

Na prawach rękopisu

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechniki Wrocławskiej

Raport serii PRE nr 7/2024

Praca doktorska

**Wpływ warunków
środowiskowych na technologię
wykonywania samoodładzających
nawierzchni drogowych
mgr inż. Agata Pasztetnik**

Słowa kluczowe:

mieszanki mineralno-asfaltowe,
właściwości termiczne,
nawierzchnie samoodładzające

Promotor: prof. dr hab. inż. Antoni Szydło

Promotor pomocniczy: dr inż. Łukasz Skotnicki

Opiekun pomocniczy: dr inż. Igor Ruttmar

Wrocław, wrzesień 2024

Autor:

mgr inż. Agata Pasztetnik

Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Katedra Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
tel. 71 320 23 45 tel./fax. 71 320 36 45

Raport został złożony w Redakcji Wydawnictw Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej 30.09.2024 r.

Lista odbiorców:

Recenzenci	3 egz.
Promotor	1 egz.
Promotor pomocniczy	1 egz.
Opiekun pomocniczy	1 egz.
Autor	1 egz.
Archiwum W-2	1 egz.

Szczególnie dziękuję mojemu promotorowi prof. dr hab. inż. Antoniemu Szydło za opiekę merytoryczną, wyrozumiałość oraz za wszystkie porady i wsparcie.

Dziękuję mojemu promotorowi pomocniczemu dr inż. Łukaszowi Skotnickiemu za pomoc oraz cenne wskazówki.

Dziękuję również mojemu opiekunowi pomocniczemu dr inż. Igorowi Ruttmarowi oraz wszystkim Koleżankom, Kolegom i Współpracownikom z firmy TPA Sp. z o.o., którzy poświęcali swój czas inspirując, dopingując i wspierając mnie.

Dziękuję mojemu mężowi Michałowi i Rodzinie za wsparcie.

SPIS TREŚCI:

WYKAZ OZNACZEŃ.....	8
1 WPROWADZENIE	11
2 CEL, ZAKRES ROZPRAWY, TEZA ROZPRAWY	12
2.1 Teza rozprawy.....	12
2.2 Cel rozprawy	12
2.3 Zakres rozprawy	12
3 ANALIZA STANU WIEDZY	14
3.1 Utrzymanie zimowe	14
3.1.1 Metody utrzymania zimowego.....	14
3.1.2 Wpływ zimowego utrzymania na środowisko, konstrukcję drogi oraz jej użytkowników.....	18
3.1.3 Zasady utrzymania zimowego w Polsce.....	20
3.2 Instalacje odladzania na świecie	22
3.2.1 Instalacje hydrauliczne	22
3.2.2 Rurki ciepła.....	26
3.2.3 Instalacje elektryczne	26
3.2.4 Inne instalacje / rozwiązania	27
3.3 Wymiana ciepła	27
3.4 Wydajność nawierzchni samoodladzających.....	31
3.4.1 Właściwości fizyczne mieszanek i ich wpływ na właściwości termiczne	31
3.4.2 Środki odladzające w składzie mieszanki.....	32
3.4.3 Projektowanie składu mieszanki polepszającego jej właściwości termiczne	32
3.4.4 Stosowanie materiałów zmiennofazowych (PCM) w mieszankach nawierzchniowych	40
3.5 Projekty badawcze o tematyce nawierzchni samoodladzających na świecie	42
3.6 Podsumowanie.....	44
4 METODY WYMIAROWANIA WARSTW KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI STOSOWANE W POLSCE.....	45
4.1 Wprowadzenie	45

4.2	Kryterium zmęczenia warstw asfaltowych według AASHTO 2004	46
4.3	Kryterium zmęczenia warstw asfaltowych w metodzie francuskiej	48
4.4	Podsumowanie.....	51
5	ANALIZA WARUNKÓW ŚRODOWISKOWYCH I LOKALIZACYJNYCH	51
5.1	Wprowadzenie	51
5.2	Warunki środowiskowe w Polsce.....	52
5.2.1	Dane meteorologiczne ze stacji pomiarowych	52
5.2.2	Zimowe strefy pogodowe w Polsce	77
5.2.3	Okresy czasowe gdy spełnione są warunki realizacji zadań utrzymania zimowego.....	80
5.2.4	Wnioski – warunki środowiskowe	85
5.3	Warunki lokalizacyjne – nasłonecznienie, dostępność sieci	86
5.3.1	Nasłonecznienie.....	86
5.3.2	Dostępność sieci gazowej.....	87
5.3.3	Warunki lokalizacyjne – podsumowanie	88
6	ANALIZA KOSZTOWA.....	89
6.1	Analiza kosztów utrzymania zimowego metodami standardowymi.....	89
6.2	Analiza kosztów wykonania instalacji – zwiększenie kosztu nawierzchni typowej	90
6.3	Porównanie kosztów instalacji ze standardowymi metodami	93
7	BADANIA LABORATORYJNE	93
7.1	Wprowadzenie	93
7.2	Badania laboratoryjne właściwości termicznych materiałów stosowanych w budownictwie nawierzchniowym w Polsce	94
7.2.1	Asfalty stosowane w Polsce.....	96
7.2.2	Mieszanki mineralno-asfaltowe stosowane powszechnie na kontraktach	97
7.2.3	Mieszanki z zastosowaniem dodatków	102
7.2.4	Wnioski z badań przewodności cieplnej	107
7.3	Badania laboratoryjne parametrów wytrzymałościowych mieszanek zalecanych do zastosowania w dedykowanym rozwiązaniu	108
7.4	Badania laboratoryjne działania instalacji na stanowisku pomiarowym	113

8	ANALIZA NUMERYCZNA.....	116
9	ROZWIĄZANIE DLA PRZEDSIĘBIORSTWA.....	128
10	PODSUMOWANIE, WNIOSKI KOŃCOWE I KIERUNKI ROZWOJU DALSZYCH BADAŃ	134
10.1	Podsumowanie.....	134
10.2	Wnioski końcowe.....	137
10.3	Kierunki rozwoju dalszych badań	138
	SPIS RYSUNKÓW.....	139
	SPIS TABEL	143
	BIBLIOGRAFIA.....	145
	STRESZCZENIE	155
	ABSTRACT	157

WYKAZ OZNACZEŃ

a – dyfuzyjność cieplna

AC – beton asfaltowy

AG – destrukcja asfaltowa

b – parametr nachylenia krzywej zmęczenia materiału w układzie współrzędnych $\log \varepsilon - \log N$

c – pojemność cieplna (ang. specific heat capacity)

C – współczynnik zależny od właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej

CaCl_2 – chlorek wapnia

DBM – bitumiczna mieszanka typu makadam o małej jamistości (ang. Dense Bitumen Macadam)

D – szkoda zmęczeniowa wywołana na spodzie lub górze warstw asfaltowych jako funkcja ilości spękań FC , wyrażona jako liczba, a nie procent

DSC – metoda różnicowej kalorymetrii skalingowej (ang. Differential Scanning Calorimetry)

δ – odchylenie standardowe łączące odchylenia standardowe: grubości warstw nawierzchni Sh i testów zmęczeniowych SN

E – moduł sprężystości warstwy

$E(10^\circ\text{C})$ – moduł mieszanki w temperaturze 10°C

$E(\theta)$ – moduł sprężystości w zadanej temperaturze θ

ε_6 – odkształcenie przy 1 mln obciążeń, zależne od rozpatrywanej mieszanki mineralno-asfaltowej

$\varepsilon_6(\theta)$ – odkształcenie rozciągające, przy którym z 50-proc. prawdopodobieństwem zachodzi zniszczenie próbki przy zginaniu po 10^6 cyklach, w zadanej temperaturze ekwiwalentnej θ

ε_a – odkształcenie rozciągające w spodzie ostatniej dolnej warstwy asfaltowej

ε_z – odkształcenie ściskające na powierzchni podłoża gruntowego

ε_t – odkształcenie rozciągające w krytycznym punkcie przekroju

$\varepsilon_{t,ad}$ – dopuszczalne poziome odkształcenie rozciągające, określane na dolnej powierzchni warstw asfaltowych

$\varepsilon(NE, \theta_{eq}, f)$ – odkształcenie rozciągające, dla którego z 50-proc. prawdopodobieństwem następuje zniszczenie zginanej próbki, otrzymane po NE cyklach obciążenia, w temperaturze ekwiwalentnej θ_{eq} , przy częstotliwości f charakterystycznej dla naprężeń występujących w rozważanej warstwie

FC_{bottom} – ilość spękań siatkowych (aligatorowych) typu „z dołu do góry”, wyrażona w procentach w stosunku do całej powierzchni pasa ruchu

FC_{top} – ilość spękań podłużnych, liniowych „z góry na dół”, w metrach bieżących na 1 kilometr długości jednego pasa ruchu

$\varepsilon_6(\theta_{eq}, f)$ – odkształcenie rozciągające, przy którym z 50-proc. prawdopodobieństwem zachodzi zniszczenie próbki przy zginaniu po 10^6 cyklach, w zadanej temperaturze ekwiwalentnej θ_{eq} oraz dla zadanej częstotliwości f

h_{ac} – grubość pakietu warstw asfaltowych w konstrukcji nawierzchni [cm],

HFM – przepływomierz ciepła (eng. Heat Flow Meter)

k – współczynnik przewodności cieplnej, (eng. thermal conductivity)

k_1, k_2, k_3 – współczynniki regresji

k'_1 – parametr zależny od grubości warstw asfaltowych i charakteru ich pracy, odpowiednio stosuje się wzory

k_c – współczynnik materiału

k_r – współczynnik ryzyka

k_s – współczynnik podłoża

LFA – laserowa metoda impulsowa, (eng. Laser Flash Analysis)

m_0 – temperatura otoczenia podczas ogrzewania

m_2 – szybkość dryftu temperatury

m_3 – nachylenie linii stosunku wzrostu temperatury do logarytmu temperatury

MA5, MA8, MA11 – asfalt lany o największym ziarnie D równym kolejno 5, 8 oraz 11 mm

$MgCl_2$ – chlorek magnezu

MMA – Mieszanka mineralno-asfaltowa

MMA (DG) – Mieszanka mineralno-asfaltowa o małej jamistości

MTDSC – modyfikacja metody różnicowej kalorymetrii skalingowej (eng. Modulated Temperature Differential Scanning Calorimetry)

MTPS – zmodyfikowana metoda gorącego dysku (eng. Modified Transient Plane Source Method)

NaCl – chlorek sodu

NE – liczba osi obliczeniowych

PE – polietylen

PEX – polietylen sieciowany

q – zadane ciepło

RA – destrukta asfaltowy

SMA – mieszanka mastyksowo-grysowa

Sh – odchylenie standardowe grubości nawierzchni

SN – odchylenie standardowe prób zmęczeniowych

t – czas

t_h – czas grzania

THS – metoda analityczna określenia nieustalonego przewodzenia ciepła wokół nieskończenie długiego źródła powierzchniowego (eng. Transient Hot Strip)

TLS – metoda pomiarowa przewodności cieplnej (eng. Transient Line Source)

T_{naw} – temperatura nawierzchni

T_{pow} – temperatura powietrza

TPS – metoda gorącego dysku (eng. Transient Plane Source)

u – losowa wariancja rozkładu normalnego związanego z przyjętym ryzykiem r

v – współczynnik Poissona

V_a – zawartość objętościowa wolnej przestrzeni [%, objętościowo]

V_b – objętościowa zawartość asfaltu [%, objętościowo]

VMA – przestrzenie w mieszance mineralnej

1 WPROWADZENIE

Problem utrzymania zimowego dróg to problem powszechny, któremu zarządcy dróg stawiają czoła każdego roku. Specyfika polskiego klimatu sprzyja zmianom warunków atmosferycznych – pojawienie się mżawki lub opadów śniegu – powodujących paraliż na drogach. W dużej części kraju w okresie zimowym temperatury ujemne nie utrzymują się stale, w całym okresie zimy, lecz pojawiają się nagle, a po paru dniach lub nawet godzinach ustępują temperaturom dodatnim. Skutkuje to koniecznością natychmiastowej reakcji służb zarządzających drogami, aby w jak najszybszym czasie doprowadzić stan nawierzchni do warunków pozwalających na bezpieczne użytkowanie drogi [1]. Stosowane powszechnie środki odladzające przyczyniają się do degradacji nawierzchni, obniżenia ich trwałości, a co więcej, mają negatywny wpływ na środowisko, ponieważ dostają się do wód powierzchniowych, podziemnych oraz przydrożnych gruntów. Zawarte w nich sole mają między innymi wpływ na wzrost zasolenia wód znajdujących się w pobliżu dróg, obniżają populacje niektórych gatunków roślin oraz zwierząt, oraz przyczyniają się do korozji elementów samochodu. Rozwój transportu i towarzyszącej mu infrastruktury w ostatnich latach oddziałuje na zwiększenie zapotrzebowania na stosowanie środków służących odladzaniu nawierzchni [2].

Alternatywą dla stosowanych powszechnie środków chemicznych jest budowanie nawierzchni samoodladzających, czyli takich, które w swojej konstrukcji zawierają instalację grzewczą. Takie rozwiązania były niejednokrotnie testowane i stosowane w wielu lokalizacjach na świecie, ale wciąż nie stały się tradycyjną metodą utrzymania zimowego, lecz jedynie ciekawostką.

Niniejsza praca wykonywana jest w formie doktoratu wdrożeniowego. Odbyna się we współpracy z firmą TPA Sp. z o.o., która wchodzi w skład koncernu STRABAG. Celem jest stworzenie zaleceń do wykonywania takich nawierzchni, aby zwiększyć popularność takiego rozwiązania poprzez włączenie go do oferty przedsiębiorstwa jako rozwiązania przyjaznego środowisku.

Przedstawia aktualnie stosowane metody utrzymania zimowego oraz analizę możliwości zastosowania rozwiązań przyjaznych środowisku – nawierzchni samoodladzających. Opisane są badania właściwości termicznych mieszanek i ich składników oraz sprawdzenie możliwości doboru składu tak, aby zwiększyć wydajność projektowanych rozwiązań. Dodatkowo dobór technologii odladzającej zależny będzie od warunków środowiskowych i dostępności sieci w potencjalnych miejscach zastosowania technologii.

Badania laboratoryjne oraz płynące z nich wnioski uzupełniono analizą numeryczną rozkładu temperatur w wyniku działania instalacji grzewczej umieszczonej w konstrukcji nawierzchni drogowej.

2 CEL, ZAKRES ROZPRAWY, TEZA ROZPRAWY

2.1 Teza rozprawy

Zastosowanie technologii nawierzchni samoodladzających może stanowić alternatywę dla tradycyjnie stosowanych rozwiązań radzenia sobie ze śliskością zimową, szczególnie w miejscach niebezpiecznych. Wybór technologii zależy od warunków środowiskowych i lokalizacji, a efektywność prawidłowo zastosowanej technologii zależy od składu mieszanki mineralno-asfaltowej.

2.2 Cel rozprawy

Głównym celem rozprawy jest opracowanie rozwiązania nawierzchni samoodladzających wraz z zaleceniami do jego stosowania, które włączone zostanie do oferty przedsiębiorstwa.

W rozprawie sformułowano również następujące cele szczegółowe:

- Analiza warunków środowiskowych i lokalizacyjnych na terenie Polski
- Analiza właściwości termicznych mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych w nawierzchniach drogowych
- Analiza działania systemów hybrydowych – ocena wpływu rozwiązania materiałowego na wydajność instalacji grzewczej
- Opracowanie zaleceń dotyczących wyboru mieszanek mineralno-asfaltowych do zastosowania w nawierzchniach samoodladzających w Polsce
- Opracowanie zaleceń ułatwiających wybór najlepszego rozwiązania, w zależności od warunków środowiskowych oraz dostępności źródeł zasilania i technologii wykonania nawierzchni

2.3 Zakres rozprawy

Praca składa się z 10 rozdziałów.

W rozdziale 3 zamieszczono analizę stanu wiedzy, w tym:

- Utrzymanie zimowe;
- Instalacje odladzania na świecie;
- Wymiana ciepła – podstawy teoretyczne;
- Wydajność nawierzchni samoodladzających;
- Projekty badawcze o tematyce nawierzchni samoodladzających na świecie.

W rozdziale 4 opisano metody wymiarowania warstw konstrukcji nawierzchni stosowane w Polsce.

W rozdziale 5 zamieszczono analizę warunków środowiskowo-lokalizacyjnych, która podzielona została na część dotyczącą warunków środowiskowych w Polsce oraz warunków lokalizacyjnych (nasłonecznienia, dostępności sieci). Analizę warunków

środowiskowych oparto na danych meteorologicznych dla 14 stacji pomiarowych w Polsce. Przeanalizowano rozkład roczny temperatury powietrza w lokalizacjach oraz rozkład dobowy (uśredniony dla okresu miesiąca) temperatur w obrębie nawierzchni drogi dla następujących miesięcy: grudzień, styczeń, luty oraz marzec. Na podstawie analizowanych danych zaproponowano podział Polski na 4 strefy ze względu na występowanie temperatur niedodatnich. Dodatkowo analizę uzupełniono o dostępność sieci zasilania na terenie Polski.

W rozdziale 6 przeprowadzono uproszczoną analizę kosztową utrzymania zimowego przy zastosowaniu metod standardowych oraz porównano ją z analizą kosztów wykonania i eksploatacji instalacji grzewczej.

W rozdziale 7 opisano wykonane badania laboratoryjne, w tym:

- Badania laboratoryjne właściwości termicznych materiałów stosowanych w budownictwie nawierzchniowym w Polsce;
- Badania laboratoryjne parametrów wytrzymałościowych mieszanek zalecanych do zastosowania w dedykowanym rozwiązaniu;
- Badania laboratoryjne działania instalacji na stanowisku pomiarowym.

Badania właściwości termicznych, a dokładniej współczynnika przewodności cieplnej realizowano dla wybranych mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych w Polsce. Mieszanki były różnego typu, oparte były na różnych asfaltach oraz różnym kruszywie, przeważającym w składzie mieszanki mineralno-asfaltowej. Dodatkowo poszerzono je o badania mieszanek, w których jako wypełniacz zastosowano grafit oraz o mieszanki z dodatkiem włókien stalowych.

Dla mieszanek z zastosowaniem grafitu dodatkowo wykonano badania parametrów wytrzymałościowych według wymagań stawianych mieszankom typowym.

Jako uzupełnienie powyższych badań opracowano laboratoryjne stanowisko badawcze dla określenia właściwości termicznych całej instalacji.

W rozdziale 8 przedstawiono analizę numeryczną konstrukcji nawierzchni samoodładzającej, której celem było potwierdzenie wstępnych wyników uzyskanych w badaniach laboratoryjnych oraz ich uzupełnienie.

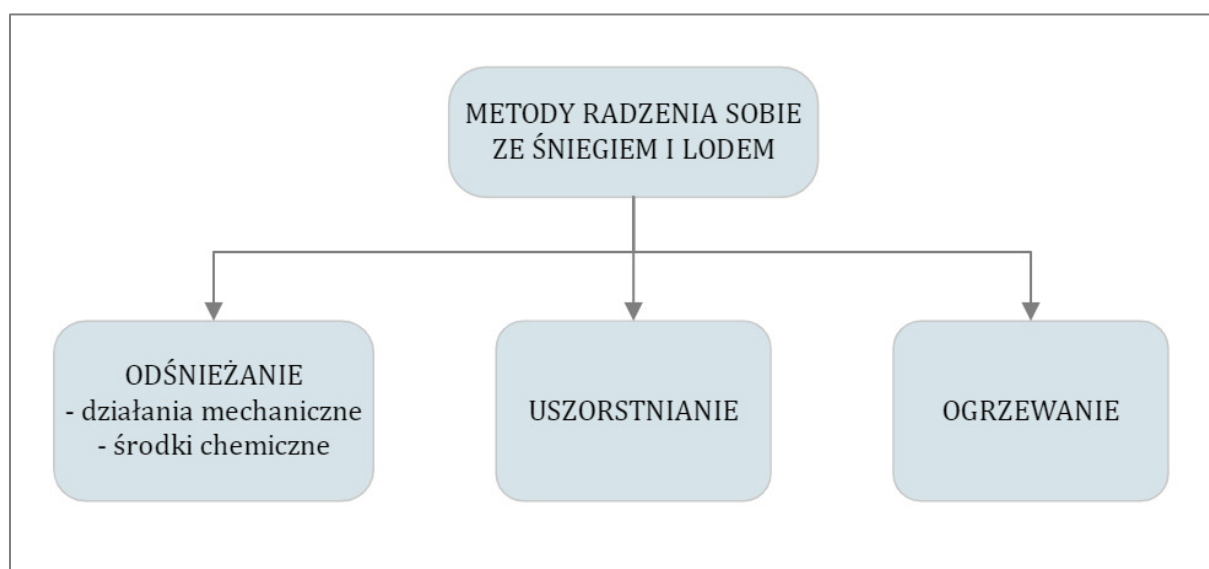
W rozdziale 9 zamieszczono opis rozwiązania dla przedsiębiorstwa.

Rozdział 10 zawiera podsumowanie, wnioski końcowe oraz wskazanie kierunków dalszych prac badawczych.

3 ANALIZA STANU WIEDZY

3.1 Utrzymanie zimowe

Problem odladzania nawierzchni drogowych oraz nawierzchni na lotniskach jest tematem powszechnym w każdym miejscu na świecie, w którym występują niskie temperatury ale również częste przejścia temperatury przez zero. Najpopularniejsze metody radzenia sobie z utrzymaniem nawierzchni w sezonie zimowym zostały schematycznie przedstawione na rys. 1 – są to odśnieżanie oraz uszorstnianie, rzadziej ogrzewanie.



Rys. 1 Metody radzenia sobie ze śniegiem i lodem

3.1.1 Metody utrzymania zimowego

Odśnieżanie polega na mechanicznym usunięciu świeżego śniegu, najczęściej za pomocą specjalistycznych maszyn, oraz usunięciu jego pozostałości za pomocą środków chemicznych. W Polsce stosuje się następujące środki chemiczne: chlorki (sodu, wapnia, magnezu oraz ich mieszanek) oraz octany (wapniowo-magnezowy, potasu), mocznik, mrówczany, alkohole i glikole [3]. Ze względów ekonomicznych, najczęściej stosowane są jednak chlorki. Występują również środki zawierające substancję organiczną z octanem potasu jako substancją czynną, cechują się one niskim wpływem na korozję, aczkolwiek stosowane są najczęściej na lotniskach, gdzie można pozwolić sobie na wyższe koszty [4].

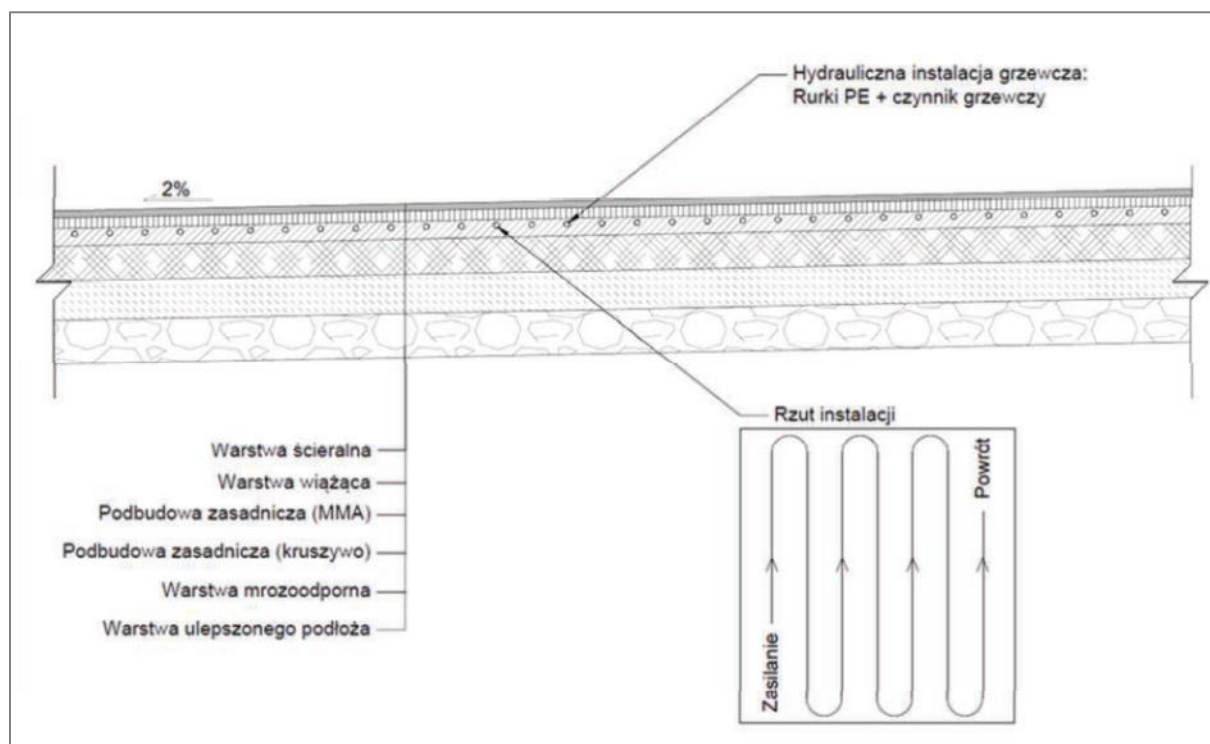
Uszorstnianie natomiast jest działaniem zakładającym pokrycie (posypanie) nawierzchni materiałem uszorstniającym, np. piaskiem, żwirem, solą drogową lub solanką. Materiały uszorstniające zwiększają przyczepność kół do nawierzchni. Obie te metody stosowane są najczęściej razem, z zaznaczeniem, że uszorstnienie następuje po procesie odśnieżenia, jeśli jest on konieczny [5].

Alternatywą dla chemicznego i mechanicznego odladzania mogą być ogrzewane nawierzchnie samoodladające. Działanie systemów samoodladających może polegać

zarówno na zapobieganiu wytwarzania się warstwy lodu i śniegu, jak i likwidowaniu takiej warstwy dopiero gdy zacznie się ona formować.

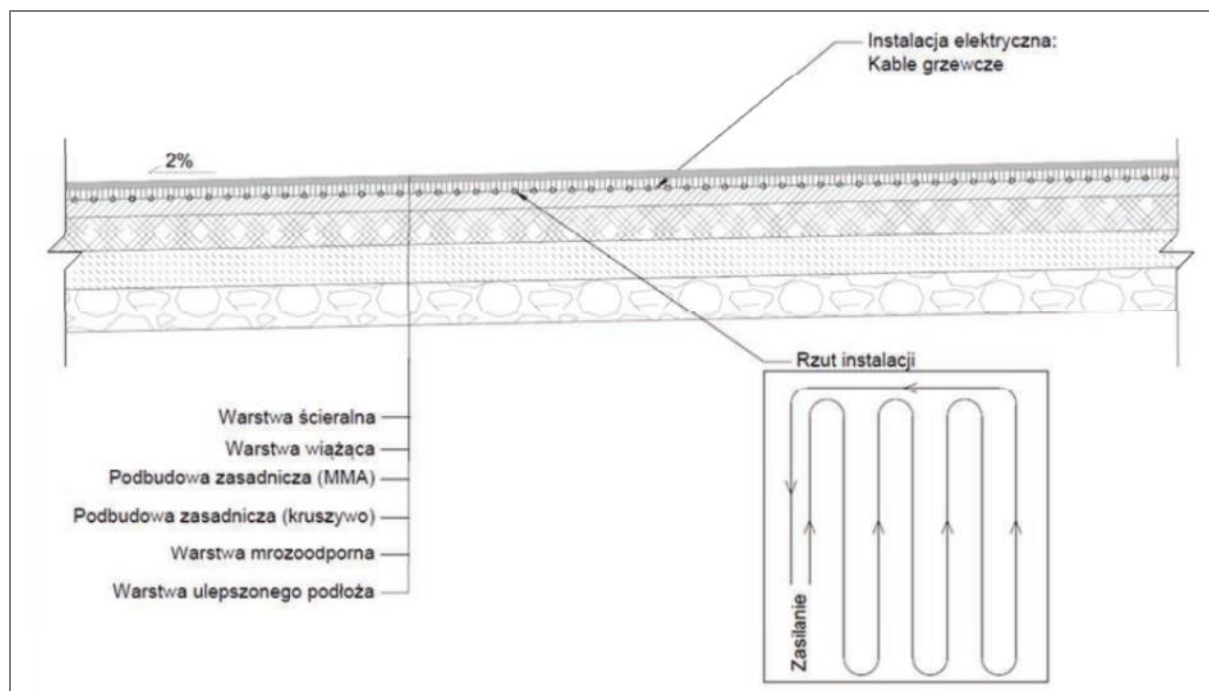
Wyróżnia się głównie instalacje hydrauliczne oraz elektryczne, a także mniej popularne ogrzewanie mikrofalami oraz indukcyjne. Instalacja może być zasilana elektrycznie, gazem lub energią geotermalną. Zasilanie odbywać może się za pomocą np. pompy ciepła, kolektorów słonecznych, rurek ciepła oraz ze studni geotermalnej.

Ogrzewanie w systemie hydraulicznym odbywa się za pośrednictwem płynu przepływającego w rurkach stanowiących element konstrukcji nawierzchni. Płynem najczęściej jest mieszanina glikolu z wodą. W przeszłości stosowano głównie rury z miedzi, stali lub żelaza. Aktualnie w związku z podatnością rur stalowych oraz żeliwnych na korozję, częściej używa się rury plastikowe, np. typu PEX [6]. W przypadku stosowania rur miedzianych, najczęściej są to rury miękkie, z otuliną PEX. Przykładowy schemat został przedstawiony na rys. 2.



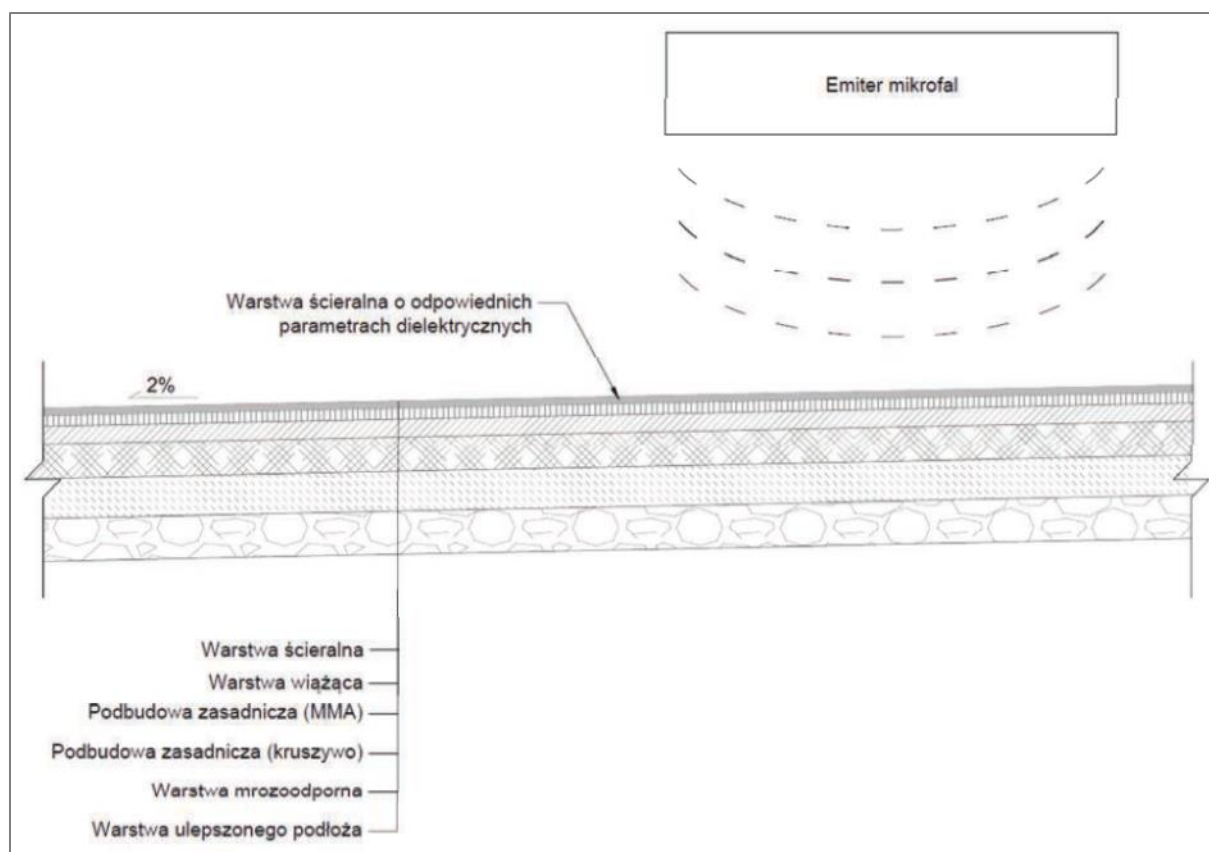
Rys. 2 Przykładowy przekrój konstrukcji nawierzchni ogrzewanej hydraulicznie [7]

W instalacji elektrycznej elementem grzewczym są natomiast kable, które występują zarówno w formie tradycyjnych kabli, jak i gotowych mat grzewczych, których rozkładanie jest znacznie ułatwione. Przykładowy schemat został przedstawiony na rys. 3.



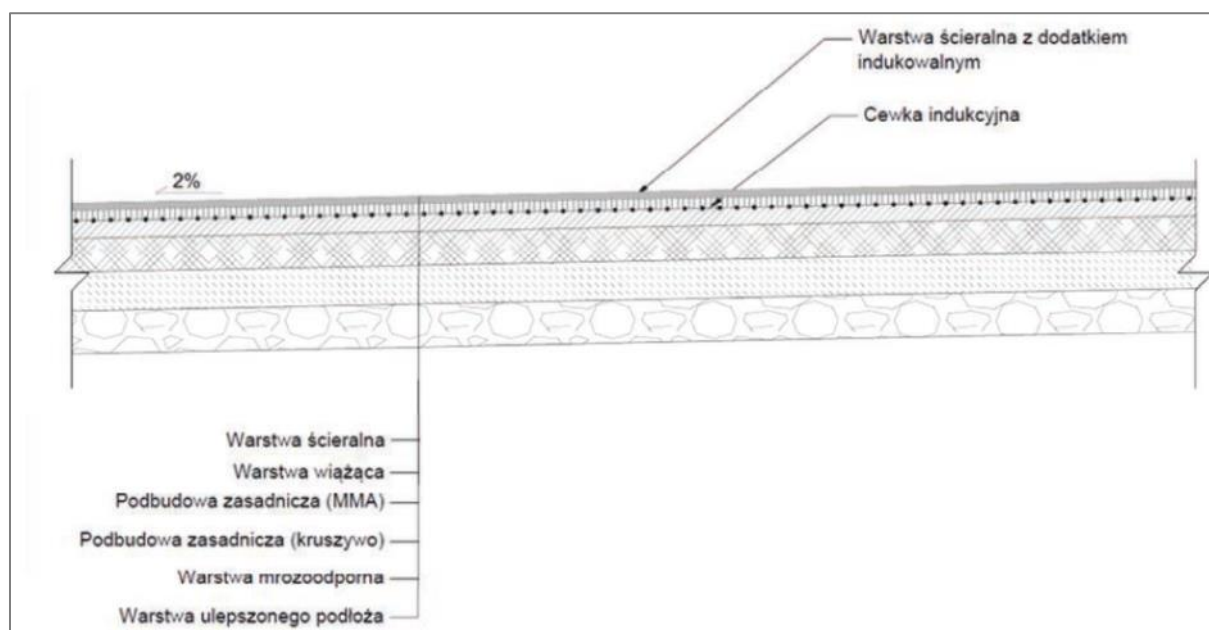
Rys. 3 Przykładowy przekrój konstrukcji nawierzchni ogrzewanej elektrycznie [7]

Ogrzewanie mikrofalowe można określić jako bezpośrednią konwersję energii w materiale podczas procesu ogrzewania. Właściwości dielektryczne materiałów opisują zdolność materiału do pochłaniania energii z mikrofal. Ruch dipola, czyli cząsteczki wody zmienia się w zależności od stanu skupienia. Dla wody w stanie ciekłym ruch ten występuje na częstotliwościach GHz (mikrofal), ale już dla lodu zachodzi na częstotliwości kHz (długich falach radiowych). Wynikiem tego jest fakt, że ogrzewanie mikrofalowe zadziała bardzo dobrze na wodę powstałą z roztopiającego się lodu, ale nie zadziała bezpośrednio na lód [7], [8]. Przykładowy schemat został przedstawiony na rys. 4.



Rys. 4 Przykładowy przekrój konstrukcji nawierzchni ogrzewanej mikrofalami [7]

Ogrzewanie indukcyjne jest procesem ogrzewania elektrycznie przewodzącego elementu poprzez indukcję elektromagnetyczną. Jej częstotliwość działania zawiera się w przedziale 1 kHz – 1 MHz [8]. Zarówno śnieg, lód, jak i standardowa mieszanka nie są takimi materiałami. Rozwiązaniem jest dodanie do mieszanki nawierzchniowej elementów przewodzących prąd, które pod wpływem indukcji nagrzeją się i roztopią warstwę śniegu lub lodu [7]. Przykładowy schemat został przedstawiony na rys. 5.



Rys. 5 Przykładowy przekrój konstrukcji nawierzchni ogrzewanej indukcyjnie [7]

3.1.2 Wpływ zimowego utrzymania na środowisko, konstrukcję drogi oraz jej użytkowników

Zagadnienie wpływu na środowisko materiałów stosowanych w procesie utrzymania zimowego jest tematem badanym od wielu lat. W obszernym opracowaniu Western Transportation Institute – centrum badań i edukacji w zakresie transportu [9], autorzy opisują wpływ soli opartych na chlorkach oraz octanach na otoczenie. Zastosowane środki chemiczne mogą rozproszyć się w powietrzu wpływając na pogorszenie jakości powietrza, jakości wody oraz osiąść na florze lądowej lub wodnej, lub spływać powodując zanieczyszczenie drogi, wód, jakości gruntów oraz zatruć organizmy żywe środowiska lądowego i wodnego. Aplikowane środki mogą się dostać do środowiska w różnoraki sposób – sole po wyschnięciu na drodze zostają rozwiane przez poruszające się samochody i przeniesione z wiatrem na okoliczne rośliny, grunty, ciekły wodne, płynne środki spływają nawierzchnią, drenażem lub przesiąkają przez grunty i wpływają na roślinność, florę i faunę. Gdy środki te są aplikowane w formie spryskania, poza drogą często spryskane zostają także otaczające drogę rośliny. Poprzez gleby średnio lub dobrze przepuszczalne środki dostają się do wód gruntowych, skąd dostają się do zbiorników wodnych i korzeni roślin. W glebach słabo przepuszczalnych sól akumuluje się w górnej warstwie gruntu powodując erozję, uszkodzenia gruntów oraz pobliską roślinność. Dostające się do wód jony mogą powodować zwiększenie twardości wody, przyczyniać się do powstawania stref beztlenowych na głębokości. Liście w wyniku kontaktu z chlorem żółkną, brązowieją oraz ulegają procesom starzenia (rys. 6), chlorki magnezu oraz wapnia powodują zahamowanie wzrostu roślin, spalenie liści, a nawet zamierania rośliny. Schemat oddziaływania środków samoodladzających na środowisko został przedstawiony na rys. 7.

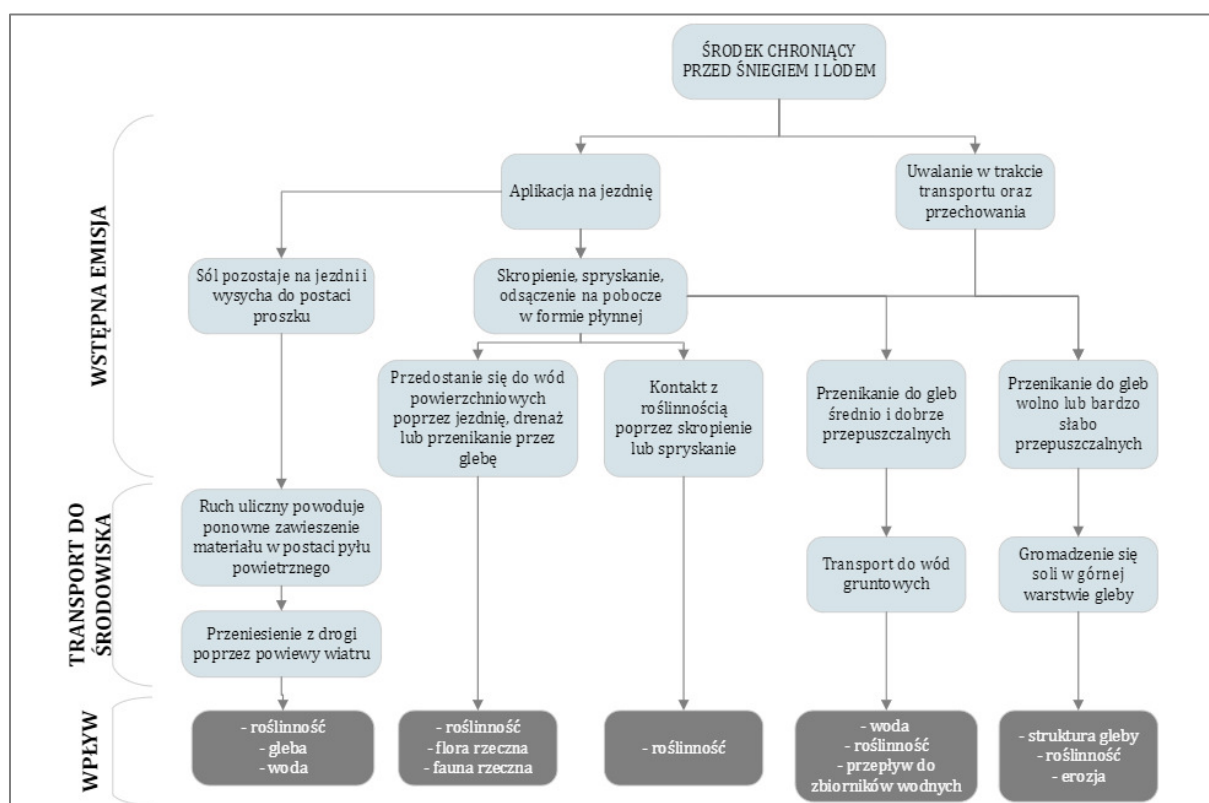
Co więcej, w miejscach, w których stosuje się środki odladzające oparte na chlorkach występuje zwiększone ryzyko wypadków drogowych z udziałem zwierząt.

Wpływ stosowania chemicznych środków odladzających (także długofalowy) został niejednokrotnie zauważony oraz zbadany przez badaczy z całego świata [4], [10] [[11], [12], [13], [14], [15]. Niestety we wszystkich opracowaniach potwierdzany jest wzrost stężenia chloru w wodach powierzchniowych [16], [17].



Photo by Janna Beckerman

Rys. 6 Liście dębu z charakterystycznymi oznakami ekstremalnego uszkodzenia przez sól [18]



Rys. 7 Oddziaływanie środków odladzających na środowisko – przetłumaczona grafika pochodząca z [9]

Jednym z regionów, w którym alternatywnie do środków chemicznych stosowane są środki uszorstniające jest Ameryka Północna ale i Austria. Są one używane głównie na drogach o mniejszym obciążeniu ruchem. Aby osiągnęły ten sam poziom skuteczności jak

środki odladzające, musiałyby być stosowane w olbrzymich ilościach, co z kolei miałyoby gorszy skutek dla środowiska niż stosowane środki chemiczne [19].

Co więcej, stosowane w procesie utrzymania zimowego chlorki wpływają niszcząco na nawierzchnie betonowe, stalowe elementy konstrukcji oraz pojazdy samochodowe. Octany posiadają w większości podobny wpływ korozyjny i niszczący, jednak w niższym stopniu niż chlorki [9].

Środki chemiczne wpływają na degradację zarówno kruszywa, jak i mieszanek mineralno-asfaltowych. Niszczące skutki występowania mrozu były wyższe w przypadku procesu zamrażania-rozmrażania w obecności środków odladzających niż w przypadku samej wody [20]. Inni autorzy badali wpływ soli na wynik badania zmęczenia i rezultaty pokazały, że jest on znaczący i może wynosić nawet ok. 20% oraz jest zależny od składu mieszanki [21].

Procesowi chemicznego odladzania w przypadku silnych opadów śniegu towarzyszy odśnieżanie mechaniczne. Nieumiejętna obsługa pługów, zastosowanie złych kątów pochylenia lub niewłaściwego rodzaju lemiesza może prowadzić do naruszenia warstwy ścieralnej oraz uszkodzeń nawierzchni drogowej.

3.1.3 Zasady utrzymania zimowego w Polsce

Jedne z zasad utrzymania zimowego w Polsce opisane są w wytycznych Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad [3]. Przedstawiono w nich opis zimowego stanu dróg oraz opisano warunki, w których należy stosować środki ochrony przed śniegiem oraz oblodzeniem, oraz ich zalecane ilości. Dokument uwzględnia specyfikę polskiego klimatu i opisuje zjawiska występujące na terenie kraju.

Zarządzenie opisuje problem śliskiej nawierzchni w okresie zimowym i określa, że powodowany jest on wystąpieniem następujących zjawisk:

- gołoledzi, czyli warstwy lodu grubości do 1,0 mm, powstającej na skutek opadu mgły roszącej, mżawki lub deszczu na nawierzchnię o ujemnej temperaturze. Przyjmuje się, że aby zjawisko to wystąpiło, muszą wystąpić równocześnie trzy warunki:
 - Ujemna temperatura nawierzchni $T_{naw} < 0$
 - Temperatura powietrza w następującym przedziale: $-6^{\circ}\text{C} \leq T_{pow} \leq 1^{\circ}\text{C}$
 - Względna wilgotność powietrza $w > 85\%$
- lodowicy, czyli warstwy lodu o grubości nawet do kilku centymetrów, powstałej jako zamarznięcie wody nieusuniętej z nawierzchni, która pochodzi ze stopnienia lodu, śniegu lub opadu deszczu. Powstaje gdy po odwilży lub opadzie deszczu temperatura spadnie poniżej 0°C

- szronu, czyli osadu lodu, który tworzy się w procesie bezpośredniej kondensacji pary wodnej z powietrza przy temperaturze poniżej 0°C
- szadzi, czyli osadu atmosferycznego utworzonego z ziarenek lodu rozdzielonych pęcherzykami powietrza, który powstaje w wyniku zamarznięcia mgły lub chmury, gdy temperatura wyziębionych powierzchni jest niższa lub nieznacznie wyższa od 0°C.

Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad podaje następujące materiały chemiczne do stosowania w utrzymaniu zimowym

- sól kamienna sucha (chlorek sodu NaCl)
- Solanka (roztwór NaCl lub CaCl₂ o stężeniu 20-25%)
- sól zwilżona – mieszanina 30% solanki z 70% suchej soli NaCl
- chlorek wapnia techniczny (77-80% CaCl₂)
- chlorek magnezu MgCl₂
- mieszaniny NaCl z CaCl₂ lub z MgCl₂ w stosunku wagowym:
 - 4:1 – 80% NaCl oraz 20% CaCl₂
 - 3:1 – 75% NaCl oraz 25% CaCl₂
 - 2:1 – 67% NaCl oraz 33% CaCl₂

Wytyczne podają ilości środków stosowanych do utrzymania zimowego (tab. 1). Ilości zależne są od występującej temperatury. Przedziały podane są dla temperatur: do -2°C, od -3°C do -6°C, od -7°C do -10°C oraz poniżej -10°C.

Materiały uszorstniające stosowane w Polsce to kruszywo, zarówno naturalne, jak i sztuczne, łamane lub niełamane, drobne lub o ciągłym uziarnieniu do $D \leq 4$ mm.

Tab. 1 Wydatki jednostkowe materiałów chemicznych do posypywania zapobiegawczego oraz likwidacji cienkich warstw lodu i śniegu [3]

Lp.	Rodzaj działalności i stan nawierzchni	Temperatura [°C]	NaCl (sól) sucha lub zwilżona [g/m ²]	Mieszaniny NaCl z CaCl ₂ w proporcji od 4:1 do 3:1 [g/m ²]	Mieszaniny NaCl z CaCl ₂ w proporcji 2:1 [g/m ²]	Materiały uszorstniające [g/m ²]
1	2	3	4	5	6	7
1	Zapobieganie powstaniu: - gołoledzi, - lodowicy, - szronu	do -2	do 15	-	-	-
		-3 ÷ -6	15-20	-	-	
		-7 ÷ -10	20-30	do 15	-	
		< -10	-	15 – 20	-	
2	Zapobieganie przymarzaniu śniegu do nawierzchni	do -2	do 10	-	-	-
		-3 ÷ -6	10-15	-	-	
		-7 ÷ -10	15 – 20	do 15	-	
		< -10	-	15 – 20	-	
3	Likwidacja: - gołoledzi, - szronu, - cienkich warstw ubitego lub zlodowaciałego śniegu, - pozostałości świeżego opadu śniegu po przejściach pługów	do -2	do 20	-	-	60 -150
		-3 ÷ -6	20 – 25	-	-	
		-7 ÷ -10	25 – 30	do 20	-	
		< -10	-	20 – 30	ok. 25	

3.2 Instalacje odladzania na świecie

Tematyka instalacji odladzania nawierzchni nie jest nowa, od wielu lat badacze z uniwersytetów i firm na całym świecie starają się rozwiązać problem występowania śniegu oraz lodu na chodnikach, drogach oraz lotniskach.

3.2.1 Instalacje hydrauliczne

Nawierzchnia samoodladzająca, która została udokumentowana jako pierwsza, wykonana została w Klamath Falls, w stanie Oregon (USA) w 1948 r. Odcinek testowy o długości ok. 130 m zlokalizowany na wlocie skrzyżowania został wykonany ze względu na występujące w tym miejscu 8% nachylenie drogi. Instalacja składała się z żelaznych rur umieszczonych ok. 7.5 cm poniżej powierzchni nawierzchni betonowej. Podłączona została do studni geotermalnej, a jako płyn krążący w systemie grzewczym zastosowano mieszaninę glikolu i wody w stosunku 50%:50% [6]. Ze względu na silną korozję instalacji, niemalże po 50 latach użytkowania system wymagał zrekonstruowania, w tym samym czasie remontu wymagała już konstrukcja drogi. W trakcie remontu zastosowano bardziej wytrzymałe rury PEX z mieszaniną wody i glikolu ogrzewanego przez wymiennik płytowy zasilany wodą geotermalną o temperaturze 60°C, powracającą z sieci ciepłowniczej. Temperatura roztworu glikolu wynosiła od 38°C do 54°C, natomiast temperaturę nawierzchni utrzymywano na poziomie 3,5°C [22].

Podobną nawierzchnię wykonano w Sapporo, w Japonii. Wodę pochodzącą ze Spa Jozankei zaczęto stosować do odsnieżania już w 1966 r. Początkowo do konstrukcji

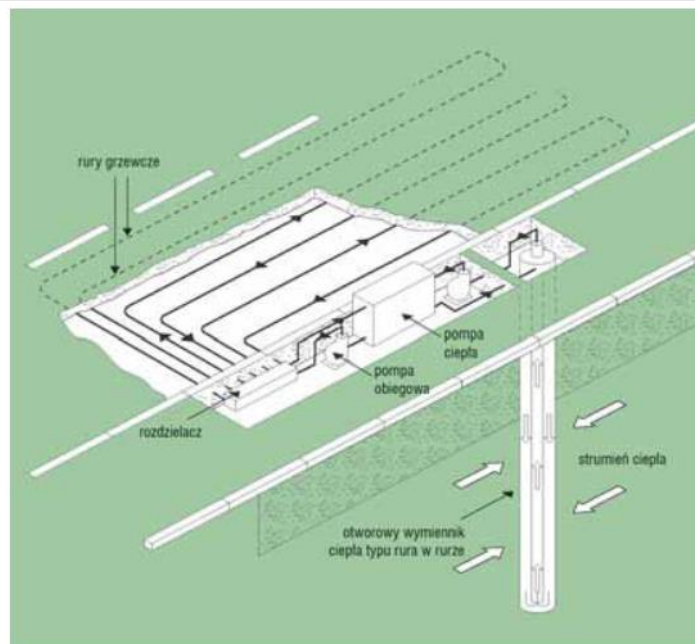
używano rur stalowych, ale w związku z problemem korozji zostały one zastąpione rurami z polibutenu w 1973 r. [6].

Energię geotermalną można również wykorzystać w niestandardowy sposób. W mieście Fukui w północnej Japonii woda gruntowa o temperaturze niepełna 16°C przepływa przez wymienniki ciepła zainstalowane w chodniku, temperatura spada do 7°C , i po ogrzaniu chodnika spryskuje nawierzchnię drogi. System jest sterowany automatycznie za pomocą czujników śniegu [6].

Na Islandii energia geotermalna jest głównym źródłem energii na wyspie. W ostatnich latach zastosowanie energii geotermalnej do ogrzewania chodników i dróg stopniowo wzrastało. W 2019 r. większość nowych budynków w rejonach energii geotermalnej posiada systemy odładzania. Ilość powierzchni ogrzewanej w 2018 r. to ok. 1,2 mln m^2 . Woda powracająca z domów, o temperaturze ok. 35°C stosowana jest do ogrzewania chodników i miejsc parkingowych. Większość działających systemów posiada możliwość dodania wody z ogrzewania miejskiego o temp. 80°C , gdy obciążenie śniegiem jest większe [23].

W Argentynie, w rejonie term Copahue-Caviahue na stokach Andów drogi i ulice odładane są za pomocą pary wodnej produkowanej ze studni geotermalnej o głębokości 1400 m, której produkcja pary wodnej wynosi 30 t/h. Para wodna transportowana jest rurociągiem o długości ok. 2600 m i przyczynia się do ogrzewania nawierzchni z pomocą radiacji [6].

Nie zawsze jednak występuje możliwość zastosowania studni geotermalnej, rozwiązania trzeba dostosować do dostępnych zasobów w miejscach inwestycji. W Japonii w 1995 r., w miejscowości Ninohe na niebezpiecznym łuku poziomym o nachyleniu 9% zainstalowano system topnienia śniegu Gaia (rys. 8). System tworzą następujące elementy: rury wbudowane w nawierzchni poniżej 10 cm od jej powierzchni, w odstępach 20 cm, pompy ciepła oraz otworowe wymienniki ciepła. Latem temperatura z rozgrzanej nawierzchni jest pobierana i transportowana do wymienników ciepła [24], [25]. W miejscowości Amori, w której w latach 1990-2003 średnia roczna wysokość opadów śniegu wynosiła 765 cm, w 2002 r. zainstalowano system Gaia celem ogrzewania chodników o powierzchni 659 m^2 (rys. 9). Był podzielony na dwa odcinki, składające się z 4 wymienników ciepła o głębokości 151,4 m, pompy ciepła oraz pompy cyrkulacyjnej. Instalacja umieszczona była w warstwie betonu, która przykryta była warstwą z mieszanki mineralno-asfaltowej. Jako składnik mieszanki mineralno-asfaltowej zastosowano kwarcyt w celu zwiększenia przenoszenia ciepła w górę nawierzchni oraz ograniczenia strat ciepła w dół. W pierwszych dwóch latach użytkowania, rzeczywisty strumień ciepła wyniósł średnio 200 W/m^2 [26].



Rys. 8 Szkic poglądowy wodnej instalacji topnienia śniegu zasilanej gruntowym wymiennikiem ciepła typu rura w rurze – system Gaia, Japonia [24]



Rys. 9 Instalacja topnienia śniegu na chodniku w miejscowości Aomori, Japonia [26]

Analizowane zagadnienie było również tematyką szwajcarskiego projektu SERSO, zakładającego gromadzenie w zbiornikach podziemnych energii cieplnej z nawierzchni asfaltowej, rozgrzewanej w okresie letnim, a następnie wykorzystywanie jej do ogrzewania drogi zimą. System zakładał wykonanie instalacji w nawierzchni drogi na powierzchni ok. 1300 m², podziemnego wymiennika ciepła składającego się z 91

pionowych otworów na głębokość 65 m oraz systemu hydraulicznego składającego się z przewodów łączących most oraz zbiornik cieplny, pomp, zaworów oraz zbiorników mieszających [6].

Ta sama idea została wykorzystana w 2005 r. w Niemczech na peronach na stacji Harz. Peron o długości 200 m ogrzewany był ciepłem gromadzonym w 9 otworowych wymiennikach ciepła o długości 200 m każdy [27].

W miejscowości Fukui w 2006 r. wykonano (podobnie jak w Szwajcarii) konstrukcję służącą do przechowywania ciepła zgromadzonego latem. Wymiana mostu Saiwai na rzece Asuwa zakładała zastosowanie systemu do topnienia śniegu i lodu. W związku z przewidywaniami wysokich kosztów związanych ze stosowaniem sprzętu elektrycznego, będącego dotychczas najpopularniejszym rozwiązaniem w tym rejonie, oraz dodatkowego pompowania wód gruntowych została opracowana nowa metoda gromadzenia ciepła z okresu letniego. Zakładała ona wbicie dużej ilości pali z wymiennikiem ciepła w brzegu rzeki. System składa się z rur grzewczych umieszczonych w nawierzchni mostu oraz 378 pali połączonych za pomocą pompy cyrkulacyjnej, która w okresie letnim pracuje w sposób automatyczny przenosiła ciepło z nagrzaną nawierzchni do pali [28].

Brytyjska firma ICAX zajmuje się rozwiązaniami łączącymi odnawialne źródła energii z budownictwem. Jednym z projektów, którym się zajmują jest rozwiązanie wykorzystujące gromadzone ciepło do ogrzewania dróg i budynków. Rozwiązanie zakłada wykonanie instalacji kolektorów słonecznych w nawierzchni drogi (sieć rur na głębokości 12 cm) oraz ułożonych poniżej izolowanych zbiorników do przechowywania nagromadzonego ciepła (system rur na głębokości 87,5 cm). System był testowany przez 2 lata i wykazał, że można obniżać temperaturę w sezonie letnim, a pozyskane ciepło gromadzić, by w sezonie zimowym wykorzystać je do utrzymania nawierzchni zimą. Do zastosowań na większych powierzchniach zalecane jest jednak wykonanie odwiertów zamiast testowanego w tym przypadku izolowanego zbiornika podziemnego, którego wykonanie na większych inwestycjach wymagałoby zbyt dużych kosztów i miejsca [29].

Zhao i inni [30] z regionu Harbin w Chinach, gdzie zimy są zdecydowanie mroźne (średnia temperatura zimą wynosi ok. -16.9°C , a najniższa może spaść nawet poniżej -25°C) skupili się na działaniu systemu w niższych temperaturach. Na potrzeby badań wykonano konstrukcję systemu o wymiarach drogi 5×5 m, zasilanego gruntem 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 natomiast dobrać tak, aby osiągnąć możliwie najniższe zużycie energii oraz jak najlepszą wydajność energetyczną.

3.2.2 Rurki ciepła

Przekazanie energii może następować za pomocą rurek ciepła. Rozwiązanie takie polega na samoczynnym przepływie ciepła od miejsca cieplejszego do miejsca zimniejszego. Pierwsza taka instalacja została wykonana w Trenton, w stanie New Jersey, w 1969 r. Mieszanina glikolu i wody krążyła pomiędzy rurkami umiejscowionymi ok. 5 cm poniżej powierzchni drogi, a horyzontalną siatką rur umieszczonych na głębokości od ok. 0.9 m do ok 4 m. Kolejny projekt bazujący na doświadczeniach z Trenton zakładał wykonanie badań z zastosowaniem pionowego gruntowego wymiennika ciepła lub grawitacyjnych rurek ciepła, a jako płyn roboczy wybrano mieszaninę amoniaku i freonu. Mieszanina ta nie powoduje korozji stali oraz nie jest podatna na zamarzanie. Dolny koniec rury pełni funkcję parownika, a górna część kondensatora. Gdy parownik jest cieplejszy niż kondensator część cieczy paruje i przemieszcza się w kierunku skraplacza, gdzie następnie jej ciepło utajone jest uwalniane. Ponieważ energia cieplna transportowana jest w postaci ciepła utajonego, w rurze duże ilości energii mogą być transportowane na dużą odległość. Odcinki próbne zostały wykonane na zjazdach na autostrady w Oak Hill, w Zachodniej Wirginii oraz w stanie Wyoming. Pomimo niskiej temperatury gruntu - ok. 12°C system działał zgodnie z przewidywaniami. W 1980 r. wykonano odcinek na moście Spring Creek w Laramie, w stanie Wyoming, który poddano bardziej szczegółowemu monitorowaniu przez dwa lata. System skutecznie zapobiegał zamarzaniu podgrzewanej płyty mostu. Jedyny zaobserwowany problem dotyczył zbyt małego nachylenia rur, które nie rekompensowały osiadania ziemi, ale zalecono zwiększenie nachylenia z 2% do 5%. Podobny system zastosowano w Japonii w pobliżu Glenwood Springs, ale ciepło pobierano ze studni wodnej, a nie geotermalnej [6].

3.2.3 Instalacje elektryczne

Nie wszystkie stosowane dotychczas systemy odładzania nawierzchni opierały się na hydraulicznych metodach ogrzewania.

Ogrzewanie elektryczne płyty pomostowej zastosowano już w latach 60' XIX wieku [31]. Z początku, rozwiązania elektrycznego odładzania były bardzo kosztowne. Instalacje musiały pozostawać w stałej gotowości, by w przypadku potrzeby móc sprawnie ogrzać nawierzchnie. Skutkowało to wysokim zapotrzebowaniem na energię elektryczną. W Japonii, pomiędzy grudniem 1992 oraz marcem 1994 (w okresach zimowych) testowano system ogrzewania elektrycznego zaprogramowany w oparciu o probabilistyczne dane Japońskiego Stowarzyszenia Meteorologicznego dotyczące opadów śniegu. Działanie systemu było sprawdzane na rzeczywistych skrzyżowaniach. Dowiedziono, że dodatkowe dane pozwoliły zmniejszyć zużycie energii o 29,7% oraz o 61,6% w dwóch kolejnych okresach zimowych [32].

W latach 1992-1997, w Stanach Zjednoczonych realizowano program badawczy, którego celem było sprawdzenie możliwości stosowania różnych technologii ogrzewanych obiektów mostowych. Wykonano 10 obiektów inżynierskich, stosując ogrzewanie elektryczne, hydrauliczne oraz z zastosowaniem tzw. rurek cieplnych. Wszystkie z nich spełniły swoje założenia projektowe, co jednoznacznie wskazało na możliwość stosowania analizowanych systemów [33].

3.2.4 Inne instalacje / rozwiązania

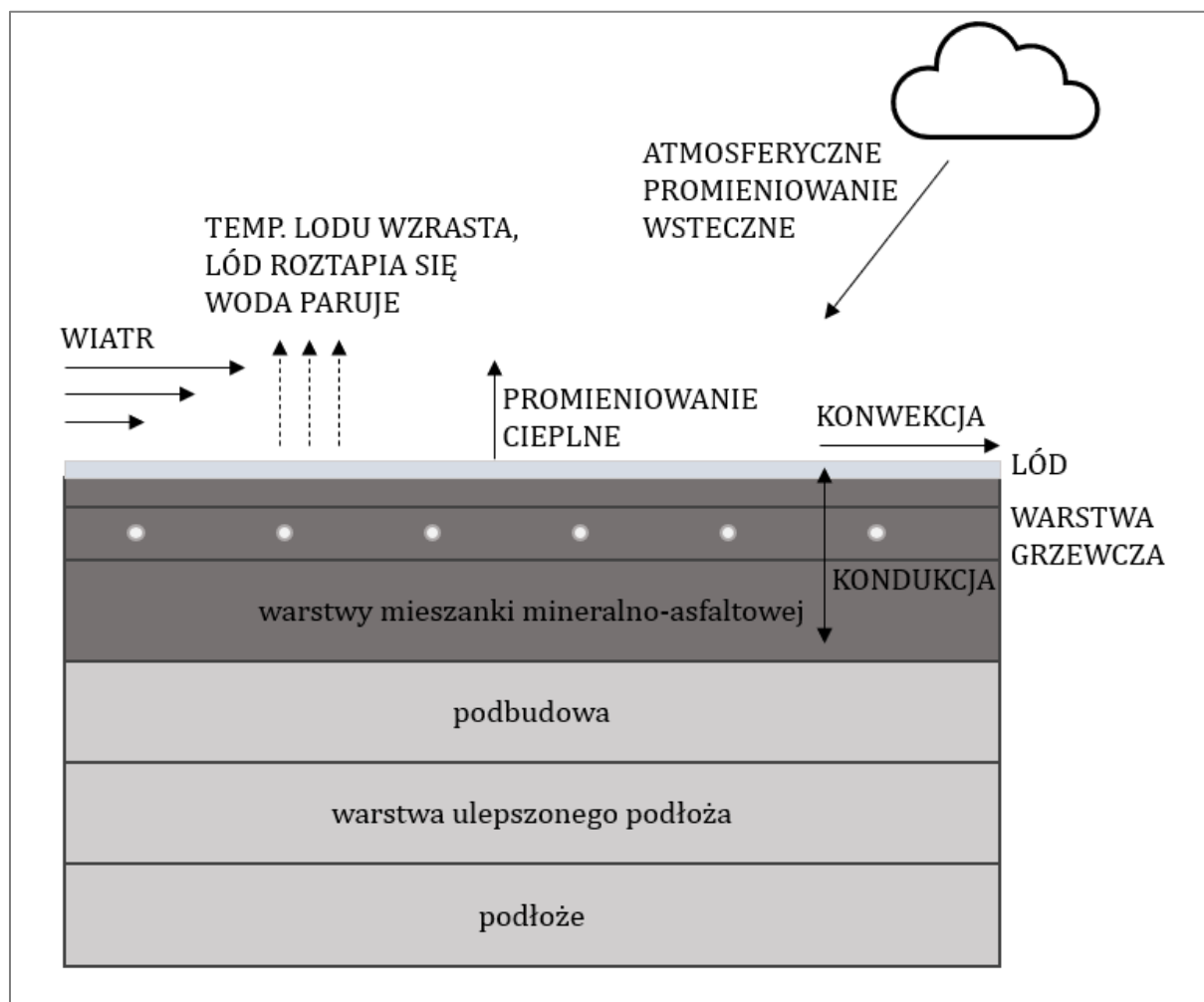
Zarówno instalacje hydrauliczne, jak i elektryczne są stosowane w Niemczech w rozwiązywaniu jastrychów ogrzewanych. Normy serii DIN 18560 [34], [35] podają asfalt lany jako jeden z rodzajów jastrychów dla nawierzchni przemysłowych. W nawierzchni z asfaltu lanego umieszczana jest instalacja elektryczna lub rury miedziane, w których następnie płynie ciecz grzewcza. Wykonuje się je grubości 25-45mm, a zalecane mieszanki definiowane są przewidywanymi naprężeniami – dla dużych mieszanki MA 8, MA 11, a dla średnich oraz małych - MA 5, MA 8.

Ciekawą technologią, którą przebadali Rao i inni [36] jest beton zawierający składniki przewodzące, które pozwoliły na osiągnięcie stabilnego przewodzenia elektrycznego. Zaproponowali użycie określenia beton grzejący (elektrycznie) zamiast betonu przewodzącego (prąd). Nakładka wykonana z cienkiej warstwy betonu z dodatkiem włókien stalowych oraz grafitu, 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 [7].

3.3 Wymiana ciepła

Ważnym zagadnieniem związanym z nawierzchniami samoodladzającymi jest wymiana ciepła, która ze względu na swoją jednokierunkowość nazywana jest również przenoszeniem ciepła. Jest to proces przekazywania energii wewnętrznej z jednego ciała do drugiego, bez wykonania pracy. Występuje gdy pojawia się różnica temperatur wewnątrz układu lub pomiędzy układami, które mogą na siebie wzajemnie oddziaływać. Rozróżnia się trzy rodzaje przenoszenia ciepła: przewodzenie ciepła, promieniowanie i konwekcję. Przewodzenie ciepła, nazywane inaczej kondukcją występuje przy bezpośrednim stykaniu się różnych ciał lub części jednego ciała. Jest to proces, w którym cząsteczki przenoszące ciepło nie podlegają przemieszczeniom makroskopowym. Konwekcja występuje w płynach (cieczach i gazach), i polega na makroskopowym przemieszczaniu się zgrupowanych cząsteczek wraz z energią cieplną tych cząstek. Promieniowanie jest natomiast procesem przenoszenia energii za pomocą fal elektromagnetycznych. Zachodzi ono pomiędzy ciałami stałymi i cieczami poprzez ciała

gazowe i próżnie [37]. W instalacji grzewczej, umieszczonej w nawierzchni drogi mamy do czynienia z przewodzeniem ciepła pomiędzy poszczególnymi warstwami konstrukcyjnymi drogi, instalacji oraz ewentualnej warstwy śniegu, a także z konwekcją pomiędzy nawierzchnią i otoczeniem, rurą oraz płynem, jak i promieniowaniem pomiędzy nawierzchnią, a atmosferą [38]. Przykładowy schemat został przedstawiony na rys. 10.



Rys. 10 Schematyczne przedstawienie wymiany ciepła w rozwiązaniu samoodładzania nawierzchni, opracowane na podstawie [38]

W analizie termicznej materiałów występują 3 główne parametry – przewodność cieplna, gęstość oraz pojemność cieplna [39]. Głównym parametrem brany pod uwagę w trakcie projektowania nawierzchni ogrzewanej będzie współczynnik przewodności cieplnej k . Przewodzenie ciepła uzależnione jest od współczynnika przewodności cieplnej k w stanie ustalonym oraz od współczynnika ciepła i dyfuzyjności cieplnej a .

Najpopularniejszą stosowaną metodą pomiarową jest laserowa metoda impulsowa (LFA). Badanie polega na impulsowym ogrzaniu jednej ze stron badanej próbki oraz rejestracji przebiegu temperatury w czasie po stronie przeciwnej. Kolejną popularną metodą jest wykorzystanie rozwiązania analitycznego nieustalonego przewodzenia ciepła wokół

nieskończenie długiego źródła powierzchniowego (THS). W badaniu umieszcza się cienką taśmę grzewczą w badanym ośrodku oraz poprzez jej zasilenie prądem elektrycznym o stabilizowanym natężeniu wywołuje się stan nieustalony przewodzenia ciepła. Poprzez zmianę temperatury taśmy, zmienia się jej rezystancja, co zmienia napięcie zasilania. Możliwe jest powiązanie spadku napięcia na oporze taśmy w czasie ze zmianą temperatury i wyznaczenie wartości współczynników k i a . Układ pomiarowy w tej metodzie jest uproszczony – taśma jest jednocześnie źródłem ciepła oraz czujnikiem temperatury. Pomiary można wykonać również za pomocą metody gorącego dysku (TPS), która jest pochodną metody THS. Taśma zostaje zastąpiona podwójną spiralą wykonaną z cienkiej warstwy niklu, która zabezpieczona jest z obu stron folią kaptonową. Kolejną metodą jest technika kalorymetrii radiacyjnej, ale wymaga ona warunków próżni. Badanie następuje na podstawie bilansu energetycznego próbki wymieniającej ciepło z powierzchnią grzałki oraz ściankami komory próżniowej, jedynie w formie promieniowania. Innym sposobem jest wykorzystanie metody MTDSC, która jest modyfikacją metody różnicowej kalorymetrii skalingowej (DSC) [40]. Parametry można wyznaczyć również za pomocą zmodyfikowanej metody gorącego dysku (MTPS) [41].

Gdy specjalistyczne urządzenia pomiarowe nie są dostępne, badacze wykorzystują prostsze rozwiązania. Chen i inni [42] wykorzystali metodę proponowaną przez badaczy: Luca oraz Mrawira [46] polegającą na umieszczeniu badanej próbki w izolowanej formie styropianowej o niskiej przewodności cieplnej (0,023-0,033 W/mK), oświetleniu jej lampą halogenową powodującą podgrzewanie (500 W/m²) oraz umieszczeniu na przekroju próbki termopar odczytujących temperaturę w sposób ciągły, w trakcie trwania badania. Porównując wyniki badań oraz symulacje komputerowe autorzy podali wartości pojemności cieplnej oraz przewodności cieplnej.

Określenie właściwości termicznych mieszanek nawierzchniowych oraz ich składników było tematem wielu opracowań. Wartości te różnią się, ze względu na zastosowanie różnych materiałów składowych w projektowanych mieszankach. Wartości otrzymane w badaniach zebrano w tab. 2.

Tab. 2 Przewodność cieplna mieszanek nawierzchniowych wg wybranych publikacji

Mieszanka	Wsp. przewodności cieplnej k [W/mK]	Źródło
MMA (DG)	2,3-2,5	Chadbourn et al. [43]
SMA 15.9	1,4-1,6	
MMA	2,28-2,88	Farouki [44]
MMA, D=19, uziarnienie grube	1,394	Khasawneh et al. [45]
MMA, D=19, uziarnienie drobne	1,434	
MMA, D=12,5 uziarnienie grube	1,425	
MMA, D=12,5 uziarnienie drobne	1,729	
MMA, D=9,5 uziarnienie drobne	1,338	
MMA, D=9,5 uziarnienie drobne	2,000	
MMA, D=12,5	1,7-2,1	Mrawira, Luca [46]
ABT11	1,39	Mirzanamadi et al. [47]
ABS11	1,89	
AG22	1,51	
MMA (DG)	1,43	Petkova, Zlateva [41]
AC 6, 65C	1,34-1,63	Byzyka et al. [48]
AC 6, 80C	1,11-1,30	
AC 6, 19C	0,84-1,03	
AC 14, 65C	1,14-1,75	
AC 14, 80C	0,7-1,34	
AC 14, 19C	0,56-1,00	
20 mm DBM, 65C	1,33-1,91	
21 mm DBM, 80C	1,06-1,46	
22 mm DBM, 19C	0,85-1,05	
MMA	1,35	Nguyen et al. [49]

Wielokrotnie powołani powyżej autorzy podkreślają wpływ wielu czynników na badane parametry termiczne – m. in. wpływ wilgotności, gęstości, wolnych przestrzeni oraz temperatury, w której przeprowadzane było badanie. Ponadto badanie mieszanki różni się także składnikami – kruszywem, lepiszczem.

Dodatkową informacją, która może być istotna w tematyce nawierzchni samoodladzających jest stwierdzenie, że wysoka przewodność cieplna materiałów wpływa na zmniejszenie amplitudy temperatury nawierzchni w ciągu doby [50].

3.4 Wydajność nawierzchni samoodładzających

Ważnym aspektem działania nawierzchni samoodładzających jest ich wydajność. Stosowane systemy odladzania muszą być zaprogramowane w sposób umożliwiający sprawne wykrywanie pogorszenia się warunków atmosferycznych tak, aby uniknąć sytuacji, w których stan nawierzchni będzie stanowił zagrożenie dla uczestników ruchu. Skład mieszanki powinien być natomiast zaprojektowany w sposób, umożliwiający jak najsprawniejsze przekazywanie ciepła na powierzchnię drogi.

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 [39].

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 [38].

3.4.1 Właściwości fizyczne mieszanek i ich wpływ na właściwości termiczne

Właściwości termiczne mieszanek nawierzchniowych zależą przede wszystkim od właściwości materiałów składowych (kruszywa będącego głównym składnikiem mieszanki), zawartości wolnej przestrzeni oraz wilgotności. Aboufoul i inni [51] badali wpływ wolnej przestrzeni na parametry termiczne mieszanki. Płyty MMA o różnej zawartości wolnej przestrzeni (w skład mieszanek wchodził asfalt o penetracji 40/60 oraz kruszywo o maksymalnym wymiarze ziaren $D=20$ mm), poddawano 12 h grzania oraz 12 h schładzania mierząc zmianę temperatury. Określono, że mieszanki o wysokiej zawartości wolnych przestrzeni mają niższą przewodność cieplną oraz pojemność cieplną. Mieszanki o wysokiej zawartości wolnej przestrzeni mają mniejszą zdolność do kumulowania ciepła i z tego względu mogą ograniczyć efekt wysp ciepła. Mieszanki o niskiej zawartości wolnej przestrzeni wykazują lepsze właściwości termiczne. Zależność ta potwierdzona została także przez innych badaczy [47], [45]. Różnica ta musi być jednak znacząca. Przy małych różnicach, np. 4-6,5 % różnice te nie są znaczące [48], [52]. Wpływ wolnych przestrzeni na przewodność cieplną potwierdził również Mieczkowski oraz Budzinski [53], [54]. Dodatkowo autor zwrócił uwagę, że wpływ ma również gęstość upakowania części mineralnych – sumarycznej powierzchni kontaktu pomiędzy ziarnami (powierzchni przylegania poszczególnych elementów).

Zaobserwowany został również istotny wpływ temperatury pomiaru właściwości termicznych – wartości współczynnika w temperaturze 19°C są niemalże dwukrotnie

wyższe niż te zmierzone w temperaturze 80°C. Co więcej, zwrócono uwagę, że ważne jest stosowanie pasty przewodzącej, aby zapewnić lepszy kontakt sondy pomiarowej z mieszanką mineralno-asfaltową [48].

3.4.2 Środki odladzające w składzie mieszanki

Jednym z alternatywnych sposobów na ułatwienie procesu radzenia sobie ze śniegiem i lodem są mieszanki, w których zamiast części wypełniacza stosuje się środki odladzające. Zjawisko uwalniania się aktywnych składników jonów chlorkowych, ułatwiające zrozumienie działania mechanizmu mieszanek samoodladzających z zastosowaniem środków odladzających opisali Limin Li i inni [55]. Zwrócili uwagę, że zwiększenie uwalniania może nastąpić przy zastosowaniu mieszanek wysoko porowatych oraz przy zwiększeniu ilości stosowanego środka. Mulian Zheng i inni [56] badali odladzające mieszanki nawierzchniowe. Sprawdzali zachowanie się śniegu na warstwie mieszanki tradycyjnej oraz mieszanki z dodatkiem granulowanego wypełniacza V-260 (opartego głównie na NaCl_2). Środek ten został wybrany po wstępnych badaniach wpływu dodatków: V-260 (CaCl_2), IGD (CaCl_2), Mafilon (NaCl) na zamarzanie. Wykazano, że zawarty w składzie NaCl_2 reaguje z leżącą na drodze warstwą śniegu i wpływa na jej łatwiejsze usunięcie. Warstwa lodu szybciej znika pod obciążeniem kół. Do podobnych wniosków doszli Liu i inni [57]. Potwierdzili to również Giuliani i inni [58] badający efektywność odladzającą na próbkach mastyksu asfaltowego zawierających wypełniacz odladzający – szybkość odladzania została zwiększona dzięki uwalniającemu się środkowi odladzającemu i jego prawdopodobnym działaniu na obniżenie temperatury zamarzania.

Sang Luo i inni [59] potwierdzają wnioski powołanych wcześniej autorów, ale zwracają uwagę, że dodanie Mafilonu do mieszanek ze standardowym asfaltem modyfikowanym SBS wpływają na obniżenie parametrów wytrzymałościowych mieszanek.

Zhilun Sun i inni [60] sprawdzali właściwości mieszanek z modyfikowanym asfaltem oraz dodatkiem środka odladzającego w miejsce standardowego wypełniacza. Dodanie środka odladzającego poprawiło właściwości mieszanki w wysokich temperaturach, ale osłabiło ją w niskich temperaturach. Dodatkowo dodatek ten wpływał oczywiście na właściwości odladzające oraz odśnieżające.

3.4.3 Projektowanie składu mieszanki polepszającego jej właściwości termiczne

Innym zabiegiem poprawiającym działanie nawierzchni samoodladzających mogłoby być zastosowanie mieszanek o ulepszonych parametrach termicznych.

Tab. 3 przedstawia porównanie zmierzonych przez różnych autorów wartości współczynnika przewodności cieplnej w zależności od składu i dodatków mieszanek mineralno-asfaltowych.

Tab. 3 Porównanie wartości współczynnika przewodności cieplnej mieszanek mineralno-asfaltowych zmierzonych przez różnych autorów, w zależności od składu i dodatków

Autor	Mieszanka	Współczynnik przewodności cieplnej [W/mK]	Dodatkowe informacje o składzie mieszanki
Bai et al. [61]	zastosowano 5.3% asfaltu PG 64-22, do mieszanki bazowej (D =19 mm) stosowano dodatki poprawiające właściwości termiczne	1.866	mieszanka bazowa: lokalny żwir rzeczny
		1.911-1.962	pył węglowy (5-20%)
		1.979-2.089	grafit (5-20%)
		1.930-2.177	włókna węglowe 0.5 + grafit (5-20%)
Dawson et al. [62]	AC 14, zastosowano 4.9%+-0.4% asfaltu drogowego 100/150, zawartość wolnych przestrzeni 4±1.5%	0.46	kruszywo wapienne 20% (>10mm); Lytag (kruszywo lekkie) 80%
		1.05	kruszywo wapienne 20% (>10mm); żużle pomiedziowe 80%
		1.21	kruszywo wapienne
		1.46	kruszywo wapienne 20% (>10mm); kwarcyt 80%
		2.47	kruszywo wapienne zostało całkowicie zastąpione kwarcytem
		2.82	kruszywo wapienne zostało całkowicie zastąpione kwarcytem; dodano 2% włókien miedzianych (d=1mm, 50 mm długości)
A. Hassn et al. [63]	zastosowano asfalt PG 60/40 oraz kruszywo wapienne D=20 mm	0.82	wolne przestrzenie: 25.3 %, zawartość asfaltu: 3.2 %
		0.90	wolne przestrzenie: 21.5 %, zawartość asfaltu: 3.3 %
		0.92	wolne przestrzenie: 17.4 %, zawartość asfaltu: 3.8 %
		0.96	wolne przestrzenie: 13.2 %, zawartość asfaltu: 4.2 %
		1.04	wolne przestrzenie: 9.9 %, zawartość asfaltu: 4.5 %
		1.16	wolne przestrzenie: 5.0 %, zawartość asfaltu: 4.7 %
Pan et al. [64]	badano wpływ składników w mieszance o D = 12.5 mm	1.548	bazalt, asfalt AH-70
		1.597	bazalt, asfalt AH-90
		1.622	bazalt, asfalt SBS
		1.560	destrukta asfaltowy, asfalt SBS
		1.594	wapień, asfalt SBS
		1.612	żużle, asfalt SBS
		1.621	bazalt, asfalt SBS
		1.717	diabaz, asfalt SBS
		1.781	granit, asfalt SBS
		2.123	dacyt, asfalt SBS
		1.621	bazalt, asfalt SBS, wypełniacz wapienny
		2.217	bazalt, asfalt SBS, wypełniacz wapienny zastąpiony grafitem w 40%

Zagadnienie zmiany kruszyw w składzie mieszanki zostało opisane przez Dawsona i innych [39]. Autorzy zaprezentowali koncepcję zastosowania mieszanki mineralno-asfaltowej jako kolektora słonecznego oraz magazynu ciepła. Sprawdzali wpływ poszczególnych składników mieszanki - różnych kruszyw oraz dodatków, mogących mieć korzystny wpływ na parametry mieszanki. Dla celów badawczych przyjęto wyjściowy skład mieszanki zawierającej wapien, a pozostałe mieszanki wykonano analogicznie, zamieniając składniki, ale zachowując ich objętości jak w mieszance wyjściowej. Zawartość oraz rodzaj asfaltu, uziarnienie kruszywa było stałe, aby nie zaburzać wyniku pomiarów właściwości termicznych. Przewodność cieplną wyznaczono za pomocą przepływomierza cieplnego HFM, pojemność cieplna poszczególnych składników została zmierzona za pomocą metody różnicowej kalorymetrii skalingowej DSC, wartość dla całej mieszanki została obliczona przy zastosowaniu odpowiednich proporcji. Dyfuzyjność cieplną obliczono ze wzoru. Wyniki pokazały, że zastąpienie wapienia kwarcytem zwiększa przewodność cieplną mieszanki o 135%, żuźle pomiedziowe nie podnoszą przewodności.

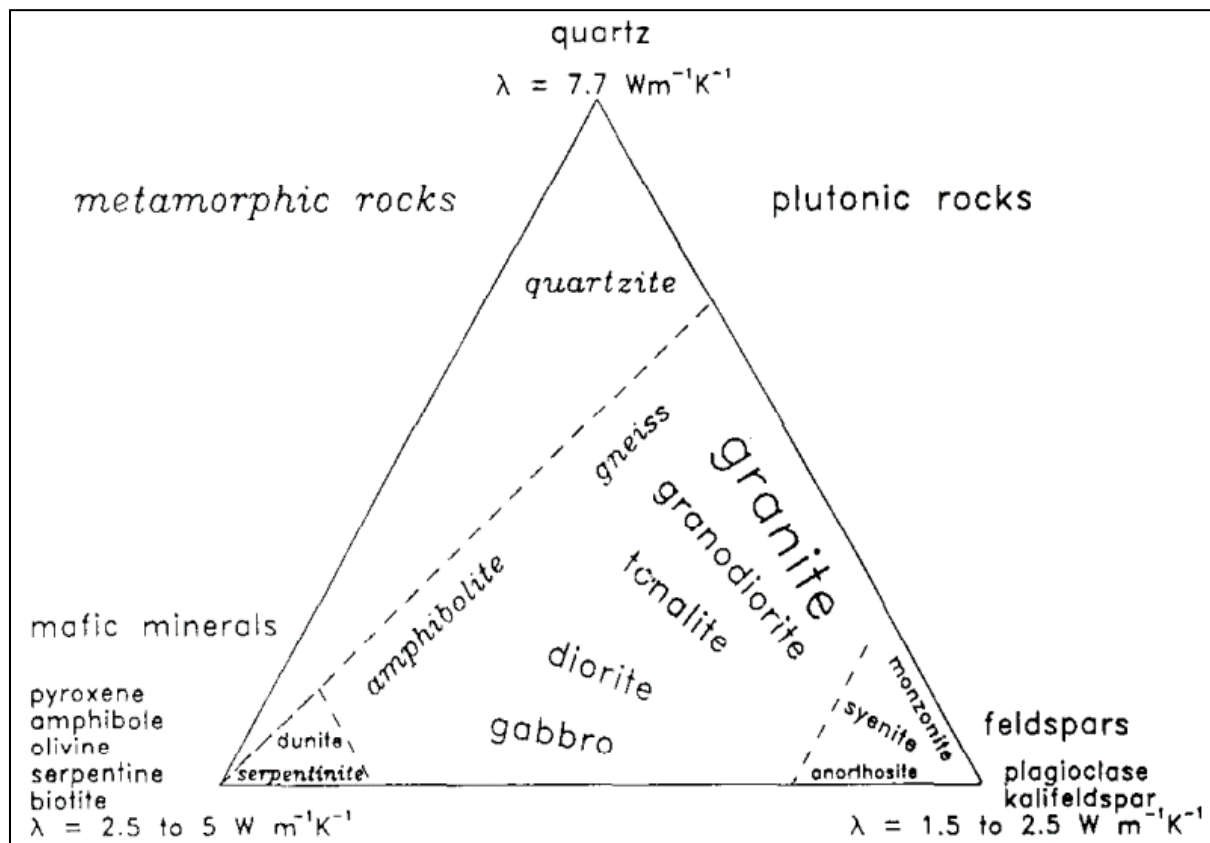
Pan i inni [65] przeprowadzili badania określające wpływ składu mieszanki mineralno-asfaltowej na właściwości termiczne wykonanej nawierzchni. Dla asfaltów AH-70, AH-90 oraz SBS (modyfikowanego asfaltu AH-90), mieszanek z zastosowaniem wybranego asfaltu oraz różnych kruszyw, mieszanek z wybranym kruszywem oraz asfaltem, ale z zastosowaniem standardowego wypełniacza wapiennego oraz mieszanki wypełniacza wapiennego z grafenem określili przewodność cieplną oraz dyfuzyjność cieplną za pomocą TCA, co pozwoliło obliczyć pojemność cieplną c_v (TPS2500S, oparte na TPS). Uzyskane wyniki wskazują, że wybór kruszywa ma wpływ na końcowe parametry, a zastosowanie grafenu również je poprawia.

Przewodność cieplna skał zmienia się w zależności od ciśnienia oraz temperatury. Co więcej wpływ na współczynnik przewodności cieplnej każdej skały ma zawartość minerałów, porowatość, zawartość wody oraz anizotropia. W związku z tym ciężkie jest określenie wartości współczynnika przewodności cieplnej dla ogółu skały – w zależności od miejsca pochodzenia jej skład będzie się różnił, a tym samym różnić się będą jej właściwości.

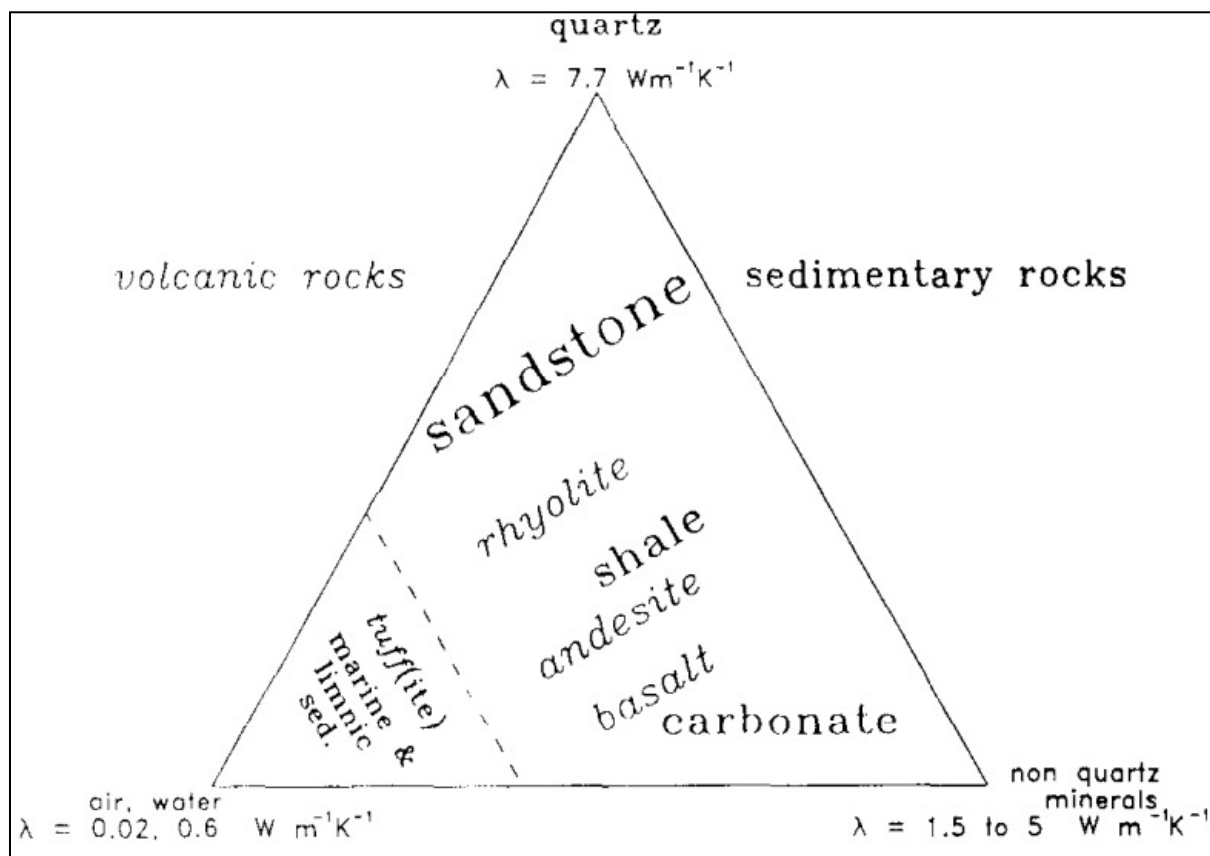
Clauser oraz Huenges [66] przedstawili zależność przewodności cieplnej skał w odniesieniu do ich elementów składowych, mających największy wpływ na przewodność cieplną - zawartości podstawowych minerałów oraz powietrza i wody.

