

Przegląd metod ogrzewania nawierzchni drogowych

Review of road pavement heating methods



Agata Pasztetnik

Magister inżynier

TPA Sp. z o.o.

agata.pasztetnik@pwr.edu.pl

Streszczenie: Kluczowym aspektem utrzymania zimowego dróg jest usuwanie śliskości zimowej. W artykule przedstawiono przegląd metod ogrzewania nawierzchni będących alternatywą dla standardowych sposobów radzenia sobie ze śniegiem i lodem. Przenalizowano ogrzewanie: hydrauliczne, elektryczne, mikrofalowe oraz indukcyjne. Przedstawiono badania i realizacje poszczególnych metod.

Słowa kluczowe: Nawierzchnie ogrzewane; Utrzymanie zimowe

Abstract: The main aspect of winter maintenance is removing winter slipperiness. The paper presents an overview of pavement heating methods that are an alternative to standard methods of dealing with snow and ice. Hydraulic, electric, microwave and induction heating was analyzed. The research and implementation of individual methods were presented.

Keywords: Heated pavements; Winter maintenance

Wstęp

Autorka w swojej pracy naukowej zajmuje się nawierzchniami samoodładzającymi, czyli takimi, na których powierzchni możliwa jest zautomatyzowana, zdalna likwidacja śliskości zimowej.

Śliskość zimowa, tak powszechna w Polsce, jest zjawiskiem wpływającym na obniżenie bezpieczeństwa użytkowników dróg. Utrzymanie zimowe jest corocznym wyzwaniem zarządców. Pogorszenie warunków zwykle pojawia się niespodziewanie, nierzadko powodując paraliż na drogach. Wytyczne GDDKiA [1] definiują zimowe utrzymanie dróg jako prace mające na celu zmniejszenie lub ograniczenie zakłóceń ruchu drogowego wywołanych czynnikami atmosferycznymi, takimi jak śliskość zimowa i opady śniegu. Obejmują one m.in. przygotowanie materia-

łów do usuwania (oraz zapobiegania) śliskości zimowej, usuwanie śliskości zimowej oraz mechaniczne usuwanie śniegu.

W Polsce standardowo stosuje się środki chemiczne i materiały uszorstniające oraz mechaniczne usuwanie warstw śniegu i lodu. Rozwiązania te mają jednak negatywny wpływ na środowisko, użytkowników, a także konstrukcję dróg i obiektów. [2-4]

Alternatywą dla standardowych metod może być stosowanie nawierzchni samoodładzających, czyli takich, których konstrukcja pozwala na usuwanie śniegu oraz lodu poprzez wydzielone ciepło. Wraz z rozwojem odnawialnych źródeł energii spopularyzowanie tych rozwiązań wydaje się coraz bardziej możliwe. Powszechne ich stosowanie wpłynęłoby pozytywnie na środowisko, wydłużyło trwałość nawierzchni, a także przy odpowiednim zaprogra-

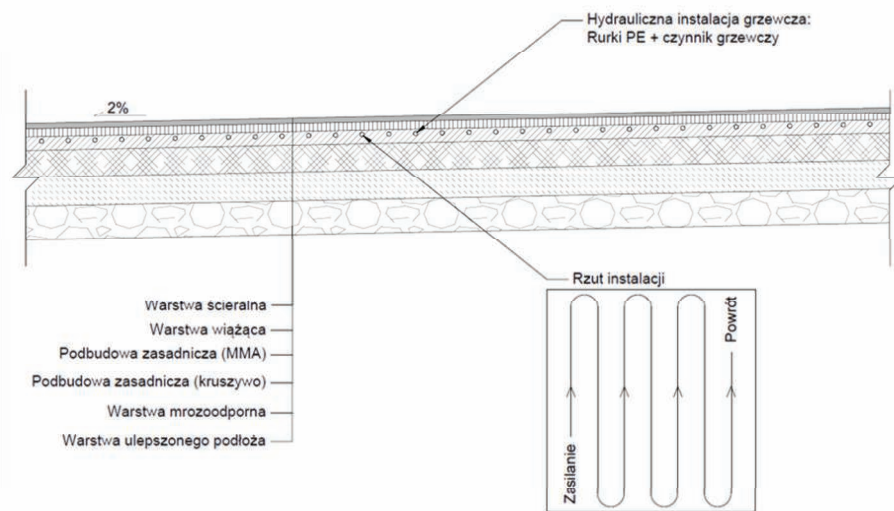
mowaniu pozwoliło na szybkie usunięcie śliskości.

