

INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW
Zakład Diagnostyki Nawierzchni

SPRAWOZDANIE

z realizacji pracy pt.:

„Wpływ parametrów termiczno-mechanicznych nawierzchni asfaltowej na trwałość zmęczeniową nawierzchni”.

Zleceniodawca: Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad
Umowa Nr 685/2004 z dnia 07.04.2004

Opracowali:

mgr inż. Jacek SUDYKA
Radosław BORUCKI
Artur GRĄCZEWSKI
Jacek KUSIAK

Kierownik Zakładu
Diagnostyki Nawierzchni

mgr inż. Tomasz MECHOWSKI

Warszawa, listopad 2005

Spis treści

ROZDZIAŁ 1 WSTĘP	5
ROZDZIAŁ 2 PRZEGLĄD ISTNIEJĄCYCH METOD OCENY TEMPERATURY NAWIERZCHNI W POLSCIE I ZA GRANICĄ	6
2.1 Wstęp	6
2.2 Metoda BELLS3	7
2.3 Metoda Wistuby	9
2.4 Metoda Hermanssona	10
2.5 Bibliografia	12
ROZDZIAŁ 3 PRACE BADAWCZO-POMIAROWE	13
3.1 Wstęp	13
3.2 Założenia wykonawczo-pomiarowe	13
3.3 Realizacja prac	16
3.3.1 Podłoże i podbudowa nawierzchni	17
3.3.2 Warstwa ścieralna	21
ROZDZIAŁ 4 WYNIKI POMIARÓW	26
4.1 Temperatury zarejestrowane dla miejsc pomiarowych w przekrojach	26
4.2 Temperatury powierzchni warstw ścieralnych zarejestrowane pirometrem ST20	34
4.3 Monitoring warunków atmosferycznych	38
ROZDZIAŁ 5 OPRACOWANIE ALGORYTMU WYZNACZANIA TEMPERATURY MIARODAJNEJ	51
5.1 Analiza i weryfikacja rozkładu temperatur w nawierzchni z zastosowaniem wybranych metod pod kątem uzyskanych w trakcie badań wyników pomiarów	51
5.2 Opracowanie algorytmu wyznaczenia temperatury miarodajnej warstw asfaltowych na podstawie pomiarów temperatury powierzchni i otoczenia	54
5.3 Weryfikacja opracowanego algorytmu w warunkach terenowych dla badań FWD	60
ROZDZIAŁ 6 WPŁYW RODZAJU WARSTWY ŚCIERALNEJ NA TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ KONSTRUKCJI	63
ROZDZIAŁ 7 WNIOSKI	68

Rozdział 1 Wstęp

Moduł sztywności warstw asfaltowych jest jednym z podstawowych parametrów wpływających na trwałość zmęczeniową nawierzchni. Parametr ten może być obliczony mniej lub bardziej wyrafinowanymi programami komputerowymi, na podstawie pomiarów ugięć nawierzchni ugięciomierzem FWD. Niezależnie od stopnia zaawansowania użytego w oprogramowaniu algorytmu obliczeniowego niezbędne jest, między innymi, określenie temperatury lub gradientu temperatury w warstwach asfaltowych.

Wpływ na rozkład temperatury w warstwach asfaltowych ma w znacznym stopniu przewodność cieplna warstwy ścieralnej, która zależy od technologii wykonania warstwy ścieralnej, użytych materiałów, itp. Podczas słonecznych dni kolor nawierzchni odgrywa istotną rolę w wymianie ciepła między nawierzchnią a otoczeniem. W przypadku nawierzchni ciemnych absorbowana porcja krótkofalowego promieniowania słonecznego jest znacznie większa niż w przypadku nawierzchni jasnych.

Celem pracy jest ocena rozkładu temperatury w nawierzchni o różnych, pod względem technologii wykonania, warstwach ścieralnych a także określenie ich wpływu na trwałość zmęczeniową konstrukcji. Wykorzystując zebrane w trakcie badań wyniki planuje się również stworzenie bazy danych stanowiącej podstawę opracowania nowego lub wdrożenia istniejącego algorytmu oceny temperatury warstw asfaltowych na podstawie pomiaru temperatury powierzchni czujnikami IR¹.

¹ czujnik IR (InfraRed) – czujniki mierzące temperaturę powierzchni w podczerwieni, seryjnie montowane w ugięciomierzach FWD

Rozdział 2 Przegląd istniejących metod oceny temperatury nawierzchni w Polsce i za granicą

2.1 Wstęp

W niniejszym rozdziale przedstawiono wybrane metody oceny temperatury nawierzchni. Metody starsze lub rzadziej stosowane opisano w sposób skrócony. Szerzej opisano metody nowsze oraz te bazujące na wynikach pomiarów temperatury uzyskiwanych w trakcie pomiaru ugięć aparatem FWD.