Na rys. 11 przedstawiono skały magmowe plutoniczne oraz metamorficzne (oznaczone kursywą) w zależności od zawartości kwarców, skaleni (glinokrzemiany przestrzenne potasu, sodu, wapnia, rzadziej baru) oraz minerałów maficznych tj. ciemnych (oliwinów, piroksenów, amfiboli, min. nieprzezroczystych, łuszczyków).

Na rys. 12 natomiast skały magmowe wulkaniczne (oznaczone kursywą) oraz osadowe w zależności od zawartości kwarcu, pozostałych minerałów oraz zawartości wody i powietrza kruszyw, jako że jest to niezwykle ważny parametr wpływający na przewodność cieplną.



Rys. 11 Przewodność cieplna podstawowych minerałów skałotwórczych i związek składu ze skałami [66]



Rys. 12 Przewodność cieplna podstawowych minerałów skałotwórczych i związek składu ze skałami [66]

Przewodność cieplna skał była tematyką wielu opracowań. Obszernie temat opisali już wiele lat temu m.in. Kersten [67] oraz O. Farouki [44]. W ostatnich latach ukazało się także opracowanie będące wynikiem prac przy projekcie z programu UE Horyzont 2020 – tanie i wydajne zastosowanie niezawodnych gruntowych wymienników ciepła i pomp. Badacze stworzyli bazę danych dotyczącą właściwości termicznych zarówno skał, jak i nieskonsolidowanych osadów, zalecaną do stosowania przez projektantów. Zawiera ona zestawienie wartości z analizy dostępnej literatury, wartości zmierzonych oraz zakres wartości podanych w bazie danych projektu (tab. 4) [68].

Tab. 4 Tabela wartości parametrów termicznych dla skał oraz nieskonsolidowanych osadów [68]

Material	From Literature Review				Directly measured				UNIPD-Cheap GSHPs database		
	λ W m ⁻¹ K ⁻¹		ρc_p MJ m ⁻³ K ⁻¹	ρ in 10 ³ Kg m ⁻³	λ W m ⁻¹ K ⁻¹		ρc_p MJ m ⁻³ K ⁻¹	ρ in 10 ³ Kg m ⁻³	λ W m ⁻¹ K ⁻¹		
	min	max	^a	^a	min	max	REC		min	max	rec.
Sedimentary rocks	0.59	7.70			1.03	5.62			0.59	7.70	
conglomerate	1.50	5.10	1.8-2.6	2.2-2.7					1.50	5.10	1.94
sandstone	0.72	6.50	1.8-2.6	2.2-2.7	1.03	4.54	2.00	2.06-2.28	0.72	6.50	2.60
clay-mudstone	0.59	3.48	2.1-2.4	2.4-2.6	1.47	3.21	2.54	1.80-2.23	0.59	3.48	2.13
limestone	0.60	5.01	2.1-2.4	2.4-2.7	2.42	4.41	2.88	1.81-2.22	0.60	5.01	2.50
dolomite	0.61	5.73	2.1-2.4	2.4-2.7	1.96	5.22	3.65	2.03-2.34	0.61	5.73	3.58
marlstone	1.78	2.90	2.2-2.3	2.3-2.6					1.78	2.90	2.04
gypsum	1.15	2.80	2.0	2.2-2.4					1.15	2.80	1.60
anhydrite	1.50	7.70	2.0	2.8-3.0					1.50	7.70	4.77
Igneous rocks	0.44	5.86			0.86	3.29			0.44	5.86	
granite	1.49	4.45	2.1-3.0	2.4-3.0	2.02	3.68	3.13	1.80-2.12	1.49	4.45	2.74
diorite	1.38	4.14	2.9	2.9-3.0	1.99	3.04	2.50	1.75-2.10	1.38	4.14	2.40
syenite	1.35	5.20	2.4	2.5-3.0	2.20	2.66	2.41	2.02-2.06	1.35	5.20	2.51
gabbro	1.52	5.86	2.6	2.8-3.1	2.41	2.79	2.60	2.08-2.04	1.52	5.86	2.41
rhyolite	1.77	3.98	2.1	2.6	1.89	3.29	2.61	1.95-2.09	1.77	3.98	2.96
dacite	2.00	3.91	2.9	2.9-3.0					2.00	3.91	2.60
andesite	0.64	4.86	2.3-2.6	2.6-3.2	0.96	1.39	1.16	1.38-1.57	0.64	4.86	1.43
trachyte	2.20	3.40	2.1	2.6	1.86	1.95	1.91	1.87-2.00	1.86	3.40	2.48
basalt	0.44	5.33	2.3-2.6	2.6-3.2	0.86	2.69	1.78	1.89-2.07	0.44	5.33	1.82
tuff/tuffstone	1.10	2.59							1.10	2.59	1.10
Metamorphic rocks	0.65	8.15			1.98	4.43			0.65	8.15	
quartzite schist	1.89	8.15	2.1	2.5-2.7					1.89	8.15	5.18
micaschist	0.65	5.43	2.2-2.4	2.4-2.7	1.98	4.43	2.83	2.09-2.26	0.65	5.43	2.53
gneiss	0.84	4.86	1.8-2.4	2.4-2.7	3.04	3.89	3.70	2.19 - 2.2	0.84	4.86	2.95
phyllite	1.50	3.33			1.45	2.94	2.59	1.41-1.95	1.45	3.33	2.45
amphibolite	1.35	3.90	2.0-2.3	2.6-2.9					1.35	3.90	2.90
serpentinite	2.41	4.76			2.01	3.72	2.62	2.1-2.2	2.01	4.76	2.52
marble	0.98	5.98	2.0	2.5-2.8					0.98	5.98	2.50
nconsolidated sediments											
clean gravel, dry	0.13	0.9	1.3-1.6	1.8-2.2	0.14	0.55	0.33		0.14	0.9	0.4
heterometric gravel with sand, wet	0.18	3.00			0.94	1.33	1.08		0.2	3.00	1.08
medium sand, dry	0.15	0.90	1.3-1.6	1.8-2.2	0.15	0.68	0.26	0.41-1.48	0.15	0.9	0.4
medium sand, wet	1.00	2.60	2.2-2.8 ^b	1.9-2.3 ^b	1.44	2.45	1.86	1.53-2.27	1.0	2.6	1.9
silty sand/sandy silt, wet	1.20	2.25			1.24	2.06	1.56	1.85-2.48	1.20	2.25	1.62
silt, dry	0.26	1.09	1.5-1.6	1.8-2.0	0.25	0.82	0.50	1.37-1.52	0.25	1.09	0.55
silt and clayey silt, wet	0.82	2.60	2.0-2.8 ^b	2.0-2.2 ^b	0.93	1.76	1.32	1.84-2.43	0.82	2.60	1.45
clay, dry	0.25	1.52	1.5-1.6	1.8-2.0	0.25	1.22	0.64	0.49-1.38	0.25	1.52	0.64
plastic clay, wet	0.60	1.90	2.0-2.8 ^b	2.0-2.2 ^b	0.87	1.39	1.03	0.62-2.67	0.60	1.90	1.10
organic materials: peat	0.2	0.7	0.5-3.8	0.5-1.1	0.30	0.66	0.51	0.32-0.78	0.2	0.7	0.51

Na podstawie powyższej literatury zebrano wartości dla skał najczęściej stosowanych w budownictwie drogowym w Polsce (tab. 5). Zakresy są dość szerokie, ale zgodnie z powyższym opisem występuje wiele zmiennych mających wpływ na wartości parametrów termicznych.

Tab. 5 Przewodność cieplna podstawowych skał używanych w Polsce

Skała	Bazalt	Gabro	Granit	Gnejs	Wapień	Dolomit	Ryolit
Współczynnik przewodności cieplnej λ [W/(m·K)]	1.6 - 5.6	2.0 - 3.5	2.1 - 4.1	1.4 - 3.4	0.8 - 2.9	2.8 - 5.2	3.1 - 3.4

Zagadnienie wpływu wyboru lepszcza o lepszych parametrach termicznych było opisane m.in. przez Petkova-Slipets i innych [41]. Tłumaczą oni potrzebę wykorzystania nowego materiału w budowie dróg wynikiem z obliczeń mówiącym, że naprężenia termiczne są znacząco niższe dla materiałów asfaltowych mających wyższy współczynnik

przewodności cieplnej. Obniżenie tych naprężeń poniżej wartości wytrzymałości może ograniczyć pojawianie się pęknięć termicznych. Petkowa-Slipets i in. stosując metodę MTPS badali właściwości termiczne mieszanek o składach różniących się rodzajem lepiszcza: lepiszcze asfaltowe oraz termoplastyczny polimer akrylowy nowej generacji. Lepiszczce zastępcze charakteryzuje się wyższą przewodnością cieplną, tym samym lepiej znosząc zmiany temperatury otoczenia, natomiast oba lepiszcza charakteryzują się podobną pojemnością cieplną.

Dawson i inni [39] wykazali, że przewodność cieplna mieszanek z zastosowaniem asfaltu modyfikowanego włóknami miedziowymi wzrasta o 13%. Autorzy zwracają uwagę, że wcześniejsze opracowania wskazywały na wzrost właściwości termicznych po dodaniu włókien i, że wynik przeprowadzonych przez nich badań może wykazywać niewielką poprawę ze względu na horyzontalne ułożenie się włókien, utrudniające przepływ ciepła.

Zhilun Sun i inni [60] badali właściwości asfaltów modyfikowanych SBS oraz granulatem gumowym w połączeniu z zastąpieniem części wypełniacza sproszkowanym środkiem odladzającym. Wszystkie dodatki poprawiały właściwości mieszanki w wysokich temperaturach, a w niskich temperaturach modyfikowane asfalty niwelowały negatywny wpływ wypełniacza ze środka odladzającego.

Badania właściwości termicznych przeprowadzone przez Pana i innych [65] wykazały, że pomimo różnic we właściwościach asfaltu, jego wybór do stosowanej mieszanki nie wpływa na jej właściwości ze względu na niski udział w mieszance.

Kolejnym badanym zagadnieniem jest stosowanie dodatków mających na celu poprawienie właściwości termicznych. Bai i inni [61] badali przewodność cieplną mieszanek modyfikowanych przewodzącym wypełniaczem. Grafit, karbon oraz ich mieszanka z włóknami węglowymi były dodawane w różnych ilościach oraz w różnych procesach – mieszanie na mokro i mieszanie na sucho. Dodatki w ilości 5, 10, 15, 20 % objętości asfaltu dodawano na mokro (asfalt podgrzewano, następnie mieszano go z dodatkiem mieszałem wysokoobrotowym przez 30 minut, w ten sposób mieszanka stawała się jednorodna) lub na sucho (dodatki mieszano z podgrzany kruszywem, a następnie dodawano asfalt). Zauważono, że proces mieszania na mokro daje bardziej równomierne rozłożenie dodatków, polepsza przewodność w większym stopniu, ale jednocześnie jest trudniejszy do wykonania – wymaga specjalnej komory do mieszania z asfaltem w procesie produkcji mieszanki. Oba dodatki wpływają na poprawę przewodności cieplnej, ale karbon w mniejszym stopniu, dodanie włókien podnosi ją jeszcze bardziej. Dodatki te sprawiają, że mieszanka będzie bardziej sztywna – podniesie się wytrzymałość na koleinowanie, ale jednocześnie spadnie wytrzymałość na pękanie termiczne. W kwestii przewodności cieplnej oraz elektrycznej (istotne w przypadku betonów przewodzących) połączenie dodatku włókien węglowych wraz z drobnym

dotatkem, np. grafenem pozwala na wypełnienie nieciągłości w ułożeniu włókien [69]. Wang i inni [70] również badali wpływ dodatku włókien węglowych. W ich przypadku lepsze parametry termiczne osiągnięto przy dodaniu włókien na sucho do mieszanki niż w przypadku włókien dodawanych najpierw do lepiszcza asfaltowego. Niezależnie od metody dodania włókien, przewodność cieplna wzrastała wraz ze zwiększeniem ilości dodanych włókien. Dodanie zbyt dużej ilości włókien może prowadzić do przegęszczonych próbek.

Shi i inni [50] badali wpływ dodatku polipropylenu spienionego (EPP) oraz grafitu. Zgodnie z przewidywaniami autorów, wykazano, że polipropylen spieniony wpływa na obniżenie przewodności cieplnej i pojemności cieplnej. Jednocześnie zastosowanie dodatku wpływa na spadek wytrzymałości na pośrednie rozciąganie. Zastąpienie 18% kruszywa granulami EPP powoduje spadek wspomnianych właściwości termicznych o ok. 30%. Grafen działa przeciwnie do EPP, jego dodanie do mieszanki wpływa na wzrost przewodności cieplnej oraz zwiększa wytrzymałość na pośrednie rozciąganie. Dodanie objętościowo 4,8% grafitu powoduje wzrost przewodności o 43%, nie ma natomiast znaczącego wpływu na wartość pojemności cieplnej. Dodatkowo zastosowanie lepiszcza modyfikowanego grafitem zwiększa minimalną temperaturę nawierzchni o 0,3°C, co może wpływać na zmniejszenie zapotrzebowania na utrzymanie zimowe drogi. Dodanie grafitu w ilości powyżej 3,6% może wpłynąć jednak na spadek wytrzymałości. Zagadnienie to należy brać pod uwagę przy projektowaniu takich mieszanek.

Niektóre z badań opisują wpływ na właściwości termiczne ale w ogrzewaniu mikrofalowym – w tych przypadkach wpływ dotyczy często właściwości elektromagnetycznych czy przewodności elektrycznej, nie przewodności cieplnej.

Warto dodać, że często uwaga zwracana jest również na właściwości uzdrawiające takich mieszanek, czyli niwelujące powstawanie rys. Wpływ na regenerację mają m.in.: rodzaj zastosowanego dodatku, metoda ogrzewania nawierzchni, zawartość wolnych przestrzeni oraz stan nawierzchni – ilość rys, mikropęknięć, starzenie, wilgotność [70], [71], [72], [73], [74].

Pan i inni wskazali potencjał w stosowaniu przewodzącej mieszanki mineralno-asfaltowej (eng. conductive asphalt concrete). Zaznaczyli konieczność wykonania badań na większych próbkach w laboratorium oraz w skali rzeczywistej, aby zaobserwować wpływ temperatury oraz obciążenia, do dalszego rozwoju technologii. Istotnymi aspektami przy projektowaniu i wykonywaniu takich mieszanek są: sposób dodawania składników i ich mieszania, odpowiednia wartość 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. Zmiany rezystywności zależne od zmian zawartości dodatku wypełniacza przewodzącego można wyjaśnić teorią perkolacji. Przewodność mieszanki mineralno-asfaltowej zależy głównie od rozkładu wypełniacza przewodzącego w lepiszczu asfaltowym [75].

Jie Gao i inni sprawdzali możliwości stosowania włókien stalowych oraz wełny stalowej w mieszankach przeznaczonych do odladzania mikrofalami. Zauważyli, że wraz ze wzrostem ilości włókien, wzrasta ilość wolnych przestrzeni. Wytypowali rekomendowane poziomy ilości dodatku włókien w zależności od wielkości [76].

Sassani i inni [77] 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 (eng. percolation determination test) pozwoliło na określenie odpowiedniej ilości stosowanych 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.

3.4.4 Stosowanie materiałów zmiennofazowych (PCM) w mieszankach nawierzchniowych

Autorzy [78] zebrali oraz przedstawili informacje na temat materiałów zmiennofazowych oraz systemów magazynowania ciepła utajonego, zwanego również ciepłem przemiany gazowej.

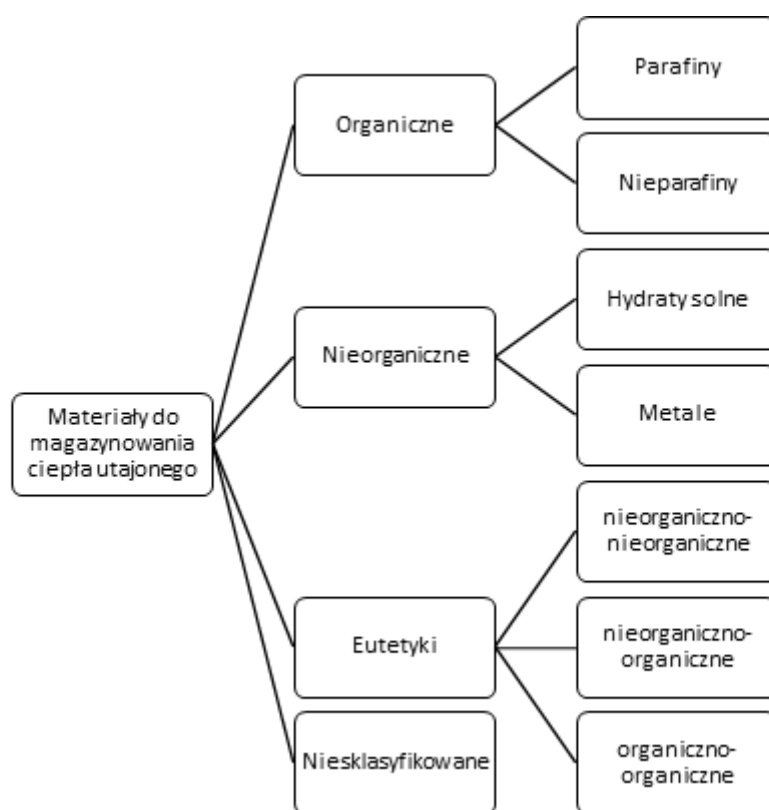
Zastosowanie rozwiązania magazynowania ciepła utajonego zawierającego materiał zmiennofazowy jest atrakcyjne ze względu na wysoką gęstość magazynowania przy małych wahaniami temperatury. Różnorodność materiałów zmiennofazowych umożliwia znalezienie materiałów do różnych zastosowań w zależności od wymaganych zakresów temperatury.

Potrzeba magazynowania ciepła lub energii występuje w wielu sektorach – m.in. w budownictwie, elektronice, przemyśle oraz transporcie. Świadomość ograniczonej ilości konwencjonalnych źródeł energii również prowadzi do zwiększenia zainteresowania się materiałami zmiennofazowymi – niekonwencjonalne źródła energii wymagają rozwinięcia technologii magazynowania ciepła oraz energii.

Energia cieplna może być magazynowana jako zmiana energii wewnętrznej materiału w postaci jawnej (eng. Sensible Heat Storage, SHS), utajonej (eng. Latent Heat Storage, LHS) lub jako ich kombinacja. W przypadku SHS energia cieplna jest magazynowana poprzez wzrost temperatury ciała stałego lub płynu, a pojemność cieplna i zmiana temperatury materiału wykorzystywane są podczas procesów ładowania i rozładowywania. Ilość gromadzonego ciepła zależy od ciepła właściwego medium, zmiany temperatury oraz ilości zmagazynowanego materiału. System LHS opiera się natomiast na wchłanianiu albo uwalnianiu ciepła, gdy materiał magazynujący zmienia stan ze stałego do płynnego, z płynnego do gazowego i odwrotnie.

Materiały zmiennofazowe to materiały, które mogą magazynować ciepło utajone w trakcie przemian fazowych. Ze względu na kompaktową budowę materiałów PCM ciepło utajone jest znacznie wyższe niż ciepło jawne.

Materiały zmiennofazowe można skwalifikować w sposób przedstawiony na poniższym schemacie (rys. 13).



Rys. 13 Podział materiałów zmiennofazowych [25]

Autorzy [79] poruszyli tematykę nawierzchni betonowych z zastosowaniem materiałów zmiennofazowych w celu magazynowania ciepła, które później może zostać wykorzystane do odładzania. Materiał zmiennofazowy – olej parafinowy został użyty na dwa sposoby: poprzez umieszczenie w kruszywie lekkim dodawanym do betonu oraz jako materiał zmiennofazowy umieszczony w rurach zamocowanych w betonie. Badania wykazały potencjał w stosowaniu materiałów zmiennofazowych w mieszankach

betonowych oraz szybsze rozpuszczenie śniegu. Na badanych próbkach śnieg był w stanie całkowicie roztopić się samoczynnie w temperaturze 2°C, a na standardowej próbce referencyjnej dopiero gdy temperatura podniosła się do 7°C. W temperaturze 0°C próbka z parafiną wykazała większą zdolność do rozpuszczenia śniegu, jednakże nie całkowitą. Zauważono, że ciepło wydzielane przez materiał zmiennofazowy zawierający się w składzie mieszanki wypuszczane jest stopniowo, natomiast ciepło wydzielane przez materiał umieszczony w rurach nagle, przez krótszy odcinek czasu. Spowodowało to osłabione działanie konstrukcji z rurami w temperaturze niższej, równej 0 °C.

Podobne wnioski mieli Kalombe i inni [80], którzy badali beton z kruszywem mającym funkcję magazynu ciepłego. Keramzyt był impregnowany 1) woskiem parafinowym, 2) mieszanką wosku parafinowego i oleju sojowego oraz 3) mieszanką oleju kokosowego i sojowego. Najlepsze rezultaty opóźnienia oblodzenia osiągnięto dla kruszywa lekkiego zaimpregnowanego mieszanką wosku parafinowego i oleju sojowego oraz mieszanką oleju kokosowego i sojowego.

Za pomocą symulacji numerycznej [81] wykazano, że dzięki zastosowaniu środków zmiennofazowych mieszanki betonowe znacząco zmniejszyły amplitudę temperatur w porównaniu do mieszanek typowych, a liczba cykli zamarzanie-rozmrażanie spadła o połowę.

Ewentualne stosowanie materiałów fazowych wymaga przeanalizowania temperatur zmiany fazy, aby pasowały do temperatur jakie występują typowo dla nawierzchni drogowej. Dodatkowo temperatury są inne w poszczególnych warstwach, więc trzeba to brać pod uwagę na etapie projektowania. Co więcej, dodanie środków zmiennofazowych może wpływać na obniżenie przewodności cieplnej [82].

3.5 Projekty badawcze o tematyce nawierzchni samoodładzających na świecie

Tematem nawierzchni samoodładzających w latach 2016-2020 zajmowali się pracownicy Uniwersytetu technologicznego Chalmersa w Göteborgu.

Raheb Mirzanamadi w swojej pracy doktorskiej [83] analizował wpływ składników mieszanki na właściwości termiczne mieszanek mineralno-asfaltowych. Stosując metodę TPS, która wykorzystuje czujnik zwany „gorącym dyskiem” umieszczony pomiędzy dwoma próbkami materiału, zbadano pięć spośród typowych mieszanek stosowanych w Szwecji. Mieszanki nie były wytwarzane w laboratorium, zostały dostarczone w formie gotowych próbek przez firmę Skanska. Dodatkowo wykonano modele obliczeniowe, które porównano z otrzymanymi w trakcie badań wynikami. Modele te wykorzystano również do określenia wpływu dodatku grafitu do lepiszcza. Na podstawie wykonanych modeli ustalono, że dodanie 1% grafitu do lepiszcza powoduje wzrost przewodności cieplnej o 0,01 W/(mK) dla mieszanek z kruszywa diabazowego oraz o 0,02 W/(mK) dla mieszanek z kruszywa diabazowego o ziarnie poniżej 4mm oraz kruszywa kwarcytowego

powyżej 4 mm. Wysunięto przypuszczenie, że wpływ na stopień działania dodatku grafitu mają parametry takie jak zastosowane kruszywo oraz zawartość wolnych przestrzeni. Wykonano również model obliczeniowy pozwalający przeanalizować rozwiązanie ogrzewanych nawierzchni hydraulicznych (eng. hydronic). Aby ograniczyć ryzyko uszkodzeń instalacji, rury zostały umieszczone w warstwie wiążącej. Obliczenia wykonano dla danych klimatycznych w miejscu planowanego odcinka testowego (Östersund), w którym średnia roczna temperatura wynosi $2,53^{\circ}\text{C}$. Założono, że system będzie działał gdy spełnione będą następujące warunki: temperatura powierzchni mniejsza od temperatury punktu rosy $T_{\text{surface}} < T_{\text{dew}}$ oraz mniejsza od 0°C $T_{\text{surface}} < 0^{\circ}\text{C}$, a temperatura otoczenia będzie większa od -12°C , $T_{\text{ot}} > -12^{\circ}\text{C}$.

W [84] porównano wpływ parametrów na zapotrzebowanie energetyczne, opisano m.in. jaki wpływa ma odległość pomiędzy rurkami, ich zagłębienie w nawierzchni oraz ich średnica, a także przewodność cieplna warstwy ścieralnej, temperatura cieczy oraz w jakiej temperaturze działanie systemu ma mniejszy sens.

W 2017 r. firma Eurovia wprowadziła do swojej oferty Power Road® - drogę produkującą czystą i odnawialną energię ciepłą. Energia produkowana jest poprzez wykorzystanie promieniowania słonecznego padającego na drogę. Energia ta może być magazynowana, a następnie przekazywana do odbiorcy (ogrzewanie budynków, odładzanie nawierzchni, podgrzewanie basenów) poprzez system pomp ciepła. Pierwszy prototyp testowany był we Francji w 2014 r [85].

W latach 2018-2022 realizowano projekt Snowless, finansowany w programie UE Horyzont 2020. Projekt zakładał opracowanie elektrycznego automatycznego systemu odładzania i kontroli śniegu, sterowanego inteligentnym systemem monitorowania. Efektem projektu jest rozwiązanie zaprojektowane przy zastosowaniu połączenia opatentowanego sprzętu oraz oprogramowania. W górnej warstwie nawierzchni osadzone są taśmy grzewcze ze stopu amorficznego, charakteryzujące się wysoką wytrzymałością. Są to długie, płaskie elementy o prostokątnym przekroju, w którym znajduje się metalowy rdzeń wytwarzający ciepło w trakcie przepływu prądu. System działa za pomocą zdalnie sterowanego oprogramowania opartego na danych pogodowych dla czasu rzeczywistego. Opisano wykonany odcinek testowy w skali rzeczywistej – umieszczano taśmy na długości drogi, w wykonanych w świeżej nawierzchni bruzdach na warstwie lepiszcza asfaltowego służącego jako klej. Następnie były przykrywane kolejną warstwą lepiszcza. Wszystkie taśmy połączone były rozłożonymi w poprzek drogi kablami. Rozwiązanie sprawdziło się oraz zauważono potencjał do wykonywania go w rzeczywistości. Zwrócono jednak uwagę na konieczność monitorowania umieszczenia instalacji, w celu ochrony jej przed ewentualnymi uszkodzeniami w trakcie wykonywania odwiertów dla kontroli układanej mieszanki.

Dodatkowo zauważono potrzebę dalszych prac nad metodą instalacji systemu, ponieważ umieszczenie płataniny kabli łączących taśmy wpływa na osłabienie konstrukcji drogi oraz nie pozwala na automatyzację procesu [86].

3.6 Podsumowanie

Tematyka nawierzchni samoodładzających, choć znana od lat, wciąż nie jest do końca zbadana. Wiele z realizacji, które miały miejsce nie zostało publicznie opisane po latach od wybudowania ze wskazaniem wad, zalet, trwałości rozwiązań, ich wydajności oraz kierunków, które powinny zostać obrane aby rozwijać tę ciekawą technologię.

Część z wykonanych odcinków została w zasadzie przedstawiona jako ciekawostka, w źródłach informujących o ich realizacji nie podawano szczegółowych informacji o technologii wykonania. Projekty badawcze realizowane w danej tematyce nierzadko są rozprawami opierającymi się jedynie na literaturze oraz obliczeniach, bez wykonania testów w warunkach rzeczywistych lub chociaż laboratoryjnych. Zadaniem ważnym do wykonania w ramach danego opracowania wydaje się opracowanie koncepcji, którą można byłoby wdrożyć do realizacji w przedsiębiorstwie, co pozwoliłoby w późniejszym okresie na stałą obserwację wykonanego odcinka, wyciągnięcie wniosków oraz ciągłe doskonalenie i rozwijanie technologii.

Aspektem koniecznym do rozwinięcia wydaje się porównanie właściwości termicznych mieszanek, z uwzględnieniem parametrów jakościowych mieszanek nawierzchniowych i ich zasadności do stosowania w praktyce. Dotychczasowe badania skupiały się głównie na parametrach termicznych rozwiązań nietypowych, bez zagłębiania się na zmianę parametrów fizycznych mieszanek.

Planując realizację nawierzchni samoodładzającej należy wziąć pod uwagę czy technologia układania warstwy nawierzchni z betonu asfaltowego nie uszkodzi instalacji. 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 [6].

Niewątpliwym minusem zdaje się być ograniczenie dostępnych materiałów do wykonywania nawierzchni asfaltowych, których temperatura jest za wysoka do stosowania rozwiązań typowych oraz najbardziej powszechnych na terenie Polski, stosowanych do ogrzewania podłogowego w domach oraz np. w budynkach przemysłowych lub produkcyjnych.

Warto byłoby stworzyć schemat, który pozwoliłby na dobór optymalnej technologii w zależności od lokalizacji i dostępnych na miejscu źródeł energii.

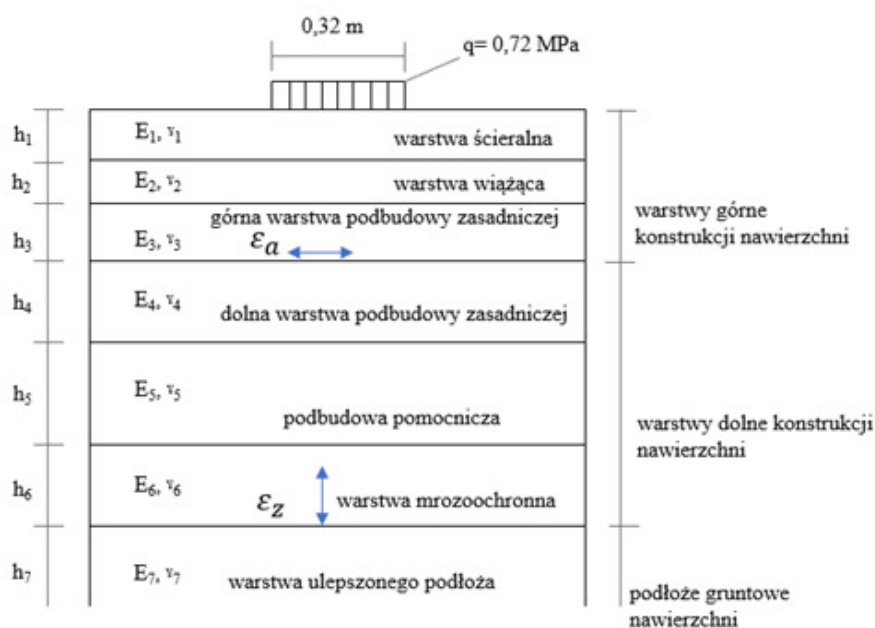
4 METODY WYMIAROWANIA WARSTW KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI STOSOWANE W POLSCE

4.1 Wprowadzenie

Zagadnieniem istotnym dla projektowania nawierzchni drogowych jest niewątpliwie zagadnienie wymiarowania warstw konstrukcji nawierzchni.

W Polsce brak jest oficjalnej metody wymiarowania konstrukcji nawierzchni z warstwami z mieszanek mineralno-asfaltowych. Projektanci mają do dyspozycji tzw. Katalogi, w których znajdują się zbiory nawierzchni o różnych grubościach warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych oraz różnych rodzajach podbudów (z kruszywa niezwiązanego, z kruszywa związanego cementem oraz z mieszanek mineralno-asfaltowych). Są opracowane dwa Katalogi: Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych, GDDKiA, Warszawa, 2014 [87] oraz Katalog typowych konstrukcji podatnych z betonem asfaltowym o wysokim module sztywności [88].

Nawierzchnie w katalogach zostały zaprojektowane według metody mechanistycznej projektowania konstrukcji, zgodnie z którą nawierzchnię traktuje się jako układ warstw o określonych grubościach na podłożu gruntowym o nieskończonej grubości [89], [90]. Modelem przyjętym do obliczeń trwałości nawierzchni dla konstrukcji nawierzchni podatnych i sztywno-podatnych (półsztywnych) przyjęto sprężystą półprzestrzeń warstwową (rys. 14). Każda z warstw półprzestrzeni charakteryzowana jest przez trzy parametry: grubość (h), współczynnik Poissona (ν), mówiący o sposobie odkształcania się danej warstwy, oraz moduł (E), opisujący sprężystość warstwy.



Rys. 14 Model konstrukcji nawierzchni drogowej

W metodzie mechanistycznej przyjmuje się powszechnie stosowany schemat niszczenia nawierzchni podatnych, w którym występują dwa rodzaje odkształceń krytycznych [89]:

- odkształcenie rozciągające w spodzie ostatniej dolnej warstwy asfaltowej ϵ_a ;
- odkształcenie ściskające na powierzchni podłoża gruntowego ϵ_z .

W modelu oblicza się dla określonych parametrów modelu maksymalne odkształcenia rozciągające w warstwach z mieszanek mineralno-asfaltowych oraz w podłożu gruntowym.

Obciążenie modelu przyjmuje się najczęściej jako równoważne naciskowi koła standardowego równego 50 kN lub 57,5 kN (obciążenie osi 100 lub 115 kN).

Nawierzchnia drogowa traci swoją nośność w momencie wyczerpania się jej trwałości zmęczeniowej. Trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni definiujemy jako liczbę równoważnych osi standardowych, którą może przenieść konstrukcja nawierzchni do wystąpienia stanu krytycznego, określonego liczbą spękań zmęczeniowych lub głębokością kolein strukturalnych.

Dla konstrukcji z Katalogu [87] przyjęto kryterium AASHTO 2004 (USA) [89], a dla Katalogu [88] kryterium stosowane we Francji [89]. Poniżej opisane będą stosowane metody. Celem niniejszego rozdziału jest wskazanie jakie podstawowe parametry mieszanek mineralno-asfaltowych decydują o grubościach warstw projektowanych konstrukcji nawierzchni.

4.2 Kryterium zmęczeniowe warstw asfaltowych według AASHTO 2004

Kryterium spękania warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych w metodzie AASHTO 2004 opisuje zależność (1):

$$N_f = D \cdot C \cdot k_1 \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^{k_2} \left(\frac{1}{E} \right)^{k_3} \quad (1)$$

gdzie:

N_f – liczba powtarzalnych obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych na 50% całkowitej powierzchni pasa ruchu,

ϵ_t – odkształcenie rozciągające w krytycznym punkcie przekroju,

E – moduł sztywności materiału,

C – współczynnik zależny od właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej,

k_1, k_2, k_3 – współczynniki regresji,

D – szkoda zmęczeniowa wywołana na spodzie warstw asfaltowych jako funkcja ilości spękań FC, wyrażona jako liczba, a nie procent.

Zależność (1) została skalibrowana do warunków terenowych i ostatecznie przybrała postać (2):

$$N_f = D \cdot 7,3557(10^{-6}) C k'_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,9492} \left(\frac{1}{E}\right)^{1,281} \quad (2)$$

gdzie:

N_f – liczba powtarzalnych obciążeń do powstania spękań zmęczeniowych na 50% całkowitej powierzchni pasa ruchu,

D – szkoda zmęczeniowa wywołana na spodzie warstw asfaltowych jako funkcja ilości spękań FC, wyrażona jako liczba, a nie procent,

k'_1 – parametr zależny od grubości warstw asfaltowych i charakteru ich pracy, odpowiednio stosuje się wzory (3), (4):

$$k'_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 1,374 h_{ac})}}} - \text{spękania „z dołu do góry”} \quad (3)$$

$$k'_1 = \frac{1}{0,01 + \frac{12,00}{1 + e^{(15,676 - 1,1097 h_{ac})}}} - \text{spękania „z góry do dołu”} \quad (4)$$

gdzie:

h_{ac} – grubość pakietu warstw asfaltowych w konstrukcji nawierzchni [cm],

ε_t – odkształcenie rozciągające w krytycznym punkcie, w przekroju pionowym nawierzchni, liczba bezwymiarowa,

E – moduł sztywności warstwy asfaltowej [MPa],

C – współczynnik zależny od właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej, określony zależnością (5):

$$C = 10^M; \quad M = 4,84 \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0,69 \right) \quad (5)$$

gdzie:

V_b – objętościowa zawartość asfaltu [%], objętościowo],

V_a – zawartość objętościowa wolnej przestrzeni [%], objętościowo].

Natomiast ilość spękań zmęczeniowych w zależności od szkody zmęczeniowej oblicza się według zależności (6) i (7):

$$F C_{bottom} = \left(\frac{100}{1 + e^{(c_1 c'_1 + c_2 c'_2 \log_{10}(D - 100))}} \right) \quad (6)$$

gdzie:

FC_{bottom} – ilość spękań siatkowych (aligatorowych) typu „z dołu do góry”, wyrażona w procentach w stosunku do całej powierzchni pasa ruchu,

D – szkoda zmęczeniowa wywołana na spodzie warstw asfaltowych jako funkcja ilości spękań FC , wyrażona jako liczba, a nie procent.

Współczynniki kalibracyjne są następujące:

$$C_1 = 1,0$$

$$C'_1 = -2C'_2$$

$$C_2 = 1,0$$

$$C'_2 = 2,40874 - 39,748 (1 + h_{ac}/2,54)^{-2,86}$$

gdzie h_{ac} – grubość warstw asfaltowych [cm].

Po wstawieniu podanych współczynników kalibracyjnych do wzoru otrzymano:

$$FC_{bottom} = \left(\frac{100}{1 + e^{(-2C'_2 + C'_2 \log_{10}(D-100))}} \right) \quad (7)$$

z oznaczeniami jak poprzednio.

Ilość spękań typu z „góry na dół” oblicza się ze szkody zmęczeniowej z zależności (8), podanego w jednostkach metrycznych:

$$FC_{top} = \left(\frac{17,936}{1 + e^{(7,0 - 3,5 \log_{10}(D-100))}} \right) \quad (8)$$

gdzie:

FC_{top} – ilość spękań podłużnych, liniowych „z góry na dół”, w metrach bieżących na 1 kilometr długości jednego pasa ruchu,

D – szkoda zmęczeniowa na górze warstw asfaltowych, dla spękań typu „z góry na dół”, wyrażona jako liczba, a nie procent.

Analizując przedstawiony algorytm projektowania widać, że trwałość zmęczeniowa (liczba powtarzalnych obciążeń do utraty nośności) zależy m.in. od modułów warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych oraz zawartości asfaltu i wolnej przestrzeni w mieszance mineralno-asfaltowej w której występują największe odkształcenia rozciągające. Jednocześnie należy zaznaczyć, że moduły warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych są zależne w znacznym stopniu od zawartości asfaltu i wolnej przestrzeni w mieszance oraz temperatury.

4.3 Kryterium zmęczeniowe warstw asfaltowych w metodzie francuskiej

Francuskie kryterium spękań warstw asfaltowych, które ma zastosowanie w konstrukcjach z mieszankami mineralno-asfaltowymi o wysokim module sztywności opisuje zależność [89], [91]:

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon(NE, \theta_{eq}, f) k_r k_c k_s \quad (9)$$

gdzie:

$\varepsilon_{t,ad}$ – dopuszczalne poziome odkształcenie rozciągające, określane na dolnej powierzchni warstw asfaltowych,

$\varepsilon(NE, \theta_{eq}, f)$ – odkształcenie rozciągające, dla którego z 50-proc. prawdopodobieństwem następuje zniszczenie zginanej próbki, otrzymane po NE cyklach obciążenia, w temperaturze ekwiwalentnej θ_{eq} , przy częstotliwości f charakterystycznej dla naprężeń występujących w rozważanej warstwie,

k_r – współczynnik ryzyka,

k_c – współczynnik materiału,

k_s – współczynnik podłoża.

Prawo zmęczenia dla materiałów asfaltowych przedstawia zależność (10):

$$\varepsilon(NE, \theta_{eq}, f) = \varepsilon_6(\theta_{eq}, f) \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b \quad (10)$$

gdzie:

$\varepsilon_6(\theta_{eq}, f)$ – odkształcenie rozciągające, przy którym z 50-proc. prawdopodobieństwem zachodzi zniszczenie próbki przy zginaniu po 10^6 cyklach, w zadanej temperaturze ekwiwalentnej θ_{eq} oraz dla zadanej częstotliwości f ,

NE – liczba osi obliczeniowych,

b – parametr nachylenia krzywej zmęczenia materiału w układzie współrzędnych $\log \varepsilon - \log N$.

Badaniem do określenia wartości modułu sztywności i odkształcenia rozciągającego ε_σ jest test kontrolowanego odkształcenia wspornikowej belki trapezowej. W sytuacji braku możliwości wykonania badań laboratoryjnych współczynnik ε_6 można wyznaczyć na podstawie zależności (11) [89], [91]:

$$\varepsilon_6(\theta) \times E(\theta) = const. \quad (11)$$

gdzie:

$\varepsilon_6(\theta)$ – odkształcenie rozciągające, przy którym z 50-proc. prawdopodobieństwem zachodzi zniszczenie próbki przy zginaniu po 10^6 cyklach, w zadanej temperaturze ekwiwalentnej θ ,

$E(\theta)$ – moduł sprężystości w zadanej temperaturze θ .

Dla typowych warunków pracy konstrukcji zależność (11) przyjmuje postać (12):

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon_{\sigma} \left(\frac{N}{10^6} \right)^b \left(\frac{E(10^{\circ}C)}{E(\theta)} \right)^{0.5} k_c k_r k_s \quad (12)$$

gdzie:

$\varepsilon_{t,ad}$ – dopuszczalne poziome odkształcenie rozciągające, określane na dolnej powierzchni warstw asfaltowych,

ε_6 – odkształcenie przy 1 mln obciążeń, zależne od rozpatrywanej mieszanki mineralno-asfaltowej,

N – liczba powtarzalnych obciążeń,

b – parametr nachylenia krzywej zmęczenia materiału w układzie współrzędnych $\log \varepsilon - \log N$,

$E(10^{\circ}C)$ – moduł mieszanki w temperaturze $10^{\circ}C$,

$E(\theta)$ – moduł sprężystości w zadanej temperaturze θ ,

k_c – współczynnik materiału, zależny od rozpatrywanej mieszanki mineralno-asfaltowej,

k_s – współczynnik podłoża, uwzględniający efekt miejscowego braku zdolności do przenoszenia obciążeń warstwy znajdującej się pod warstwą rozpatrywaną,

k_r – współczynnik ryzyka przyjęty według zależności (13), dostosowujący dopuszczalne odkształcenie rozciągające do dobranego ryzyka, wyznaczonego na podstawie odchylenia standardowego grubości warstwy Sh oraz odchylenia standardowego wyników testów zmęczeniowych SN [89], [91]:

$$k_r = 10^{-ub\delta} \quad (13)$$

u – losowa wariancja rozkładu normalnego związanego z przyjętym ryzykiem r ,

b – jak wyżej,

δ – odchylenie standardowe łączące odchylenia standardowe: grubości warstw nawierzchni Sh i testów zmęczeniowych SN , parametr liczony według zależności (14) [89], [91]:

$$\delta = [SN^2 + \left(\frac{c^2}{b^2}\right)Sh^2]^{0.5} \quad (14)$$

c – współczynnik łączący wariancję odkształcenia w nawierzchni z losową wariancją grubości,

SN – odchylenie standardowe prób zmęczeniowych,

Sh – odchylenie standardowe grubości nawierzchni,

Analizując kryterium francuskie widać, że za trwałość zmęczeniową mieszanek mineralno-asfaltowych o wysokim module sztywności odpowiadają moduły oraz odkształcenia mieszanek dla 1 mln osi standardowych.

4.4 Podsumowanie

Przeprowadzone analizy metod projektowania konstrukcji nawierzchni pokazały, że podstawowymi parametrami wpływającymi na trwałość zmęczeniową konstrukcji mieszanek mineralno-asfaltowych są: zawartość asfaltu oraz wolnej przestrzeni w mieszance, pośrednio również kruszywo wpływając na sztywność mieszanek i trwałość zmęczeniową, jak również temperatura.

Przeprowadzona wcześniej analiza literatury w tematyce właściwości termicznych mieszanek mineralno-asfaltowych wykazała z kolei, że parametrami mającymi największy wpływ na wartość współczynnika przewodności cieplnej mieszanek jest zastosowane w składzie mieszanki kruszywo oraz zawartość wolnej przestrzeni. Dodatkowo im cieńsza jest warstwa nawierzchni do ogrzania powyżej umieszczonej instalacji, tym mniej ciepła jest potrzebne do ogrzania powierzchni.

Na etapie wymiarowania konstrukcji wstępnie zasadne wydaje się stosowanie do standardowych wymagań odnośnie projektowania i wymiarowania konstrukcji, z równoczesnym spojrzeniem na wybór konstrukcji o cieńszych warstwach ścieralnej i wiążącej. Istotny jest również dobór parametrów zawartości wolnej przestrzeni, asfaltu oraz rodzaju stosowanego kruszywa w mieszance – sprawdzenie wpływu składu mieszanki zostanie sprawdzone i opisane w dalszych punktach niniejszej pracy.

5 ANALIZA WARUNKÓW ŚRODOWISKOWYCH I LOKALIZACYJNYCH

5.1 Wprowadzenie

W rozwiązaniu nawierzchni odladzających istotnym parametrem wpływającym na dobór rozwiązania jest lokalizacja planowanej inwestycji. Znając lokalizację można określić potrzebną moc instalacji grzewczej, można zaprojektować konstrukcję nawierzchni, a także dobrać mieszanki materiałowe odpowiednie dla danej lokalizacji – optymalne pod względem dostępności materiałów. Aby poprawnie zaprojektować instalację potrzebna jest charakterystyka pogodowa, a także dostępność sieci w danym miejscu. W poniższym rozdziale podjęto próbę analizy warunków środowiskowych i lokalizacji, tworząc w ten sposób bazę podstawowych informacji, na których opierając się można planować projektowanie i wdrażanie nawierzchni odladzających w Polsce. Rozdział ten zostanie podzielony na dwie zasadnicze części zajmujące się: warunkami środowiskowymi i kwestiami lokalizacji.

5.2 Warunki środowiskowe w Polsce

Powód dla którego poruszana w pracy tematyka jest tak ważna to bezpieczeństwo użytkowania dróg, na które w sposób zdecydowany wpływają warunki środowiskowe. Gołoledź i śnieg na drogach przyczynia się do znacznego zwiększenia drogi hamowania, a nawet utraty panowania nad pojazdem w czasie manewrów. Dlatego podstawowym działaniem mającym na celu poprawienie warunków użytkowania dróg w okresie zimowym jest zdiagnozowanie problemu – temperatury spadające poniżej punktu zamarzania wody oraz skali i częstotliwości jego występowania.

5.2.1 Dane meteorologiczne ze stacji pomiarowych

W celu określenia charakterystyki warunków panujących w Polsce, uzyskano dane meteorologiczne z drogowych stacji pogodowych dla 14 lokalizacji. Zlokalizowane są one w 13 województwach, a na ich podstawie można określić przybliżoną charakterystykę pogodową Polski. Lokalizację punktów pomiarowych, branych pod uwagę w analizie przedstawiono poniżej (rys. 15).

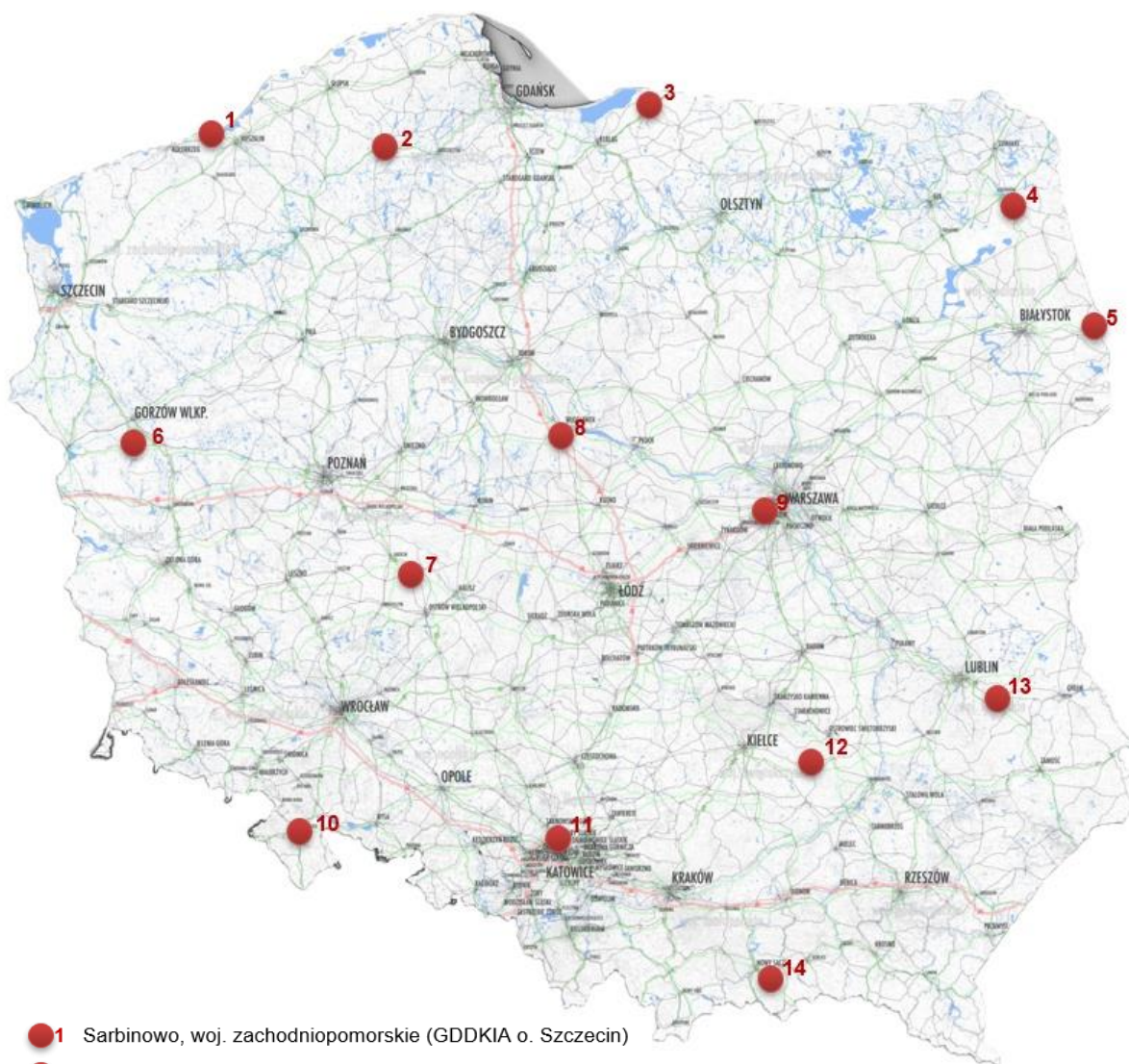
Dane uzyskano z odpowiednich oddziałów Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad. W zależności od lokalizacji, otrzymane dane zawierają informacje odnośnie:

- temperatury w obrębie nawierzchni (na poziomie w stosunku do powierzchni +20cm, 0 cm, -5 cm, -30 cm)
- temperatury powietrza
- temperatury odczuwalnej
- temperatury punktu rosy
- prędkości średniej i maksymalnej oraz kierunku wiatru
- wilgotności powietrza
- stanu nawierzchni
- obecności środka odladzającego
- intensywności opadu.

Posiadane dane analizowano w zakresie opracowania rozkładu rocznego temperatury w zależności od lokalizacji, uśrednionego dobowego rozkładu temperatury dla poszczególnych miesięcy. Przeprowadzono również analizę rozkładu temperatury w konstrukcji nawierzchni (porównanie temperatury powietrza powyżej nawierzchni, na poziomie powierzchni, 5 cm poniżej powierzchni oraz na warstwie gruntu). Dzięki czemu możliwe będzie określenie okresów potencjalnie niebezpiecznych na drodze.

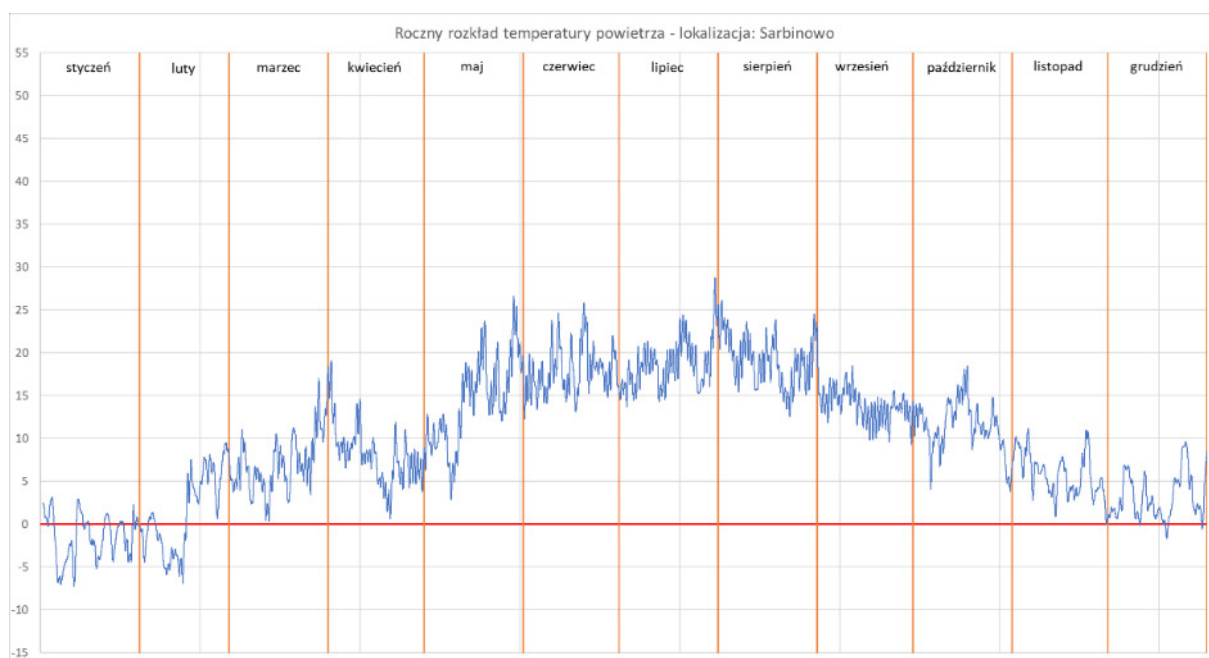
Na podstawie analizy uzyskanych danych stworzono i zestawiono wykresy prezentujące roczny rozkład temperatury powietrza w miejscach analizowanych stacji pogodowych (rys. 16 – rys. 29). Zauważyć można, że temperatura w okresie grudzień – luty spada i oscyluje w okolicy 0°C, w zależności od lokalizacji nawet niżej. W marcu temperatury

bliskie 0°C pojawiają się rzadziej, ale są obecne. Niekiedy spadek temperatury w okolicę 0°C zauważyć można nawet w kwietniu i maju. Brak danych w niektórych lokalizacjach w miesiącach letnich spowodowany jest odbywającymi się pracami konserwacyjnymi.

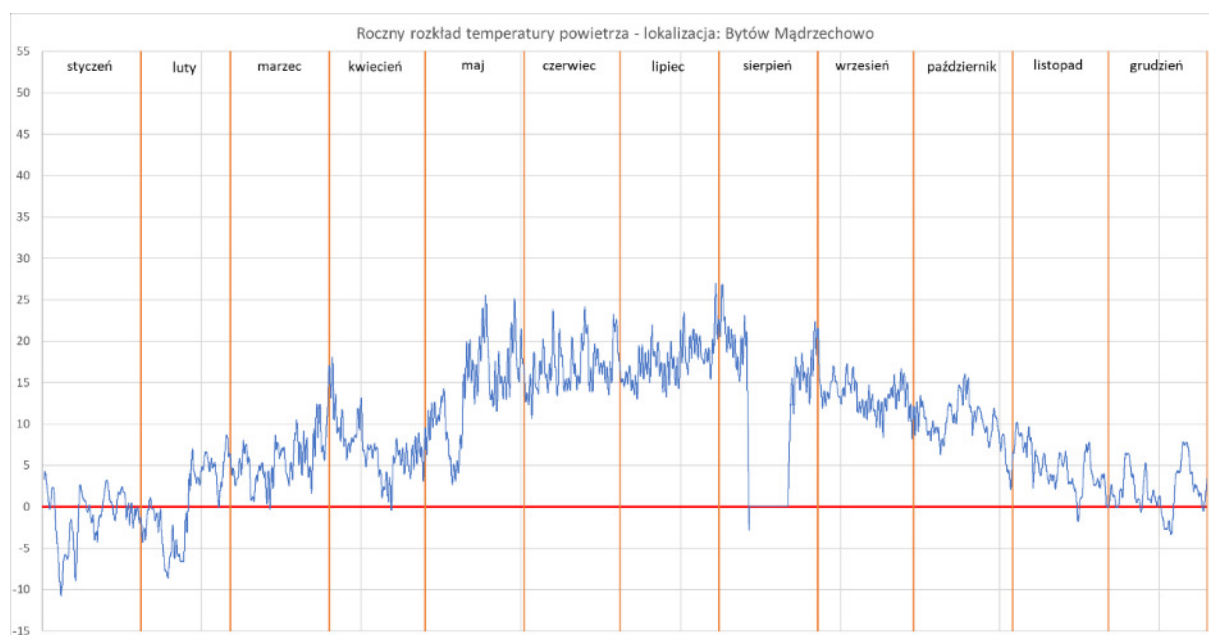


- 1 Sarbinowo, woj. zachodniopomorskie (GDDKIA o. Szczecin)
- 2 Bytów Mądrzechowo, woj. pomorskie (GDDKIA o. Gdańsk)
- 3 Węzeł Braniewo, woj. warmińsko-mazurskie (GDDKIA o. Olsztyn)
- 4 Białobrzegi, woj. podlaskie (GDDKIA o. Białystok)
- 5 Bobrowniki, woj. podlaskie (GDDKIA o. Białystok)
- 6 Bolemin, woj. lubuskie (GDDKIA o. Zielona Góra)
- 7 Dobrzyca, woj. wielkopolskie (GDDKIA o. Poznań)
- 8 Kowal, woj. kujawsko-pomorskie (GDDKIA o. Bydgoszcz)
- 9 Węzeł Pruszków, woj. mazowieckie (GDDKIA o. Białystok)
- 10 Kłodzko Estakada, woj. dolnośląskie (GDDKIA o. Wrocław)
- 11 Piekary Śląskie A1, woj. śląskie (GDDKIA o. Katowice)
- 12 Łagów, woj. świętokrzyskie (GDDKIA o. Kielce)
- 13 Piaski, woj. lubelskie (GDDKIA o. Lublin)
- 14 Nawojowa, woj. małopolskie (GDDKIA o. Kraków)

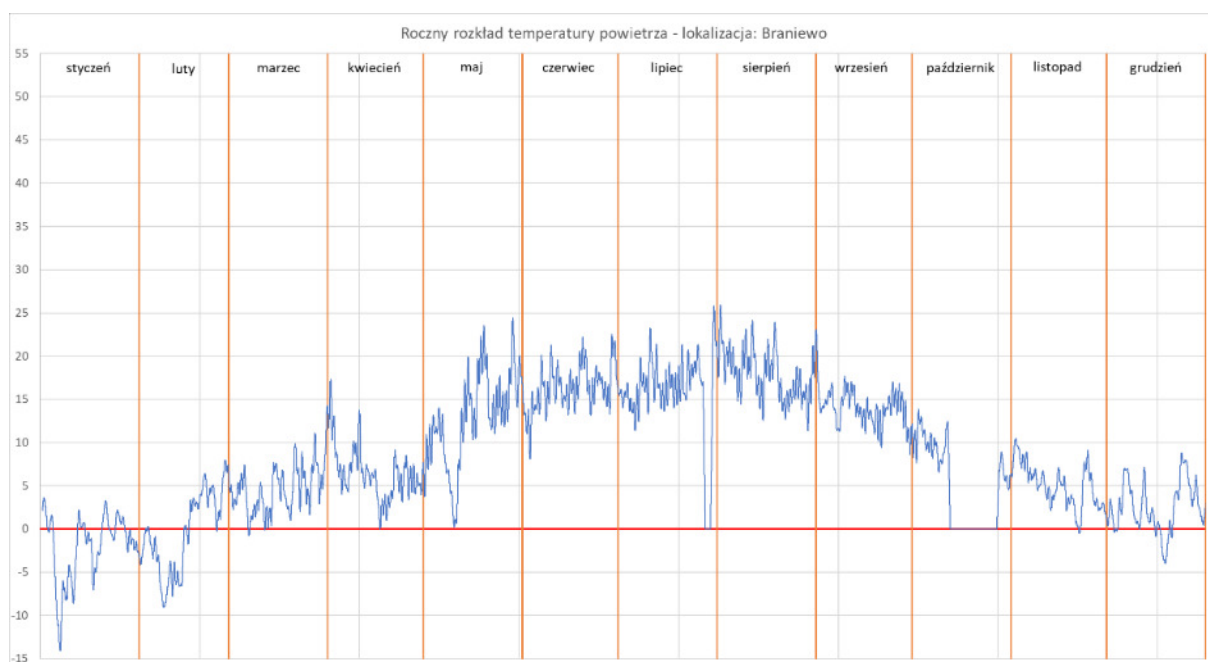
Rys. 15 Lokalizacja drogowych stacji pogodowych na mapie Polski



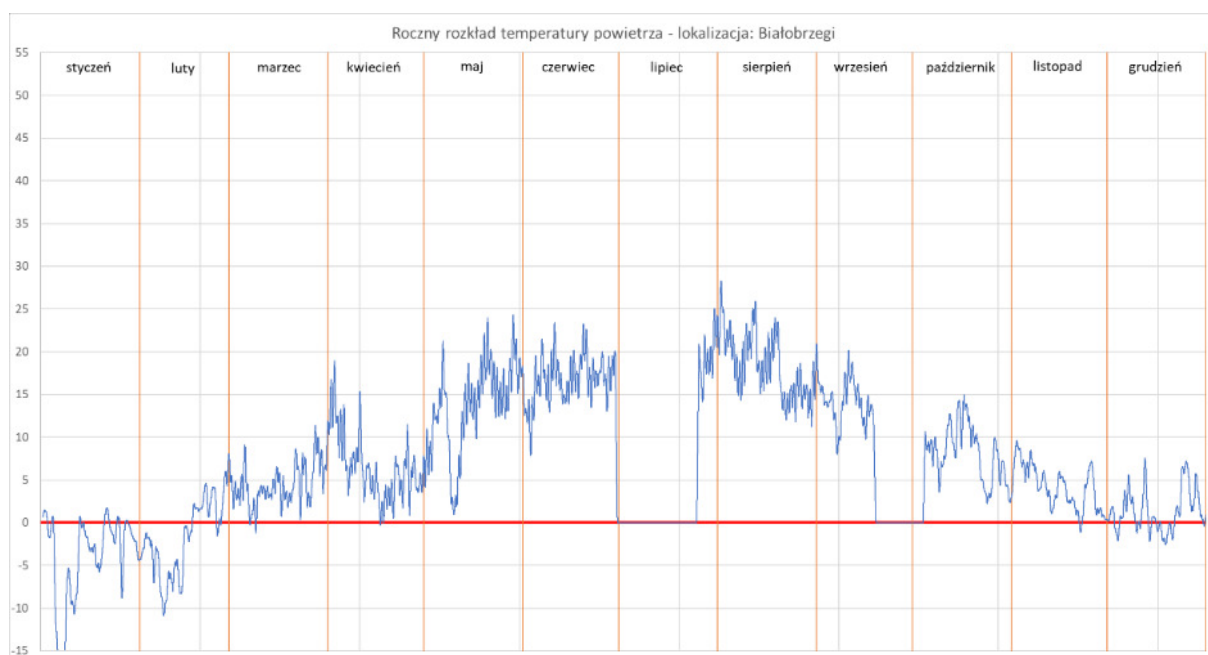
Rys. 16 Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Sarbinowo



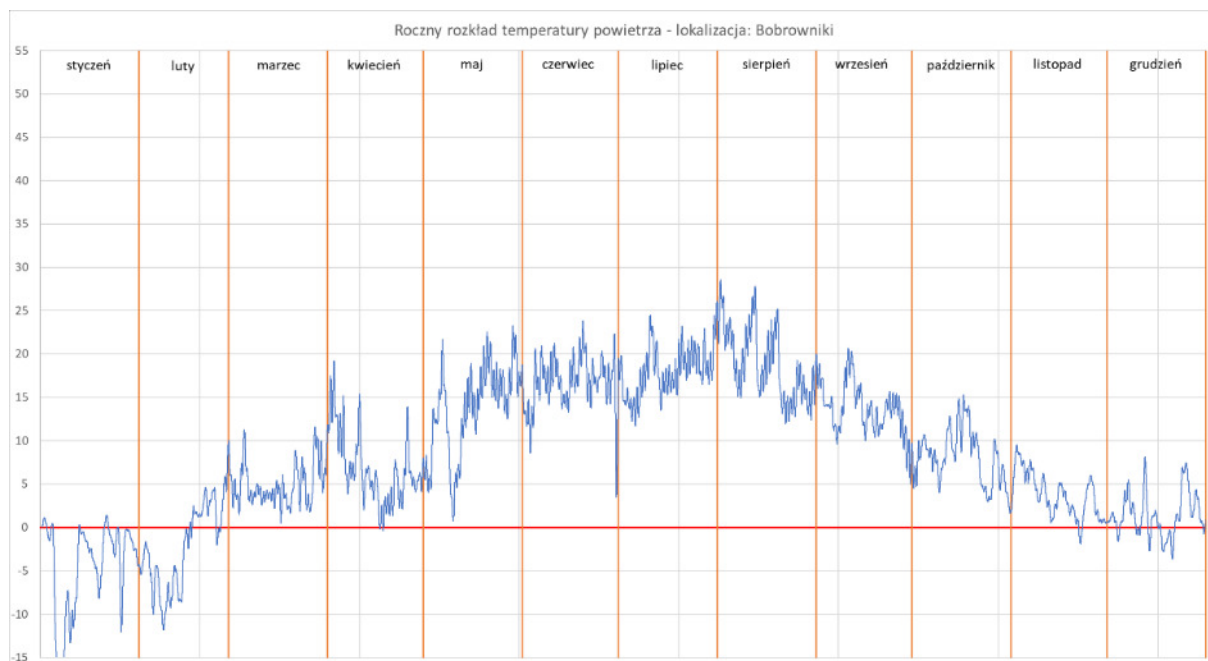
Rys. 17 Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Bytów Mądrzechowo



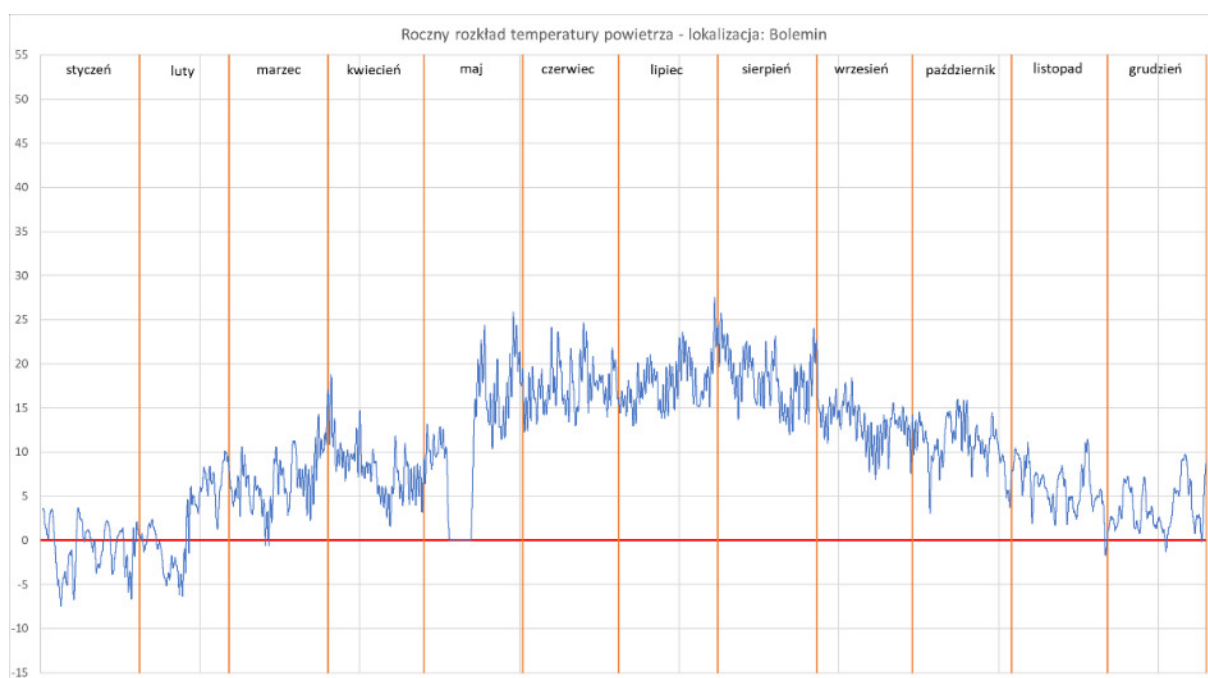
Rys. 18 Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Węzeł Braniewo



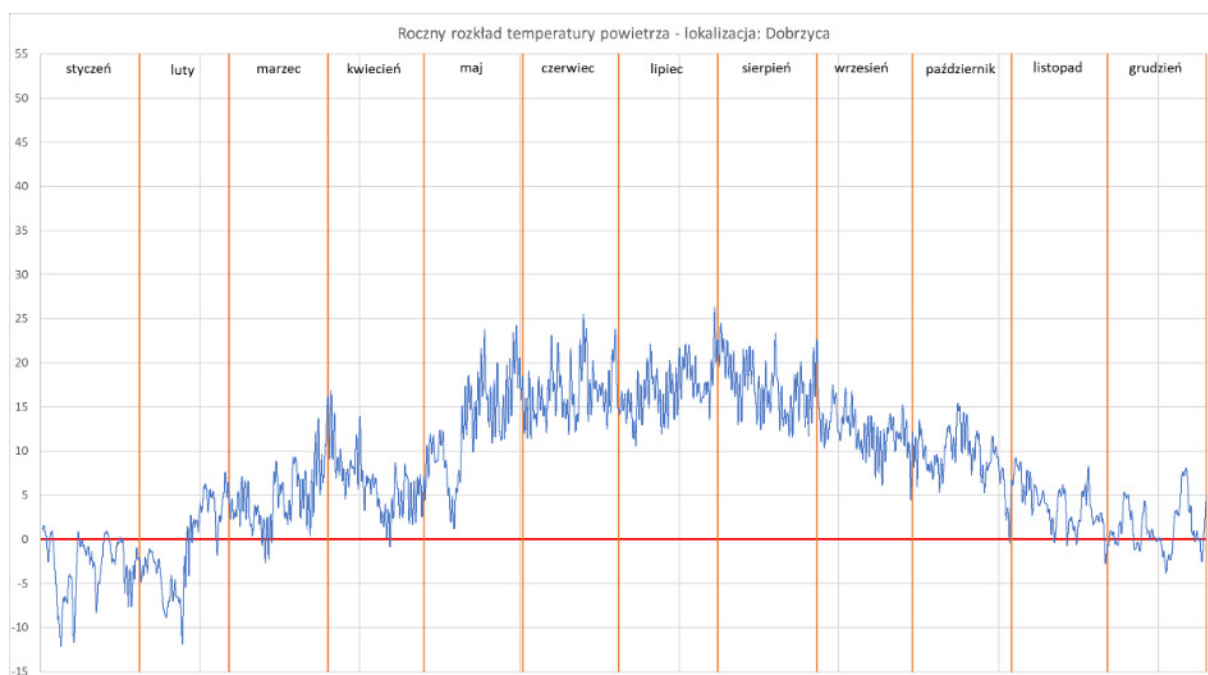
Rys. 19 Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Białobrzegi



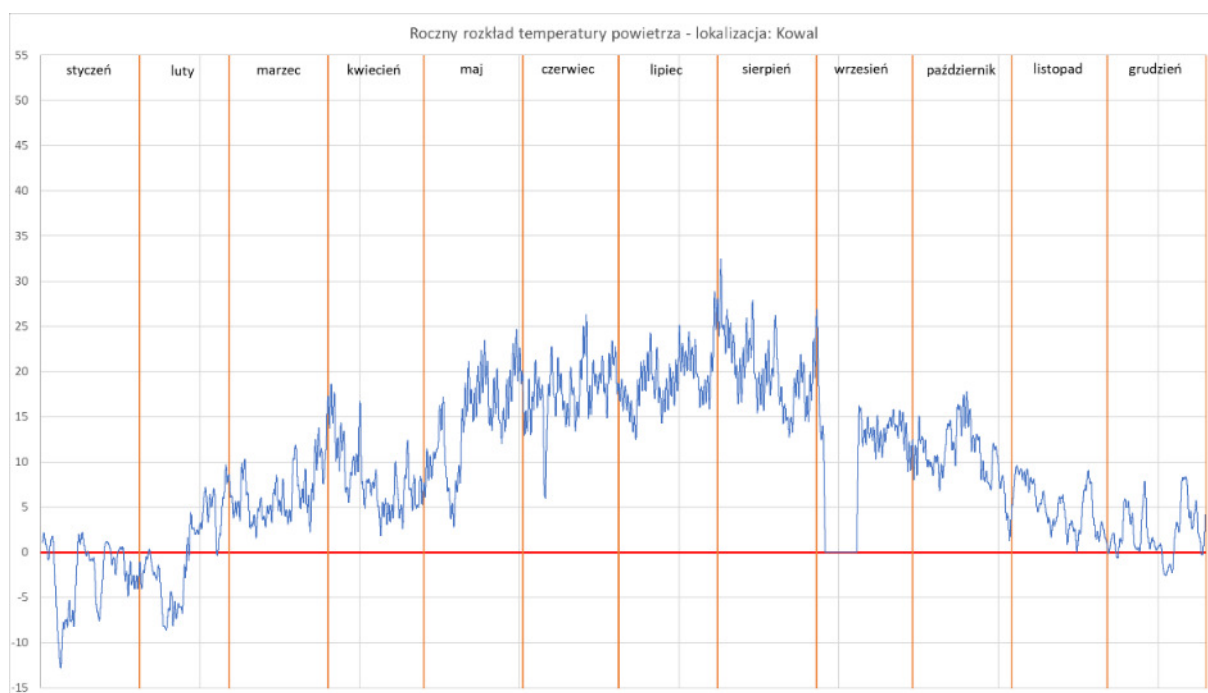
Rys. 20 Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Bobrowniki



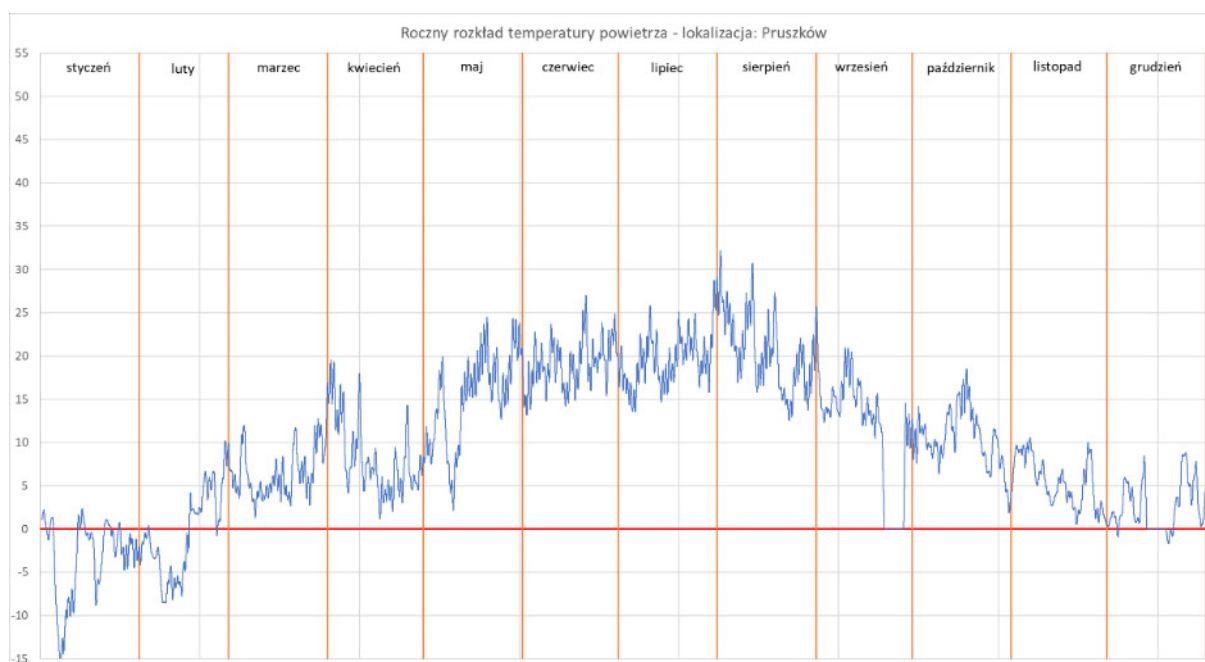
Rys. 21 Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Bolemin



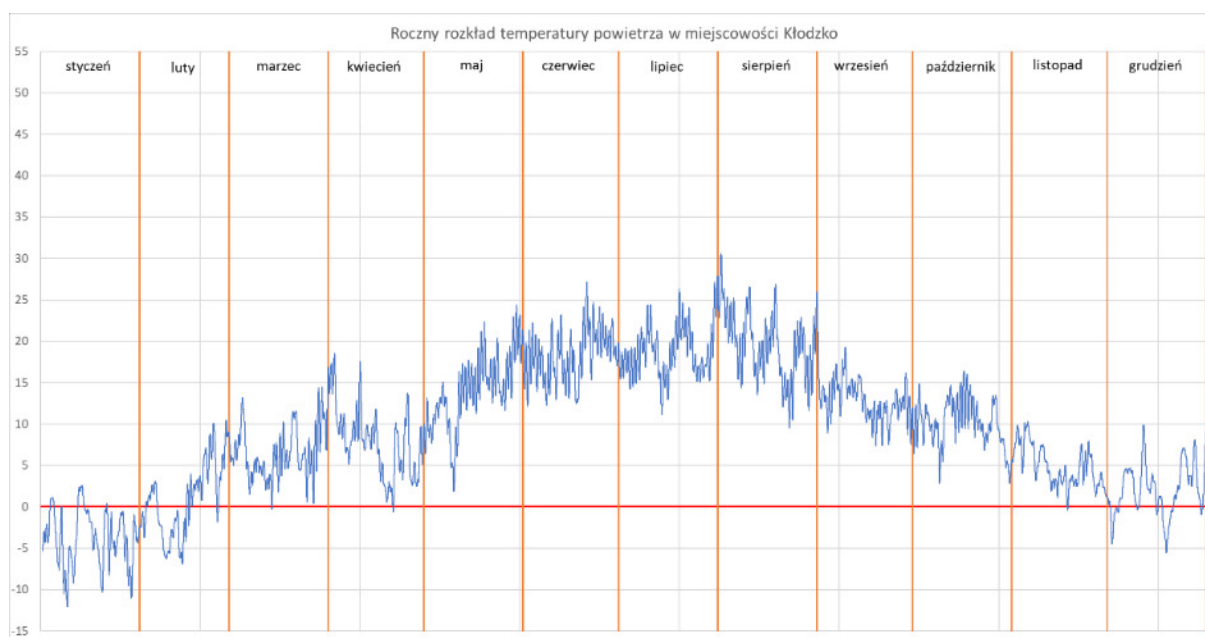
Rys. 22 Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Dobrzyca



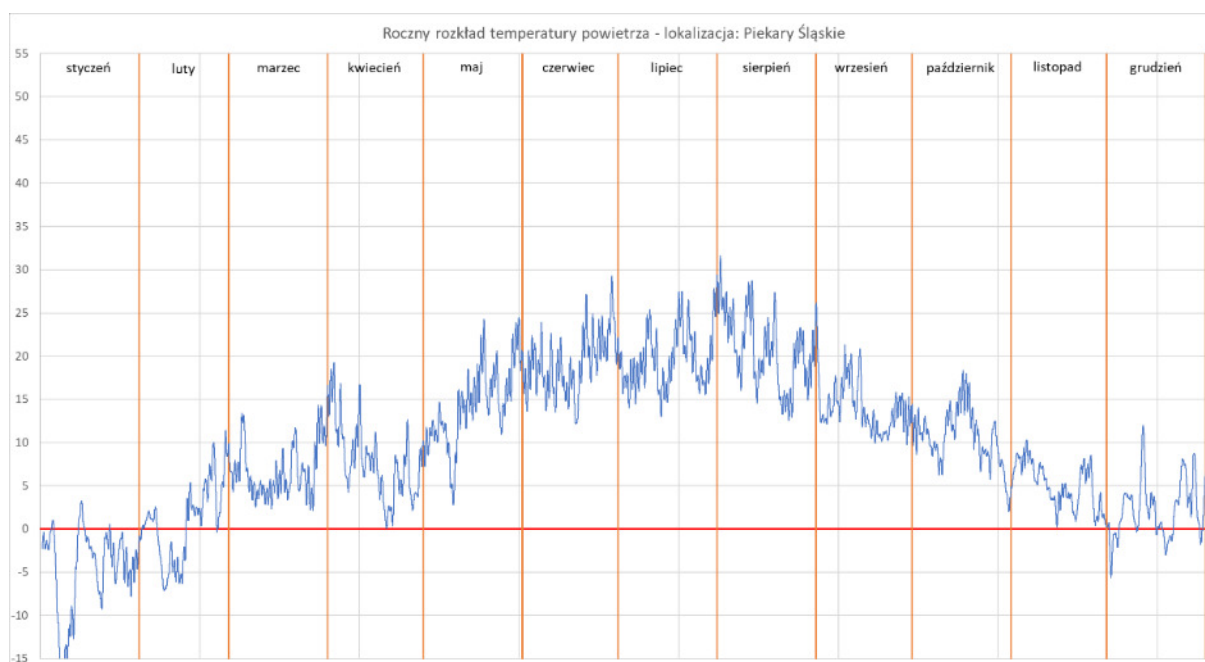
Rys. 23 Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Kowal



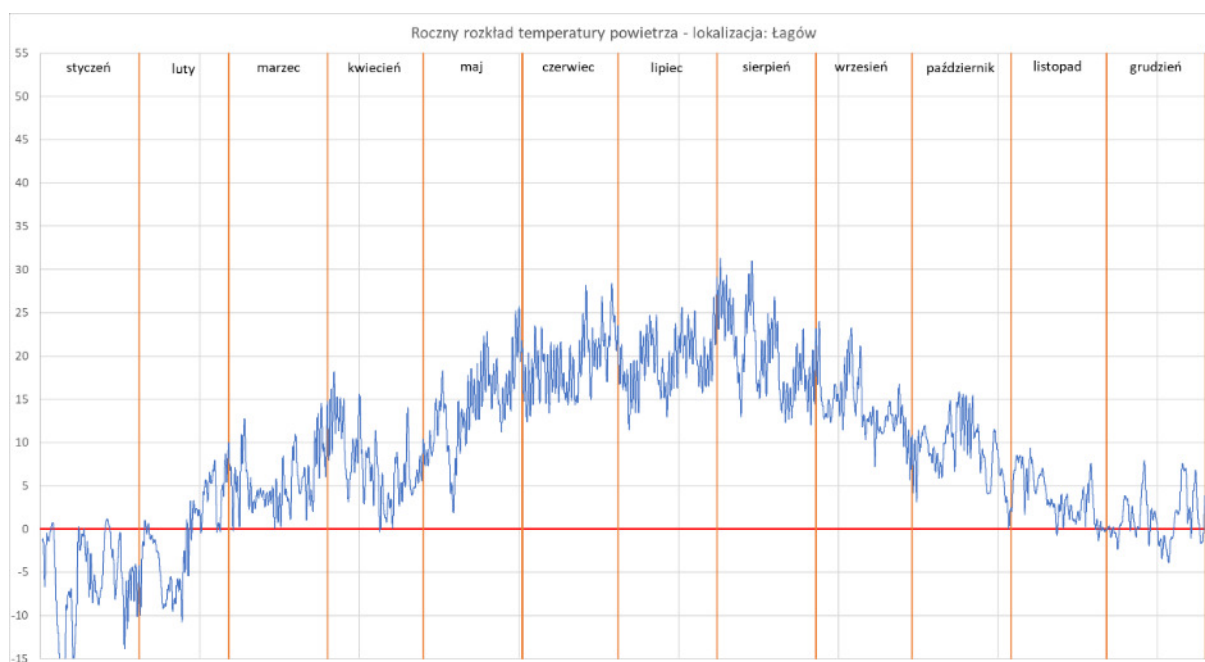
Rys. 24 Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Pruszków



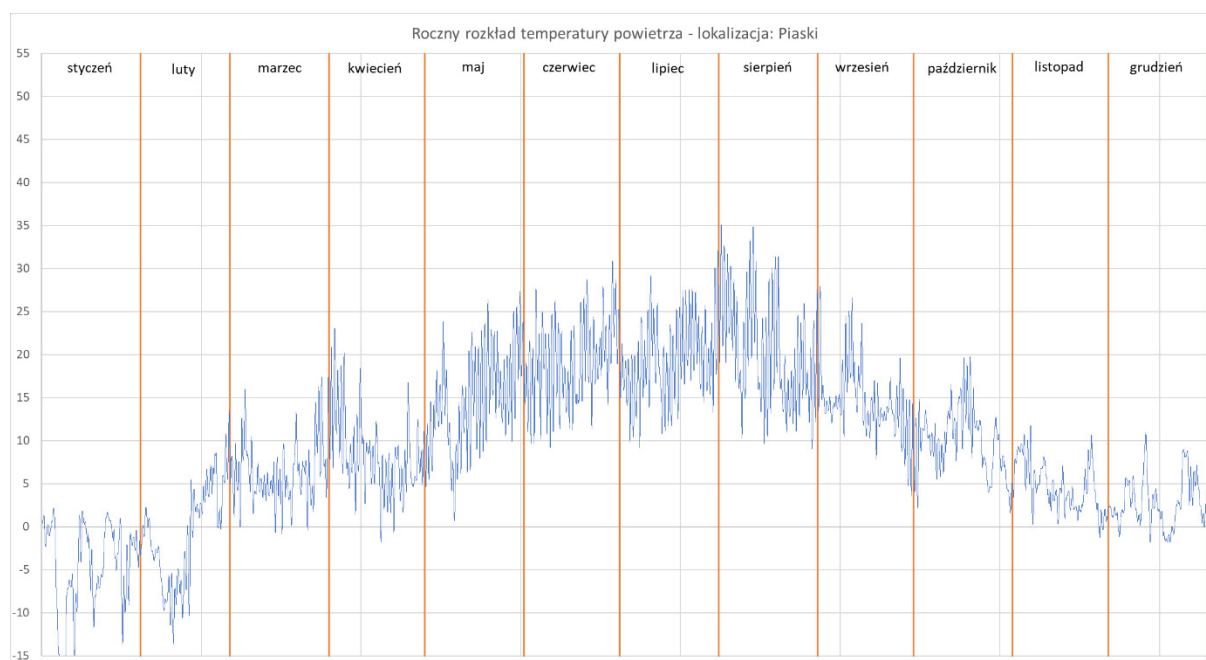
Rys. 25 Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Kłodzko



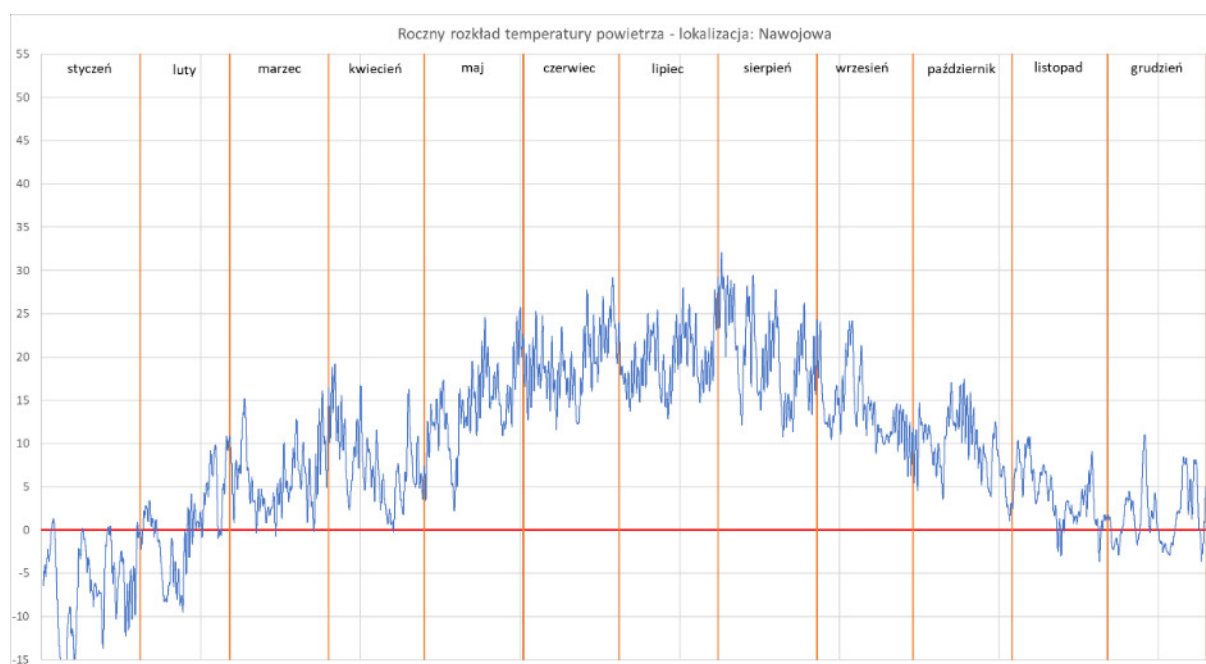
Rys. 26 Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Piekary Śląskie



Rys. 27 Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Łagów



Rys. 28 Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Piaski



Rys. 29 Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Nawojowa

Dodatkowo do analizy rocznych temperatur wykonano analizę rozkładu dobowego - na przedstawionych poniżej wykresach (rys. 30 – rys. 43) zobaczyć można rozkład dobowy temperatury uśredniony dla poszczególnych miesięcy. Przedstawiono tylko miesiące, dla których występują temperatury ujemne, czyli grudzień, styczeń, luty oraz marzec.