W artykule omówiono badania i realizacje w zakresie ogrzewania: hydraulicznego, elektrycznego, mikrofalowego i indukcyjnego oraz wskazano potencjalny kierunek rozwoju zagadnienia.

Ogrzewanie hydrauliczne

Najbardziej popularne są nawierzchnie ogrzewane za pomocą instalacji hydraulicznej umieszczonej w konstrukcji drogi. Przepływający przez nią czynnik sprawia, że nawierzchnia ulega podgrzaniu. Taka instalacja może być zasilana zarówno za pomocą powietrznej lub gruntowej pompy ciepła, jak i bezpośrednio energią geotermalną. Przekrój przykładowej konstrukcji drogi w tej technologii przedstawiono na rys. 1.

W 1948 r. w miejscowości Klamath



1. Przykładowy przekrój konstrukcji nawierzchni ogrzewanej hydraulicznie

Falls, w stanie Oregon wykonano pierwszą taką inwestycję. Instalację zbudowaną z rur żelaznych o długości 135 m umieszczonych w nawierzchni z betonu cementowego zasilano studnią geotermalną. Konstrukcja działała bez potrzeby wykonania remontu przez okres prawie 50 lat. Następnie w trakcie remontu konstrukcji nawierzchni wykonano przebudowę instalacji, wbudowując odporne na korozję rury PEX [5]. W Szwajcarii, w 1994 r. oddano do użytku most w Därligen, w którego nawierzchni umieszczono system hydrauliczny, zasilany przez gruntowy magazyn ciepła. Dzięki instalacji 91 pionowych sond gruntowych wykonanych na głębokość 65 m umożliwiono przechowywanie ciepła odebranego z nawierzchni w

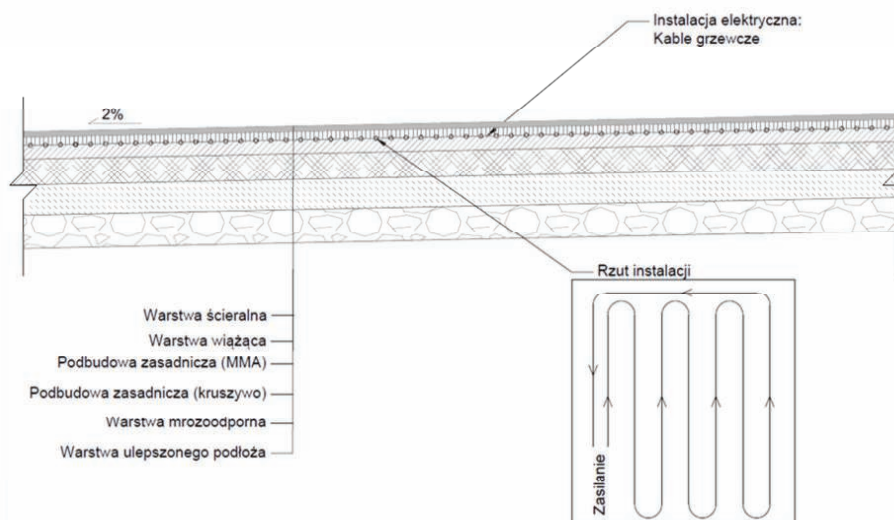
sezonie letnim i wykorzystanie w zimowym [6]. W miejscowości Fukui (Japonia) w 2006r. wykonano most na rzece Asuwa, gdzie energię pozyskaną z nawierzchni w okresie letnim przechowywano dzięki instalacji 378 pali wraz z wymiennikiem ciepła w okolicy brzegu rzeki, a następnie wykorzystywano ją do roztopiania śniegu i lodu w okresie zimowym [7]. Na Islandii głównym źródłem energii na wyspie jest energia geotermalna. Co roku, liczba chodników i dróg ogrzewanych za jej pomocą wzrasta. W 2019 r. większość nowo budowanych budynków, które znajdują się w rejonach bogatych w energię geotermalną posiada systemu odładowania. Powierzchnia ogrzewana w 2018 r. wyniosła ok. 1,2 mln m² [8]. W miejscach wykonywanych wcze-