Podstawą wielu opracowań jest praca [SOU 68], w której zarejestrowane temperatury warstw asfaltowych przedstawiono w funkcji głębokości, pory dnia oraz średniej temperatury z ostatnich pięciu dni. W pracy tej wykorzystano informacje o grubości warstw asfaltowych oraz wyniki pomiarów temperatury powierzchni uzyskane przy pomocy czujnika IR.

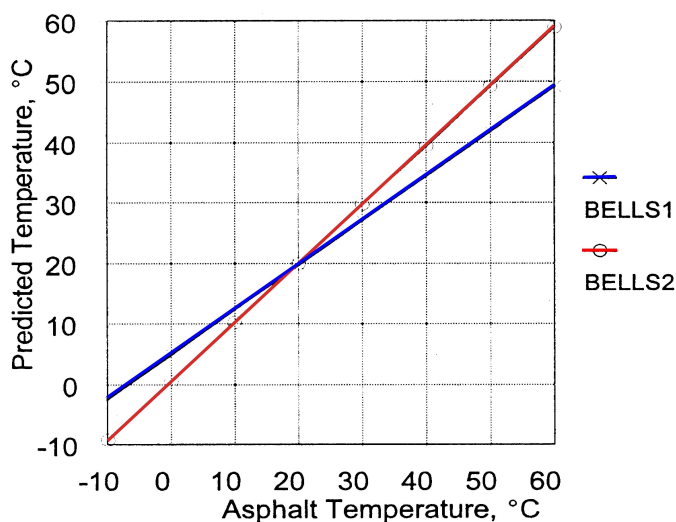
W późniejszym okresie opracowano wiele prostych procedur łącznie z próbą oszacowania średniej temperatury nawierzchni z bieżącej i/lub 5-cio dniowej średniej temperatury powietrza. Jedną z tych procedur jest, rekomendowana przez AASTHTO [AAS 86], *Procedura Szacowania Modułu Warstwy Nawierzchni*. Temperaturę przyjmowaną do dalszych analiz określa się na podstawie pomiarów temperatury powierzchni czujnikami podczerwieni oraz 5-cio dniowej średniej temperatury powietrza. Dodatkowo w ocenie temperatury na różnych głębokościach stosowane są współczynniki korekcyjne w celu normalizacji uzyskanych modułów warstw do temperatury równoważnej. W procedurze AASTHTO wykorzystuje się średnią arytmetyczną temperatur określonych dla górnej, środkowej i dolnej części warstw asfaltowych.

W innych metodach szacowania temperatury warstw asfaltowych posługiwano się między innymi takimi parametrami jak przenikalność cieplna, promieniowanie słoneczne i prędkość wiatru. W pracy [STU 94] zaprezentowano metodę BELLS wykorzystującą temperaturę powietrza z 5-ciu dni, porę dnia, w której wykonano pomiary, zarejestrowaną czujnikiem IR temperaturę powierzchni oraz grubość warstw asfaltowych. Udoskonalone w ramach pracy [LUK 00] metody BELLS2 i BELLS3 zalecane są do stosowania w badaniach LTPP² i rutynowych badaniach ugięć. Porównanie obliczonych oboma metodami temperatur na zakładanej głębokości przedstawiono na Rysunku 2.1.

W pracy [PAR 01] zaproponowano metodę określania temperatury warstwy asfaltowej wykorzystującą dwa parametry: temperaturę powierzchni oraz porę dnia, w której wykonano pomiary, natomiast w opracowaniu [HER 03] zaproponowano metodę bazującą na pomiarach temperatury powierzchni. W tej ostatniej dane zebrane w trakcie pomiaru urządzeniem FWD reprezentują warunki graniczne w obliczeniach przenikalności cieplnej i rozwiązują problem uwzględniania dni słonecznych i z zachmurzeniem. Do obliczenia rozkładu temperatury w warstwach asfaltowych w proponowanej metodzie wykorzystywane są pomiary temperatury powierzchni oraz przenikalność cieplna określona zależnością wyznaczoną metodą różnic skończonych. Przy pomocy tej metody możliwe jest oszacowanie rozkładu temperatury

² Program badawczy LTPP (Long Term Pavement Performance) prowadzony przez Federal Highway Administration (FHWA)

warstw asfaltowych dla każdego punktu pomiarowego FWD, dla którego przeprowadzona ma być analiza nośności nawierzchni.