Na wykresach prezentujących dobowy rozkład temperatury w obrębie konstrukcji nawierzchni zastosowano następujące oznaczenia:

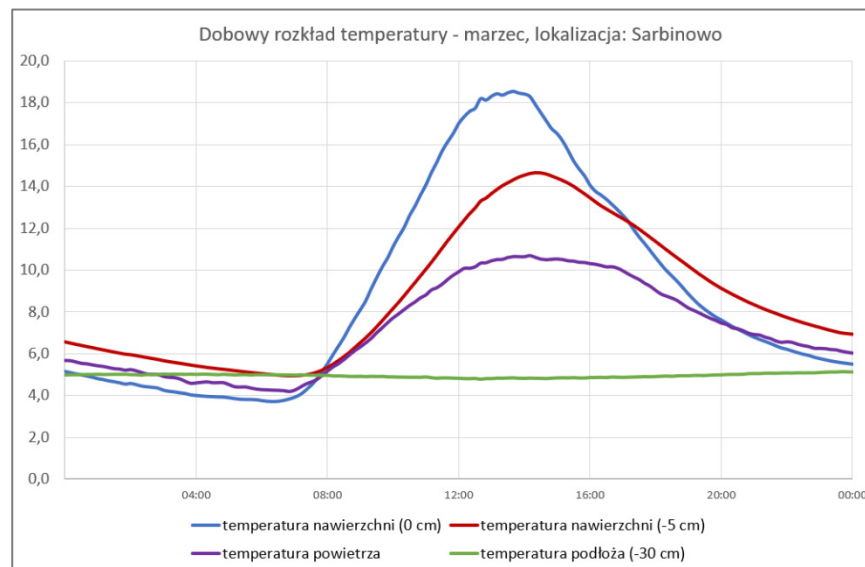
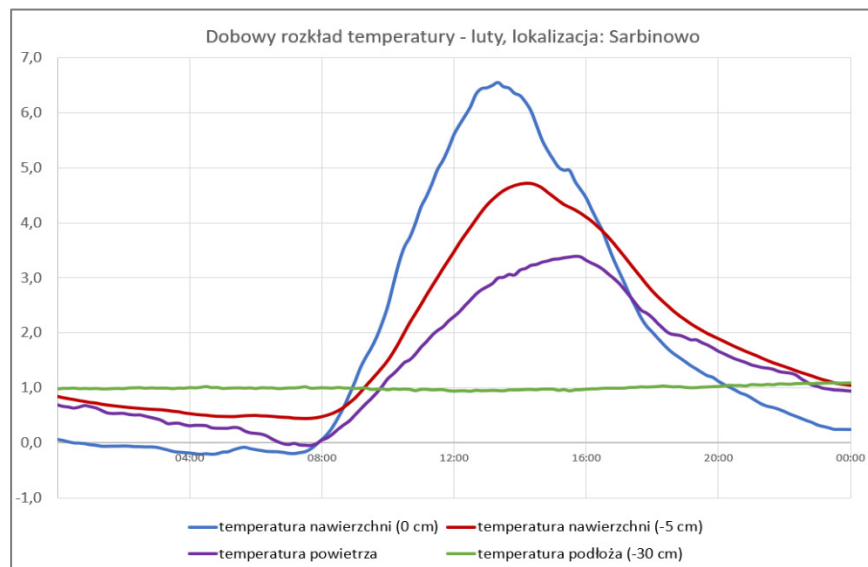
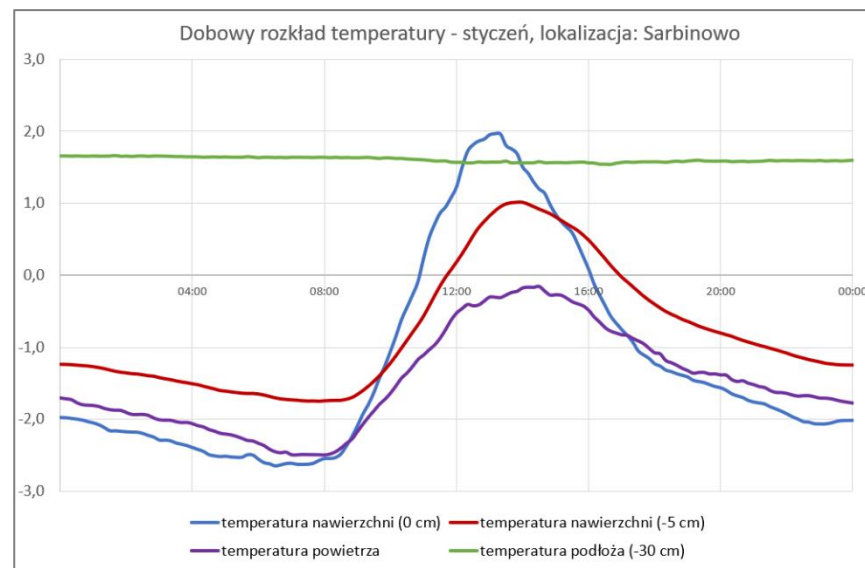
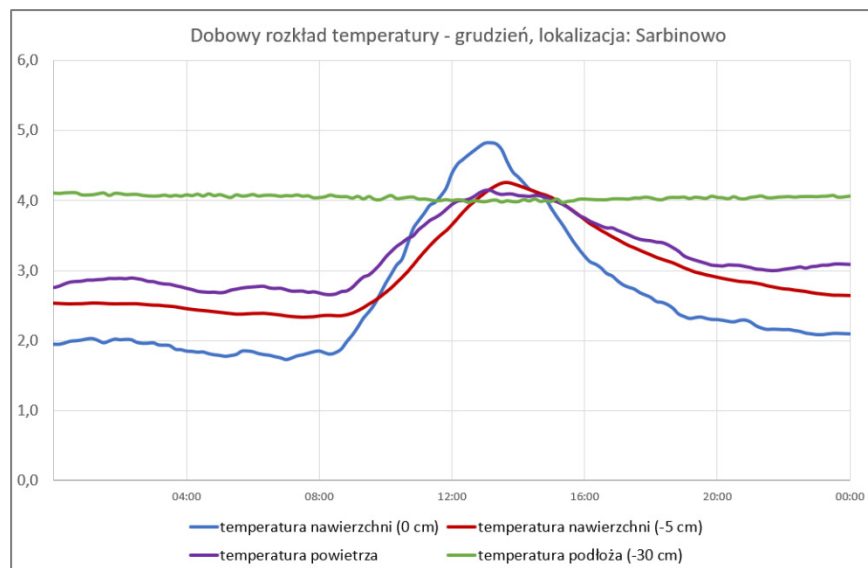
- temperatury powietrza – oznaczona fioletową linią

- temperatury nawierzchni na poziomie powierzchni – 0 cm oznaczona niebieską linią
- temperatury nawierzchni na poziomie -5 cm w stosunku do powierzchni – oznaczona czerwoną linią
- temperatury podłoża na poziomie -30 cm w stosunku do powierzchni – oznaczona zieloną linią (dane pomiarowe dostępne dla wybranych lokalizacji).

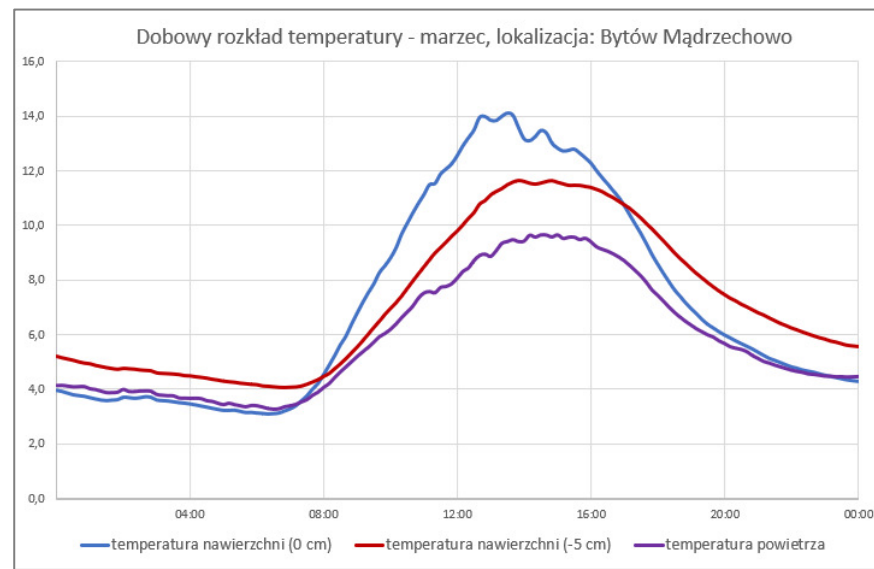
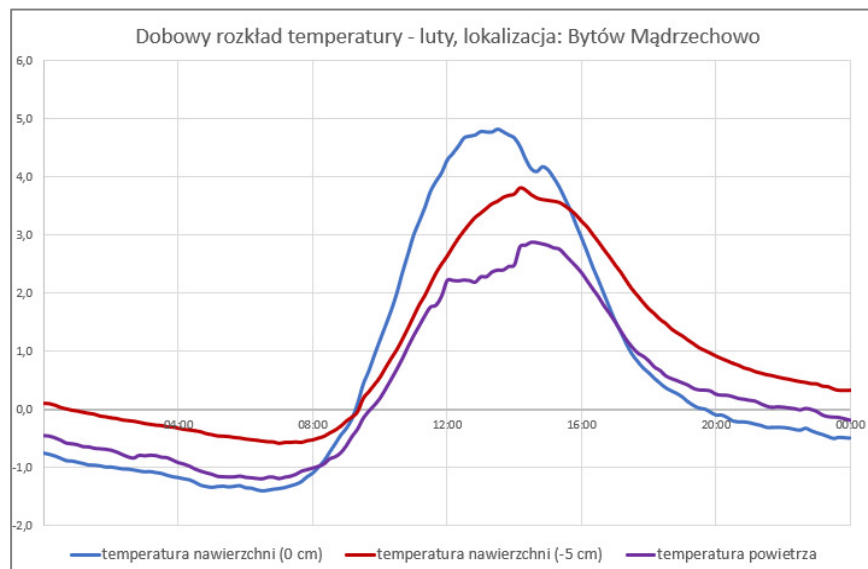
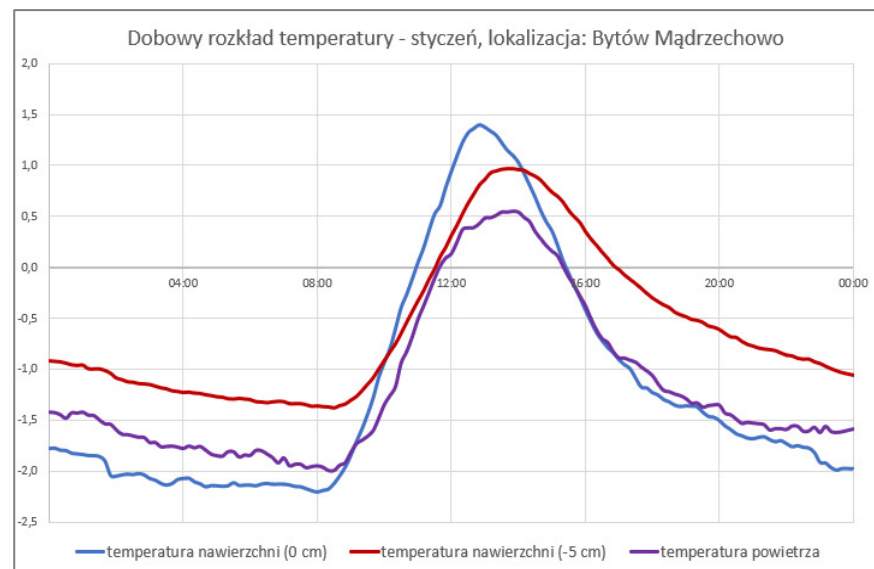
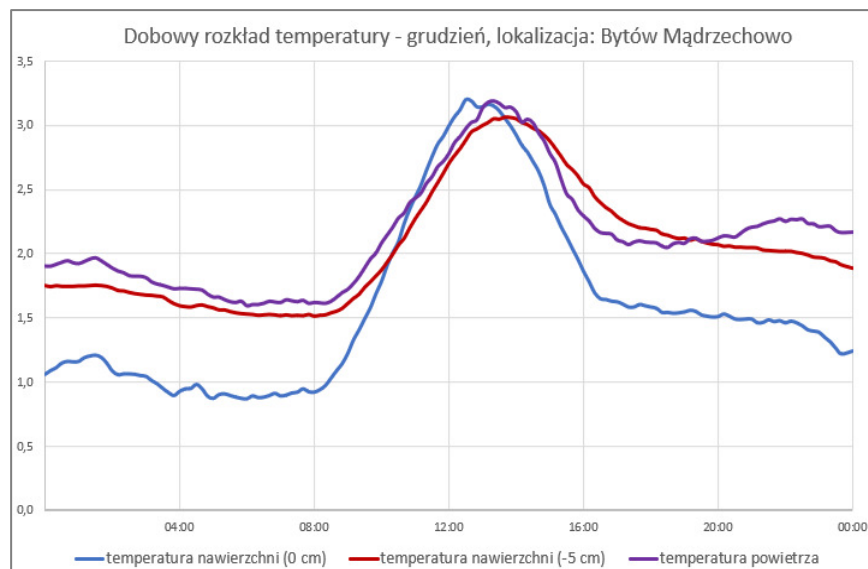
Na podstawie tych danych można zauważyć jak kształtuje się typowy rozkład temperatur w trakcie dnia. Można również określić średnią dobową liczbę godzin w miesiącu, w których występują temperatury ujemne.

Dla polskiego klimatu typowe są przejścia przez temperaturę 0°C. Sytuacja taka jest szczególnie niebezpieczna dla użytkowników dróg. Warunki te sprzyjają nagłemu pojawianiu się niesprzyjających warunków jazdy – śliskości na drodze. Powoduje to, że Polska jest miejscem, w którym technologie samoodładzania są szczególnie potrzebne i mogłyby znacząco wpłynąć na poprawę warunków użytkowania dróg w sezonie zimowym.

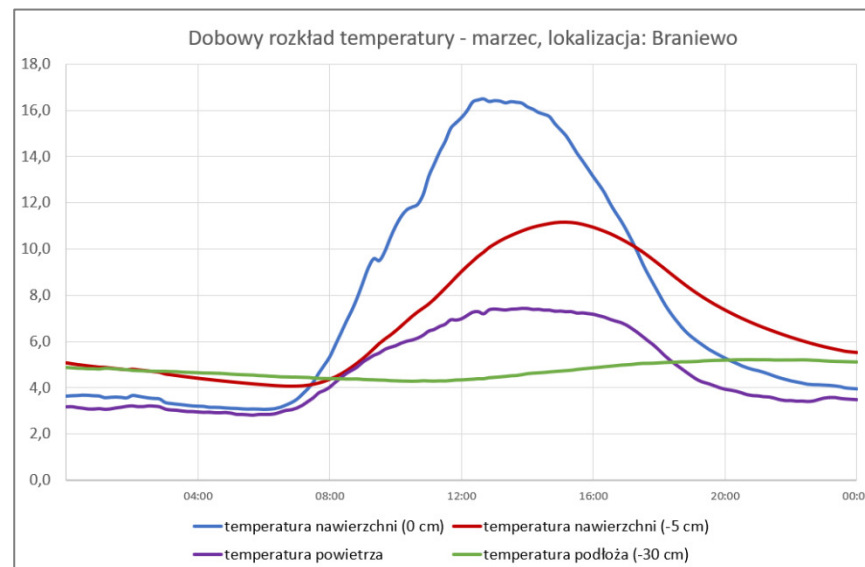
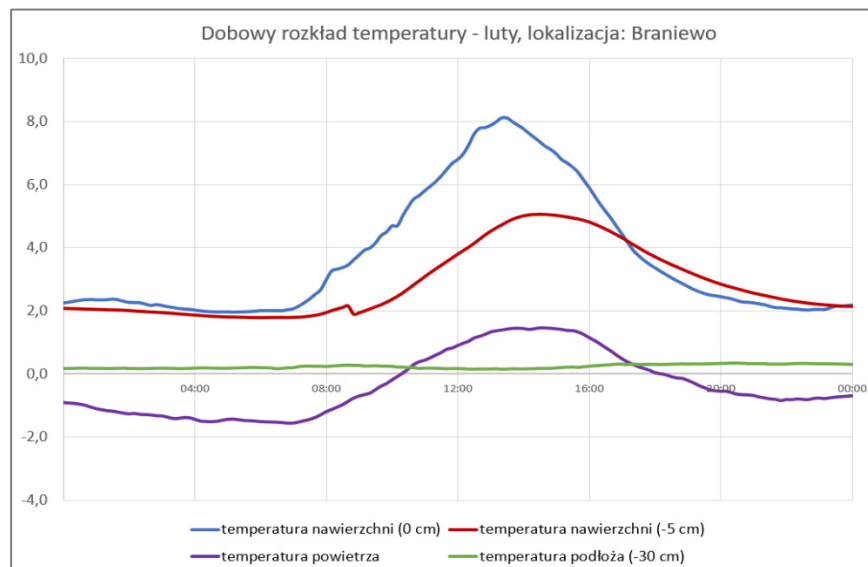
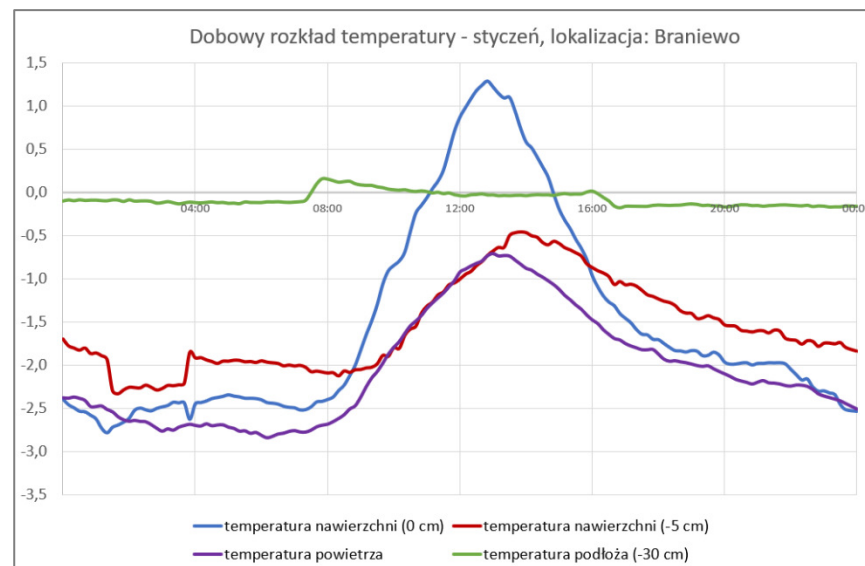
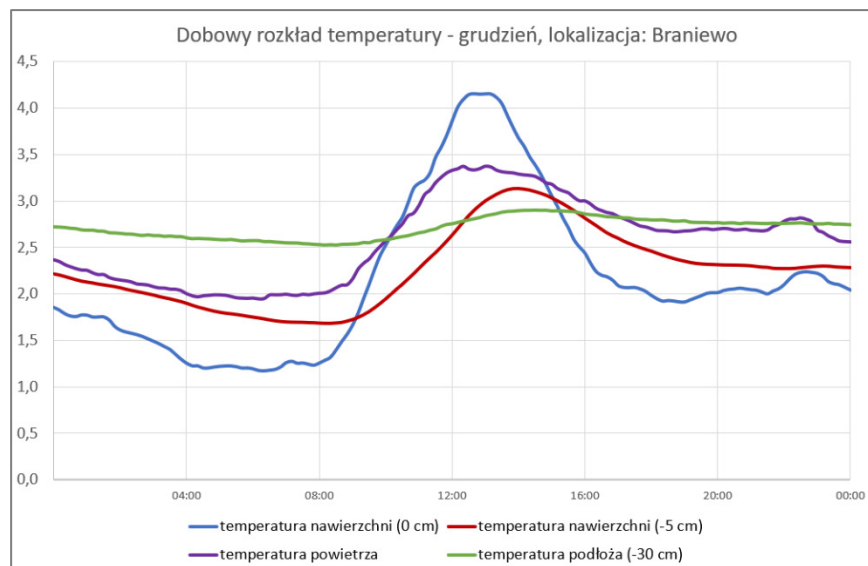
Dodatkowo, zauważyć można, że temperatura na głębokości 30 cm nie ulega wahaniom w trakcie dnia, jest dość jednolita. Rzadziej też spada poniżej 0, jedynie dla miejsc, w których występują niższe średnie temperatury.



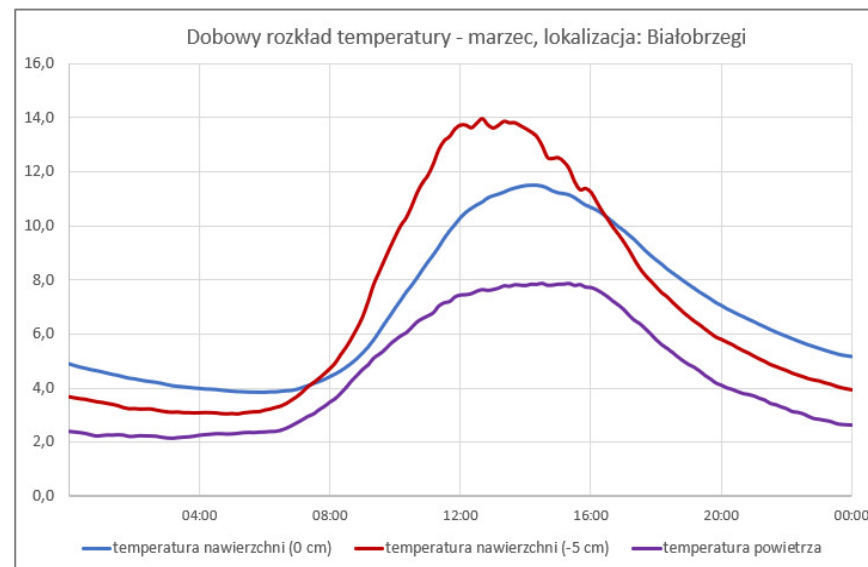
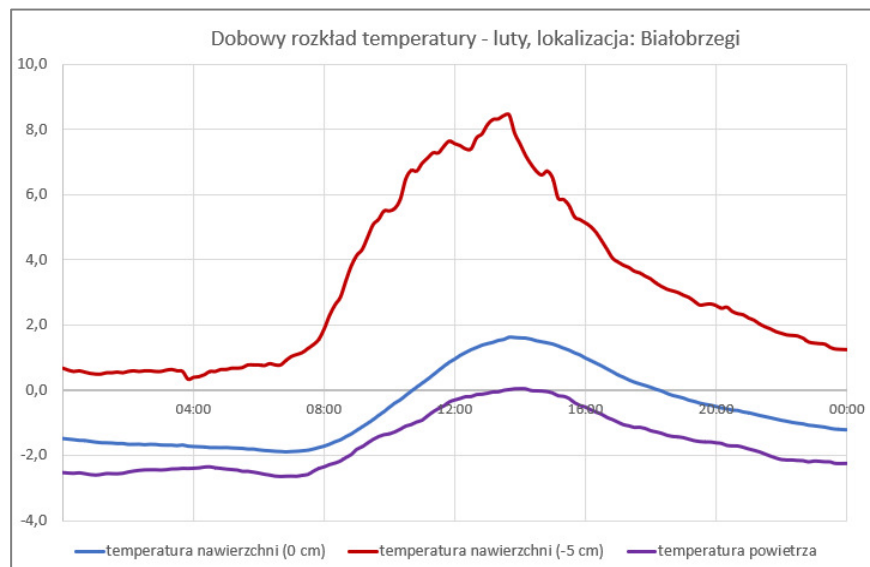
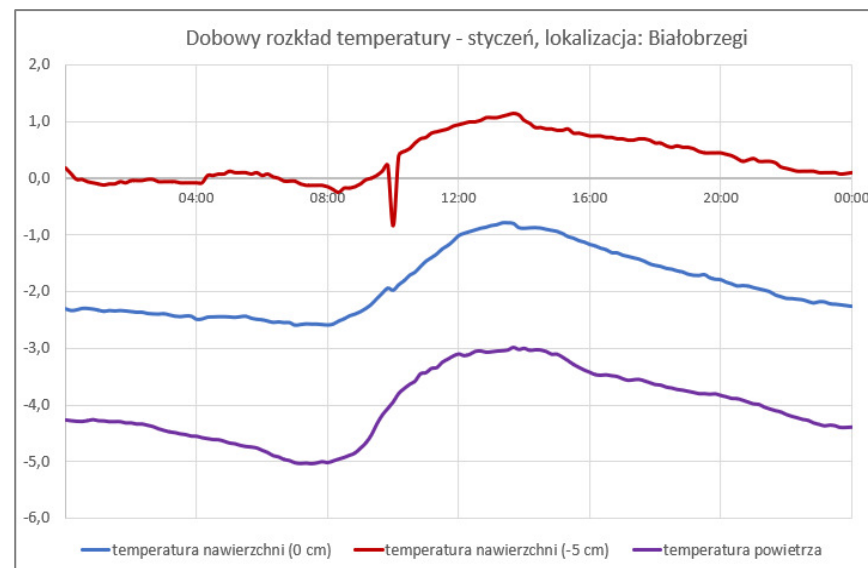
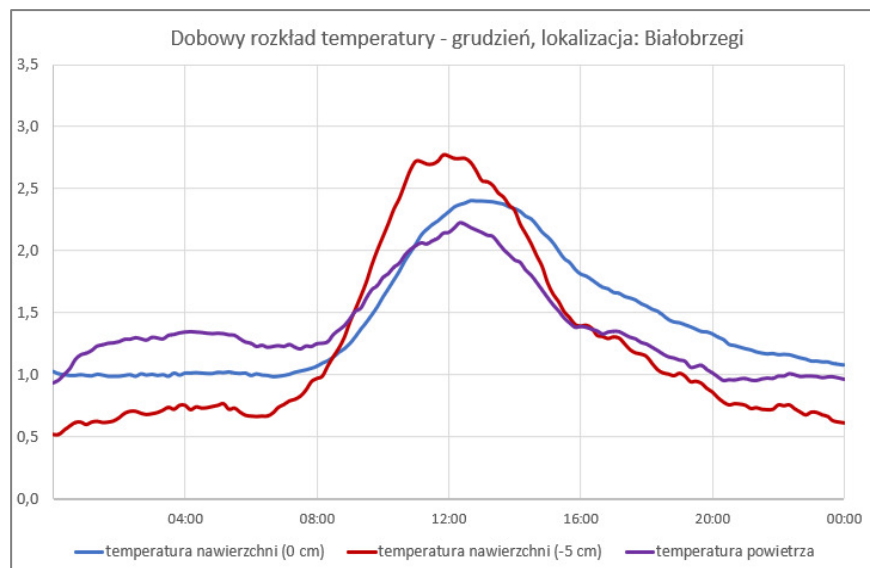
Rys. 30 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Sarbinowo



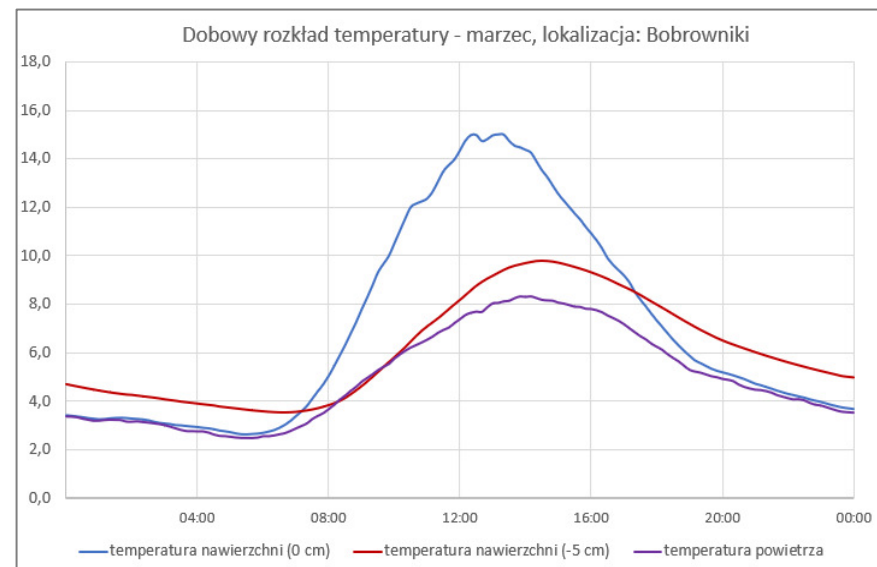
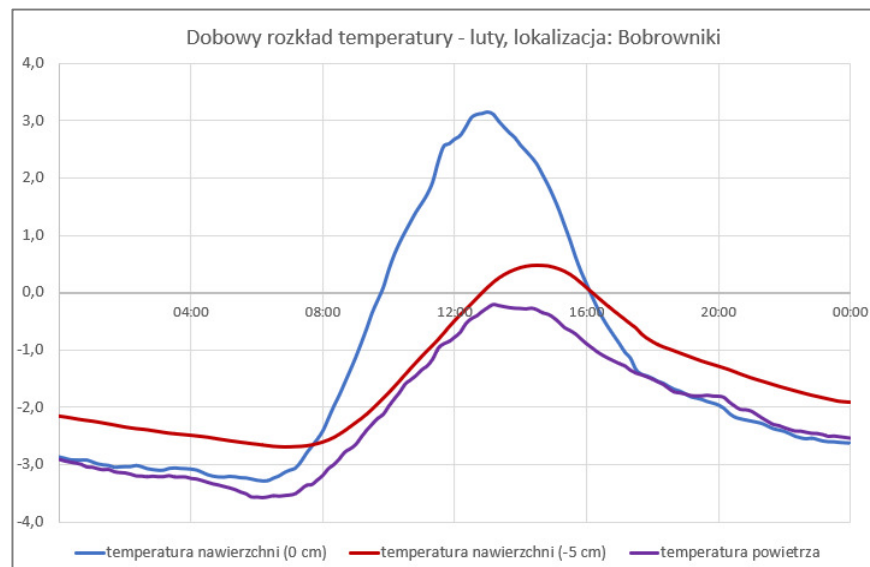
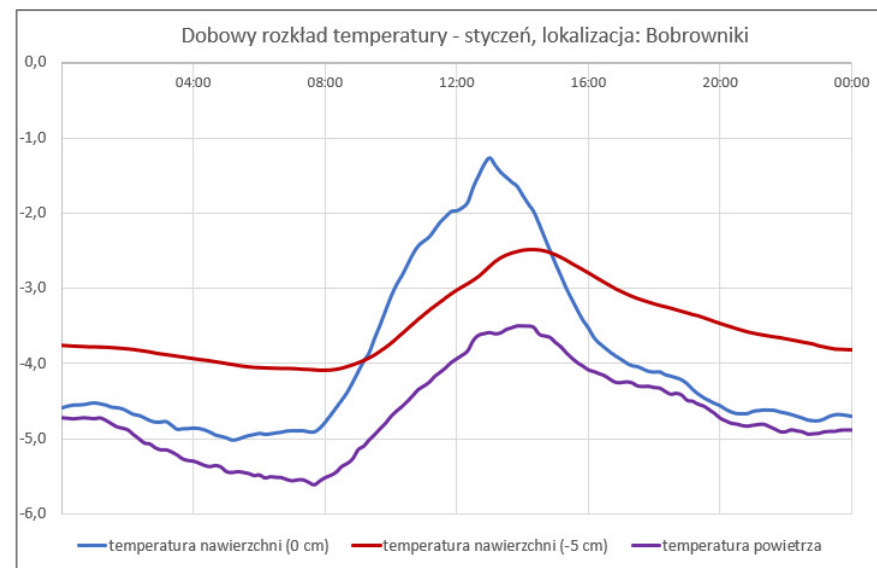
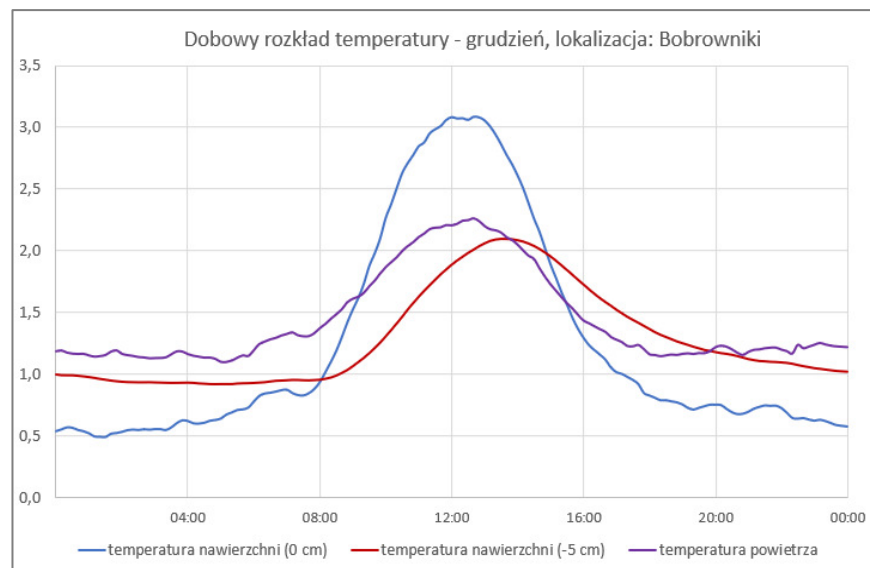
Rys. 31 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Bytów Mądrzechowo



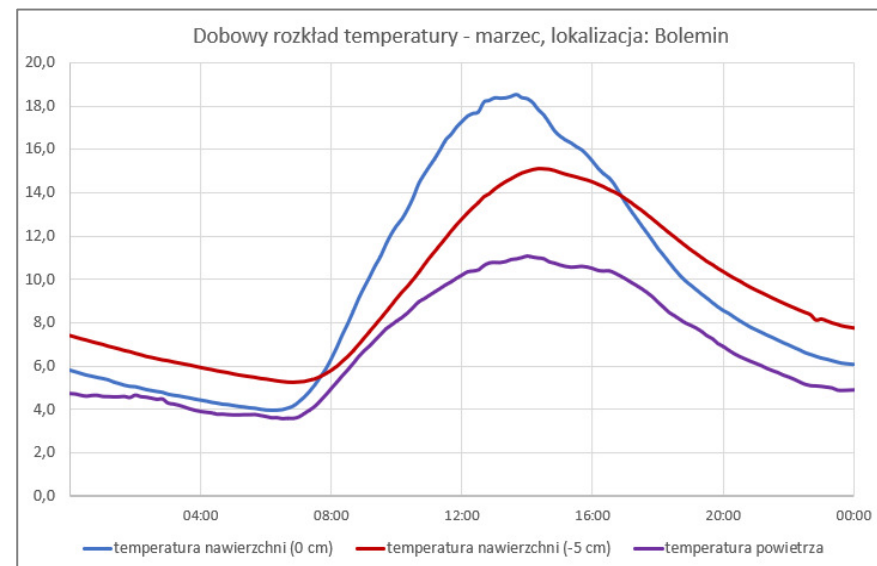
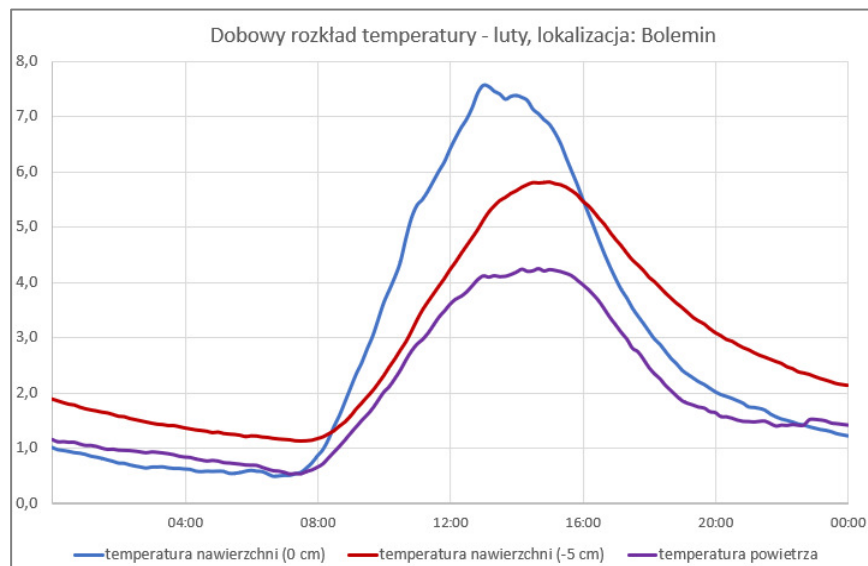
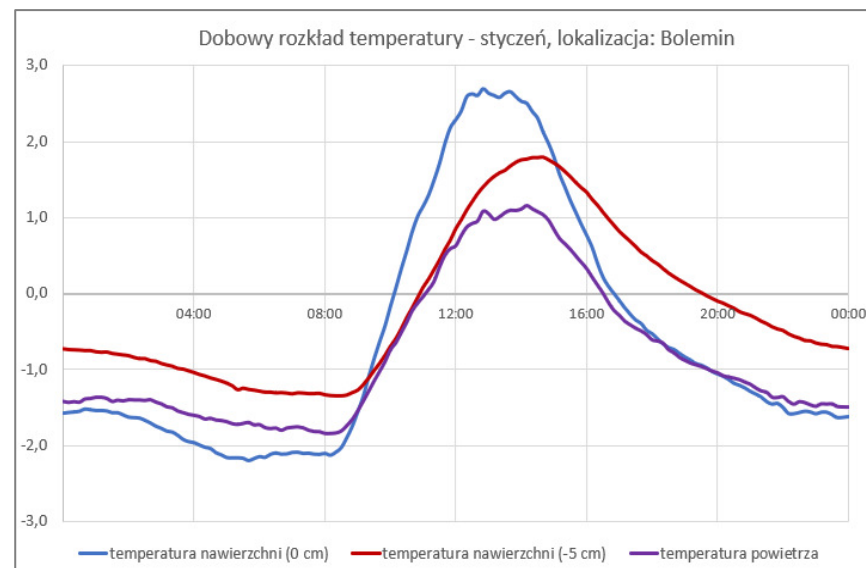
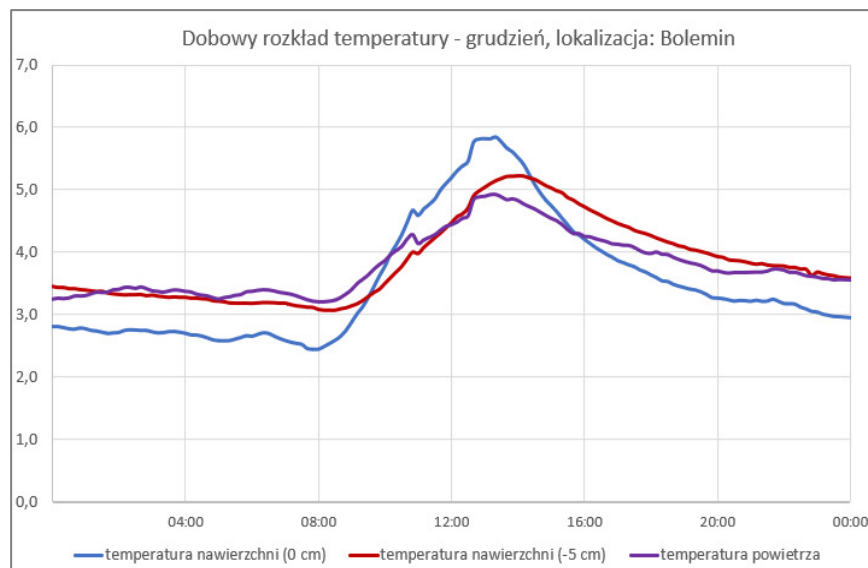
Rys. 32 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Węzeł Braniewo



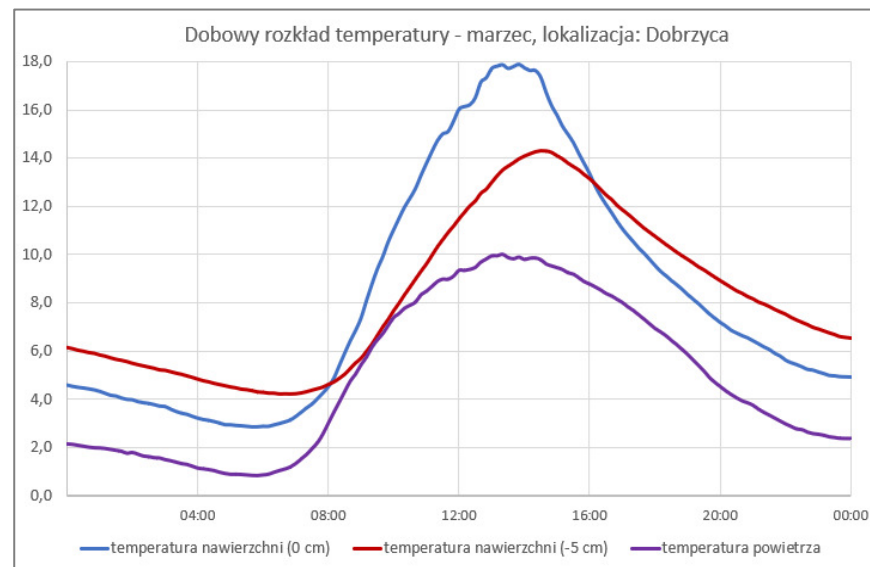
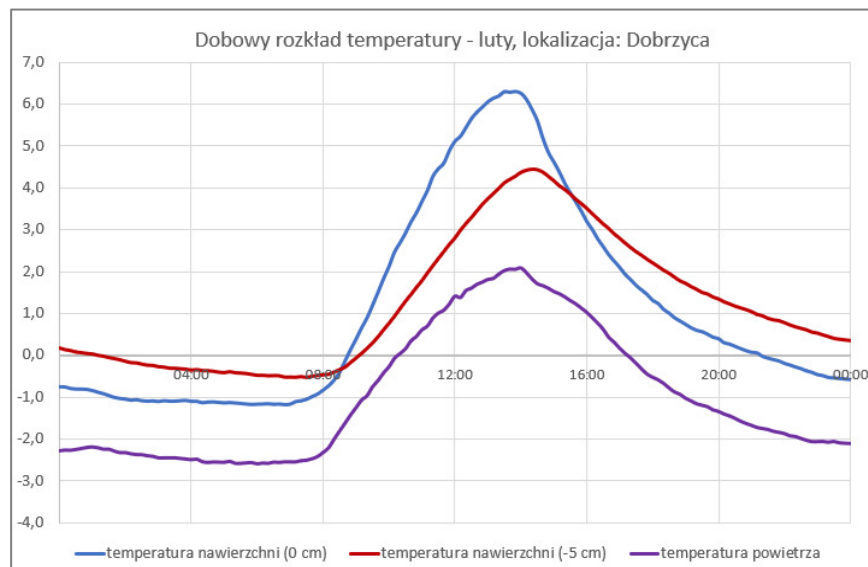
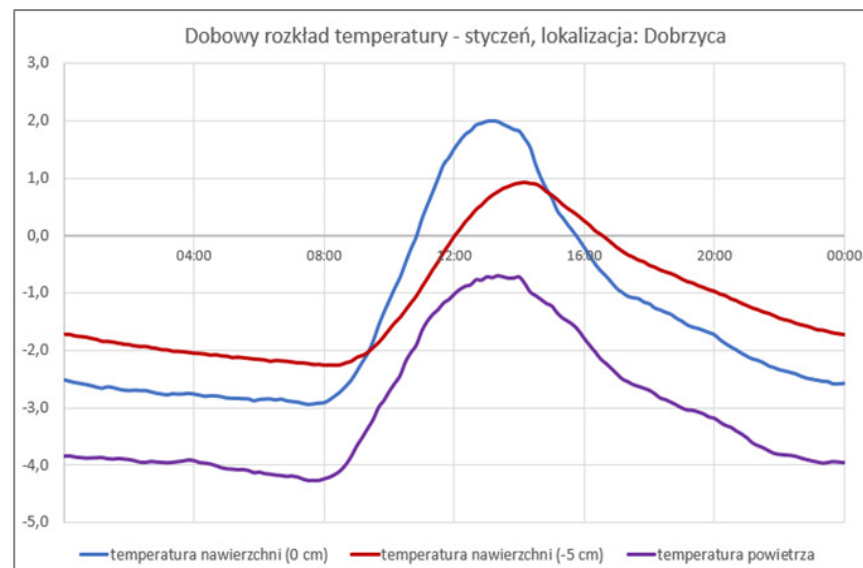
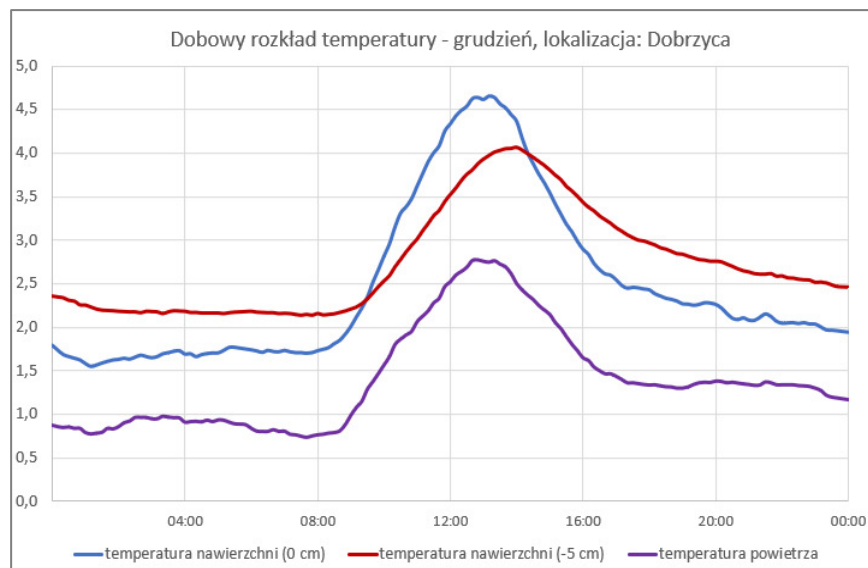
Rys. 33 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Białobrzegi



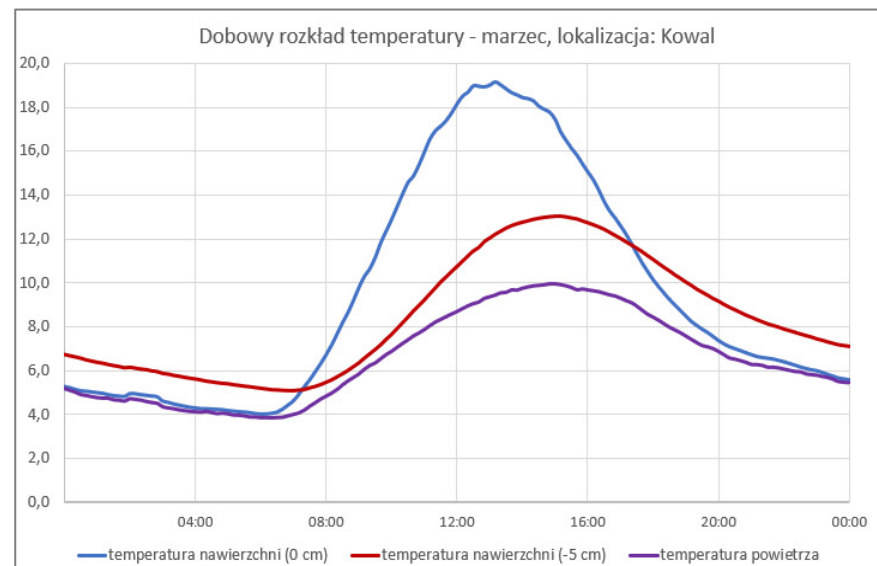
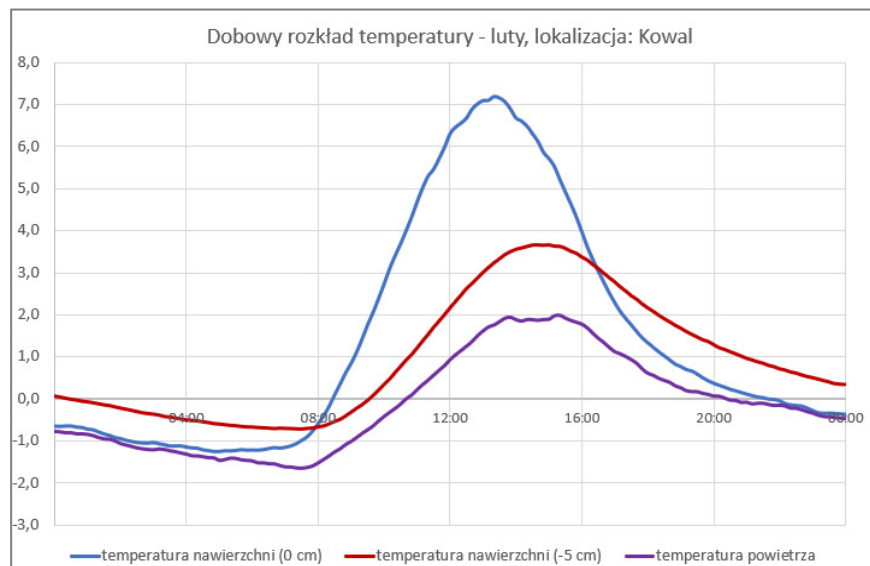
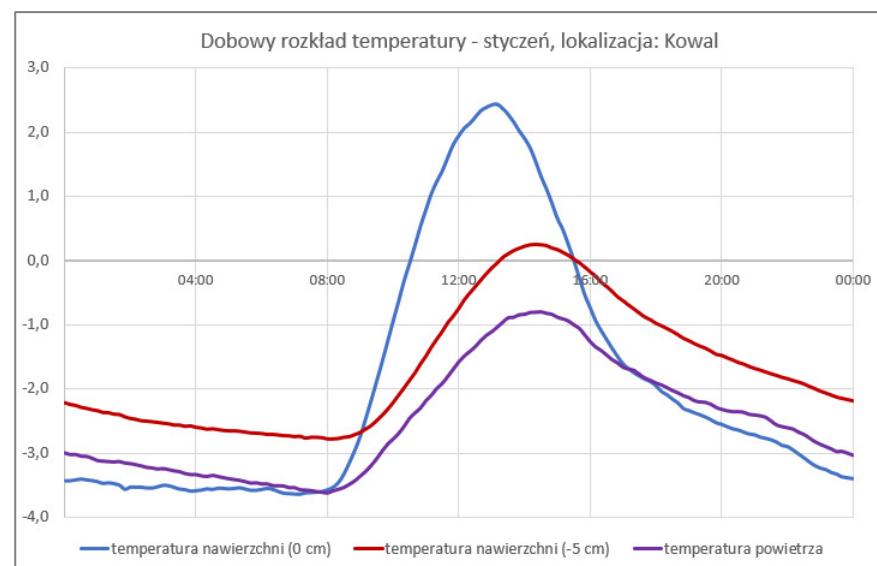
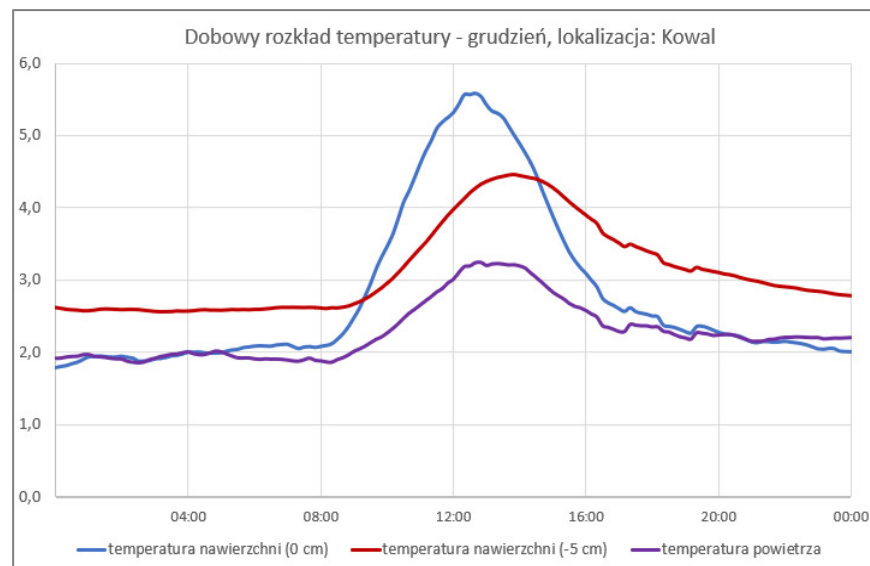
Rys. 34 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Bobrowniki



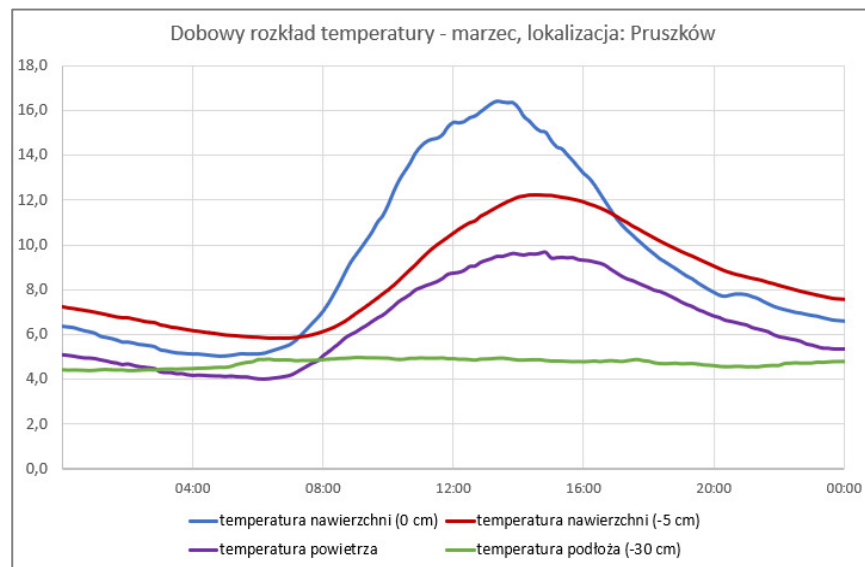
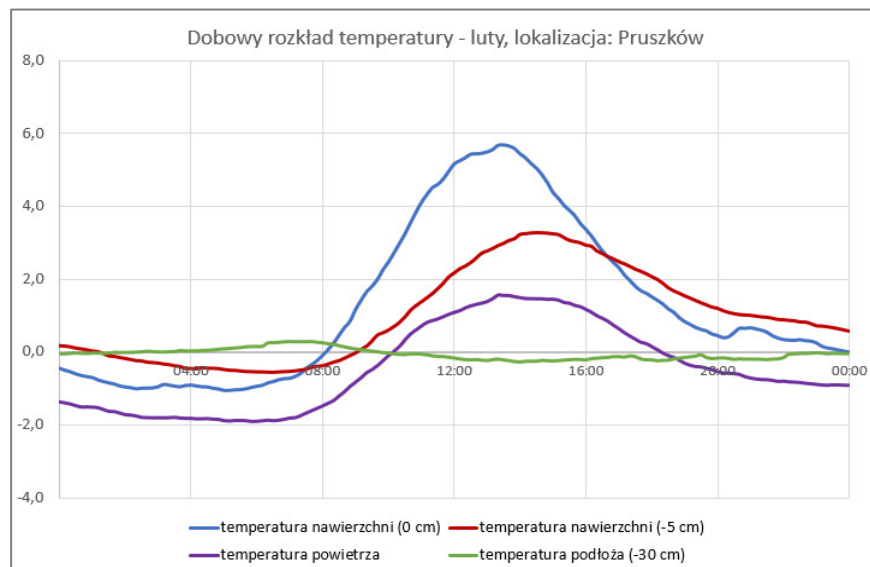
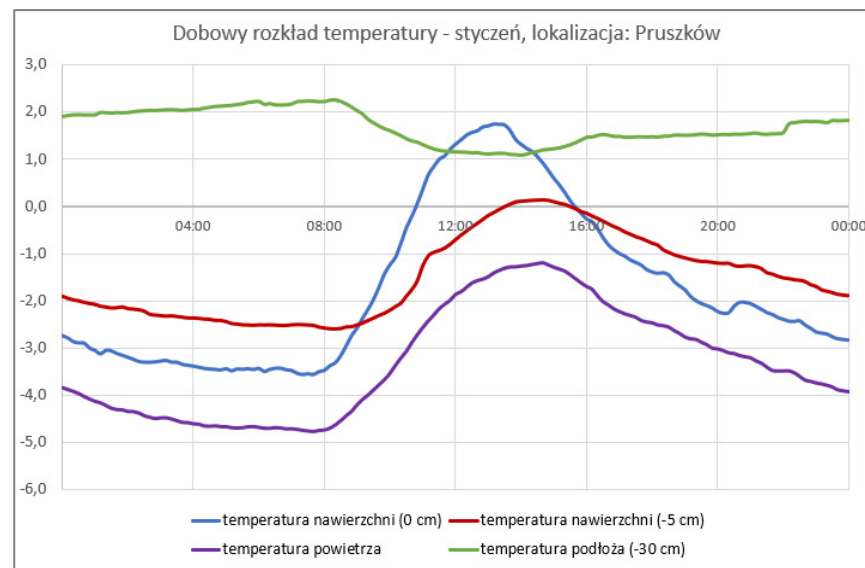
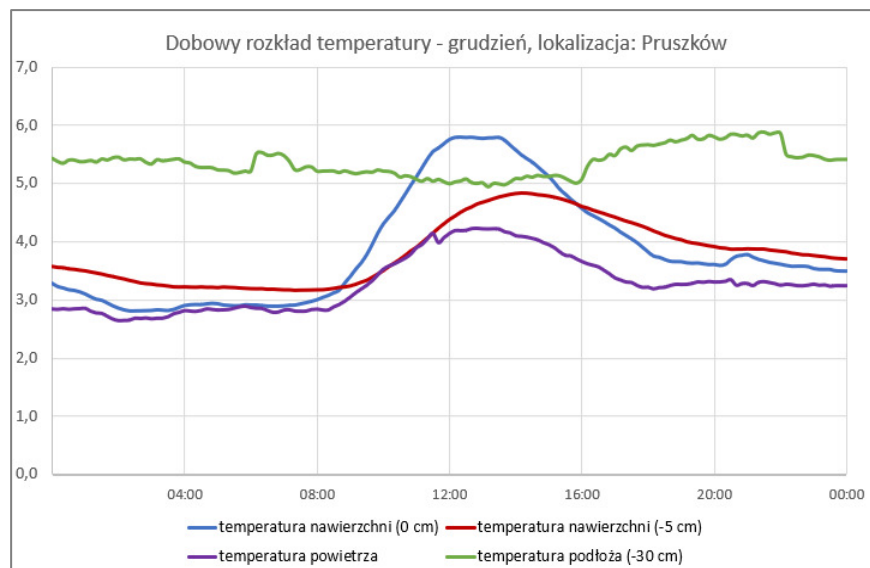
Rys. 35 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Bolemin



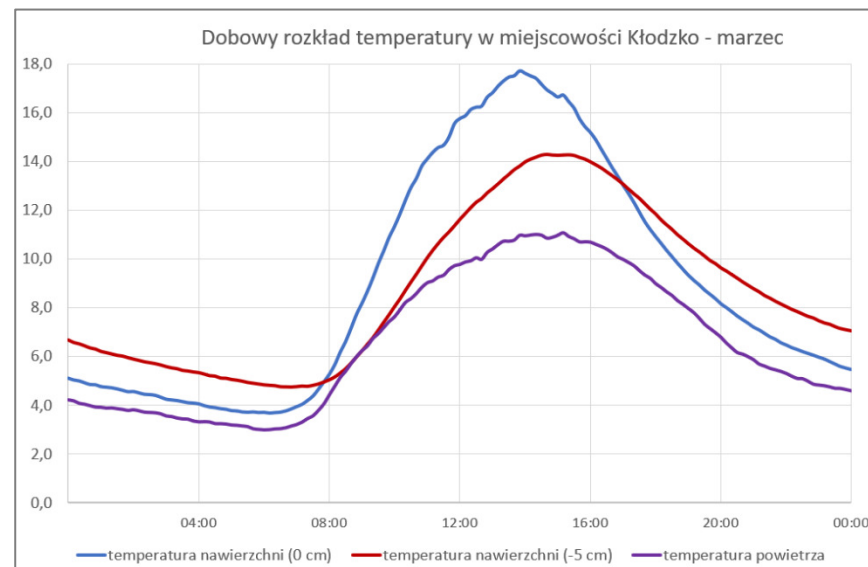
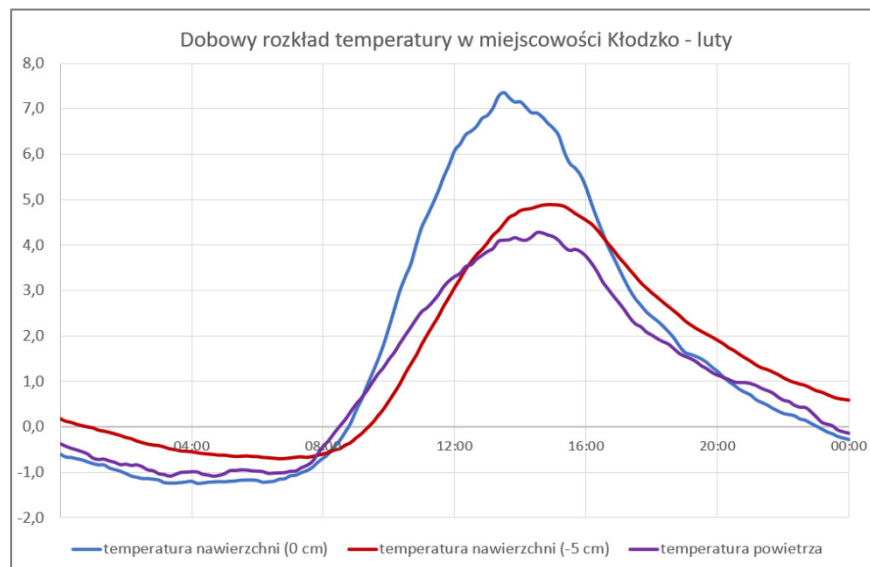
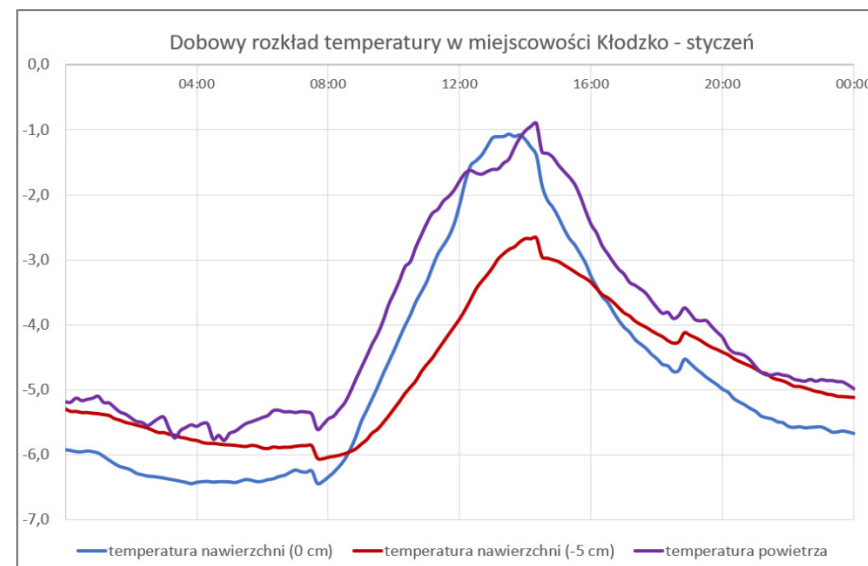
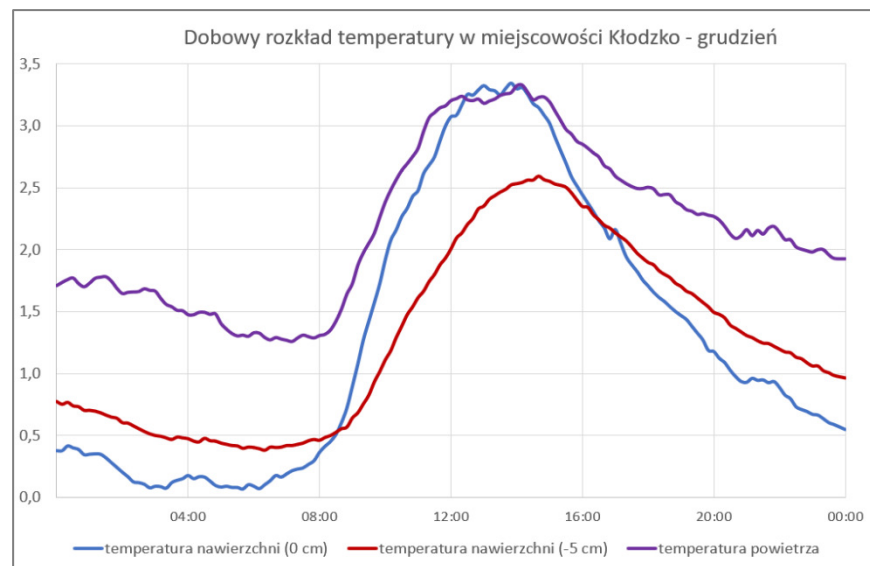
Rys. 36 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Dobrzyca



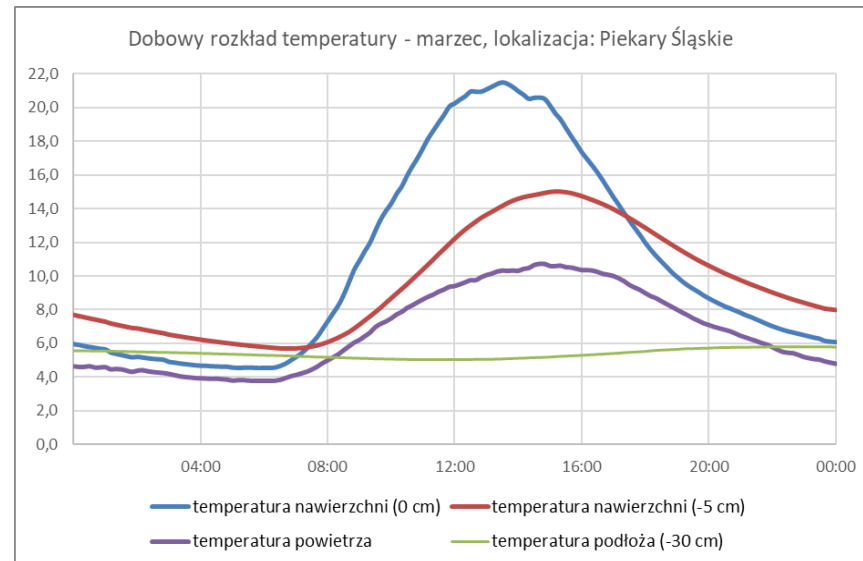
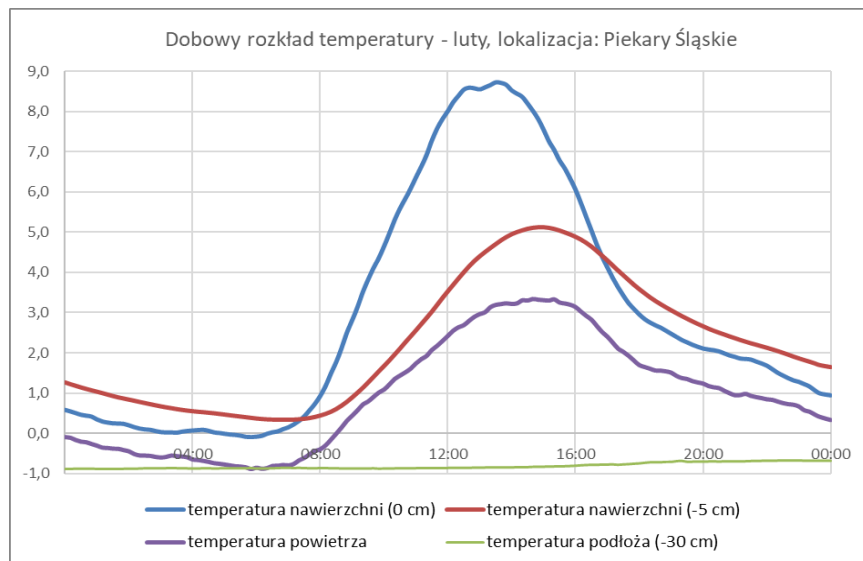
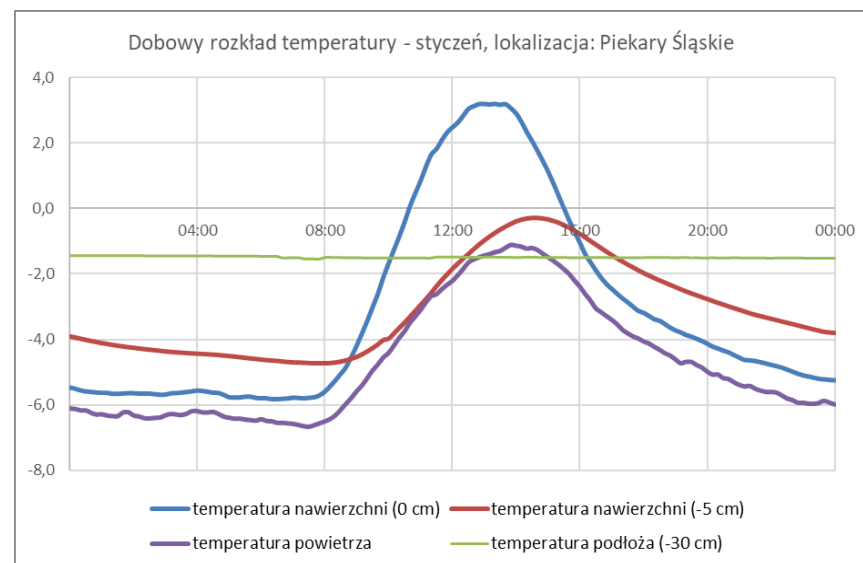
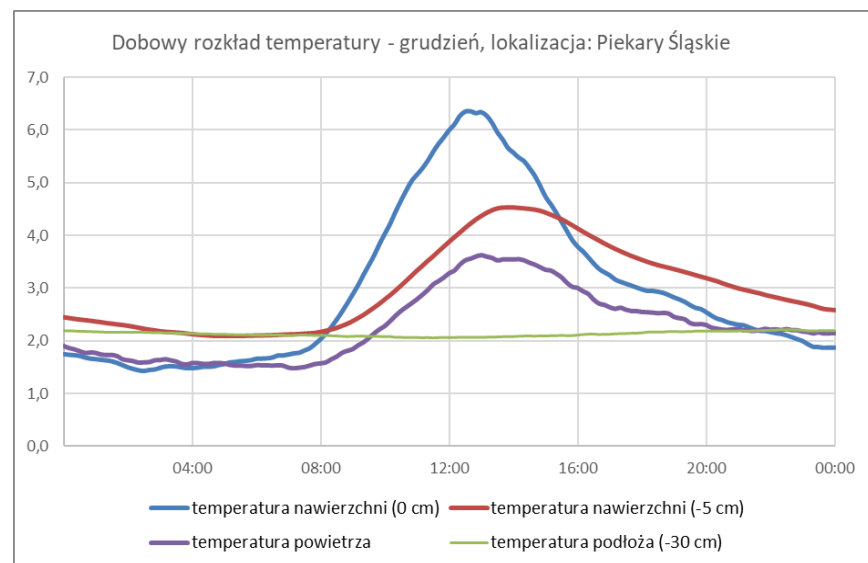
Rys. 37 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Kowal



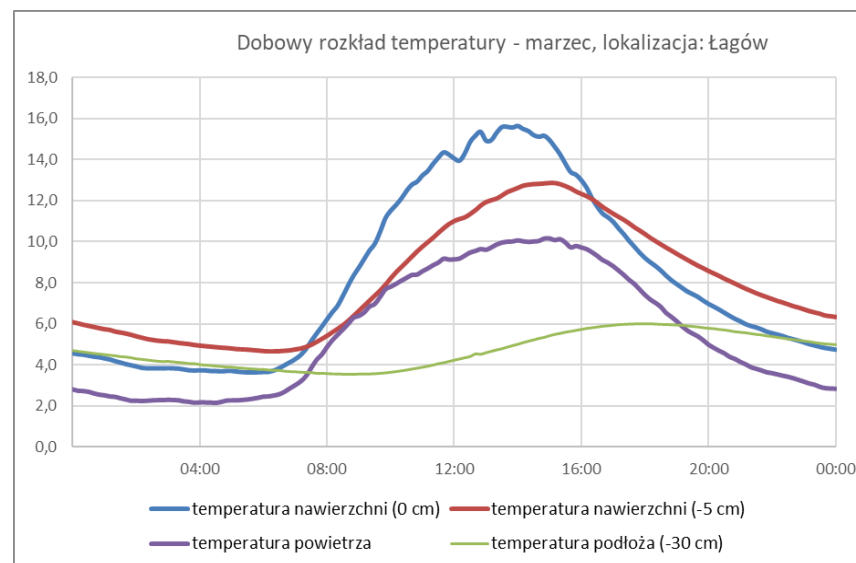
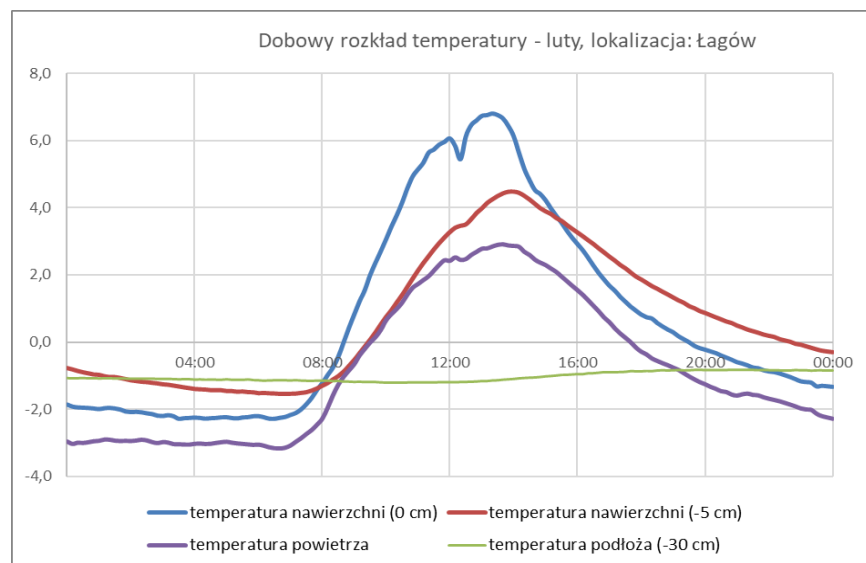
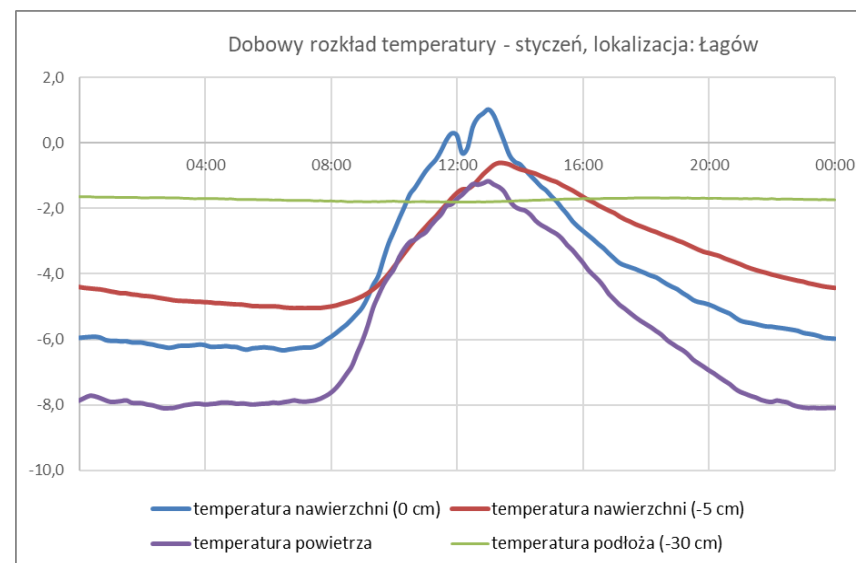
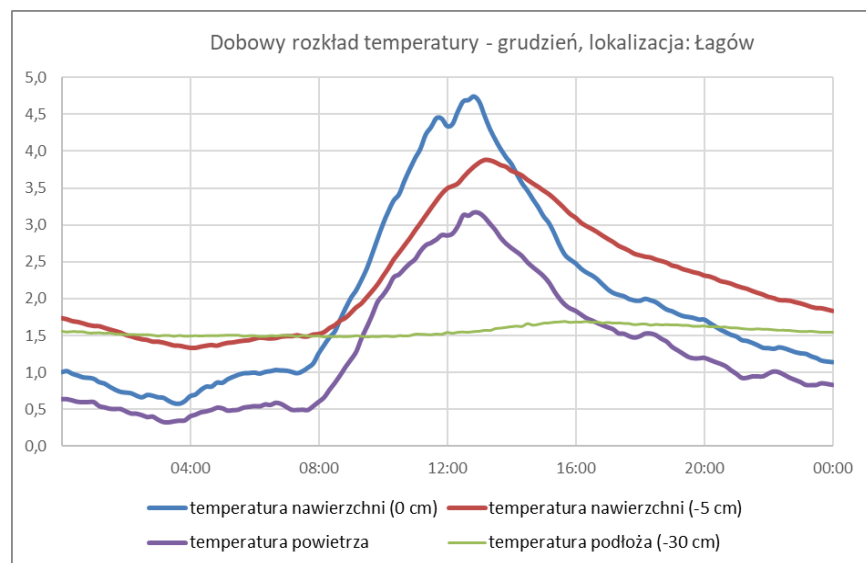
Rys. 38 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Pruszków



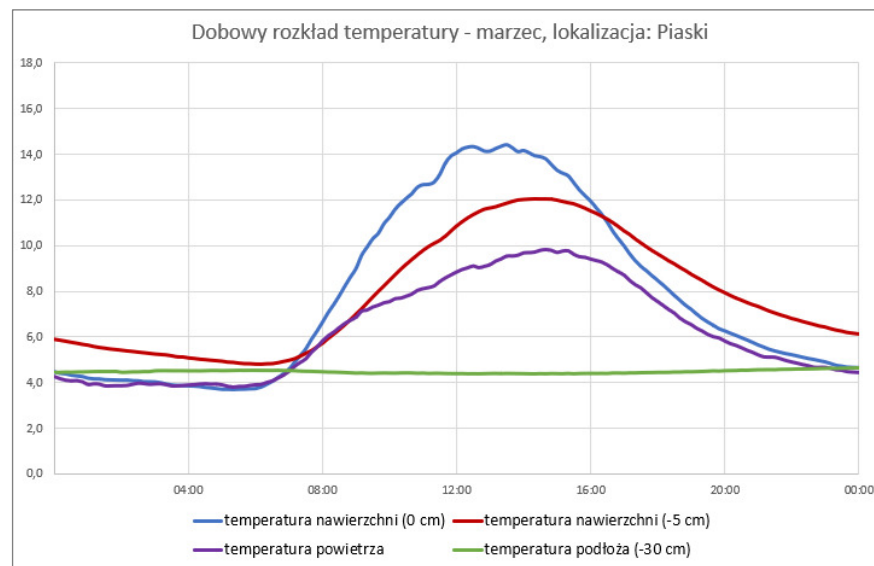
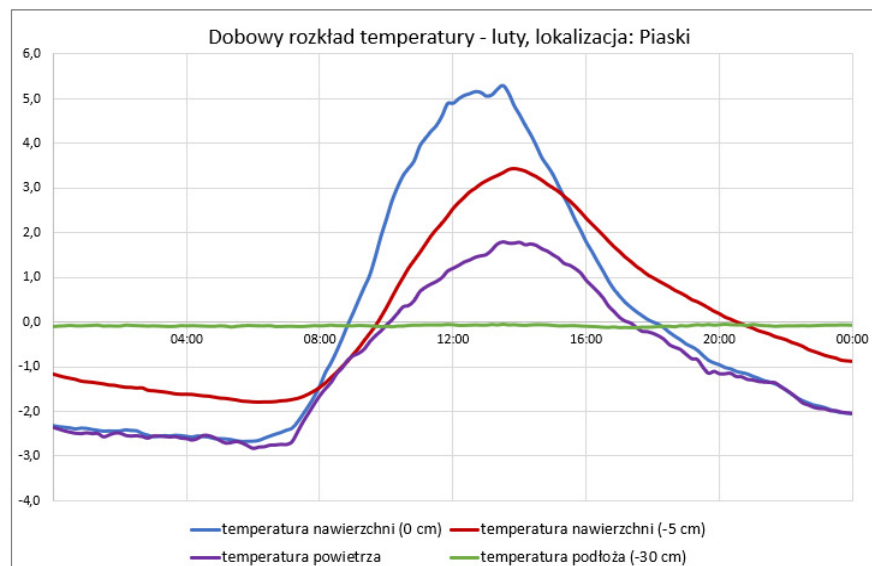
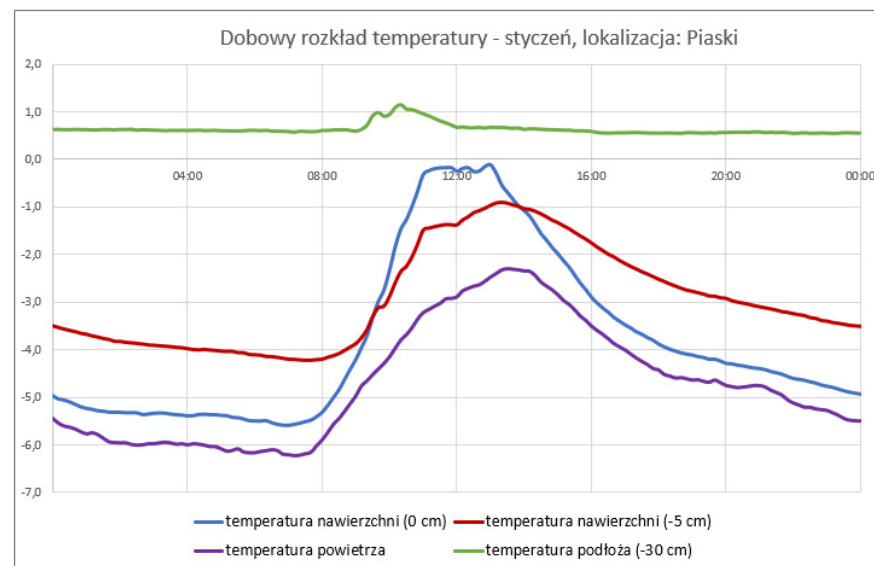
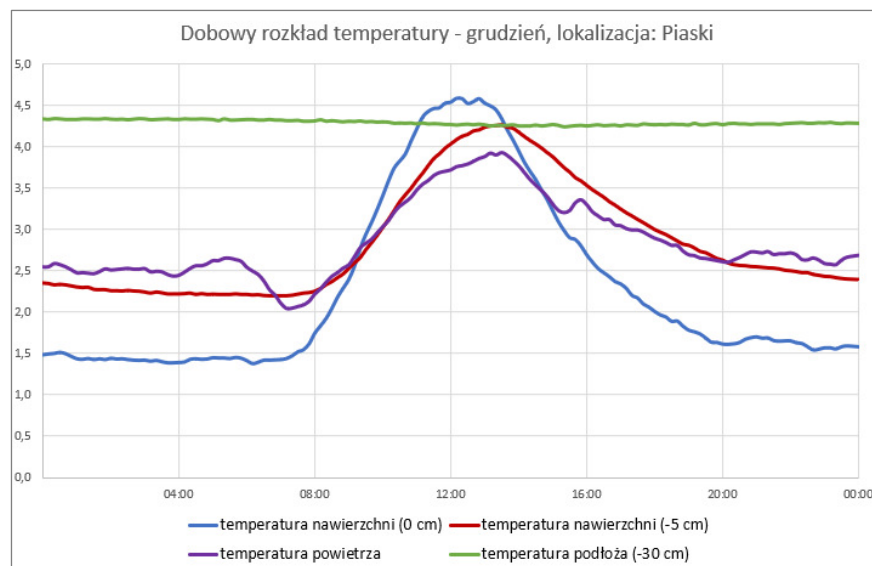
Rys. 39 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Kłodzko



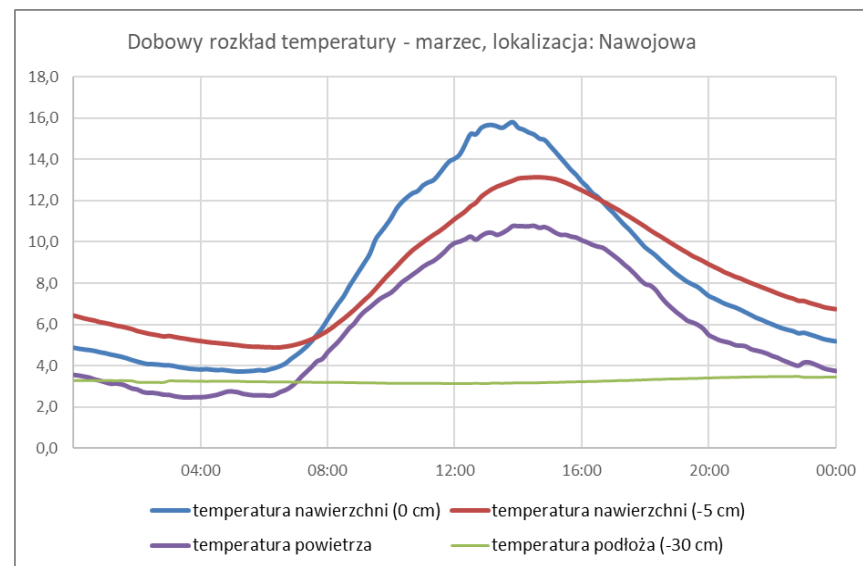
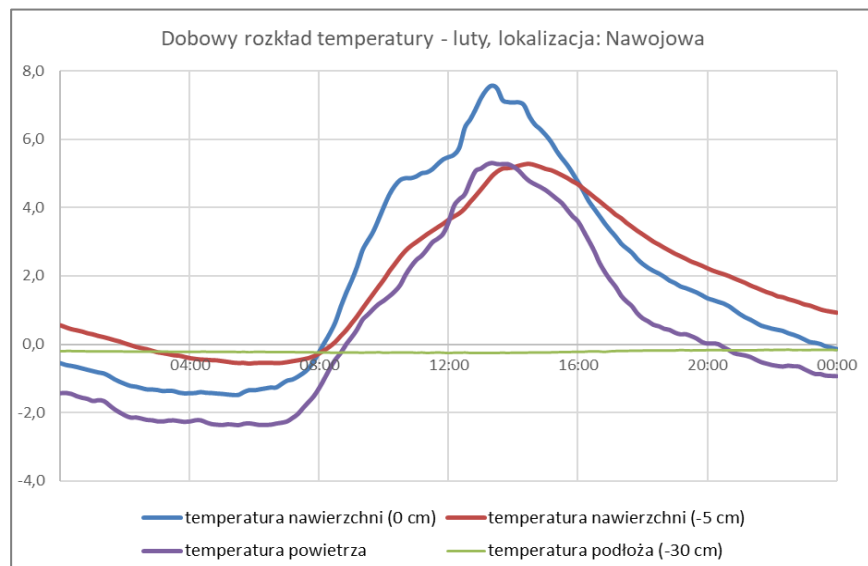
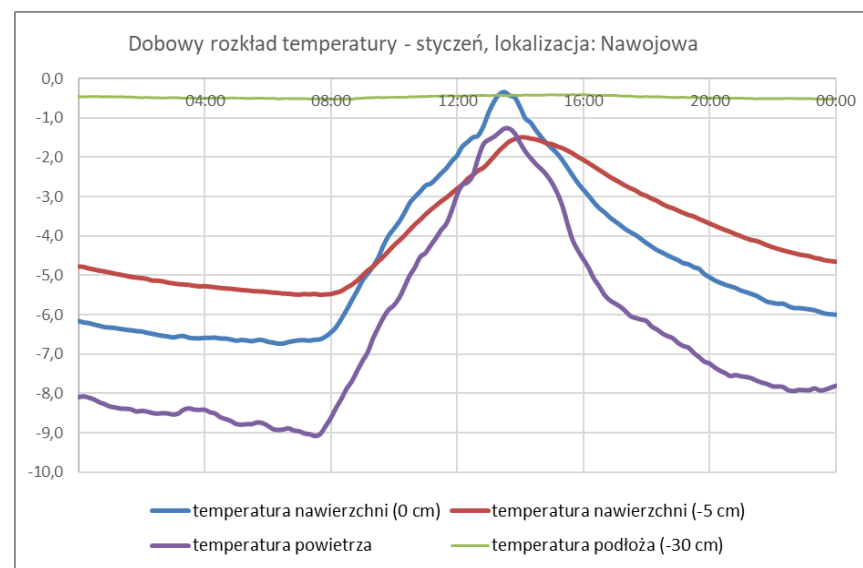
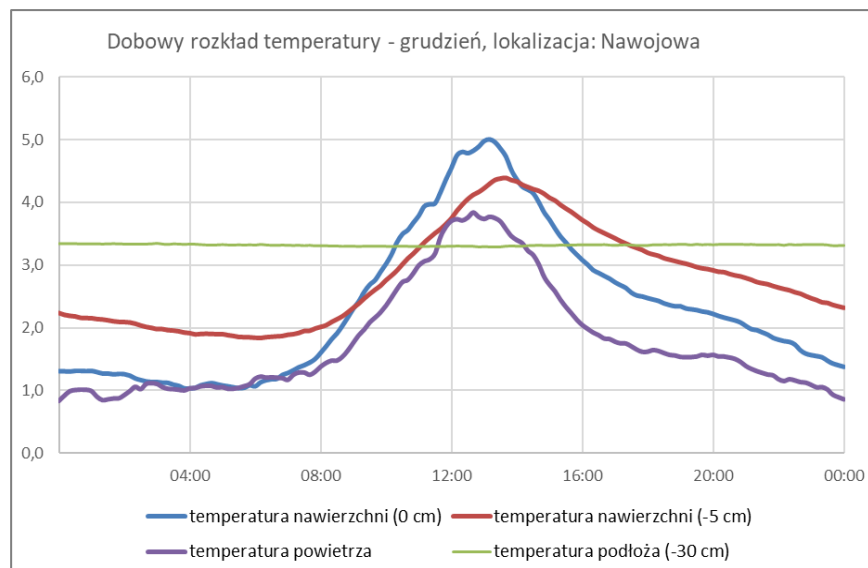
Rys. 40 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Piekary Śląskie



Rys. 41 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Łągów



Rys. 42 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Piaski



Rys. 43 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Nawojowa

Analizując przedstawione dane w głównej mierze należy skupić się na temperaturze nawierzchni (0cm), gdyż to ona decyduje o warunkach panujących na drodze. Aby w prosty sposób określić zapotrzebowanie na systemy odladzające należy wprowadzić wielkość określającą liczbę godzin gdy temperatura nawierzchni jest mniejsza niż 0°C. Dzięki temu możliwe będzie porównanie ze sobą poszczególnych lokalizacji i miesięcy (tab. 6). Dodatkowo należy porównać liczbę dni, w których wystąpiła ujemna temperatura nawierzchni (tab. 7).