śniej instalacji, zimowe temperatury osiągały wartości do -10°C. Zhao i inni [9] z Harbin w Chinach skupili się na działaniu systemu w niższych temperaturach, ponieważ w ich regionie średnia temperatura zimą wynosi ok. -16,9°C, a najniższa może spaść nawet poniżej -25°C. Na potrzeby badań wykonano konstrukcję systemu o wymiarach drogi 5x5 m, zasilanego gruntową pompą ciepła z 10 wymiennikami sięgającymi głębokości 10 m. Na podstawie osiągniętych rezultatów badacze wnioskują, że w celu zwiększenia szybkości ogrzewania, temperatura przepływającej cieczy powinna wynosić powyżej 30°C. Przepływ cieczy należy dobrać tak, aby osiągnąć możliwie najniższe zużycie energii oraz jak najlepszą wydajność energetyczną.

Na działanie nawierzchniowych hydraulicznych systemów energetycznych, zarówno tych gromadzących ciepło, jak i tych przekazujących ciepło na powierzchnię w okresie zimowym, wpływ ma wiele czynników, m.in. zdolność do przewodzenia ciepła pomiędzy instalacją, a nawierzchnią, głębokość umieszczonej instalacji, materiał, kształt, wymiary, rozstaw rur, rodzaj zastosowanego płynu roboczego, interakcja pomiędzy nawierzchnią, a rurą oraz temperatura i przepływ płynu roboczego [10,11].

Czas potrzebny do działania systemu zmniejsza się wraz ze wzrostem przewodności cieplnej warstwy nawierzchni, zwiększeniem średnicy rury, zmniejszeniem zagłębienia instalacji oraz jej rozstawu. Rozstaw 25 cm oraz głębokość w zakresie 4 do 10 cm są optymalne [12].

Zagadnieniem ogrzewania hydraulicznego zasilanego bezpośrednio ze źródeł geotermalnych zajmowali się Ho i inni [13]. Przeprowadzona analiza numeryczna wykazała, że dla rejonu Dakoty Północnej, gdzie temperatura powietrza w



2. Przykładowy przekrój konstrukcji nawierzchni ogrzewanej elektrycznie

okresie zimowym waha się w przedziale -5°C do -25°C , czynnik (woda) musi mieć temperaturę $50-60^{\circ}\text{C}$. Przeprowadzona przez Zhao i innych [14] analiza numeryczna systemu hydraulicznego dla bardzo zimnych obszarów Chin wykazała, że sugerowany rozstaw rur powinien wynosić 120 mm (badania przeprowadzone dla 160 mm nie dawały pozytywnych wyników).

Ogrzewanie elektryczne

Kolejnym rozwiązaniem są nawierzchnie ogrzewane za pomocą kabli lub mat elektrycznych. Zasilane są zazwyczaj bezpośrednio z sieci, ale wraz z rozwojem technologii paneli fotowoltaicznych pojawiają się nowe możliwości zasilania. Przykładowy schemat rozwiązania znajduje się na rys. 2.

Już w latach 60' XIX wieku zastosowano ogrzewanie elektryczne na płycie pomostowej [15]. Pierwsze instalacje elektryczne były bardzo kosztowne. Systemy ogrzewania musiały pozostawać w ciągłej gotowości, aby sprawnie ogrzać nawierzchnie gdy zajdzie taka potrzeba, co skutkowało wysokim zapotrzebowaniem na energię elektryczną. W Japonii, w okresach zimowych pomiędzy grudniem 1992 oraz marcem 1994 testowano system ogrzewania elektrycznego działający w oparciu o probabilistyczne dane dotyczące opadów śniegu, generowane przez Japońskie Stowarzyszenie Meteorologiczne. Działanie systemu było sprawdzane na rzeczywistych skrzyżowaniach. Wykazano, że w dwóch kolejnych okresach zimowych dodatkowe dane pozwoliły na zmniejszenie zużycia energii o 29,7% oraz 61,6% [16].

