje się w przypadku wytrzymałości na pośrednie rozciąganie w temperaturze badania  $-10^{\circ}\text{C}$ . Pomiedzy tymi dwoma komponentami rozwijają się efekty synergiczne, a ich indywidualne oddziaływania są kompensowane. W temperaturach badań  $+13^{\circ}\text{C}$ ,  $+25^{\circ}\text{C}$  i  $+40^{\circ}\text{C}$  to przede wszystkim asfalt spieniony w całym zakresie dozowania zapewnia wymaganą wytrzymałość na pośrednie rozciąganie. Chociaż w zakresie temperatury badania  $+13^{\circ}\text{C}$  i  $+25^{\circ}\text{C}$  należy odnotować też istotny wpływ wapna hydratyzowanego stosowanego zamiennie w mączce wapiennej AC 8S. Natomiast w temperaturze  $+40^{\circ}\text{C}$  znaczący wpływ na wytrzymałość na pośrednie rozciąganie AC 8S odgrywa oddziaływanie synergiczne asfaltu spienionego i wapna hydratyzowanego.

Tabela 4 / Table 4

PARAMETRY MODELU ZMIENNYCH BETONU ASFALTOWEGO AC 8S PODDANYCH OCENIE

MODEL PARAMETERS OF AC 8S ASPHALT CONCRETE VARIABLES EVALUATED

Zmienne zależne Dependent variable	Test SS dla pełnego modelu w odniesieniu do SS dla reszt / SS Test for the full model with respect to SS for residual							
	Multiple R	Multiple R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	SS Model	MS Model	SS Residual	MS Residual	$p_{\text{val}}$
ITS <sub>d-10</sub> , kPa	0.617	0.381	0.359	362366.1	72473.2	587590.9	4257.90	<0.001
ITS <sub>d+13</sub> , kPa	0.729	0.532	0.515	346740.7	69348.1	304837.3	2208.96	<0.001
ITS <sub>d+25</sub> , kPa	0.738	0.545	0.529	249297.1	49859.4	207729.0	1505.28	<0.001
ITS <sub>d+40</sub> , kPa	0.600	0.361	0.337	146405.3	29281.0	259119.2	1877.67	<0.001
WTS <sub>AIR</sub> , mm	0.812	0.660	0.648	0.0	0.0	0.0	0.00	<0.001
PRD <sub>AIR</sub> , %	0.976	0.952	0.950	81.2	16.2	4.1	0.03	<0.001

ITS – średnia wytrzymałość na rozciąganie w zakresie temperatur, WTS<sub>AIR</sub> – nachylenie toru koła, PRD<sub>AIR</sub> – proporcjonalna głębokość koleiny / ITS – indirect tensile strength in the temperature range, WTS<sub>AIR</sub> – wheel tracking slope, PRD<sub>AIR</sub> – proportional rut depth

as its increased content in AC 8S causes an unfavorable increase in the parameter proportional rut. However, since the influence of hydrated lime is stronger than that of foamed asphalt, there is no adverse effect of hydrated lime and foamed bitumen on the change in the parameter proportional rut depth of the AC 8S mixture.

The analysis of the research results presented in Fig. 8 shows that hydrated lime significantly affects the resistance to permanent deformations of the AC 8S asphalt mixture produced in the “half warm” technology. A more intense effect of hydrated lime is observed on the proportional rut depth when the content of hydrated lime used interchangeably with a portion of mineral filler to 45 %. Hydrated lime in the range of 15 % to 30 % significantly influences this parameter. Increasing it to 45 % results in only a slight increase in wheel tracking slope.

### 3.3. Determination of the recommended content of hydrated lime and foamed bitumen

As demonstrated in earlier analyses, both foamed bitumen and hydrated lime had varying effects on selected properties of AC 8S asphalt concrete in the “half warm” technology. An attempt was made to optimize the composition of the designed asphalt concrete regarding the content of foamed bitumen and hydrated lime so that its properties would meet established criteria. For this purpose, utility functions DF were used (33, 35, 37).