Tab. 6 Liczba godzin w trakcie dnia, gdy średnia miesięczna temperatura nawierzchni jest mniejsza niż 0

Lokalizacja	Grudzień	Styczeń	Luty	Marzec
Sarbinowo	0	19	7	0
Bytów Mądrzechowo	0	20	13	0
Braniewo	0	24	17	0
Białobrzegi	0	24	17	0
Bobrowniki	0	24	21	0
Bolemin	0	17	0	0
Dobrzyca	0	19	12	0
Kowal	0	19	10	0
Pruszków	0	19	8	0
Kłodzko	0	24	8	0
Piekary Śląskie	0	19	2	0
Łagów	0	22	13	0
Piaski	0	24	15	0
Nawojowa	0	24	8	0

Tab. 7 Liczba dni w roku, w których wystąpiła ujemna temperatura nawierzchni

Lokalizacja	Liczba dni w roku, w których wystąpiła ujemna temperatura
Sarbinowo	69
Bytów Mądrzechowo	83
Braniewo	70
Białobrzegi	67
Bobrowniki	93
Bolemin	67
Dobrzyca	78
Kowal	82
Pruszków	57
Kłodzko	93
Piekary Śląskie	73
Łagów	83
Piaski	85
Nawojowa	88

Analiza przedstawionych danych wskazuje różnice pomiędzy lokalizacjami, które są znaczące. Przykład stacji Bobrowniki – jest to stacja o największej liczbie dni z ujemnymi temperaturami i najdłuższym okresem czasu z ujemną temperaturą powierzchni drogi. Wyniki te kontrastują ze stacjami w Pruszkowie czy Boleminie, gdzie zarówno liczba dni jak i czas trwania ujemnych temperatur jest znacznie krótszy. W związku z tym, przy rozważaniach wydajności systemów i kalkulacji kosztów utrzymania konieczne jest zróżnicowanie poszczególnych lokalizacji.

Co więcej, zauważyć można, że opierając się na liczbie dni gdy średnia miesięczna temperatura nawierzchni (nawet w rozkładzie dobowym) jest ujemna otrzymujemy zupełnie inne liczby niż opierając się na dniach, w których temperatura ujemna się pojawia. Przyglądając się rozkładowi rocznym zauważalne są wahania temperatury na przestrzeni miesiąca, przede wszystkim widoczne dla miesiąca grudnia.

Analizowane dane pochodzą z okresu rocznego. Porównując je z danymi przedstawionymi w [89], gdzie analizowane były temperatury w wybranych lokalizacjach Polski na przestrzeni 30 lat zauważyć można, że w ujęciu wieloletnim, dla niektórych lokalizacji, średnie ujemne temperatury występują również w grudniu.

5.2.2 Zimowe strefy pogodowe w Polsce

Na podstawie wyników analiz danych podjęto próbę podziału powierzchni Polski na strefy pogodowe. Jako czynnik decydujący w przypadku podziału na strefy przyjęta została liczba dni z występującą niedodatnią temperaturą powietrza. Dokonując podziału

oparto się również na istniejących podziałach Polski na strefy występujących w dokumentach technicznych – podział na strefy obciążenia śniegiem zgodnie z normą PN-EN 1991-1-3:2005 [92] (rys. 44) oraz mapa z zasięgiem stref przemarzania gruntu, przyporządkowane do nich głębokości przemarzania (h_z) w Polsce według normy PN-81.B-03020 [93] (rys. 45) oraz podział Polski na strefy klimatyczne zgodnie z załącznikiem krajowym NB do PN-EN 12831 [96] (rys. 46).



Rys. 44 Mapa z podziałem na strefy obciążenia śniegiem wg PN-EN 1991-1-3:2005 [94]

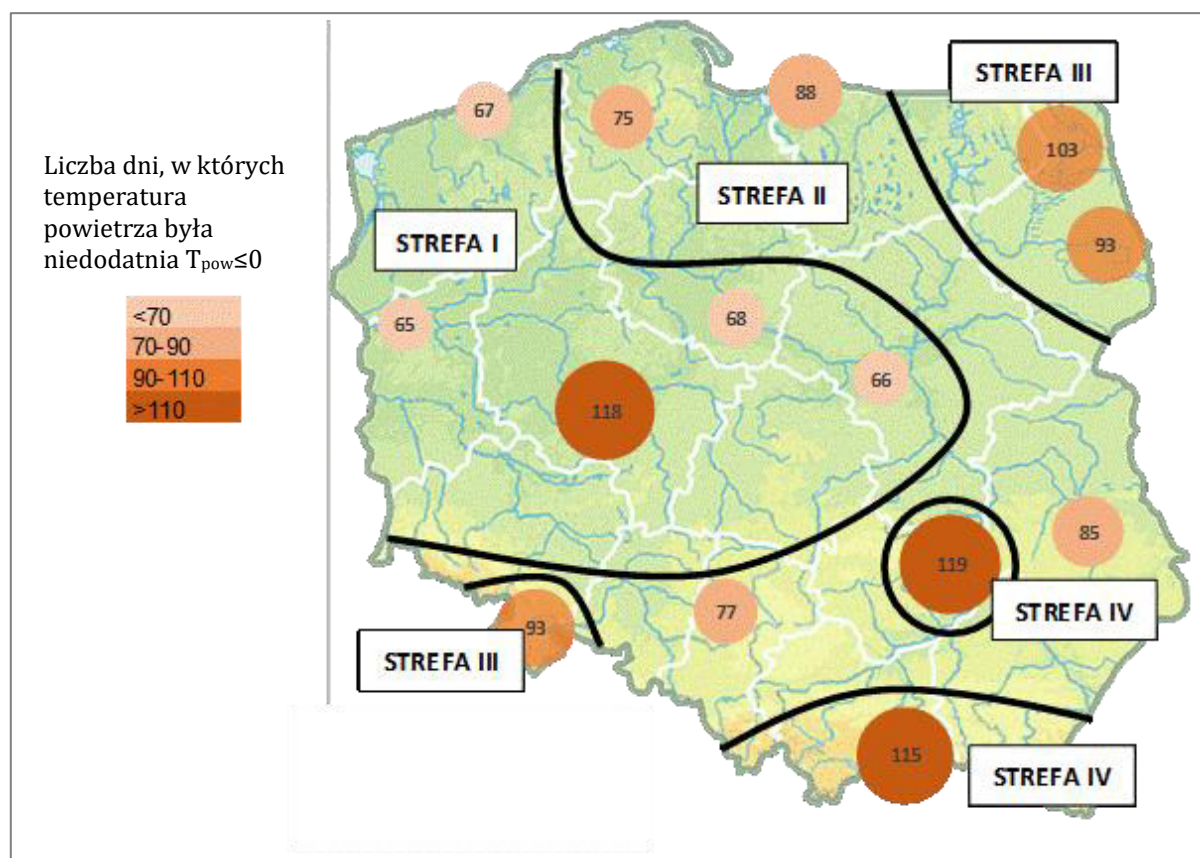


Rys. 45 Mapa z zasięgiem stref przemarzania gruntu wg PN-81.B-03020 [95]



Rys. 46 Podział Polski na strefy klimatyczne (Załącznik krajowy NB do PN-EN 12831) [96]

Wynikiem podziału Polski na strefy pogodowe jest rys. 47. Zaproponowany w ten sposób podział pozwala przyjąć pewną liczbę dni i długości okresów z występującą temperaturą ujemną. Co pozwala szacować zapotrzebowanie na system odladzania, jak również pomaga określić stopień ich wykorzystania. Porównując zaproponowany podział z mapami z norm można zauważyć podobieństwo. Pewną anomalią jest jedynie lokalizacja w województwie wielkopolskim, ale może ona być spowodowana umieszczeniem czujników w miejscu o większej ekspozycji na zimno. Biorąc pod uwagę brak przesłanek, które wskazywałyby na występowanie bieguna zimna w stacji Dobrzyce, została ona odrzucona od globalnych rozważań.



Rys. 47 Mapa przedstawiająca podział Polski na strefy ze względu na występowanie dni z temperaturami niedodatnimi

Bazując na podziale z rys. 47 wszystkim stacjom zostały przyporządkowane strefy i obliczone zostały średnie wartości: dni z występującymi niedodatnimi temperaturami nawierzchni, jak również średnia długość trwania okresu niedodatniej temperatury nawierzchni z rozdzieleniem na miesiące (styczeń i luty). Wyniki zostały przedstawione w tab. 8.

Tab. 8 Liczba godzin w ciągu dnia z ujemną temperaturą nawierzchni w poszczególnych strefach

Strefa	Średnia długość okresu ujemnej dziennej temperatury nawierzchni [h] : Styczeń	Średnia długość okresu ujemnej dziennej temperatury nawierzchni [h] : Luty	Średnia ilość dni w roku w których wystąpi ujemna temperatura
I	18,5	6,25	68,75
II	21	10,67	75,33
III	24	15,33	84,33
IV	24	10,5	85,5

5.2.3 Okresy czasowe gdy spełnione są warunki realizacji zadań utrzymania zimowego

Zważywszy na informacje przedstawione w punkcie 3.1.3 opisujące wytyczne zimowego utrzymania dróg i zasad stosowania środków odladzających, uzyskane dane

przeanalizowano odnosząc się do podziału na temperatury przedstawionego w Wytycznych (wytyczne zimowego utrzymania dróg). Występującą temperaturę podzielono na przedziały temperatur: do 0°C, od 0°C do -2,5°C, od -2,5°C do -6,5°C, od -6,5°C do -10,5°C oraz poniżej -10,5°C. Na potrzeby niniejszego opracowania przyjęto, że środki do posypywania zapobiegawczego zaczyna się stosować gdy temperatura spadnie poniżej 1°C. Otrzymane wartości (ilość okresów 10 minutowych w zależności od temperatury) przedstawiono w tabelach (tab. 9 – tab. 22) dla poszczególnych lokalizacji.

Tab. 9 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Sarbinowo

Lokalizacja	T [°C]	Temperatura 0 cm	Temperatura 20 cm	Temperatura -30 cm	Temperatura -5 cm	Temperatura odczuwalna	Temperatura powietrza	Temperatura punktu rosy
Sarbinowo	Liczba 10 minutowych odcinków czasu, w których warunek jest spełniony							
	$0 \leq T < 1,0$	1901	brak danych	2785	1787	2064	1989	3356
	$-2,5 \leq T < 0$	2813	brak danych	615	2784	2848	2602	4947
	$-6,5 \leq T < -2,5$	1964	brak danych	0	1388	2264	2311	2818
	$-10,5 \leq T < -6,5$	228	brak danych	0	0	479	316	1320
	$T < -10,5$	0	brak danych	0	0	0	0	155

Tab. 10 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Bytów Mądrzechowo

Lokalizacja	T [°C]	Temperatura 0 cm	Temperatura 20 cm	Temperatura -30 cm	Temperatura -5 cm	Temperatura odczuwalna	Temperatura powietrza	Temperatura punktu rosy
Bytów Mądrzechowo	Liczba 10 minutowych odcinków czasu, w których warunek jest spełniony							
	$0 \leq T < 1,0$	2151	2911	brak danych	2039	2332	2314	2146
	$-2,5 \leq T < 0$	3112	3110	brak danych	2845	4223	2625	4107
	$-6,5 \leq T < -2,5$	2221	1958	brak danych	1661	4383	2076	2244
	$-10,5 \leq T < -6,5$	433	378	brak danych	222	1414	704	1189
	$T < -10,5$	50	0	brak danych	0	178	81	459

Tab. 11 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Braniewo

Lokalizacja	T [°C]	Temperatura 0 cm	Temperatura 20 cm	Temperatura -30 cm	Temperatura -5 cm	Temperatura odczuwalna	Temperatura powietrza	Temperatura punktu rosy
Braniewo	Liczba 10 minutowych odcinków czasu, w których warunek jest spełniony							
	$0 \leq T < 1,0$	2292	2319	1575	2501	2379	2378	3205
	$-2,5 \leq T < 0$	1825	3708	5845	1601	3995	3083	5129
	$-6,5 \leq T < -2,5$	1006	2285	194	954	3608	2076	3651
	$-10,5 \leq T < -6,5$	386	1006	126	249	1861	971	1331

5 ANALIZA WARUNKÓW ŚRODOWISKOWYCH I LOKALIZACYJNYCH

	T < -10,5	131	326	329	14	985	206	967
--	-----------	-----	-----	-----	----	-----	-----	-----

Tab. 12 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Białobrzegi

Lokalizacja	T [°C]	Temperatura 0 cm	Temperatura 20 cm	Temperatura -30 cm	Temperatura -5 cm	Temperatura odczuwalna	Temperatura powietrza	Temperatura punktu rosy
Białobrzegi	Liczba 10 minutowych odcinków czasu, w których warunek jest spełniony							
	$0 \leq T < 1,0$	2244	brak danych	brak danych	1528	2909	3086	4279
	$-2,5 \leq T < 0$	3736	brak danych	brak danych	1846	5109	3983	5177
	$-6,5 \leq T < -2,5$	1742	brak danych	brak danych	159	3153	2081	3579
	$-10,5 \leq T < -6,5$	507	brak danych	brak danych	0	1052	1155	1318
	$T < -10,5$	6	brak danych	brak danych	0	1060	640	1217

Tab. 13 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Bobrowniki

Lokalizacja	T [°C]	Temperatura 0 cm	Temperatura 20 cm	Temperatura -30 cm	Temperatura -5 cm	Temperatura odczuwalna	Temperatura powietrza	Temperatura punktu rosy
Bobrowniki	Liczba 10 minutowych odcinków czasu, w których warunek jest spełniony							
	$0 \leq T < 1,0$	2208	2863	brak danych	2114	2406	2689	3489
	$-2,5 \leq T < 0$	3822	4940	brak danych	3889	4425	3576	5258
	$-6,5 \leq T < -2,5$	2060	2875	brak danych	2355	3975	2228	3713
	$-10,5 \leq T < -6,5$	1063	1205	brak danych	1032	1962	1340	1498
	$T < -10,5$	698	1014	brak danych	319	1483	858	1393

Tab. 14 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Bolemin

Lokalizacja	T [°C]	Temperatura 0 cm	Temperatura 20 cm	Temperatura -30 cm	Temperatura -5 cm	Temperatura odczuwalna	Temperatura powietrza	Temperatura punktu rosy
Bolemin	Liczba 10 minutowych odcinków czasu, w których warunek jest spełniony							
	$0 \leq T < 1,0$	1512	2152	brak danych	1484	2020	1684	2443
	$-2,5 \leq T < 0$	2129	2373	brak danych	1931	3564	2279	3444
	$-6,5 \leq T < -2,5$	1337	2002	brak danych	1087	2423	1766	2421
	$-10,5 \leq T < -6,5$	352	599	brak danych	42	674	336	1198
	$T < -10,5$	0	40	brak danych	0	106	3	17141

Tab. 15 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Dobrzyca

Lokalizacja	T [°C]	Temperatura 0 cm	Temperatura 20 cm	Temperatura -30 cm	Temperatura -5 cm	Temperatura odczuwalna	Temperatura powietrza	Temperatura punktu rosy
Dobrzyca	Liczba 10 minutowych odcinków czasu, w których warunek jest spełniony							
	$0 \leq T < 1,0$	2029	2802	brak danych	1871	2726	2660	3394
	$-2,5 \leq T < 0$	2675	3332	brak danych	2477	5612	4522	5652
	$-6,5 \leq T < -2,5$	2038	2295	brak danych	1782	3329	2679	3705
	$-10,5 \leq T < -6,5$	459	664	brak danych	254	1591	1306	1531
	$T < -10,5$	32	169	brak danych	0	379	255	699

Tab. 16 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Kowal

Lokalizacja	T [°C]	Temperatura 0 cm	Temperatura 20 cm	Temperatura -30 cm	Temperatura -5 cm	Temperatura odczuwalna	Temperatura powietrza	Temperatura punktu rosy
Kowal	Liczba 10 minutowych odcinków czasu, w których warunek jest spełniony							
	$0 \leq T < 1,0$	1780	brak danych	brak danych	1669	1763	2385	2821
	$-2,5 \leq T < 0$	2334	brak danych	brak danych	2055	3644	2582	3332
	$-6,5 \leq T < -2,5$	1927	brak danych	brak danych	2028	6046	1997	2113
	$-10,5 \leq T < -6,5$	644	brak danych	brak danych	386	3303	1154	1376
	$T < -10,5$	160	brak danych	brak danych	0	2637	153	786

Tab. 17 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Pruszków

Lokalizacja	T [°C]	Temperatura 0 cm	Temperatura 20 cm	Temperatura -30 cm	Temperatura -5 cm	Temperatura odczuwalna	Temperatura powietrza	Temperatura punktu rosy
Pruszków	Liczba 10 minutowych odcinków czasu, w których warunek jest spełniony							
	$0 \leq T < 1,0$	2045	2181	4490	2419	2116	1881	2875
	$-2,5 \leq T < 0$	1129	3150	2334	986	3927	2155	4762
	$-6,5 \leq T < -2,5$	1690	2083	0	1704	3157	2052	3216
	$-10,5 \leq T < -6,5$	559	1122	0	488	1573	999	1449
	$T < -10,5$	266	491	0	106	1153	527	1335

Tab. 18 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Kłodzko

Lokalizacja	T [°C]	Temperatura 0 cm	Temperatura 20 cm	Temperatura -30 cm	Temperatura -5 cm	Temperatura odczuwalna	Temperatura powietrza	Temperatura punktu rosy
Kłodzko Estakada	Liczba 10 minutowych odcinków czasu, w których warunek jest spełniony							
	$0 \leq T < 1,0$	1645	975	brak danych	1451	1465	1492	2813
	$-2,5 \leq T < 0$	3043	6254	brak danych	2954	2770	3033	4951
	$-6,5 \leq T < -2,5$	2875	846	brak danych	3055	2684	2617	5150
	$-10,5 \leq T < -6,5$	1004	0	brak danych	885	1375	1034	2163
	$T < -10,5$	417	0	brak danych	307	852	307	964

Tab. 19 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Piekary Śląskie

Lokalizacja	T [°C]	Temperatura 0 cm	Temperatura 20 cm	Temperatura -30 cm	Temperatura -5 cm	Temperatura odczuwalna	Temperatura powietrza	Temperatura punktu rosy
Piekary Śląskie	Liczba 10 minutowych odcinków czasu, w których warunek jest spełniony							
	$0 \leq T < 1,0$	1632	brak danych	938	1199	2286	2182	2749
	$-2,5 \leq T < 0$	2417	brak danych	6841	2740	4086	2877	5196
	$-6,5 \leq T < -2,5$	1835	brak danych	215	1722	3437	2106	3125
	$-10,5 \leq T < -6,5$	502	brak danych	0	408	1575	1047	2099
	$T < -10,5$	508	brak danych	0	306	1053	648	1118

Tab. 20 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Łagów

Lokalizacja	T [°C]	Temperatura 0 cm	Temperatura 20 cm	Temperatura -30 cm	Temperatura -5 cm	Temperatura odczuwalna	Temperatura powietrza	Temperatura punktu rosy
Łagów	Liczba 10 minutowych odcinków czasu, w których warunek jest spełniony							
	$0 \leq T < 1,0$	1897	brak danych	2584	1927	2701	2681	2513
	$-2,5 \leq T < 0$	2781	brak danych	4528	2449	3610	3578	6142
	$-6,5 \leq T < -2,5$	2325	brak danych	2262	2484	2033	2022	4016
	$-10,5 \leq T < -6,5$	1094	brak danych	0	614	1865	1857	2515
	$T < -10,5$	390	brak danych	0	240	990	990	2866

Tab. 21 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Piaski

Lokalizacja	T [°C]	Temperatura 0 cm	Temperatura 20 cm	Temperatura -30 cm	Temperatura -5 cm	Temperatura odczuwalna	Temperatura powietrza	Temperatura punktu rosy
Piaski	Liczba 10 minutowych odcinków czasu, w których warunek jest spełniony							
	$0 \leq T < 1,0$	1815	brak danych	5623	1855	2266	1908	3092
	$-2,5 \leq T < 0$	3085	brak danych	2080	2494	3784	2412	5183
	$-6,5 \leq T < -2,5$	2036	brak danych	0	2141	3752	1813	3248
	$-10,5 \leq T < -6,5$	958	brak danych	0	696	2091	1570	1703
	$T < -10,5$	526	brak danych	0	224	1883	740	1564

Tab. 22 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Nawojowa

Lokalizacja	T [°C]	Temperatura 0 cm	Temperatura 20 cm	Temperatura -30 cm	Temperatura -5 cm	Temperatura odczuwalna	Temperatura powietrza	Temperatura punktu rosy
Nawojowa	Liczba 10 minutowych odcinków czasu, w których warunek jest spełniony							
	$0 \leq T < 1,0$	1931	brak danych	3667	1813	2054	1897	2027
	$-2,5 \leq T < 0$	2716	brak danych	5390	2250	3797	3551	3069
	$-6,5 \leq T < -2,5$	2269	brak danych	0	2174	2495	2342	2690
	$-10,5 \leq T < -6,5$	998	brak danych	0	757	1591	1474	1106
	$T < -10,5$	444	brak danych	1	237	1235	1171	990

Na podstawie zgromadzonych danych oraz przeprowadzonych analiz możliwe jest wyliczenie teoretycznych ilości koniecznych do zastosowania środków chemicznych oraz określenie koniecznych do zastosowania zasobów sprzętowych oraz ludzkich. Ilości te pomnożone przez koszty obrazują wydatki na utrzymanie zimowe dla założonych lokalizacji. W dalszej analizie koszty będzie można porównać z kosztami wykonania nawierzchni samoodładzającej wraz z jej późniejszą eksploatacją.

5.2.4 Wnioski – warunki środowiskowe

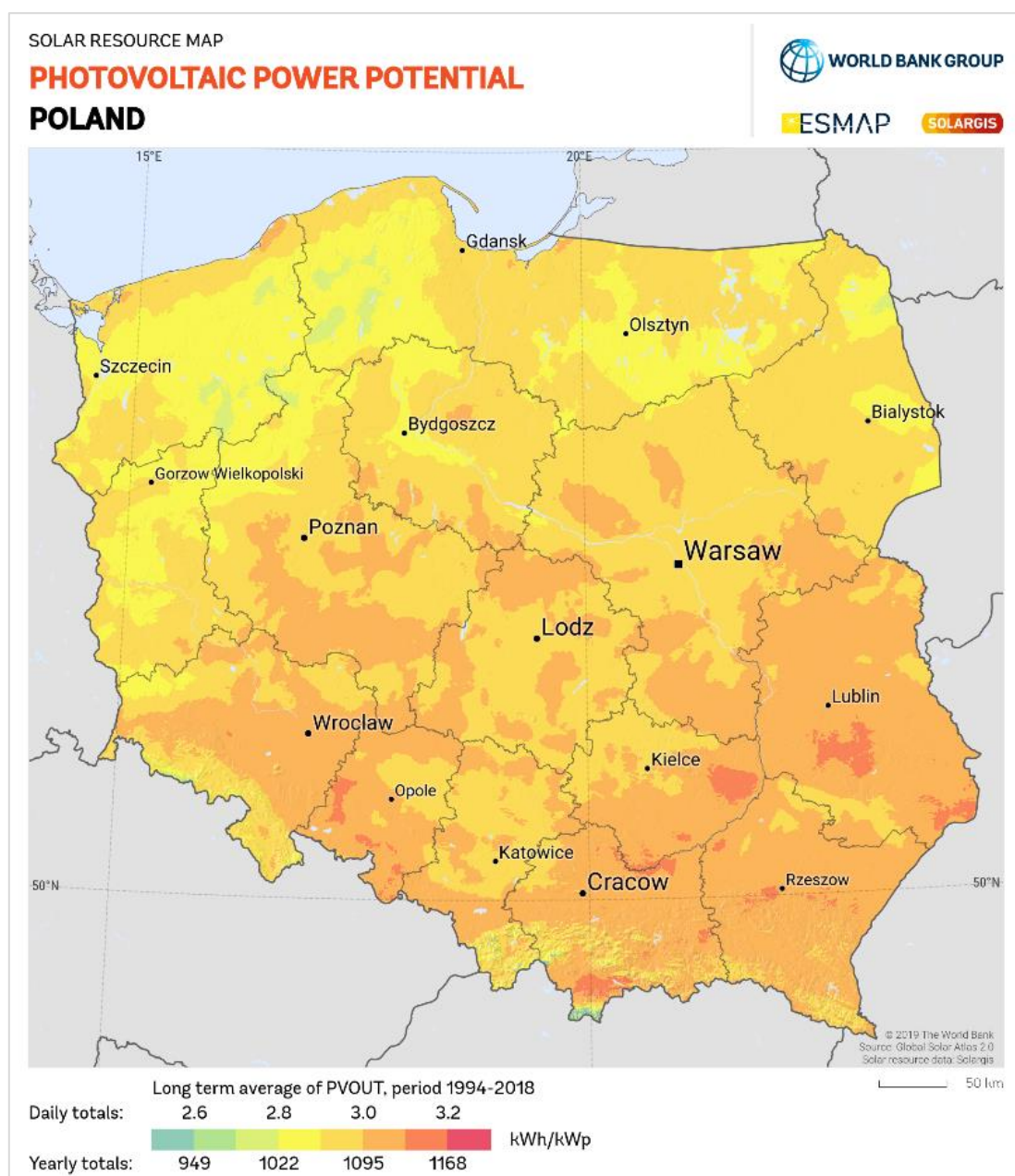
Na podstawie przeanalizowanych i zestawionych danych widoczne jest, że warunki środowiskowe występujące w danym miejscu mają znaczący wpływ na lokalizację, a za czym idzie na instalacje samoodładzania. Jej wydajność i efektywność są ściśle powiązane z panującymi temperaturami, częstotliwością przejść przez temperaturę 0°C, jak również ilością dni kiedy instalacja ma działać. Przedstawiony przez autorkę podział na strefy pogodowe pozwala w szybki sposób przypisać rozpatrywaną lokalizację do uśrednionych danych dotyczących ilości dni, w których występuje i ilości godzin w ciągu dnia, przez które utrzymuje się ujemna temperatura. Na bazie tych uśrednionych wartości możliwe jest oszacowanie kosztów eksploatacji instalacji, co w połączeniu z kosztami wbudowania daje pogląd na temat całkowitych kosztów realizacji i ich opłacalności.

5.3 Warunki lokalizacyjne – nasłonecznienie, dostępność sieci

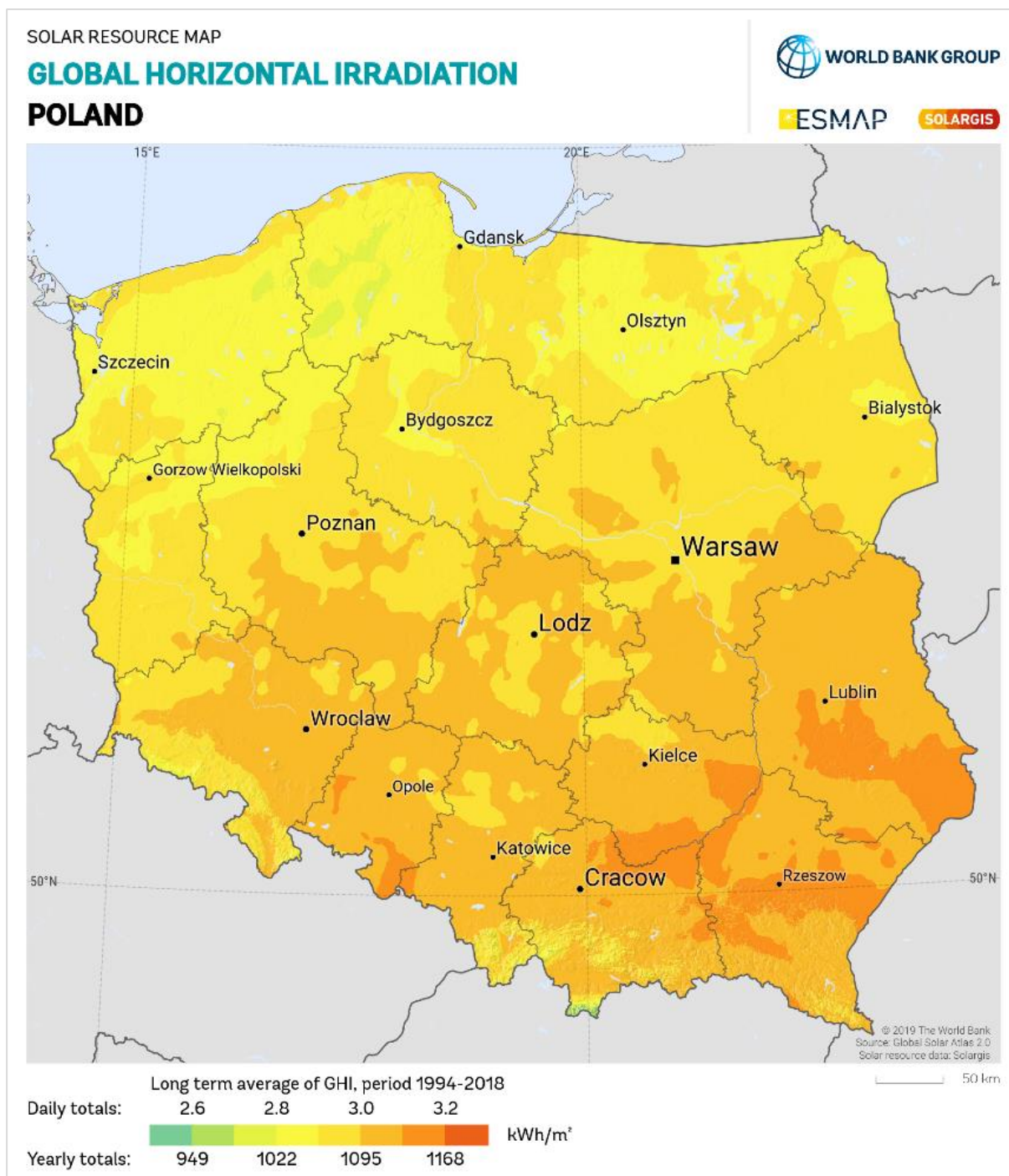
5.3.1 Nasłonecznienie

Nasłonecznienie w Polsce, choć niższe od tego, które występuje na południu Europy, powoduje, że instalacje fotowoltaiczne są rozwiązaniem opłacalnym na terenie naszego kraju. W ostatnich latach w Polsce obserwujemy rozwój branży fotowoltaicznej, a w 2022 wzrost na rynku fotowoltaicznym wyniósł 61 %. Na koniec roku 2022 Polska była na szóstym miejscu krajów w Unii Europejskiej w zestawieniu mocy zainstalowanej fotowoltaiki [97]. Panele fotowoltaiczne mogą być instalowane w każdym miejscu naszego kraju, oczywiście o ile otoczenie nie ogranicza dostępu do promieni słonecznych.

Poniższe mapy prezentują potencjał mocy fotowoltaicznej (rys. 48) oraz globalne napromieniowanie poziome (rys. 49).



Rys. 48 Potencjał mocy fotowoltaicznej [98]

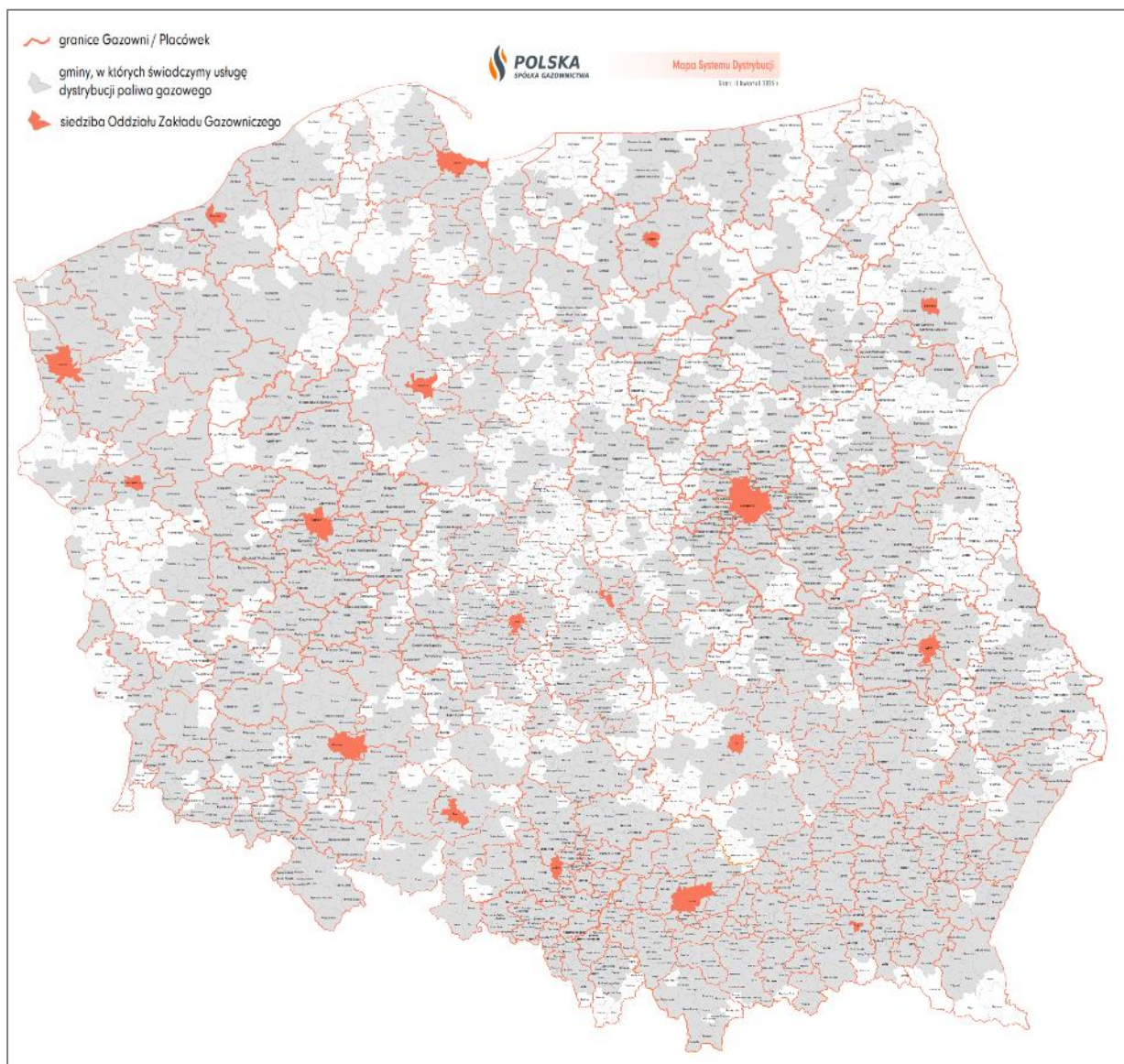


Rys. 49 Globalne napromieniowanie poziome na terenie Polski [98]

5.3.2 Dostępność sieci gazowej

W ostatnich latach zauważyć można znaczne rozbudowanie sieci gazowej w Polsce. W 2018 r. wprowadzono program rozwoju gazyfikacji, którego celem było doprowadzenie do sytuacji, w której 90% obywateli Polski będzie żyło w gminach zgazyfikowanych [99]. W dalszym ciągu występują jednak obszary, które nie zostały zgazyfikowane, a drogi nierzadko zlokalizowane są na obszarach niezamieszkałych, gdzie zapotrzebowanie na gaz może być niskie. Poniższa mapa (rys. 50) została opracowana na podstawie map dla poszczególnych oddziałów Zakładów Gazowniczych i prezentuje gminy, na których

świadczane są usługi dystrybucji paliwa gazowego lub, w których znajdują się siedziby tych oddziałów. Białe gminy, to gminy, w których usługi te nie są świadczone.



Rys. 50 Mapa systemu dystrybucji Polskiej Spółki Gazownictwa – stan II kwartał 2023 (opracowanie na podstawie map dla oddziałów Zakładów Gazowniczych [100])

5.3.3 Warunki lokalizacyjne – podsumowanie

Na przykładzie powyższych map można zauważyć, że lokalizacja potencjalnych inwestycji będzie znacząca dla możliwości jej wykonania oraz doboru technologii. Mimo wysokiego stopnia gazyfikacji można trafić na miejsce, w którym dostępu do sieci nie będzie. Pomimo dobrych warunków nasłonecznienia w całej Polsce, pamiętać należy o otoczeniu miejsca potencjalnej inwestycji, czy dostęp do promieni słonecznych nie zostanie zaburzony przez wysokie drzewa lub zabudowania. Podobnie będzie z dostępem do sieci elektrycznej – inwestycje drogowe mogą być zlokalizowane wszędzie, nawet w miejscach oddalonych od zabudowań, gdzie na wcześniejszym etapie nie było potrzeby na

doprowadzenie prądu. Wszystko to może mieć znaczący wpływ na możliwość wykonania inwestycji oraz jej ostatecznych kosztów.

6 ANALIZA KOSZTOWA

6.1 Analiza kosztów utrzymania zimowego metodami standardowymi

Informacje odnośnie kosztów utrzymania zimowego są najczęściej podawane dla całego obszaru zarządzanego przez danego zarządcę dróg. Analizę utrzymania zimowego przeprowadzono dla obszaru Polski północno-wschodniej ponieważ również w tej okolicy wyceniano wykonanie instalacji grzewczej przedstawione w kolejnym punkcie.

Podlaski Zarząd Dróg Wojewódzkich w Białymstoku udostępnia w Biuletynie Informacji Publicznej wyniki oraz szczegóły przetargu na zimowe utrzymanie dróg wojewódzkich w sezonach: 2018/2019, 2019/2020, 2020/2021 na terenie województwa podlaskiego z podziałem na zadania [101]. Na podstawie informacji podanych w dokumentach przetargowych przygotowano tabelę (tab. 23) prezentującą orientacyjne koszty utrzymania zimowego dla metod tradycyjnych. Średnio wynoszą one niecałe 100 zł/100 m².

Tab. 23 Orientacyjne koszty utrzymania zimowego dla metod tradycyjnych

	Budżet na 3 sezony [PLN]	budżet na 1 sezon [PLN]	długość dróg [km]	Cena [PLN/ 1 km]	Cena [PLN/ 100m ²]
zad 1 RDW w Białymstoku	4 200 000,00	1 400 000,00	282,856	4949,51	82,49
zad 2 RDW w Łomży	4 200 000,00	1 400 000,00	219,018	6392,17	106,54
zad 3 RDW w Siemiatyczach	4 200 000,00	1 400 000,00	265,869	5265,75	87,76
zad 4 RDW w Sokółce	4 200 000,00	1 400 000,00	255,722	5474,70	91,24
zad 5 RDW w Suwałkach	4 200 000,00	1 400 000,00	252,685	5540,50	92,34

średnio 92,08 zł

Na podstawie danych ze stacji pomiarowych trudno jest jednoznacznie określić koszty – nie posiadają one informacji o opadach śniegu, więc np. uwzględnienie kosztów pługów zostało pominięte.

Analizie poddano jednak dane ze stacji w Białobrzegach, która jest zlokalizowana najbliżej do obszaru z zad. 4 RDW w Sokółce. Zebrane dane analizowano w odcinkach godzinnych. Przyjęto jednak opcję najbardziej krytyczną – dla każdej godziny wymagane będzie zwalczanie śliskości. Uwzględnienie takich warunków zdecydowanie zniweluje brak uwzględnienia kosztów pługu, równiarki, ładowarki oraz posypki z piaskosoli, która stosowana jest stosunkowo rzadko. Przy tak bezpiecznych założeniach otrzymano 348 h gotowości solarki z pługiem jednostronnym (20g/m²) oraz 343 h gotowości solarki z pługiem jednostronnym (30g/m²). Dla tych założeń koszt metod tradycyjnych wyniósł 1554,50 zł za sezon zimowy (na podstawie danych pogodowych z roku 2017, tab. 24).

Tab. 24 Teoretyczne koszty utrzymania zimowego dla metod tradycyjnych w lokalizacji Białobrzegi

		zwalczanie śliskości z ceną materiału [zł/100m ²]	Koszt [zł/100m ²]
Solarka z pługiem jednostronnym	20g/m ²	2,20	765,60
	30g/m ²	2,30	788,90

ŁĄCZNIE: 1554,50

6.2 Analiza kosztów wykonania instalacji – zwiększenie kosztu nawierzchni typowej

W tab. 25 przedstawiono wady i zalety oraz zestawiono koszty eksploatacyjne, oraz inwestycyjne dla technologii nawierzchni samoodładzających. Dane zostały opracowane w oparciu o informacje (rekomendacje, informacje o kosztach, o żywotności) uzyskane od firmy zewnętrznej specjalizującej się w wykonywaniu instalacji grzewczych aktualne w momencie pozyskiwania tych informacji (2020 r.).

Tab. 25 Wady i zalety, koszty inwestycyjne oraz eksploatacyjne dla technologii samoodładzania nawierzchni

	Instalacja elektryczna zasilana z sieci elektrycznej	Instalacja elektryczna zasilana panelami PV	Instalacja hydrauliczna zasilana gazową powietrzną pompą ciepła	Instalacja hydrauliczna zasilana elektryczną powietrzną pompą ciepła wspierana zasilaniem elektrycznym z sieci	Instalacja hydrauliczna zasilana elektryczną powietrzną pompą ciepła wspierana zasilaniem elektrycznym z paneli PV	Instalacja hydrauliczna zasilana gazową gruntową pompą ciepła
Zalety	Niskie koszty inwestycyjne Długi okres eksploatacji	Niskie koszty eksploatacyjne Rozwiązanie ekologiczne	Niskie koszty inwestycyjne Niskie koszty eksploatacyjne	Niskie koszty inwestycyjne	Niskie koszty eksploatacyjne Rozwiązanie ekologiczne	Niskie koszty eksploatacyjne
Wady	Bardzo wysokie koszty eksploatacyjne	Bardzo wysokie koszty inwestycyjne – panele PV Zapotrzebowanie na duży niezacieniony obszar, do ogrodzenia	Wymagany dostęp do sieci gazowej w okolicy	Zależność źródła ciepła od temperatury powietrza Ograniczenie pracy do minimalnej temperatury powietrza: -15 °C Wymagane dodatkowe źródło ciepła ze względu na grzałki elektryczne	Wysokie koszty inwestycyjne Zależność źródła ciepła od temperatury powietrza Ograniczenie pracy do minimalnej temperatury powietrza: -15 °C	Wysokie koszty inwestycyjne Wymagany dostęp do sieci gazowej w okolicy
Koszt inwestycyjny*	30 000 zł	225 000 zł	83 000 zł	76 000 zł	120 000 zł	110 000 zł
Koszt eksploatacyjny**	14 500 zł / rok	1 500 zł / rok	2 500 zł / rok	5 000 zł / rok	1 000 zł / rok	2 000 zł / rok

* Koszt netto dla instalacji na powierzchni 100 m²** Koszt przy założeniu rocznego zapotrzebowania na energię ~200 kWh/m²

Żywotność systemów z zastosowaniem instalacji hydraulicznej wynosi 15-20 lat, żywotność systemów z zastosowaniem paneli fotowoltaicznych wynosi ok. 25 lat, natomiast żywotność systemu elektrycznego zasilanego z instalacji sięga nawet 50 lat. Ze względu na trwałość nawierzchni zdecydowano się przedstawić analizę kosztów wykonania inwestycji wraz z jej użytkowaniem w okresie 25 lat. Dla instalacji hydraulicznej przyjęto ponowne wykonanie inwestycji po 15 latach użytkowania. Wyniki niniejszej analizy przedstawia tab. 26.

W oparciu o uzyskane informacje jako rekomendowane (główne) rozwiązania wybrano instalację elektryczną zasilaną panelami PV lub instalację hydrauliczną zasilaną gazową powietrzną pompą ciepła. Jednakże specyfika rozwiązań wraz z dostępnością do sieci oraz terenu koniecznego do wykonania potrzebnej instalacji wymaga każdorazowo indywidualnego podejścia do ofertowanej inwestycji. Nie sposób wybrać jedno rozwiązanie idealne dla każdej lokalizacji w granicach Polski – koszty doprowadzenia sieci, zagwarantowania wymaganej powierzchni terenu mogą mieć znaczący wpływ na wybór ostatecznego rozwiązania.

Tab. 26 Narastające wyliczenie kosztów inwestycyjnych oraz eksploatacyjnych dla technologii samoodładzania nawierzchni

	Instalacja elektryczna zasilana z sieci elektrycznej			Instalacja elektryczna zasilana panelami PV			Instalacja hydrauliczna zasilana gazową powietrzną pompą ciepła			Instalacja hydrauliczna zasilana elektryczną powietrzną pompą ciepła wspierana zasilaniem elektrycznym z sieci			Instalacja hydrauliczna zasilana elektryczną powietrzną pompą ciepła wspierana zasilaniem elektrycznym z paneli PV			Instalacja hydrauliczna zasilana gazową gruntową pompą ciepła		
Rok	KI*	KE*	Suma	KI*	KE*	Suma	KI*	KE*	Suma	KI*	KE*	Suma	KI*	KE*	Suma	KI*	KE*	Suma
1	30 000	14 500	44 500	225 000	1 500	226 500	83 000	2 500	85 500	76 000	5 000	81 000	120 000	1 000	121 000	110 000	2 000	112 000
2		14 500	59 000		1 500	228 000		2 500	88 000		5 000	86 000		1 000	122 000		2 000	114 000
3		14 500	73 500		1 500	229 500		2 500	90 500		5 000	91 000		1 000	123 000		2 000	116 000
4		14 500	88 000		1 500	231 000		2 500	93 000		5 000	96 000		1 000	124 000		2 000	118 000
5		14 500	102 500		1 500	232 500		2 500	95 500		5 000	101 000		1 000	125 000		2 000	120 000
6		14 500	117 000		1 500	234 000		2 500	98 000		5 000	106 000		1 000	126 000		2 000	122 000
7		14 500	131 500		1 500	235 500		2 500	100 500		5 000	111 000		1 000	127 000		2 000	124 000
8		14 500	146 000		1 500	237 000		2 500	103 000		5 000	116 000		1 000	128 000		2 000	126 000
9		14 500	160 500		1 500	238 500		2 500	105 500		5 000	121 000		1 000	129 000		2 000	128 000
10		14 500	175 000		1 500	240 000		2 500	108 000		5 000	126 000		1 000	130 000		2 000	130 000
11		14 500	189 500		1 500	241 500		2 500	110 500		5 000	131 000		1 000	131 000		2 000	132 000
12		14 500	204 000		1 500	243 000		2 500	113 000		5 000	136 000		1 000	132 000		2 000	134 000
13		14 500	218 500		1 500	244 500		2 500	115 500		5 000	141 000		1 000	133 000		2 000	136 000
14		14 500	233 000		1 500	246 000		2 500	118 000		5 000	146 000		1 000	134 000		2 000	138 000
15		14 500	247 500		1 500	247 500	83 000	2 500	203 500	76 000	5 000	227 000	120 000	1 000	255 000	110 000	2 000	250 000
16		14 500	262 000		1 500	249 000		2 500	206 000		5 000	232 000		1 000	256 000		2 000	252 000
17		14 500	276 500		1 500	250 500		2 500	208 500		5 000	237 000		1 000	257 000		2 000	254 000
18		14 500	291 000		1 500	252 000		2 500	211 000		5 000	242 000		1 000	258 000		2 000	256 000
19		14 500	305 500		1 500	253 500		2 500	213 500		5 000	247 000		1 000	259 000		2 000	258 000
20		14 500	320 000		1 500	255 000		2 500	216 000		5 000	252 000		1 000	260 000		2 000	260 000
21		14 500	334 500		1 500	256 500		2 500	218 500		5 000	257 000		1 000	261 000		2 000	262 000
22		14 500	349 000		1 500	258 000		2 500	221 000		5 000	262 000		1 000	262 000		2 000	264 000
23		14 500	363 500		1 500	259 500		2 500	223 500		5 000	267 000		1 000	263 000		2 000	266 000
24		14 500	378 000		1 500	261 000		2 500	226 000		5 000	272 000		1 000	264 000		2 000	268 000
25		14 500	392 500		1 500	262 500		2 500	228 500		5 000	277 000		1 000	265 000		2 000	270 000

* KI – koszt inwestycyjny, KE – koszt eksploatacyjny; Koszt netto[*zł*] dla instalacji na powierzchni 100 m²; przy założeniu rocznego zapotrzebowania na energię ~200 kWh/m²

6.3 Porównanie kosztów instalacji ze standardowymi metodami

Porównując koszty przedstawione w punktach 6.1 oraz 6.2 można zauważyć, że roczne koszty metod tradycyjnych są nieporównywalnie niższe w stosunku do kosztów wykonania i utrzymania nawierzchni samoodładzających (9140-11080 zł/rocznie; wyłączając rozwiązanie instalacji elektrycznej zasilanej z sieci). Należy pamiętać jednak o tym, że metody te są niezwykle powszechne, a metody alternatywne są rzadkością. Rozwój alternatywnych źródeł energii daje nadzieję, że ceny będą spadać i w przyszłości rozbieżność cenowa będzie się zmniejszać. Stosowanie środków chemicznych ma jednak ogromny wpływ na otaczające nas środowisko, więc każda metoda zmniejszająca ten negatywny wpływ jest warta rozważenia.

Otrzymane wyceny dla technologii samoodładzania były przedstawiane dla rozwiązań na niewielkich odcinkach, do stosowania w miejscach niebezpiecznych. Zastosowanie technologii na większej powierzchni powinno obniżyć koszty jednostkowe, jednakże na ten moment różnica cenowa jest znacząca.

7 BADANIA LABORATORYJNE

7.1 Wprowadzenie

W celu zaprojektowania mieszanki dedykowanej do nawierzchni odładzających zdecydowano o konieczności wykonania badań parametrów termicznych mieszanek nawierzchniowych najczęściej stosowanych w Polsce. Badania te pozwalają na określenie wpływu składników tych mieszanek na właściwości termiczne.

W niniejszym rozdziale opisano wyniki badań przewodności cieplnej k wybranych asfaltów, standardowych mieszanek mineralno-asfaltowych oraz mieszanek mineralno-asfaltowych z zastosowaniem dodatku włókien stalowych oraz grafitu. Wszystkie badane materiały są typowe jeżeli chodzi o zastosowanie w Polsce. Wartości wskazywane w przeglądzie literatury pochodzą z badań wielu autorów, różniących się zarówno stanowiskiem badawczym jak i sposobem przeprowadzania eksperymentu. Dodatkowo wpływ na wyniki mają różnice we właściwościach materiałów występujących lokalnie. W związku z czym konieczne jest przeprowadzenie badań własnych.

Warstwy nawierzchni drogowej w Polsce wykonuje się w największym stopniu z mieszanek mineralno-asfaltowych (nawierzchnie podatne) lub z betonów cementowych (nawierzchnie sztywne). W niniejszym opracowaniu skupiono się na mieszankach mineralno-asfaltowych. Zgodnie z Wymaganiami Technicznymi [102] wyróżnić można następujące typy mieszanek mineralno-asfaltowych:

- Beton asfaltowy (AC)
- Beton asfaltowy o wysokim module sztywności (AC WMS)
- Beton asfaltowy do bardzo cienkich warstw (BBTM)

- SMA – mieszanka z grubego kruszywa łamanego, o nieciągłym uziarnieniu, związanego zaprawą mastyksową
- Asfalt lany (MA)
- Asfalt porowaty (PA)
- Destrukt asfaltowy (RA).

W zależności od typu mieszanki mineralno-asfaltowej, warstwy oraz Kategorii Ruchu wykonywanej nawierzchni badane są następujące właściwości:

- Zawartość wolnych przestrzeni
- Wolne przestrzenie wypełnione lepiszczem
- Zawartość wolnych przestrzeni w mieszance mineralnej
- Wrażliwość na działanie wody
- Odporność na deformacje trwałe
- Współczynnik luminancji
- Sztywność – dotyczy AC WMS
- Odporność na zmęczenie – dotyczy AC WMS
- Odporność na spękania niskotemperaturowe – dotyczy AC WMS
- Spływność lepiszcza – dotyczy SMA, PA
- Odporność na deformacje trwałe, penetracja statyczna – dotyczy MA
- Ubytek ziaren – dotyczy PA

Wymagane wartości dla powyższych właściwości określone są w Wytycznych Technicznych [102], a metodyka przeprowadzania badań oraz przygotowania próbek określona jest w odpowiednich normach z serii PN-EN 12697 [103], [104], [105], [106], [107] [108] oraz serii PN-EN 13108 [109].

7.2 Badania laboratoryjne właściwości termicznych materiałów stosowanych w budownictwie nawierzchniowym w Polsce

W przypadku nawierzchni samoodładzających, dodatkowo pojawia się potrzeba określenia parametrów cieplnych. Badania właściwości termicznych, a dokładniej współczynnika przewodności cieplnej gotowych mieszanek wykonano za pomocą miernika KD2 Pro Thermal Analyzer. Badanie wykorzystuje metodę TLS [70]. Po podłączeniu przewodu sondy igłowej do rejestratora KD2 Pro, wprowadzeniu jej w całości do badanej próbki oraz odczekaniu 15 minut w celu doprowadzenia do stanu równowagi poprzez wyrównanie się temperatur próbki oraz sondy uruchamiano urządzenie. Przez 10 min trwania badania rejestrowano wartości temperatury w czasie – przez pierwsze 5 min następowała faza grzania dzięki przepływowi prądu o stałym natężeniu w sondzie igłowej, a przez kolejne 5 minut następowała faza chłodzenia. Procedura wyznaczenia współczynnika przewodności cieplnej zastosowana w mierniku KD2Pro jest opisana normą ASTM D5334-08, która opisuje procedurę wyznaczania

przewodności cieplnej gruntów i skał [110]. Do wyznaczenia współczynnika przewodności cieplnej potrzebne są temperatury rejestrowane zarówno w fazie grzania, jak i fazy chłodzenia. Temperatura podczas fazy ogrzewania obliczana jest na podstawie (15), a podczas fazy chłodzenia na podstawie (16). [111]

$$T = m_0 + m_2 t + m_3 \ln t \quad (15)$$

$$T = m_1 + m_2 t + m_3 \ln \left[\frac{t}{(t-t_h)} \right] \quad (16)$$

m_0 – temperatura otoczenia podczas ogrzewania,

m_2 – szybkość dryftu temperatury,

m_3 – nachylenie linii stosunku wzrostu temperatury do logarytmu temperatury,

t – czas,

t_h – czas grzania.

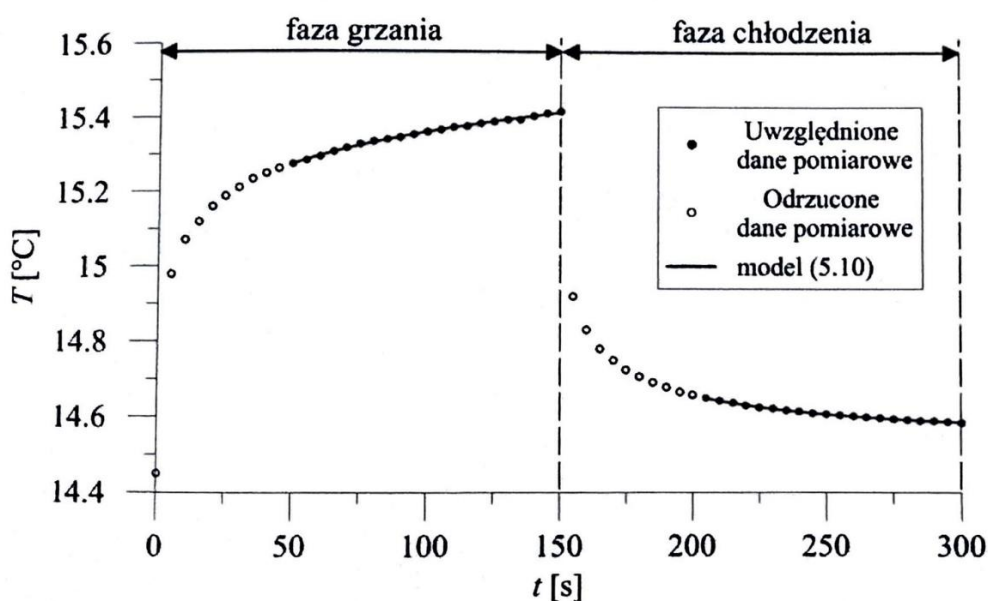
Współczynnik przewodności cieplnej k wyznacza się z równania (17).

$$k = \frac{q}{4\pi m_3} \quad (17)$$

q – zadane ciepło,

m_3 – nachylenie linii stosunku wzrostu temperatury do logarytmu temperatury,

Zgodnie z zaleceniami normy ASTM D5334-08 (2008) 1/3 początkowych pomiarów temperatury w obu fazach: grzania oraz chłodzenia jest pomijana. Procedura pozwalająca określić współczynnik przewodności cieplnej została graficznie przedstawiona na rys. 51 [110].



Rys. 51 Procedura określania współczynnika przewodności cieplnej zgodnie z normą ASTM D5334-08 (2008) [110]

Wymiar próbek badawczych dobrano zgodnie z zaleceniami instrukcji [111] tak, aby sensor pomiarowy był otoczony materiałem przynajmniej o 1.5 cm. Ze względu na długość igły pomiarowej równą 100 mm zdecydowano o przygotowaniu próbki mieszanek mineralno-asfaltowych zgodnie z Zeszytem 48 [112] – w formie próbki Marshalla o wysokości ok. 11 cm z wykonanymi otworami na umieszczenie sondy, zagęszczanej poprzez 120 uderzeń ubijaka na stronę. Wielkość przygotowywanej próbki jest zbliżona do próbki jaką kiedyś wykonywano do oznaczania odkształcenia i modułu sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej metodą pełzania pod obciążeniem statycznym. W trakcie pomiaru używano pasty termoprzewodzącej. Pomiary dla asfaltów wykonywano na próbkach materiału umieszczonego w puszcze metalowej o średnicy 99 mm, wysokości 146 mm.

Badania właściwości termicznych wykonano dla następujących grup materiałów:

- Asfalty stosowane w Polsce
- Przykładowe mieszanki mineralno-asfaltowe stosowane powszechnie w Polsce
- Mieszanki z zastosowaniem dodatków – włókien stalowych oraz grafitu w odniesieniu do mieszanek typowych.

7.2.1 Asfalty stosowane w Polsce

Wykonano pomiary współczynnika przewodności cieplnej asfaltów stosowanych w Polsce. Przebadano asfalty drogowe: 20/30, 35/50, 50/70, asfalty modyfikowane: 25/55-60 i 45/80-55 oraz Asfalt Modyfikowany Gumą.

Tab. 27 Wyniki pomiarów przewodności cieplnej asfaltów stosowanych w Polsce

Asfalt	k [W/mK]
20/30	0.152
35/50	0.157
50/70	0.152
25/55-60	0.153
45/80-55	0.158
Asfalt Modyfikowany Gumą	0.174

Wartości przewodności asfaltów przedstawione w tab. 27 niewiele się różnią. Jedynie Asfalt Modyfikowany Gumą charakteryzuje się współczynnikiem przewodności cieplnej wyższym o ok. 0,02 W/mK od wartości osiągniętych przez pozostałe asfalty. Wartości te są jednak na tyle niskie, a zawartość asfaltu w składzie mieszanki na tyle niewielka, że

zastosowane lepiszcze nie powinno mieć wpływu na wydajność nawierzchni samoodładzającej.

7.2.2 Mieszanki mineralno-asfaltowe stosowane powszechnie na kontraktach

Wykonano pomiary współczynnika przewodności cieplnej wybranych mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych powszechnie na kontraktach. Mieszanki zostały wybrane spośród mieszanek oferowanych przez firmę STRABAG. Przeprowadzono pomiary przewodności cieplnej typowych mieszanek drogowych - mieszanki SMA, WMS oraz betonu asfaltowego, z zastosowaniem następujących kruszyw: gabbro, szarogłaz, granit, żwir, melafir oraz bazalt (rys. 52).



Rys. 52 Pomiar przewodności cieplnej próbek mieszanki mineralno-asfaltowej za pomocą miernika KD2 Pro Thermal Analyzer

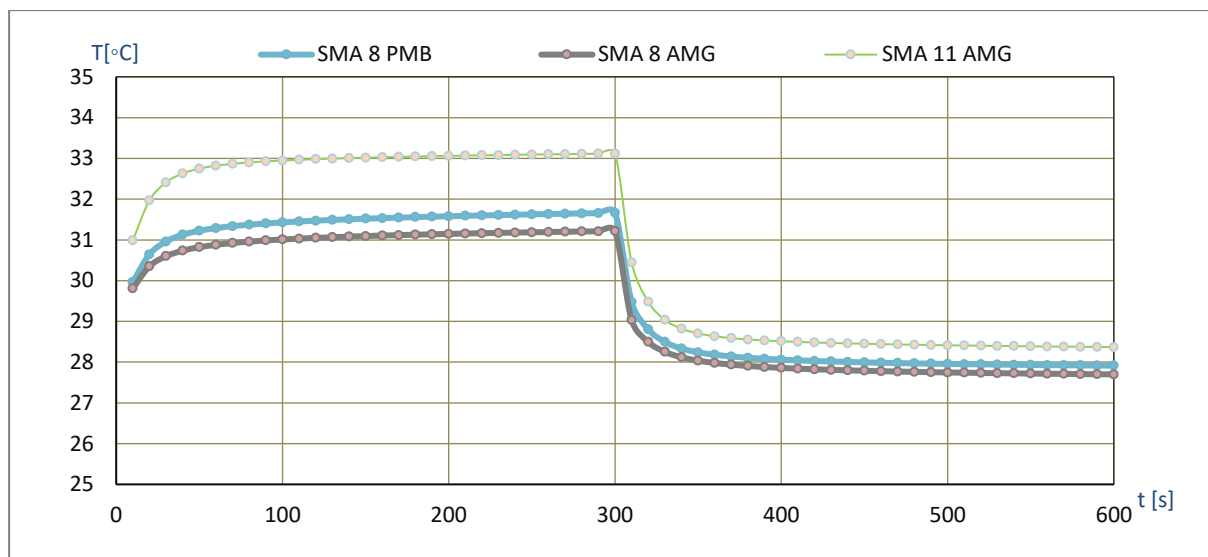
Dodatkowo do wyniku pomiaru współczynnika przewodności cieplnej k , w tab. 28 dodano informacje o ilości asfaltu całkowitego B [%] oraz zawartości wolnych przestrzeni V_a [%] w badanych mieszankach.

Tab. 28 Mieszanki mineralno-asfaltowe poddane pomiarom współczynnika przewodności cieplnej k

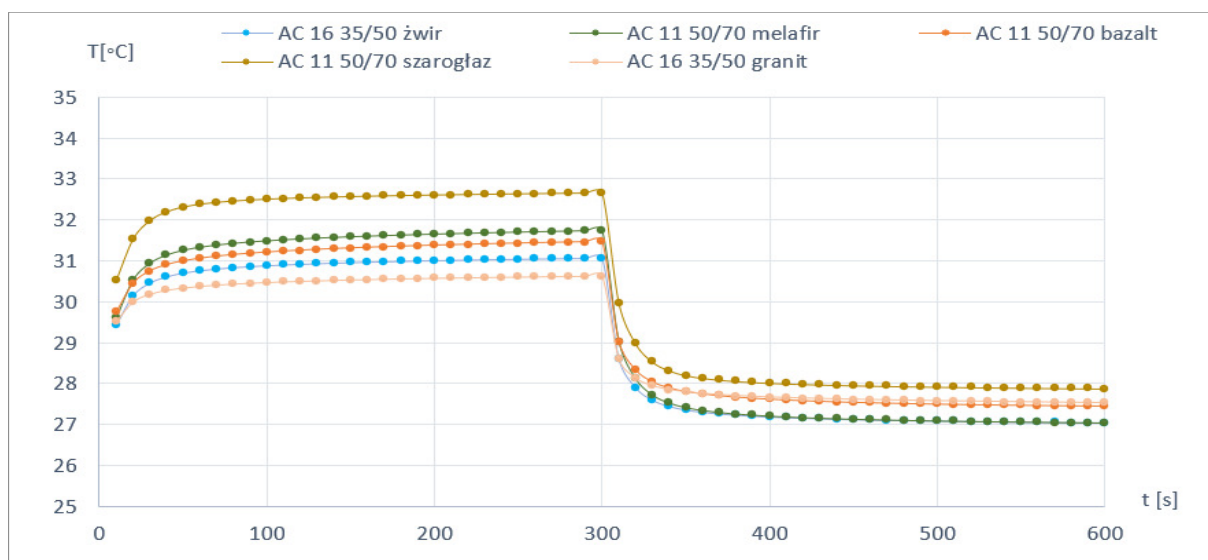
Mieszanka	Kruszywo	k [W/mK]	B [%]	V_a [%]
SMA 8 AMG KR 5-6	gabro	1,664	6,5	4,5
SMA 11 AMG KR 5-6	szarogłaz	2,006	6,9	5,0
SMA 8 PMB 45/80-55 KR 5-7	gabro	1,591	6,8	2,7
WMS 16 P/W PBM 25/55-60 KR 3-4	granit	1,938	5,3	3,2
WMS 16 P/W PBM 25/55-60 KR 3-4	granit	2,165	5,0	3,0
AC 16W 35/50 KR3-KR7	żwir	1,878	4,4	5,4
AC 11 S 50/70 KR 3-4	melafir	1,47	5,7	3,0
AC 11 S 50/70 KR 3-4	bazalt	1,468	5,2	2,4
AC 11 S 50/70 KR 3-4	szarogłaz	2,14	5,6	3,1
AC 16W 35/50 KR3-KR7	granit	2,147	4,7	5,5

Otrzymane wyniki pokazały, że uzyskane wartości współczynnika przewodności cieplnej różnią się znacznie (1,46 - 2,17 W/mK), przede wszystkim w zależności od zastosowanego do wykonania mieszanki kruszywa. Otrzymane wyniki wskazują na możliwości uzyskania odpowiedniej dla rozwiązania mieszanki poprzez wybór odpowiednich składników i uzyskanie wartości współczynnika przewodności o wartościach podobnych do wartości przedstawianych w literaturze dla mieszanek z zastosowaniem dodatków, nierzadko kosztownych. Zauważyć można również, że mieszanka SMA 11 AMG KR 5-6 z zastosowaniem Asfaltu Modyfikowanego Gumą, dla którego wyniki przewodności asfaltów były najwyższe nie osiąga współczynnika przewodności cieplnej wyższego niż mieszanka AC 11 S 50/70 KR 3-4 – dla obu tych mieszanek głównym kruszywem był szarogłaz, a wartości współczynnika przewodności cieplnej są zbliżone (2,006 oraz 2,140 W/mK). Wskazuje to możliwość pominięcia wpływu asfaltu stosowanego w mieszance na w dalszych rozważaniach.

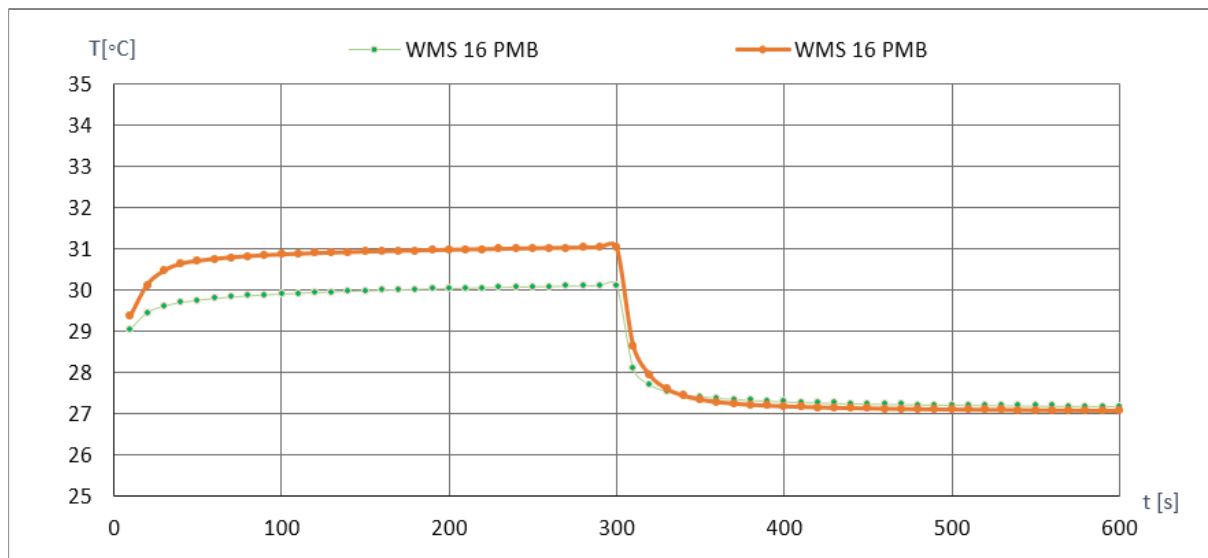
Na poniższych rysunkach (rys. 53 – rys. 55) przedstawiono wartości temperatury odczytane w trakcie pomiarów za pomocą miernika KD2 Pro Thermal Properties Analyzer. Na ich podstawie określono współczynniki przewodności cieplnej k badanych materiałów.



Rys. 53 Temperatura zarejestrowana w trakcie badania mieszank SMA



Rys. 54 Temperatura zarejestrowana w trakcie badania mieszank betonu asfaltowego AC



Rys. 55 Temperatura zarejestrowana w trakcie badania mieszank WMS

W dalszym etapie przeanalizowano korelację (wg współczynnika korelacji Pearsona) otrzymanych wartości współczynnika przewodności cieplnej k mieszanek mineralno-asfaltowych z poszczególnymi parametrami:

- współczynnik przewodności cieplnej k kruszywa (wartości w oparciu o dane z literatury [68])
- wolne przestrzenie w mieszance mineralno-asfaltowej V_a [%]
- Ilość stosowanego asfaltu w mieszance mineralno-asfaltowej B [%]
- Współczynnik przewodności cieplnej k zastosowanego asfaltu.

Wyniki przedstawiono w poniższych tabelach (tab. 29 – tab. 32).

Tab. 29 Korelacja wyników przewodności cieplnej mma oraz przewodności cieplnej kruszyw

Mieszanka	Kruszywo	k [W/mK]	k [W/mK] Kruszywo	Wsp. Korelacji Pearsona
SMA 8 AMG KR 5-6	gabro	1,664	2,41	0,88
SMA 11 AMG KR 5-6	szarogłaz	2,006	2,60	
SMA 8 PMB 45/80-55 KR 5-7	gabro	1,591	2,41	
WMS 16 P/W PBM 25/55-60 KR 3-4	granit	1,938	2,74	
WMS 16 P/W PBM 25/55-60 KR 3-4	granit	2,165	2,74	
AC 11 S 50/70 KR 3-4	melafir	1,47	1,82	
AC 11 S 50/70 KR 3-4	bazalt	1,468	1,82	
AC 11 S 50/70 KR 3-4	szarogłaz	2,140	2,60	
AC 16W 35/50 KR3-KR7	granit	2,147	2,74	

Tab. 30 Korelacja wyników współczynnika przewodności cieplnej mma k oraz wolnej przestrzeni V_a

Mieszanka	Kruszywo	k [W/mK]	V_a [%]	Wsp. Korelacji Pearsona
SMA 8 AMG KR 5-6	gabro	1.664	4.5	0,41
SMA 8 PMB 45/80-55 KR 5-7	gabro	1.591	2.7	
SMA 11 AMG KR 5-6	szarogłaz	2.006	5.0	
AC 11 S 50/70 KR 3-4	szarogłaz	2.14	3.1	
WMS 16 P/W PBM 25/55-60 KR 3-4	granit	1.938	3.2	
AC 16W 35/50 KR3-KR7	granit	2.147	5.5	
WMS 16 P/W PBM 25/55-60 KR 3-4	granit	2.165	3.0	
AC 11 S 50/70 KR 3-4	melafir	1.47	3.0	
AC 11 S 50/70 KR 3-4	bazalt	1.468	2.4	
AC 16W 35/50 KR3-KR7	żwir	1.878	5.4	

Tab. 31 Korelacja wyników współczynnika przewodności cieplnej mma k oraz ilości asfaltu B

Mieszanka	Kruszywo	k [W/mK]	B [	Wsp. Korelacji Pearsona
SMA 8 AMG KR 5-6	gabro	1,664	6,5	-0,31
SMA 11 AMG KR 5-6	szarogłaz	2,006	6,9	
SMA 8 PMB 45/80-55 KR 5-7	gabro	1,591	6,8	
WMS 16 P/W PBM 25/55-60 KR 3-4	granit	1,938	5,3	
WMS 16 P/W PBM 25/55-60 KR 3-4	granit	2,165	5,0	
AC 16W 35/50 KR3-KR7	żwir	1,878	4,4	
AC 11 S 50/70 KR 3-4	melafir	1,47	5,7	
AC 11 S 50/70 KR 3-4	bazalt	1,468	5,2	
AC 11 S 50/70 KR 3-4	szarogłaz	2,14	5,6	
AC 16W 35/50 KR3-KR7	granit	2,147	4,7	

Tab. 32 Korelacja wyników współczynnika przewodności cieplnej mma oraz stosowanego asfaltu

Mieszanka	Kruszywo	k [W/mK]	k asfaltu [W/mK]	Wsp. Korelacji Pearsona
SMA 8 AMG KR 5-6	gabro	1,664	0,174	0,001
SMA 11 AMG KR 5-6	szarogłaz	2,006	0,174	
SMA 8 PMB 45/80-55 KR 5-7	gabro	1,591	0,158	
WMS 16 P/W PBM 25/55-60 KR 3-4	granit	1,938	0,153	
WMS 16 P/W PBM 25/55-60 KR 3-4	granit	2,165	0,153	
AC 16W 35/50 KR3-KR7	żwir	1,878	0,157	
AC 11 S 50/70 KR 3-4	melafir	1,47	0,152	
AC 11 S 50/70 KR 3-4	bazalt	1,468	0,152	
AC 11 S 50/70 KR 3-4	szarogłaz	2,14	0,152	
AC 16W 35/50 KR3-KR7	granit	2,147	0,157	

Porównując współczynnik przewodności cieplnej mieszanki mineralno-asfaltowej oraz współczynnika przewodności cieplnej kruszywa zauważyć można wynik wskazujący na silną dodatnią korelację. Dobór odpowiedniego kruszywa może wpłynąć na współczynnik przewodności w większym stopniu niż zastosowanie dodatków, które niejednokrotnie znacząco zwiększają koszty wykonania mieszanek. Porównanie wolnej przestrzeni z współczynnikiem przewodności cieplnej mieszanki wskazuje na średnią korelację tych parametrów. Porównując wyniki z informacjami otrzymanymi z przeglądu literatury zauważyć można, że korelacja jest dodatnia, a nie ujemna. Zakres zawartości wolnej

przestrzeni jest jednak niewielki 2,4-5,5%, a przyglądając się poszczególnym wynikom, zauważyć można, że wzrost przewodności czasem powiązać można ze spadkiem, czasem ze wzrostem zawartości wolnej przestrzeni (tab. 30). W opracowaniach badaczy najczęściej wpływ wolnych przestrzeni zauważyć można było dopiero przy stosowaniu mieszanek porowatych, gdy wolna przestrzeń wzrastała przynajmniej do kilkunastu procent. Biorąc pod uwagę rozbieżności i niewielkie różnice w zawartości wolnej przestrzeni w najczęściej stosowanych mieszankach parametr ten nie zostaje uznany za istotny. Na podstawie przedstawionych powyżej danych można zauważyć, że korelacja związana z asfaltem jest zerowa albo słaba. Zatem rodzaj oraz ilość stosowanego asfaltu nie mają wpływu na ostateczną wartość współczynnika przewodności cieplnej. Podsumowując najważniejszym i jedynym istotnym czynnikiem materiałowym w standardowych mieszankach mineralno-asfaltowych jest właściwy dobór kruszywa. Pozostałe czynniki nie wykazują jednoznacznie dającego się określić wpływu, lub wpływ ten jest znikomy.

7.2.3 Mieszanki z zastosowaniem dodatków

Dodatkowo do badań mieszanek standardowych przeprowadzono pomiary współczynnika przewodności cieplnej przykładowych mieszanek drogowych AC 16W – jednej opartej na bazalcie, drugiej na granicie, ale z zastosowaniem dodatku włókien stalowych oraz grafitu. Dla porównania otrzymanych wartości przeprowadzono pomiary mieszanek bazowych bez dodatków. Wyniki przedstawiono w tab. 33.

Tab. 33 Wyniki pomiarów współczynnika przewodności cieplnej mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkami

Mieszanka	Dodatek	k [W/mK]	Zmiana k
AC 16W 35/50 (granit)	-	1,972	-
AC 16W 35/50 (granit)	Grafit 5%	2,922	+ 48,2%
AC 16W 35/50 (granit)	Włókna stalowe 1,5%	1,786	-9,5%
AC 16W 35/50 (bazalt)	-	1,380	-
AC 16W 35/50 (bazalt)	Grafit 5%	2,866	+ 107,7%
AC 16W 35/50 (bazalt)	Włókna stalowe 1,5%	1,264	-8,4%

Analizując wyniki można zauważyć, że dodatek grafitu sprawia, że współczynnik przewodności cieplnej mieszanki mineralno-asfaltowej znacznie wzrasta. Uwagę zwracają również nietypowe wyniki dla mieszanek z dodatkiem włókien stalowych – na

podstawie wiedzy dotychczasowej oraz wiedzy teoretycznej włókna te powinny zdecydowanie przyczynić się do wzrostu przewodności, a nie jej spadku.

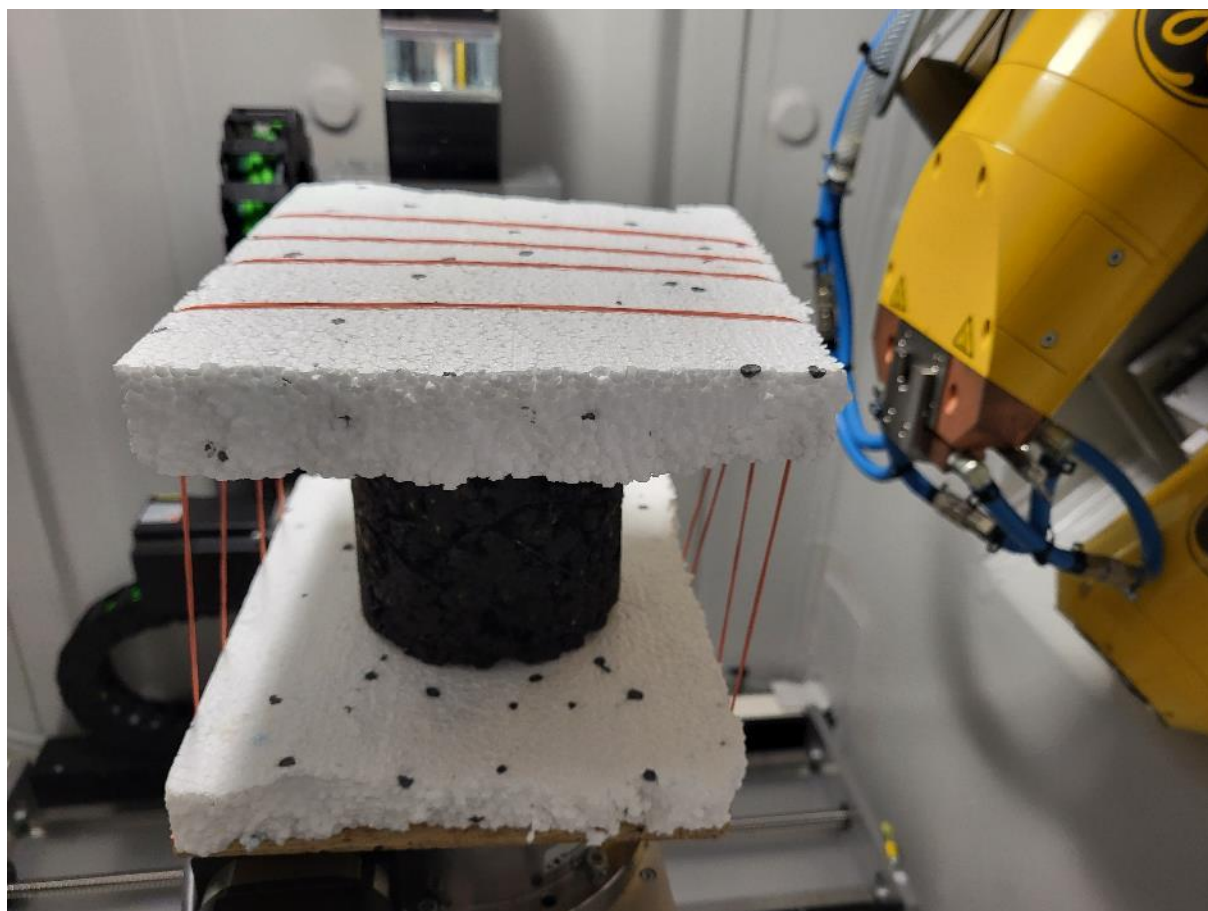
W celu zbadania przyczyn tego zjawiska wykonano badania mikrotomografem rentgenowskim: Waygate Technologies phoenix v|tome|x s (rys. 56 – rys. 59). Proces tego pomiaru składa się z dwóch etapów: akwizycji oraz rekonstrukcji danych. W etapie akwizycji należy stabilnie zamontować próbkę, ustalić obszar pomiaru, dokładność badania oraz wprowadzić parametry badania. Efektem tych czynności będzie otrzymanie dokładnych wyników oraz wymaganej jakości obrazu dla struktury materiału. Następnie emitowana jest wiązka promieniowania X z lampy rentgenowskiej. Promieniowanie zarejestrowane przez detektor przetworzone zostaje w obraz 2D przy zastosowaniu algorytmów. W trakcie badania próbka obraca się, zmieniając swoją pozycję, dzięki czemu w etapie rekonstrukcji danych możliwe jest stworzenie modelu 3D z otrzymanych obrazów 2D [113].



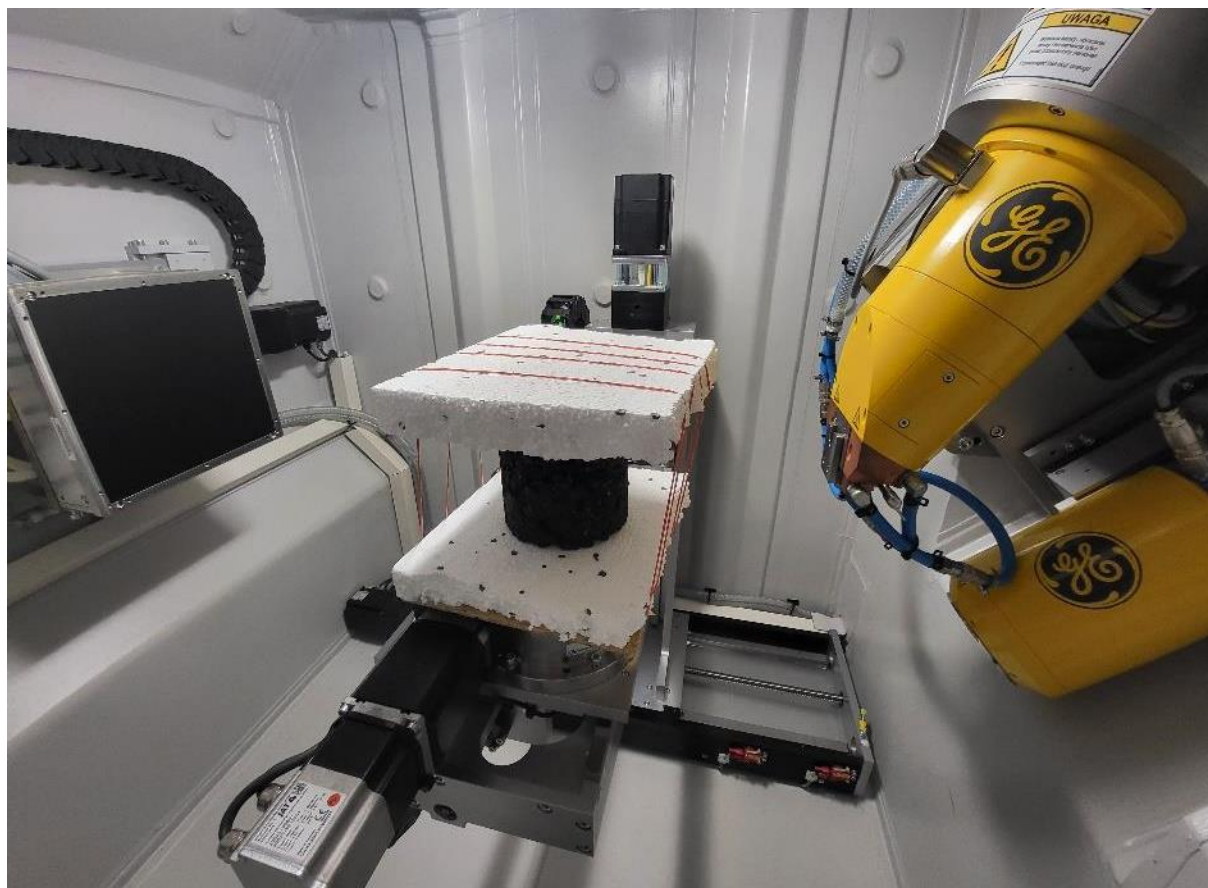
Rys. 56 Mikrotomograf rentgenowski phoenix v|tome|x s



Rys. 57 Wnętrze Mikrotomografu rentgenowskiego phoenix v|tome|x s



Rys. 58 Badana próbka przygotowana do badania w mikrotomografii rentgenowskiej

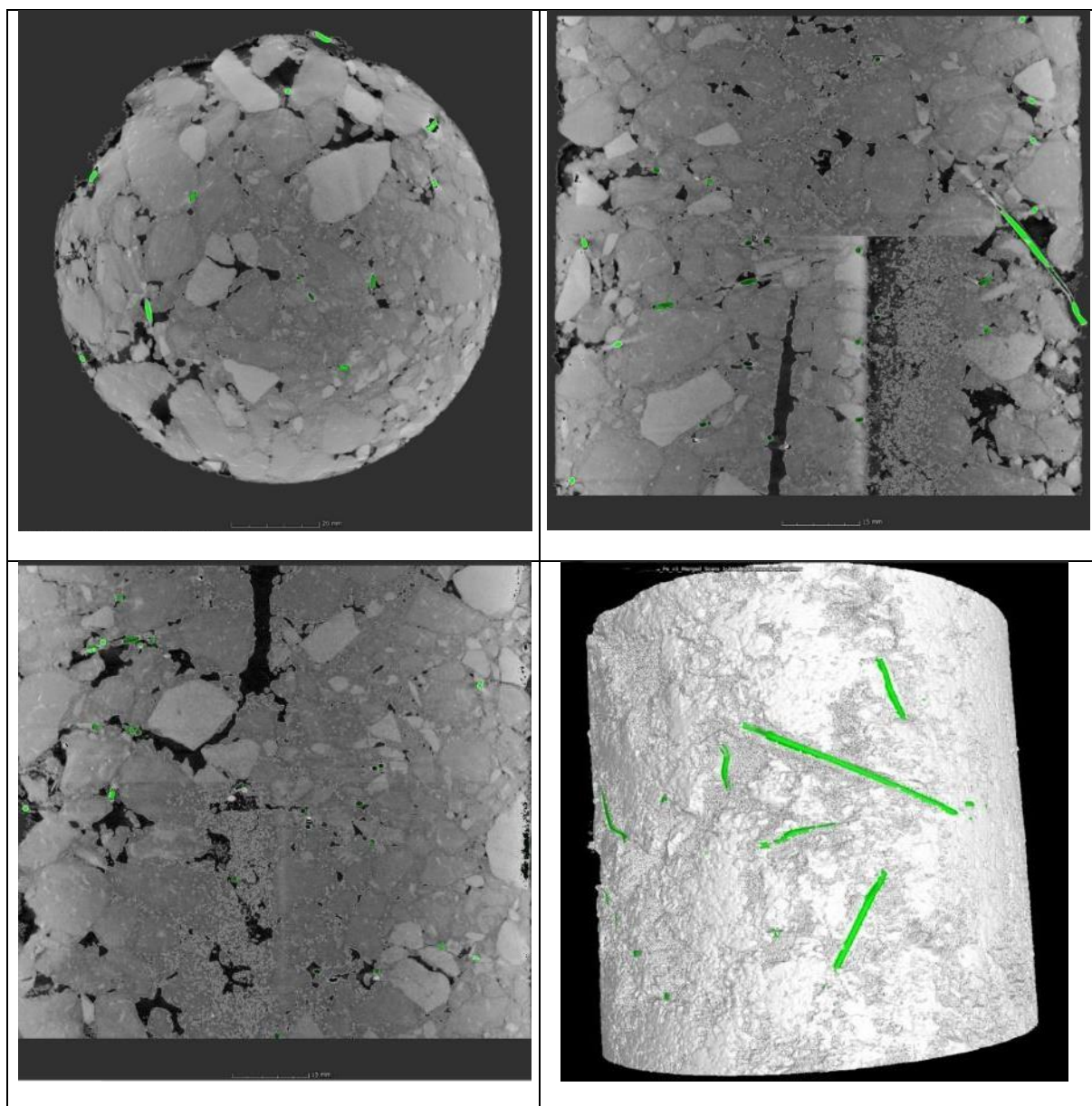


Rys. 59 Badana próbka umieszczona we wnętrzu mikrotomografu rentgenowskiego

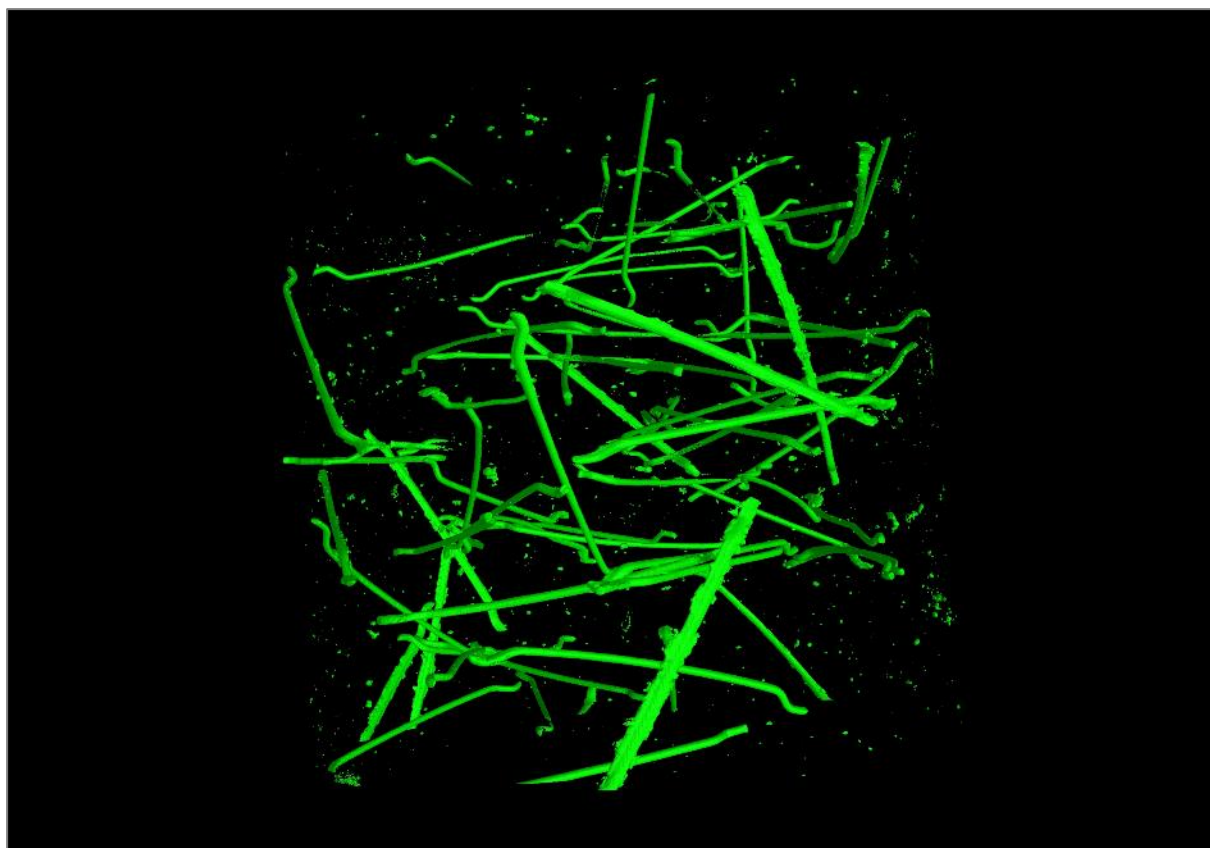
Przeprowadzone badanie pokazuje jak ułożone są włókna stalowe (rys. 60). Ułożenie jest nieregularne, kierunek ułożenia włókien jest niejednorodny, w niektórych przekrojach liczba włókien oraz ich koncentracja jest wyższa niż w pozostałych miejscach.