Rao i inni [17] przebadali beton zawierający składniki przewodzące, pozwalające na osiągnięcie stabilnego przewodzenia elektrycznego. Nakładka z cienkiej warstwy betonu z

dodatkiem grafitu oraz włókien stalowych, podłączona do prądu może generować ciepło zapobiegające powstawaniu lodu. Technologia została po raz pierwszy wykorzystana w dużej skali w Chinach na dwóch rampach parkingowych, każda o długości 41 m. Mimo problemów powstałych na etapie wykonywania instalacji, udało się ją uruchomić i uzyskać właściwe dla odladzania wartości mocy: 200-300 W/m².

Pan i inni [18] wskazali potencjał w stosowaniu przewodzącej mieszanki mineralno-asfaltowej. Zaznaczyli konieczność wykonania badań na większych próbkach w laboratorium oraz w skali rzeczywistej, aby zaobserwować wpływ temperatury oraz obciążenia, do dalszego rozwoju technologii. Przewodność mieszanki mineralno-asfaltowej zależy głównie od rozkładu wypełniacza przewodzącego w lepiszczu asfaltowym. Istotnymi aspektami przy projektowaniu i wykonywaniu takich mieszanek są: sposób dodawania składników i ich mieszania, odpowiednia zawartość wolnej przestrzeni w mieszance mineralnej VMA oraz odpowiedni szkielet gruntowy. Należy pamiętać, że dodatki poprawiające przewodność elektryczną mogą jednocześnie wpłynąć na parametry wytrzymałościowe mieszanek, w zależności od tego jaki mają kształt, skład i na ile są kompatybilne z mieszanką/asfaltem. Przewodzące wypełniacze zwiększają lepkość asfaltów, co wpływa jednocześnie na podniesienie temperatury mieszania zapewniającej odpowiednie pokrycie kruszywa lepiszczem.

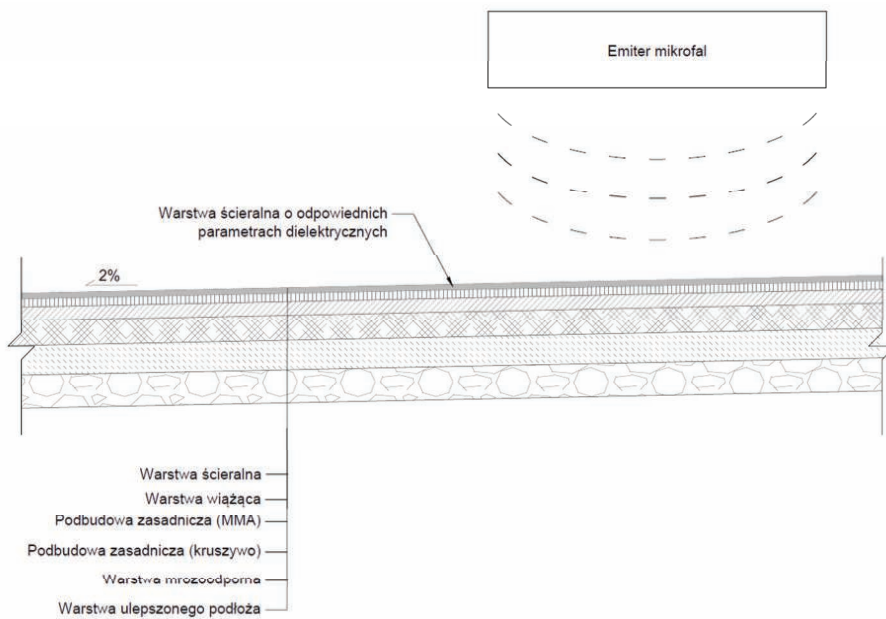
Sassani i inni [19] badali zastosowanie włókien węglowych w przewodzącym prąd betonie dla zastosowań w odladzaniu nawierzchni. Specjalna mieszanka musi zawierać odpowiednią ilość włókien węglowych, by ułożyły się one w sposób umożliwiający przewodzenie z systemu ogrzewania drogi. Badanie

przepuszczalności pozwoliło na określenie odpowiedniej ilości włókien. Autorzy wykazali, że mieszanki mogą być stosowane przy odladzaniu nawierzchni, z zaleceniem stosowania włókien w ilości 1% objętościowo. Zalecają oni stosowanie warstwy izolującej z betonu cementowego o niskim przewodnictwie cieplnym (np. z kruszywa lekkiego) poniżej instalacji. Autorzy sprawdzili, że początkowe wartości współczynnika przekazywania energii obniżają się z ok. 66% do 50%, by ustabilizować się na tym poziomie.