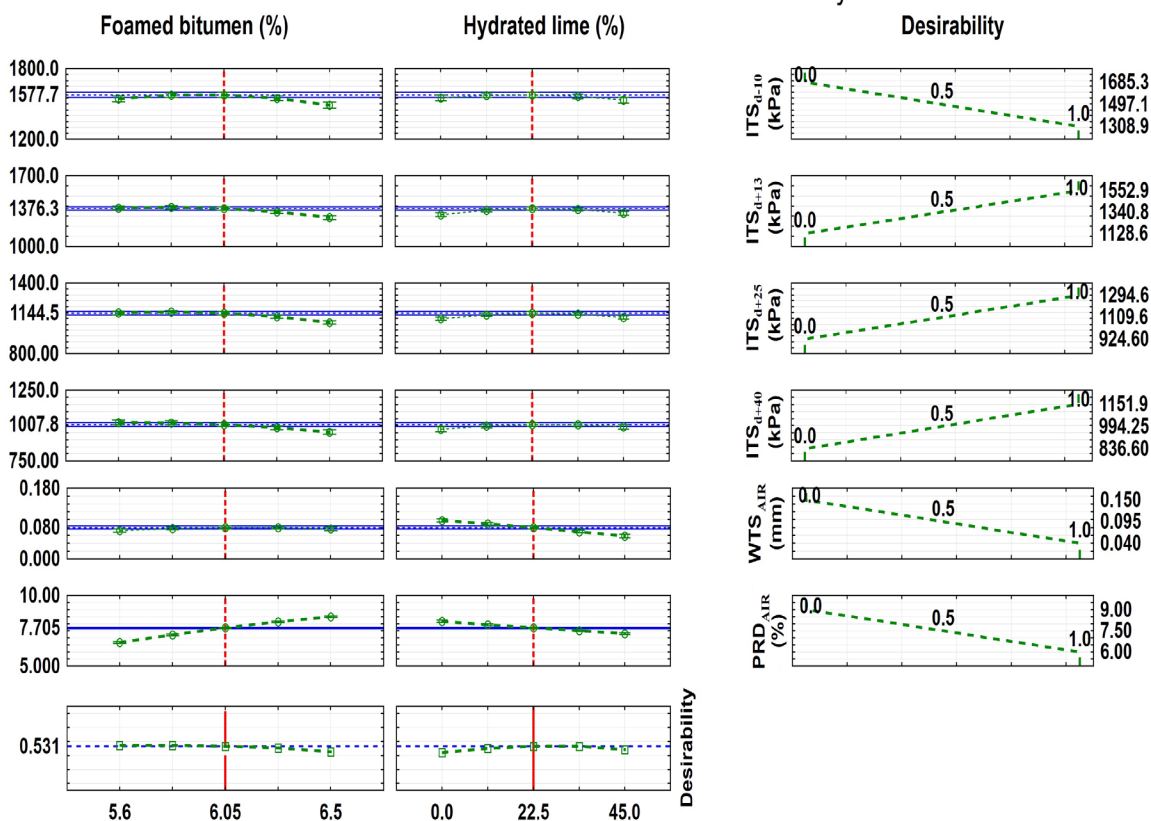
The first step in the analysis of utility functions for the properties of AC 8S asphalt concrete, depending on the content of foamed bitumen and hydrated lime used interchangeably in the limestone filler, was to assess the significance of the impact of these parameters on the optimization of its composition. This assessment was carried out using ANOVA analysis, and the results of the calculations are presented in Table 4.

Based on the analysis of the data presented in Table 4, it was found that all the parameters of the AC 8S asphalt mixture analyzed in the study depend significantly on the factors being investigated, as the  $p_{\text{value}}$  is less than 0.05.

Next, the utility of AC 8S was assessed by assigning a value of 1 to the most desirable response values and a value of 0 to the least desirable response values for the analyzed parameters using the



## Profiles for Predicted Values and Desirability



Rys. 9. Oznaczenia optymalnej ilości wapna hydratyzowanego i asfaltu spienionego w AC 8S w aspekcie analizowanych parametrów.