Na zdjęciu pokazującym włókna w próbce (rys. 61 – rys. 62) zauważyć można, że powierzchnia włókien jest obklejona – obklejenie asfaltem lub mastyksem asfaltowym, którego przewodność jest znacząco niższa niż przewodność stali, potencjalnie znacząco ogranicza wpływ występujących w mieszance mineralno-asfaltowej włókien stalowych na poprawę jej przewodności cieplnej.

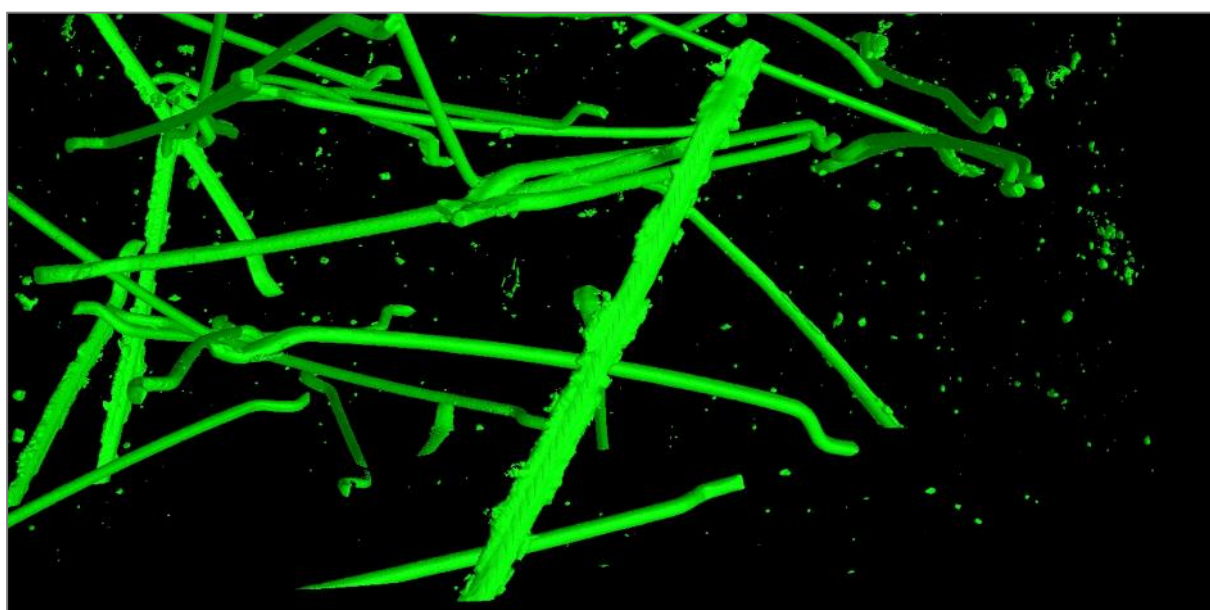
Połączenie powyższych zjawisk sprawiło, że otrzymano wynik przewodności cieplnej mieszanki z włóknami stalowymi inny niż spodziewany, a ich dodatek do mieszanki mineralno-asfaltowej nie przyczynił się do poprawy parametrów cieplnych.



Rys. 60 Przykładowe rzuty badanej próbki



Rys. 61 Przykładowy widok na włókna w badanej próbce



Rys. 62 Przykładowy widok na włókna w badanej próbce - zbliżenie

7.2.4 Wnioski z badań przewodności cieplnej

Przeprowadzone badania laboratoryjne w zakresie parametrów termicznych mieszanek potwierdzają, że największy wpływ na przewodność cieplną mieszanek ma zastosowane w mieszance kruszywo, lub ewentualne zastosowanie dodatków o wysokiej przewodności cieplnej. Zmiany w doborze stosowanych asfaltów nie mają wpływu, ponieważ wartość przewodności asfaltów w połączeniu z jego ilością w mieszance mają

znikomy wpływ na ostateczną przewodność mieszanki mineralno-asfaltowej. Współczynnik przewodności cieplnej powyżej 2,0 W/mK można otrzymać zarówno dla mieszanek standardowych, w których zastosowany jest szarogłaz, granit lub żwir łamany oraz dla mieszanek z zastosowaniem innych kruszyw wraz z dodatkiem grafitu jako wypełniacza w składzie mieszanki. Najwyższe wartości współczynnika przewodności cieplnej otrzymuje się dla mieszanek opartych na kruszywach o wysokim współczynniku przewodności cieplnej z dodatkiem grafitu.

7.3 Badania laboratoryjne parametrów wytrzymałościowych mieszanek zalecanych do zastosowania w dedykowanym rozwiązaniu

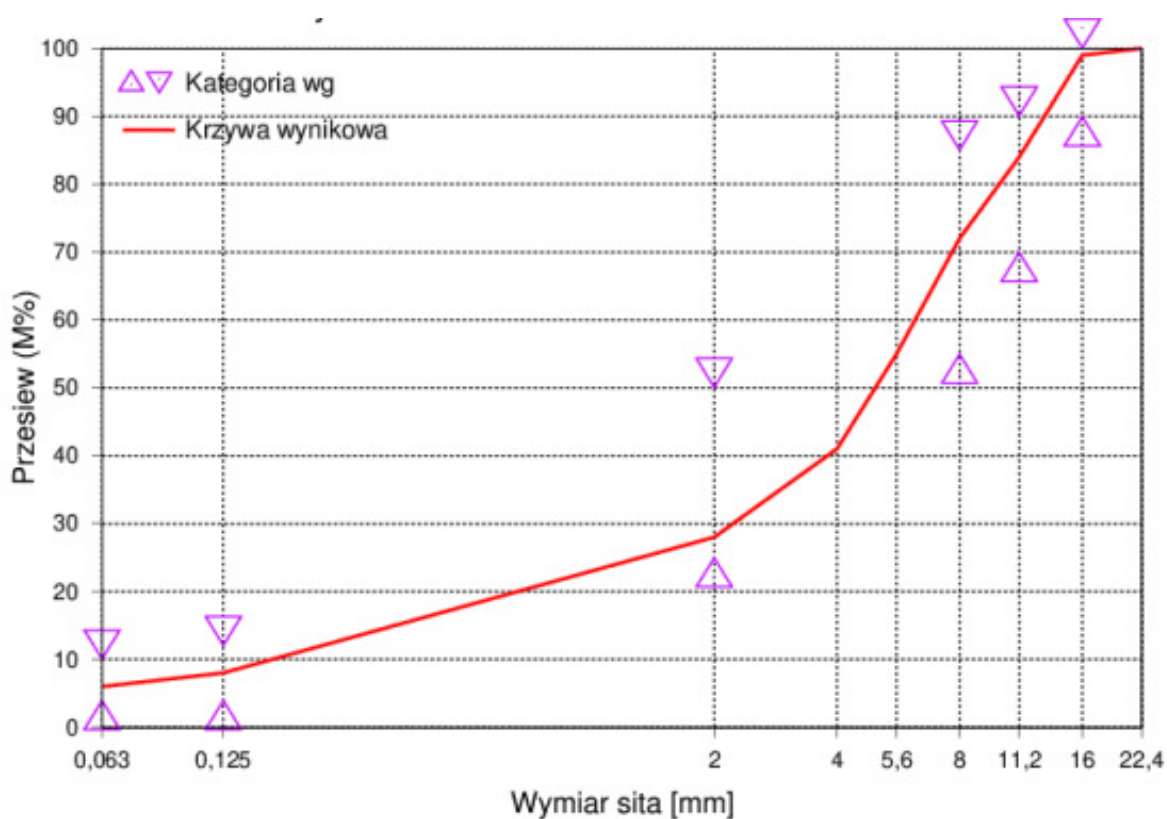
Na podstawie wyników badań przewodności cieplnej wyróżniono mieszanki o wyższej przewodności cieplnej – poza standardowymi mieszankami opartymi na kruszywie o wyższej przewodności wybrano mieszanki z zastosowaniem grafitu. Grafit stosowany jako wypełniacz, dodawany w sposób standardowy jak dla wypełniaczy nie generuje potrzeby diametralnej zmiany technologii wytwarzania mieszanek. W związku z tym stosowanie takich mieszanek w rzeczywistości byłoby możliwe. Konieczne jednak jest sprawdzenie standardowych parametrów wytrzymałościowych mieszanek z zastosowaniem grafitu, od których wartości zależy dopuszczenie do zastosowania w wykonawstwie. Opracowanie recepty wykonano dla warstw:

- wiążącej AC 16 W 35/50 KR 3-7, z zastosowaniem szarogłazu, wypełniacz: grafit - 5,0 % mm.
- ścieralnej AC 11 S PMB 45/80-65 KR3-KR6, z zastosowaniem szarogłazu wypełniacz: grafit - 6,5 % mm.

Uziarnienie zaprojektowanych mieszanek zostało przedstawione w tab. 34 – tab. 35 oraz rys. 63 – rys. 64. Wyniki otrzymane w badaniach przedstawiono w tab. 36 – tab. 37.

Tab. 34 Uziarnienie mieszanki mineralnej dla AC 16 W 35/50 KR 3-7

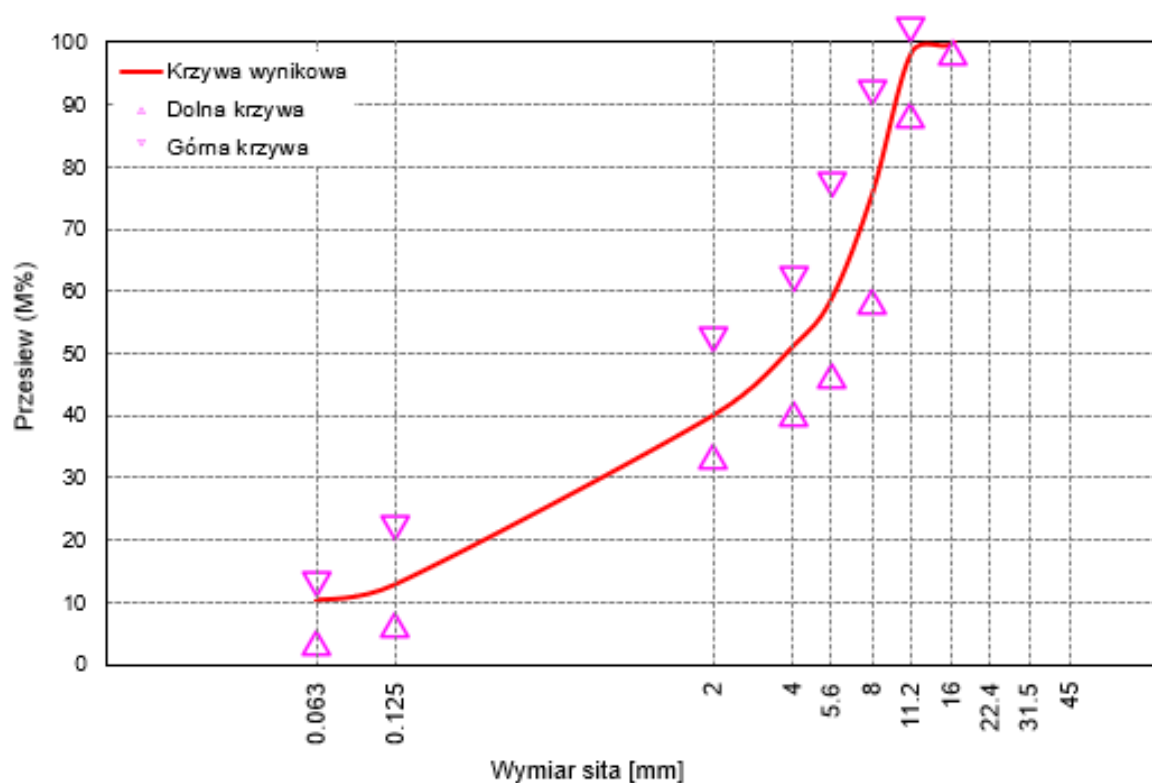
Wymiar otworów sit #, mm	Przechodzi % (m/m)	Krzywe graniczne zgodne z WT-2 [102]	
		Dolna	Górna
45.0	100	-	-
31.5	100	-	-
22.4	100	100	-
16.0	99	90	100
11.2	84	70	90
8.0	72	55	80
5.6	55	-	-
4.0	41	-	-
2.0	28	25	50
0.125	8	4	12
0.063	6.4	4.0	10.0



Rys. 63 Graficzna interpretacja zaprojektowanej mieszanki mineralnej dla AC 16W 35/50 KR 3-7 (dolna i górna krzywa zgodne z WT-2 [102])

Tab. 35 Uziarnienie mieszanki mineralnej dla AC 11 S PMB 45/80-65 KR3-KR6

Wymiar otworów sit #, mm	Przechodzi % (m/m)	Krzywe graniczne zgodne z WT-2 [102]	
		Dolna	Górna
45.0	100	-	-
31.5	100	-	-
22.4	100	-	-
16.0	100	100	-
11.2	98	90	100
8.0	76	60	90
5.6	59	48	75
4.0	51	42	60
2.0	40	35	50
0.125	13	8	20
0.063	10.2	5.0	11.0



Rys. 64 Graficzna interpretacja zaprojektowanej mieszanki mineralnej dla AC 11 S PMB 45/80-65 KR3-KR6 (dolna i górna krzywa zgodne z WT-2 [102])

Tab. 36 Wyniki pomiarów podstawowych właściwości AC 16W 35/50 KR 3-7

Właściwość	Dokument odniesienia	Wynik	Jedn.
Zawartość asfaltu całkowita B, % (m/m)	-	4,5	M%
Gęstość ρ_{mv} , (Mg/m ³)	PN-EN 12697-5 2019-01	2,478	Mg/m ³
Gęstość objętościowa ρ_{bdry} , (Mg/m ³)	PN-EN 12697-6:2020-07	2,339	Mg/m ³
Wolna przestrzeń w mma Va, % (v/v)	PN-EN 12697-8:2019-01	5,6	Obj.%
Wrażliwość na działanie wody ITSR (1 cykl zamrażania, temp. badania 25°C), %	PN-EN 12697-12:2008	82	%
Odporność na deformacje trwałe Średnie nachylenie wykresu koleinowania WTS _{AIR} , mm/1000 cykli	PN-EN 12697-22:2020-07	0,05	mm/10 ³
Odporność na deformacje trwałe Średnia proporcjonalna głębokość koleiny PRD _{AIR} , %	PN-EN 12697-22:2020-07	4,0	%
Temperatura zagęszczania próbek, °C	135		
Sposób przygotowania mma	W laboratorium zgodnie z PN-EN 12697-35:2016-05 (mechanicznie)		
Metoda zagęszczania próbek	Ubijanie wg PN-EN 12697-30:2019-01		
Energia zagęszczania próbek	2x75 uderzeń		

Tab. 37 Wyniki pomiarów podstawowych właściwości AC 11 S PMB 45/80-65 KR3-KR6

Właściwość	Dokument odniesienia	Wynik	Jedn.
Zawartość asfaltu całkowita B, % (m/m)	-	5.6	M%
Gęstość ρ_{mv} , (Mg/m ³)	PN-EN 12697-5 2019-01	2.463	Mg/m ³
Gęstość objętościowa ρ_{bdry} , (Mg/m ³)	PN-EN 12697-6:2020-07	2.376	Mg/m ³
Wolna przestrzeń w mma Va, % (v/v)	PN-EN 12697-8:2019-01	3.5	Obj.%
Wrażliwość na działanie wody ITSR (1 cykl zamrażania, temp. badania 25°C), %	PN-EN 12697-12:2008	90	%
Odporność na deformacje trwałe Średnie nachylenie wykresu koleinowania WTS _{AIR} , mm/1000 cykli	PN-EN 12697-22:2020-07	0.03	mm/10 ³
Odporność na deformacje trwałe Średnia proporcjonalna głębokość koleiny PRD _{AIR} , %	PN-EN 12697-22:2020-07	3.5	%
Temperatura zagęszczania próbek, °C	145		

Sposób przygotowania mma	W laboratorium zgodnie z PN-EN 12697-35:2016-05 (mechanicznie)
Metoda zagęszczania próbek	Ubijanie wg PN-EN 12697-30:2019-01
Energia zagęszczania próbek	2x75 uderzeń



Rys. 65 Próbki AC 11 S PMB 45/80-65 KR3-KR6 z grafitem jako wypełniaczem



Rys. 66 Próbki mieszanki AC 11 S PMB 45/80-65 KR3-KR6 z grafitem po badaniu kolejowania

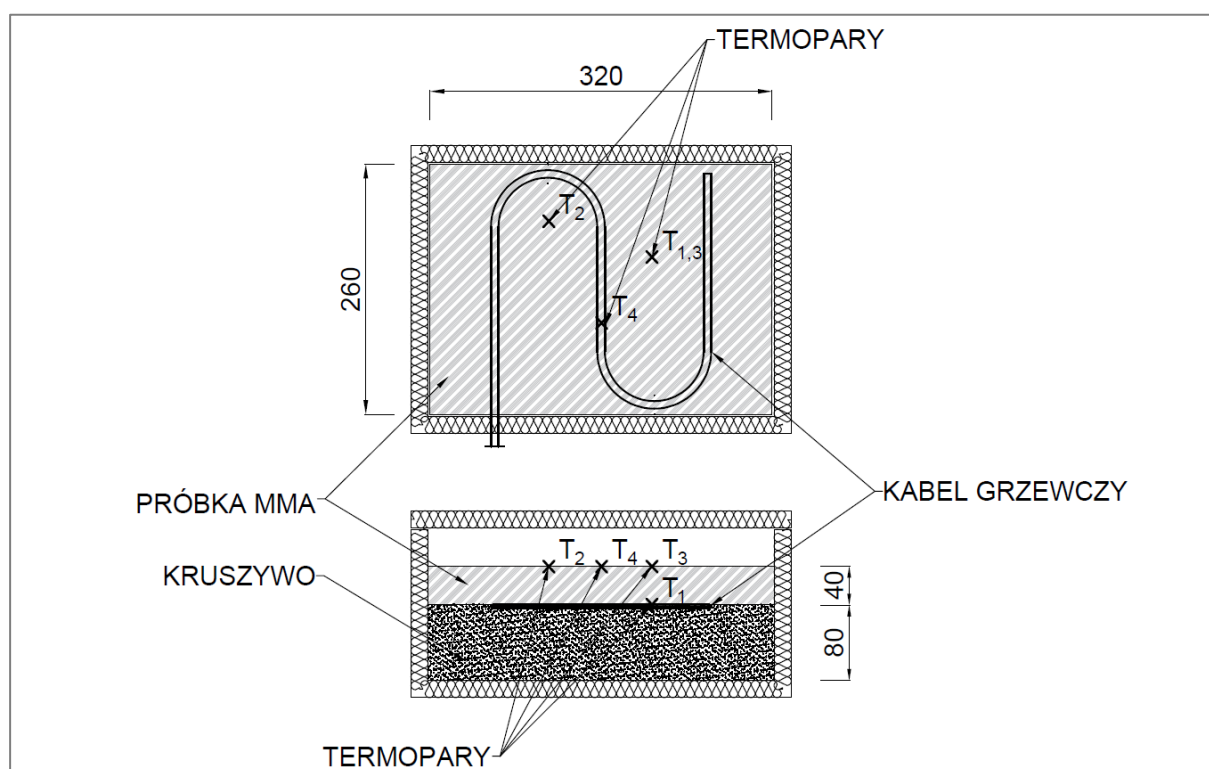
Otrzymane wyniki spełniają wymagania stawiane przez WT-2 [102], co wskazuje na możliwość zamiany standardowego wypełniacza wapiennego na grafit. Mieszanki z grafitem bez przeszkód mogą być stosowane przy budowie dróg. Przykładową mieszankę ukazują rys. 65, rys. 66.

7.4 Badania laboratoryjne działania instalacji na stanowisku pomiarowym

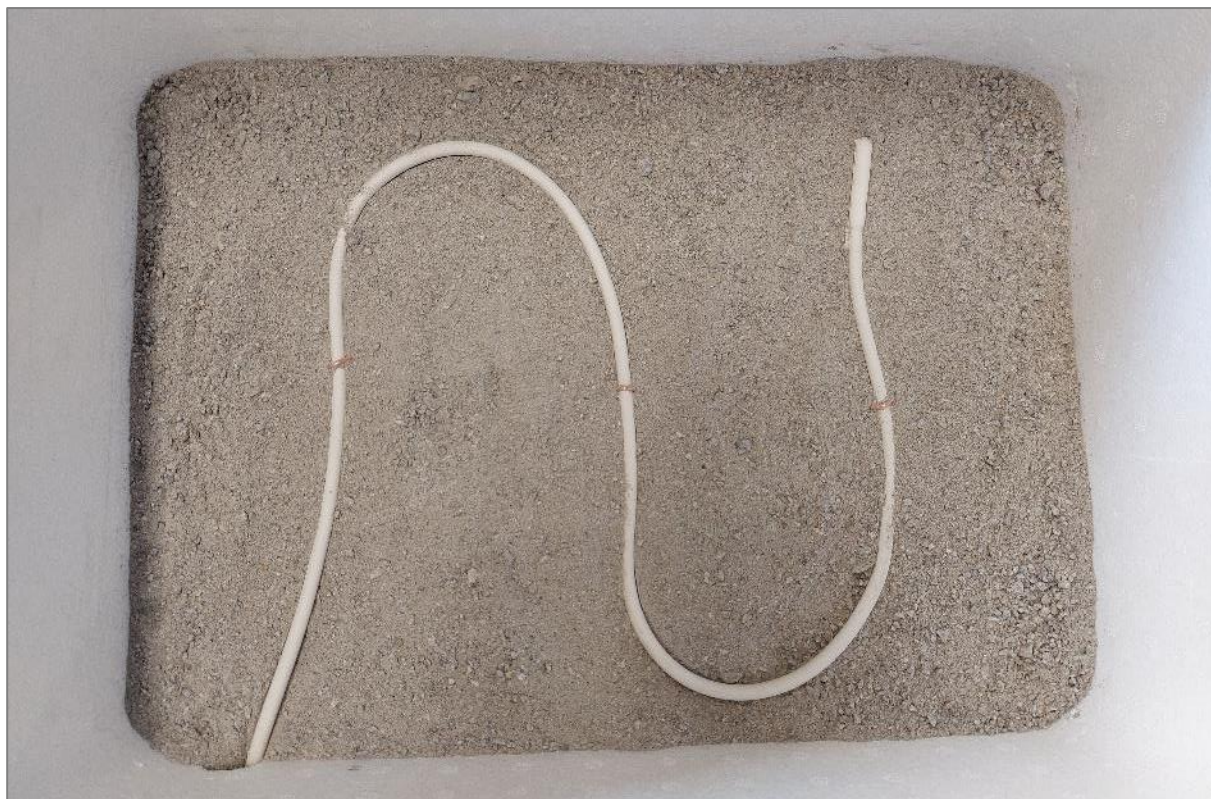
Po przebadaniu właściwości termicznych oraz sprawdzeniu zasadności stosowania mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem grafitu należało sprawdzić zachowanie się próbek w połączeniu z instalacją grzewczą. W tym celu wykonano pomiary na specjalnie przygotowanym stanowisku pomiarowym umiejscowionym w formie styropianowej (rys. 67). Pomysł zainspirowany był metodą wspomnianą przez badaczy: Luca oraz Mrawira [46].

Do badań w skali laboratoryjnej wybrano ogrzewanie elektryczne. Źródło ciepła – kabel grzewczy umieszczono na wierzchu warstwy kruszywa granitowego 0/2 (rys. 68). Następnie na instalacji umieszczano próbkę mieszanki mineralno-asfaltowej w formie płyty o wymiarach 320 x 260 x 40 mm. Na spodzie płyty umieszczono jedną termoparę kontrolną, a na jej wierzchu 3 termopary pozwalające na ciągły pomiar temperatury w trakcie badania (rys. 69). Forma styropianowa na czas badania była zamykana i obserwowano zmiany temperatury na wierzchniej warstwie próbki w czasie. Przed badaniem próbki były kondycjonowane w komorze termicznej w temperaturze -5°C .

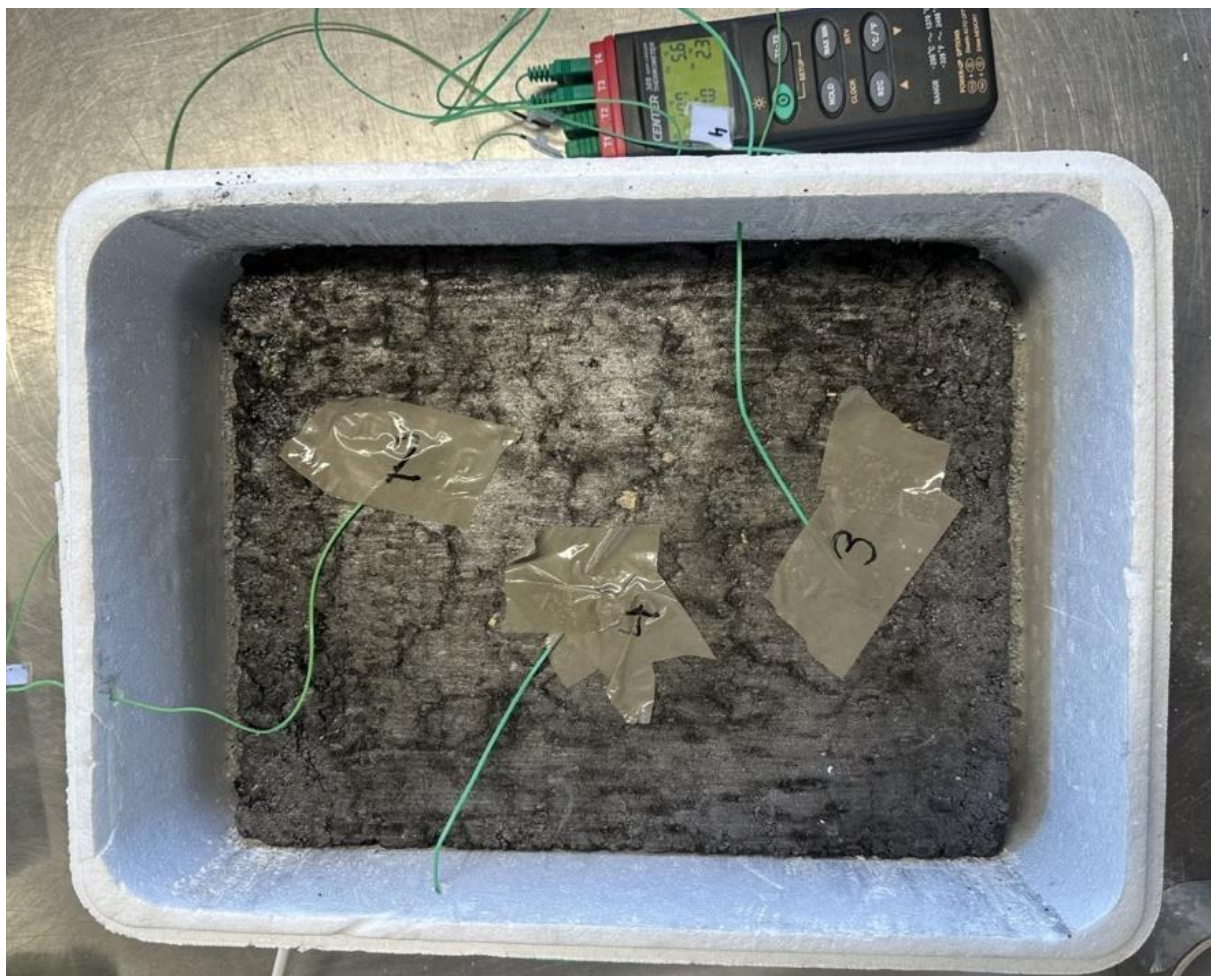
Celem była ocena zdolności do przewodzenia ciepła wybranych mieszanek mineralno-asfaltowych poddanych analizie (przy działającej instalacji).



Rys. 67 Schemat przygotowanego stanowiska pomiarowego

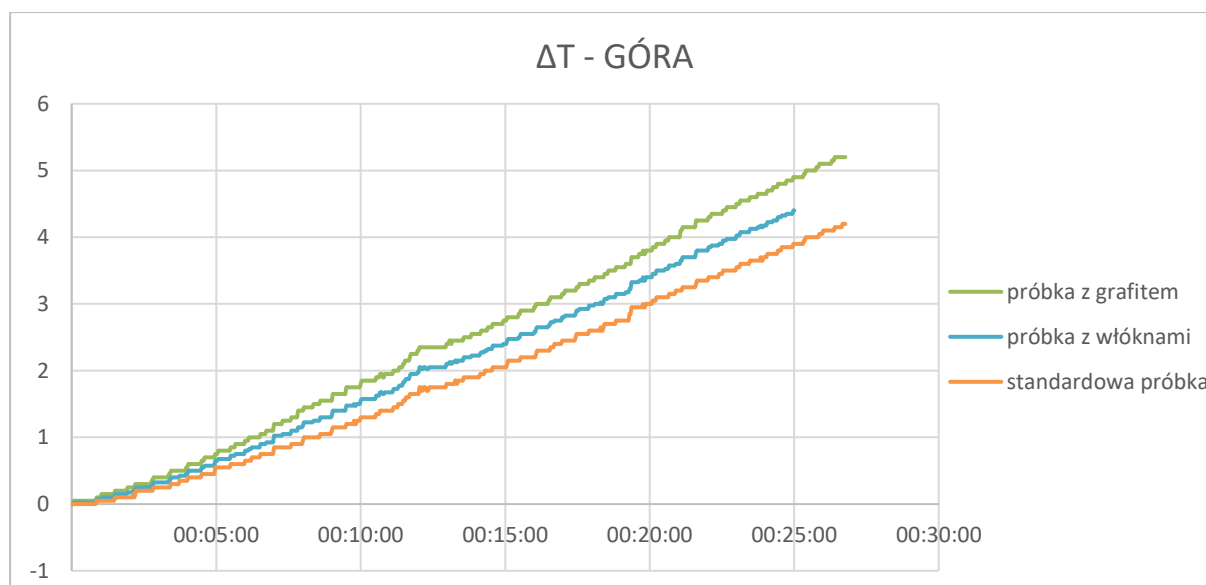


Rys. 68 Widok na kabel grzewczy ułożony na warstwie kruszywa 0/2



Rys. 69 Widok na przykładową próbkę mieszanki mineralno-asfaltowej umieszczonej w formie pomiarowej

Dla każdego rodzaju mieszanki przygotowano i przebadano dwie próbki. Pomiar temperatury prowadzono przez około 30 minut. Otrzymane w trakcie pomiaru wyniki uśredniono w obrębie jednej mieszanki. Początkiem opracowywanego okresu był moment ustabilizowania się temperatury na termoparach. Rezultaty zestawiono na wykresie (rys. 70).



Rys. 70 Temperatura zarejestrowana w trakcie badania mieszank

Tab. 38 Średnie przyrosty temperatury dla poszczególnych próbek

	Próbka standardowa	Próbka z włóknami	Próbka z grafitem
Średni przyrost temperatury [°C/min]	0,156	0,176	0,196
Porównanie względem próbki standardowej [%]	100%	113%	126%

W tab. 38 zestawione zostały średnie przyrosty temperatury dla poszczególnych próbek, ze względu na niemal liniowy przyrost jest to dobra baza do porównań.

Zauważyć można, że mieszanka bez zastosowania dodatków – włókien stalowych lub grafitu charakteryzuje się najwolniejszym wzrostem temperatury górnej warstwy w czasie. Temperatura najszybciej wzrastała w przypadku próbki z grafitem, co jest zbieżne z badaniami nad przewodnością mieszank. Próbka z włóknami stalowymi charakteryzowała się wzrostem temperatury większym niż próbka kontrolna o 13%, ale mniejszym niż próbka z dodatkiem grafitu (której temperatura rosła o 26% szybciej niż próbki kontrolnej). Otrzymane wyniki wskazywałyby, że faktyczny współczynnik przewodności mieszanki mineralno-asfaltowej z dodatkiem włókien stalowych jest wyższy od mieszanki bez dodatków. Fakt ten każe sądzić, że wpływ włókien stalowych

jest słabo wykrywalny przy badaniach przewodności cieplnej przy pomocy miernika. Powodem może być sposób ułożenia włókien, otoczenia asfaltem oraz wymiar samego włókna w stosunku do próbki i sondy pomiarowej. Nie mniej przy testach na próbce o większej skali zauważalny jest znaczący pozytywny wpływ włókien stalowych na przewodność cieplną, co jest zgodne z intuicją.

Podsumowując, celem badania było określenie wpływu dodatków do mieszanki mineralno-asfaltowej w przypadku próbek o większej skali. Wyniki badań potwierdzają wnioski badań materiałowych i dodatkowo rozszerzają je o ujęcie wpływu włókien stalowych. Wpływ ten jest niemożliwy do uchwycenia w przypadku konwencjonalnych badań przewodności cieplnej materiału. Ponadto udało się określić stopień polepszenia właściwości termicznych poprzez dodatki. Dla włókien stalowych jest to 13%, a dla dodatku grafitu aż 26% wyższy przyrost temperatury na powierzchni próbki. Eksperyment został zaprojektowany w ten sposób, aby możliwe dokładnie oddawać sytuację z rzeczywistości, na jego podstawie można więc przenieść uzyskane wyniki na potrzeby szacowania opłacalności dodatków do mieszanki mineralno-asfaltowej używanej w połączeniu z systemem odładzania.

8 ANALIZA NUMERYCZNA

Dodatkowo do uzupełnienia wniosków płynących z opisanych badań w punkcie 7.4, przeprowadzono analizę numeryczną mającą na celu ocenę wpływu zmiany materiałów poszczególnych warstw nawierzchni na zmianę temperatury. Znając właściwości termiczne poszczególnych mieszanek mineralno-asfaltowych zasadne wydaje się pytanie: jak należy je zastosować w konstrukcji nawierzchni drogi, aby jej odładzanie było możliwie najbardziej efektywne. Przeprowadzona analiza numeryczna pozwala na zamodelowanie instalacji w warunkach rzeczywistych i określenie wpływu typu mieszanki użytej w poszczególnych warstwach konstrukcji drogi, bez konieczności wykonywania bardzo kosztownych odcinków próbnych.

Model oraz analiza zostały przeprowadzone w oprogramowaniu ANSYS, gdzie utworzono model 2D dla przepływu ciepła, który przedstawiał 1m² drogi wraz z wszystkimi warstwami. Analizę termiczną wykonano w stanie nieustalonym (przejściowym). Wszystkie właściwości materiałowe zostały zaimplementowane na podstawie badań z wcześniejszych rozdziałów lub na podstawie danych dostarczonych przez producenta. Obserwacji podlegała zmiana temperatury w okresie godziny od włączenia instalacji grzewczej. Dla wszystkich warstw nawierzchni przedstawionych na modelu dostępne są pola temperatury. Pomiar temperatury zestawiony na wykresie dotyczy powierzchni warstwy ścieralnej.

Analizie poddana została konstrukcja typu A1 dla kategorii ruchu KR5 z Katalogu Typowych Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych (rys. 71) [102]. Dodatkowo, pomiędzy

warstwą podbudowy oraz warstwą wiążącą utworzona została warstwa będąca symulacją kabla o grubości 0,5 cm. Na jej górnej i dolnej krawędzi przyłożono gęstość strumienia ciepła o wartości 100W/m^2 . Jej parametry termiczne zostały dobrane tak, aby nie wpływała ona na przepływ ciepła. Nad konstrukcją nawierzchni zamodelowano warstwę powietrza.

Do zamodelowania poszczególnych warstw konstrukcji przyjęto właściwości materiałów w oparciu o przeprowadzone wcześniej badania laboratoryjne, a wartości ciepła właściwego c oszacowano na podstawie danych z literatury [64]. Parametry zestawiono w tab. 39.

Tab. 39 Właściwości materiałów zastosowanych w trakcie modelowania

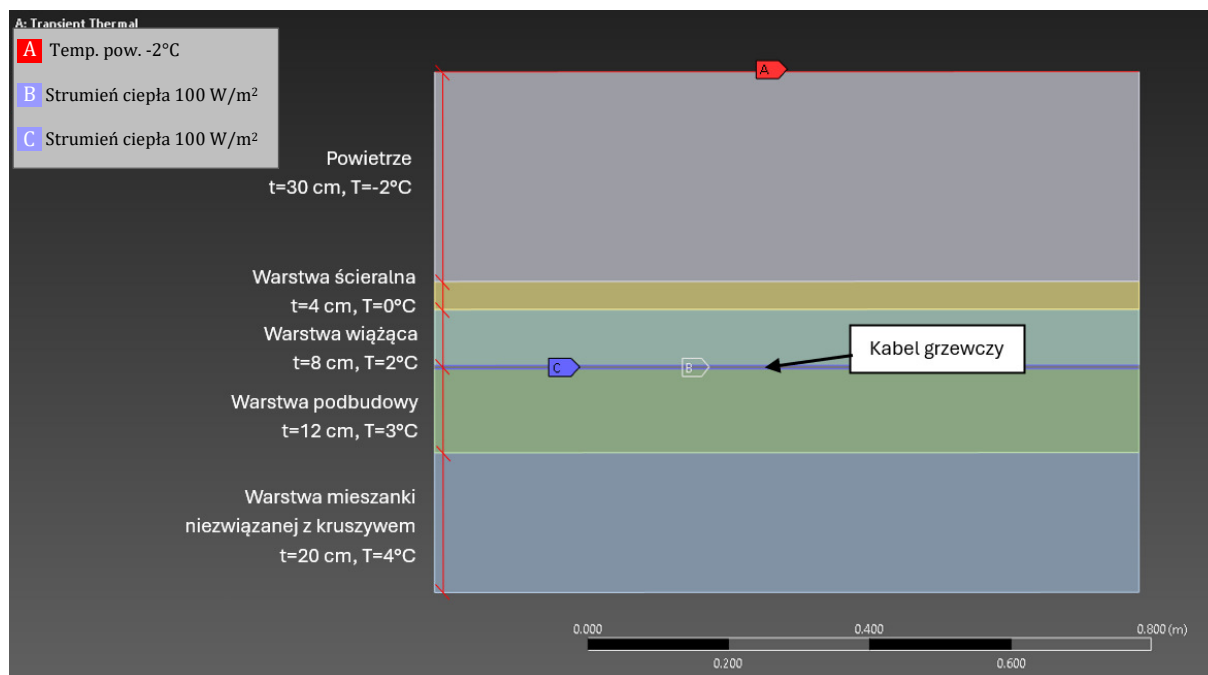
Materiał	gęstość objętościowa	współczynnik przewodności cieplnej k	Ciepło właściwe c
	[kg/m ³]	[W/mK]	[J/kgK]
Powietrze	1,2	0,025	1000
MMA z dodatkiem grafitu	2586	2,866	765
MMA o wysokim współczynniku przewodności cieplnej	2425	2,165	722
MMA o niskim współczynniku przewodności cieplnej	2625	1,380	799
Kruszywo	1670	0,8	800

Tablica 9.1. TYP A1 - Typowe konstrukcje górnych warstw nawierzchni podatnych
Podbudowa zasadnicza: beton asfaltowy AC, mieszanka niezwiązana z kruszywem C_{90/3}

Kategoria ruchu	KR1	KR2	KR3	KR4	KR5	KR6	KR7
Ruch projektowy (mln osi 100 kN)	0,03 - 0,09	0,09 - 0,5	0,5 - 2,5	2,5 - 7,4	7,4 - 22,0	22,0 - 52,0	> 52,0
TYP A1							
LEGENDA:	warstwa ścieralna z mieszanki mineralno-asfaltowej; warstwa wiążąca z betonu asfaltowego; warstwa podbudowy zasadniczej z betonu asfaltowego; warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki niezwiązanej z kruszywem C_{90/3}; wymagany wtórny moduł odkształcenia E₂						

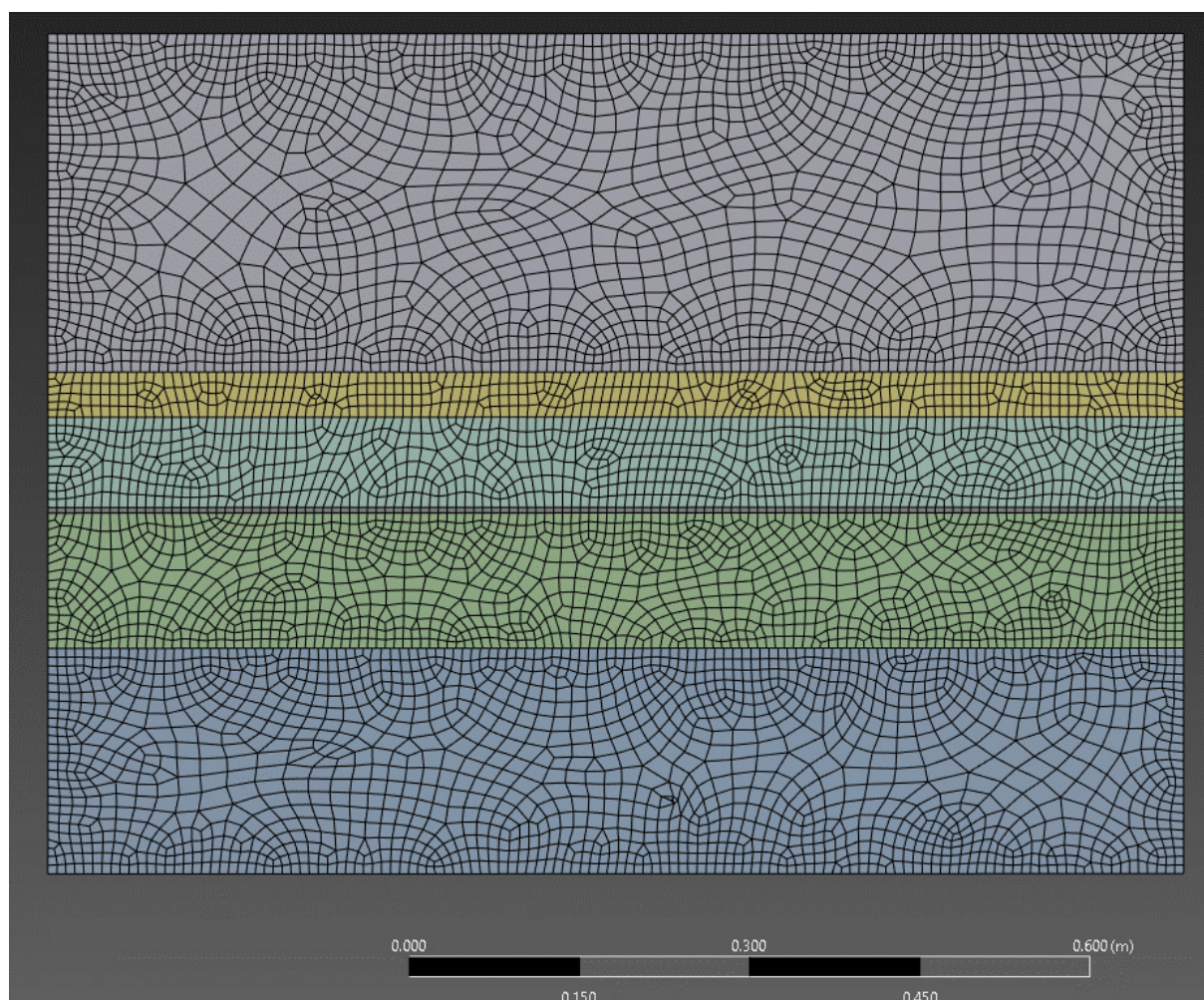
Rys. 71 Konstrukcja typu A1 poddana analizie

Na rys. 72 przedstawiono schemat analizowanego modelu z warunkami początkowymi poszczególnych warstw.

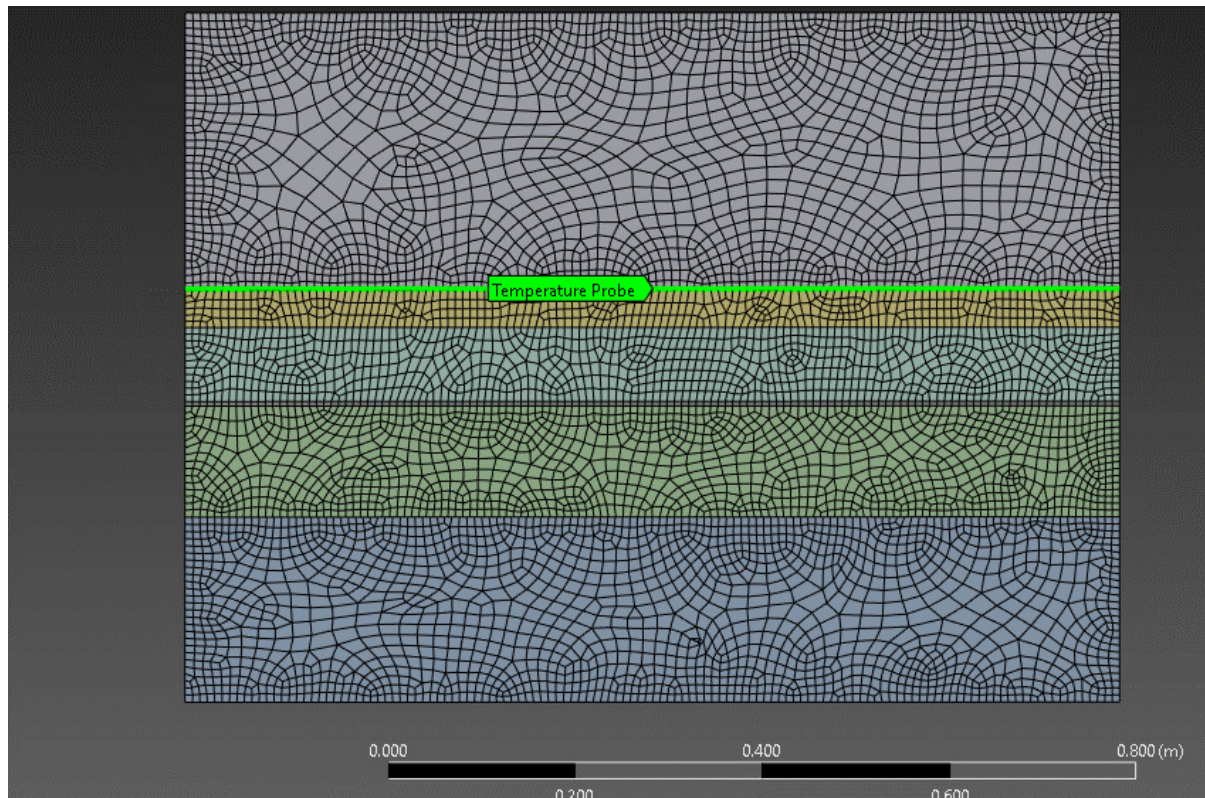


Rys. 72 Schemat analizowanego modelu z warunkami początkowymi poszczególnych warstw

Na rys. 73 – rys. 74 przedstawiono model MES z siatką oraz lokalizację pomiaru temperatury.



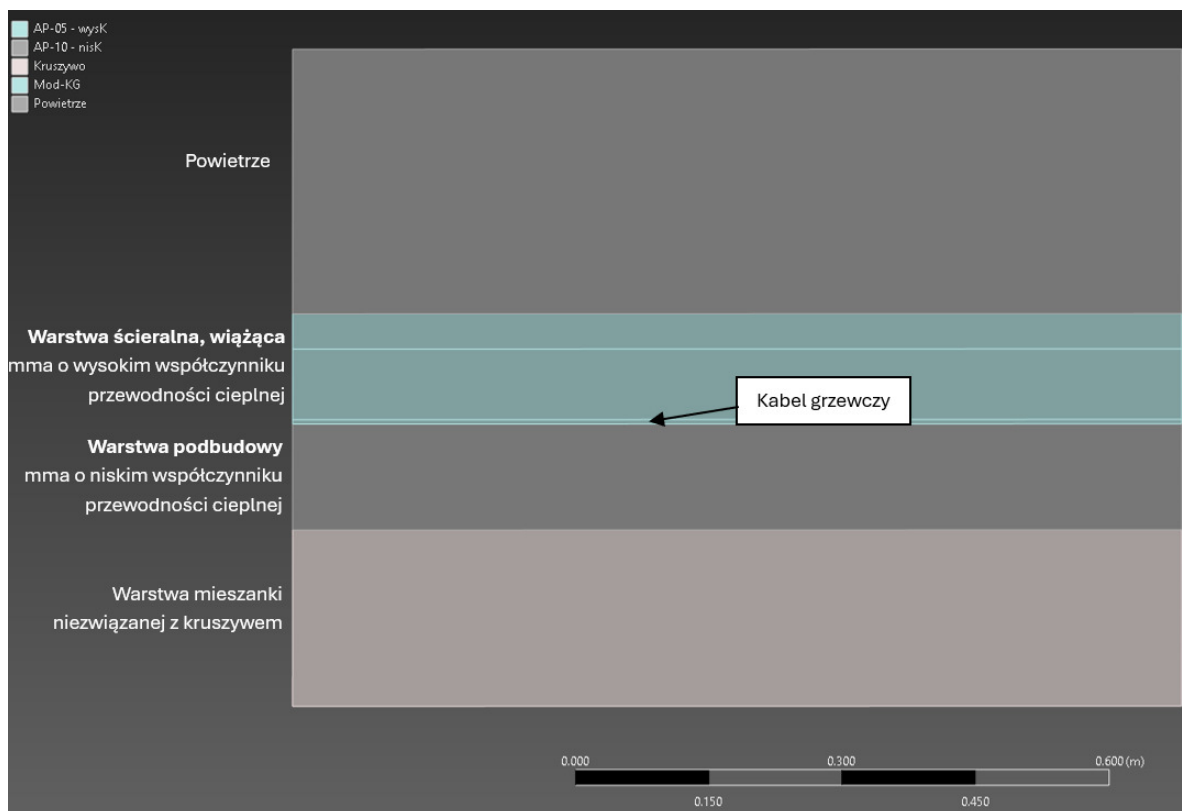
Rys. 73 Model z siatką MES



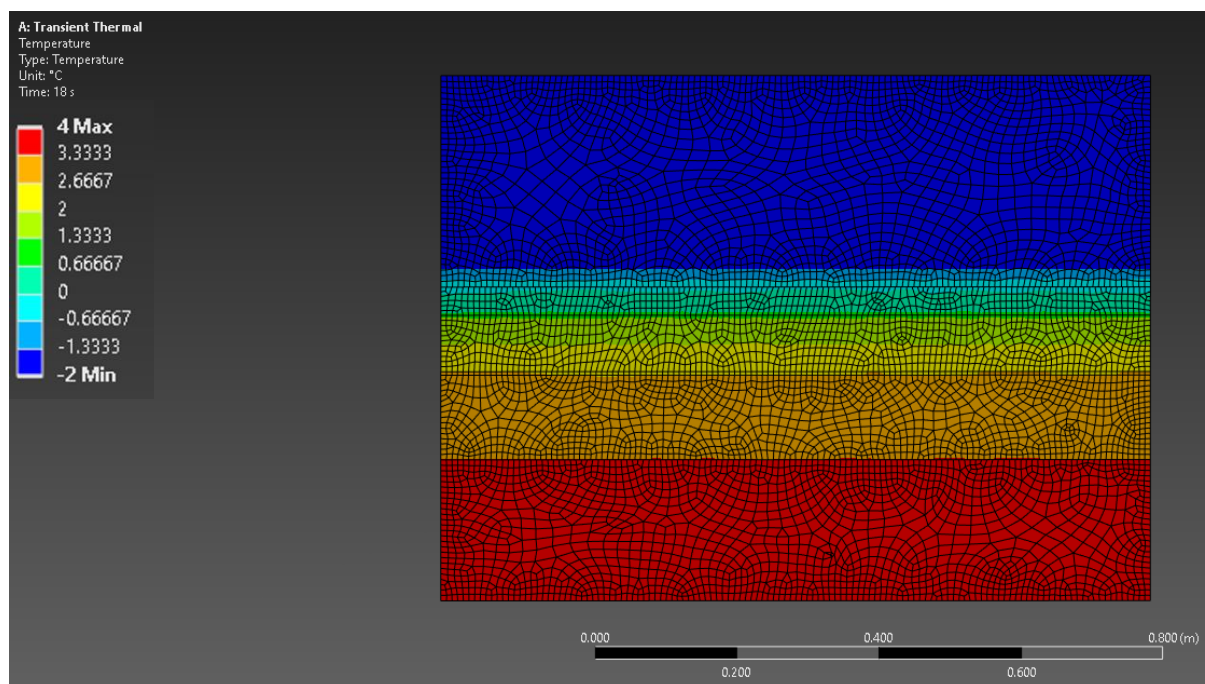
Rys. 74 Lokalizacja pomiaru temperatury (zielona linia, powierzchnia nawierzchni)

Przeprowadzono analizę dla następujących przypadków:

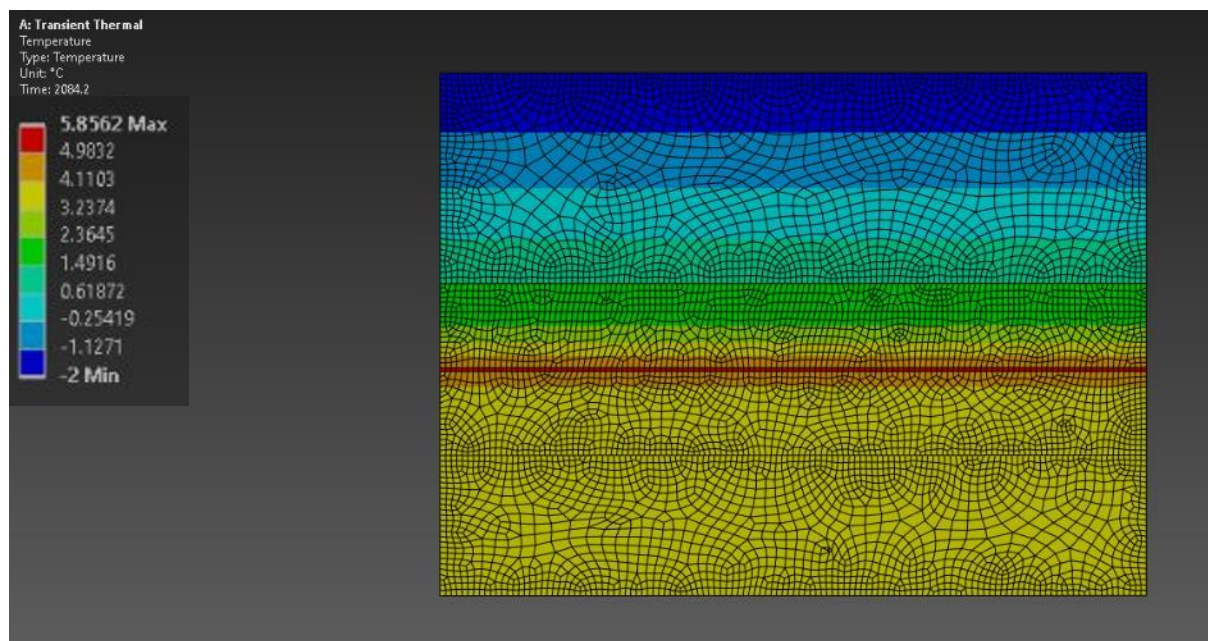
- A. Warstwa podbudowy o niskim współczynniku przewodności cieplnej, warstwy wiążące i ścieralna o wysokim współczynniku przewodności cieplnej (rys. 75 – rys. 78)
- B. Warstwa podbudowy o wysokim współczynniku przewodności cieplnej, warstwy wiążące i ścieralna o wysokim współczynniku przewodności cieplnej (rys. 79 – rys. 82)
- C. Warstwa podbudowy o niskim współczynniku przewodności cieplnej, warstwy wiążące i ścieralna o niskim współczynniku przewodności cieplnej (rys. 83 – rys. 86)
- D. Warstwa podbudowy o niskim współczynniku przewodności cieplnej, warstwy wiążące i ścieralna z mieszanki z dodatkiem grafitu (rys. 87– rys. 90).



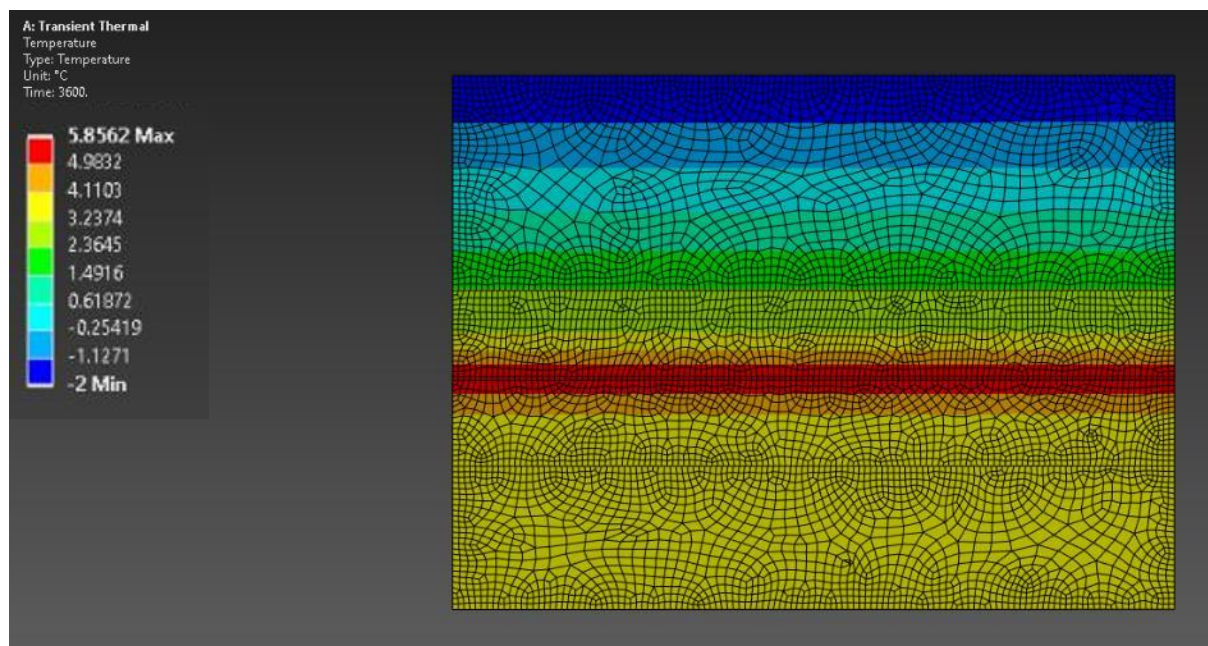
Rys. 75 Rozkład materiałów - przypadek A (warstwa podbudowy o niskim współczynniku przewodności, warstwy wiążące i ścierna o wysokim współczynniku przewodności)



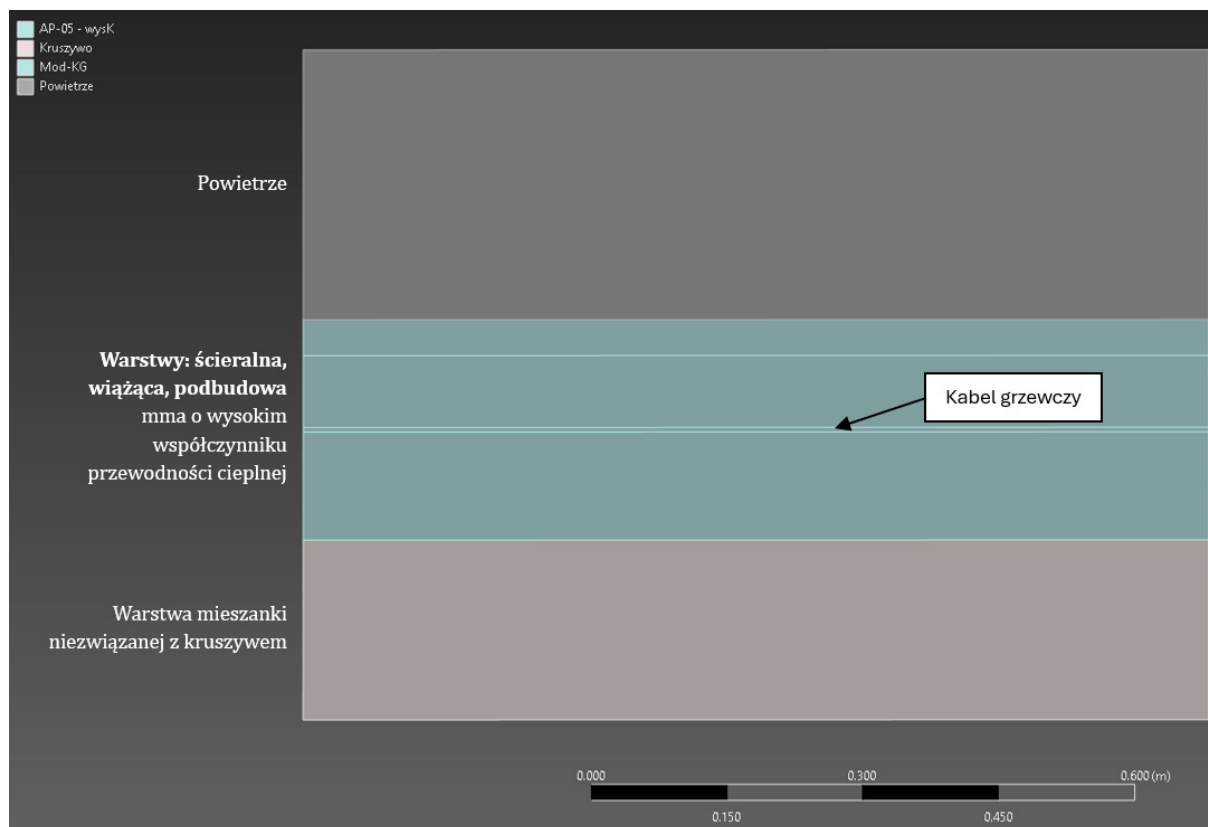
Rys. 76 Pole temperatury na początku analizy (w pierwszej minucie) - przypadek A



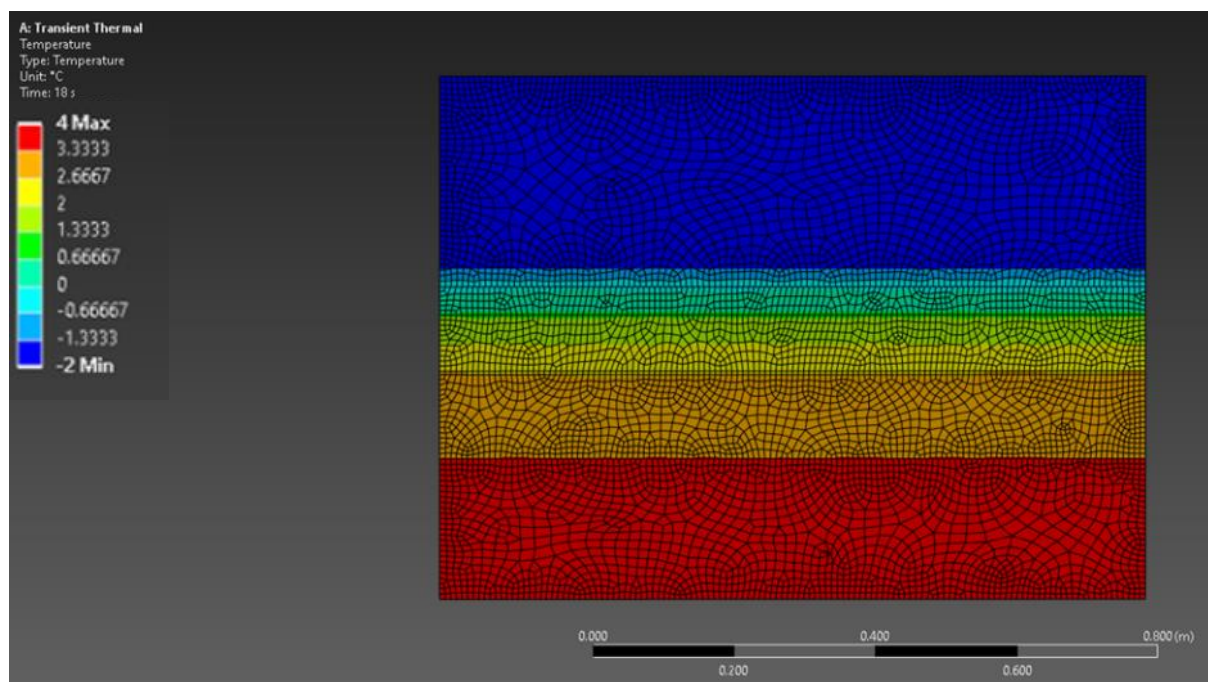
Rys. 77 Pole temperatury w połowie analizy (35 minuta) - przypadek A



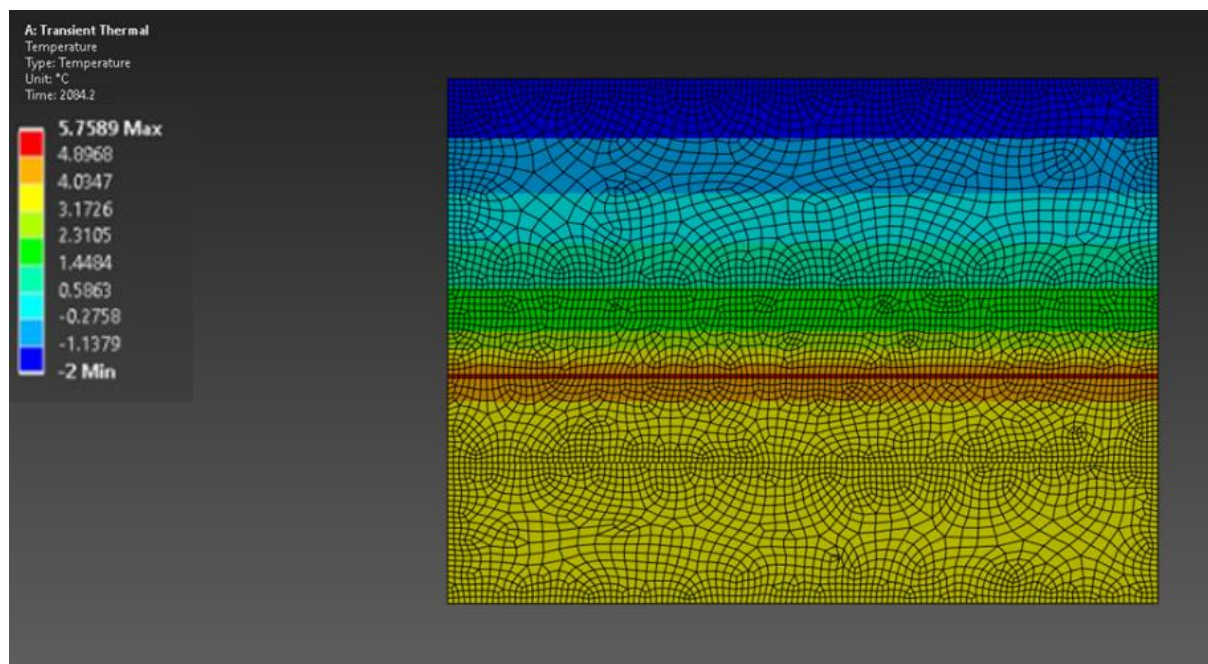
Rys. 78 Pole temperatury na koniec analizy (po 1h) - przypadek A



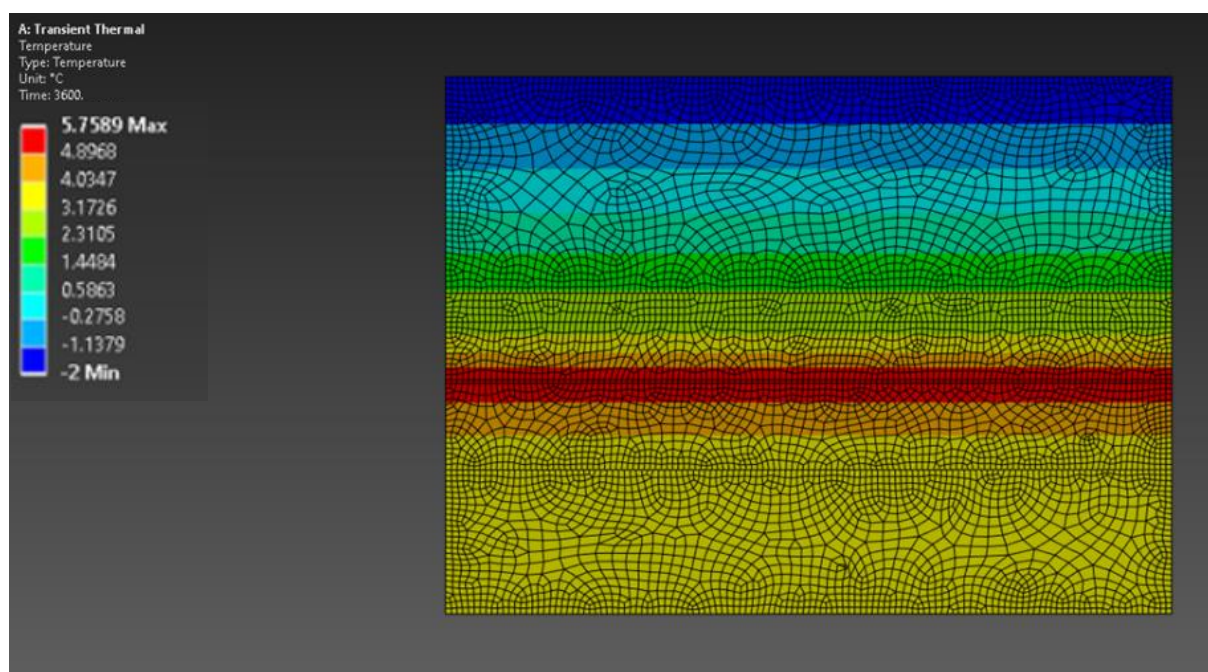
Rys. 79 Rozkład materiałów - przypadek B (warstwa podbudowy o wysokim współczynniku przewodności, warstwy wiążące i ścieralna o wysokim współczynniku przewodności)



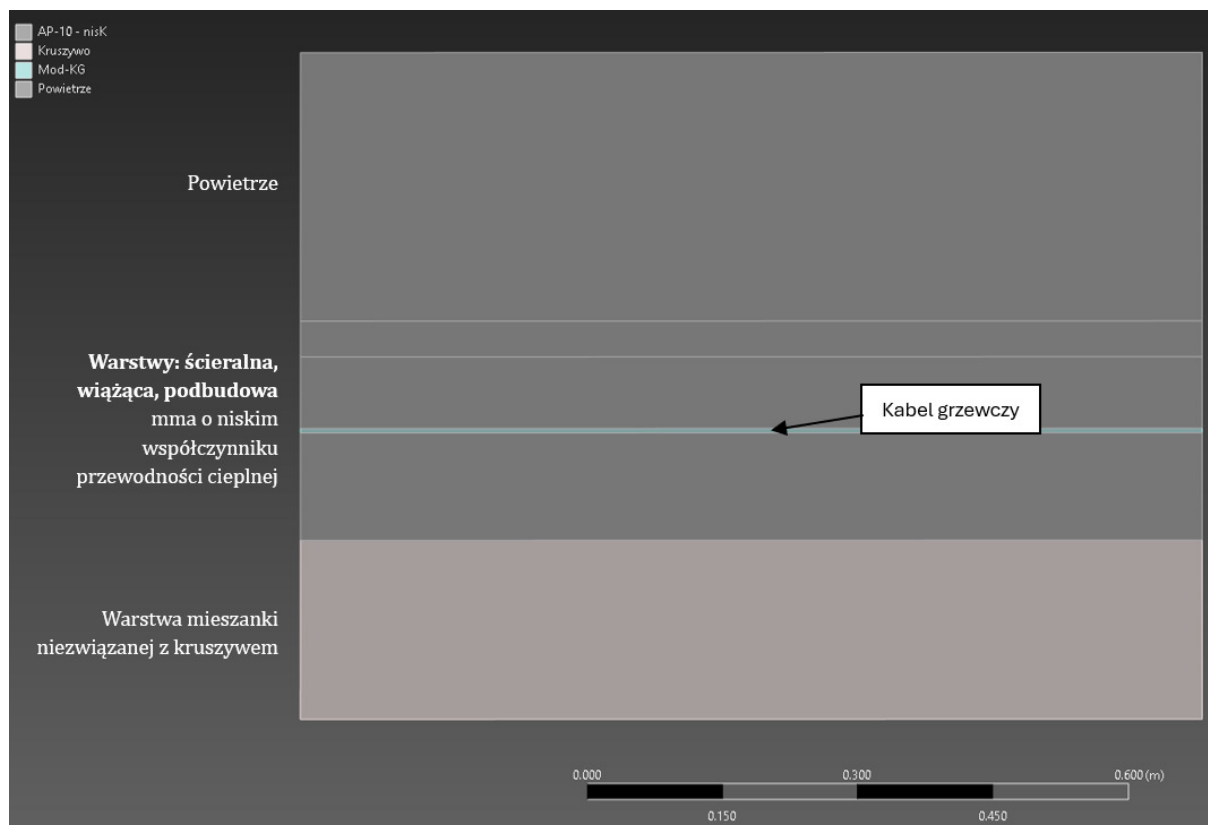
Rys. 80 Pole temperatury na początku analizy (w pierwszej minucie) - przypadek B



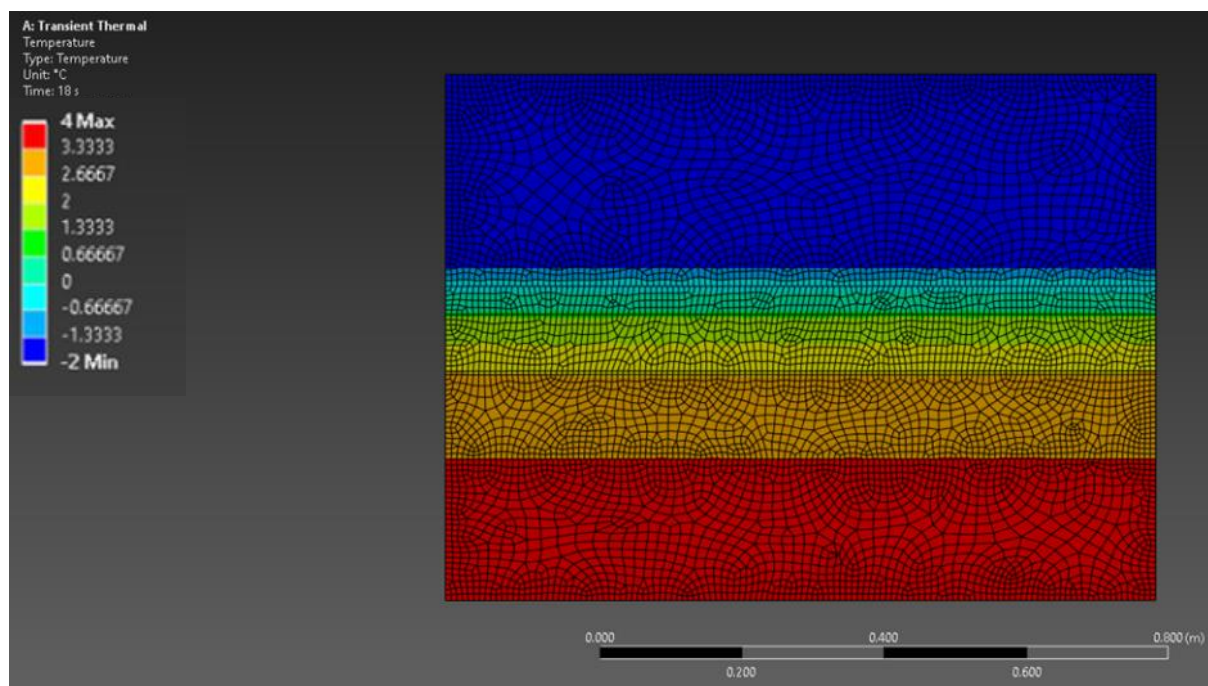
Rys. 81 Pole temperatury w połowie analizy (35 minuta) – przypadek B



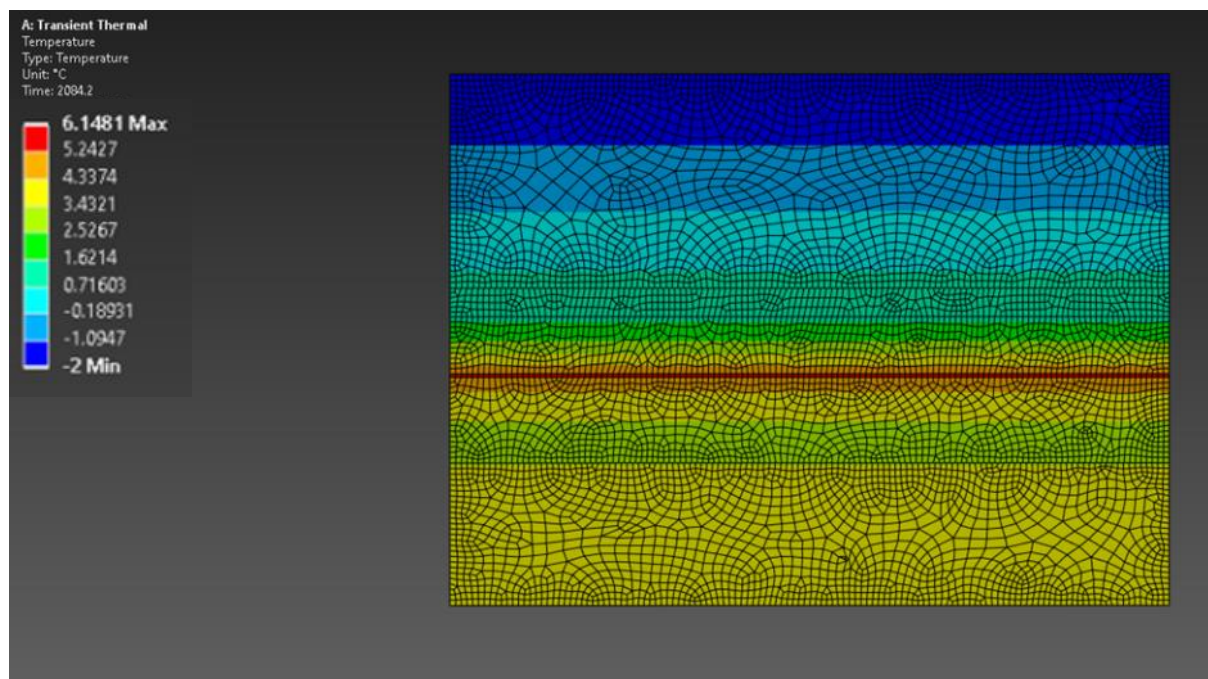
Rys. 82 Pole temperatury na koniec analizy (po 1h) - przypadek B



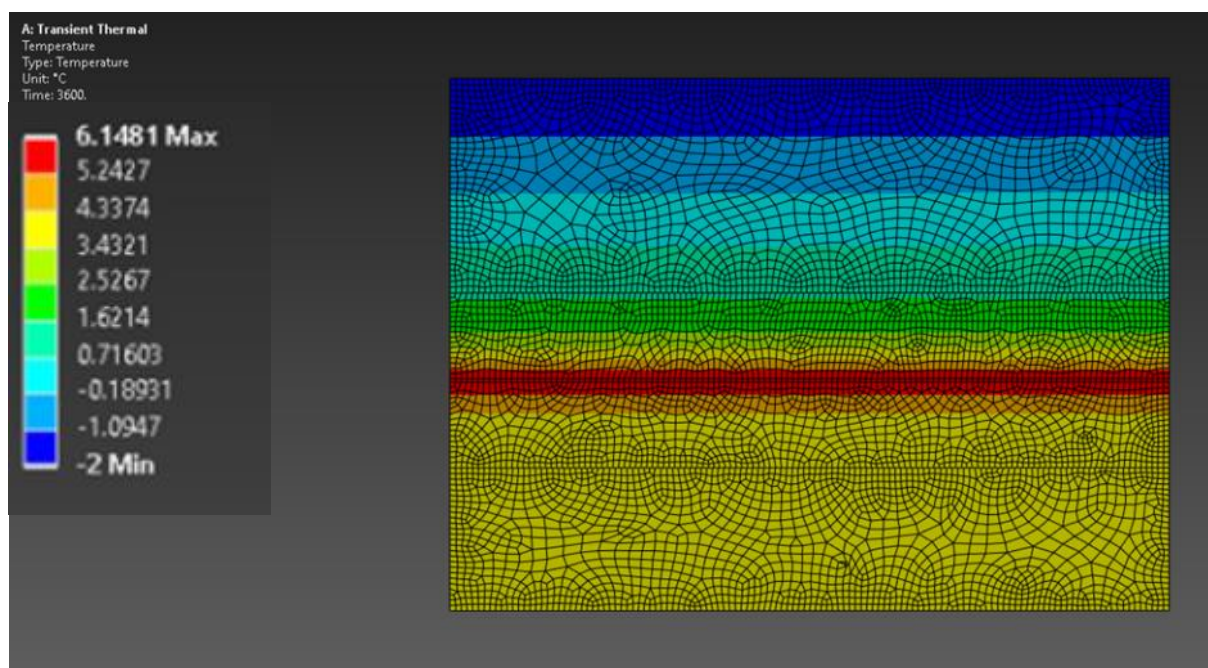
Rys. 83 Rozkład materiałów - przypadek C (warstwa podbudowy o niskim współczynniku przewodności, warstwy wiążące i ścieralna o niskim współczynniku przewodności)



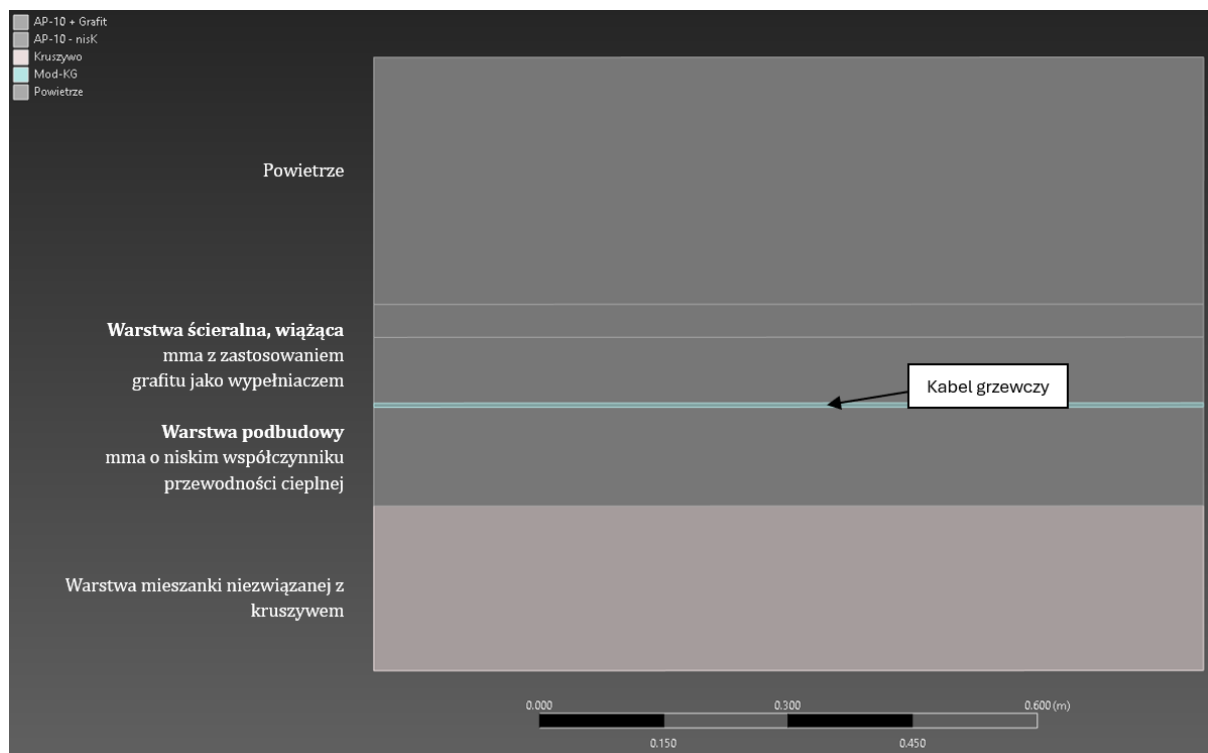
Rys. 84 Pole temperatury na początku analizy (w pierwszej minucie) - przypadek C



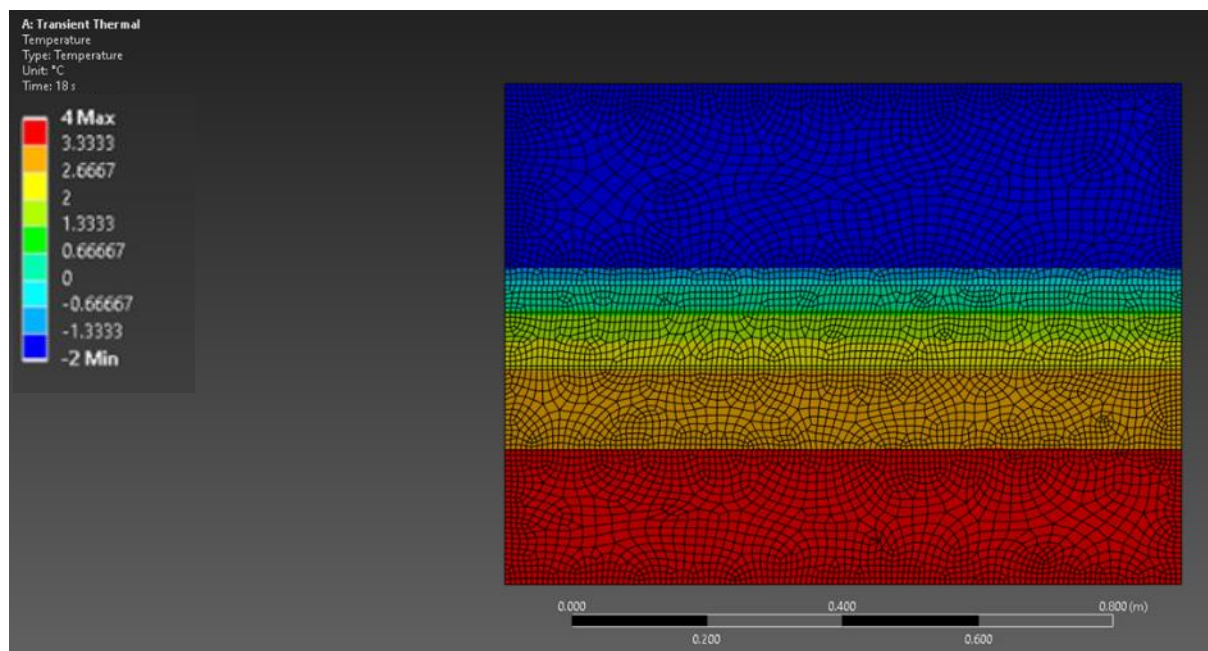
Rys. 85 Pole temperatury w połowie analizy (35 minuta) - przypadek C



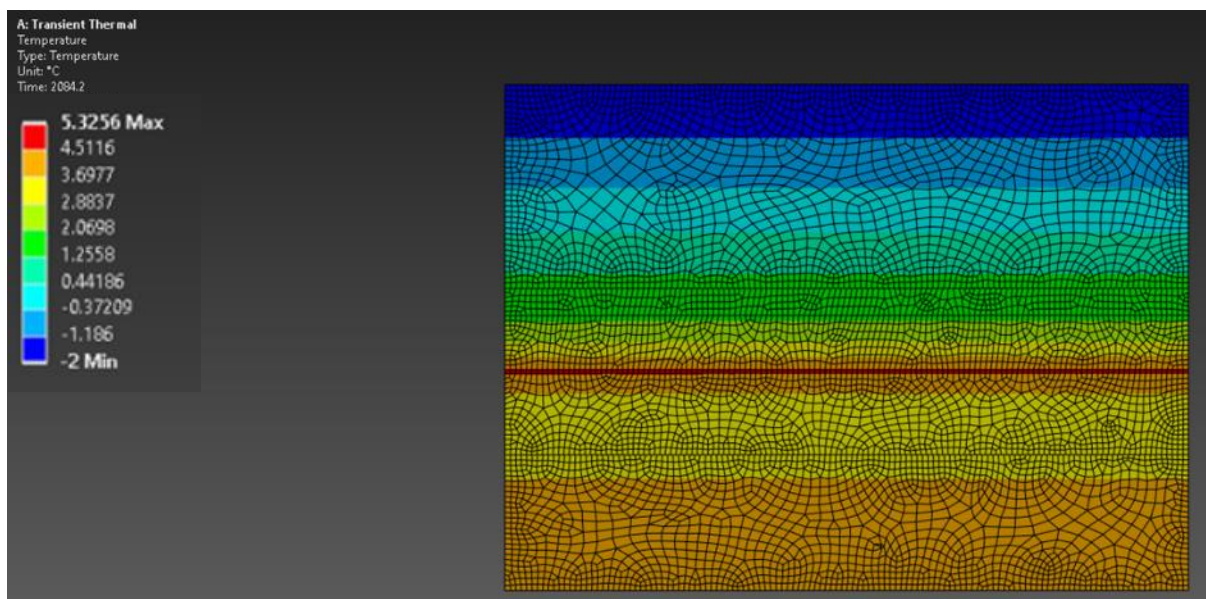
Rys. 86 Pole temperatury na koniec analizy (po 1h) - przypadek C



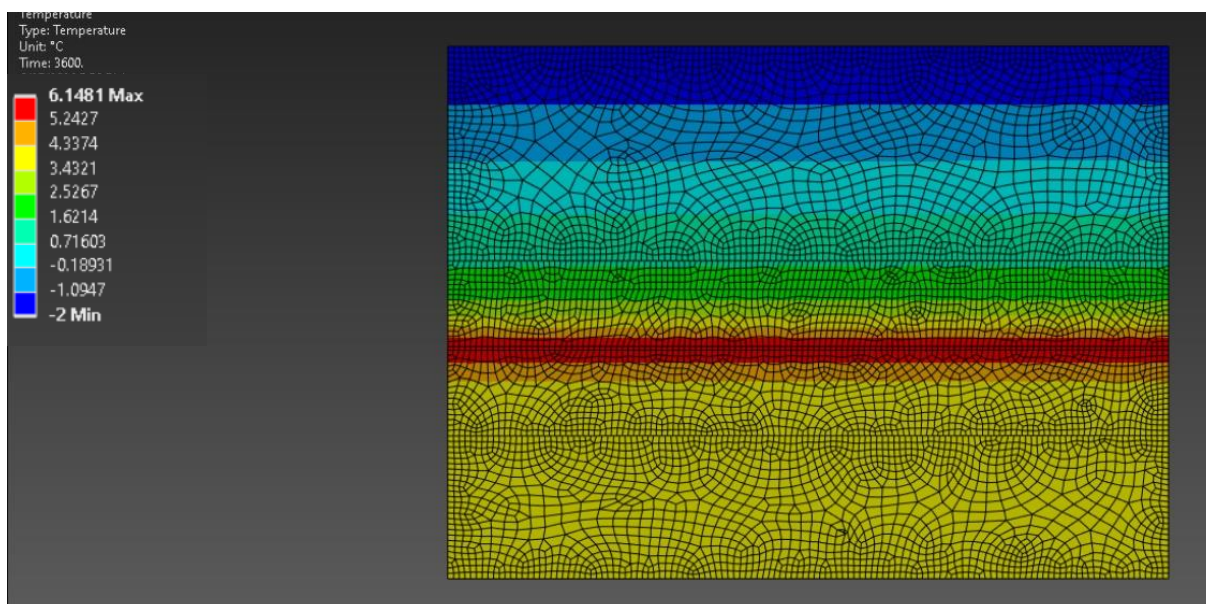
Rys. 87 Rozkład materiałów - przypadek D (warstwa podbudowy o niskim współczynniku przewodności, warstwy wiążące i ściernalna z mieszanki z dodatkiem grafitu)



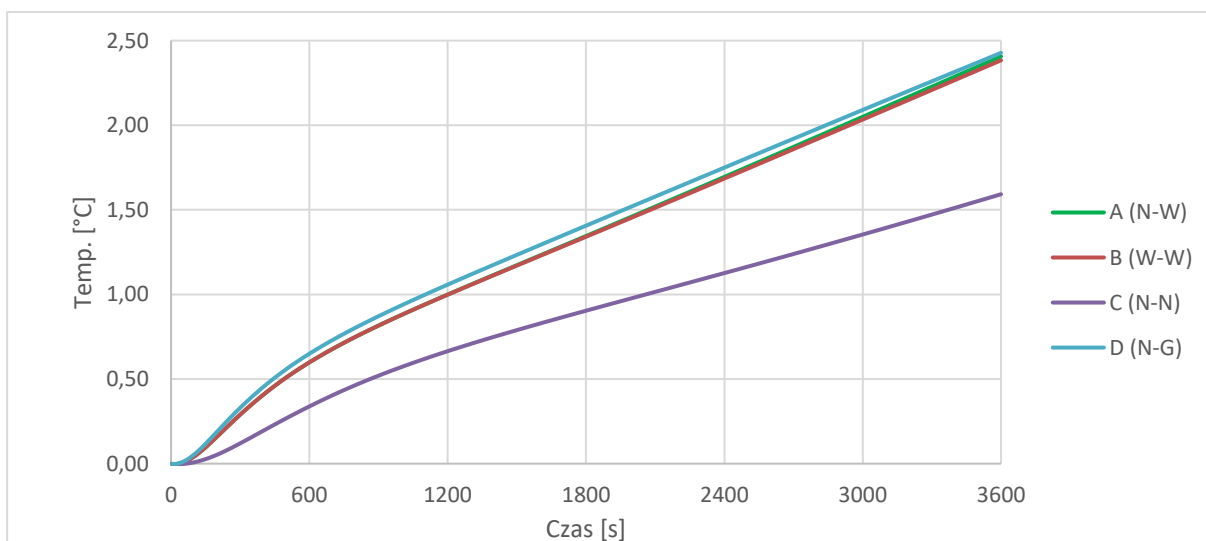
Rys. 88 Pole temperatury na początku analizy (w pierwszej minucie) - przypadek D



Rys. 89 Pole temperatury w połowie analizy (35 minuta) - przypadek D



Rys. 90 Pole temperatury na koniec analizy (po 1h) - przypadek D



Rys. 91 Pomiar temperatury dla poszczególnych przypadków

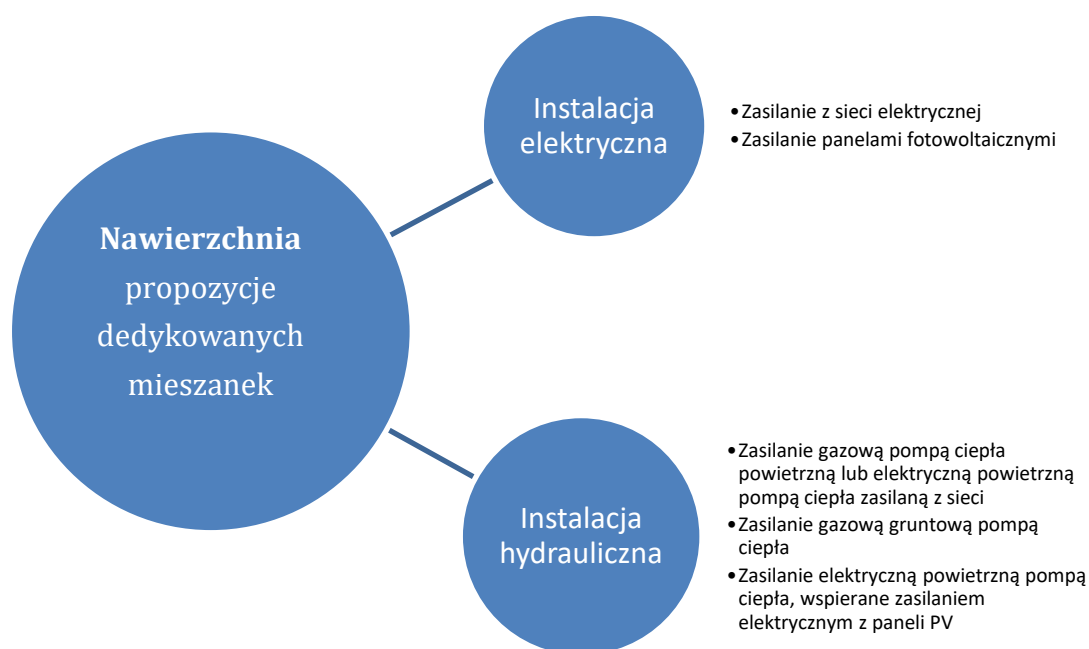
Pomiar temperatury dla poszczególnych przypadków przedstawiono na wykresie (rys. 91). Przeprowadzona analiza wskazuje na niewielki wpływ mieszanki stosowanej poniżej wbudowanej instalacji grzewczej na zmianę temperatury (warstwy podbudowy). Istnieje za to istotna różnica temperatur dla różnych mieszanek znajdujących się nad instalacją grzewczą (warstwa wiążąca i ścieralna). Mieszanka stosowana w warstwach powyżej instalacji powinna być mieszanką o wyższej przewodności cieplnej, co koresponduje z intuicyjnym podejściem do problemu. Wyższa przewodność cieplna warstwy sprawia, że ciepło z instalacji szybciej przepłynie w kierunku nawierzchni (przy założeniu takiej samej pojemności cieplnej). W rozważaniach teoretycznych niższa przewodność warstwy poniżej instalacji grzewczej powinna powodować wolniejszy odpływ ciepła do gruntu, lecz model nie potwierdza istotnego wpływu tej kwestii na temperaturę nawierzchni. Co każe sądzić, że mieszanki użyte poniżej instalacji, nie mają wpływu na odladzanie. Dodatkowo zauważono, że różnica przy zastosowaniu standardowych mieszanek o wyższej przewodności cieplnej oraz mieszanki z zastosowaniem grafitu nie wpływa znacząco na temperaturę nawierzchni. Dobór mieszanki o wysokiej przewodności cieplnej powinien być oparty na aspektach ekonomicznych oraz technologicznych. Zastosowanie grafitu musi odbywać się w oparciu o analizę ekonomiczną – dla niewielkich inwestycji proces technologiczny dla produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej ze zmienionym wypełniaczem może być nieopłacalny.