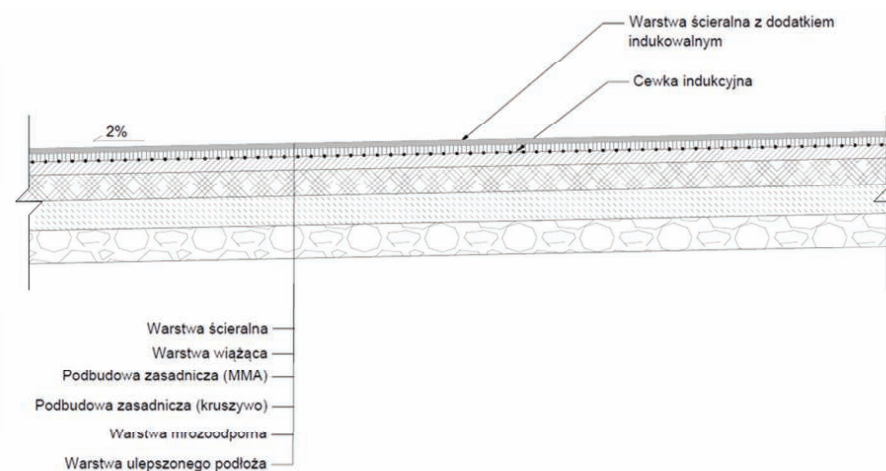
Ogrzewanie mikrofalami

Mikrofałe są falami o częstotliwości w zakresie 100 MHz do 100 GHz. Ogrzewanie za pomocą mikrofal można określić jako bezpośrednią konwersję energii w materiale podczas procesu ogrzewania. Zdolność materiału do pochłaniania energii z mikrofal opisują właściwości dielektryczne materiałów. Ruch dipola, czyli cząsteczki wody zmienia się w zależności od stanu skupienia. Dla wody w stanie ciekłym ruch ten występuje na częstotliwościach GHz (mikrofal), dla lodu natomiast zachodzi na częstotliwości kHz (długich falach radiowych). Skutkiem czego ogrzewanie mikrofalowe nie zadziała na lód, ale zadziała bardzo dobrze na wodę powstałą z roztopiającego się lodu [20]. Przykładowy przekrój nawierzchni zilustrowano na rys. 3.

Liu i inni [21] badali właściwości dielektryczne materiałów przeznaczonych do nawierzchni drogowych. Stwierdzono wzrost wydajności ogrzewania mikrofalami oraz poprawę właściwości dielektrycznych betonu nawierzchniowego wraz ze wzrostem współczynnika w/c oraz punktu piskowego. Dodatkowo zwrócono uwagę na znaczny wzrost tych parametrów po dodaniu grafitu. Dodatek grafitu w ilości 15% masy cementu spowodował wzrost



3. Przykładowy przekrój konstrukcji nawierzchni ogrzewanej mikrofalami



4. Przykładowy przekrój konstrukcji nawierzchni ogrzewanej indukcyjnie

wydajności ogrzewania z $0,65^{\circ}\text{C/s}$ do $1,63^{\circ}\text{C/s}$ dla źródła mikrofal na wysokości 20 mm.

Gulisano i inni [22] skupili się w swoich badaniach na poprawie właściwości dielektrycznych mieszanek poprzez dodatek żużli z pieca łukowego. Dla uzyskania bardziej precyzyjnych wyników zdecydowano się badać zaprawy asfaltowe (wymiar ziaren do 2 mm). Część kruszywa wapiennego została zastąpiona żużlami (5% oraz 10% objętościowo), a rezultaty wskazały na wzrost stałej dielektrycznej z 3,8 do 5 w całym badanym przedziale częstotliwości. Dodatkowo zalecono stosowanie częstotliwości 5,8 GHz przy warstwach nawierzchni grubości do 7 cm oraz 2,45 GHz dla większych gru-

bości.