Fig. 9. Designations of the optimal amount of hydrated lime and foamed bitumen in AC 8S with respect to the analyzed parameters.

Dokonując oceny odporności na deformacje trwałe betonu asfaltowego AC 8S można stwierdzić, że istotną rolę w kształtowaniu tej właściwości odgrywa wapno hydratyzowane częściowo zastępujące mączkę wapienną, przyczyniając się do usztywnienia mieszanki mineralno-asfaltowej i tym samym zapewniając wzrost odporności na powstawanie koleiny. Natomiast asfalt spieniony z dodatkiem odgrywa istotną rolę w kształtowaniu parametru proporcjonalnej głębokości koleiny.

Z analizy funkcji użyteczności wynika, że zalecana zawartość asfaltu 50/70 z 0,6% środka aktywnego powierzchniowo wynosi 6,05%, a zalecana zawartość wapna hydratyzowanego częściowo zastępującego mączkę wapienną wynosi 22,5%. Jednak biorąc pod uwagę proces dozowania i tolerancje zalecane są następujące ilości: 6% asfaltu spienionego i 25% wapna hydratyzowanego. Przy zawartości procentowej na tych poziomach właściwości betonu asfaltowego uzyskają optymalne wartości, zapewniając tym samym prawidłowe działanie warstw konstrukcyjnych nawierzchni i wymagając ich trwałość eksploatacyjną.

## 4. Wnioski

Na podstawie dokonanej analizy wyników badań betonu asfaltowego AC 8S z asfaltem spienionym z dodatkiem 0,6% środka powierzchniowo aktywnego oraz wapna hydratyzowanego sto-

Statistica program (31). Intermediate values ranged from 0 to 1 in a linear relationship (33, 35). The results of the analysis for AC 8S with respect to the amount of hydrated lime and foamed bitumen are presented in Figure 9.

The results of the analysis show a varied impact of the amount of hydrated lime and foamed bitumen on the evaluated properties of asphalt concrete. A significant influence of the amount of foamed 50/70 bitumen and hydrated lime is observed in the case of indirect tensile strength at the test temperature of -10 °C. Between these two components, synergistic effects develop, and their individual effects are compensated. At test temperatures of +13 °C, +25 °C, and +40 °C, it is primarily the foamed bitumen that provides the required indirect tensile strength throughout the dosage range. Although it should be noted that at test temperatures of +13 °C and +25 °C, there is also a significant influence of hydrated lime used interchangeably in the limestone meal of AC 8S. However, at +40 °C, the significant influence on the indirect tensile strength of AC 8S is played by the synergistic interaction of foamed bitumen and hydrated lime.

When assessing the resistance to permanent deformation of AC 8S asphalt concrete, it can be concluded that hydrated lime, partially replacing limestone filler, plays a significant role in shaping this parameter, contributing to the stiffening of the asphalt mixture and thus ensuring increased resistance to rutting. On the other hand,

sowanego zamiennie za część mączki wapiennej wykonanego w technologii na „pół ciepło” sformułowano poniższe wnioski.