9 ROZWIĄZANIE DLA PRZEDSIĘBIORSTWA

W oparciu o uzyskane informacje jako rekomendowane (główne) rozwiązania wybrano instalację elektryczną zasilaną panelami PV lub instalację hydrauliczną zasilaną gazową powietrzną pompą ciepła.

Rozprawa doktorska realizowana jest w ramach programu doktorat wdrożeniowy. Celem niniejszego zadania realizowanego przez doktorantkę jest opracowanie rozwiązania nawierzchni samoodladzającej dla przedsiębiorstwa, możliwego do wdrożenia poprzez włączenie do oferty, w tym przypadku firmy TPA Sp. z o.o., wchodzącej w skład koncernu STRABAG.

Elementy wchodzące w skład rozwiązania nawierzchni samoodladzającej przedstawiono na rys. 92.



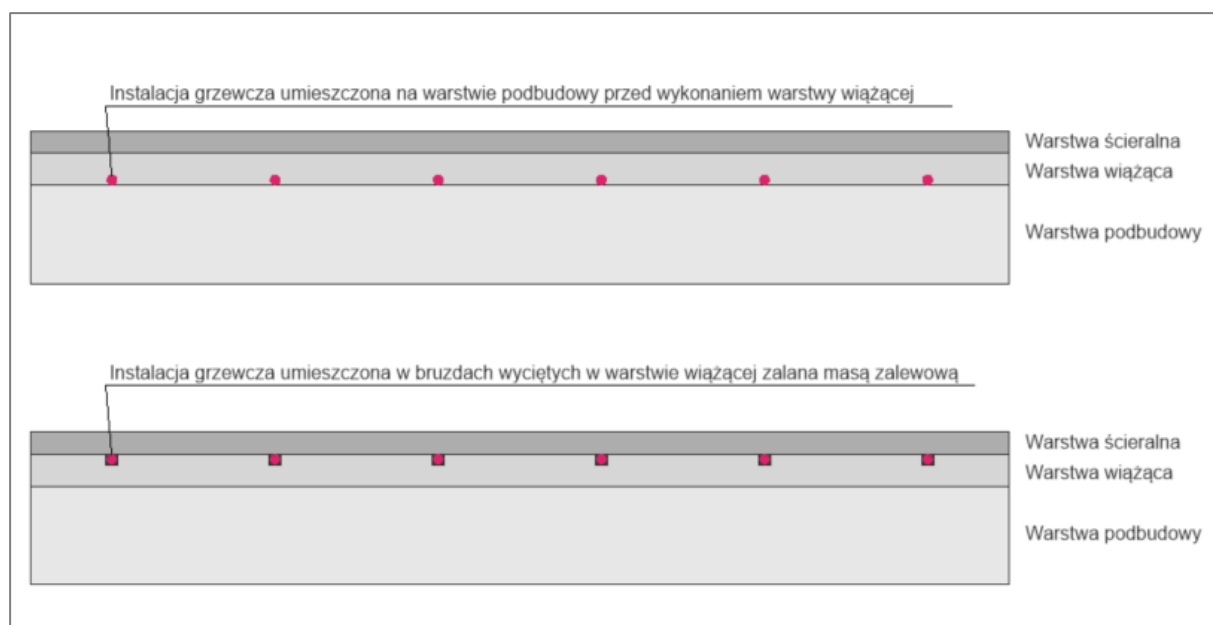
Rys. 92 Elementy rozwiązania nawierzchni samoodładzającej

Ważnym aspektem w projektowaniu nawierzchni drogowej jest umożliwienie jak najdłuższego czasu eksploatacji. Częstym rozwiązaniem jest wymiana jedynie warstwy ścieralnej, która zużywa się najszybciej z całej konstrukcji. W związku z tym, aby umożliwić ewentualny remont nawierzchni poprzez wymianę warstwy ścieralnej instalacja powinna być umieszczona w warstwie wiążącej.

Występują dwie możliwości umieszczenia instalacji w warstwie wiążącej (rys. 93):

- Instalacja grzewcza umieszczona na warstwie podbudowy przed wykonaniem warstwy wiążącej
- Instalacja grzewcza umieszczona w bruzdach wyciętych w warstwie wiążącej, zalanych masą zalewową (to rozwiązanie jest szczególnie dedykowane do już istniejących nawierzchni, w których wystarczy wymienić jedynie warstwę ścieralną).

W przypadku instalacji grzewczej umieszczonej w bruzdach wyciętych w warstwie wiążącej wymagana moc instalacji będzie niższa – ciepło przekazywane jest wyłącznie na grubości warstwy ścieralnej zanim dotrze do powierzchni nawierzchni drogowej. W rozwiązaniu, w którym instalacja znajduje się na spodzie warstwy wiążącej droga dla przepływu ciepła będzie niemalże dwukrotnie większa ze względu na typowe wymiary konstrukcji nawierzchni.



Rys. 93 Przekroje nawierzchni prezentujące możliwości umieszczenia instalacji grzewczej

Dobór parametrów technicznych instalacji nie jest objęty niniejszym opracowaniem, w tej kwestii zalecany jest kontakt z wyspecjalizowanymi instalatorami – materiały oraz urządzenia ulegają ciągłym ulepszeniom, więc decyzyjność oraz zalecenia powinny być aktualizowane w momencie przedstawiania oferty potencjalnym Inwestorom. W zależności od warunków środowiskowych moc instalacji stosowanych na terenie Polski waha się w zakresie 200-400 W/m². Na podstawie wykonanej analizy temperatur w Polsce zaleca się następującą moc:

- 200-250 W/m² w wydzielonej w niniejszym opracowaniu Strefie I (rys. 47)
- 250-300 W/m² w wydzielonej w niniejszym opracowaniu Strefie II (rys. 47)
- 300-350 W/m² w wydzielonej w niniejszym opracowaniu Strefie III (rys. 47)
- 350-400 W/m² w wydzielonej w niniejszym opracowaniu Strefie IV (rys. 47)

Projekt oraz parametry instalacji zastosowanej w nawierzchni samoodładzającej muszą być dostosowane do warunków lokalizacyjnych oraz środowiskowych. Należy również pamiętać o zarezerwowaniu przestrzeni pod stację zasilania.

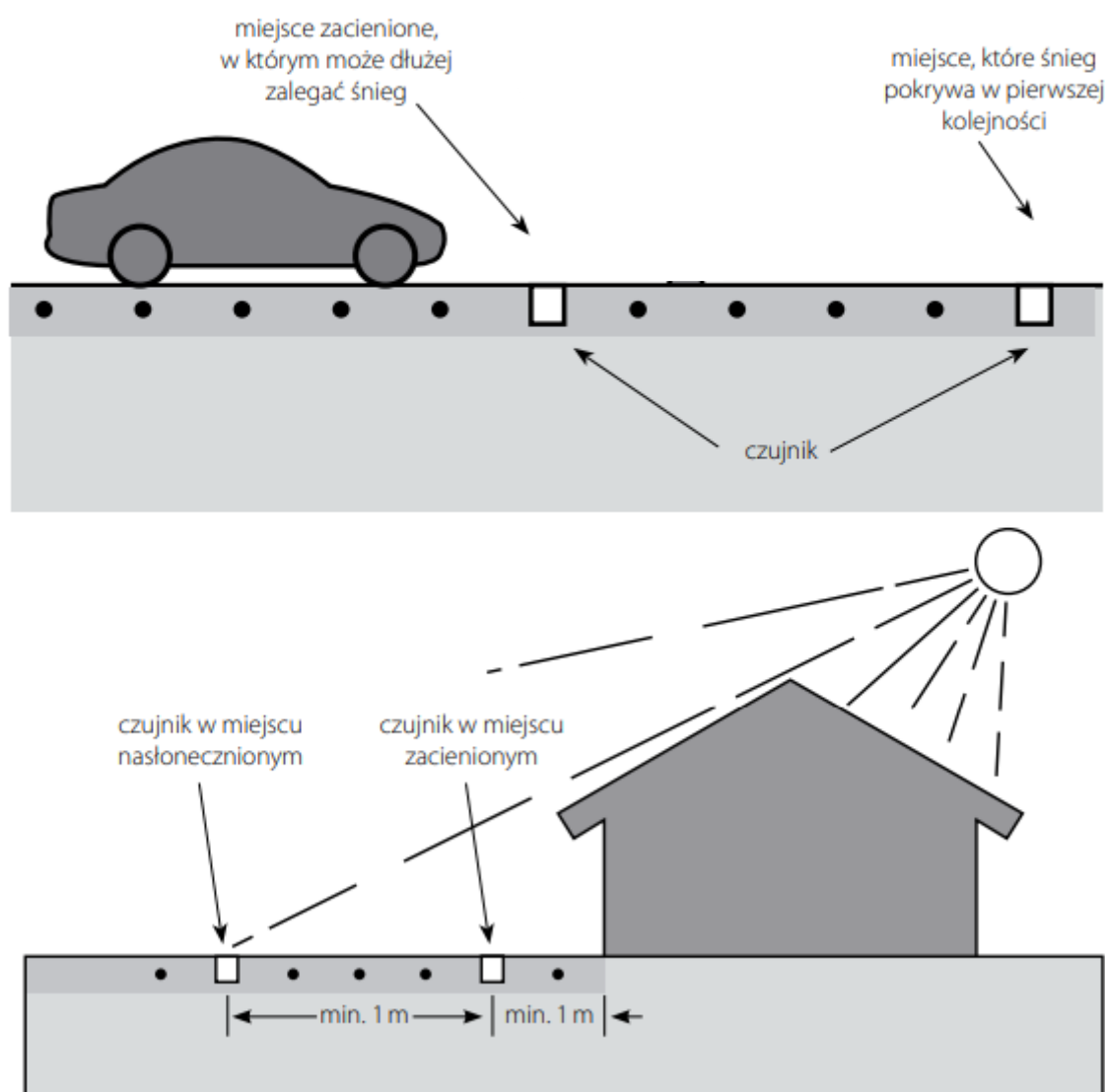
Ważnym aspektem (wchodzącym w skład instalacji, nieobjętej niniejszym opracowaniem) jest zastosowanie czujników. Sterowanie pracą instalacji samoodładzającej powinno opierać się na odczytach czujników monitorujących następujące parametry:

- temperaturę powietrza
- temperaturę powierzchni ogrzewanej
- wilgotność powietrza
- wykrycie śniegu i lodu przy nawierzchni.

System sterujący pracą instalacji powinien reagować na zbliżające się warunki pogodowe z wyprzedzeniem – zalecaną metodą kontroli jest tryb pracy czuwania/topnienie, w którym instalacja utrzymuje zadaną temperaturę w trybie czuwania oraz zwiększenie mocy w trybie topnienia, np. podczas opadów śniegu.

Dodatkowo, zasadniczy wpływ na pracę systemu ma właściwe usytuowanie czujników. Według zaleceń firmy DEVI [114] jeden z czujników powinien znajdować się w miejscu, w którym najszybciej powstaje oblodzenie i zalega śnieg (szybkość działania), a drugi czujnik należy umieścić w miejscu, w którym śnieg/lód będzie się utrzymywał najdłużej (dokładność działania). Sposób łączenia i rozmieszczania czujników przedstawiono na rys. 94.

**Sposób łączenia
i rozmieszczania czujników gruntowych**



Rys. 94 Sposób łączenia i rozmieszczania czujników gruntowych [114]

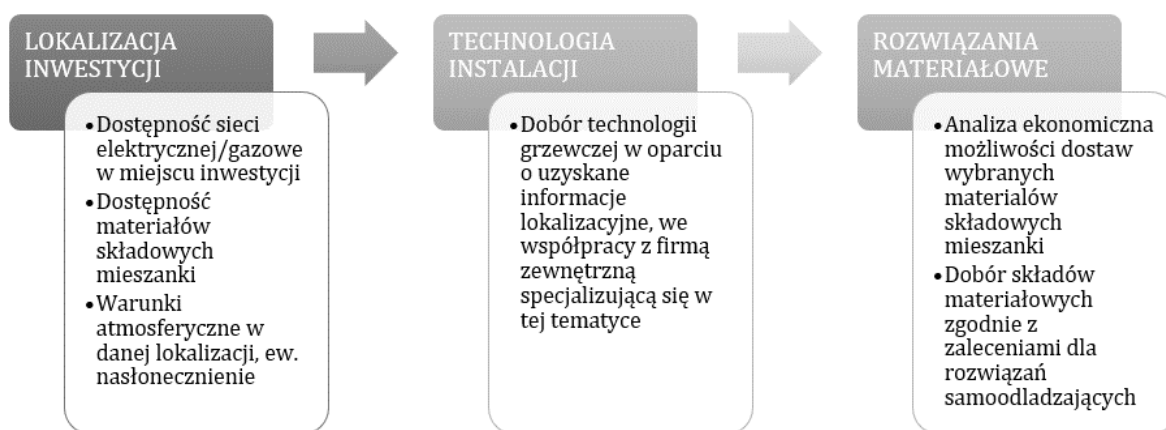
Zastosowana mieszanka powinna być następująca:

- Warstwa podbudowy – standardowa mieszanka, która byłaby zastosowana w danej lokalizacji, na danym kontrakcie bez występowania nawierzchni samoodladzającej
- Warstwa wiążąca dla rozwiązania instalacji grzewczej umieszczonej w bruzdach wyciętych w warstwie wiążącej, zalanych masą zalewową – standardowa mieszanka, która byłaby zastosowana w danej lokalizacji, na danym kontrakcie bez występowania nawierzchni samoodladzającej
- Warstwa wiążąca dla rozwiązania instalacji grzewczej umieszczonej na warstwie podbudowy przed wykonaniem warstwy wiążącej – standardowa mieszanka mineralno-asfaltowa z ewentualnym dodatkiem grafitu jako wypełniacza, w składzie której przeważającym kruszywem jest żwir łamany, szarogłaz lub granit,
- Warstwa ścieralna dla rozwiązania instalacji grzewczej umieszczonej na warstwie podbudowy przed wykonaniem warstwy wiążącej – standardowa mieszanka mineralno-asfaltowa z ewentualnym dodatkiem grafitu jako wypełniacza, w składzie której przeważającym kruszywem jest granit, szarogłaz

Mieszanki mineralno-asfaltowe o wyższej przewodności (oparte na żwirze łamanym, szarogłazie lub granicie) każdorazowo powinny być projektowane w oparciu o dostępność materiałów w miejscu zastosowania. Nie należy stawiać się na jedną konkretną mieszankę, ze względu na aspekty ekonomiczne.

Projektowanie składów mieszanek mineralno-asfaltowych – badań typu należy wykonywać w sposób standardowy, zgodnie z Wymaganiami Technicznymi [102]. W miarę możliwości należy zastosować mieszanki oparte na żwirze, szarogłazie lub granicie. Wybierać należy mieszanki mineralno-asfaltowe o niższej zawartości wolnych przestrzeni ($V_{a,max}=7\%$).

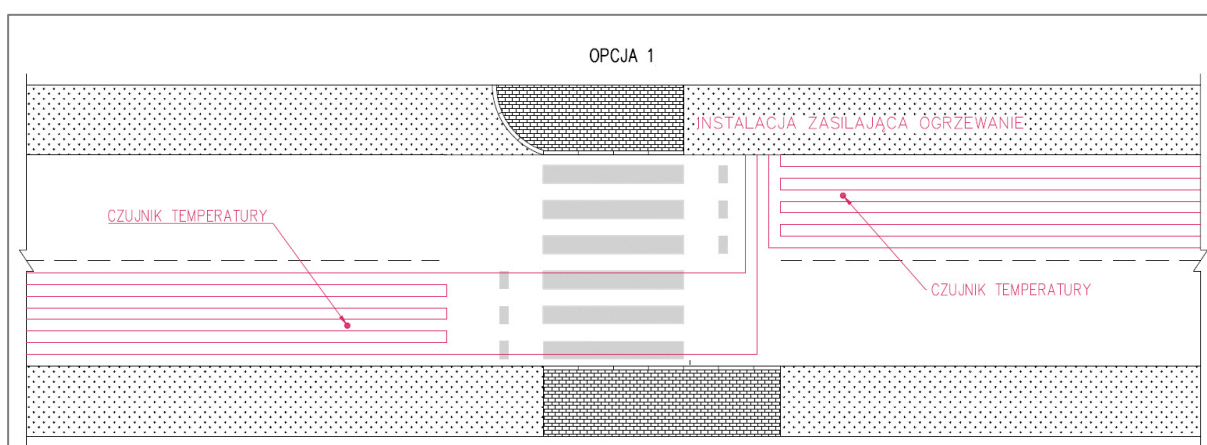
Schemat postępowania przy doborze technologii samoodladzającej przedstawia rys. 95.



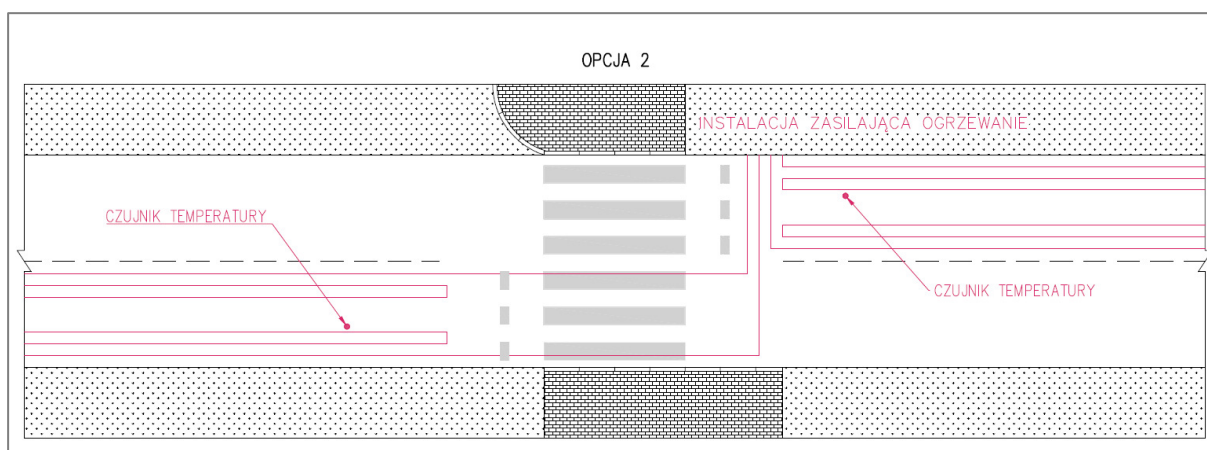
Rys. 95 Schemat postępowania przy doborze technologii samoodladzającej

Rozwiązaniem, które może zostać zaproponowane Inwestorowi jest rozwiązanie samoodladzającego dojazdu do przejścia dla pieszych. Długość ogrzewanego odcinka powinna być dostosowana do długości drogi hamowania w miejscu planowanego rozwiązania. Lokalizacja ta jest miejscem szczególnie niebezpiecznym – pojawiający się na przejściu pieszcy w sposób nagły zmusza jadącego kierowcę do nagłego hamowania. Warunki zimowe, brak śliskości są szczególnie istotne w tym momencie, dlatego wykonanie takiej inwestycji byłoby kluczowe.

Przewidywane są dwie opcje (rys. 96, rys. 97) – opcja 1, zakładająca wykonanie instalacji na całym pasie oraz opcja 2, w której na środku pasa pozostaje nieogrzewany pas. Zabieg ten skutkuje użyciem mniejszej ilości medium grzewczego, co pozwoli zaoszczędzić ok. 25% wydatków koniecznych do wykonania instalacji.



Rys. 96 Schemat rozwiązania – opcji 1 dla samoodladzającego dojazdu do przejścia dla pieszych



Rys. 97 Schemat rozwiązania – opcji 2 dla samoodladzającego dojazdu do przejścia dla pieszych

W związku z wdrożeniowym charakterem niniejszej rozprawy dla rozwiązania przygotowano przykładowe Badania Typu do zastosowania w rozwiązaniu nawierzchni samoodladzających (będące wewnętrzną informacją dostępną dla przedsiębiorstwa) oraz następujące dokumenty techniczne, stanowiące załącznik do niniejszej pracy:

- Zał. 1.1 Przekrój poprzeczny – system grzewczy w nowej warstwie wiążącej
- Zał. 1.2 Przekrój poprzeczny – system grzewczy w istniejącej warstwie wiążącej

- Zał. 2 Plan sytuacyjny
- Zał. 3.1 Specyfikacja Techniczna Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (STWiORB) – nawierzchnia samoodladzająca z betonu asfaltowego, warstwa wiążąca
- Zał. 3.2 Specyfikacja Techniczna Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (STWiORB) – nawierzchnia samoodladzająca z betonu asfaltowego, warstwa ścierna
- Zał. 4 Disclaimer

10 PODSUMOWANIE, WNIOSKI KOŃCOWE I KIERUNKI ROZWOJU DALSZYCH BADAŃ

10.1 Podsumowanie

Nawierzchnie samoodladzające, choć znane od ponad 70 lat w dalszym ciągu są rzadkością. Wraz z rosnącym zainteresowaniem tematyką dbania o środowisko i chęci ograniczenia wpływu stosowanych soli odladzających, a także rozwojem technologii alternatywnych metod zasilania, zagadnienie stało się coraz bardziej popularną tematyką działalności badawczo-rozwojowej.

Duża część prowadzonych badań polegała na analizie numerycznej lub laboratoryjnej możliwych rozwiązań czy ulepszeń. Problemem wydaje się rzadkie połączenie efektów badań z możliwością zaoferowania ich do wykonania w codziennych inwestycjach i przygotowania odcinków testowych pozwalających na potwierdzenie badań laboratoryjnych w makro skali.

Analiza warunków środowiskowych w Polsce pozwala na podzielenie Polski na 4 strefy w zależności od liczby dni w roku, w których temperatura powietrza była niedodatnia. Podział ten pomaga w dobrze potencjalnego rozwiązania i szacowania jego kosztów. Ważną cechą warunków występujących na terenie Polski jest fakt częstego przechodzenia temperatury przez 0. Właściwość ta sprawia, że utrzymanie zimowe na terenie naszego kraju charakteryzuje się zwiększoną częstotliwością procesów zamarzania i rozmrażania, sprawiając, że warunki na drogach są niezwykle ciężkie. Istotnym aspektem przy planowaniu i projektowaniu inwestycji instalacji samoodladzających jest również dostępność sieci elektrycznej lub gazowej w zależności od doboru technologii.

Przeprowadzona analiza kosztowa wskazuje na przynajmniej 6-krotną (bardzo bezpieczne założenia), a nawet 100-krotną różnicę cenową. W związku z tym początkowo rozwiązanie sugerowane jest do stosowania na mniejszych odcinkach, głównie w miejscach niebezpiecznych. Takie postępowanie pozwoli na ograniczenie kosztów, przy jednoczesnej możliwości jego sprawdzenia w warunkach rzeczywistych. Stały rozwój

technologii oraz źródeł zasilania pozostawia nadzieję na obniżenie tych kosztów w przyszłości i spowszechnienie rozwiązania nawierzchni samoodładzających.

Przeprowadzono badania właściwości termicznych asfaltów oraz mieszanek mineralno-asfaltowych. W wyniku badań asfaltów otrzymano wartości współczynnika przewodności cieplnej w zakresie 0,152-0,174 W/mK, z czego Asfalt Modyfikowany Gumą osiągnął wartość najwyższą, a pozostałe z badanych asfaltów osiągnęły wartości zbliżone z przedziału 0,152-0,158 W/mK. Badane mieszanki mineralno-asfaltowe osiągają wartości 10-krotnie (lub więcej) wyższe – 1,468-1,470 W/mK dla mieszanek opartych na bazalcie lub melafirze, 1,591-1,664 W/mK dla mieszanek opartych na gabrze oraz 1,878-2,165 W/mK dla mieszanek opartych głównie na żwirze, granicie lub szarogłazie. Zmierzone wartości współczynnika przewodności cieplnej mieszanek mineralno-asfaltowych w porównaniu do wartości współczynnika przewodności cieplnej kruszyw (będących głównym składnikiem danej mieszanki) wskazują na silną dodatnią korelację (wsp. korelacji Pearsona=0,88). Różnice pomiędzy wartościami współczynnika przewodności cieplnej dla asfaltów i mieszanek mineralno-asfaltowych oraz pomiędzy samymi asfaltami wskazuje, że zastosowany asfalt nie ma większego znaczenia na ostateczny wynik współczynnika przewodności cieplnej mieszanki.

Dodatkowo, zbadano również właściwości mieszanek z zastosowaniem dodatków. W przeprowadzonych badaniach wykazano, że dodatek 5% grafitu jako wypełniacza znacznie podnosi wartość współczynnika przewodności cieplnej – dla mieszanki AC 16W 35/50 opartej głównie na granicie było to niespełna 50% wzrostu, a dla mieszanki z bazaltem jako przeważającym kruszywem w składzie – wzrost o ponad 100%. Sprawdzano również wpływ dodatku włókien stalowych w ilości 1,5% zauważono niespodziewaną zależność – spadek wartości współczynnika przewodności cieplnej o niecałe 10%. W dalszym etapie sprawdzono te próbki w badaniu mikrotomografem rentgenowskim. Zauważono, że włókna są rozłożone w sposób niejednorodny, dodatkowo są one oblepione asfaltem lub mastyksem asfaltowym. Potencjalnie są to przyczyny otrzymania wyniku niższego niż spodziewany w przeprowadzonych pomiarach. Jednakże z powodu nierównomiernego rozkładu włókien, niższego niż w przypadku grafitu wpływu na współczynnik przewodności cieplnej oraz ewentualnych problemów technologicznych w trakcie produkcji mieszanek z tym dodatkiem nie zdecydowano się na zastosowanie włókien stalowych w rekomendowanym rozwiązaniu.

Przeprowadzono analizę wpływu rozwiązania materiałowego na wydajność instalacji grzewczej. W badaniach laboratoryjnych sprawdzano wpływ wybranych mieszanek – standardowej, lub z zastosowaniem dodatku grafitu lub włókien stalowych – znajdującej się powyżej instalacji grzewczej na wzrost temperatury na górnej powierzchni tej warstwy. Badanie przeprowadzono na stanowisku pomiarowym zaplanowanym do tego

celu. Próbkę (płyty) mieszanki mineralno-asfaltowej umieszczano na warstwie kruszywa drobnego z kablem grzewczym umieszczonym na górze warstwy. Pod płytą oraz na płycie umieszczono termopary, na których prowadzono ciągły pomiar temperatury, a całość zamknięta była w formie styropianowej. Wykazano, że temperatura wzrasta najszybciej dla próbki z grafitem, a najwolniej dla standardowej próbki.

Dodatkowo, jako uzupełnienie do przeprowadzonych badań wykonano analizę numeryczną, w której rozważaniom poddano wpływ zastosowanej mieszanki poniżej oraz powyżej warstwy grzewczej. Sprawdzano wpływ mieszanek o niskim lub wysokim współczynniku przewodności cieplnej zastosowanych poniżej warstwy grzewczej oraz wpływ tych mieszanek oraz mieszanki z grafitem dla warstw powyżej instalacji grzewczej. Przeprowadzona analiza wskazała, że nie ma znaczenia jaka mieszanka jest stosowana poniżej warstwy grzewczej. Istotny jest dobór mieszanki ulokowanej powyżej warstwy grzewczej. W przeprowadzonej analizie, przy zastosowaniu mieszanek o niskim współczynniku przewodności cieplnej temperatura na powierzchni jest o stopień niższa niż w przypadku mieszanek o wyższym współczynniku. Dodatkowo stworzony model numeryczny potwierdził wyniki uzyskane w badaniach laboratoryjnych – mieszanki z dodatkiem grafitu i włókien stalowych znacząco skracają czas nagrzewania powierzchni drogi, a za czym idzie rozmrażania znajdującego się na nim lodu.

Na podstawie przeprowadzonych analiz opracowano zalecenia dotyczące wyboru mieszanek nawierzchniowych do zastosowania w nawierzchniach samoodładzających w Polsce. Określono zalecenia dla mieszanek dla poszczególnych warstw, z uwzględnieniem umiejscowienia instalacji grzewczej:

- Warstwa podbudowy – standardowa mieszanka, która byłaby zastosowana w danej lokalizacji, na danym kontrakcie bez występowania nawierzchni samoodładzającej
- Warstwa wiążąca dla rozwiązania instalacji grzewczej umieszczonej w bruzdach wyciętych w warstwie wiążącej, zalanych masą zalewową – standardowa mieszanka, która byłaby zastosowana w danej lokalizacji, na danym kontrakcie bez występowania nawierzchni samoodładzającej
- Warstwa wiążąca dla rozwiązania instalacji grzewczej umieszczonej na warstwie podbudowy przed wykonaniem warstwy wiążącej – standardowa mieszanka mineralno-asfaltowa w składzie której przeważającym kruszywem jest żwir łamany, szarogłaz lub granit z ewentualnym dodatkiem grafitu jako wypełniacza
- Warstwa ścieralna dla rozwiązania instalacji grzewczej umieszczonej na warstwie podbudowy przed wykonaniem warstwy wiążącej – standardowa mieszanka mineralno-asfaltowa w składzie której przeważającym kruszywem jest szarogłaz lub granit z ewentualnym dodatkiem grafitu jako wypełniacza

Wybór rozwiązania powinien odbywać się rozpoczynając od określenia warunków środowiskowych, dostępności sieci oraz materiałów składowych dla lokalizacji inwestycji. Następnie z pomocą doświadczonych instalatorów należy dobrać ostateczne rozwiązanie instalacji samoodladzającej. W ostatnim etapie technolodzy projektują mieszanki zgodnie z zaleceniami, biorąc pod uwagę aspekty ekonomiczne późniejszego wbudowania tych mieszanek na kontrakcie. Na ten moment ze względów ekonomicznych rozwiązanie powinno być stosowane i szerzej testowane w mniejszych lokalizacjach, w miejscach szczególnie niebezpiecznych.

Na potrzeby wdrożenia rozwiązania w przedsiębiorstwie opracowano dokumentację techniczną zawierającą Disclaimer, SSTWIORB dla warstwy wiążącej i ścieralnej, jak również podstawowe rysunki wskazujące na lokalizację systemu grzewczego. Dodatkowo zebrane zostały przykładowe badania typu dla mieszanek zalecanych do zastosowania w tym rozwiązaniu. Dokumentacja sprawia, że w przypadku pozyskania klienta gotowego do realizacji inwestycji wykonania nawierzchni samoodladzającej jesteśmy, jako Przedsiębiorstwo, gotowi do realizacji. Niestety ze względu sytuację globalną w okresie realizacji doktoratu wdrożeniowego – Covid, wojna w Ukrainie oraz powiązana inflacja spowodowały opóźnienie w realizacji wdrożenia w formie budowy odcinka. Jednakże rozmowy z potencjalnym Inwestorem trwają.

Przeprowadzone badania i analizy **potwierdzają, że zastosowanie technologii nawierzchni samoodladzających może stanowić alternatywę dla tradycyjnie stosowanych rozwiązań radzenia sobie ze śliskością zimową, szczególnie w miejscach niebezpiecznych. Wybór technologii zależy od warunków środowiskowych i lokalizacji.** Przeprowadzone badania oraz analiza numeryczna **potwierdzają, że efektywność prawidłowo zastosowanej technologii zależy od składu mieszanki mineralno-asfaltowej.**

10.2 Wnioski końcowe

Sformułowano następujące wnioski końcowe

- Dobór rodzaju i zasilania instalacji grzewczej zależy od lokalizacji inwestycji – wpływ mają panujące w niej warunki środowiskowe, czyli warunki atmosferyczne oraz dostępność sieci zasilających instalację
- Nawierzchnie samoodladzające są w chwili obecnej bardziej kosztowne niż standardowe rozwiązania likwidowania śliskości zimowej. Niemniej charakteryzują się one zdecydowanym zwiększeniem bezpieczeństwa dzięki natychmiastowej reakcji na zmieniające się warunki środowiskowe.
- Kluczowym czynnikiem wpływającym na właściwości termiczne mieszanki jest użyte kruszywo
- Rodzaj asfaltu nie wpływa w sposób istotny na właściwości termiczne mieszanki

- Dodatek grafitu do mieszanki mineralno-asfaltowej wpływa w sposób istotny na właściwości termiczne mieszanki. Decyzja o jego ostatecznym zastosowaniu powinna być jednak podejmowana po przeprowadzeniu analizy ekonomicznej.
- Wpływ na wydajność instalacji ogrzewania nawierzchni ma wyłącznie dobór mieszanek stosowanych w warstwach znajdujących się powyżej instalacji ogrzewania.

10.3 Kierunki rozwoju dalszych badań

Na podstawie analizy stanu wiedzy, analizy warunków środowiskowych, własnych badań laboratoryjnych oraz analizy numerycznej można wskazać kierunki dalszych badań w danej tematyce:

- Przeprowadzenie badań na instalacji w makro skali – wykonanie odcinka testowego w warunkach rzeczywistych, np. w miejscu niebezpiecznym. Ciągła obserwacja instalacji, sposobu jej działania w warunkach zimowych oraz wpływu na mieszankę mineralno-asfaltową.
- Analiza w warunkach rzeczywistych długofalowego wpływu działania instalacji na ograniczenie negatywnego wpływu niskiej temperatury – ciągły system ogrzewania w okresie zimowym pozwoli na podwyższenie standardowej temperatury mieszanki mineralno-asfaltowej. Sprawdzenie w makro skali właściwości potwierdzonych przez badaczy w warunkach laboratoryjnych.
- Przeprowadzenie badań i analiz dla ewentualnego zastosowania mieszanek z betonu cementowego.
- Przeprowadzenie badań i analiz porównawczych dla różnych metod ogrzewania – instalacje elektryczne, hydrauliczne oraz indukcyjne.

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1	Metody radzenia sobie ze śniegiem i lodem	14
Rys. 2	Przykładowy przekrój konstrukcji nawierzchni ogrzewanej hydraulicznie [7]	15
Rys. 3	Przykładowy przekrój konstrukcji nawierzchni ogrzewanej elektrycznie [7] ...	16
Rys. 4	Przykładowy przekrój konstrukcji nawierzchni ogrzewanej mikrofalami [7] ...	17
Rys. 5	Przykładowy przekrój konstrukcji nawierzchni ogrzewanej indukcyjnie [7]	17
Rys. 6	Liście dębu z charakterystycznymi oznakami ekstremalnego uszkodzenia przez sól [18]	19
Rys. 7	Oddziaływanie środków odladzających na środowisko – przetłumaczona grafika pochodząca z [9]	19
Rys. 8	Szkic poglądowy wodnej instalacji topnienia śniegu zasilanej gruntowym wymiennikiem ciepła typu rura w rurze – system Gaia, Japonia [24]	24
Rys. 9	Instalacja topnienia śniegu na chodniku w miejscowości Aomori, Japonia [26]	24
Rys. 10	Schematyczne przedstawienie wymiany ciepła w rozwiązaniu samoodladzania nawierzchni, opracowane na podstawie [38]	28
Rys. 11	Przewodność cieplna podstawowych minerałów skałotwórczych i związek składu ze skałami [66]	35
Rys. 12	Przewodność cieplna podstawowych minerałów skałotwórczych i związek składu ze skałami [66]	36
Rys. 13	Podział materiałów zmiennofazowych [25]	41
Rys. 14	Model konstrukcji nawierzchni drogowej	45
Rys. 15	Lokalizacja drogowych stacji pogodowych na mapie Polski	53
Rys. 16	Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Sarbinowo	54
Rys. 17	Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Bytów Mądrzechowo	54
Rys. 18	Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Węzeł Braniewo	55
Rys. 19	Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Białobrzegi	55
Rys. 20	Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Bobrowniki	56
Rys. 21	Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Bolemin	56
Rys. 22	Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Dobrzyca	57
Rys. 23	Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Kowal	57
Rys. 24	Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Pruszków	58
Rys. 25	Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Kłodzko	58
Rys. 26	Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Piekary Śląskie	59
Rys. 27	Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Łągów	59
Rys. 28	Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Piaski	60
Rys. 29	Rozkład roczny temperatury, lokalizacja: Nawojowa	60
Rys. 30	Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Sarbinowo	62

Rys. 31 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Bytów Mądrzechowo	63
Rys. 32 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Węzeł Braniewo	64
Rys. 33 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Białobrzegi.....	65
Rys. 34 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Bobrowniki.....	66
Rys. 35 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Bolemin.....	67
Rys. 36 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Dobrzyca.....	68
Rys. 37 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Kowal	69
Rys. 38 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Pruszków.....	70
Rys. 39 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Kłodzko	71
Rys. 40 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Piekary Śląskie	72
Rys. 41 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Łagów	73
Rys. 42 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Piaski.....	74
Rys. 43 Wykresy średnich dobowych rozkładów temperatur w miesiącach grudzień-marzec, lokalizacja: Nawojowa	75
Rys. 44 Mapa z podziałem na strefy obciążenia śniegiem wg PN-EN 1991-1-3:2005 [94].	78
Rys. 45 Mapa z zasięgiem stref przemarzania gruntu wg PN-81.B-03020 [95]	78
Rys. 46 Podział Polski na strefy klimatyczne (Załącznik krajowy NB do PN-EN 12831) [96]	79
Rys. 47 Mapa przedstawiająca podział Polski na strefy ze względu na występowanie dni z temperaturami niedodatnimi.....	80
Rys. 48 Potencjał mocy fotowoltaicznej [98]	86
Rys. 49 Globalne napromieniowanie poziome na terenie Polski [98]	87
Rys. 50 Mapa systemu dystrybucji Polskiej Spółki Gazownictwa – stan II kwartał 2023 (opracowanie na podstawie map dla oddziałów Zakładów Gazowniczych [100]).	88

Rys. 51	Procedura określania współczynnika przewodności cieplnej zgodnie z normą ASTM D5334-08 (2008) [110]	95
Rys. 52	Pomiar przewodności cieplnej próbek mieszanki mineralno-asfaltowej za pomocą miernika KD2 Pro Thermal Analyzer	97
Rys. 53	Temperatura zarejestrowana w trakcie badania mieszanek SMA.....	99
Rys. 54	Temperatura zarejestrowana w trakcie badania mieszanek betonu asfaltowego AC.....	99
Rys. 55	Temperatura zarejestrowana w trakcie badania mieszanek WMS	99
Rys. 56	Mikrotomograf rentgenowski phoenix v tome x s.....	103
Rys. 57	Wnętrze Mikrotomografu rentgenowskiego phoenix v tome x s	104
Rys. 58	Badana próbka przygotowana do badania w mikrotomografie rentgenowskim....	104
Rys. 59	Badana próbka umieszczona we wnętrzu mikrotomografu rentgenowskiego	105
Rys. 60	Przykładowe rzuty badanej próbki	106
Rys. 61	Przykładowy widok na włókna w badanej próbce.....	107
Rys. 62	Przykładowy widok na włókna w badanej próbce - zbliżenie.....	107
Rys. 63	Graficzna interpretacja zaprojektowanej mieszanki mineralnej dla AC 16W 35/50 KR 3-7	109
Rys. 64	Graficzna interpretacja zaprojektowanej mieszanki mineralnej dla AC 11 S PMB 45/80-65 KR3-KR6	110
Rys. 65	Próbki AC 11 S PMB 45/80-65 KR3-KR6 z grafitem jako wypełniaczem.....	112
Rys. 66	Próbki mieszanki AC 11 S PMB 45/80-65 KR3-KR6 z grafitem po badaniu koleinowania	112
Rys. 67	Schemat przygotowanego stanowiska pomiarowego.....	113
Rys. 68	Widok na kabel grzewczy ułożony na warstwie kruszywa 0/2	114
Rys. 69	Widok na przykładową próbkę mieszanki mineralno-asfaltowej umieszczonej w formie pomiarowej	114
Rys. 70	Temperatura zarejestrowana w trakcie badania mieszanek	115
Rys. 71	Konstrukcja typu A1 poddana analizie	117
Rys. 72	Schemat analizowanego modelu z warunkami początkowymi poszczególnych warstw	118
Rys. 73	Model z siatką MES	118
Rys. 74	Lokalizacja pomiaru temperatury (zielona linia, powierzchnia nawierzchni) .	119
Rys. 75	Rozkład materiałów - przypadek A (warstwa podbudowy o niskim współczynniku przewodności, warstwy wiążące i ścieralna o wysokim współczynniku przewodności)	120
Rys. 76	Pole temperatury na początku analizy (w pierwszej minucie) - przypadek A.	120
Rys. 77	Pole temperatury w połowie analizy (35 minuta) - przypadek A.....	121

Rys. 78 Pole temperatury na koniec analizy (po 1h) - przypadek A.....	121
Rys. 79 Rozkład materiałów - przypadek B (warstwa podbudowy o wysokim współczynniku przewodności, warstwy wiążące i ścieralna o wysokim współczynniku przewodności).....	122
Rys. 80 Pole temperatury na początku analizy (w pierwszej minucie) - przypadek B.....	122
Rys. 81 Pole temperatury w połowie analizy (35 minuta) – przypadek B.....	123
Rys. 82 Pole temperatury na koniec analizy (po 1h) - przypadek B.....	123
Rys. 83 Rozkład materiałów - przypadek C (warstwa podbudowy o niskim współczynniku przewodności, warstwy wiążące i ścieralna o niskim współczynniku przewodności).....	124
Rys. 84 Pole temperatury na początku analizy (w pierwszej minucie) - przypadek C.....	124
Rys. 85 Pole temperatury w połowie analizy (35 minuta) - przypadek C.....	125
Rys. 86 Pole temperatury na koniec analizy (po 1h) - przypadek C.....	125
Rys. 87 Rozkład materiałów - przypadek D (warstwa podbudowy o niskim współczynniku przewodności, warstwy wiążące i ścieralna z mieszanki z dodatkiem grafitu).....	126
Rys. 88 Pole temperatury na początku analizy (w pierwszej minucie) - przypadek D.....	126
Rys. 89 Pole temperatury w połowie analizy (35 minuta) - przypadek D.....	127
Rys. 90 Pole temperatury na koniec analizy (po 1h) - przypadek D.....	127
Rys. 91 Pomiar temperatury dla poszczególnych przypadków.....	127
Rys. 92 Elementy rozwiązania nawierzchni samoodladzającej.....	129
Rys. 93 Przekroje nawierzchni prezentujące możliwości umieszczenia instalacji grzewczej.....	130
Rys. 94 Sposób łączenia i rozmieszczania czujników gruntowych [114].....	131
Rys. 95 Schemat postępowania przy doborze technologii samoodladzającej.....	132
Rys. 96 Schemat rozwiązania – opcji 1 dla samoodladzającego dojazdu do przejścia dla pieszych.....	133
Rys. 97 Schemat rozwiązania – opcji 2 dla samoodladzającego dojazdu do przejścia dla pieszych.....	133

SPIS TABEL

Tab. 1 Wydatki jednostkowe materiałów chemicznych do posypywania zapobiegawczego oraz likwidacji cienkich warstw lodu i śniegu [3]	22
Tab. 2 Przewodność cieplna mieszanek nawierzchniowych wg wybranych publikacji..	30
Tab. 3 Porównanie wartości współczynnika przewodności cieplnej mieszanek mineralno-asfaltowych zmierzonych przez różnych autorów, w zależności od składu i dodatków.....	33
Tab. 4 Tabela wartości parametrów termicznych dla skał oraz nieskonsolidowanych osadów [68]	37
Tab. 5 Przewodność cieplna podstawowych skał używanych w Polsce	37
Tab. 6 Liczba godzin w trakcie dnia, gdy średnia miesięczna temperatura nawierzchni jest mniejsza niż 0	76
Tab. 7 Liczba dni w roku, w których wystąpiła ujemna temperatura nawierzchni.....	77
Tab. 8 Liczba godzin w ciągu dnia z ujemną temperaturą nawierzchni w poszczególnych strefach.....	80
Tab. 9 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Sarbinowo	81
Tab. 10 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Bytów Mądrzechowo	81
Tab. 11 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Braniewo	81
Tab. 12 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Białobrzegi.....	82
Tab. 13 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Bobrowniki	82
Tab. 14 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Bolemin	82
Tab. 15 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Dobrzyca.....	83
Tab. 16 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Kowal	83
Tab. 17 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Pruszków.....	83
Tab. 18 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Kłodzko	84
Tab. 19 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Piekary Śląskie	84

Tab. 20 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Łagów.....	84
Tab. 21 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Piaski.....	85
Tab. 22 Liczba 10-minutowych odcinków czasu spełniających podane warunki temperaturowe – lokalizacja: Nawojowa.....	85
Tab. 23 Orientacyjne koszty utrzymania zimowego dla metod tradycyjnych.....	89
Tab. 24 Teoretyczne koszty utrzymania zimowego dla metod tradycyjnych w lokalizacji Białobrzegi	90
Tab. 25 Wady i zalety, koszty inwestycyjne oraz eksploatacyjne dla technologii samoodładzania nawierzchni	90
Tab. 26 Narastające wyliczenie kosztów inwestycyjnych oraz eksploatacyjnych dla technologii samoodładzania nawierzchni	92
Tab. 27 Wyniki pomiarów przewodności cieplnej asfaltów stosowanych w Polsce	96
Tab. 28 Mieszanki mineralno-asfaltowe poddane pomiarom współczynnika przewodności cieplnej k	98
Tab. 29 Korelacja wyników przewodności cieplnej mma oraz przewodności cieplnej kruszyw	100
Tab. 30 Korelacja wyników współczynnika przewodności cieplnej mma k oraz wolnej przestrzeni V_a	100
Tab. 31 Korelacja wyników współczynnika przewodności cieplnej mma k oraz ilości asfaltu B.....	101
Tab. 32 Korelacja wyników współczynnika przewodności cieplnej mma oraz stosowanego asfaltu	101
Tab. 33 Wyniki pomiarów współczynnika przewodności cieplnej mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkami	102
Tab. 34 Uziarnienie mieszanki mineralnej dla AC 16 W 35/50 KR 3-7	109
Tab. 35 Uziarnienie mieszanki mineralnej dla AC 11 S PMB 45/80-65 KR3-KR6	110
Tab. 36 Wyniki pomiarów podstawowych właściwości AC 16W 35/50 KR 3-7	111
Tab. 37 Wyniki pomiarów podstawowych właściwości AC 11 S PMB 45/80-65 KR3-KR6	111
Tab. 38 Średnie przyrosty temperatury dla poszczególnych próbek	115
Tab. 39 Właściwości materiałów zastosowanych w trakcie modelowania.....	117

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Pasztetnik, "Wybrane zagadnienia wpływu ogrzewania nawierzchni drogowych na śliskość zimową," *Builder*, vol. 295, no. 2, pp. 20–23, 2022, doi: 10.5604/01.3001.0015.7043.
- [2] N. Mazur, "Wpływ soli do odladzania dróg na środowisko przyrodnicze," *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, vol. T. 18, nr, no. 4, pp. 449–458, 2015.
- [3] GDDKiA, *Zarządzenie nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 05.09.2017r. w sprawie wprowadzenia „Wytycznych zimowego utrzymania dróg”*. 2017.
- [4] H. L. Dai, K. L. Zhang, X. L. Xu, and H. Y. Yu, "Evaluation on the Effects of Deicing Chemicals on Soil and Water Environment," *Procedia Environ Sci*, vol. 13, no. 2011, pp. 2122–2130, 2012, doi: 10.1016/j.proenv.2012.01.201.
- [5] M. Stawowiak, "Zimowe utrzymanie dróg. Jak najskuteczniej usunąć śnieg z nawierzchni?," *Drogi Gminne i Powiatowe*, vol. 6 (29), 2016.
- [6] J. W. Lund, "Pavement snow melting," *Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology*, no. June, pp. 12–19, 2000.
- [7] A. Pasztetnik, "Przegląd metod ogrzewania nawierzchni drogowych", *Przegląd Komunikacyjny*, VOL. 76, no 12, pp. 8-13, 2021
- [8] Y. Sun, S. Wu, Q. Liu, J. Hu, Y. Yuan, and Q. Ye, "Snow and ice melting properties of self-healing asphalt mixtures with induction heating and microwave heating," *Appl Therm Eng*, vol. 129, pp. 871–883, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.10.050.
- [9] L. Fay *et al.*, "Manual of Environmental Best Practices for Snow and Ice Control Prepared," *Minnesota Department of Transportation*, vol. 5, no. June, 2015.
- [10] A. Müller, H. Österlund, J. Marsalek, and M. Viklander, "The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources," 2020. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136125.
- [11] P. Li *et al.*, "Effect of deicing agents on the performance of airport asphalt pavement," *Front Mater*, vol. 10, 2023, doi: 10.3389/fmats.2023.1231483.
- [12] J. S. Webber, J. G. Chanat, A. J. Porter, and J. D. Jastram, "Evaluating Drivers of Hydrology, Water Quality, and Benthic Macroinvertebrates in Streams of Fairfax County, Virginia, 2007–18," *USGS Scientific Investigations Report*, vol. 2023, 2023, doi: 10.3133/sir20235027.
- [13] J. Hegrová *et al.*, "Monitoring of the impact of road salting on spruce forest ecosystem in the vicinity of the highway D1 in the Bohemian-Moravian Highlands,

- Czech Republic," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 8, 2022, doi: 10.1007/s11356-021-16468-9.
- [14] D. M. Haake and J. H. Knouft, "Comparison of Contributions to Chloride in Urban Stormwater from Winter Brine and Rock Salt Application," *Environ Sci Technol*, vol. 53, no. 20, pp. 11888–11895, Oct. 2019, doi: 10.1021/acs.est.9b02864.
- [15] B. Švédová *et al.*, "Concentration variability of water-soluble ions during the acceptable and exceeded pollution in an industrial region," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 17, no. 10, May 2020, doi: 10.3390/ijerph17103447.
- [16] M. L. Rossi, P. Kremer, C. A. Cravotta, K. E. Scheirer, and S. T. Goldsmith, "Long-term impacts of impervious surface cover change and roadway deicing agent application on chloride concentrations in exurban and suburban watersheds," *Science of the Total Environment*, vol. 851, no. August, p. 157933, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157933.
- [17] K. S. Godwin, S. D. Hafner, and M. F. Buff, "Long-term trends in sodium and chloride in the Mohawk River, New York: The effect of fifty years of road-salt application," *Environmental Pollution*, vol. 124, no. 2, pp. 273–281, 2003, doi: 10.1016/S0269-7491(02)00481-5.
- [18] Purdue University, "Salt Damage in Landscape Plants," *Purdue Extension publication ID-412-W*, pp. 1–11, 2009.
- [19] X. Shi, S. Du, and L. Fay, "Environmental Risks of Snow and Ice Control Materials," *Sustainable Winter Road Operations*, pp. 180–210, 2018, doi: 10.1002/9781119185161.ch10.
- [20] Y. Hassan, A. O. Abd El Halim, A. G. Razaqpur, W. Bekheet, and M. H. Farha, "Effects of runway deicers on pavement materials and mixes: Comparison with road salt," *J Transp Eng*, vol. 128, no. 4, pp. 385–391, 2002, doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:4(385).
- [21] E. Mączka and P. Mackiewicz, "Asphalt Mixtures Fatigue Life Considering Various Environmental Impacts," *Materials*, vol. 16, no. 3, 2023, doi: 10.3390/ma16030966.
- [22] J. W. Lund, "Reconstruction of a Pavement Geothermal Deicing System," *GHC Bulletin*, no. 20, pp. 14–17, 1999.
- [23] Á. Ragnarsson, "Geothermal Development in Iceland," *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, pp. 19–25, 2015.

-
- [24] K. Zwarycz-Makles, "Wodne instalacje topnienia śniegu i odladzania," *Rynek Instalacyjny*, vol. Nr 1-2, pp. 26–31, 2011.
- [25] K. Morita and M. Tago, "Operational Characteristics of the GAIA Snow-Melting System in Ninohe, Iwate, Japan," *Geo-Heat Center Bulletin*, vol. 21, no. 4, pp. 5–11, 2000.
- [26] K. Morita and M. Tago, "Snow-Melting on Sidewalks with Ground-Coupled Heat Pumps in a Heavy Snowfall City," *Proceedings World Geothermal Congress*, no. April, pp. 24–29, 2005.
- [27] W. J. Eugster, "Road and Bridge Heating Using Geothermal Energy, Overview and Examples," *European Geothermal Congress*, no. June, p. 5, 2007.
- [28] "Summer Solar Heat Stored in Ground for Snow Melting during Winter," Japan for Sustainability.
- [29] D. R. Carder, J. Barker, M. G. Hewitt, D. Ritter, and A. Kiff, "Performance of an interseasonal heat transfer facility for collection, storage, and re-use of solar heat from the road surface," 2007.
- [30] W. Zhao, Y. Zhang, X. Chen, W. Su, B. Li, and Z. Fu, "Experimental heating performances of a ground source heat pump (GSHP) for heating road unit," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 7, no. June 2019, p. 100040, 2020, doi: 10.1016/j.ecmx.2020.100040.
- [31] C. Wang, H. Fu, W. Ma, Z. Zhang, X. Ji, and X. Han, "Combination design and performance evaluation of conductive bonding layer for asphalt pavement active deicing," *Constr Build Mater*, vol. 263, p. 121037, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121037.
- [32] N. Sugawara, K. Hokari, T. Watanabe, and H. Sugawara, "Energy saving characteristics of a new type of road-heating system," *Atmos Res*, vol. 46, no. 1–2, pp. 113–122, 1998, doi: 10.1016/S0169-8095(97)00034-3.
- [33] L. D. Minsk, "Heated Bridge Technology," *Federal Highway Administration*, no. July, pp. 1–51, 1999.
- [34] *DIN 18560-2:2009-09 Floor screeds in building construction - Part 2: Floor screeds and heating floor screeds on insulation layers.*
- [35] *DIN 18560-1:2015-11 Floor screeds in building construction - Part 1: General requirements, testing and construction.*

-
- [36] R. Rao, J. Fu, Y. Chan, C. Y. Tuan, and C. Liu, "Steel fiber confined graphite concrete for pavement deicing," *Compos B Eng*, vol. 155, no. August, pp. 187–196, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.08.013.
- [37] W. Pudlik, *Wymiana i wymienniki ciepła*. Gdańsk: Politechnika Gdańska, 2012.
- [38] P. Pan, S. Wu, Y. Xiao, and G. Liu, "A review on hydronic asphalt pavement for energy harvesting and snow melting," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 48, pp. 624–634, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.04.029.
- [39] A. R. Dawson, P. K. Dehdezi, M. R. Hall, J. Wang, and R. Isola, "Enhancing thermal properties of asphalt materials for heat storage and transfer applications," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 13, no. 4, pp. 784–803, 2012, doi: 10.1080/14680629.2012.735791.
- [40] R. Gałek, "Zastosowanie algorytmów inteligencji obliczeniowej do wyznaczania właściwości cieplnych materiałów," *Scientific Letters of University of Rzeszow Technology - Mechanics*, vol. 88, no. 17, pp. 17–35, 2016, doi: 10.7862/rm.2016.2.
- [41] R. Petkova-Slipets and P. Zlateva, "Thermal properties of a new pavement material for using in road construction," *Civil and Environmental Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 99–104, 2018, doi: 10.2478/cee-2018-0013.
- [42] B. L. Chen, L. Rockett, and R. B. Mallick, "A laboratory investigation of temperature profiles and thermal properties of asphalt pavements with different subsurface layers," in *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists- Proceedings of the Technical Sessions*, 2008.
- [43] B. A. Chadbourn, J. A. Luoma, D. E. Newcomb, and V. R. Voller, "Consideration of hot mix asphalt thermal properties during compaction," *ASTM Special Technical Publication*, vol. 1299, pp. 127–141, 1996.
- [44] O. T. Farouki, "Thermal properties of soils.," 1981.
- [45] M. A. Khasawneh, A. A. Sawalha, M. T. Aljarrah, and M. A. Alsheyab, "Effect of aggregate gradation and asphalt mix volumetrics on the thermal properties of asphalt concrete," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01725.
- [46] D. M. Mrawira and J. Luca, "Effect of aggregate type, gradation, and compaction level on thermal properties of hot-mix asphalts," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 33, no. 11, 2006, doi: 10.1139/L06-076.

- [47] R. Mirzanamadi, P. Johansson, and S. A. Grammatikos, "Thermal properties of asphalt concrete: A numerical and experimental study," *Constr Build Mater*, vol. 158, pp. 774–785, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.068.
- [48] J. Byzyka, M. Rahman, and D. A. Chamberlain, "A laboratory investigation on thermal properties of virgin and aged asphalt mixture," *Constr Build Mater*, vol. 305, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124757.
- [49] Q. T. Nguyen, H. Di Benedetto, and C. Sauzéat, "Determination of thermal properties of asphalt mixtures as another output from cyclic tension-compression test," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 13, no. 1, 2012, doi: 10.1080/14680629.2011.644082.
- [50] X. Shi, "Controlling thermal properties of asphalt concrete and its multifunctional applications," 2014. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [51] A. Hassn, M. Aboufoul, Y. Wu, A. Dawson, and A. Garcia, "Effect of air voids content on thermal properties of asphalt mixtures," *Constr Build Mater*, vol. 115, pp. 327–335, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.106.
- [52] S. M. Subash, N. Mahendran, M. M. Kumar, and M. Nagarajan, "Performance Analysis of Flexible Pavement with Reinforced Ash," *Archives of Civil Engineering*, vol. 63, no. 3, pp. 149–162, 2017, doi: 10.1515/ace-2017-0034.
- [53] P. Mieczkowski and B. Budzinski, "Influence of the Type of HMA and Free Space Content and the Thermal Conductivity Coefficient λ ," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. doi: 10.1088/1757-899X/603/4/042014.
- [54] P. Mieczkowski, "Współczynnik przewodzenia ciepła mieszanek mineralno-asfaltowych," *Izolacje: budownictwo, przemysł, ekologia*, vol. 6, pp. 62–69, 2013.
- [55] L. Li, H. Li, Y. Tan, X. Yang, and H. Xu, "Investigation of chloride release characteristic of Chlorine-Based Anti-Icing asphalt mixture," *Constr Build Mater*, vol. 312, no. September 2020, p. 125410, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125410.
- [56] M. Zheng, S. Wu, C. Wang, Y. Li, Z. Ma, and L. Peng, "A study on evaluation and application of snowmelt performance of anti-icing asphalt pavement," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 7, no. 6, 2017, doi: 10.3390/app7060583.
- [57] Z. Liu, M. Xing, S. Chen, R. He, and P. Cong, "Influence of the chloride-based anti-freeze filler on the properties of asphalt mixtures," *Constr Build Mater*, vol. 51, pp. 133–140, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.057.

-
- [58] F. Giuliani, F. Merusi, G. Polacco, S. Filippi, and M. Paci, "Effectiveness of sodium chloride-based anti-icing filler in asphalt mixtures," *Constr Build Mater*, vol. 30, pp. 174–179, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.036.
- [59] S. Luo and X. Yang, "Performance evaluation of high-elastic asphalt mixture containing deicing agent Mafilon," *Constr Build Mater*, vol. 94, pp. 494–501, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.064.
- [60] Z. Sun, J. Chen, S. Liu, J. Qian, and R. Huang, "Evaluation of the performance of SBS/CR composite-modified deicing asphalt mixture prepared for ultra-thin wearing course," *Constr Build Mater*, vol. 416, no. January, p. 135085, 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135085.
- [61] B. C. Bai, D. W. Park, H. V. Vo, S. Dessouky, and J. S. Im, "Thermal Properties of Asphalt Mixtures Modified with Conductive Fillers," *J Nanomater*, vol. 2015, no. July 2016, 2015, doi: 10.1155/2015/926809.
- [62] A. R. Dawson, P. K. Dehdezi, M. R. Hall, J. Wang, and R. Isola, "Enhancing thermal properties of asphalt materials for heat storage and transfer applications," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 13, no. 4, pp. 784–803, 2012, doi: 10.1080/14680629.2012.735791.
- [63] A. Hassn, M. Aboufoul, Y. Wu, A. Dawson, and A. Garcia, "Effect of air voids content on thermal properties of asphalt mixtures," *Constr Build Mater*, vol. 115, pp. 327–335, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.106.
- [64] P. Pan, S. Wu, X. Hu, G. Liu, and B. Li, "Effect of material composition and environmental condition on thermal characteristics of conductive asphalt concrete," *Materials*, vol. 10, no. 3, pp. 5–7, 2017, doi: 10.3390/ma10030218.
- [65] P. Pan, S. Wu, X. Hu, G. Liu, and B. Li, "Effect of material composition and environmental condition on thermal characteristics of conductive asphalt concrete," *Materials*, vol. 10, no. 3, pp. 5–7, 2017, doi: 10.3390/ma10030218.
- [66] C. Clauser and E. Huenges, "Rock Physics & Phase Relations: A Handbook of Physical Constants," in *American Geophysical Union*, no. Thermal Conductivity of Rocks and Minerals, 1995, pp. 105–126.
- [67] M. S. Kersten, "Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils - Engineering Experimental Station, Univesity of Minnesota (USA)," *ACFEL*, 1949.

- [68] G. Dalla Santa *et al.*, "An updated ground thermal properties database for GSHP applications," *Geothermics*, vol. 85, 2020, doi: 10.1016/j.geothermics.2019.101758.
- [69] Y. Y. Wang, Y. Q. Tan, K. Liu, and H. N. Xu, "Preparation and electrical properties of conductive asphalt concretes containing graphene and carbon fibers," *Constr Build Mater*, vol. 318, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125875.
- [70] Z. Wang, Q. Dai, D. Porter, and Z. You, "Investigation of microwave healing performance of electrically conductive carbon fiber modified asphalt mixture beams," *Constr Build Mater*, vol. 126, pp. 1012–1019, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.039.
- [71] M. M. Karimi, S. Amani, H. Jahanbakhsh, B. Jahangiri, and A. H. Alavi, "Induced heating-healing of conductive asphalt concrete as a sustainable repairing technique: A review," *Clean Eng Technol*, vol. 4, no. February, p. 100188, 2021, doi: 10.1016/j.clet.2021.100188.
- [72] J. Zhao, K. Liu, H. Liu, W. Ding, and H. Pang, "Optimization of crack healing in steel bridge deck asphalt pavement based on the microwave heating technology," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 46, 2023, doi: 10.1016/j.tsep.2023.102159.
- [73] L. Zhang, Z. Zhang, W. Yu, and Y. Miao, "Review of the Application of Microwave Heating Technology in Asphalt Pavement Self-Healing and De-icing," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 7, 2023, doi: 10.3390/polym15071696.
- [74] F. T. Joenck, V. B. C. Joenck, J. A. V. Del Carpio, and J. V. S. de Melo, "Self-healing capacity of asphalt mixtures with steel fiber, steel slag angraphite powder, evaluated with microwave induction and fatigue test," *Revista Materia*, vol. 27, no. 4, 2022, doi: 10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0221.
- [75] P. Pan, S. Wu, F. Xiao, L. Pang, and Y. Xiao, "Conductive asphalt concrete: A review on structure design, performance, and practical applications," *J Intell Mater Syst Struct*, vol. 26, no. 7, pp. 755–769, 2015, doi: 10.1177/1045389X14530594.
- [76] J. Gao *et al.*, "Microwave deicing for asphalt mixture containing steel wool fibers," *J Clean Prod*, vol. 206, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.09.223.
- [77] A. Sassani *et al.*, "Carbon fiber-based electrically conductive concrete for salt-free deicing of pavements," *J Clean Prod*, vol. 203, no. August, pp. 799–809, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.315.

-
- [78] A. K. Rai and A. Kumar, "a Review on Phase Change Materials & Their Applications," *Ijaret*, vol. 3, no. 2, pp. 214–225, 2012.
- [79] Y. Farnam, H. S. Esmaeeli, P. D. Zavattieri, J. Haddock, and J. Weiss, "Incorporating phase change materials in concrete pavement to melt snow and ice," *Cem Concr Compos*, vol. 84, no. September, pp. 134–145, 2017, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.09.002.
- [80] R. Methode Kalombe, S. Sobhansarbandi, and J. Kevern, "Low-cost phase change materials based concrete for reducing deicing needs," *Constr Build Mater*, vol. 363, no. December 2022, p. 129129, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129129.
- [81] S. Nayak, N. M. A. Krishnan, and S. Das, "Microstructure-guided numerical simulation to evaluate the influence of phase change materials (PCMs) on the freeze-thaw response of concrete pavements," *Constr Build Mater*, vol. 201, pp. 246–256, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.199.
- [82] Y. Deng, X. Shi, Y. Kou, J. Chen, and Q. Shi, "Optimized design of asphalt concrete pavement containing phase change materials based on rutting performance," *J Clean Prod*, vol. 380, no. P1, p. 134787, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134787.
- [83] R. Mirzananadi, *Utilizing solar energy for anti-icing road surfaces using hydronic heating pavement with low temperature*. 2019.
- [84] R. Mirzananadi, C. E. Hagentoft, P. Johansson, and J. Johnsson, "Anti-icing of road surfaces using Hydronic Heating Pavement with low temperature," *Cold Reg Sci Technol*, vol. 145, pp. 106–118, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.coldregions.2017.10.006.
- [85] Informacje prasowe firmy Eurovia, "ROAD ® droga z pozytywną energią - innowacja firmy Eurovia," pp. 1–12.
- [86] E. Levenberg and Q. F. Adam, "Construction of an electrically heated asphalt road based on ribbon technology," *Transp Res Rec*, vol. 2675, no. 9, pp. 652–663, 2021, doi: 10.1177/03611981211004175.
- [87] GDDKiA, *Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych*. Warszawa, 2014.
- [88] IBDIM, *Katalog typowych konstrukcji podatnych z betonem asfaltowym o wysokim module sztywności*. Warszawa, 2023.
- [89] J. Judycki, *Analizy i projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*. Warszawa: WKŁ, 2014.
- [90] A. Szydło, *Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego*. Kraków: Polski Cement, 2004.

- [91] W. Bańkowski, *Charakterystyka właściwości i zastosowanie betonu asfaltowego o wysokim module sztywności w konstrukcjach nawierzchni drogowych*, Studia i m. IBDIM, 2019.
- [92] *PN-EN 1991-1-3:2005 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje — Część 1-3: Oddziaływania ogólne – Obciążenie śniegiem.*
- [93] *PN-81.B-03020 Grunty Budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli.*
- [94] *PN-EN 1991-1-3:2005 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje — Część 1-3: Oddziaływania ogólne – Obciążenie śniegiem.*
- [95] *PN-81.B-03020 Grunty Budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli.*
- [96] *PN-EN 12831:2006 Instalacje ogrzewcze w budynkach. Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego.*
- [97] Instytut Energetyki Odnawialnej, "Rynek Fotowoltaiki w Polsce 2023," Warszawa.
- [98] S. The World Bank, "Global Solar Atlas 2.0," <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/poland>.
- [99] T. Cieślik, K. Kogut, K. Metelska, P. Narloch, A. Szurlej, and P. Wnęk, "Wpływ wybranych czynników na zużycie gazu ziemnego w powiatach," *Rynek Energii*, vol. 4, pp. 3–8, 2019.
- [100] Polska Spółka Gazownictwa, "<https://www.psgaz.pl/mapasystemu>."
- [101] "BIP - Podlaski Zarząd Dróg Wojewódzkich w Białymstoku." Accessed: May 01, 2024. [Online]. Available: http://bip.pzdw.wrotapodlasia.pl/zamowieniapubliczne/nieograniczony/Archiwum/2018_1/zimowe-utrzymanie-drog-wojewodzkich-w-sezonach-20182019-20192020-20202021-na-terenie-wojewodztwa-podlaskiego-z-podzialem-na-zadania-zadanie-1-rdw-w-bialymstoku-zadanie-2-rdw-w-lomzy-zadanie-3-rdw-w-siemiatyczach-zadanie-4-rdw-w-sokolce-zada.html
- [102] GDDKiA, *WT-2 2014 – część I Mieszanki mineralno-asfaltowe, Wymagania Techniczne*. 2014.
- [103] *PN-EN 12697-8:2019-01 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań - Część 8: Oznaczanie zawartości wolnej przestrzeni próbek mineralno-asfaltowych.*
- [104] *PN-EN 12697-12:2018-08 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań - Część 12: Określanie wrażliwości na wodę próbek mineralno-asfaltowych.*
- [105] *PN-EN 12697-18 – Mieszanki mineralno-asfaltowe — Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco — Część 18: Spływność lepiszcza.*

- [106] PN-EN 12697-22 – *Mieszanki mineralno-asfaltowe — Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco — Część 22: Koleinowanie.*
- [107] PN-EN 12697-24 *Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco. Część 24: Odporność na zmęczenie.*
- [108] PN-EN 12697-26 – *Mieszanki mineralno-asfaltowe — Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco — Część 26: Sztywność.*
- [109] PN-EN 13108-20:2016-07 *Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Wymagania -- Część 20: Badanie typu.*
- [110] A. Rozanski, *Analiza wieloskalowa charakterystyki cieplnej wielofazowego ośrodka gruntowego.* Oficyna Wydawnicza PWR, 2018.
- [111] “KD2 Pro Operator’s Manual, version 10.”
- [112] M. Zawadzki, Janusz ; Kłos, *Zeszyt 48 - Zasady projektowania betonu asfaltowego o zwiększonej odporności na odkształcenia trwałe. Wytyczne oznaczania odkształcenia i modułu sztywności mieszanek mineralno-bitumicznych metodą pełzania pod obciążeniem statycznym.* 1995.
- [113] E. Mączka, “Mikrotomografia komputerowa w służbie inżynierii drogowej,” *Builder*, vol. 274, no. 5, pp. 28–32, 2020, doi: 10.5604/01.3001.0014.0802.
- [114] DEVI Elektryczne Systemy Grzewcze, „*Kompletne systemy grzewcze. Systemy przeciwooblodzeniowe*” 2019

STRESZCZENIE

Autor: Agata Pasztetnik

Tytuł: Wpływ warunków środowiskowych na technologię wykonywania samoodladzających nawierzchni drogowych

Słowa kluczowe: mieszanki mineralno-asfaltowe, właściwości termiczne, nawierzchnie samoodladzające

Streszczenie:

Rozprawa doktorska skupia się na tematyce nawierzchni samoodladzających jako alternatywnego rozwiązania dla standardowych metod utrzymania zimowego na drogach. Ze względu na wdrożeniowy charakter realizacji pracy doktorskiej głównym celem rozprawy jest opracowanie rozwiązania nawierzchni samoodladzających wraz z zaleceniami do jego stosowania, które włączone zostanie do oferty przedsiębiorstwa.

W przygotowanej rozprawie przedstawiono przegląd literatury podsumowujący: zagadnienia utrzymania zimowego, podstawy teoretyczne w tematyce wymiany ciepła, istniejące instalacje odladzania na świecie, projekty badawcze realizowane w tej tematyce, zagadnienie wydajności nawierzchni samoodladzających oraz metody wymiarowania warstw konstrukcji nawierzchni stosowane w Polsce.

Na podstawie analizy stanu wiedzy stwierdzono potencjał nawierzchni samoodladzających jako alternatywy dla tradycyjnie stosowanych rozwiązań radzenia sobie ze śliskością zimową, szczególnie w miejscach niebezpiecznych.

Przeprowadzono analizę warunków środowiskowych na terenie Polski, zbierając dane z 14 stacji pomiarowych w tym uśredniony dobowy rozkład temperatury powietrza jak również rozkład temperatury na powierzchni nawierzchni, 5 cm w głąb nawierzchni oraz gruntu w wyniku czego zaproponowano podział kraju na 4 strefy pogodowe. Dodatkowo przeanalizowano warunki lokalizacyjne skupiając się na dostępności sieci, m.in. sieci gazowej w Polsce.

Przeprowadzono uproszczoną analizę kosztową utrzymania zimowego przy zastosowaniu metod standardowych oraz porównano ją z analizą kosztów wykonania i eksploatacji instalacji grzewczej.

W zrealizowanych badaniach laboratoryjnych porównano właściwości termiczne mieszanek typowych oraz mieszanek z dodatkami, Dodatkowo uwzględniono parametry jakościowe mieszanek nawierzchniowych i ich zasadności do stosowania w praktyce. Badaniami tymi potwierdzono, że stosowanie mieszanek z wypełniaczem grafitowym jest zasadne. Warto zaznaczyć, że dotychczasowe badania w poruszonym temacie skupiały się

głównie na parametrach termicznych rozwiązań nietypowych, bez zagłębiania się na zmianę parametrów wytrzymałościowych i fizycznych mieszanek.

W kolejnym etapie badań laboratoryjnych sprawdzono działanie instalacji grzewczej w połączeniu z badanymi materiałami nawierzchniowymi. Badania wykonano na zaprojektowanym w tym celu stanowisku pomiarowym. Rezultaty otrzymane w wyniku tego eksperymentu potwierdzono również w analizie numerycznej konstrukcji nawierzchni samoodladzającej. Przeanalizowano typową konstrukcję nawierzchni dla kategorii ruchu KR5.

Dodatkowym wnioskiem płynącym z przeprowadzonej analizy numerycznej jest informacja o braku wpływu rodzaju mieszanki mineralno-asfaltowej znajdującej się pod instalacją grzewczą, wpływ na efektywność rozwiązania mają jedynie mieszanki umiejscowione ponad instalacją. Fakt ten został potwierdzony również w badaniach laboratoryjnych.

Opisano zalecenia rozwiązania dla przedsiębiorstwa – jakie materiały powinny być stosowane. Przedstawiono opis i schemat ułatwiający wybór najlepszego rozwiązania - bazując na warunkach środowiskowych lokalizacji oraz dostępności źródeł zasilania i technologii wykonania nawierzchni. Dodatkowo, stworzono dokumentację techniczną, która stanowi zalecenia w zakresie przygotowania inwestycji, jej projektowania i późniejszego wykonania.

Rozprawę podsumowano wnioskami, które potwierdzają tezę rozprawy. W zakończeniu pracy zaproponowano kierunki dalszych prac badawczych.

ABSTRACT

Author: Agata Pasztetnik

Title: The influence of environmental conditions on the technology of self-deicing road pavements

Keywords: asphalt concrete, thermal properties, self-deicing pavements

Abstract:

The dissertation focuses on the topic of self-deicing pavements as an alternative solution to standard winter road maintenance methods. Due to the implementation nature of the dissertation, the main objective of the dissertation is to develop a solution for self-deicing pavements with recommendations for its use, which will be included in the company's offer.

This dissertation presents a literature review that summarises: winter maintenance issues, theoretical foundations in the subject of heat transfer, existing deicing installations worldwide, research projects carried out in this topic, the performance of self-deicing pavements and the methods of dimensioning pavement construction layers used in Poland.

Based on an analysis of the state of knowledge, the potential of self-deicing pavements as an alternative to traditional solutions for dealing with winter slipperiness, especially in dangerous areas, was identified.

An analysis of the environmental (atmospheric) conditions in Poland was carried out, collecting data from 14 measuring stations, including the monthly average of daily air temperature distribution as well as the temperature distribution on the surface of the pavement, 5 cm into the pavement and the ground. As a result of that, a division of the country into 4 weather zones was proposed. In addition, locational conditions were analysed, focusing on the availability of infrastructure, such as the gas network in Poland.

A simplified cost analysis of winter maintenance using standard methods was carried out and compared with an analysis of the cost of constructing and operating the heating system.

In the laboratory tests carried out, the thermal properties of typical asphalt concretes and asphalt concretes with additives were compared. In addition, the quality parameters of the pavement mixtures and their suitability for use in practice were taken into consideration. These studies confirmed that the use of asphalt concretes with graphite filler is reasonable. It is worth pointing out that the research to date on the topic in question has mainly focused on the thermal parameters of non-standard solutions, without looking into the change in strength and physical parameters of the mixtures.

In the next stage of the laboratory tests, the performance of the heating system was checked in combination with the tested pavement materials. The tests were carried out on a test stand designed for this purpose. The results obtained from this experiment were also confirmed in the numerical analysis of the self-heating pavement construction. A typical pavement design for traffic category KR5 was analysed.

An additional conclusion of the numerical analysis is that the type of asphalt concrete underneath the heating system has no effect on the efficiency of the solution, only the asphalt concretes located above the system. This was also confirmed in laboratory tests.

Recommendations for a solution for the company - which materials should be used - are described. A description and diagram to help select the best solution - based on the environmental conditions of the location and the availability of power sources and pavement technology - is provided. In addition, technical documentation has been created to provide recommendations for the project preparation, design and later execution.

The dissertation is summarised with conclusions that support the thesis of the dissertation. The thesis ends by proposing directions for further research work.