Gao i inni [23] zwracają uwagę na zwiększenie zawartości wolnej przestrzeni w mieszance mineralno-asfaltowej wraz ze wzrostem ilości włókien wełny stalowej. Autorzy zalecają dobór włókien cieńszych, generują one mniej wolnej przestrzeni. Należy jednak uważać, gdyż im mniejsza średnica włókien wełny stalowej, tym bardziej nierównomiernie ogrzewa się nawierzchnia. Optymalnymi zawartościami wełny stalowej są: 0,3% dla wełny #000, 0,6% dla wełny #0 i 0,9% dla wełny #2.

Ogrzewanie indukcyjne

Ogrzewanie indukcyjne to pro-

ces ogrzewania elektrycznie przewodzącego elementu poprzez indukcję elektromagnetyczną, której częstotliwość działania zawiera się w przedziale 1 kHz – 1 MHz [20.] Ani śnieg, ani lód, ani standardowa mieszanka nie są takimi materiałami. Rozwiązaniem jest dodanie do mieszanki nawierzchniowej elementów przewodzących prąd, które pod wpływem indukcji będą się nagrywały i roztopiały warstwę śniegu lub lodu. Schemat rozwiązania ukazano na rys. 4.

Xu i inni [24] w swoich badaniach skupili się na właściwościach odladzania mieszanek mineralno-asfaltowych zawierających włókna wełny stalowej. Zbadali tempo odladzania dla mieszanek standardowych oraz modyfikowanych - wyniki wskazują na znaczący pozytywny wpływ ilości oraz długości dodanych włókien.

Liu i inni [25] opracowali nową konstrukcję nawierzchni asfaltowych, zawierającą warstwy elektrycznie przewodzące oraz pochłaniające magnetycznie. Górna warstwa (elektrycznie przewodząca) zawierała dodatek wiórów stalowych, jako rekomendowaną wartość wybrano 6% wagowo w stosunku do kruszywa.

Liu i inni [26] zajęli się porównaniem działania ogrzewania indukcyjnego oraz za pomocą mikrofal. Wykazali, że przy podobnej mocy i sposobie radiacji ogrzewanie za pomocą indukcji jest szybkie, ale jednocześnie niejednorodne w kierunku podłużnym, natomiast mikrofalowe jest wolne, ale równomierne. Efektywna głębokość ogrzewania była znacznie większa w przypadku zastosowania mikrofal.

Nietypowe rozwiązania

Asfour i inni [27] zaprezentowali koncepcję niestandardowego ogrzewania hydraulicznego. W przedstawionym modelu po dwóch stronach nawierzchni znalazły się zbiorniki:

górny oraz dolny, pompa, oraz izolacja warstwy ścieralnej oraz podbudowy. Podgrzewana ciecz przepływała przez warstwę wiążącą z asfaltu porowatego. Symulacje wykazały skuteczność w różnych warunkach pogodowych.

Lei i inni [28] zaproponowali metodę ogrzewania istniejących mostów. Pętle z rur PEX przymocowane do spodu płyty mostowej zaizolowano na długości instalacji, tworząc w ten sposób instalację grzewczą. Osiągnięte rezultaty potwierdziły działanie systemu w łagodnych warunkach zimowych.

Xiang i inni [29] przedstawili koncepcję fotowoltaiczno-termicznej drogi. System składa się z przezroczystej powierzchni, modułów fotowoltaicznych oraz betonu asfaltowego z siecią rur grzejnych. Analiza stworzonego modelu matematycznego wykazała zwiększenie wydajności energetycznej w porównaniu do znanego wcześniej systemu dróg fotowoltaicznych.

Podsumowanie

Wachlarz alternatywnych sposobów zwalczania śliskości zimowej zawiera zarówno metody bardzo tradycyjne jak ogrzewanie hydrauliczne, jak i metody bardzo innowacyjne jak ogrzewanie mikrofalami oraz indukcyjne.

Metody hydrauliczne są zagadnieniem najmocniej rozwiniętym i najczęściej stosowanym w realizacjach, aczkolwiek dalej wymagającym optymalizacji.