1. Wapno hydratyzowane korzystnie wpływa na trwałość. Poprawie ulegają właściwości takie jak wytrzymałość na pośrednie rozciąganie i odporność na deformacje trwałe betonu asfaltowego AC 8S wytwarzanego w technologii na „pół ciepło” z asfaltem spienionym. Intensywność jego oddziaływania uzależniona jest od analizowanej charakterystyki betonu asfaltowego. Obserwuje się też synergię oddziaływania wapna hydratyzowanego i asfaltu spienionego. Intensywność jego oddziaływania uzależniona jest od analizowanej charakterystyki betonu AC 8S.
2. Wapno hydratyzowane w ilości powyżej 30% częściowo zastępujące mączkę wapienną znacząco wpływa na wytrzymałość na pośrednie rozciąganie mieszanki AC 8S zawierającej od 5.9% do 6.5% asfaltu spienionego. W temperaturach 13°C, 25°C i 40°C wapno hydratyzowane w zakresie 30-45% wykazuje istotny wpływ na wytrzymałość na pośrednie rozciąganie AC 8 zawierający 5.6 - 6.5% asfaltu spienionego 50/70 z 0.6% środka aktywnego powierzchniowo, w analizowanym zakresie temperaturowym,
3. Zastosowanie wapna hydratyzowanego w ilości od 15% do 30% stosowanego zamiennie za część mączki mineralnej oraz asfaltu spienionego z dodatkiem 0.6% powierzchniowo aktywnego środka w ilości do 5.6% do 5.9% zapewnia wysoką odporność na powstawanie trwałych deformacji betonu asfaltowego AC 8S,
4. Analiza właściwości betonu asfaltowego AC 8S w oparciu o funkcję użyteczności pozwoliła na określenie optymalnych ilości wapna hydratyzowanego wynoszącego 25% zamiennie za część mączki wapiennej i asfaltu spienionego w ilości 6% z dodatkiem 0,6% powierzchniowo aktywnego środka w celu zapewnienia najkorzystniejszych wartości analizowanych jej parametrów trwałości.

Na podstawie wyników badań laboratoryjnych można stwierdzić, że zastosowanie wapna hydratyzowanego w betonie asfaltowym AC 8S otrzymanym w technologii „na pół ciepło” z zastosowaniem asfaltu spienionego ma istotny, pozytywny wpływ na jego trwałość, co zapewnia prawidłową pracę betonu asfaltowego w konstrukcji nawierzchni.

## Podziękowanie

Badania zostały sfinansowane z subwencji Wydziału Budownictwa i Architektury, Politechniki Świętokrzyskiej [praca badawcza Nr 02.0.09.00/2.01.01.00.0000SUBB.BKIK.20.001].

## Literatura / References

1. B. Hofko, M. Dimitrov, O. Schwab, R. Weiss, H. Rechberger, H.; Grothe, Technological and environmental performance of temperature-reduced mastic asphalt mixtures. *Road Mater. Pavement Des.*, **18**, 22–37 (2017). <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1141703>

foamed bitumen with an additive plays a significant role in shaping the parameter of proportional rut depth.

From the utility function analysis, it can be inferred that the recommended content of foamed 50/70 bitumen with 0.6 % surface active agent is 6.05 %, and the recommended content of hydrated lime, partially replacing limestone filler, is 22.5 %. However, considering the dosing process and tolerances, the following percentages are recommended: 6% foamed bitumen and 25 % hydrated lime. With these percentage levels, the asphalt concrete parameters will achieve optimal values, ensuring the proper functioning of the structural layers of the pavement and the required operational durability.

## 4. Conclusions

Based on the analysis of the results of the research conducted on AC 8S asphalt concrete produced in the “half warm mix” technology with foamed bitumen with a 0.6 % surface active agent and hydrated lime used interchangeably for part of the limestone filler, the following conclusions have been formulated.

1. Hydrated lime has a beneficial effect on durability, improving such properties as indirect tensile strength and resistance to permanent deformation of AC 8S asphalt concrete produced in the “half warm mix” technology with foamed bitumen. The intensity of its influence depends on the analyzed characteristic of the asphalt concrete. Synergy of the effect of hydrated lime and foamed bitumen is observed, and its intensity is determined by the properties of AC 8S asphalt concrete;
2. Hydrated lime in an amount exceeding 30 %, partially replacing limestone meal, significantly affects the indirect tensile strength of AC 8S mixture containing 5.9 % to 6.5 % foamed bitumen. At temperatures of 13 °C, 25 °C, and 40 °C, hydrated lime in the range of 30-45 % has a significant impact on the indirect tensile strength of AC 8S containing 5.6 - 6.5 % foamed bitumen 50/70 with 0.6 % surface active agent, within the analyzed temperature range,
3. The use of hydrated lime in quantities from 15 % to 30 %, used interchangeably for part of the mineral filler, and foamed bitumen with an additive in quantities from 5.6 % to 5.9 %, ensures high resistance to the formation of permanent deformations in AC 8S asphalt concrete.
4. The analysis of AC 8S asphalt concrete properties based on the utility function allowed for determining the optimal amounts of hydrated lime, partially replacing limestone filler, is 25 % and foamed bitumen with 0.6 % surface active agent, is 6 %, to ensure the most favorable values of its durability parameters.