NAWIERZCHNIE SAMOODŁADZAJĄCE

Załącznik do pracy doktorskiej „Wpływ warunków środowiskowych na technologię wykonywania samoodładzających nawierzchni drogowych”

Opracował / e-mail:

Agata Pasztetnik
agata.pasztetnik@tpaqi.com

Spis załączników:

Zał. 1.1 Przekrój poprzeczny – system grzewczy w nowej warstwie wiążącej

Zał. 1.2 Przekrój poprzeczny – system grzewczy w istniejącej warstwie wiążącej

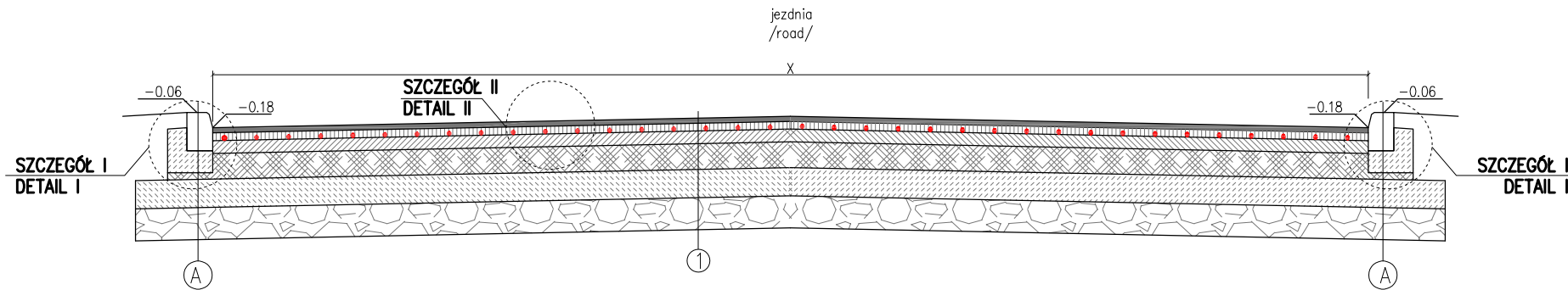
Zał. 2 Plan sytuacyjny

Zał. 3.1 Specyfikacja Techniczna Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (STWiORB) – nawierzchnia samoodładzająca z betonu asfaltowego, warstwa wiążąca

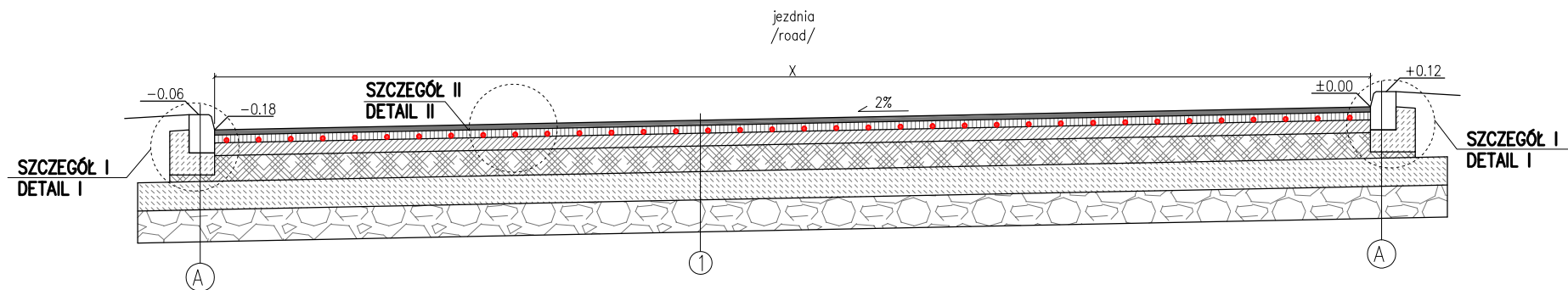
Zał. 3.2 Specyfikacja Techniczna Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (STWiORB) – nawierzchnia samoodładzająca z betonu asfaltowego, warstwa ścieralna

Zał. 4 Disclaimer

Przekrój/Section 1-1
skala/scale 1:50



Przekrój/Section 2-2
skala/scale 1:50



1 Konstrukcja projektowanej jezdni
/the construction of designed road/

Górne warstwy konstrukcji nawierzchni
The upper layers of the pavement structure

4cm Warstwa ścieralna
Wearing course of asphaltic concrete

6cm Warstwa wiążąca
Binder course of asphaltic concrete

10cm Podbudowa zasadnicza
Base layer of asphaltic concrete

20cm Podbudowa zasadnicza z mieszanki niezwiązanej z kruszywem C90/3
Prime base of loose mixture of broken aggregate C90/3

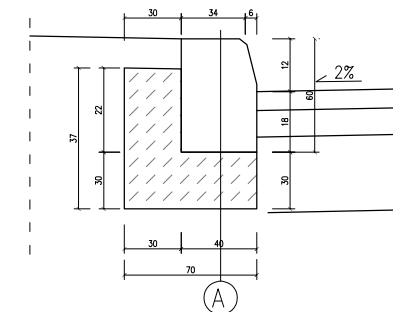
Podłoże G1 o o wtórnym module min. 80 MPa
G1 subgrade with a secondary modulus of min. 80 MPa

Przykładowe grubości warstw – ostateczny projekt musi zostać dostosowany do parametrów drogi
Sample layer thicknesses – the final design must be adapted to the parameters of the road

A 30cm Krawężnik betonowy 20x30x100cm
Concrete curb 20x30x100cm
3cm Podsypka cementowo-piaskowa 1:4
Cement-sand ballast
15cm Ława betonowa z betonu C12/15
Bench made of concrete C12/15

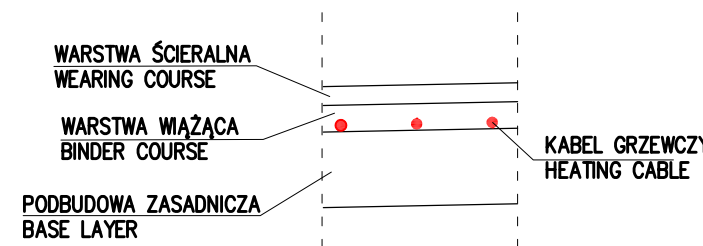
Szczegóły konstrukcyjne/Construction details
skala/scale 1:20

SZCZEGÓŁ I/DETAIL I
KRAWĘŻNIK BETONOWY 20x30x100cm
CONCRETE CURB 20x30x100cm
(wyniesiony/built-up 12cm)



SZCZEGÓŁ II/DETAIL II
KABLE GRZEWcze (CO 25cm)
HEATING CABLES (EVERY 25cm)

Instalacja grzewcza umieszczona na warstwie podbudowy przed wykonaniem warstwy wiążącej
Heating system placed on the prime base before the bound coat is made



TPA Sp. z o.o.
ul. Parzniewska 8
05-800 Pruszków
Polska

IMIĘ I NAZWISKO OPRACOWUJĄCEGO:

DATA
OPRACOWANIA:

MGR INŻ. AGATA PASZTETNIK

2024/09/10

BRANŻA:
DROGOWA

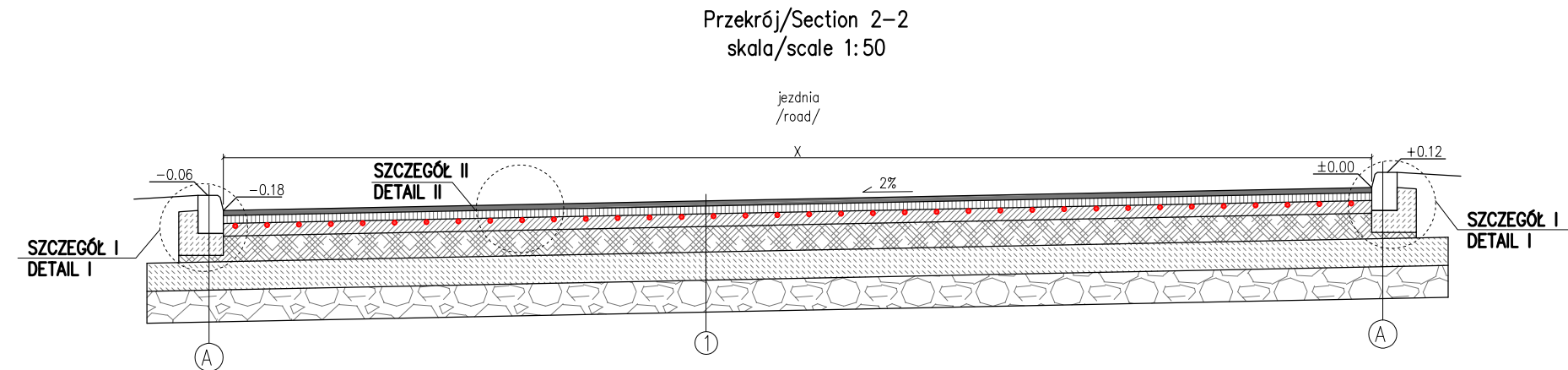
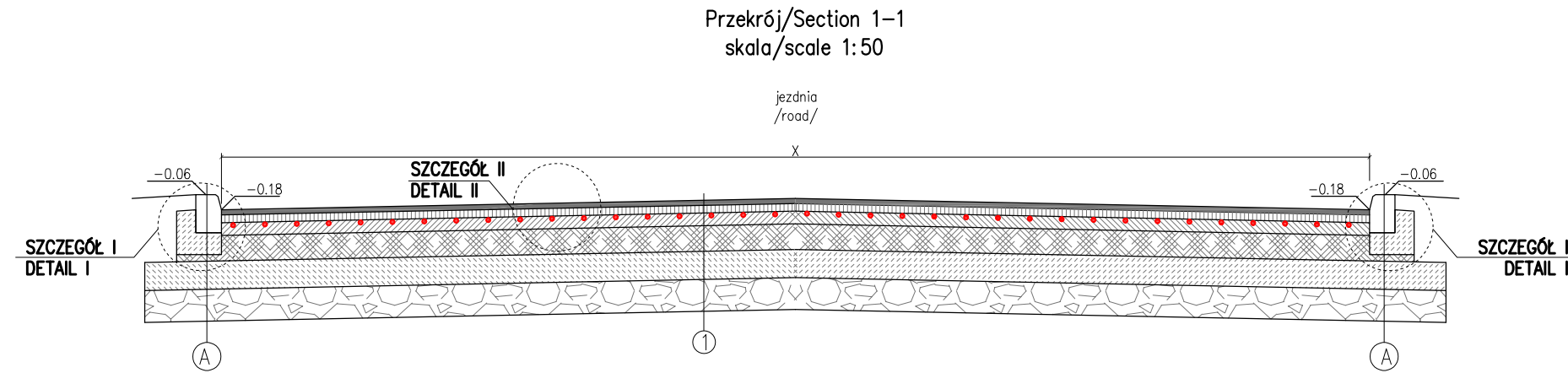
SKALA:
1:50

TYTUŁ RYSUNKU:

**PRZĘKRÓJ POPRZECZNY - NAWIERZCHNIA SAMOODŁADZAJĄCA
SYSTEM GRZEWczy W NOWEJ WARSTWIE WIĄŻĄCEJ**

NUMER ZAŁĄCZNIKA:

ZAŁ. 1.1



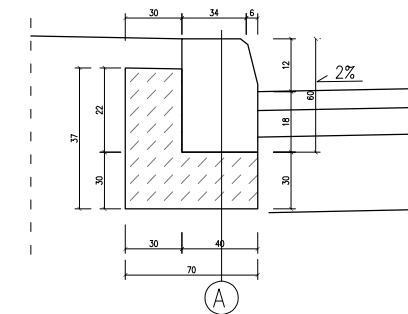
- 1 Konstrukcja projektowanej jezdni
/the construction of designed road/
Górne warstwy konstrukcji nawierzchni
The upper layers of the pavement structure
- 4cm Warstwa ścieralna
Wearing course of asphaltic concrete
- 6cm Warstwa wiążąca
Binder course of asphaltic concrete
- 10cm Podbudowa zasadnicza
Base layer of asphaltic concrete
- 20cm Podbudowa zasadnicza z mieszanki niezwiązanej z kruszywem C90/3
Prime base of loose mixture of broken aggregate C90/3
- Podłoże G1 o o wtórnym module min. 80 MPa
G1 subgrade with a secondary modulus of min. 80 MPa

Przykładowe grubości warstw – ostateczny projekt musi zostać dostosowany do parametrów drogi
Sample layer thicknesses – the final design must be adapted to the parameters of the road

- A 30cm Krawężnik betonowy 20x30x100cm
Concrete curb 20x30x100cm
- 3cm Podsyпка cementowo-piaskowa 1:4
Cement-sand ballast
- 15cm Ława betonowa z betonu C12/15
Bench made of concrete C12/15

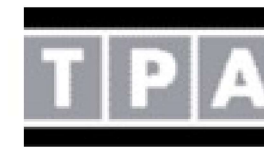
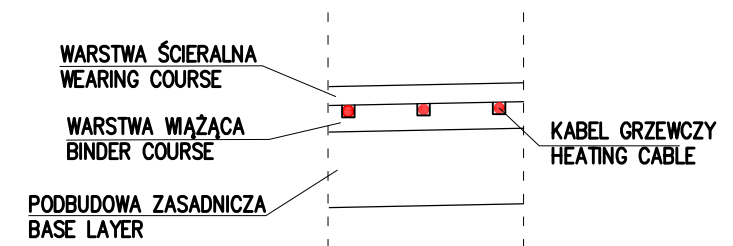
Szczegóły konstrukcyjne/Construction details
skala/scale 1:20

SZCZEGÓŁ I/DETAIL I
KRAWĘŻNIK BETONOWY 20x30x100cm
CONCRETE CURB 20x30x100cm
(wyniesiony/built-up 12cm)



SZCZEGÓŁ II/DETAIL II
KABLE GRZEWCZE (CO 25cm)
HEATING CABLES (EVERY 25cm)

Instalacja grzewcza umieszczona w brzdach wyciętych w warstwie wiążącej zalana masą zalewową
Heating system located in grooves cut out in the bound coat, flooded with pouring compound



TPA Sp. z o.o.
ul. Parzniewska 8
05-800 Pruszków
Polska

IMIĘ I NAZWISKO OPRACOWUJĄCEGO:

DATA
OPRACOWANIA:

MGR INŻ. AGATA PASZTETNIK

2024/09/10

BRANŻA:
DROGOWA

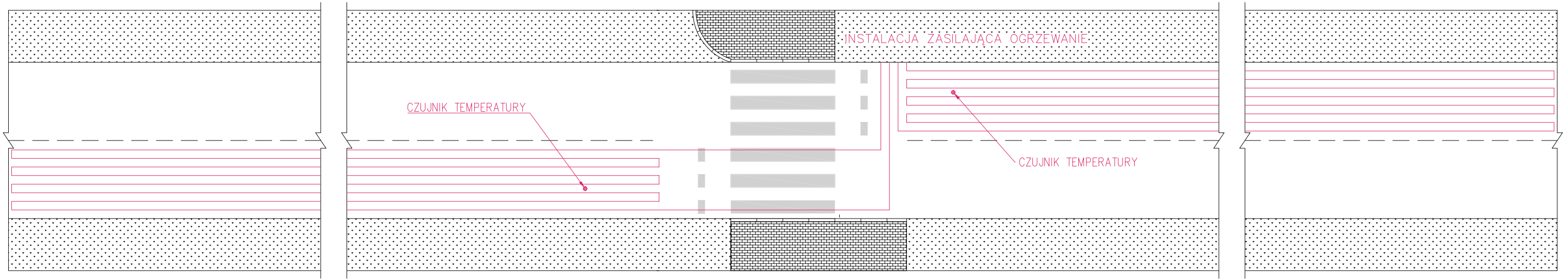
SKALA:
1:50

TYTUŁ RYSUNKU:
**PRZEKRÓJ POPRZECZNY - NAWIERZCHNIA SAMOODŁADZAJĄCA
SYSTEM GRZEWCZY W ISTNIEJĄCEJ WARSTWIE WIĄŻĄCEJ**

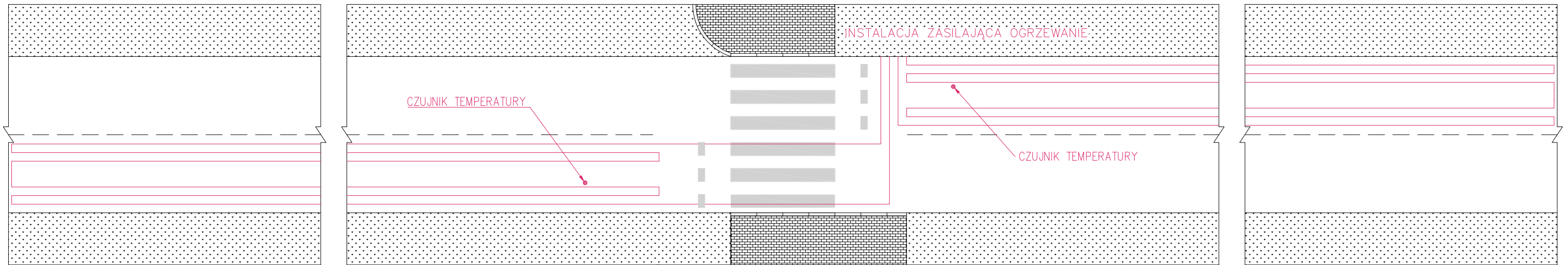
NUMER ZAŁĄCZNIKA:

ZAŁ. 1.2

OPCJA 1/OPTION 1
skala/scale 1:100



OPCJA 2/OPTION 2
skala/scale 1:100



- 1

Długość odcinka ogrzewanego powinna być dostosowana do długości drogi hamowania

/The length of the heated section should be adapted to the length of the braking distance/
- 2

Rodzaj instalacja zasilającej musi być dostosowany do warunków lokalizacyjnych

/The type of power supply installation must be adapted to the location conditions/
- 3

Parametry instalacji grzewczej muszą być dostosowane do warunków środowiskowych

/The parameters of the heating system must be adapted to the environmental conditions/
- 4

Konieczne jest zarezerwowanie przestrzeni pod stację zasilania

/It is necessary to reserve space for the power station/
- 5

Dokładna lokalizacja czujników temperatury musi zostać ujęta w projekcie

/The exact location of temperature sensors must be included in the design/



TPA Sp. z o.o.
ul. Parzewska 8
05-800 Pruszków
Polska

IMIĘ I NAZWISKO OPRACOWUJĄCEGO:		DATA OPRACOWANIA:	
MGR INŻ.	AGATA PASZTETNIK	2024/09/10	
BRANŻA: DROGOWA			
SKALA: 1:100			
TYTUŁ RYSUNKU: PLAN SYTUACYJNY - NAWIERZCHNIA SAMOODŁADZAJĄCA			
NUMER ZAŁĄCZNIKA: ZAŁ. 2			

SZCZEGÓŁOWA SPECYFIKACJA TECHNICZNA WYKONANIA I ODBIORU ROBÓT BUDOWLANYCH

NAWIERZCHNIA SAMOODŁADZAJĄCA Z BETONU ASFALTOWEGO. WARSTWA WIĄŻĄCA

D-05.03.05A

ZAŁĄCZNIK NR 3.1 DO PRACY DOKTORSKIEJ

1 Wstęp

1.1 Nazwa zadania

„...” – podać nazwę kontraktu

1.2 Przedmiot Szczegółowej Specyfikacji Technicznej Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (SSTWiORB)

Przedmiotem niniejszej Szczegółowej Specyfikacji Technicznej Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (SSTWiORB) są wymagania dotyczące wykonania i odbioru robót związanych z wykonaniem warstwy wiążącej z betonu asfaltowego w konstrukcji nawierzchni samoodładzającej.

1.3 Zakres stosowania SSTWiORB

Szczegółowa Specyfikacja Techniczna Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych jest stosowana jako dokument przetargowy i kontraktowy przy zlecaniu i realizacji robót wymienionych w punkcie 1.1 na drogach publicznych. Została opracowana na podstawie Warunków Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (WWiORB).

1.4 Informacje ogólne o terenie budowy

„...” – uzupełnić znając szczegóły kontraktu

1.5 Określenia podstawowe

Definicje i określenia podano w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”, oraz w przepisach związanych wyszczególnionych w pkt. 10 niniejszej SSTWiORB.

1.6 Ogólne wymagania dotyczące Robót

Ogólne wymagania dotyczące robót podano w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”.

2 Materiały

Ogólne wymagania dotyczące materiałów, ich pozyskiwania i składowania podano w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”. Poszczególne rodzaje materiałów powinny pochodzić ze źródeł zatwierdzonych przez Inżyniera/Inspektora Nadzoru. W przypadku wystąpienia zmian w materiałach składowych (rodzaj, kategoria, typ petrograficzny, gęstość, zmiana złoża) należy postępować zgodnie z zasadami określonymi w punkcie 4.2. normy PN-EN 13108-20.

2.1 Rodzaje materiałów

Rodzaje materiałów stosowanych do mieszanki mineralno-asfaltowej podano w tabeli 1.

Tabela 1. Rodzaje materiałów do mieszanki mineralno-asfaltowej

Lp.	Rodzaj materiału	Wymagania wg / dokument odniesienia		
		KR 1-2	KR3-4	KR5-7
1.	Kruszywo grube ^{b)}	WT-1 Kruszywa 2014, tabela 8,		
2.	Kruszywo drobne ^{b)} lub o ciągłym uziarnieniu ^{b)} D≤8	WT-1 Kruszywa 2014, tabela 9 i 10		
3.	Wypełniacz ^{c)}	WT-1 Kruszywa 2014, tabela 11		
4.	Lepiszczce	WT-2 2014 – część I pkt. 8.2.2.1 Tab. 10, PN-EN 14023; PN-EN 12591, PN-EN 13924-2		
5.	Granulat asfaltowy	pkt. 2.1.1. WWiORB, PN-EN 13108-8, RID I/6 Załącznik nr 9.2.1, Załącznik 9.2.2 i Załącznik nr 9.2.3		

6.	Środek adhezyjny	wg p. 4.1 PN-EN 13108-1		
7.	Mieszanka mineralno-asfaltowa	WT-2 2014 – część I pkt. 8.2.2.2 tab. 11 i pkt 8.2.2.3 tab. 12 ^{a)}	WT-2 2014 – część I pkt. 8.2.2.2 tab. 11 i pkt 8.2.2.3 tab. 13 ^{a)}	WT-2 2014 – część I pkt. 8.2.2.2 tab. 11 i pkt 8.2.2.3 tab. 14 ^{a)}
a) grubość płyty w badaniu odporności na deformacje trwałe : AC 16 - 60 mm, AC 22 - 80 mm, AC 32 – 80 mm; badanie ITSR wg Załącznika 1 do WT-2 2014 cz. I b) Stosowane kruszywo ze względu na konstrukcję nawierzchni jako nawierzchni samoodładzającej powinno zostać wybrane spośród granitów, szarogłazów oraz żwiru łamanego c) Jako wypełniacz można zastosować zamiennie do standardowych rozwiązań grafit, który poprawia właściwości termiczne mieszanki mineralno-asfaltowej W zaprojektowanej mieszance mineralnej należy zapewnić, aby obliczona proporcja frakcji 0/2 (z wyłączeniem wypełniacza) kruszywa drobnego łamanego (w przypadku stosowania mieszanki łamanej o uziarnieniu ciągłym o D₈ mm do obliczeń należy przyjąć wyłącznie procentową zawartość frakcji 0/2mm w tym kruszywie) do kruszywa drobnego niełamanego, stanowiła co najmniej 50/50. Dla kategorii KR 1-2 dopuszcza się stosowanie w mieszance mineralnej do 100% kruszywa drobnego niełamanego Projektowanie mieszanki mineralno-asfaltowej wg WT-2 2014 – część I pkt. 8. W przypadku stosowania granulatu asfaltowego należy na etapie projektowania mieszanki mineralno-asfaltowej stosować się do wytycznych opisanych w Załączniku nr 9.2.1, Załączniku 9.2.2 i Załączniku nr 9.2.3 RID I/6				

2.1.1 Granulat asfaltowy

Granulat asfaltowy należy stosować zgodnie z wymaganiami podanymi w normie PN-EN 13108-8 oraz Załączniku nr 9.2.1, Załączniku 9.2.2 i Załączniku nr 9.2.3 RID I/6

Mieszanki mineralno-asfaltowe zawierające granulat asfaltowy muszą posiadać parametry odpowiadające ich rodzajowi oraz przeznaczeniu, zgodnie z wymaganiami niniejszej STWiORB.

2.1.1.1 Zasady stosowania granulatu asfaltowego

Zakres stosowania granulatu asfaltowego w mieszankach mineralno-asfaltowych typu AC S, zależy od następujących czynników:

- pochodzenia granulatu asfaltowego,
- jakości granulatu asfaltowego, a w szczególności właściwości lepiszcza, właściwości kruszywa i jednorodności granulatu,
- rodzaju nowego lepiszcza,
- technologii stosowanej do recyklingu na gorąco (metoda dozowania granulatu na zimno/na gorąco).

Właściwości lepiszcza asfaltowego, które powstanie z połączenia starych i nowych składników, muszą spełniać wymagania stawiane tym materiałom, ze względu na typ i przeznaczenie mieszanki mineralno-asfaltowej.

1. Nie wykonuje się badań właściwości kruszywa odzyskanego z destruktu (z wyjątkiem określenia rodzaju kruszyw grubych w destrukcie na podstawie uproszczonego opisu petrograficznego według PN-EN 932-3, pod warunkiem że:

W przypadku dróg zarządzanych przez GDDKiA:

- a) warstwa z mma została wykonana po 31.12.2000 r. – na podstawie informacji uzyskanej od Zarządcy drogi lub przekazanej dokumentacji archiwalnej oraz
- b) przekazane zostaną informacje dot. klasy i numeru drogi, KR, rodzaju warstwy oraz
- c) destruktu asfaltowy będzie pozyskiwany selektywnie z danej warstwy asfaltowej i wykorzystywany zgodnie z tabelą 2

W przypadku dróg zarządzanych przez innych zarządców:

- a) warstwa z mma została wykonana po 31.12.2000 r. – na podstawie informacji uzyskanej od Zarządcy drogi lub przekazanej dokumentacji archiwalnej oraz

- b) destrukty asfaltowy będzie pozyskiwany selektywnie z danej warstwy asfaltowej i wykorzystywany zgodnie z tabelą 2 oraz
- c) potwierdzono właściwości kruszywa (należy przez to rozumieć potwierdzenie zgodności parametrów kruszywa z odpowiednimi wymaganiami dla kruszyw stosowanych w warstwie ścieralnej z AC) – na podstawie informacji uzyskanej od Zarządcy drogi lub przekazanej dokumentacji archiwalnej.

2. W przypadku braku możliwości potwierdzenia właściwości kruszywa na podstawie dokumentacji archiwalnej o jego wcześniejszym zastosowaniu (zgodnie z wymaganiami pkt 1) i/lub chęci zastosowania kruszywa z destruktu do warstwy konstrukcyjnej z innej mieszanki mma lub do drogi o wyższej kategorii ruchu niż wynikało to z pierwotnego zastosowania kruszywa, należy wykonać badania zgodne z poniższym zakresem:

- mrozoodporność w wodzie (frakcja 4-8 lub 8-16mm),
- odporność na rozdrabnianie wg normy PN-EN 1097-2 (frakcja 4-8, 8-11 lub 10- 14mm),
- grube zanieczyszczenia lekkie wg normy PN-EN 1744-1pkt 14.2,
- ocena zawartości drobnych cząstek - badanie błękitem metylenowym wg normy PN- EN 933-9,
- procentowa zawartość ziarn przekruszonych w kruszywie o grubym i o ciągłym uziarnieniu według normy PN-EN 933-5.

Wyniki badań powinny spełniać wymagania podane w WT-1 (dla określonej warstwy konstrukcyjnej i kategorii ruchu w odniesieniu do warstwy, w której zastosowany zostanie destrukty).

Tabela. 2 Możliwość zastosowania kruszywa z granulatu asfaltowego w nowych mieszankach mineralno-asfaltowych, w zależności od jego pochodzenia

Pochodzenie granulatu	Przeznaczenie mma z granulem									
	AC P KR1-2	AC P KR3-7	AC W KR1-2	AC W KR3-7	AC S KR1-2	AC S KR3-4	AC WMS P KR3-7	AC WMS W KR3-7	SMA KR1-2	SMA KR3-7
AC P KR1-2	Możliwe	Nie	Nie	Nie	Nie	Nie	Nie	Nie	Nie	Nie
AC P KR3-7	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie	Nie	Nie	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie
AC W KR1-2	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie	Nie	Nie	Nie	Nie	Nie
AC W KR3-7	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie
AC S KR1-2	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie	Nie	Nie	Nie
AC S KR3-4	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie
AC WMS P KR3-7	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie	Nie	Nie	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie
AC WMS W KR3-7	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie
SMA KR1-2	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Nie
SMA KR3-7	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe
Możliwe – możliwość stosowania kruszywa pochodzącego z destruktu, przy spełnieniu warunku 1 lub warunku 2 pkt. 2.1.1.2										
Nie – brak możliwości zastosowania kruszywa z destruktu										

Procentowe zawartości granulatu asfaltowego określa się na podstawie maksymalnej wartości wskaźnika zastąpienia lepiszcza BR [%], obliczanego następująco:

$$BR = (a \times b)/c$$

gdzie:

BR – wskaźnik zastąpienia lepiszcza [% (m/m)],

a – zawartość lepiszcza rozpuszczalnego w granulacie asfaltowym [% (m/m)],

b – udział granulatu asfaltowego w mieszance mineralno-asfaltowej [% (m/m)],

c – całkowita zawartość lepiszcza rozpuszczalnego w mieszance mineralno-asfaltowej % (m/m)].

Tabela 3. Dopuszczalne wartości wskaźnika BR [%]

Typ betonu asfaltowego	Dopuszczalna wartość wskaźnika zastąpienia lepiszcza BR [%] w przypadku dozowania granulatu asfaltowego w otaczarce metodą	
	na zimno	na gorąco
AC W	20	30 (40 ¹⁾)

1) W przypadku mieszanek AC W o wartości wskaźnika BR powyżej 30% przy dozowaniu granulatu asfaltowego metodą na gorąco - na zasadzie indywidualnego dopuszczenia przez Zamawiającego po przeprowadzeniu badań dodatkowych określonych w tabeli 6.1. Załącznika nr 9.2.3 RID I/6 dla KR1-2 lub badania odporności na spękania niskotemperaturowe wg PN-EN 12697-46 dla KR 3-7.

Jeżeli w projektowanej mieszance mineralno-asfaltowej przewidziano użycie:

– asfaltu modyfikowanego,

– granulatu asfaltowego zawierającego asfalt modyfikowany i w projektowanej mieszance mineralno-asfaltowej przewidziano użycie zwykłego asfaltu drogowego,

zastosowanie granulatu asfaltowego może nastąpić na zasadzie indywidualnego dopuszczenia (po przeprowadzeniu badań dodatkowych określonych w tabeli 6.1. Załącznika nr 9.2.3 RID I/6) dla KR1-2 lub badania odporności na spękania niskotemperaturowe wg PN-EN 12697-46 dla KR3-7. Wynik badania na spękania niskotemperaturowe wg PN-EN 12697-46 powinien wynosić $\leq -20^{\circ}\text{C}$.

2.1.1.2 Wymagania dla granulatu asfaltowego

W przypadku stosowania granulatu asfaltowego do produkcji mieszanek mineralno- asfaltowych typu beton asfaltowy do warstwy wiążącej AC W to musi on spełniać wymagania określone w tabeli 4.

Tabela 4. Wymagane właściwości granulatu asfaltowego stosowanego do mieszanek mineralno-asfaltowych typu AC W

Właściwość			Wymagania	Dokument odniesienia
Zawartość materiałów obcych			Kategoria FM1	PN-EN 13108-8 pkt. 4.1
Właściwości lepiszcza odzyskanego w granulacie asfaltowym a)	Pochodzący z destruktu, w którego składzie znajduje się asfalt drogowy	PiK	Kategoria S ₇₀ ** Wartość średnia temperatury mięknięcia nie może być wyższa niż 70°C. Pojedyncze wartości temperatury mięknięcia nie mogą przekraczać 77°C.	PN-EN 13108-8 pkt. 4.2 PN-EN 13108-20 Załącznik A
		Pen.	Kategoria P ₁₅ ** Wartość średnia nie może być mniejsza niż 15x0,1mm. Pojedyncze wartości penetracji nie mogą być mniejsze niż 10x0,1mm.	
	Pochodzący z	PiK	Wartość średnia kategoria S _{dec}	

destruktu, w którego składzie znajdują się asfalty modyfikowane *	Pen.	Wartość średnia kategoria P _{dec}	
Jednorodność		Wymagana jednorodność określona na podstawie dopuszczalnego rozstępu wyników badań określonych właściwości	Załącznik nr 9.2.1 i Załącznik nr 9.2.3 RID I/6
Zawartość asfaltu Uziarnienie kruszywa		PN-EN 13108-20 Załącznik A Załącznik nr 9.2.1 i Załącznik nr 9.2.3 RID I/6 Dopuszcza się deklarowanie właściwości kruszywa mineralnego w granulacie asfaltowym na podstawie zadeklarowanego, wcześniejszego zastosowania. W przypadku braku możliwości takiego zadeklarowania jakości kruszywa w granulacie oraz wątpliwości co do właściwości fizycznych lub mechanicznych, należy przeprowadzić badania kruszywa w wymaganym przez Zamawiającego zakresie	
a) do sklasyfikowania lepiszcza odzyskanego w granulacie asfaltowym należy oznaczyć następujące właściwości w zależności od wskaźnika BR: BR≤15%: temperaturę mięknięcia PiK. lub penetrację, BR>15%: temperaturę mięknięcia PiK. i penetrację. * W przypadku gdy wartość badania nawrotu sprężystego wg PN-EN 13398 wynosi co najmniej 40% ** W przypadku przekroczenia wartości temperatury mięknięcia i/lub penetracji, należy zastosować indywidualne projektowanie mieszanki mineralno-asfaltowej, przy zachowaniu wymagań dla mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych do warstwy ścieralnej o odpowiedniej KR, przy spełnieniu wymagań pkt. 2.1.1.1. niniejszej STWiORB			

2.2 Wymagania wobec innych materiałów

2.2.1 Materiały do połączeń technologicznych

Do uszczelniania połączeń technologicznych należy stosować materiały zgodnie z pkt. 7.6.1

WT-2 2016 – część II i wg tabel 5 i 6 niniejszej STWiORB.

Tabela 5. Materiały do złączy (podłużnych i poprzecznych wykonywanych metodą „gorące przy zimnym”)

Rodzaj warstwy	Złącze podłużne		Złącze poprzeczne	
	Ruch	Rodzaj materiału	Ruch	Rodzaj materiału
Warstwa wiążąca	KR 1-7	Pasty asfaltowe lub elastyczne taśmy bitumiczne + środek gruntujący (zgodnie z zaleceniami Producenta)	KR 1-2	Pasty asfaltowe lub elastyczne taśmy bitumiczne + środek gruntujący (zgodnie z zaleceniami Producenta)
			KR 3-7	Elastyczne taśmy bitumiczne + środek gruntujący (zgodnie z zaleceniami Producenta)

Tabela 6. Materiały do spoin między fragmentami zagęszczonej MMA i elementami wyposażenia drogi

Rodzaj warstwy	Ruch	Rodzaj materiału
Warstwa wiążąca	KR 1-7	Pasty asfaltowe lub elastyczne taśmy bitumiczne + środek gruntujący (zgodnie z zaleceniami Producenta)

Uwaga: W przypadku elastycznych taśm bitumicznych należy zastosować środek do gruntowania powierzchni połączeń technologicznych przewidziany przez producenta taśm.

Materiały do połączeń technologicznych muszą spełniać wymagania sformułowane w tabelach 10, 11 i 12 z WT-2 2016 – część II.

2.2.2 Lepiszczce do skropienia podłoża

Lepiszczce do skropienia podłoża powinny spełniać wymagania podane PN-EN 13808.

2.2.3 Dodatki do mieszanki mineralno-asfaltowej

Za zgodą Zamawiającego mogą być stosowane dodatki stabilizujące lub modyfikujące. Pochodzenie, rodzaj i właściwości dodatków powinny być deklarowane. Skuteczność stosowanych dodatków i modyfikatorów powinna być udokumentowana zgodnie z PN-EN 13108-1 punkt 4.1.

Zaleca się stosowanie do mieszanek mineralno-asfaltowych, dodatku środka obniżającego temperaturę produkcji i układania – nie dotyczy to produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych z dozowaniem granulatu asfaltowego w technologii „na zimno”.

Do mieszanek mineralno-asfaltowych może być stosowany dodatek asfaltu naturalnego, jeżeli spełnia wymagania podane w PN-EN 13108-4 Załącznik B.

2.3 Dostawy materiałów

Za dostawy materiałów odpowiedzialny jest Wykonawca robót zgodnie z ustaleniami określonymi w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”.

Do obowiązku Wykonawcy należy takie zorganizowanie dostaw materiałów do wytwarzania MMA, aby zapewnić nieprzerwaną pracę otaczarni w trakcie wykonywania dziennej działki roboczej. Jakość każdej dostawy kruszywa i wypełniacza musi być potwierdzona deklaracją producenta (oznakowanie CE). Do każdej partii granulatu asfaltowego należy dołączyć dokumenty określone w normie PN-EN 13108-8 pkt. 6

2.4 Składowanie materiałów

2.4.1 Składowanie kruszywa

Składowanie kruszywa powinno odbywać się w warunkach zabezpieczających je przed zanieczyszczeniem i zmieszaniem z innymi rodzajami lub frakcjami kruszywa. Kruszywo powinno być składowane na utwardzonym i odwodnionym podłożu.

2.4.2 Składowanie wypełniacza

Wypełniacz należy składować w silosach wyposażonych w urządzenia do aeracji.

2.4.3 Składowanie asfaltu

Lepiszczce asfaltowe należy przechowywać zgodnie z zasadami podanymi w pkt. 8.3 WT-2 2014 – część I. Zbiorniki na asfalt modyfikowany winny być wyposażone w mieszadła mechaniczne lub co najmniej winny mieć zapewniony system przepompowywania wprawiający w cyrkulację asfalt z dolnych partii zbiornika. Maksymalne temperatury składowania asfaltu drogowego powinny być zgodne z tabelą 41 ww. wytycznych, co nie dotyczy przypadków użycia dodatków obniżających temperaturę produkcji i wbudowania lepiszczy zawierających takie środki, lub specjalnych technologii produkcji i wbudowywania w obniżonej temperaturze tj. z użyciem asfaltu spienionego.

2.4.4 Składowanie środka adhezyjnego

Składowanie środka adhezyjnego jest dozwolone tylko w oryginalnych opakowaniach producenta w warunkach podanych zgodnie z zaleceniami producenta.

2.4.5 Składowanie granulatu asfaltowego

Składowanie granulatu asfaltowego powinno odbywać się w warunkach zabezpieczających je przed:

- segregacją – zaleca się formowanie hałd o kształcie stożkowym o wysokości max. do 8m,
- zanieczyszczeniem i zmieszaniem z innymi rodzajami lub frakcjami granulatu,
- zawilgoceniem – ochrona granulatu asfaltowego przed opadami atmosferycznymi;

W przypadku dozowania „na zimno” obowiązkowe jest składowanie granulatu pod zadaszeniem lub przykryciem.

Powierzchnię na której będzie składowany granulatu asfaltowy należy utwardzić i ukształtować z wyraźnym spadkiem przeciwdziałającym akumulacji wody w hałdzie.

Podczas składowania granulatu asfaltowego należy postępować zgodnie z zasadami określonymi w Załączniku nr 9.2.1 i Załączniku nr 9.2.2 RID I/6.

3 SPRZĘT

Ogólne wymagania dotyczące sprzętu podano w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”.

3.1 Wytwórnia mieszanek mineralno-asfaltowych

Produkcja mieszanki mineralno-asfaltowej powinna odbywać się na WMA o cyklicznym systemie produkcji mieszanki. WMA powinna prowadzić system ZKP (Zakładowa Kontrola Produkcji) zgodnie z wymaganiami PN-EN 13108-21, certyfikowany przez jednostkę notyfikowaną. Dozowanie wszystkich składników powinno odbywać się wagowo, dopuszcza się objętościowe dozowanie środka adhezyjnego.

Wytwórnia powinna być wyposażona w automatyczny system sterowania produkcją, z możliwością rejestracji danych produkcyjnych dla każdego zarobu, ich odtworzenia i drukowania w cyklu dziennym.

W przypadku wykorzystania destruktu asfaltowego w technologii „na gorąco”, Wykonawca musi mieć dostępną wytwórnię mieszanek mineralno-asfaltowych, wyposażoną w instalację do recyklingu w technologii „na gorąco” z równoległym bębniem do dozowania granulatu asfaltowego - metoda „równoległego bębna”.

3.2 Układarka mieszanek mineralno-asfaltowych

Układanie mieszanki powinno odbywać się możliwie największą szerokością, przy użyciu mechanicznej układarki do układania mieszanki mineralno-asfaltowej lub zespołem układarek pracujących równolegle z przesunięciem roboczym umożliwiającym ułożenie stykających się warstw asfaltowych na gorąco, posiadającej następujące urządzenia:

- automatyczne sterowanie pozwalające na ułożenie warstwy zgodnie z założoną niweletą i grubością,
- urządzenie do wstępnego zagęszczania mieszanki z systemem podgrzewania

Przy wykonywaniu nawierzchni dróg o kategorii KR 6-7, do warstwy wiążącej zaleca się stosowanie podajników mieszanki mineralno-asfaltowej do zasilania kosza rozkładarki ze środków transportu.

Mieszanki mineralno-asfaltowe można rozkładać specjalną maszyną drogową z podwójnym zestawem rozkładającym do układania dwóch warstw technologicznych w jednej operacji (tzw. asfaltowe warstwy kompaktowe).

3.3 Walce do zagęszczania

Wykonawca powinien dysponować sprzętem pozwalającym na uzyskanie wymaganych parametrów zagęszczenia warstwy z mieszanki mineralno-asfaltowej.

W przypadku umieszczenia w konstrukcji drogi instalacji grzewczej należy uzgodnić typ walca z producentem instalacji, aby nie dopuścić do jej uszkodzenia.

3.4 Skrapiarki

Wykonawca powinien dysponować skrapiarką, pozwalającą na równomierne i zgodne z wymaganiami równomierne skropienie podłoża.

4 TRANSPORT

Ogólne wymagania dotyczące transportu podano w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”. Mieszanki mineralno-asfaltowe powinny być dowożone na budowę odpowiednio do postępu robót, tak aby zapewnić ciągłość wbudowania. Podczas transportu i postoju przed wbudowaniem mieszanki powinny być zabezpieczone przed ostygnięciem i dopływem powietrza (przykrycie, pojemniki termoizolacyjne lub pojazdy ogrzewane itp.). Mieszanki mineralno-asfaltowe, powinny być przewożone pojazdami samowyładowczymi.

Podczas transportu mieszanki mineralno-asfaltowej muszą być zachowane dopuszczalne wartości temperatury. Dowieziona do rozkładarki mieszanka musi mieć temperaturę w wymaganym przedziale określonym w WT-2 2014 – część I tab. 42. Nie dotyczy to przypadków użycia dodatków obniżających temperaturę produkcji i wbudowania lepiszczy zawierających takie środki, lub specjalnych technologii produkcji i wbudowywania w obniżonej temperaturze tj. z użyciem asfaltu spienionego. W tym zakresie należy kierować się informacjami (zaleceniami) podanymi przez producentów tych środków.

Powierzchnie skrzyń ładunkowych lub pojemników używanych do transportu mieszanki powinny być czyste. Do zwilżania tych powierzchni można używać tylko tego rodzaju środków antyadhezyjnych, które nie oddziałują szkodliwie na mieszanki mineralno-asfaltowe. Zabrania się skrapiania skrzyń olejem napędowym lub innymi środkami ropopochodnymi.

5 WYKONANIE ROBÓT

Ogólne zasady wykonania robót podano w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”.

5.1 Projektowanie mieszanki mineralno-asfaltowej

W terminie 3 tygodni przed rozpoczęciem robót Wykonawca przedstawi Inżynierowi/Inspektorowi Nadzoru do zatwierdzenia projekt MMA (Badanie Typu) oraz wszystkie dokumenty potwierdzające jakość materiałów składowych MMA i reprezentatywne próbki materiałów. MMA powinna być zaprojektowana zgodnie z pkt. 8.1 i 8.2.3 WT-2 2014 – część I w zależności od kategorii ruchu.

Ze względu na wykonanie nawierzchni w technologii nawierzchni samoodładzającej, na etapie projektowania należy dodatkowo skontrolować współczynnik przewodności cieplnej mieszanki mineralno-asfaltowej. Zalecana wartość dla zapewnienia jak najlepszych efektów w trakcie działania instalacji: współczynnik przewodności cieplnej k wynoszący nie mniej niż 1,7 W/mK. Dopuszcza się też inne sprawdzone metody badania współczynnika przewodności cieplnej, przy czym metodą referencyjną jest metoda TLS stosowana w mierniku KD2Pro Thermal Analyzer. Przy wyznaczeniu współczynnika przewodności cieplnej stosowana jest procedura opisana normą ASTM D5334-08

W przypadku stosowania granulatu asfaltowego należy na etapie projektowania mieszanki mineralno-asfaltowej stosować się do wytycznych określonych w Załączniku nr 9.2.1, Załączniku 9.2.2 i Załączniku nr 9.2.3 RID I/6.

Wykonawca powinien zapewnić, aby podczas opracowywania Badania Typu MMA, były zastosowane w pełni reprezentatywne próbki materiałów składowych, które zostaną użyte do wykonania robót.

5.2 Wytwarzanie MMA

Produkcja MMA powinna odbywać się na WMA o cyklicznym systemie produkcji mieszanki, zgodnie z wymaganiami opisanymi w p. 3.1. Dozowanie wszystkich składników powinno odbywać się wagowo, dopuszcza się objętościowe dozowanie środka adhezyjnego. W przypadku stosowania granulatu asfaltowego do produkcji MMA należy:

- stosować się do wytycznych opisanych w Załączniku nr 9.2.2 RID I/6
- Przekazywać lub udostępniać Inżynierowi/Inspektorowi Nadzoru wydruki z WMB potwierdzające, że ilość zadozowanego granulatu asfaltowego jest zgodna z zaakceptowanym przez Inżyniera/Inspektora Nadzoru Badaniem Typu.

Temperatury technologiczne wytwarzania MMA powinny być zgodne z wymaganiami podanymi w p. 8.3 WT-2 2014 część I (Tabela 42), co nie dotyczy przypadków użycia dodatków obniżających temperaturę produkcji i wbudowania lepiszczy zawierających takie środki, lub specjalnych technologii produkcji i wbudowywania w obniżonej temperaturze tj. z użyciem asfaltu spienionego. Mieszanke MMA zaleca się wbudowywać bezpośrednio po wyprodukowaniu bez magazynowania na zapas. Przechowywanie wyprodukowanej MMA w silosie może mieć miejsce tylko w sytuacjach awaryjnych.

Jeżeli mieszanka mineralno-asfaltowa jest dostarczana z kilku wytwórni lub od kilku producentów, to należy zapewnić zgodność typu i wymiaru mieszanki oraz spełnienie wymagań dokumentacji projektowej.

5.3 Przygotowanie podłoża

Podłoże pod warstwę ścieralną z MMA powinno być:

- nośne i ustabilizowane,
- czyste, bez zanieczyszczeń lub pozostałości luźnego kruszywa,
- wyprofilowane, równe i bez kolein,
- suche,
- skropione emulsją asfaltową zapewniającą powiązanie warstw, oraz spełniać wymagania pkt. 7.2. WT-2 2016 – część II.

Brzegi krawężników i innych urządzeń przylegających do nawierzchni powinny zostać połączone z MMA zgodnie z pkt. 7.6.4 WT-2 2016 – część II (sposób wykonania spoin) i przy zastosowaniu materiałów określonych w pkt. 2.2.1 niniejszej STWiORB

5.3.1 Połączenia międzywarstwowe

Uzyskanie wymaganej trwałości nawierzchni jest uzależnione od zapewnienia połączenia między warstwami oraz ich współpracy w przenoszeniu obciążeń nawierzchni wywołanych ruchem pojazdów.

Zapewnienie połączenia międzywarstwowego wymaga starannego przygotowania podłoża, na którym będą układane kolejne warstwy asfaltowe, zastosowania odpowiedniej emulsji asfaltowej oraz właściwego wykonania skropienia.

Skropienie emulsją asfaltową ma na celu zwiększenie siły połączenia pomiędzy warstwami konstrukcyjnymi oraz zabezpieczenie przed wnikaniem i zaleganiem wody pomiędzy warstwami.

Do skropień należy stosować rodzaj emulsji i ilość w zależności od rodzaju warstwy i kategorii ruchu.

5.4 Warunki atmosferyczne

Warstwa nawierzchni z MMA powinna być układana w temperaturze:

- podłoża nie mniejszej niż +5°C,
- temperaturze otoczenia w ciągu doby (pomiaru trzy razy dziennie) nie mniejszej niż +5°C.

Nie dopuszcza się układania MMA podczas opadów atmosferycznych i silnego wiatru przekraczającego prędkość 16m/s.

5.5 Próba technologiczna

Wykonawca przed przystąpieniem do produkcji MMA na żądanie Inżyniera/Inspektora Nadzoru jest zobowiązany do przeprowadzenia próby technologicznej.

Nie dopuszcza się oceniania dokładności pracy otaczarki oraz prawidłowości składu mieszanki mineralnej na podstawie tzw. suchego zarobu, z uwagi na segregację kruszywa. Na podstawie uzyskanych wyników Inżynier/Inspektor Nadzoru podejmuje decyzję o wykonaniu odcinka próbnego. Tolerancje zawartości składników MMA względem składu zaprojektowanego powinny być zgodne z wymaganiami podanymi w pkt. 6.7. niniejszej STWiORB.

5.6 Odcinek próbny

Wykonawca ma obowiązek wykonać odcinek próbny o długości przynajmniej 100m na całej szerokości jednej jezdni w celu:

- zdefiniowania parametrów produkcyjnych MMA,
- sprawdzenia czy sprzęt użyty do rozkładania i zagęszczania mieszanki jest właściwy,
- określenia grubości warstwy mieszanki mineralno-asfaltowej przed zagęszczeniem, koniecznej do uzyskania wymaganej ostatecznej grubości warstwy,
- określenia potrzebnej liczby przejazdów walców dla uzyskania prawidłowego zagęszczenia warstwy,
- przeprowadzenia próby technologicznej wykonania instalacji wraz z procesem zagęszczania, w celu zminimalizowania ryzyka uszkodzenia tej instalacji.

Do wykonania odcinka próbnego, Wykonawca powinien zastosować takie same materiały oraz sprzęt, jakie będą stosowane do wykonania warstwy z MMA podczas robót. Lokalizacja odcinka próbnego zostanie zaakceptowana przez Inżyniera/Inspektora Nadzoru – dopuszcza się akceptację wykonanego odcinka próbnego w ramach innego zadania pod warunkiem, że został wbudowany ten sam typ mieszanki mineralno-asfaltowej oraz zastosowano ten sam sprzęt do wbudowania i zagęszczania warstwy. Wykonawca rozpocznie wykonywanie nawierzchni z MMA dopiero po otrzymaniu akceptacji Inżyniera/Inspektora Nadzoru, wydanej na podstawie testów oraz pomiarów dokonanych na odcinku próbnym. W przypadku nieprawidłowych parametrów warstwy wiążącej i nie zatwierdzeniu przez Inżyniera/Inspektora Nadzoru odcinka próbnego, Wykonawca ma obowiązek usunąć odcinek próbny warstwy wiążącej (jeżeli był wykonywany w obrębie Kontraktu) na własny koszt.

Do wykonania odcinka próbnego instalacji samoodładzającej w konstrukcji nawierzchni, Wykonawca powinien w pełni zastosować się do zaleceń producenta materiałów instalacyjnych oraz projektu instalacji grzewczej. W przypadku instalacji hydraulicznej zalecane jest wprowadzenie zimnego czynnika do instalacji – w ten sposób obniży się wpływ wysokiej temperatury na instalację oraz możliwa będzie bieżąca obserwacja czy nie występują żadne uszkodzenia instalacji (widoczne np. w różnicach temperatur na czujnikach instalacji).

5.7 Wbudowywanie mieszanki MMA

Transport MMA powinien odbywać się zgodnie z wymaganiami podanymi w pkt. 7.4 WT-2 2016 – część II. Wbudowywanie MMA powinno odbywać się zgodnie z wymaganiami podanymi w pkt. 7.5 WT-2 2016 – część II.

Prace związane z wbudowaniem mieszanki mineralno-asfaltowej należy tak zaplanować, aby:

- umożliwiały układanie warstwy całą szerokością jezdni (jedną rozkładarką lub dwoma rozkładarkami pracującymi obok siebie z przesunięciem wg pkt 7.6.3.1. WT- 2 2016 – część II); w przypadku przebudów i remontów o dopuszczonym ruchu jednokierunkowym (wahadłowym) szerokością pasa ruchu ,
- dzienne działki robocze (tj. odcinki nawierzchni na których mieszanka mineralno- asfaltowa jest wbudowywana jednego dnia) powinny być możliwie jak najdłuższe min. 200 m,
- organizacja dostaw mieszanki powinna zapewnić pracę rozkładarki bez zatrzymań z jednostajną prędkością.
- wykonanie instalacji grzewczej było zaplanowane w sposób zapewniający ochronę instalacji w trakcie wbudowywania mieszanki mineralno-asfaltowej.

Mieszanke mineralno-asfaltową należy wbudowywać w sprzyjających warunkach atmosferycznych określonych w pkt. 5.4. Temperatura otoczenia może być niższa w wypadku stosowania ogrzewania podłoża i obramowania (np. promienniki podczerwieni, urządzenia mikrofalowe).

W przypadku stosowania mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem umożliwiającym obniżenie temperatury mieszania i wbudowania (mieszanki na ciepło) lub stosowania specjalnych technologii produkcji i wbudowywania w obniżonej temperaturze, należy indywidualnie określić wymagane warunki otoczenia. Układarka powinna być stale zasilana w mieszanke tak, aby w zasobniku zawsze znajdowała się odpowiednia jej ilość, a kosz, transporter i stół były zawsze gorące i nie stygły. W miejscach niedostępnych dla sprzętu dopuszcza się wbudowywanie ręczne.

Podczas rozkładania grubość wykonywanej warstwy powinna być sprawdzana co 25 m, w co najmniej trzech miejscach (w osi i przy brzegach warstwy). Warstwy wałowane powinny być równomiernie zagęszczane walcami drogowymi o charakterystyce zapewniającej skuteczność zagęszczania, potwierdzoną na odcinku próbnym.

Po wykonanej warstwie wiążącej powinien odbywać się wyłącznie ruch pojazdów związanych z układaniem następnej warstwy.

Dopuszczenie wykonanej warstwy asfaltowej na gorąco do ruchu może nastąpić po jej schłodzeniu do temperatury zapewniającej jej odporność na deformacje trwałe.

W przypadku konieczności dopuszczenia innego ruchu należy zastosować zabiegi zabezpieczające uzyskanie wymaganego połączenia międzywarstwowego tj. poprzez wykonanie dodatkowego skropienia z użyciem mleczka wapiennego (wg. pkt. 7.3.4 WT-2 2016 – część II).

5.8 Połączenia technologiczne

Połączenia technologiczne powinny być wykonane przy zastosowaniu materiałów określonych w pkt 2.2.1 niniejszej STWiORB, oraz zgodnie z pkt. 7.6 WT-2 2016 – część II.

5.8.1 Sposób i warunki aplikacji materiałów stosowanych do złączy.

5.8.1.1 Wymagania wobec wbudowania elastycznych taśm bitumicznych

Krawędź boczna złącza podłużnego winna być uformowana za pomocą rolki dociskowej lub poprzez obcięcie nożem talerzowym.

Krawędź boczna złącza poprzecznego powinna być uformowana w taki sposób i za pomocą urządzeń umożliwiających uzyskanie nieregularnej powierzchni.

Powierzchnie krawędzi do których klejona będzie taśma, powinny być czyste i suche.

Przed przyklejeniem taśmy w metodzie „gorące przy zimnym”, krawędzie „zimnej” warstwy na całkowitej grubości, należy zagruntować środkiem gruntującym zgodnie z zaleceniami producenta taśmy.

Taśma bitumiczna o grubości 10 mm powinna być wstępnie przyklejona do zimnej krawędzi złącza na 2/3 wysokości warstwy licząc od górnej powierzchni warstwy wiążącej. Minimalna wysokość taśmy 4 cm.

5.8.1.2 Wymagania wobec wbudowania past bitumicznych

Przygotowanie krawędzi bocznych jak w przypadku stosowania taśm bitumicznych.

Pasta powinna być наносzona mechanicznie z zapewnieniem równomiernego jej rozprowadzenia na bocznej krawędzi w ilości 3 - 4 kg/m² (warstwa o grubości 3 - 4 mm przy gęstości około 1,0 g/cm³).

Dopuszcza się ręczne nanoszenie past w miejscach niedostępnych.

5.8.2 Sposób wykonania złączy

Wymagania ogólne:

- złącza w warstwach nawierzchni powinny być wykonane w linii prostej,
- złącza podłużnego nie można lokalizować w śladach kół, a także w obszarze poziomego oznakowania jezdni,
- złącza podłużne w konstrukcji wielowarstwowej należy przesunąć względem siebie w kolejnych warstwach technologicznych o co najmniej 30 cm w kierunku poprzecznym do osi jezdni,
- złącza muszą być całkowicie związane a powierzchnie przylegających warstw powinny być w jednym poziomie.

A. Metoda rozkładania „gorące przy gorącym”

Metoda ta ma zastosowanie w przypadku wykonywania złącza podłużnego – należy ją stosować zgodnie z pkt. 7.6.3.1 WT-2 2016 – część II.

Przy tej metodzie nie stosuje się dodatkowych materiałów do złączy.

B. Metoda rozkładania „gorące przy zimnym”

Wykonanie złączy metodą „gorące przy zimnym” stosuje się w przypadkach, gdy ze względu na ruch, względnie z innych uzasadnionych powodów konieczne jest wykonywanie nawierzchni w odstępach czasowych – należy ją stosować zgodnie z pkt. 7.6.3.2 WT-2 2016 – część II.

C. Sposób zakończenia działki roboczej

Zakończenie działki roboczej należy wykonać w sposób i przy pomocy urządzeń zapewniających uzyskanie nieregularnej, szorstkiej powierzchni spoiny (przy pomocy wstawianej kantówki lub frezarki) oraz szorstkiego podłoża w rejonie planowanego złącza.

Niedopuszczalne jest posypywanie piaskiem jako sposobu na obniżenie szczepności warstw w rejonie końca działki roboczej oraz obcinanie piłą tarczową zimnej krawędzi działki.

Zakończenie działki roboczej wykonuje się prostopadle do osi drogi. Krawędź działki roboczej jest równocześnie krawędzią poprzeczną złącza.

Złącza poprzeczne między działkami roboczymi układanych pasów kolejnych warstw technologicznych należy przesunąć względem siebie o co najmniej 3 m w kierunku podłużnym do osi jezdni.

D. Sposób wykonywania spoin

Spoiny wykonuje się z użyciem materiałów wymienionych w punkcie 2.2.1.

Grubość elastycznej taśmy bitumicznej do spoin powinna wynosić:

- nie mniej niż 15 mm w warstwie wiążącej/wyrównawczej.

Pasta powinna być наносzona mechanicznie z zapewnieniem równomiernego jej rozprowadzenia na bocznej krawędzi w ilości 3 - 4 kg/m² (warstwa o grubości 3 - 4 mm przy gęstości około 1,0 g/cm³).

5.9 Krawędzie zewnętrzne warstwy ścieralnej

Krawędzie zewnętrzne warstwy ścieralnej należy wykonać zgodnie z wymaganiami pkt. 7.7 WT-2 2016 – część II

Po wykonaniu warstwy ścieralnej o jednostronnym nachyleniu jezdni należy uszczelnić wyżej położoną krawędź boczną. Niżej położona krawędź boczna powinna pozostać nieuszczelniona.

Krawędź zewnętrzną oraz powierzchnię odsadзки poziomej należy zabezpieczyć przez pokrycie gorącym asfaltem w ilości:

- powierzchnie odsadzek - 1,5 kg/m²
- krawędzie zewnętrzne - 4 kg/m², zgodnie z rys. 1 pkt. 7.7 WT-2 2016 – część II.

W przypadku nawierzchni o dwustronnym nachyleniu (przekrój daszkowy) nie wykonuje się uszczelnienia zewnętrznych krawędzi jezdni, jeśli jednak w ciągu tej drogi (np. na łukach) wystąpi przekrój o jednostronnym nachyleniu, należy uszczelnić wyżej położoną krawędź boczną.

6 KONTROLA JAKOŚCI ROBÓT

6.1 Ogólne wymagania dotyczące kontroli jakości robót

Ogólne zasady kontroli jakości robót podano w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”.

Badania mieszanki mineralno-asfaltowej należy wykonywać zgodnie z normami podanymi w pkt. 8.2.2 WT-2 2014 Nawierzchnie Asfaltowe (Tabela 12, 13, 14 – dla mieszanki typu AC).

Badania i pomiary dzielą się na:

- badania i pomiary Wykonawcy – w ramach własnego nadzoru
- badania i pomiary kontrolne – w ramach nadzoru Zamawiającego.

W uzasadnionych przypadkach w ramach badań i pomiarów kontrolnych dopuszcza się wykonanie badań i pomiarów kontrolnych dodatkowych lub badań i pomiarów arbitrażowych.

Badania obejmują:

- pobranie próbek,
- zapakowanie próbek do wysyłki,
- transport próbek z miejsca pobrania do placówki wykonującej badania,
- przeprowadzenie badania,
- sprawozdanie z badań.

Pomiary obejmują terenową weryfikację cech nawierzchni.

6.2 Badania i pomiary Wykonawcy - zgodnie z D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”

Zakres badań i pomiarów Wykonawcy powinien:

- być nie mniejszy niż określony w Zakładowej Kontroli Produkcji dla dostarczanych na budowę materiałów i wyrobów budowlanych - mieszanki mineralno-asfaltowe, kruszywa, lepiszcze, materiały do uszczelnień, itd.,
- dla wykonanej warstwy być nie mniejszy niż określony zakres i częstotliwość badań i pomiarów kontrolnych określony w tab. 7.

Zakres badań Wykonawcy związany z wykonywaniem nawierzchni:

- pomiar temperatury powietrza,
- pomiar temperatury mieszanki mineralno-asfaltowej podczas wykonywania nawierzchni,
- ocena wizualna mieszanki mineralno-asfaltowej,
- wykaz ilości materiałów lub grubości wykonanych warstw,
- pomiar spadku poprzecznego poszczególnych warstw asfaltowych,
- pomiar równości warstwy wiążącej,
- pomiar rzędnych wysokościowych i pomiary sytuacyjne,

- badania zagęszczenia warstwy i zawartości wolnej przestrzeni,
- pomiar szczepności warstw asfaltowych
- pomiar współczynnika przewodności cieplnej mieszanki
- ocena wizualna jednorodności powierzchni warstwy,
- ocena wizualna jakości wykonania połączeń technologicznych.

Tabela 7. Minimalna częstotliwość badań ze strony Wykonawcy dla warstwy ścieralnej

Lp.	Badana cecha	Metoda	Częstotliwość
1.	Zagęszczenie MMA oraz zawartość wolnych przestrzeni w warstwie	Porównanie gęstości objętościowej referencyjnej do rzeczywistej	- 2 razy na kilometr każdej jezdni, nie rzadziej niż 1 raz na 6000 m ²
2.	Sczepność warstw asfaltowych dla dróg KR 4-7	Metoda Leutnera	- nie rzadziej niż 1 raz na 15000 m ²
3.	Grubość (grubości poszczególnych warstw i grubość pakietu warstw asfaltowych)	Rzędne wysokościowe,	- nie rzadziej niż co 50 m
		Lub pomiar elektromagnetyczny	- nie rzadziej niż co 100 m
		Lub przymiarem na wyciętych próbach	- 2 razy na kilometr każdej jezdni, nie rzadziej niż 1 raz na 6000 m ²
4.	Równość podłużna		
4.1.	Wszystkie klasy dróg	Profilografem	- każdy pas układania warstwy w sposób ciągły
4.2.	Wszystkie klasy dróg w miejscach niedostępnych dla urządzeń pomiarowych	4 metrową łatą i klinem	- w sposób ciągły (początek każdego pomiaru łatą w miejscu zakończenia poprzedniego pomiaru)
5.	Równość poprzeczna		
5.1.	Klasy dróg: GP, G	Profilografem	- każdy pas układania warstwy w sposób ciągły
5.5	W miejscach niedostępnych dla urządzeń pomiarowych	2 metrową łatą i klinem	- nie rzadziej niż co 5 m
6	Spadki poprzeczne	Profilografem	- co 10m
		lub 2 metrową łatą i pochyłomierzem	lub metodami geodezyjnymi
7.	Szerokość warstwy	Taśmą mierniczą lub metodami geodezyjnymi	- pomiar co 50 m, na łukach poziomych w punktach charakterystycznych

8.	Odchylenie od projektowanej osi drogi	Rzędne wysokościowe Pomiary sytuacyjne	- pomiar rzędnych niwelacji podłużnej i poprzecznej oraz usytuowania osi, na łukach poziomych i pionowych w punktach charakterystycznych
10.	Współczynnik przewodności cieplnej	Pomiar miernikiem KD2Pro lub analogicznym sprzętem	- min. 1 raz

6.3 Badania i pomiary kontrolne - zgodnie z D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”

6.4 Badania i pomiary kontrolne dodatkowe - zgodnie z D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”

6.5 Badania i pomiary arbitrażowe - zgodnie z D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”

6.6 Badania i pomiary przed przystąpieniem do robót - zgodnie z D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”

Przed przystąpieniem do robót Wykonawca powinien przedstawić Inżynierowi/Inspektorowi Nadzoru do akceptacji źródła poboru kruszyw oraz wszystkich dodatkowych materiałów, dołączając wszystkie dokumenty potwierdzające jakość materiałów składowych.

6.7 Badania w czasie robót

6.7.1 Zawartość lepiszcza rozpuszczalnego

Badanie polega na wykonaniu ekstrakcji lepiszcza, zgodnie PN-EN 12697-1, z próbki pobranej z mieszanki mineralno-asfaltowej.

Jakości wbudowanej mieszanki mineralno-asfaltowej należy ocenić na podstawie:

- wielkości odchyłki obliczonej dla wartości średniej (średnia arytmetyczna wszystkich wyników z całej drogi dla danego typu MMA i danej warstwy asfaltowej) z dokładnością do 0,01 %,
- wielkości odchyłki obliczonej dla pojedynczego wyniku (próbki) z dokładnością do 0,1 %.

Wyżej wymienione kryteria należy stosować jednocześnie (oba podlegają ocenie jakości MMA).

Odchyłka jest to wartość bezwzględna różnicy pomiędzy procentową zawartością lepiszcza rozpuszczalnego uzyskaną z badań laboratoryjnych a procentową zawartością lepiszcza rozpuszczalnego podaną w Badaniu Typu (%).

Tabela 8. Dopuszczalne odchyłki do odbioru dla wartości średniej policzonej z dokładnością do 0,01 %

Oceniany parametr	Wielkość odchyłki dla wartości średniej ; %	
	AC	
	KR3÷KR7	KR1 ÷KR2
wartość lepiszcza rozpuszczalnego S – niedomiar	0,15	0,20
wartość lepiszcza rozpuszczalnego S – nadmiar	0,20	0,20

Tabela 9. Dopuszczalne odchyłki do odbioru dla pojedynczego wyniku określonego z dokładnością do 0,1 %

Oceniany parametr	Wielkość odchyłki dla pojedynczego wyniku ; %
	AC
	KR1÷KR7
Zawartość lepiszcza rozpuszczalnego S - niedomiar	0,3
Zawartość lepiszcza rozpuszczalnego S - nadmiar	0,3

W przypadku przekroczenia wielkości dopuszczalnych odchyłek dla wartości średniej i dla pojedynczego wyniku w zakresie zawartości lepiszcza rozpuszczalnego należy postępować zgodnie z Instrukcją DP-T 14 *Ocena jakości na drogach krajowych. Część I-Roboty drogowe*, z uwzględnieniem zasad opisanych w punktach 6.4 lub 6.5 niniejszej STWiORB.

6.7.2 Uziarnienie mieszanki mineralnej

Po wykonaniu ekstrakcji lepiszcza należy przeprowadzić kontrolę uziarnienia mieszanki kruszywa mineralnego wg PN-EN 12697-2.

Jakości mieszanki mineralnej należy ocenić na podstawie:

- wielkości odchyłki obliczonej dla wartości średniej (średnia arytmetyczna wszystkich wyników z całej drogi dla danego typu MMA i danej warstwy asfaltowej) z dokładnością do 0,1 %
- wielkości odchyłki obliczonej dla pojedynczego wyniku (próbki) z dokładnością do 0,1 % dla sita 0,063mm i z dokładnością do 1 % dla pozostałych sit.

Wyżej wymienione kryteria należy stosować jednocześnie (oba podlegają ocenie jakości MMA).

Odchyłka jest to wartość bezwzględna różnicy pomiędzy procentową zawartością ziaren w wyekstrahowanej mieszance mineralnej uzyskaną z badań laboratoryjnych a procentową zawartością ziaren w mieszance mineralnej podaną w Badaniu Typu (%).

Dopuszczalne odchyłki w zakresie uziarnienia podano w tabeli 10.

Tabela 10. Dopuszczalne odchyłki w zakresie uziarnienia.

Przechodzi przez sito #, mm	Odchyłki dopuszczalne dla pojedynczego wyniku, %		Odchyłki dopuszczalne dla wartości średniej, %
	KR 3-7	KR 1-2	
0,063	2,5	3,0	1,5
0,125	4	5	2,0
2	5	6	3,0
D/2 lub sito charakterystyczne	6	7	4,0
D	7	8	5,0

Wymagania dotyczące udziału kruszywa grubego, drobnego i wypełniacza powinny być spełnione jednocześnie.

W przypadku przekroczenia wielkości dopuszczalnych odchyłek dla wartości średniej w zakresie uziarnienia należy postępować zgodnie z Instrukcją DP-T 14 *Ocena jakości na drogach krajowych. Część I-Roboty drogowe*, z uwzględnieniem zasad opisanych w punktach 6.4 lub 6.5 niniejszej STWiORB.

Dla kryterium dotyczącego pojedynczego wyniku nie stosuje się potrąceń – należy je spełnić wg wyżej wymienionych wymagań.

6.7.3 Zawartość wolnych przestrzeni w mieszance MMA

Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach Marshalla oblicza się zgodnie z PN-EN 12697-8. Zawartość wolnych przestrzeni nie może przekroczyć wartości podanych w WT-2 2014 Tabela 18 i 19 w zależności od kategorii ruchu.

6.7.4 Pomiar grubości warstwy wg PN-EN 12697-36

Grubość wykonanej warstwy należy określać na wyciętych próbkach (nie wycinać próbek na obiektach mostowych wiertnicą mechaniczną) lub metodą elektromagnetyczną z częstotliwością określoną w tab. 7. Sposób oceny grubości warstwy i pakietu warstw należy dokonać zgodnie z WT-2 2016 – część II pkt 8.2 i Instrukcją DP-T 14 pkt. 2.3.

Grubość warstwy należy ocenić na podstawie wielkości odchyłki obliczonej dla:

- pojedynczego wyniku pomiaru grubości warstwy i pakietu warstw asfaltowych,
- wartości średniej ze wszystkich pomiarów grubości danej warstwy i wartości średniej pomiarów pakietu warstw asfaltowych.

Odchyłka w zakresie grubości danej warstwy lub pakietu warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych jest to procentowe **przekroczenie w dół** projektowanej grubości warstwy lub pakietu i obliczona wg pkt 2.3. Instrukcji DP-T 14 – część I z dokładnością do 1%.

Tolerancja dla pojedynczego wyniku w zakresie:

- grubości warstwy może wynosić $1 \pm 10\%$ grubości projektowanej.
- pakietu wszystkich warstw asfaltowych wynosi $0 \pm 10\%$ grubości projektowanej, lecz nie więcej niż 1 cm.

Wartość średnia ze wszystkich pomiarów grubości danej warstwy lub pakietu warstw powinna być równa bądź większa w stosunku do grubości przyjętej w projekcie konstrukcji nawierzchni.

W przypadku przekroczenia wartości dopuszczalnych w zakresie grubości należy postępować zgodnie z Instrukcją DP-T 14 *Ocena jakości na drogach krajowych. Część I - Roboty drogowe*, z uwzględnieniem zasad opisanych w punktach 6.4 lub 6.5 niniejszej STWiORB.

Dopuszcza się przy odbiorze warstwy przez Zamawiającego pomiar grubości za pomocą georadaru GPR.

6.7.5 Wskaźnik zagęszczenia warstwy wg PN-EN 13108-20 załącznik C4

Wskaźnik zagęszczenia warstwy należy sprawdzać na próbkach wyciętych z zagęszczonej warstwy z częstością podaną w pkt. 6.2. tab. 7. Wskaźnik zagęszczenia nie może być niższy niż 98,0%. Dopuszcza się za zgodą Inżyniera/Inspektora Nadzoru badania zagęszczenia warstwy metodami izotopowymi (zamiennie do cięcia próbek). Metodą referencyjną jest badanie na próbkach wyciętych z zagęszczonej warstwy. Wykonawca jest zobowiązany do wycięcia próbki na każde życzenie Inżyniera/Inspektora Nadzoru w miejscach wątpliwych przez niego wskazanych.

W przypadku jeśli wskaźnik zagęszczenia jest niższy niż 98,0% należy postępować zgodnie z Instrukcją DP-T 14 *Ocena jakości na drogach krajowych. Część I - Roboty drogowe*, z uwzględnieniem zasad opisanych w punktach 6.4 lub 6.5 niniejszej STWiORB.

6.7.6 Wolna przestrzeń w zagęszczonej warstwie wg PN-EN 12697-8.

Do obliczenia wolnej przestrzeni w warstwie należy przyjmować gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej oznaczonej w dniu wykonywania kontrolowanej działki roboczej. Zawartość wolnej przestrzeni w warstwie powinna mieścić się w granicach dla KR 1-2 2,0- 7,0%, dla KR $\geq$ 3 3,0-8,0%. Zawartość wolnej przestrzeni w warstwie należy sprawdzać z częstością podaną w pkt. 6.2. tab. 7.

W przypadku przekroczenia wartości dopuszczalnych w zakresie zawartości wolnych przestrzeni należy postępować zgodnie z Instrukcją DP-T 14 *Ocena jakości na drogach krajowych. Część I - Roboty drogowe*, z uwzględnieniem zasad opisanych w punktach 6.4 lub 6.5 niniejszej STWiORB.

6.7.7 Wytrzymałość na ścinanie połączeń międzywarstwowych.

Badanie szczepności międzywarstwowej należy wykonać wg metody Leutnera na próbkach $\varnothing 150 \pm 2 \text{ mm}$ lub $\varnothing 100 \pm 2 \text{ mm}$ zgodnie z „Instrukcją laboratoryjnego badania szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych wg metody Leutnera i wymagania techniczne szczepności. 2014”. Wymagana wartość dla połączenia wiążąca – podbudowa wynosi nie mniej niż 0,7 MPa – kryterium należy spełnić. Dopuszcza się też inne sprawdzone metody badania szczepności, przy czym metodą referencyjną jest metoda Leutnera na próbkach $\varnothing 150 \pm 2 \text{ mm}$.

Badanie szczepności międzywarstwowej należy sprawdzać zgodnie z częstością podaną w pkt. 6.2. tab. 7.

W przypadku przekroczenia wartości dopuszczalnych w zakresie wytrzymałości na ścinanie połączeń międzywarstwowych należy postępować zgodnie z Instrukcją DP-T 14 *Ocena jakości na drogach krajowych. Część I - Roboty drogowe*, z uwzględnieniem zasad opisanych w punktach 6.4 lub 6.5 niniejszej STWiORB.

6.7.8 Współczynnik przewodności cieplnej mieszanki

Ze względu na wykonanie nawierzchni w technologii nawierzchni samoodładzającej z wyprodukowanej mieszanki mineralno-asfaltowej należy kontrolować:

- współczynnik przewodności cieplnej mieszanki mineralno-asfaltowej (1 badanie podczas próby technologicznej oraz w razie wątpliwości) – badanie powinno zostać przeprowadzone przynajmniej na 3 próbkach oraz powinna zostać wyciągnięta średnia z otrzymanych wyników.

Zalecana wartość dla zapewnienia jak najlepszych efektów w trakcie działania instalacji: współczynnik przewodności cieplnej k wynoszący nie mniej niż 1,7 W/mK. Otrzymany na tym etapie wynik należy porównać z wynikiem otrzymanym na etapie projektowania mieszanki – wartość nie powinna być mniejsza o więcej niż 10% w porównaniu do wartości otrzymanej na etapie projektowania.

Dopuszcza się też inne sprawdzone metody badania współczynnika przewodności cieplnej, przy czym metodą referencyjną jest metoda TLS stosowana w mierniku KD2Pro Thermal Analyzer. Przy wyznaczeniu współczynnika przewodności cieplnej stosowana jest procedura opisana normą ASTM D5334-08

6.7.9 Właściwości lepiszcza odzyskanego.

Dla lepiszcza odzyskanego (wyekstrahowanego) z wyprodukowanej mieszanki mineralno-asfaltowej należy kontrolować następujące właściwości:

- temperaturę mięknięcia (1 badanie podczas próby technologicznej oraz w razie wątpliwości)- dotyczy mieszanek bez udziału granulatu asfaltowego,
- temperaturę mięknięcia (1 badanie na 10 000 t mieszanki)- dotyczy mieszanek z udziałem granulatu asfaltowego,
- nawrót sprężysty – dot. polimeroasfaltów (1 badanie podczas próby technologicznej oraz w razie wątpliwości).

Wymagania dla temperatury mięknięcia lepiszcza odzyskanego (wyekstrahowanego) z wyprodukowanej mieszanki są identyczne jak dla temperatury mięknięcia lepiszcza zadeklarowanego w badaniu typu danej mieszanki mineralno-asfaltowej, zarówno dla mieszanek mineralno-asfaltowych z udziałem granulatu asfaltowego jak i dla mieszanek mineralno-asfaltowych bez udziału granulatu asfaltowego. Maksymalna temperatura mięknięcia lepiszcza odzyskanego w zależności od rodzaju asfaltu zadeklarowanego w badaniu typu danej mieszanki, nie powinna być większa niż określona w pkt. 8.1. WT 2 2016 – część II.

6.8 Badania i pomiary cech geometrycznych warstwy z MMA

6.8.1 Częstość oraz zakres badań i pomiarów

Częstość oraz zakres badań i pomiarów podano dla warstwy ścieralnej podano w tabeli 7.

6.8.2 Szerokość warstwy

Szerokość wykonanej warstwy powinna być zgodna z szerokością projektowaną z tolerancją + 5 cm. Wymaga się, aby co najmniej 95% wykonanych pomiarów nie przekraczało dopuszczalnego odchylenia. 100% wykonanych pomiarów szerokości wykonanej warstwy powinna być zgodna z szerokością projektowaną z tolerancją + 7 cm.

6.8.3 Równość podłużna i poprzeczna warstwy ścieralnej

A. Ocena równości podłużnej warstwy wiążącej.

Do oceny równości podłużnej warstwy wiążącej nawierzchni dróg wszystkich klas technicznych, należy stosować metodę pomiaru ciągłego równoważną użyciu łąty i klina z wykorzystaniem planografu, umożliwiającego wyznaczanie odchyłeń równości podłużnej jako największej odległości (prześwitu) pomiędzy teoretyczną linią łączącą spody kółek jezdnych urządzenia a mierzoną powierzchnią warstwy [mm].

W miejscach niedostępnych dla planografu pomiar równości podłużnej warstwy wiążącej nawierzchni należy wykonać w sposób ciągły z użyciem łąty i klina. Długość łąty w pomiarze równości podłużnej powinna wynosić 4 m.

Wymagana równość podłużna jest określona przez maksymalne dopuszczalne wartości odchyłeń, które dla warstwy wiążącej zostały podane w tabeli 11.

Tabela 11. Dopuszczalne wartości odchyłeń równości podłużnej dla warstwy wiążącej

Klasa drogi	Element nawierzchni	Dopuszczalne wartości odchyłeń równości podłużnej warstwy wiążącej [mm]
A, S, GP	Pasy ruchu zasadnicze, awaryjne, dodatkowe, włączania i wyłączania, jezdnie łącznic	6
	Jezdnie MOP	9
G, Z	Pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, włączania i wyłączania, postojowe, jezdnie łącznic,	9
L, D, place, parkingi	Wszystkie pasy ruchu i powierzchnie przeznaczone do ruchu i postoju pojazdów	12

Pomiar równości podłużnej nawierzchni metodą łąty i klina

Pomiar równości podłużnej warstwy wiążącej nawierzchni z użyciem łąty (o długości 4 m) i klina należy wykonywać jedynie w miejscach niedostępnych dla sprzętu pomiarowego (stanowiska postojowe, zatoki autobusowe itp.). Pomiary równości podłużnej z wykorzystaniem łąty i klina należy wykonywać w osi podłużnej elementu drogi/pasa ruchu, w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni badanej warstwy. Pomiar należy wykonywać w sposób ciągły (początek każdego pomiaru łątą w miejscu zakończenia poprzedniego pomiaru). Klin należy podkładać pod łątę w miejscu, w którym prześwit jest największy (największe odchylenie równości). Wielkość prześwitu jest równa najmniejszej liczbie widocznej na klinie podłożonym pod łątę. Zasady oceny wyników pomiaru jak w tabeli 11.

B. Pomiar równości poprzecznej warstwy ścieralnej

Do oceny równości poprzecznej warstwy ścieralnej nawierzchni dróg klasy GP oraz G należy stosować metodę pomiaru profilometrycznego równoważną użyciu łąty i klina, umożliwiającą wyznaczenie odchylenia równości w

Do oceny równości poprzecznej warstwy wiążącej nawierzchni dróg wszystkich klas technicznych oraz placów i parkingów należy stosować metodę pomiaru profilometrycznego równoważną użyciu łąty i klina, umożliwiającą wyznaczenie odchylenia równości w przekroju poprzecznym pasa ruchu/elementu drogi. Odchylenie to jest obliczane jako największa odległość (prześwit) pomiędzy teoretyczną łątą (o długości 2 m) a

zarejestrowanym profilem poprzecznym warstwy. Do oceny równości poprzecznej dopuszcza się stosowanie metody łąty i klina. Metodą referencyjną oceny równości poprzecznej jest pomiar profilometryczny.

Efektywna szerokość pomiarowa jest równa szerokości mierzonego pasa (elementu) nawierzchni z tolerancją $\pm 15\%$. Wartość odchylenia równości poprzecznej należy wyznaczać z krokiem co 1 m, natomiast ocenie podlega wartość średnia z kolejnych 5 metrów

Dopuszczalne wartości odchylen zostały podane w tabeli 12.

Tabela 12. Dopuszczalne wartości odchylen równości poprzecznej dla warstwy wiążącej

Klasa drogi	Element nawierzchni	Dopuszczalne wartości odchylen równości poprzecznej warstwy wiążącej [mm]
A, S, GP	Pasy ruchu zasadnicze, awaryjne, dodatkowe, włączania i wyłączania, jezdnie łącznic	6
	Jezdnie MOP	9
G, Z	Pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, włączania i wyłączania, postojowe, jezdnie łącznic	9
L, D, place, parkingi	Wszystkie pasy ruchu i powierzchnie przeznaczone do ruchu i postoju pojazdów	12

Pomiar równości poprzecznej warstw nawierzchni z użyciem łąty i klina

Pomiar równości poprzecznej warstwy wiążącej nawierzchni z użyciem łąty (o długości 2 m) i klina należy wykonywać z krokiem nie rzadziej niż co 5 m. W czasie pomiaru łąta powinna leżeć prostopadłe do osi drogi i w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni badanej warstwy.

Klin należy podkładać pod łątę w miejscu, w którym prześwit jest największy (największe odchylenie równości). Wielkość prześwitu jest równa najmniejszej liczbie widocznej na klinie podłożonym pod łątę. Zasady oceny wyników podano w tabeli 12.

6.8.4 Spadki poprzeczne

Sprawdzenie polega na przyłożeniu łąty i pomiarze pochylenia pochyłomierzem lub pomiar profilografem laserowym lub pomiar metodami geodezyjnymi. Spadki poprzeczne warstwy wiążącej na odcinkach prostych i na łukach powinny być zgodne z spadkami poprzecznymi z tolerancją $\pm 0,5\%$.

Wymaga się, aby co najmniej 95% wykonanych pomiarów nie przekraczało przedziału dopuszczalnych odchylen. Dla 100% wykonanych pomiarów spadki poprzeczne warstwy wiążącej na odcinkach prostych i na łukach powinny być zgodne z spadkami poprzecznymi z tolerancją $\pm 0,7\%$. Spadek poprzeczny musi być wystarczający do zapewnienia sprawnego spływu wody.

6.8.5 Ukształtowanie osi w planie

Oś warstwy w planie powinna być usytuowana zgodnie z osią projektowaną z tolerancją ± 5 cm. Wymaga się, aby co najmniej 95% wykonanych pomiarów nie przekraczało przedziału dopuszczalnych odchylen. 100% wykonanych pomiarów ukształtowania osi w planie powinno być zgodne z osią projektowaną z tolerancją ± 7 cm.

6.8.6 Rzędne wysokościowe nawierzchni

Rzędne wysokościowe warstwy ścieralnej powinny być mierzone w przekrojach co 10m w osi i na krawędziach każdej jezdni. Przed przystąpieniem do robót Wykonawca przedstawi schemat punktów pomiarowych do akceptacji. Różnice pomiędzy rzędnymi wysokościowymi warstwy a rzędnymi projektowanymi nie powinny przekraczać ± 1 cm.

Wymaga się, aby co najmniej 95% wykonanych pomiarów nie przekraczało przedziału dopuszczalnych odchyłeń. Dla 100% wykonanych pomiarów różnice pomiędzy rzędnymi wysokościowymi warstwy ścieralnej a rzędnymi projektowanymi nie mogą przekraczać $\pm 1,5$ cm.

6.8.7 Złącza podłużne i poprzeczne

Złącza w nawierzchni powinny być wykonane w linii prostej, prostopadle lub równoległe do osi drogi.

W konstrukcji wielowarstwowej:

- złącza poprzeczne powinny być przesunięte względem siebie co najmniej o 3 m,
- złącza podłużne powinny być przesunięte względem siebie w kolejnych warstwach technologicznych o co najmniej o 30 cm w kierunku poprzecznym do osi jezdni.

Nie można lokalizować złącza podłużnego w śladach kół, a także w obszarze poziomego oznakowania jezdni. Złącza powinny być całkowicie związane, a przylegające warstwy powinny być w jednym poziomie.

6.8.8 Wygląd warstwy

Wygląd warstwy z MMA powinien być jednorodny, bez miejsc „przeasfaltowanych”, porowatych, łuszczących się i spękanych.

7 OBMIAR ROBÓT

7.1 Ogólne zasady obmiaru robót

Ogólne zasady obmiaru robót podano w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”.

7.2 Jednostka obmiarowa

Jednostką obmiarową jest m² (metr kwadratowy) wykonanej warstwy wiążącej z betonu asfaltowego (AC W).

8 ODBIÓR ROBÓT

Ogólne zasady odbioru robót podano w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”. Roboty uznaje się za wykonane zgodnie z Dokumentacją Projektową i niniejszej STWiORB, jeżeli wszystkie badania i pomiary z zachowaniem tolerancji wg pkt. 6 niniejszej STWiORB dały wyniki pozytywne.

Do odbioru ostatecznego uwzględniane są wyniki badań i pomiarów kontrolnych, badań i pomiarów kontrolnych dodatkowych, badań i pomiarów arbitrażowych do wyznaczonych odcinków częściowych.

8.1 Zasady postępowania z wadliwie wykonanymi robotami

Jeżeli wystąpią wyniki negatywne dla materiałów i robót (nie spełniające wymagań określonych w niniejszej STWiORB), to Inżynier/Inspektor Nadzoru/Zamawiający wydaje Wykonawcy polecenie przedstawienia programu naprawczego, chyba że na wniosek jednej ze stron kontraktu zostaną wykonane badania/pomiary kontrolne dodatkowe lub arbitrażowe (zgodnie z pkt. 6.4 lub 6.5 niniejszej STWiORB), a ich wyniki będą pozytywne. Wykonawca w programie tym jest zobowiązany dokonać oceny wpływu na trwałość konstrukcji nawierzchni, przedstawić sposób naprawienia wady lub wnioskować o zredukowanie ceny kontraktowej – naliczenie potrąceń według zasad określonych w Instrukcji DP-T 14 Ocena Jakości na Drogach Krajowych. Część I Roboty Drogowe.

Na zastosowanie programu naprawczego wyraża zgodę Inżynier/Inspektor Nadzoru/Zamawiający.

W przypadku braku zgody Inżyniera/Inspektora Nadzoru/Zamawiającego na zastosowanie programu naprawczego wszystkie materiały i roboty nie spełniające wymagań podanych w odpowiednich punktach

STWiORB zostaną odrzucone. Wykonawca wymieni materiały na właściwe i wykona prawidłowo roboty na własny koszt.

Jeżeli wymiana materiałów niespełniających wymagań lub wadliwie wykonane roboty spowodują szkodę w innych, prawidłowo wykonanych robotach, to również te roboty powinny być ponownie wykonane przez Wykonawcę na jego koszt.

9 PODSTAWA PŁATNOŚCI

9.1 Ogólne ustalenia dotyczące podstawy płatności

Ogólne ustalenia dotyczące podstawy płatności podano w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”.

9.2 Cena jednostki obmiarowej

Cena wykonania 1 m² warstwy wiążącej z betonu asfaltowego (AC W) obejmuje:

- prace pomiarowe i roboty przygotowawcze,
- oznakowanie robót,
- oczyszczenie i skropienie podłoża,
- dostarczenie materiałów i sprzętu,
- opracowanie recepty laboratoryjnej,
- wykonanie próby technologicznej i odcinka próbnego,
- wyprodukowanie mieszanki betonu asfaltowego i jej transport na miejsce wbudowania,
- posmarowanie lepiszczem lub pokrycie taśmą asfaltową krawędzi urządzeń obcych i krawężników,
- rozłożenie i zagęszczenie mieszanki betonu asfaltowego,
- uformowanie złączy, zagruntowanie środkiem gruntującym i przymocowanie taśm bitumicznych,
- posmarowanie krawędzi bocznych asfaltem,
- przeprowadzenie pomiarów i badań wymaganych w specyfikacji technicznej,
- odwiezienie sprzętu,
- wszelkie inne czynności związane z prawidłowym wykonaniem warstwy zgodnie z wymaganiami niniejszej STWiORB.

9.3 Sposób rozliczenia robót tymczasowych i prac towarzyszących

Cena wykonania robót określonych niniejszej STWiORB obejmuje:

- roboty tymczasowe, które są potrzebne do wykonania robót podstawowych, ale nie są przekazywane Zamawiającemu i są usuwane po wykonaniu robót podstawowych,
- prace towarzyszące, które są niezbędne do wykonania robót podstawowych, niezaliczane do robót tymczasowych, jak geodezyjne wytyczenie robót itd.

10 PRZEPISY ZWIĄZANE

10.1 Normy

1. ASTM D5334-08 Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure
2. PN-EN 12591 Asfalty i produkty asfaltowe - Wymagania dla asfaltów drogowych
3. PN-EN 12597 Asfalty i produkty asfaltowe - Terminologia
4. PN-EN 13808 Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Zasady klasyfikacji kationowych emulsji asfaltowych
5. PN-EN 14023 Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Zasady klasyfikacji asfaltów modyfikowanych polimerami

6. PN-EN 13924-2 Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Zasady klasyfikacji asfaltów drogowych specjalnych - Część 2: Asfalty drogowe wielorodzajowe
7. PN-EN 13043 Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu
8. PN-EN 932-3 Badania podstawowych właściwości kruszyw – Część 3: Procedura i terminologia uproszczonego opisu petrograficznego
9. PN-EN 932-5 Badania podstawowych właściwości kruszyw – Część 5: Wyposażenie podstawowe i wzorcowanie
10. PN-EN 933-1 Badania geometrycznych właściwości kruszyw - Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania
11. PN-EN 933-3 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 3: Oznaczanie kształtu ziaren za pomocą wskaźnika płaskości
12. PN-EN 933-4 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 4: Oznaczanie kształtu ziaren – Wskaźnik kształtu
13. PN-EN 933-5 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 5: Oznaczanie procentowej zawartości ziarn przekruszonych w kruszywie o grubym i o ciągłym uziarnieniu
14. PN-EN 933-6 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 6: Ocena właściwości powierzchni – Wskaźnik przepływu kruszyw
15. PN-EN 933-9 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 9: Ocena zawartości drobnych cząstek – Badania błękitem metylenowym
16. PN-EN 933-10 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 10: Ocena zawartości drobnych cząstek – Uziarnienie wypełniaczy (przesiewanie w strumieniu powietrza)
17. PN-EN 1097-2 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 2: Metody oznaczania odporności na rozdrabianie
18. PN-EN 1097-3 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Oznaczanie gęstości nasypowej i jamistości
19. PN-EN 1097-4 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 4: Oznaczanie pustych przestrzeni suchego, zagęszczonego wypełniacza
20. PN-EN 1097-5 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 5: Oznaczanie zawartości wody przez suszenie w suszarce z wentylacją
21. PN-EN 1097-6 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 6: Oznaczanie gęstości ziarn i nasiąkliwości
22. PN-EN 12697-1 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 1: Zawartość lepiszcza rozpuszczalnego
23. PN-EN 12697-2 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 2: Oznaczanie uziarnienia
24. PN-EN 12697-3 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań – Część 3: Odzyskiwanie asfaltu: Wyparka obrotowa
25. PN-EN 12697-4 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody– Część 4: Odzysk asfaltu - Kolumna do destylacji frakcyjnej
26. PN-EN 12697-5 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 5: Oznaczanie gęstości
27. PN-EN 12697-6 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 6: Oznaczanie gęstości objętościowej próbek mieszanki mineralno-asfaltowej
28. PN-EN 12697-8 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 8: Oznaczanie zawartości

wolnej przestrzeni próbek mineralno-asfaltowych

29. PN-EN 12697-10 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 10: Zagęszczalność
30. PN-EN 12697-11 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 11: Określenie powinowactwa pomiędzy kruszywem i asfaltem
31. PN-EN 12697-12 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badania– Część 12: Określanie wrażliwości na wodę próbek mineralno-asfaltowych
32. PN-EN 12697-17 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 17: Ubytek ziaren w próbkach porowatego asfaltu
33. PN-EN 12697-18 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 18: spływność lepiszcza
34. PN-EN 12697-20 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 20: Badanie penetracji na próbkach sześciennych lub cylindrycznych (CY)
35. PN-EN 12697-22 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 22: Koleinowanie
36. PN-EN 12697-23 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badania– Część 23: oznaczanie wytrzymałości mieszanki mineralno-asfaltowej na rozciąganie pośrednie
37. PN-EN 12697-24 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 24: Odporność na zmęczenie
38. PN-EN 12697-25 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 25: Badanie cyklicznego ściskania
39. PN-EN 12697-26 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 26: Sztywność
40. PN-EN 12697-27 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 27: Pobieranie próbek
41. PN-EN 12697-28 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 28: Przygotowanie próbek do oznaczania zawartości lepiszcza, zawartości wody i uziarnienia
42. PN-EN 12697-29 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 29: Oznaczanie wymiarów próbki z mieszanki mineralno-asfaltowej
43. PN-EN 12697-30 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 30: Przygotowanie próbek zagęszczonych przez ubijanie
44. PN-EN 12697-31 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 31: Probki przygotowane w prasie żyrowej
45. PN-EN 12697-33 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metoda badania– Część 33: Przygotowanie próbek zagęszczanych urządzeniem wałującym
46. PN-EN 12697-35 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 35: Mieszanie laboratoryjne
47. PN-EN 12697-38 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 38: Podstawowe wyposażenie i kalibracja
48. PN-EN 12697-40 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 40: Wodoprzepuszczalność nawierzchni „in-situ”
49. PN-EN 12697-42 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 42: Zawartość części obcych w destrukcie asfaltowym
50. PN-EN 14188-1 Wypełniacze szczelin i zalewy drogowe - Część 1: Wymagania wobec zalew drogowych na gorąco

51. PN-EN 12272-1 Powierzchniowe utrwalenie - Metody badań - Część 1: Dozowanie i poprzeczny rozkład lepiszcza i kruszywa
52. PN-EN 13108-1 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Wymagania - Część 1: Beton asfaltowy
53. PN-EN 13108-8 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Wymagania - Część 8: Destrukt asfaltowy
54. PN-EN 13108-20 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Wymagania - Część 20: Badanie typu
55. PN-EN 13108-21 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Wymagania - Część 21: Zakładowa Kontrola Produkcji
56. PN-EN 13036-5 Cechy powierzchniowe nawierzchni drogowych i lotniskowych - Metody badań - Część 5: Określanie wskaźników nierówności podłużnej
57. PN-EN 13036-6 Właściwości nawierzchni drogowych i lotniskowych – Metody badań – Część 6 : Pomiary poprzecznych i podłużnych profili w zakresie długości fali równości i megatekstury
58. PN-EN 13036-8 Właściwości nawierzchni drogowych i lotniskowych – Metody Badań – Część 8 : Określenie wskaźników nierówności poprzecznej
59. PN-EN 12697-36 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 36: Określanie grubości nawierzchni asfaltowej
60. PN-EN 12697-46 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 46: Pękanie niskotemperaturowe i właściwości w badaniach osiowego rozciągania
61. PN-EN 13398 Asfalty i lepiszcza asfaltowe -- Oznaczanie nawrotu sprężystego asfaltów modyfikowanych

10.2 Inne dokumenty

1. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 24 czerwca 2022 r. w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących dróg publicznych (Dz.U. 2022 poz. 1518)
2. Ustawa o odpadach z dnia 14 grudnia 2012 (Dz. U. 2013 poz. 21 z późn. zm.)
3. Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 23 grudnia 2021 r. w sprawie określenia szczegółowych warunków utraty statusu odpadów dla odpadów destruktu asfaltowego (Dz.U. 2021 poz. 2468)
4. WT-1 2014 Kruszywa do nawierzchni drogowych i powierzchniowych utrwaleń na drogach krajowych
5. WT-2 2014 – część I Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania Techniczne. Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych.
6. WT-2 2016 – część II Wykonanie warstw nawierzchni asfaltowych. Wymagania techniczne.
7. Instrukcja laboratoryjnego badania szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych wg. metody Leutnera i wymagania techniczne szczepności” Politechnika Gdańska 2014.
8. Instrukcja DP-T 14 Ocena jakości na drogach krajowych. Część I-Roboty drogowe.
9. Projekt RID I/6 Wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu: Załącznik nr 9.2.1, Załącznik nr 9.2.2, Załącznik nr 9.2.3.