Ogrzewanie elektryczne jest również technologią znaną od dawna. Wraz z rozwojem alternatywnych źródeł energii zwiększył się potencjał tej metody.

W ostatnich latach coraz więcej prac badawczych związanych jest zarówno z technologią ogrzewania przy pomocy mikrofal, jak i indukcji. Są to niewątpliwie obiecujące me-

tody, ale wprowadzenie ich do komercyjnego zastosowania wymaga dalszych badań i opracowania niezawodnych metod realizacji.

Różnorodność systemów będzie pozwalała idealnie dopasować się do sytuacji. Autorka planuje w swojej pracy stworzenie wytycznych pomagających dobrać rozwiązanie odpowiednie dla lokalizacji oraz potrzeb. Dodatkowo planując realizację nawierzchni samoodładzającej należy wziąć pod uwagę czy technologia układania warstwy nawierzchni z betonu asfaltowego lub betonu cementowego nie uszkodzi instalacji. W przypadku betonu cementowego należy pamiętać o zamocowaniu instalacji w odpowiedni sposób, aby elementy nie opadły, ani nie wypłynęły. Z kolei za wysoka temperatura mieszanki mineralno-asfaltowej może uszkodzić kable lub rurki, dlatego też należy mieć to na uwadze wybierając materiały do wykonania konstrukcji. Ważnym aspektem jest również proces zagęszczania wykonanej warstwy, trzeba sprawdzić czy standardowe metody nie przyczynią się do uszkodzenia instalacji. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Zarządzenie nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 5 września 2017 roku w sprawie wprowadzenia „Wytycznych zimowego utrzymania dróg”.
- [2] Mazur N. Wpływ soli do odładzania dróg na środowisko przyrodnicze. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 2015, T. 18, nr 4, s. 449–458
- [3] Fay L. et al. Manual of Environmental Best Practices for Snow and Ice Control. Minnesota Dep. Transp., 2015, vol. 5, no. June, [Online] Available: www.clearroads.org.
- [4] Shi X., Du S., Fay L. Environmental Risks of Snow and Ice Control Ma-

terials. *Sustainable Winter Road Operations*, 2018, pp. 180–210, doi: 10.1002/9781119185161.ch10.

- [5] LUND J. W. Reconstruction of a Pavement Geothermal Deicing System. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, 1999, Vol. 20, No. 1, Klamath Falls, OR, pp. 14–17
- [6] LUND J. W. Pavement Snow Melting. *GHC Bulletin*, 2000
- [7] Japan for Sustainability webpage, Summer Solar Heat Stored in Ground for Snow Melting during Winter, 2007 [dokument elektroniczny – online]. https://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id026795.html
- [8] RAGNARSSON Á., STEINGRIMSSON B., THORHALLSSON S. Geothermal Development in Iceland 2015–2019, *Proceedings World Geothermal Congress 2020*, Reykjavik, Iceland
- [9] Zhao W., Zhang Y., Chen X., Su W., Li B., Fu Z. Experimental heating performances of a ground source heat pump (GSHP) for heating road unit. *Energy Conversion and Management*: X, Volume 7, 2020, 100040, <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100040>
- [10] Dawson A. R., Dehdezi P. K., Hall M. R., Wang J., Isola R. Enhancing thermal properties of asphalt materials for heat storage and transfer applications. *Road Materials and Pavement Design*, 2012, vol. 13, no. 4, pp. 784–803, doi: 10.1080/14680629.2012.735791
- [11] Mirzanamadi R., Hagentoft C. E., Johansson P., Johnsson J. Anti-icing of road surfaces using Hydronic Heating Pavement with low temperature. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, vol. 145, pp. 106–118, doi: 10.1016/j.coldregions.2017.10.006
- [12] Pan P., Wu S., Xiao Y., Liu G. A review on hydronic asphalt pa-