Based on the results of laboratory research, it can be concluded that the use of hydrated lime in AC 8S asphalt concrete obtained in the “half warm mix” technology with the use of foamed bitumen has a significant positive impact on its durability parameters, which will ensure the proper performance of the asphalt concrete in the construction of pavement structures.

2. E. Sanchez-Alonso, A. Vega-Zamanillo, D. Castro-Fresno, M. Del Rio-Prat, Evaluation of compactability and mechanical properties of bituminous mixes with warm additives. *Constr. Build. Mater.* **25**, 2304–2311, (2011). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.024>
3. Z. Leng, A. Gamez, I.L. Al-Qadi, Mechanical property characterization of warm-mix asphalt prepared with chemical additives. *J. Mater. Civ. Eng.* **26**, 304–311, (2014). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000810](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000810).
4. A. Wozzuk, W. Franus, A Review of the Application of Zeolite Materials in Warm Mix Asphalt Technologies. *Appl. Sci.* **7**, 293 (2017). <https://doi.org/10.3390/app7030293>.
5. K.J. Jenkins, *Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with on Foamed Bitumen*. PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa, 2000.
6. P.J. Ruckel, S.M. Acott, R.H. Bowering, Foamed-Asphalt Paving Mixtures: Preparation of Design Mixes and Treatment of Test Specimens. In: *Asphalt materials, mixtures, construction, moisture effects and sulfur*, Washington, DC: TRB – Transportation Research Board, 1982, 911, National Research Council USA, p. 88-95
7. *Wirtgen Cold Recycling Technology (1st ed.)*. 2012. Windhagen: Wirtgen GmbH
8. M.M. Iwański, A. Chomicz-Kowalska, K. Maciejewski, Impact of Additives on the Foamability of a Road Paving Bitumen. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **2019**, Vol. 603, No. 3, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/603/4/042040>.
9. K.M. Muthen, *Foamed Asphalt Mixes. Mix Design Procedure*; Contract Report CR 98/077; SABITA Ltd&CSIR Transportek: Pretoria, South Africa, September 2009.
10. M.M. Iwański, A. Chomicz-Kowalska, K. Maciejewski, Effect of Surface Active Agent (SAA) on 50/70 Bitumen Foaming Characteristics. *Materials*. **12**, 1-21, 3514, (2019); <https://doi.org/10.3390/ma1221351>
11. X. Yu, Z. Leng, Z.; Y. Wang, S. Lin, Characterization of the effect of foaming water content on the performance of foamed crumb rubber modified asphalt. *Constr. Build. Mater.* **67**, 279-284, (2014). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.046>.
12. J. Piłat, P. Radziszewski, *Nawierzchnie asfaltowe: Podręcznik akademicki. (Asphalt Pavements; Academic handbook)*. WKiŁ: Warszawa, Poland, 2010. (in Polish).
13. P.E. Seebaly, D.N. Litte, D.N., J.A. Epps, *The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt*. The National Lime Association: Arlington, VA, USA. 2006
14. D. Lesueur, J. Petit, H-J. Ritter, The mechanism of hydrated lime modification of asphalt mixtures: a state-of-the-art review. *Road Mater. Pavement Des.* **14** (1), 1-16, (2012), <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2012.743669>.
15. M. Iwański, A. Chomicz-Kowalska, M. M. Iwański, Influence of hydrated lime on durability of SMA asphalt pavement with quartzite aggregate. *Structure and Environmental*, **5**, 4, 5-14, (2013).
16. J. Zou, M. Isola, R. Roque, S. Chun, C. Koh, G. Lopp, Effect of hydrated lime on fracture performance of asphalt mixture. *Constr. Build. Mater.*, **44**, 302 – 308, (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.019>.
17. M. Iwański, N.B. Uriew, *The asphalt concrete as a composite material (with nanodisperse and polymer components)*. Moscow State Automobile and Road Technical University – Kielce Technical University (Poland). Moscow, Russia, 2007, p. 669.