SZCZEGÓŁOWA SPECYFIKACJA TECHNICZNA WYKONANIA I ODBIORU ROBÓT BUDOWLANYCH

NAWIERZCHNIA SAMOODŁADZAJĄCA Z BETONU ASFALTOWEGO. WARSTWA ŚCIERALNA

D-05.03.05B

ZAŁĄCZNIK NR 3.2 DO PRACY DOKTORSKIEJ

1 Wstęp

1.1 Nazwa zadania

„...” – podać nazwę kontraktu

1.2 Przedmiot Szczegółowej Specyfikacji Technicznej Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (SSTWiORB)

Przedmiotem niniejszej Szczegółowej Specyfikacji Technicznej Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych są wymagania dotyczące wykonania i odbioru robót związanych z wykonaniem warstwy ścieralnej z betonu asfaltowego KR1-KR6 w konstrukcji nawierzchni samoodladzającej.

1.3 Zakres stosowania SSTWiORB

Szczegółowa Specyfikacja Techniczna Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych jest stosowana jako dokument przetargowy i kontraktowy przy zlecaniu i realizacji robót wymienionych w punkcie 1.1 na drogach publicznych. Została opracowana na podstawie Warunków Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (WWiORB).

1.4 Informacje ogólne o terenie budowy

„...” – uzupełnić znając szczegóły kontraktu

1.5 Określenia podstawowe

Definicje i określenia podano w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”, oraz w przepisach związanych wyszczególnionych w pkt. 10 niniejszej SSTWiORB.

1.6 Ogólne wymagania dotyczące Robót

Ogólne wymagania dotyczące robót podano w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”.

2 Materiały

Ogólne wymagania dotyczące materiałów, ich pozyskiwania i składowania podano w OST D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne” pkt. 2.

Wszystkie zastosowane materiały budowlane powinny być dopuszczone do obrotu i stosowania oraz posiadać deklarację właściwości użytkowych (DWU) oraz certyfikat CE lub deklarację zgodności ze znakiem B. Za jakość stosowanych materiałów odpowiada Wykonawca. Producenci wszystkich materiałów powinni mieć wdrożoną Zakładową Kontrolę Produkcji (ZKP) wyrobu, w systemie 4 zgodnie z normami lub aktualną Aprobata Techniczną.

2.1 Rodzaje materiałów

Rodzaje materiałów stosowanych do mieszanki mineralno-asfaltowej podano w tabeli 1.

Tabela 1. Rodzaje materiałów do mieszanki mineralno-asfaltowej

L.p.	Rodzaj materiału	Wymagania wg / dokument odniesienia	
		KR 1-2	KR 3-6
1.	Kruszywo grube ²⁾	WT-1 Kruszywa 2014, tabela 12	
2.	Kruszywo drobne ²⁾ lub o ciągłym uziarnieniu ²⁾ D _{≤8}	WT-1 Kruszywa 2014, tabela 13 i 14	WT-1 Kruszywa 2014, tabela 14
3.	Wypełniacz ³⁾	WT-1 Kruszywa 2014, tabela 15	

4.	Lepiszczce	WT-2 2014 – część I pkt 8.2.3.1 tab. 15, PN-EN 14023, PN-EN 13924-2, PN-EN 12591 (możliwość stosowania asfaltu 50/70 jedynie dla KR 1-3)	
5.	Granulat asfaltowy	pkt. 2.1.1. SSTWiORB, PN-EN 13108-8, RID I/6 Załącznik nr 9.2.1, Załącznik 9.2.2 i Załącznik nr 9.2.3	
6.	Środek adhezyjny	wg p. 4.1 PN-EN 13108-1	
7.	Mieszanka mineralno-asfaltowa	WT-2 2014 – część I pkt 8.2.3.2 tab. 16 i pkt 8.2.3.3 tab. 18	WT-2 2014 – część I pkt 8.2.3.2 tab. 17 i pkt 8.2.3.3 tab. 19
1) badanie ITSR wg Załącznika 1 do WT-2 2014 cz. I 2) Stosowane kruszywo ze względu na konstrukcję nawierzchni jako nawierzchni samoodladzającej powinno zostać wybrane spośród granitów oraz szarogłazów 3) Jako wypełniacz można zastosować zamiennie do standardowych rozwiązań grafit, który poprawia właściwości termiczne mieszanki mineralno-asfaltowej W zaprojektowanej mieszance mineralnej należy zapewnić, aby obliczona proporcja frakcji 0/2 (z wyłączeniem wypełniacza) kruszywa drobnego łamanego (w przypadku stosowania mieszanki łamanej o uziarnieniu ciągłym o D₈ mm do obliczeń należy przyjąć wyłącznie procentową zawartość frakcji 0/2mm w tym kruszywie) do kruszywa drobnego niełamanego, stanowiła co najmniej 50/50. Dla kategorii KR 1-2 dopuszcza się stosowanie w mieszance mineralnej do 100% kruszywa drobnego niełamanego Projektowanie mieszanki mineralno-asfaltowej wg WT-2 2014 – część I pkt. 8. W przypadku stosowania granulatu asfaltowego należy na etapie projektowania mieszanki mineralno-asfaltowej stosować się do wytycznych opisanych w Załączniku nr 9.2.1, Załączniku 9.2.2 i Załączniku nr 9.2.3 RID I/6			

2.1.1 Granulat asfaltowy

Granulat asfaltowy należy stosować zgodnie z wymaganiami podanymi w normie PN-EN 13108-8 oraz Załączniku nr 9.2.1, Załączniku 9.2.2 i Załączniku nr 9.2.3 RID I/6. Mieszanki mineralno-asfaltowe zawierające granulat asfaltowy muszą posiadać parametry odpowiadające ich rodzajowi oraz przeznaczeniu, zgodnie z wymaganiami niniejszej STWiORB.

2.1.1.1 Zasady stosowania granulatu asfaltowego

Zakres stosowania granulatu asfaltowego w mieszankach mineralno-asfaltowych typu AC S, zależy od następujących czynników:

- pochodzenia granulatu asfaltowego,
- jakości granulatu asfaltowego, a w szczególności właściwości lepiszcza, właściwości kruszywa i jednorodności granulatu,
- rodzaju nowego lepiszcza.

Właściwości lepiszcza asfaltowego, które powstanie z połączenia starych i nowych składników, muszą spełniać wymagania stawiane tym materiałom, ze względu na typ i przeznaczenie mieszanki mineralno-asfaltowej.

1. Nie wykonuje się badań właściwości kruszywa odzyskanego z destruktu (z wyjątkiem określenia rodzaju kruszyw grubych w destrukcie na podstawie uproszczonego opisu petrograficznego według PN-EN 932-3, pod warunkiem że:

W przypadku dróg zarządzanych przez GDDKiA:

- a) warstwa z mma została wykonana po 31.12.2000 r. – na podstawie informacji uzyskanej od Zarządcy drogi lub przekazanej dokumentacji archiwalnej oraz
- b) przekazane zostaną informacje dot. klasy i numeru drogi, KR, rodzaju warstwy oraz
- c) destruktu asfaltowy będzie pozyskiwany selektywnie z danej warstwy asfaltowej i wykorzystywany zgodnie z tabelą 2

W przypadku dróg zarządzanych przez innych zarządców:

- a) warstwa z mma została wykonana po 31.12.2000 r. – na podstawie informacji uzyskanej od Zarządcy drogi lub przekazanej dokumentacji archiwalnej oraz
- b) destrukta asfaltowy będzie pozyskiwany selektywnie z danej warstwy asfaltowej i wykorzystywany zgodnie z tabelą 2 oraz
- c) potwierdzono właściwości kruszywa (należy przez to rozumieć potwierdzenie zgodności parametrów kruszywa z odpowiednimi wymaganiami dla kruszyw stosowanych w warstwie ścieralnej z AC) – na podstawie informacji uzyskanej od Zarządcy drogi lub przekazanej dokumentacji archiwalnej.

2. W przypadku braku możliwości potwierdzenia właściwości kruszywa na podstawie dokumentacji archiwalnej o jego wcześniejszym zastosowaniu (zgodnie z wymaganiami pkt 1) i/lub chęci zastosowania kruszywa z destrukta do warstwy konstrukcyjnej z innej mieszanki mma lub do drogi o wyższej kategorii ruchu niż wynikało to z pierwotnego zastosowania kruszywa, należy wykonać badania zgodne z poniższym zakresem:

- odporność na rozdrabnianie wg normy PN-EN 1097-2 (frakcja 4-8, 8-11 lub 10- 14mm),
- grube zanieczyszczenia lekkie wg normy PN-EN 1744-1 pkt 14.2,
- ocena zawartości drobnych cząstek - badanie błękitem metylenowym wg normy PN EN 933-9,
- mrozoodporność w soli na frakcji zgodnie z PN-EN 1367-6
- procentowa zawartość ziarn przekruszonych w kruszywie o grubym i o ciągłym uziarnieniu według normy PN-EN 933-5.

Wyniki badań powinny spełniać wymagania podane w WT-1 (dla określonej warstwy konstrukcyjnej i kategorii ruchu w odniesieniu do warstwy, w której zastosowany zostanie destrukta).

Tabela. 2 Możliwość zastosowania kruszywa z granulatu asfaltowego w nowych mieszankach mineralno-asfaltowych, w zależności od jego pochodzenia

Pochodzenie granulatu	Przeznaczenie mma z granulem									
	AC P KR1-2	AC P KR3-7	AC W KR1-2	AC W KR3-7	AC S KR1-2	AC S KR3-4	AC WMS P KR3-7	AC WMS W KR3-7	SMA KR1-2	SMA KR3-7
AC P KR1-2	Możliwe	Nie	Nie	Nie	Nie	Nie	Nie	Nie	Nie	Nie
AC P KR3-7	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie	Nie	Nie	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie
AC W KR1-2	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie	Nie	Nie	Nie	Nie	Nie
AC W KR3-7	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie
AC S KR1-2	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie	Nie	Nie	Nie
AC S KR3-4	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie
AC WMS P KR3-7	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie	Nie	Nie	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie
AC WMS W KR3-7	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie	Możliwe	Możliwe	Nie	Nie
SMA KR1-2	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Nie
SMA KR3-7	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe	Możliwe
Możliwe – możliwość stosowania kruszywa pochodzącego z destruktu, przy spełnieniu warunku 1 lub warunku 2 pkt. 2.1.1.2										
Nie – brak możliwości zastosowania kruszywa z destruktu										

Procentowe zawartości granulatu asfaltowego określa się na podstawie maksymalnej wartości wskaźnika zastąpienia lepiszcza BR [%], obliczanego następująco:

$$BR = (a \times b)/c$$

gdzie:

BR – wskaźnik zastąpienia lepiszcza [% (m/m)],

a – zawartość lepiszcza rozpuszczalnego w granulacie asfaltowym [% (m/m)],

b – udział granulatu asfaltowego w mieszance mineralno-asfaltowej [% (m/m)],

c – całkowita zawartość lepiszcza rozpuszczalnego w mieszance mineralno-asfaltowej % (m/m)].

Tabela 3. Dopuszczalne wartości wskaźnika BR [%]

Typ betonu asfaltowego	Dopuszczalna wartość wskaźnika zastąpienia lepiszcza BR [%] w przypadku dozowania granulatu asfaltowego w otaczarce metodą	
	na zimno	na gorąco
AC S	10	30 ¹⁾

1) W przypadku mieszank AC S o podwyższonej wartości wskaźnika BR, odpowiednio do 30%, przy dozowaniu granulatu asfaltowego metodą na gorąco - na zasadzie indywidualnego dopuszczenia przez Zamawiającego po przeprowadzeniu badań dodatkowych określonych w tabeli 6.1. Załącznika nr 9.2.3 RID I/6 dla KR1-2 lub badania odporności na spękania niskotemperaturowe wg PN-EN 12697-46 dla KR3-7.

Jeżeli w projektowanej mieszance mineralno-asfaltowej przewidziano użycie:

– asfaltu modyfikowanego,

– granulatu asfaltowego zawierającego asfalt modyfikowany i w projektowanej mieszance mineralno-asfaltowej przewidziano użycie zwykłego asfaltu drogowego,

zastosowanie granulatu asfaltowego może nastąpić na zasadzie indywidualnego dopuszczenia (po przeprowadzeniu badań dodatkowych określonych w tabeli 6.1. Załącznika nr 9.2.3 RID I/6) dla KR1-2 lub badania odporności na spękania niskotemperaturowe wg PN-EN 12697-46 dla KR3-7. Wynik badania na spękania niskotemperaturowe wg PN-EN 12697-46 $\leq$ powinien wynosić -22°C .

2.1.1.2 Wymagania dla granulatu asfaltowego

W przypadku stosowania granulatu asfaltowego do produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych typu beton asfaltowy do warstwy ścieralnej AC S to musi on spełniać wymagania określone w tabeli 4.

Tabela 4. Wymagane właściwości granulatu asfaltowego stosowanego do mieszanek mineralno-asfaltowych typu AC S

Właściwość			Wymagania	Dokument odniesienia
Zawartość materiałów obcych			Kategoria FM1	PN-EN 13108-8 pkt. 4.1
Właściwości lepiszcza odzyskanego w granulacie asfaltowym a)	Pochodzący z destruktu, w którego składzie znajduje się asfalt drogowy	PiK	Kategoria S ₇₀ ** Wartość średnia temperatury mięknięcia nie może być wyższa niż 70oC. Pojedyncze wartości temperatury mięknięcia nie mogą przekraczać 77oC.	PN-EN 13108-8 pkt. 4.2 PN-EN 13108-20 Załącznik A
		Pen.	Kategoria P ₁₅ ** Wartość średnia nie może być mniejsza niż 15x0,1mm. Pojedyncze wartości penetracji nie mogą być mniejsze niż 10x0,1mm.	
	Pochodzący z destruktu, w którego składzie znajdują się asfalty modyfikowane *	PiK	Wartość średnia kategoria S _{dec}	
		Pen.	Wartość średnia kategoria P _{dec}	
Jednorodność			Wymagana jednorodność określona na podstawie dopuszczalnego rozstępu wyników badań określonych właściwości	Załącznik nr 9.2.1 i Załącznik nr 9.2.3 RID I/6
Zawartość asfaltu			PN-EN 13108-20 Załącznik A	
Uziarnienie kruszywa			Załącznik nr 9.2.1 i Załącznik nr 9.2.3 RID I/6 Dopuszcza się deklarowanie właściwości kruszywa mineralnego w granulacie asfaltowym na podstawie zadeklarowanego, wcześniejszego zastosowania. W przypadku braku możliwości takiego zadeklarowania jakości kruszywa w granulacie oraz wątpliwości co do właściwości fizycznych lub mechanicznych, należy przeprowadzić badania kruszywa w wymaganym przez Zamawiającego zakresie	

a) do sklasyfikowania lepiszcza odzyskanego w granulacie asfaltowym należy oznaczyć następujące właściwości w zależności od wskaźnika BR:
 BR≤15%: temperaturę mięknięcia PiK. lub penetrację,
 BR>15%: temperaturę mięknięcia PiK. i penetrację.
 * W przypadku gdy wartość badania nawrotu sprężystego wg PN-EN 13398 wynosi co najmniej 40%
 ** W przypadku przekroczenia wartości temperatury mięknięcia i/lub penetracji, należy zastosować indywidualne projektowanie mieszanki mineralno-asfaltowej, przy zachowaniu wymagań dla mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych do warstwy ścieralnej o odpowiedniej KR, przy spełnieniu wymagań pkt. 2.1.1.1. niniejszej STWiORB

2.2 Wymagania wobec innych materiałów

2.2.1 Materiały do połączeń technologicznych oraz wypełnienia bruzd z instalacją grzewczą umieszczoną w istniejącej warstwie wiążącej

Do uszczelniania połączeń technologicznych należy stosować materiały zgodnie z pkt. 7.6.1 WT-2 2016 – część II i wg tabel 5 i 6 niniejszej STWiORB.

Do wypełniania bruzd z instalacją grzewczą umieszczoną w istniejącej warstwie wiążącej zalecane jest zastosowanie materiałów zgodnie z pkt. 7.6.1 WT-2 2016 – część II i wg tabel 5 i 6 niniejszej STWiORB. Należy jednakże sprawdzić wpływ tych materiałów na instalację oraz sprawdzić czy są zgodne z zaleceniami producenta materiałów zastosowanych do instalacji grzewczej.

Tabela 5. Materiały do złączy (podłużnych i poprzecznych wykonywanych metodą „gorące przy zimnym”)

Rodzaj warstwy	Złącze podłużne		Złącze poprzeczne	
	Ruch	Rodzaj materiału	Ruch	Rodzaj materiału
Warstwa ścieralna	KR 1-2	Pasty asfaltowe lub elastyczne taśmy bitumiczne + środek gruntujący (zgodnie z zaleceniami Producenta)	KR 1-2	Pasty asfaltowe lub elastyczne taśmy bitumiczne + środek gruntujący (zgodnie z zaleceniami Producenta)
	KR 3-7	Elastyczne taśmy bitumiczne + środek gruntujący (zgodnie z zaleceniami Producenta)	KR 3-7	Elastyczne taśmy bitumiczne + środek gruntujący (zgodnie z zaleceniami Producenta)

Tabela 6. Materiały do spoin między fragmentami zagęszczonej MMA i elementami wyposażenia drogi,

Rodzaj warstwy	Ruch	Rodzaj materiału
Warstwa ścieralna	KR 1-2	Pasta asfaltowa
	KR 3-7	Elastyczna taśma bitumiczna + środek gruntujący lub zalewa drogowa na gorąco (zgodnie z zaleceniami Producenta)

Uwaga: W przypadku elastycznych taśm bitumicznych należy zastosować środek do gruntowania powierzchni połączeń technologicznych przewidziany przez producenta taśm.

Materiały do połączeń technologicznych muszą spełniać wymagania sformułowane w tabelach 10, 11 i 12 z WT-2 2016 – część II. Zalewy drogowe na gorąco muszą spełniać wymagania dla typu N1 wg normy PN-EN 14188-1 tablica 2 punkty od 1 do 11.2.8

2.2.2 Lepiszcze do skropienia podłoża

Lepiszcze do skropienia podłoża powinno spełniać wymagania podane PN-EN 13808.

2.2.3 Dodatki do mieszanki mineralno-asfaltowej

Za zgodą Zamawiającego mogą być stosowane dodatki stabilizujące lub modyfikujące. Pochodzenie, rodzaj i właściwości dodatków powinny być deklarowane. Skuteczność stosowanych dodatków i modyfikatorów powinna być udokumentowana zgodnie z PN-EN 13108-1 punkt 4.1.

Zaleca się stosowanie do mieszanek mineralno-asfaltowych, dodatku środka obniżającego temperaturę produkcji i układania – nie dotyczy to produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych z dozowaniem granulatu asfaltowego w technologii „na zimno”.

Do mieszanek mineralno-asfaltowych może być stosowany dodatek asfaltu naturalnego, jeżeli spełnia wymagania podane w PN-EN 13108-4 Załącznik B.

2.3 Dostawy materiałów

Za dostawy materiałów odpowiedzialny jest Wykonawca robót zgodnie z ustaleniami określonymi w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”.

Do obowiązku Wykonawcy należy takie zorganizowanie dostaw materiałów do wytwarzania MMA, aby zapewnić nieprzerwaną pracę otaczarni w trakcie wykonywania dziennej działki roboczej. Jakość każdej dostawy kruszywa i wypełniacza musi być potwierdzona deklaracją producenta (oznakowanie CE). Do każdej partii granulatu asfaltowego należy dołączyć dokumenty określone w normie PN-EN 13108-8 pkt. 6

2.4 Składowanie materiałów

2.4.1 Składowanie kruszywa

Składowanie kruszywa powinno odbywać się w warunkach zabezpieczających je przed zanieczyszczeniem i zmieszaniem z innymi rodzajami lub frakcjami kruszywa. Kruszywo powinno być składowane na utwardzonym i odwodnionym podłożu.

2.4.2 Składowanie wypełniacza

Wypełniacz należy składować w silosach wyposażonych w urządzenia do aeracji.

2.4.3 Składowanie asfaltu

Lepiszcze asfaltowe należy przechowywać zgodnie z zasadami podanymi w pkt. 8.3 WT-2 2014 – część I. Zbiorniki na asfalt modyfikowany winny być wyposażone w mieszadła mechaniczne lub co najmniej winny mieć zapewniony system przepompowywania wprawiający w cyrkulację asfalt z dolnych partii zbiornika. Maksymalne temperatury składowania asfaltu drogowego powinny być zgodne z tabelą 41 ww. wytycznych, co nie dotyczy przypadków użycia dodatków obniżających temperaturę produkcji i wbudowania lepiszczy zawierających takie środki, lub specjalnych technologii produkcji i wbudowywania w obniżonej temperaturze tj. z użyciem asfaltu spienionego.

2.4.4 Składowanie środka adhezyjnego

Składowanie środka adhezyjnego jest dozwolone tylko w oryginalnych opakowaniach producenta w warunkach podanych zgodnie z zaleceniami producenta.

2.4.5 Składowanie granulatu asfaltowego

Składowanie granulatu asfaltowego powinno odbywać się w warunkach zabezpieczających je przed:

- segregacją – zaleca się formowanie hałd o kształcie stożkowym o wysokości max. do 8m,
- zanieczyszczeniem i zmieszaniem z innymi rodzajami lub frakcjami granulatu,
- zawilgoceniem – ochrona granulatu asfaltowego przed opadami atmosferycznymi;

W przypadku dozowania „na zimno” obowiązkowe jest składowanie granulatu pod zadaszeniem lub przykryciem.

Powierzchnię na której będzie składowany granulatu asfaltowy należy utwardzić i ukształtować z wyraźnym spadkiem przeciwdziałającym akumulacji wody w hałdzie.

Podczas składowania granulatu asfaltowego należy postępować zgodnie z zasadami określonymi w Załączniku nr 9.2.1 i Załączniku nr 9.2.2 RID I/6.

3 SPRZĘT

Ogólne wymagania dotyczące sprzętu podano w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”.

3.1 Wytwórnia mieszanek mineralno-asfaltowych

Produkcja mieszanki mineralno-asfaltowej powinna odbywać się na WMA o cyklicznym systemie produkcji mieszanki. WMA powinna prowadzić system ZKP (Zakładowa Kontrola Produkcji) zgodnie z wymaganiami PN-EN 13108-21, certyfikowany przez jednostkę notyfikowaną. Dozowanie wszystkich składników powinno odbywać się wagowo, dopuszcza się objętościowe dozowanie środka adhezyjnego.

Wytwórnia powinna być wyposażona w automatyczny system sterowania produkcją, z możliwością rejestracji danych produkcyjnych dla każdego zarobu, ich odtworzenia i drukowania w cyklu dziennym.

W przypadku wykorzystania destruktu asfaltowego w technologii „na gorąco”, Wykonawca musi mieć dostępną wytwórnię mieszanek mineralno-asfaltowych, wyposażoną w instalację do recyklingu w technologii „na gorąco” z równoległym bębniem do dozowania granulatu asfaltowego - metoda „równoległego bębna”.

3.2 Układarka mieszanek mineralno-asfaltowych

Układanie mieszanki powinno odbywać się możliwie największą szerokością, przy użyciu mechanicznej układarki do układania mieszanki mineralno-asfaltowej lub zespołem układarek pracujących równolegle z przesunięciem roboczym umożliwiającym ułożenie stykających się warstw asfaltowych na gorąco, posiadającej następujące urządzenia:

- automatyczne sterowanie pozwalające na ułożenie warstwy zgodnie z założoną niweletą i grubością,
- urządzenie do wstępnego zagęszczania mieszanki z systemem podgrzewania

Mieszanki mineralno-asfaltowe można rozkładać specjalną maszyną drogową z podwójnym zestawem rozkładającym do układania dwóch warstw technologicznych w jednej operacji (tzw. asfaltowe warstwy kompaktowe).

3.3 Walce do zagęszczania

Wykonawca powinien dysponować sprzętem pozwalającym na uzyskanie wymaganych parametrów zagęszczenia warstwy z mieszanki mineralno-asfaltowej.

W przypadku umieszczenia w konstrukcji drogi instalacji grzewczej należy uzgodnić typ walca z producentem instalacji, aby nie dopuścić do jej uszkodzenia.

3.4 Skrapiarki

Wykonawca powinien dysponować skrapiarką, pozwalającą na równomierne i zgodne z wymaganiami równomierne skropienie podłoża.

4 TRANSPORT

Ogólne wymagania dotyczące transportu podano w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”. Mieszanki mineralno-asfaltowe powinny być dowożone na budowę odpowiednio do postępu robót, tak aby zapewnić ciągłość wbudowania. Podczas transportu i postoju przed wbudowaniem mieszanki powinny być zabezpieczone przed ostygnięciem i dopływem powietrza (przykrycie, pojemniki termoizolacyjne lub pojazdy ogrzewane itp.). Mieszanki mineralno-asfaltowe, powinny być przewożone pojazdami samowyładowczymi.

Podczas transportu mieszanki mineralno-asfaltowej muszą być zachowane dopuszczalne wartości temperatury. Dowieziona do rozkładarki mieszanka musi mieć temperaturę w wymaganym przedziale określonym w WT-2 2014 – część I tab. 42. Nie dotyczy to przypadków użycia dodatków obniżających temperaturę produkcji i wbudowania lepiszczy zawierających takie środki, lub specjalnych technologii produkcji i wbudowywania w obniżonej temperaturze tj. z użyciem asfaltu spienionego. W tym zakresie należy kierować się informacjami (zaleceniami) podanymi przez producentów tych środków.

Powierzchnie skrzyń ładunkowych lub pojemników używanych do transportu mieszanki powinny być czyste. Do zwilżania tych powierzchni można używać tylko tego rodzaju środków antyadhezyjnych, które nie oddziałują szkodliwie na mieszanki mineralno-asfaltowe. Zabrania się skrapiania skrzyń olejem napędowym lub innymi środkami ropopochodnymi.

5 WYKONANIE ROBÓT

Ogólne zasady wykonania robót podano w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”.

5.1 Projektowanie mieszanki mineralno-asfaltowej

W terminie 3 tygodni przed rozpoczęciem robót Wykonawca przedstawi Inżynierowi/Inspektorowi Nadzoru do zatwierdzenia projekt MMA (Badanie Typu) oraz wszystkie dokumenty potwierdzające jakość materiałów składowych MMA i reprezentatywne próbki materiałów. MMA powinna być zaprojektowana zgodnie z pkt. 8.1 i 8.2.3 WT-2 2014 – część I w zależności od kategorii ruchu.

Ze względu na wykonanie nawierzchni w technologii nawierzchni samoodladzającej, na etapie projektowania należy dodatkowo skontrolować współczynnik przewodności cieplnej mieszanki mineralno-asfaltowej. Zalecana wartość dla zapewnienia jak najlepszych efektów w trakcie działania instalacji: współczynnik przewodności cieplnej k wynoszący nie mniej niż 1,7 W/mK. Dopuszcza się też inne sprawdzone metody badania współczynnika przewodności cieplnej, przy czym metodą referencyjną jest metoda TLS stosowana w mierniku KD2Pro Thermal Analyzer. Przy wyznaczeniu współczynnika przewodności cieplnej stosowana jest procedura opisana normą ASTM D5334-08

W przypadku stosowania granulatu asfaltowego należy na etapie projektowania mieszanki mineralno-asfaltowej stosować się do wytycznych określonych w Załączniku nr 9.2.1, Załączniku 9.2.2 i Załączniku nr 9.2.3 RID I/6.

Wykonawca powinien zapewnić, aby podczas opracowywania Badania Typu MMA, były zastosowane w pełni reprezentatywne próbki materiałów składowych, które zostaną użyte do wykonania robót.

5.2 Wytwarzanie MMA

Produkcja MMA powinna odbywać się na WMA o cyklicznym systemie produkcji mieszanki, zgodnie z wymaganiami opisanymi w p. 3.1. Dozowanie wszystkich składników powinno odbywać się wagowo, dopuszcza się objętościowe dozowanie środka adhezyjnego. W przypadku stosowania granulatu asfaltowego do produkcji MMA należy:

- stosować się do wytycznych opisanych w Załączniku nr 9.2.2 RID I/6.
- Przekazywać lub udostępniać Inżynierowi/Inspektorowi Nadzoru wydruki z WMB potwierdzające, że ilość zadozowanego granulatu asfaltowego jest zgodna z zaakceptowanym przez Inżyniera/Inspektora

Nadzoru Badaniem Typu.

Temperatury technologiczne wytwarzania MMA powinny być zgodne z wymaganiami podanymi w p. 8.3 WT-2 2014 część I (Tabela 42), co nie dotyczy przypadków użycia dodatków obniżających temperaturę produkcji i wbudowania lepiszczy zawierających takie środki, lub specjalnych technologii produkcji i wbudowywania w obniżonej temperaturze tj. z użyciem asfaltu spienionego. Mieszanke MMA zaleca się wbudowywać bezpośrednio po wyprodukowaniu bez magazynowania na zapas. Przechowywanie wyprodukowanej MMA w silosie może mieć miejsce tylko w sytuacjach awaryjnych.

Jeżeli mieszanka mineralno-asfaltowa jest dostarczana z kilku wytwórni lub od kilku producentów, to należy zapewnić zgodność typu i wymiaru mieszanki oraz spełnienie wymagań dokumentacji projektowej.

5.3 Przygotowanie podłoża

W przypadku wykonywania instalacji grzewczej w istniejącej warstwie wiążącej należy wykonać bruzdy w warstwie wiążącej, umieścić instalację z wymaganym oprzyrządowaniem oraz zalać masą zalewową. Czynności te należy wykonać przed ostatecznym przygotowaniem podłoża pod warstwę ścieralną.

Podłoże pod warstwę ścieralną z MMA powinno być:

- nośne i ustabilizowane,
- czyste, bez zanieczyszczeń lub pozostałości luźnego kruszywa,
- wyprofilowane, równe i bez kolein,
- suche,
- skropione emulsją asfaltową zapewniającą powiązanie warstw, oraz spełniać wymagania pkt. 7.2. WT-2 2016 – część II.

Brzegi krawężników i innych urządzeń przylegających do nawierzchni powinny zostać połączone z MMA zgodnie z pkt. 7.6.4 WT-2 2016 – część II (sposób wykonania spoin) i przy zastosowaniu materiałów określonych w pkt. 2.2.1 niniejszej STWiORB

5.3.1 Połączenia międzywarstwowe

Uzyskanie wymaganej trwałości nawierzchni jest uzależnione od zapewnienia połączenia między warstwami oraz ich współpracy w przenoszeniu obciążeń nawierzchni wywołanych ruchem pojazdów.

Zapewnienie połączenia międzywarstwowego wymaga starannego przygotowania podłoża, na którym będą układane kolejne warstwy asfaltowe, zastosowania odpowiedniej emulsji asfaltowej oraz właściwego wykonania skropienia.

Skropienie emulsją asfaltową ma na celu zwiększenie siły połączenia pomiędzy warstwami konstrukcyjnymi oraz zabezpieczenie przed wnikaniem i zaleganiem wody pomiędzy warstwami.

Do skropień należy stosować rodzaj emulsji i ilość w zależności od rodzaju warstwy i kategorii ruchu.

5.4 Warunki atmosferyczne

Warstwa nawierzchni z MMA powinna być układana w temperaturze:

- podłoża nie mniejszej niż +5°C,
- temperaturze otoczenia w ciągu doby (pomiar trzy razy dziennie) nie mniejszej niż +5°C.

Nie dopuszcza się układania MMA podczas opadów atmosferycznych i silnego wiatru przekraczającego prędkość 16m/s.

5.5 Próba technologiczna

Wykonawca przed przystąpieniem do produkcji MMA na żądanie Inżyniera/Inspektora Nadzoru jest zobowiązany do przeprowadzenia próby technologicznej.

Nie dopuszcza się oceniania dokładności pracy otaczarki oraz prawidłowości składu mieszanki mineralnej na podstawie tzw. suchego zarobu, z uwagi na segregację kruszywa. Na podstawie uzyskanych wyników Inżynier/Inspektor Nadzoru podejmuje decyzję o wykonaniu odcinka próbnego. Tolerancje zawartości

składników MMA względem składu zaprojektowanego powinny być zgodne z wymaganiami podanymi w pkt. 6.7. niniejszej STWiORB.

5.6 Odcinek próbny

Wykonawca ma obowiązek wykonać odcinek próbny o długości przynajmniej 100m na całej szerokości jednej jezdni w celu:

- zdefiniowania parametrów produkcyjnych MMA,
- sprawdzenia czy sprzęt użyty do rozkładania i zagęszczania mieszanki jest właściwy,
- określenia grubości warstwy mieszanki mineralno-asfaltowej przed zagęszczeniem, koniecznej do uzyskania wymaganej ostatecznej grubości warstwy,
- określenia potrzebnej liczby przejazdów walców dla uzyskania prawidłowego zagęszczenia warstwy,
- przeprowadzenia próby technologicznej wykonania instalacji wraz z procesem zagęszczania, w celu zminimalizowania ryzyka uszkodzenia tej instalacji.

Do wykonania odcinka próbnego, Wykonawca powinien zastosować takie same materiały oraz sprzęt, jakie będą stosowane do wykonania warstwy z MMA podczas robót. Lokalizacja odcinka próbnego zostanie zaakceptowana przez Inżyniera/Inspektora Nadzoru – dopuszcza się akceptację wykonanego odcinka próbnego w ramach innego zadania pod warunkiem, że został wbudowany ten sam typ mieszanki mineralno-asfaltowej oraz zastosowano ten sam sprzęt do wbudowania i zagęszczania warstwy. Wykonawca rozpocznie wykonywanie nawierzchni z MMA dopiero po otrzymaniu akceptacji Inżyniera/Inspektora Nadzoru, wydanej na podstawie testów oraz pomiarów dokonanych na odcinku próbnym. W przypadku nieprawidłowych parametrów warstwy ścieralnej i nie zatwierdzeniu przez Inżyniera/Inspektora Nadzoru odcinka próbnego, Wykonawca ma obowiązek usunąć odcinek próbny warstwy ścieralnej (jeżeli był wykonywany w obrębie Kontraktu) na własny koszt.

Do wykonania odcinka próbnego instalacji samoodładzającej w konstrukcji nawierzchni, Wykonawca powinien w pełni zastosować się do zaleceń producenta materiałów instalacyjnych oraz projektu instalacji grzewczej. W przypadku instalacji hydraulicznej zalecane jest wprowadzenie zimnego czynnika do instalacji – w ten sposób obniży się wpływ wysokiej temperatury na instalację oraz możliwa będzie bieżąca obserwacja czy nie występują żadne uszkodzenia instalacji (widoczne np. w różnicach temperatur na czujnikach instalacji).

5.7 Wbudowywanie mieszanki MMA

Transport MMA powinien odbywać się zgodnie z wymaganiami podanymi w pkt. 7.4 WT-2 2016 – część II. Wbudowywanie MMA powinno odbywać się zgodnie z wymaganiami podanymi w pkt. 7.5 WT-2 2016 – część II.

Prace związane z wbudowaniem mieszanki mineralno-asfaltowej należy tak zaplanować, aby:

- umożliwiały układanie warstwy całą szerokością jezdni (jedną rozkładarką lub dwoma rozkładarkami pracującymi obok siebie z przesunięciem wg pkt 7.6.3.1. WT- 2 2016 – część II); w przypadku przebudów i remontów o dopuszczonym ruchu jednokierunkowym (wahadłowym) szerokością pasa ruchu ,
- dzienne działki robocze (tj. odcinki nawierzchni na których mieszanka mineralno- asfaltowa jest wbudowywana jednego dnia) powinny być możliwie jak najdłuższe min. 200 m,
- organizacja dostaw mieszanki powinna zapewnić pracę rozkładarki bez zatrzymań z jednostajną prędkością
- wykonanie instalacji grzewczej było zaplanowane w sposób zapewniający ochronę instalacji w trakcie wbudowywania mieszanki mineralno-asfaltowej.

Mieszankę mineralno-asfaltową należy wbudowywać w sprzyjających warunkach atmosferycznych określonych w pkt. 5.4. Temperatura otoczenia może być niższa w wypadku stosowania ogrzewania podłoża i obramowania (np. promienniki podczerwieni, urządzenia mikrofalowe).

W przypadku stosowania mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem umożliwiającym obniżenie temperatury mieszania i wbudowania (mieszanki na ciepło) lub stosowania specjalnych technologii produkcji i

wbudowywania w obniżonej temperaturze, należy indywidualnie określić wymagane warunki otoczenia. Układarka powinna być stale zasilana w mieszankę tak, aby w zasobniku zawsze znajdowała się odpowiednia jej ilość, a kosz, transporter i stół były zawsze gorące i nie stygły. W miejscach niedostępnych dla sprzętu dopuszcza się wbudowywanie ręczne.

Podczas rozkładania grubość wykonywanej warstwy powinna być sprawdzana co 25 m, w co najmniej trzech miejscach (w osi i przy brzegach warstwy). Warstwy wałowane powinny być równomiernie zagęszczane walcami drogowymi o charakterystyce zapewniającej skuteczność zagęszczania, potwierdzoną na odcinku próbnym.

Dopuszczenie wykonanej warstwy asfaltowej na gorąco do ruchu może nastąpić po jej schłodzeniu do temperatury zapewniającej jej odporność na deformacje trwałe.

5.8 Połączenia technologiczne

Połączenia technologiczne powinny być wykonane przy zastosowaniu materiałów określonych w pkt 2.2.1 niniejszej STWIORB, oraz zgodnie z pkt. 7.6 WT-2 2016 – część II.

5.8.1 Sposób i warunki aplikacji materiałów stosowanych do złączy.

5.8.1.1 Wymagania wobec wbudowania elastycznych taśm bitumicznych

Krawędź boczna złącza podłużnego winna być uformowana za pomocą rolki dociskowej lub poprzez obcięcie nożem talerzowym.

Krawędź boczna złącza poprzecznego powinna być uformowana w taki sposób i za pomocą urządzeń umożliwiających uzyskanie nieregularnej powierzchni.

Powierzchnie krawędzi do których klejona będzie taśma, powinny być czyste i suche.

Przed przyklejeniem taśmy w metodzie „gorące przy zimnym”, krawędzie „zimnej” warstwy na całkowitej grubości, należy zagruntować środkiem gruntującym zgodnie z zaleceniami producenta taśmy.

Taśma bitumiczna o grubości 10 mm powinna być wstępnie przyklejona do zimnej krawędzi złącza na całej jego wysokości oraz wystawać ponad powierzchnię warstwy do 5 mm lub wg zaleceń Producenta.

5.8.1.2 Wymagania wobec wbudowania past bitumicznych

Przygotowanie krawędzi bocznych jak w przypadku stosowania taśm bitumicznych.

Pasta powinna być наносzona mechanicznie z zapewnieniem równomiernego jej rozproszczenia na bocznej krawędzi w ilości 3 - 4 kg/m² (warstwa o grubości 3 - 4 mm przy gęstości około 1,0 g/cm³).

Dopuszcza się ręczne nanoszenie past w miejscach niedostępnych.

5.8.2 Sposób wykonania złączy

Wymagania ogólne:

- złącza w warstwach nawierzchni powinny być wykonane w linii prostej,
- złącza podłużnego nie można lokalizować w śladach kół, a także w obszarze poziomego oznakowania jezdni,
- złącza podłużne w konstrukcji wielowarstwowej należy przesunąć względem siebie w kolejnych warstwach technologicznych o co najmniej 30 cm w kierunku poprzecznym do osi jezdni,
- złącza muszą być całkowicie związane a powierzchnie przylegających warstw powinny być w jednym poziomie.

A. Metoda rozkładania „gorące przy gorącym”

Metoda ta ma zastosowanie w przypadku wykonywania złącza podłużnego – należy ją stosować zgodnie z pkt. 7.6.3.1 WT-2 2016 – część II.

Przy tej metodzie nie stosuje się dodatkowych materiałów do złączy.

B. Metoda rozkładania „gorące przy zimnym”

Wykonanie złączy metodą „gorące przy zimnym” stosuje się w przypadkach, gdy ze względu na ruch, względnie z innych uzasadnionych powodów konieczne jest wykonywanie nawierzchni w odstępach czasowych – należy ją stosować zgodnie z pkt. 7.6.3.2 WT-2 2016 – część II.

C. Sposób zakończenia działki roboczej

Zakończenie działki roboczej należy wykonać w sposób i przy pomocy urządzeń zapewniających uzyskanie nieregularnej, szorstkiej powierzchni spoiny (przy pomocy wstawianej kantówki lub frezarki) oraz szorstkiego podłoża w rejonie planowanego złącza.

Niedopuszczalne jest posypywanie piaskiem jako sposobu na obniżenie szczepności warstw w rejonie końca działki roboczej oraz obcinanie piłą tarczową zimnej krawędzi działki.

Zakończenie działki roboczej wykonuje się prostopadle do osi drogi. Krawędź działki roboczej jest równocześnie krawędzią poprzeczną złącza.

Złącza poprzeczne między działkami roboczymi układanych pasów kolejnych warstw technologicznych należy przesunąć względem siebie o co najmniej 3 m w kierunku podłużnym do osi jezdni.

W przypadku jeśli podłożem dla warstwy jest warstwa z AC WMS należy dokładnie nad złączami poprzecznymi działek roboczych AC WMS wykonać poprzecznie piłą tarczową nacięcia dylatacyjne na całą szerokość ułożonej warstwy ścieralnej do jej spodu. Nacięcia należy wypełnić zalewą drogową typu N1 o właściwościach określonych w PN EN 14188-1 tablica 2 punkty od 1 do 11.2.8. W okresie ciepłym szczelina winna być wypełniona z meniskiem wklęsłym, a w okresie chłodnym po jej brzegi.

D. Sposób wykonywania spoin

Spoiny wykonuje się z użyciem materiałów wymienionych w punkcie 2.2.1.

Grubość elastycznej taśmy bitumicznej do spoin powinna wynosić:

- nie mniej niż 10 mm w warstwie ścieralnej.

Pasta powinna być наносzona mechanicznie z zapewnieniem równomiernego jej rozprowadzenia na bocznej krawędzi w ilości 3 - 4 kg/m² (warstwa o grubości 3 - 4 mm przy gęstości około 1,0 g/cm³).

Wymagania dla wbudowywania zalew drogowych na gorąco:

Zabrudzone szczeliny należy oczyścić za pomocą sprężonego powietrza.

Zimne krawędzie winny uprzednio być posmarowane gruntownikiem wg zaleceń producenta zalewy drogowej na gorąco. Szczelinę należy zalać do pełna: z meniskiem wklęsłym w przypadku prac wykonywanych w niskich temperaturach otoczenia, bez menisku w przypadku prac wykonywanych w wysokich temperaturach.

5.9 Krawędzie zewnętrzne warstwy ścieralnej

Krawędzie zewnętrzne warstwy ścieralnej należy wykonać zgodnie z wymaganiami pkt. 7.7 WT-2 2016 – część II

Po wykonaniu warstwy ścieralnej o jednostronnym nachyleniu jezdni należy uszczelnić wyżej położoną krawędź boczną. Niżej położona krawędź boczna powinna pozostać nieuszczelniona.

Krawędź zewnętrzną oraz powierzchnię odsadzki poziomej należy zabezpieczyć przez pokrycie gorącym asfaltem w ilości:

- powierzchnie odsadzek - 1,5 kg/m²
- krawędzie zewnętrzne - 4 kg/m², zgodnie z rys. 1 pkt. 7.7 WT-2 2016 – część II.

W przypadku nawierzchni o dwustronnym nachyleniu (przekrój daszkowy) nie wykonuje się uszczelnienia zewnętrznych krawędzi jezdni, jeśli jednak w ciągu tej drogi (np. na łukach) wystąpi przekrój o jednostronnym nachyleniu, należy uszczelnić wyżej położoną krawędź boczną.

6 KONTROLA JAKOŚCI ROBÓT

6.1 Ogólne wymagania dotyczące kontroli jakości robót

Ogólne zasady kontroli jakości robót podano w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”.

Badania mieszanki mineralno-asfaltowej należy wykonywać zgodnie z normami podanymi w pkt. 8.2.3 WT-2 2014 Nawierzchnie Asfaltowe (Tabela 18, 19 – dla mieszanki typu AC).

Badania i pomiary dzielą się na:

- badania i pomiary Wykonawcy – w ramach własnego nadzoru
- badania i pomiary kontrolne – w ramach nadzoru Zamawiającego.

W uzasadnionych przypadkach w ramach badań i pomiarów kontrolnych dopuszcza się wykonanie badań i pomiarów kontrolnych dodatkowych lub badań i pomiarów arbitrażowych.

Badania obejmują:

- pobranie próbek,
- zapakowanie próbek do wysyłki,
- transport próbek z miejsca pobrania do placówki wykonującej badania,
- przeprowadzenie badania,
- sprawozdanie z badań.

Pomiary obejmują terenową weryfikację cech nawierzchni.

6.2 Badania i pomiary Wykonawcy - zgodnie z D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”

Zakres badań i pomiarów Wykonawcy powinien:

- być nie mniejszy niż określony w Zakładowej Kontroli Produkcji dla dostarczanych na budowę materiałów i wyrobów budowlanych - mieszanki mineralno-asfaltowe, kruszywa, lepiszcze, materiały do uszczelnień, itd.,
- dla wykonanej warstwy być nie mniejszy niż określony zakres i częstotliwość badań i pomiarów kontrolnych określony w tab. 7.

Zakres badań Wykonawcy związany z wykonywaniem nawierzchni:

- pomiar temperatury powietrza,
- pomiar temperatury mieszanki mineralno-asfaltowej podczas wykonywania nawierzchni,
- ocena wizualna mieszanki mineralno-asfaltowej,
- wykaz ilości materiałów lub grubości wykonanych warstw,
- pomiar spadku poprzecznego poszczególnych warstw asfaltowych,
- pomiar równości warstwy ścieralnej,
- pomiar właściwości przeciwpoślizgowych,
- pomiar rzędnych wysokościowych i pomiary sytuacyjne,
- badania zagęszczenia warstwy i zawartości wolnej przestrzeni,
- pomiar szczepności warstw asfaltowych,
- pomiar współczynnika przewodności cieplnej mieszanki
- ocena wizualna jednorodności powierzchni warstwy,
- ocena wizualna jakości wykonania połączeń technologicznych.

Tabela 7. Minimalna częstotliwość badań ze strony Wykonawcy dla warstwy ścieralnej

Lp.	Badana cecha	Metoda	Częstotliwość
1.	Zagęszczenie MMA oraz zawartość wolnych przestrzeni w warstwie	Porównanie gęstości objętościowej referencyjnej do rzeczywistej	- 2 razy na kilometr każdej jezdni, nie rzadziej niż 1 raz na 6000 m ²
2.	Sczepność warstw asfaltowych dla dróg KR 1-4	Metoda Leutnera	- nie rzadziej niż 1 raz na 15000 m ²
3.	Grubość (grubości poszczególnych warstw i grubość pakietu warstw asfaltowych)	Rzędne wysokościowe,	- nie rzadziej niż co 50 m
		Lub pomiar elektromagnetyczny	- nie rzadziej niż co 100 m
		Lub przymiarem na wyciętych próbach	- 2 razy na kilometr każdej jezdni, nie rzadziej niż 1 raz na 6000 m ²
4.	Równość podłużna		
4.1.	Klasy dróg: GP,G	Profilografem	- każdy pas układania warstwy w sposób ciągły
4.2.	Klasy dróg: Z,L,D, place i parkingi oraz w miejscach niedostępnych dla urządzeń pomiarowych	Planografem	- każdy pas układania warstwy w sposób ciągły
4.3.	Klasy dróg Z, L i D w miejscach niedostępnych dla urządzeń pomiarowych	4 metrową łatą i klinem	- w sposób ciągły (początek każdego pomiaru łatą w miejscu zakończenia poprzedniego pomiaru)
5.	Równość poprzeczna		
5.1.	Klasy dróg: GP, G	Profilografem	- każdy pas układania warstwy w sposób ciągły
5.2.	Klasy dróg: Z,L,D place i parkingi	Profilografem	- każdy pas układania warstwy w sposób ciągły
		lub 2 metrową łatą i klinem	- nie rzadziej niż co 5 m
5.3.	W miejscach niedostępnych dla urządzeń pomiarowych	2 metrową łatą i klinem	- nie rzadziej niż co 5 m
6.1.	Spadki poprzeczne	Profilografem	- co 10m
6.2.		lub 2 metrową łatą i pochylomierzem lub metodami geodezyjnymi	- 50 razy na 1 km dodatkowe pomiary w punktach charakterystycznych łuków poziomych

7.	Właściwości przeciwpoślizgowe Klasy dróg: GP,G	Urządzeniem SRT-3 lub równoważnym	- każdy pas układania warstwy pomiar co 50 m
8.	Szerokość warstwy	Taśmą mierniczą lub metodami geodezyjnymi	- pomiar co 50 m, na łukach poziomych w punktach charakterystycznych
9.	Odchylenie od projektowanej osi drogi	Rzędne wysokościowe Pomiary sytuacyjne	- pomiar rzędnych niwelacji podłużnej i poprzecznej oraz usytuowania osi, na łukach poziomych i pionowych w punktach charakterystycznych
10.	Współczynnik przewodności cieplnej	Pomiar miernikiem KD2Pro lub analogicznym sprzętem	- min. 1 raz

6.3 Badania i pomiary kontrolne - zgodnie z D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”

6.4 Badania i pomiary kontrolne dodatkowe - zgodnie z D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”

6.5 Badania i pomiary arbitrażowe - zgodnie z D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”

6.6 Badania i pomiary przed przystąpieniem do robót - zgodnie z D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”

Przed przystąpieniem do robót Wykonawca powinien przedstawić Inżynierowi/Inspektorowi Nadzoru do akceptacji źródła poboru kruszyw oraz wszystkich dodatkowych materiałów, dołączając wszystkie dokumenty potwierdzające jakość materiałów składowych.

6.7 Badania w czasie robót

6.7.1 Zawartość lepiszcza rozpuszczalnego

Badanie polega na wykonaniu ekstrakcji lepiszcza, zgodnie PN-EN 12697-1, z próbki pobranej z mieszanki mineralno-asfaltowej.

Jakości wbudowanej mieszanki mineralno-asfaltowej należy ocenić na podstawie:

- wielkości odchyłki obliczonej dla wartości średniej (średnia arytmetyczna wszystkich wyników z całej drogi dla danego typu MMA i danej warstwy asfaltowej) z dokładnością do 0,01 %,
- wielkości odchyłki obliczonej dla pojedynczego wyniku (próbki) z dokładnością do 0,1 %.

Wyżej wymienione kryteria należy stosować jednocześnie (oba podlegają ocenie jakości MMA).

Odchyłka jest to wartość bezwzględna różnicy pomiędzy procentową zawartością lepiszcza rozpuszczalnego uzyskaną z badań laboratoryjnych a procentową zawartością lepiszcza rozpuszczalnego podaną w Badaniu Typu (%).

Tabela 8. Dopuszczalne odchyłki do odbioru dla wartości średniej policzonej z dokładnością do 0,01 %

Oceniany parametr	Wielkość odchyłki dla wartości średniej ; %	
	AC	
	KR3÷KR7	KR1 ÷KR2
wartość lepiszcza rozpuszczalnego S – niedomiar	0,15	0,20

wartość lepiszcza rozpuszczalnego S – nadmiar	0,20	0,20
--	------	------

Tabela 9. Dopuszczalne odchyłki do odbioru dla pojedynczego wyniku określonego z dokładnością do 0,1 %

Oceniany parametr	Wielkość odchyłki dla pojedynczego wyniku ; %	
	AC	
	KR1÷KR7	
Zawartość lepiszcza rozpuszczalnego S - niedomiar	0,3	
Zawartość lepiszcza rozpuszczalnego S - nadmiar	0,3	

W przypadku przekroczenia wielkości dopuszczalnych odchyłek dla wartości średniej i dla pojedynczego wyniku w zakresie zawartości lepiszcza rozpuszczalnego należy postępować zgodnie z Instrukcją DP-T 14 *Ocena jakości na drogach krajowych. Część I-Roboty drogowe*, z uwzględnieniem zasad opisanych w punktach 6.4 lub 6.5 niniejszej STWiORB.

6.7.2 Uziarnienie mieszanki mineralnej

Po wykonaniu ekstrakcji lepiszcza należy przeprowadzić kontrolę uziarnienia mieszanki kruszywa mineralnego wg PN-EN 12697-2.

Jakości mieszanki mineralnej należy ocenić na podstawie:

- wielkości odchyłki obliczonej dla wartości średniej (średnia arytmetyczna wszystkich wyników z całej drogi dla danego typu MMA i danej warstwy asfaltowej) z dokładnością do 0,1 %
- wielkości odchyłki obliczonej dla pojedynczego wyniku (próbki) z dokładnością do 0,1 % dla sita 0,063mm i z dokładnością do 1 % dla pozostałych sit.

Wyżej wymienione kryteria należy stosować jednocześnie (oba podlegają ocenie jakości MMA).

Odchyłka jest to wartość bezwzględna różnicy pomiędzy procentową zawartością ziaren w wyekstrahowanej mieszance mineralnej uzyskaną z badań laboratoryjnych a procentową zawartością ziaren w mieszance mineralnej podaną w Badaniu Typu (%).

Dopuszczalne odchyłki w zakresie uziarnienia podano w tabeli 10.

Tabela 10. Dopuszczalne odchyłki w zakresie uziarnienia.

Przechodzi przez sito #, mm	Odchyłki dopuszczalne dla pojedynczego wyniku, %		Odchyłki dopuszczalne dla wartości średniej, %
	KR 3-7	KR 1-2	
0,063	2,5	3,0	1,5
0,125	4	5	2,0
2	5	6	3,0
D/2 lub sito charakterystyczne	6	7	4,0

D	7	8	5,0
---	---	---	-----

Wymagania dotyczące udziału kruszywa grubego, drobnego i wypełniacza powinny być spełnione jednocześnie.

W przypadku przekroczenia wielkości dopuszczalnych odchyłek dla wartości średniej w zakresie uziarnienia należy postępować zgodnie z Instrukcją DP-T 14 *Ocena jakości na drogach krajowych. Część I - Roboty drogowe*, z uwzględnieniem zasad opisanych w punktach 6.4 lub 6.5 niniejszej STWiORB.

Dla kryterium dotyczącego pojedynczego wyniku nie stosuje się potrąceń – należy je spełnić wg wyżej wymienionych wymagań.

6.7.3 Zawartość wolnych przestrzeni w mieszance MMA

Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach Marshalla oblicza się zgodnie z PN-EN 12697-8. Zawartość wolnych przestrzeni nie może przekroczyć wartości podanych w WT-2 2014 Tabela 18 i 19 w zależności od kategorii ruchu.

6.7.4 Pomiar grubości warstwy wg PN-EN 12697-36

Grubość wykonanej warstwy należy określać na wyciętych próbkach (nie wycinać próbek na obiektach mostowych wiertnicą mechaniczną) lub metodą elektromagnetyczną z częstotliwością określoną w tab. 7. Sposób oceny grubości warstwy i pakietu warstw należy dokonać zgodnie z WT-2 2016 – część II pkt 8.2 i Instrukcją DP-T 14 pkt. 2.3.

Grubość warstwy należy ocenić na podstawie wielkości odchyłki obliczonej dla:

- pojedynczego wyniku pomiaru grubości warstwy i pakietu warstw asfaltowych,
- wartości średniej ze wszystkich pomiarów grubości danej warstwy i wartości średniej pomiarów pakietu warstw asfaltowych.

Odchyłka w zakresie grubości danej warstwy lub pakietu warstw z mieszanek mineralno- asfaltowych jest to procentowe **przekroczenie w dół** projektowanej grubości warstwy lub pakietu i obliczona wg pkt 2.3. Instrukcji DP-T 14 – część I z dokładnością do 1%.

Tolerancja dla pojedynczego wyniku w zakresie:

- grubości warstwy może wynosić $1 \pm 5\%$ grubości projektowanej.
- pakietu wszystkich warstw asfaltowych wynosi $0 \pm 10\%$ grubości projektowanej, lecz nie więcej niż 1 cm.

Wartość średnia ze wszystkich pomiarów grubości danej warstwy lub pakietu warstw powinna być równa bądź większa w stosunku do grubości przyjętej w projekcie konstrukcji nawierzchni.

W przypadku przekroczenia wartości dopuszczalnych w zakresie grubości należy postępować zgodnie z Instrukcją DP-T 14 *Ocena jakości na drogach krajowych. Część I - Roboty drogowe*, z uwzględnieniem zasad opisanych w punktach 6.4 lub 6.5 niniejszej STWiORB.

Dopuszcza się przy odbiorze warstwy przez Zamawiającego pomiar grubości za pomocą georadaru GPR.

6.7.5 Wskaźnik zagęszczenia warstwy wg PN-EN 13108-20 załącznik C4

Wskaźnik zagęszczenia warstwy należy sprawdzać na próbkach wyciętych z zagęszczonej warstwy z częstością podaną w pkt. 6.2. tab. 7. Wskaźnik zagęszczenia nie może być niższy niż 98,0%. Dopuszcza się za zgodą Inżyniera/Inspektora Nadzoru badania zagęszczenia warstwy metodami izotopowymi (zamiennie do cięcia próbek). Metodą referencyjną jest badanie na próbkach wyciętych z zagęszczonej warstwy. Wykonawca jest zobowiązany do wycięcia próbki na każde życzenie Inżyniera/Inspektora Nadzoru w miejscach wątpliwych przez niego wskazanych.

W przypadku jeśli wskaźnik zagęszczenia jest niższy niż 98,0% należy postępować zgodnie z Instrukcją DP-T 14 *Ocena jakości na drogach krajowych. Część I - Roboty drogowe*, z uwzględnieniem zasad opisanych w punktach 6.4 lub 6.5 niniejszej STWiORB.

6.7.6 Wolna przestrzeń w zagęszczonej warstwie wg PN-EN 12697-8.

Do obliczenia wolnej przestrzeni w warstwie należy przyjmować gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej oznaczonej w dniu wykonywania kontrolowanej działki roboczej. Zawartość wolnej przestrzeni w warstwie powinna mieścić się w granicach AC 5 S KR 1-2 1,0-5,0%, dla AC 8 S oraz AC 11 S KR 1-2 1,0-4,5%, dla KR 3-4 2,0-5,0%. Zawartość wolnej przestrzeni w warstwie należy sprawdzać z częstotnością podaną w pkt. 6.2. tab. 7.

W przypadku przekroczenia wartości dopuszczalnych w zakresie zawartości wolnych przestrzeni należy postępować zgodnie z Instrukcją DP-T 14 *Ocena jakości na drogach krajowych. Część I - Roboty drogowe*, z uwzględnieniem zasad opisanych w punktach 6.4 lub 6.5 niniejszej STWiORB.

6.7.7 Wytrzymałość na ścinanie połączeń międzywarstwowych.

Badanie szczepności międzywarstwowej należy wykonać wg metody Leutnera na próbkach $\varnothing 150 \pm 2$ mm lub $\varnothing 100 \pm 2$ mm zgodnie z „Instrukcją laboratoryjnego badania szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych wg metody Leutnera i wymagania techniczne szczepności. 2014”. Wymagana wartość dla połączenia ścieralna – wiążąca wynosi nie mniej niż 1,0 MPa – kryterium należy spełnić. Dopuszcza się też inne sprawdzone metody badania szczepności, przy czym metodą referencyjną jest metoda Leutnera na próbkach $\varnothing 150 \pm 2$ mm.

Badanie szczepności międzywarstwowej należy sprawdzać zgodnie z częstotnością podaną w pkt. 6.2. tab. 7.

W przypadku przekroczenia wartości dopuszczalnych w zakresie wytrzymałości na ścinanie połączeń międzywarstwowych należy postępować zgodnie z Instrukcją DP-T 14 *Ocena jakości na drogach krajowych. Część I - Roboty drogowe*, z uwzględnieniem zasad opisanych w punktach 6.4 lub 6.5 niniejszej STWiORB.

6.7.8 Współczynnik przewodności cieplnej mieszanki

Ze względu na wykonanie nawierzchni w technologii nawierzchni samoodładzającej z wyprodukowanej mieszanki mineralno-asfaltowej należy kontrolować:

- współczynnik przewodności cieplnej mieszanki mineralno-asfaltowej (1 badanie podczas próby technologicznej oraz w razie wątpliwości) – badanie powinno zostać przeprowadzone przynajmniej na 3 próbkach oraz powinna zostać wyciągnięta średnia z otrzymanych wyników.

Zalecana wartość dla zapewnienia jak najlepszych efektów w trakcie działania instalacji: współczynnik przewodności cieplnej k wynoszący nie mniej niż 1,7 W/mK. Otrzymany na tym etapie wynik należy porównać z wynikiem otrzymanym na etapie projektowania mieszanki – wartość nie powinna być mniejsza o więcej niż 10% w porównaniu do wartości otrzymanej na etapie projektowania.

Dopuszcza się też inne sprawdzone metody badania współczynnika przewodności cieplnej, przy czym metodą referencyjną jest metoda TLS stosowana w mierniku KD2Pro Thermal Analyzer. Przy wyznaczeniu współczynnika przewodności cieplnej stosowana jest procedura opisana normą ASTM D5334-08

6.7.9 Właściwości lepiszcza odzyskanego.

Dla lepiszcza odzyskanego (wyekstrahowanego) z wyprodukowanej mieszanki mineralno-asfaltowej należy kontrolować następujące właściwości:

- temperaturę mięknięcia (1 badanie podczas próby technologicznej oraz w razie wątpliwości)- dotyczy mieszanek bez udziału granulatu asfaltowego,
- temperaturę mięknięcia (1 badanie na 5000 t mieszanki)- dotyczy mieszanek z udziałem granulatu asfaltowego,
- nawrót sprężysty – dot. polimeroasfaltów (1 badanie podczas próby technologicznej oraz w razie wątpliwości).

Wymagania dla temperatury mięknięcia lepiszcza odzyskanego (wyekstrahowanego) z wyprodukowanej mieszanki są identyczne jak dla temperatury mięknięcia lepiszcza zadeklarowanego w badaniu typu danej mieszanki mineralno-asfaltowej, zarówno dla mieszanek mineralno-asfaltowych z udziałem granulatu asfaltowego jak i dla mieszanek mineralno-asfaltowych bez udziału granulatu asfaltowego. Maksymalna temperatura mięknięcia lepiszcza odzyskanego w zależności od rodzaju asfaltu zadeklarowanego w badaniu typu danej mieszanki, nie powinna być większa niż określona w pkt. 8.1. WT 2 2016 – część II.

6.8 Badania i pomiary cech geometrycznych warstwy z MMA

6.8.1 Częstość oraz zakres badań i pomiarów

Częstość oraz zakres badań i pomiarów podano dla warstwy ścieralnej podano w tabeli 7.

6.8.2 Szerokość warstwy

Szerokość wykonanej warstwy powinna być zgodna z szerokością projektowaną z tolerancją + 5 cm. Wymaga się, aby co najmniej 95% wykonanych pomiarów nie przekraczało dopuszczalnego odchylenia. 100% wykonanych pomiarów szerokości wykonanej warstwy powinna być zgodna z szerokością projektowaną z tolerancją + 7 cm.

6.8.3 Równość podłużna i poprzeczna warstwy ścieralnej

A. Ocena równości podłużnej warstwy ścieralnej.

W pomiarach równości nawierzchni należy stosować metody:

- profilometryczną bazującą na wskaźnikach równości IRI;
- pomiaru ciągłego równoważną użyciu łąty i klina z wykorzystaniem planografu (w miejscach niedostępnych dla planografu pomiar ciągły z użyciem łąty o długości 4 m i klina).

Do oceny równości podłużnej warstwy ścieralnej nawierzchni dróg klasy GP oraz G należy stosować metodę profilometryczną bazującą na wskaźnikach równości IRI [mm/m]. Kierunek pomiaru powinien być zgodny z projektowanym kierunkiem jazdy. Profil nierówności warstwy nawierzchni należy rejestrować z krokiem co 10 cm.

Wartość IRI należy wyznaczać z krokiem co 50 m.

Odcinek drogi, którego warstwa ścieralna podlega ocenie równości podłużnej metodą profilometryczną, dzieli się na oceniane odcinki o długości nie większej niż 1 000 m. W przypadku odcinka, którego długość jest mniejsza niż 500 m, ocenę równości podłużnej przeprowadza się łącznie z odcinkiem poprzedzającym o długości równej 1 000 m. W przypadkach szczególnych, tj. początek lub koniec odcinka drogi, oceniane odcinki mogą mieć długości od 500 do 1 500 m.

Natomiast ocenę równości podłużnej na odcinkach krótkich, o długości mniejszej niż 500 m (za wyjątkiem pasów ruchu zasadniczych, awaryjnych, dodatkowych) można przeprowadzić metodą pomiaru ciągłego z wykorzystaniem planografu lub łąty i klina, jako weryfikację pomiaru profilometrycznego. Wartości wymagań dla takich przypadków określono w tabeli 12.

Wymagana równość podłużna jest określona przez dopuszczalną wartość średnią wyników pomiaru IRI_{sr} oraz dopuszczalną wartość maksymalną pojedynczego pomiaru IRI_{max}, których nie można przekroczyć na długości ocenianego odcinka nawierzchni. Wartości dopuszczalne przy odbiorze warstwy ścieralnej metodą profilometryczną określa tabela 11.

Tabela 11. Wartości dopuszczalne przy odbiorze warstwy ścieralnej metodą profilometryczną

Klasa drogi	Element nawierzchni	Dopuszczalne odbiorcze wartości wskaźników dla zadanego zakresu długości odcinka drogi [mm/m]	
		IRI _{sr} *	IRI _{max}
1	2	3	4
GP	Pasy ruchu zasadnicze, awaryjne, dodatkowe, włączania i wyłączania	1,1	2,4
	Jezdnie łącznic	1,3	2,4
	Jezdnie MOP	1,5	2,7

G	Pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, włączania i wyłączania, postojowe, jezdnie łącznic	1,5	3,4
---	--	-----	-----

* w przypadku:

- odbioru odcinków warstwy nawierzchni o całkowitej długości mniejszej niż 500 m,
 - odbioru robót polegających na ułożeniu na istniejącej nawierzchni jedynie warstwy ścieralnej niezależnie od długości odcinka robót),
- dopuszczalną wartość IRI_{sr} wg tabeli należy zwiększyć o 0,2 mm/m.

W przypadku dokonywania oceny równości podłużnej odcinków nawierzchni, na których występują dylatacje obiektów inżynierskich, dopuszcza się weryfikację równości podłużnej w miejscach lokalizacji dylatacji z użyciem łąty (o długości 4 m) i klina lub metody równoważnej (planografu).

Maksymalna wielkość zmierzonego prześwitu nie może przekroczyć wartości określonych w tabeli 12.

Tabela 12. Dopuszczalne odbiorcze wartości odchyłeń równości podłużnej metodą łąty i klina

Klasa drogi	Dopuszczalne odbiorcze wartości odchyłeń równości podłużnej warstwy ścieralnej metodą łąty i klina [mm]
GP	4
G	6

Do oceny równości podłużnej warstwy ścieralnej nawierzchni dróg klasy Z, L, D, placów i parkingów oraz w miejscach niedostępnych dla profilografów należy stosować metodę pomiaru ciągłego równoważną użyciu łąty i klina z wykorzystaniem planografu, umożliwiającego wyznaczanie odchyłeń równości podłużnej jako największej odległości (prześwitu) pomiędzy teoretyczną linią łączącą spody kółek jezdnych urządzenia a mierzoną powierzchnią warstwy [mm]. W miejscach niedostępnych dla planografu pomiar równości podłużnej warstw nawierzchni należy wykonać w sposób ciągły z użyciem łąty (o długości 4 m) i klina.

Wartości dopuszczalne odchyłeń równości podłużnej przy odbiorze warstwy planografem (łątą i klinem) określa tabela 13.

Tabela 13. Dopuszczalne wartości odchyłeń równości podłużnej przy odbiorze warstwy planografem (łątą i klinem)

Klasa drogi	Element nawierzchni	Dopuszczalne odbiorcze wartości odchyłeń równości podłużnej warstwy ścieralnej [mm]
Z	Pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, włączania i wyłączania, postojowe, jezdnie łącznic,	6
L, D, place, parkingi	Wszystkie pasy ruchu i powierzchnie przeznaczone do ruchu i postoju pojazdów	9

B. Pomiar równości poprzecznej warstwy ścieralnej

Do oceny równości poprzecznej warstwy ścieralnej nawierzchni dróg klasy GP oraz G należy stosować metodę pomiaru profilometrycznego równoważną użyciu łąty i klina, umożliwiającą wyznaczenie odchylenia równości w przekroju poprzecznym pasa ruchu/elementu drogi. Odchylenie to jest obliczane jako największa odległość (prześwit) pomiędzy teoretyczną łątą (o długości 2 m) a zarejestrowanym profilem poprzecznym warstwy.

Efektywna szerokość pomiarowa jest równa szerokości mierzonego pasa (elementu) nawierzchni z tolerancją $\pm 15\%$. Wartość odchylenia równości poprzecznej należy wyznaczać z krokiem co 1 m, natomiast ocenie podlega wartość średnia z kolejnych 5 metrów.

W miejscach niedostępnych dla profilografu oraz dróg klas Z, L, D, placów i parkingów pomiar równości poprzecznej warstwy ścieralnej nawierzchni dopuszcza się wykonać z użyciem łąty i klina. Długość łąty w pomiarze równości poprzecznej powinna wynosić 2 m, Pomiar powinien być wykonany nie rzadziej niż co 5 m. Dopuszczalne wartości odchyleń zostały podane w tabeli 14.

Tabela 14. Dopuszczalne wartości odchyleń równości poprzecznej dla warstwy ścieralnej

Klasa drogi	Element nawierzchni	Dopuszczalne wartości odchyleń równości poprzecznej warstwy ścieralnej [mm]
GP	Pasy ruchu zasadnicze, awaryjne, dodatkowe, włączania i wyłączania, jezdnie łącznic,	4
G, Z	Pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, włączania i wyłączania, postojowe, jezdnie łącznic,	6
L, D, place, parkingi	Wszystkie pasy ruchu i powierzchnie przeznaczone do ruchu i postoju pojazdów	9

Pomiar równości poprzecznej warstw nawierzchni z użyciem łąty i klina

Pomiar równości poprzecznej warstwy ścieralnej nawierzchni z użyciem łąty (o długości 2 m) i klina należy wykonywać z krokiem nie rzadziej niż co 5 m. W czasie pomiaru łąta powinna leżeć prostopadle do osi drogi i w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni badanej warstwy.

Klin należy podkładać pod łątę w miejscu, w którym prześwit jest największy (największe odchylenie równości). Wielkość prześwitu jest równa najmniejszej liczbie widocznej na klinie podłożonym pod łątę. Zasady oceny wyników podano w tabeli 14.

6.8.4 Spadki poprzeczne

Pomiar spadków poprzecznych należy wykonać:

- łątą i pochyłomierzem (sprawdzenie spadku poprzecznego polega na przyłożeniu łąty i pomiar pochylenia pochyłomierzem), lub
- metodą profilometryczną (pomiar profilografem laserowym), lub
- metodami geodezyjnymi.

Spadki poprzeczne warstwy ścieralnej na odcinkach prostych i na łukach powinny być zgodne z spadkami poprzecznymi z tolerancją $\pm 0,5\%$.

Wymaga się, aby co najmniej 95% wykonanych pomiarów nie przekraczało przedziału dopuszczalnych odchyleń. Dla 100% wykonanych pomiarów spadki poprzeczne warstwy ścieralnej na odcinkach prostych i na łukach powinny być zgodne z spadkami poprzecznymi z tolerancją $\pm 0,7\%$. Spadek poprzeczny musi być wystarczający do zapewnienia sprawnego spływu wody.

6.8.5 Ukształtowanie osi w planie

Oś warstwy w planie powinna być usytuowana zgodnie z osią projektowaną z tolerancją ± 5 cm. Wymaga się, aby co najmniej 95% wykonanych pomiarów nie przekraczało przedziału dopuszczalnych odchyleń. 100% wykonanych pomiarów ukształtowania osi w planie powinno być zgodne z osią projektowaną z tolerancją ± 7 cm.

6.8.6 Rzędne wysokościowe nawierzchni

Rzędne wysokościowe warstwy ścieralnej powinny być mierzone w przekrojach co 10m w osi i na krawędziach każdej jezdni. Przed przystąpieniem do robót Wykonawca przedstawi schemat punktów pomiarowych do akceptacji. Różnice pomiędzy rzędnymi wysokościowymi warstwy a rzędnymi projektowanymi nie powinny przekraczać ± 1 cm.

Wymaga się, aby co najmniej 95% wykonanych pomiarów nie przekraczało przedziału dopuszczalnych odchyleń. Dla 100% wykonanych pomiarów różnice pomiędzy rzędnymi wysokościowymi warstwy ścieralnej a rzędnymi projektowanymi nie mogą przekraczać $\pm 1,5$ cm.

6.8.7 Złącza podłużne i poprzeczne

Złącza w nawierzchni powinny być wykonane w linii prostej, prostopadle lub równoległe do osi drogi.

W konstrukcji wielowarstwowej:

- złącza poprzeczne powinny być przesunięte względem siebie co najmniej o 3 m,
- złącza podłużne powinny być przesunięte względem siebie w kolejnych warstwach technologicznych o co najmniej o 30 cm w kierunku poprzecznym do osi jezdni.

Nie można lokalizować złącza podłużnego w śladach kół, a także w obszarze poziomego oznakowania jezdni. Złącza powinny być całkowicie związane, a przylegające warstwy powinny być w jednym poziomie.

6.8.8 Wygląd warstwy

Wygląd warstwy z MMA powinien być jednorodny, bez miejsc „przeasfaltowanych”, porowatych, łuszczących się i spękanych.

6.8.9 Właściwości przeciwoślizgowe

Przy ocenie właściwości przeciwoślizgowych nawierzchni drogi klasy GP i G powinien być określony współczynnik tarcia na mokrej nawierzchni przy całkowitym poślizgu opony testowej. Pomiar wykonuje się urządzeniem SRT-3 nie rzadziej niż co 50 m na nawierzchni zwilżanej wodą w ilości 0,5 l/m², przy 100% poślizgu opony testowej rowkowanej (ribbed tyre) rozmiaru 165 R 15 □ zalecanej przez World Road Association PIARC, lub za pomocą innej wiarygodnej metody równoważnej, jeśli dysponuje się sprawdzoną zależnością korelacyjną umożliwiającą przeliczenie wyników pomiarów na wartości uzyskiwane zestawem o pełnej blokadzie koła pozytywnie zaopiniowanej przez Zamawiającego. Pomiary powinny być wykonywane w temperaturze otoczenia od 5°C do 30°C, na czystej nawierzchni. Badanie należy wykonać w śladzie koła przed dopuszczeniem nawierzchni do ruchu drogowego oraz powtórnie w okresie od 4 do 8 tygodni od oddania nawierzchni do eksploatacji. Jeżeli warunki atmosferyczne uniemożliwiają wykonanie pomiaru w wymienionym terminie, powinien być on zrealizowany z najmniejszym możliwym opóźnieniem. Uzyskane wartości współczynnika tarcia należy rejestrować z dokładnością do trzech miejsc po przecinku. Miarą właściwości przeciwoślizgowych jest miarodajny współczynnik tarcia. Za miarodajny współczynnik tarcia przyjmuje się różnicę wartości średniej $E(m)$ i odchylenia standardowego $D : E(m) - D$. Wyniki podaje się z dokładnością do dwóch miejsc po przecinku. Długość ocenianego odcinka nawierzchni nie powinna być większa niż 1000 m a liczba pomiarów nie mniejsza niż 10. Odcinek końcowy o długości mniejszej niż 500 m należy oceniać łącznie

z odcinkiem poprzedzającym. Wymagane minimalne parametry miarodajnego współczynnika tarcia nawierzchni określa tabela 15:

Tabela 15. Minimalne wartości miarodajnego współczynnika tarcia nawierzchni dla konkretnej prędkości zablokowanej opony względem nawierzchni.

Klasa drogi	Element nawierzchni	Minimalna wartość miarodajnego współczynnika tarcia przy prędkości zablokowanej opony względem nawierzchni	
		30 km/h	60 km/h
GP, G	Pasy ruchu, pasy dodatkowe, jezdnie łącznic	0,48*	0,41

*wartości wymagań dla odcinków nawierzchni, na których nie można wykonać pomiarów z prędkością 60 km/h.

7 OBMIAR ROBÓT

7.1 Ogólne zasady obmiaru robót

Ogólne zasady obmiaru robót podano w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”.

7.2 Jednostka obmiarowa

Jednostką obmiarową jest m² (metr kwadratowy) wykonanej warstwy ścieralnej z betonu asfaltowego (AC S).

8 ODBIÓR ROBÓT

Ogólne zasady odbioru robót podano w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”. Roboty uznaje się za wykonane zgodnie z Dokumentacją Projektową i niniejszej STWiORB, jeżeli wszystkie badania i pomiary z zachowaniem tolerancji wg pkt. 6 niniejszej STWiORB dały wyniki pozytywne.

Do odbioru ostatecznego uwzględniane są wyniki badań i pomiarów kontrolnych, badań i pomiarów kontrolnych dodatkowych, badań i pomiarów arbitrażowych do wyznaczonych odcinków częściowych.

8.1 Zasady postępowania z wadliwie wykonanymi robotami

Jeżeli wystąpią wyniki negatywne dla materiałów i robót (nie spełniające wymagań określonych w niniejszej STWiORB, to Inżynier/Inspektor Nadzoru/Zamawiający wydaje Wykonawcy polecenie przedstawienia programu naprawczego, chyba że na wniosek jednej ze stron kontraktu zostaną wykonane badania/pomiary kontrolne dodatkowe lub arbitrażowe (zgodnie z pkt. 6.4 lub 6.5 niniejszej STWiORB), a ich wyniki będą pozytywne. Wykonawca w programie tym jest zobowiązany dokonać oceny wpływu na trwałość konstrukcji nawierzchni, przedstawić sposób naprawienia wady lub wnioskować o zredukowanie ceny kontraktowej – naliczenie potrąceń według zasad określonych w Instrukcji DP-T 14 Ocena Jakości na Drogach Krajowych. Część I Roboty Drogowe.

Na zastosowanie programu naprawczego wyraża zgodę Inżynier/Inspektor Nadzoru/Zamawiający.

W przypadku braku zgody Inżyniera/Inspektora Nadzoru/Zamawiającego na zastosowanie programu naprawczego wszystkie materiały i roboty nie spełniające wymagań podanych w odpowiednich punktach STWiORB zostaną odrzucone. Wykonawca wymieni materiały na właściwe i wykona prawidłowo roboty na własny koszt.

Jeżeli wymiana materiałów niespełniających wymagań lub wadliwie wykonane roboty spowodują szkodę w innych, prawidłowo wykonanych robotach, to również te roboty powinny być ponownie wykonane przez Wykonawcę na jego koszt.

9 PODSTAWA PŁATNOŚCI

9.1 Ogólne ustalenia dotyczące podstawy płatności

Ogólne ustalenia dotyczące podstawy płatności podano w D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne”.

9.2 Cena jednostki obmiarowej

Cena wykonania 1 m² warstwy ścieralnej z betonu asfaltowego (AC S) obejmuje:

- prace pomiarowe i roboty przygotowawcze,
- oznakowanie robót,
- oczyszczenie i skropienie podłoża,
- dostarczenie materiałów i sprzętu,
- opracowanie recepty laboratoryjnej,
- wykonanie próby technologicznej i odcinka próbnego,
- wyprodukowanie mieszanki betonu asfaltowego i jej transport na miejsce wbudowania,
- posmarowanie lepiszczem lub pokrycie taśmą asfaltową krawędzi urządzeń obcych i krawężników,
- rozłożenie i zagęszczenie mieszanki betonu asfaltowego,
- uformowanie złączy, zagruntowanie środkiem gruntującym i przymocowanie taśm bitumicznych,
- posmarowanie krawędzi bocznych asfaltem,
- przeprowadzenie pomiarów i badań wymaganych w specyfikacji technicznej,
- odwiezienie sprzętu,
- zawiera wszelkie inne czynności związane z prawidłowym wykonaniem warstwy zgodnie z wymaganiami niniejszej STWiORB.

9.3 Sposób rozliczenia robót tymczasowych i prac towarzyszących

Cena wykonania robót określonych niniejszej STWiORB obejmuje:

- roboty tymczasowe, które są potrzebne do wykonania robót podstawowych, ale nie są przekazywane Zamawiającemu i są usuwane po wykonaniu robót podstawowych,
- prace towarzyszące, które są niezbędne do wykonania robót podstawowych, niezaliczane do robót tymczasowych, jak geodezyjne wytyczenie robót itd.

10 PRZEPISY ZWIĄZANE

10.1 Normy

1. ASTM D5334-08 Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure
2. PN-EN 12591 Asfalty i produkty asfaltowe - Wymagania dla asfaltów drogowych
3. PN-EN 12597 Asfalty i produkty asfaltowe - Terminologia
4. PN-EN 13808 Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Zasady klasyfikacji kationowych emulsji asfaltowych
5. PN-EN 14023 Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Zasady klasyfikacji asfaltów modyfikowanych polimerami
6. PN-EN 13924-2 Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Zasady klasyfikacji asfaltów drogowych specjalnych - Część 2: Asfalty drogowe wielorodzajowe
7. PN-EN 13043 Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu

8. PN-EN 932-3 Badania podstawowych właściwości kruszyw – Część 3: Procedura i terminologia uproszczonego opisu petrograficznego
9. PN-EN 932-5 Badania podstawowych właściwości kruszyw – Część 5: Wyposażenie podstawowe i wzorcowanie
10. PN-EN 933-1 Badania geometrycznych właściwości kruszyw - Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania
11. PN-EN 933-3 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 3: Oznaczanie kształtu ziaren za pomocą wskaźnika płaskości
12. PN-EN 933-4 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 4: Oznaczanie kształtu ziaren – Wskaźnik kształtu
13. PN-EN 933-5 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 5: Oznaczanie procentowej zawartości ziarn przekuszonych w kruszywie o grubym i o ciągłym uziarnieniu
14. PN-EN 933-6 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 6: Ocena właściwości powierzchni – Wskaźnik przepływu kruszyw
15. PN-EN 933-9 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 9: Ocena zawartości drobnych cząstek – Badania błękitem metylenowym
16. PN-EN 933-10 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 10: Ocena zawartość drobnych cząstek – Uziarnienie wypełniaczy (przesiewanie w strumieniu powietrza)
17. PN-EN 1097-2 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 2: Metody oznaczania odporności na rozdrabianie
18. PN-EN 1097-3 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Oznaczanie gęstości nasypowej i jamistości
19. PN-EN 1097-4 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 4: Oznaczanie pustych przestrzeni suchego, zagęszczonego wypełniacza
20. PN-EN 1097-5 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 5: Oznaczanie zawartości wody przez suszenie w suszarce z wentylacją
21. PN-EN 1097-6 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 6: Oznaczanie gęstości ziarn i nasiąkliwości
22. PN-EN 12697-1 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 1: Zawartość lepiszcza rozpuszczalnego
23. PN-EN 12697-2 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 2: Oznaczanie uziarnienia
24. PN-EN 12697-3 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań – Część 3: Odzyskiwanie asfaltu: Wyparka obrotowa
25. PN-EN 12697-4 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody– Część 4: Odzysk asfaltu - Kolumna do destylacji frakcyjnej
26. PN-EN 12697-5 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 5: Oznaczanie gęstości
27. PN-EN 12697-6 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 6: Oznaczanie gęstości objętościowej próbek mieszanki mineralno-asfaltowej
28. PN-EN 12697-8 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 8: Oznaczanie zawartości wolnej przestrzeni próbek mineralno-asfaltowych
29. PN-EN 12697-10 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 10: Zagęszczalność
30. PN-EN 12697-11 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 11: Określenie

powinowactwa pomiędzy kruszywem i asfaltem

31. PN-EN 12697-12 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badania– Część 12: Określanie wrażliwości na wodę próbek mineralno-asfaltowych
32. PN-EN 12697-17 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 17: Ubytek ziaren w próbkach porowatego asfaltu
33. PN-EN 12697-18 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 18: spływność lepiszcza
34. PN-EN 12697-20 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 20: Badanie penetracji na próbkach sześciennych lub cylindrycznych (CY)
35. PN-EN 12697-22 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 22: Koleinowanie
36. PN-EN 12697-23 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badania– Część 23: oznaczanie wytrzymałości mieszanki mineralno-asfaltowej na rozciąganie pośrednie
37. PN-EN 12697-24 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 24: Odporność na zmęczenie
38. PN-EN 12697-25 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 25: Badanie cyklicznego ściskania
39. PN-EN 12697-26 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 26: Sztywność
40. PN-EN 12697-27 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 27: Pobieranie próbek
41. PN-EN 12697-28 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 28: Przygotowanie próbek do oznaczania zawartości lepiszcza, zawartości wody i uziarnienia
42. PN-EN 12697-29 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 29: Oznaczanie wymiarów próbki z mieszanki mineralno-asfaltowej
43. PN-EN 12697-30 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 30: Przygotowanie próbek zagęszczonych przez ubijanie
44. PN-EN 12697-31 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 31: Probki przygotowane w prasie żyratorowej
45. PN-EN 12697-33 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metoda badania– Część 33: Przygotowanie próbek zagęszczanych urządzeniem wałującym
46. PN-EN 12697-35 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 35: Mieszanie laboratoryjne
47. PN-EN 12697-38 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 38: Podstawowe wyposażenie i kalibracja
48. PN-EN 12697-40 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 40: Wodoprzepuszczalność nawierzchni „in-situ”
49. PN-EN 12697-42 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań– Część 42: Zawartość części obcych w destrukcie asfaltowym
50. PN-EN 14188-1 Wypełniacze szczelin i zalewy drogowe - Część 1: Wymagania wobec zalew drogowych na gorąco
51. PN-EN 12272-1 Powierzchniowe utrwalanie - Metody badań - Część 1: Dozowanie i poprzeczny rozkład lepiszcza i kruszywa
52. PN-EN 13108-1 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Wymagania - Część 1: Beton asfaltowy

53. PN-EN 13108-8 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Wymagania - Część 8: Destrukt asfaltowy
54. PN-EN 13108-20 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Wymagania - Część 20: Badanie typu
55. PN-EN 13108-21 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Wymagania - Część 21: Zakładowa Kontrola Produkcji
56. PN-EN 13036-5 Cechy powierzchniowe nawierzchni drogowych i lotniskowych - Metody badań - Część 5: Określanie wskaźników nierówności podłużnej
57. PN-EN 13036-6 Właściwości nawierzchni drogowych i lotniskowych – Metody badań – Część 6 : Pomiary poprzecznych i podłużnych profili w zakresie długości fali równości i megatekstury
58. PN-EN 13036-8 Właściwości nawierzchni drogowych i lotniskowych – Metody Badań – Część 8 : Określenie wskaźników nierówności poprzecznej
59. PN-EN 12697-36 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 36: Określanie grubości nawierzchni asfaltowej
60. PN-EN 12697-46 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 46: Pękanie niskotemperaturowe i właściwości w badaniach osiowego rozciągania
61. PN-EN 13398 Asfalty i lepiszcza asfaltowe -- Oznaczanie nawrotu sprężystego asfaltów modyfikowanych

Obowiązują wydania przywołanych powyżej norm i innych dokumentów na dzień złożenia przez Wykonawcę oferty.

Wprowadzenie nowszego wydania normy czy innego dokumentu wymaga uzgodnienia przez strony kontraktu.

10.2 Inne dokumenty

1. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 24 czerwca 2022 r. w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących dróg publicznych (Dz.U. 2022 poz. 1518)
2. Ustawa o odpadach z dnia 14 grudnia 2012 (Dz. U. 2013 poz. 21 z późn. zm.)
3. Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 23 grudnia 2021 r. w sprawie określenia szczegółowych warunków utraty statusu odpadów dla odpadów destruktu asfaltowego (Dz.U. 2021 poz. 2468)
4. WT-1 2014 Kruszywa do nawierzchni drogowych i powierzchniowych utrwaleń na drogach krajowych
5. WT-2 2014 – część I Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania Techniczne. Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych.
6. WT-2 2016 – część II Wykonanie warstw nawierzchni asfaltowych. Wymagania techniczne.
7. Instrukcja laboratoryjnego badania szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych wg. metody Leutnera i wymagania techniczne szczepności” Politechnika Gdańska 2014.
8. Instrukcja DP-T 14 Ocena jakości na drogach krajowych. Część I-Roboty drogowe.
9. Projekt RID I/6 Wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu: Załącznik nr 9.2.1, Załącznik nr 9.2.2, Załącznik nr 9.2.3.



DISCLAIMER

Nawierzchnie samoodladzające

Nawierzchnie samoodladzające proponowane przez firmę TPA oraz koncern STRABAG przeznaczone są do stosowania jako rozwiązanie dla nawierzchni drogowych, szczególnie w miejscach niebezpiecznych, np. dojazdy do przejść dla pieszych, niebezpieczne łuki poziome, wzniesienia. Są metodą alternatywną dla standardowych metod radzenia sobie ze śniegiem i lodem na nawierzchniach drogowych. Nawierzchnie posiadają dwa rozwiązania – zarówno dla nowopowstających nawierzchni oraz remontów dróg, gdzie wymieniana jest jedynie warstwa ścieralna.

W związku z naszym doświadczeniem, wiedzą technologiczną oraz specyfiką działalności, w proponowanych rozwiązaniach skupiamy się na doborze jak najlepszej mieszanki mineralno-asfaltowej pod względem jej składników, parametrów termicznych oraz wytrzymałościowych.

W kwestii doboru najlepszego rozwiązania samej instalacji, która ma zostać umieszczona w konstrukcji nawierzchni niezbędne jest przeprowadzenia analizy kosztowej i sporządzenie przez inwestora osobnego projektu wykonawczego instalacji. W ten sposób możliwa jest optymalna współpraca pomiędzy konstrukcją nawierzchni, a rozwiązaniem instalacyjnym (wraz ze stacją zasilania i odpowiednimi czujnikami pozwalającymi na automatyczne działanie systemu).

Wydajność nawierzchni samoodladzających jest największa w przypadku działania instalacji w sposób, niepozwalający na osiągnięcie przez nawierzchnię temperatury pozwalającej na formowanie się warstwy lodu oraz pozostawanie warstwy śniegu na nawierzchni.

Należy pamiętać, że w przypadku wystąpienia nagłego obniżenia temperatury i gwałtownego osiągnięcia skrajnie niskich wartości, należy podjąć kroki mające na celu wzmożone monitorowanie sytuacji w miejscu wykonanej nawierzchni samoodladzającej – w takim przypadku istnieje możliwość wsparcia działania instalacji standardowymi metodami zwalczania śliskości zimowej.