- vement for energy harvesting and snow melting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, Volume 48, Pages 624-634, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.029>
- [13] Ho I.-H., Li S., Abudureyimu S. Alternative hydronic pavement heating system using deep direct use of geothermal hot water. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, Volume 160, Pages 194-208, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.01.014>
- [14] Zhao W., Chen X., Zhang Y., Su W., Xu F., Li B. Deicing performances of a road unit driven by a hydronic heating system in severely cold regions of China. *Computers & Mathematics with Applications*, 2021, Volume 81, Pages 838-850, <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2019.10.016>
- [15] Wang C., Fu H., Ma W., Zhang Z., Ji X., Han X. Combination design and performance evaluation of conductive bonding layer for asphalt pavement active deicing. *Construction and Building Materials*, 2020, Volume 263, 121037, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121037>
- [16] Sugawara N., Hokari K., Watanabe T., Sugawara H. Energy saving characteristics of a new type of road-heating system. *Atmospheric Research*, 1998, Volume 46, Issues 1-2, Pages 113-122, [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(97\)00034-3](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(97)00034-3)
- [17] Rao R., Fu J., Chan Y., Tuan C. Y., Liu C. Steel fiber confined graphite concrete for pavement deicing. *Composites Part B: Engineering*, 2018, Volume 155, Pages 187-196, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.013>
- [18] Pan P., Wu S., Xiao F., Pang L., Xiao Y. Conductive asphalt concrete: A review on structure design, performance, and practical applications. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2015, Vol. 26(7) 755-769, doi: 10.1177/1045389X14530594
- [19] Sassani A., Arabzadeh A., Ceylan H., Kim S., Sadati S., Gopalakrishnan K., Taylor P. C., Abdulla H. Carbon fiber-based electrically conductive concrete for salt-free deicing of pavements. *Journal of Cleaner Production*, 2018, Volume 203, Pages 799-809, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.315>
- [20] Sun Y., Wu S., Liu Q., Hu J., Yuan Y., Ye Q. Snow and ice melting properties of self-healing asphalt mixtures with induction heating and microwave heating. *Applied Thermal Engineering*, 2018, Volume 129, Pages 871-883, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.050>
- [21] Liu J., Xu J., Lu S., Chen H. Investigation on dielectric properties and microwave heating efficiencies of various concrete pavements during microwave deicing. *Construction and Building Materials*, 2019, Volume 225, Pages 55-66, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.249>
- [22] Gulisano F., Gallego J., Trigos L., Apaza Apaza F. R., Dielectric characterisation of asphalt mortars for microwave heating applications. *Construction and Building Materials*, 2021, Volume 308, 125048, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125048>
- [23] Gao J., Guo H., Wang X., Wang P., Wei Y., Wang Z., Huang Y., Yang B. Microwave deicing for asphalt mixture containing steel wool fibers. *Journal of Cleaner Production*, 2019, Volume 206, Pages 1110-1122, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.223>
- [24] Xu C., Wang K., Li K., Zong Y. Deicing Property of Asphalt Mixture Containing SteelWool Fiber by Electromagnetic Induction Heating. *Coatings*, 2021, 11, 1276. <https://doi.org/10.3390/coatings11111276>
- [25] Liu K., Fu C., Dai D., Jin C., Li W., Li S., Xu X. Induction heating performance of asphalt pavements incorporating electrically conductive and magnetically absorbing layers. *Construction and Building Materials*, 2019, Volume 229, 116805, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116805>
- [26] Liu Q., Chen C., Li B., Sun Y., Li H. Heating Characteristics and Induced Healing Efficiencies of Asphalt Mixture via Induction and Microwave Heating. *Materials (Basel)*. 2018, 11(6):913 doi:10.3390/ma11060913
- [27] Asfour S., Bernardin F., Tousseint E., Piau J.-M., Hydrothermal modeling of porous pavement for its surface de-freezing. *Applied Thermal Engineering*, 2016, Volume 107, Pages 493-500, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.138>
- [28] Lei G., Yu X., Li T., Habibzadeh-Bigdarvish O., Timothy Hurley M. Insulated PEX Pipe Loops for Deicing on Existing Bridge Deck using Geothermal Energy: Laboratory Tests, Modeling, and Performance Analyses. *Applied Thermal Engineering*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.118028>
- [29] Xiang B., Yuan Y., Ji Y., Cao X., Zhou J. Thermal and electrical performance of a novel photovoltaic-thermal road. *Solar Energy*, 2020, Volume 199, Pages 1-18, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.021>