## Acknowledgements

The research was funded by a grant from the Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology [research paper No. 02.0.09.00/2.01.01.00.0000SUBB.BKIK.20.001].

18. D. Lesueur, D.N. Little, Effect on hydrated lime on rheology, fracture and aging of bitumen. *Transp. Res. Rec.* **1661**, 93-105, (1999).
19. C. Gorkem, B. Sengoz, Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime. *Constr. Build. Mater.* **23**, 2227-2236 (2009), <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.12.001>.
20. E. Remišová, M. Decký, M. Podolka, M. Kováč, T. Vondráčková, L. Bartuška; Frost Index from Aspect of Design of Pavement Construction in Slovakia. *Procedia Earth Planet. Sci.* 2015, 15, 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.002>
21. M. Iwański, G. Mazurek, The effect of hydrated lime on the rheological properties of extracted bitumen from Stone Mastic Asphalt. *Cem. Wapno Beton* **19**, 81, 6, 376-383, (2014).
22. M. Iwański, G. Mazurek, Applying of 2S2P1D model for assessing viscoelastic properties of bituminous binder extracted from SMA mixture with hydrated lime addition. *Cem. Wapno Beton* **21**, 2, 124-136, (2018)
23. M.M. Iwański, Effect of Hydrated Lime on Indirect Tensile Stiffness Modulus of Asphalt Concrete Produced in Half-Warm Mix Technology. *Materials*, **13**, 210, 4731, (2020)
24. M.M. Iwański, A. Chomicz-Kowalska, K. Maciejewski, Resistance to Moisture Induced Damage of Half Warm Mix Asphalt Concrete with Foamed Bitumen. *Materials*, **13**, 654;1-29, (2020), <http://dx.doi.org/10.3390/ma13030654>.
25. WT-2 2014. Asphalt mixes. Technical Requirements. Appendix to ordinance No. 54 of the General Director of National Roads and Highways, 8.11.2014. 2014.
26. Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych”, GDDKiA, Poland, Warsaw, 2014, p.112.
27. Z. Owsiak, P. Czapik, J. Zapala-Słweta, Properties of a Three-Component Mineral Road Binder for Deep-Cold Recycling Technology. *Materials*, **13**, 16, 1-13, (2020), <https://doi.org/10.3390/ma13163585>
28. WT-1 2014. Aggregates Technical Requirements. Aggregates for mineral-asphalt mixtures and surface reinforcements on national roads. Appendix to ordinance No. 46 of the General Director of National Roads and Highways, Poland, Warsaw, 2014.
29. Ž.R. Lazić, 2004. Design of experiments in chemical engineering: a practical guide. Wiley-VCH, Weinheim ; [Germany].
30. D.G. Montgomery, 2001. Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Son, 5th Edition, 684
31. STATISTICA 13.3. Statsoft. Available online: [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com) (accessed on 20 August 2019).
32. G.F. Piepel, J.A. Cornell, Mixture Experiment Approaches: Examples, Discussion, and Recommendations. *Journal of Quality Technology*, **26** (3), 177–196, (1994), <https://doi.org/10.1080/00224065.1994.11979525>
33. D. Steuer, 1999. Multi-Criteria-Optimisation and Desirability Indices. Technical Report / Universität Dortmund SFB 475, No. 1999/20.
34. J. Harrington, The desirability function. *Industrial Quality Control*, **21** (10), 494-498, (1965).
35. K.J. Kim, J. Lin, Simultaneous optimization of mechanical properties of steel by maximizing desirability functions. *Applied Statistics*, **49** (3), 311-326, (2000).