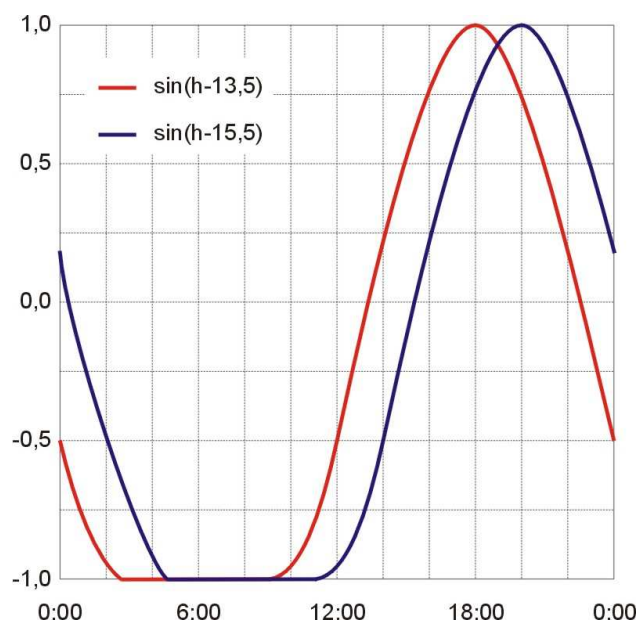
Rysunek 2.1 Porównanie modeli obliczeniowych BELL i BELL2 [LUK 00]

W pracy [WIS 03] przedstawiono model numeryczny oparty na przekształceniach Fouriera wyznaczonych dla przewodności cieplnej. Poprzez kolejne obliczenia iteracyjne przepływu ciepła między powietrzem, konstrukcją nawierzchni a podłożem wyznaczone są temperatury na różnych głębokościach. Wartości te, wyznaczone w określonym momencie dają tzw. profil temperatury.

Poniżej omówiono w sposób szczegółowy wybrane modele obliczeniowe.

2.2 Metoda BELLS3

W metodzie BELLS3 [LUK 00] wykorzystuje się średnią temperaturę z poprzednich dni wraz z porą dnia i temperaturą powierzchni nawierzchni. Metoda BELLS3 jest znacznym unowocześnieniem metody BELLS. Stosowana w metodzie oryginalnej pięciodniowa temperatura powietrza, w niektórych przypadkach trudna do osiągnięcia, została w tej metodzie zastąpiona jednodniową temperaturą powietrza. Według [HER 03] takie podejście polepsza ocenę, ponieważ dzień pierwszy i piąty ma tą samą wagę w oryginalnej metodzie BELLS. W metodzie BELL3 funkcje sinusoidalne wykorzystywane w metodzie oryginalnej do aproksymacji zachowań przy rozgrzewaniu i schładzaniu zostały zastąpione skróconymi funkcjami sinusoidalnymi (Rysunek 2.2).



Rysunek 2.2 Funkcje sinusoidalne zastosowane w metodzie BELLS3 [LUK 00]

Równanie opracowane w [LUK 00], rekomendowane w badaniach rutynowych, przedstawia się następująco:

$$T_d = 0,95 + 0,892 \cdot IR + \{\log(d) - 1,25\} \{-0,428 \cdot IR + 0,553 \cdot (1\text{-dniowa}) + 3,29 \cdot \sin(h_{18} - 15,5)\} + 0,037 \cdot IR \cdot \sin(h_{18} - 13,5)$$

gdzie:

T_d – temperatura nawierzchni na głębokości d , °C

IR – temperatura zarejestrowana przez czujnik podczerwieni, °C

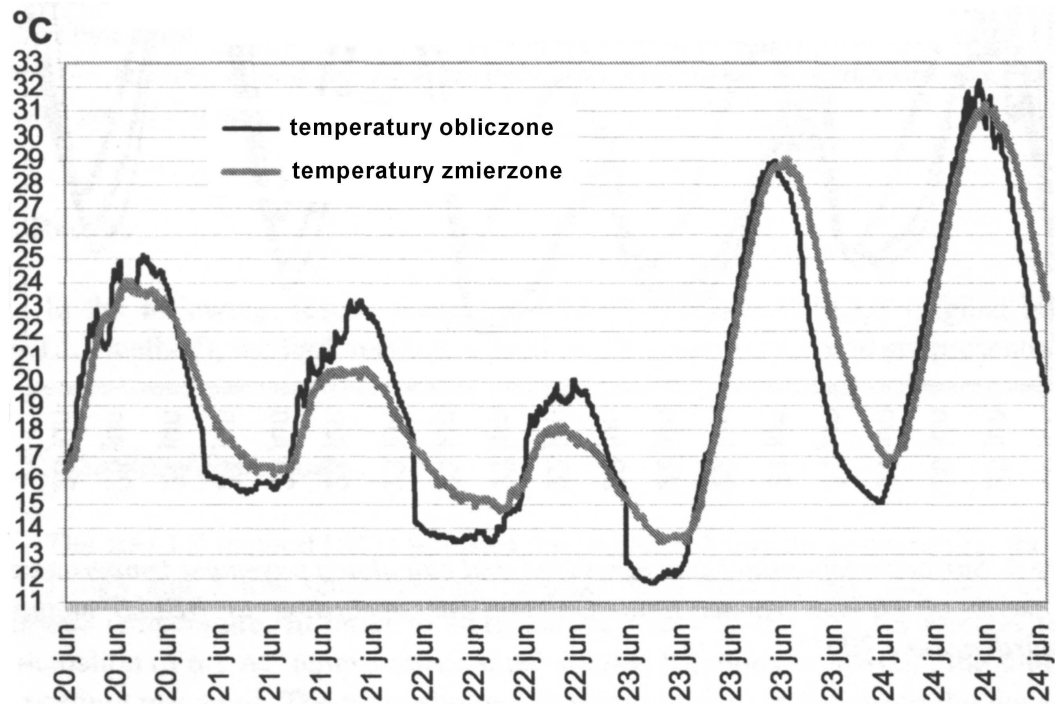
d – głębokość, dla której obliczana jest temperatura, mm

1-dniowa – średnia temperatura powietrza dla dnia poprzedzającego dzień pomiarów,

\sin – funkcja sinusoidalna dla 18-godzinnego systemu zegarowego, gdzie 2π radianów równa się 18-godzinnemu cyklowi

h_{18} – pora dnia w 24-godzinnym systemie zegarowym ale obliczana w 18-godzinnym systemie wzrostów i spadków temperatury warstw asfaltowych

Na Rysunku 2.3 przedstawiono przykład wyników badań porównawczych, przeprowadzonych w pracy [HER 03], dla temperatur obliczonych metodą BELLS3 i temperatur zmierzonych na głębokości 130 mm



Rysunek 2.3 Obliczone metodą BELLS3 i zmierzone temperatury nawierzchni na głębokości 130 mm w funkcji czasu.

Temperatury obliczone metodą BELLS3 w tym przykładzie niższe niż te zmierzone w wczesnych godzinach porannych natomiast wyższe od tych zmierzonych w ciągu dni zachmurzonych.

2.3 Metoda Wistuby

W metodzie tej, opartej na numerycznym modelu przewodności cieplnej opisanej przekształceniami Fouriera, poprzez kolejne obliczenia iteracyjne przepływu ciepła między powietrzem, konstrukcją nawierzchni a podłożem wyznaczane są temperatury na różnych głębokościach. Uzyskane w ten sposób temperatury na różnych głębokościach w określonym momencie tworzą tzw. profil temperatury.

Poniżej przedstawiono równanie [WIS 03], przy pomocy którego można wyznaczyć profil temperatury w czasie $k+1$, przy założeniu, że znany jest profil temperatury w czasie k .

$$T_{n,k+1} = a * \frac{\Delta t}{\Delta x^2} * (T_{n+1,k} - 2 * T_{n,k} + T_{n-1,k}) + T_{n,k}$$

gdzie:

$T_{k,n}$ – temperatura wyrażona w Kelvinach [K]

n – głębokość [cm]

k – godzina [h]

a – dyfuzyjność termiczna [cm^2/h]

Δt – okres między profilami [h]

Δx – odległość między głębokościami n i $n+1$ [cm]

Dokładność zastosowanego modelu zależy wg [WIS 03] od jakości danych wejściowych takich jak: początkowy profil temperatury, zmienność temperatury w czasie określona dla podłoża i powierzchni nawierzchni, parametrów warstw konstrukcji i jakości modelu np. liczba wykonanych iteracji.

Jak podaje [WIS 03] metoda ta stosowana była w pracach badawczych związanych z oceną temperatury warstw asfaltowych w różnych strefach klimatycznych na terenie Austrii. W badaniach tych, trwających pięć lat, wyznaczana była temperatura godzinowa na podstawie danych meteorologicznych tj godzinowej zmienności temperatury powietrza, nasłonecznienia i prędkości wiatru oraz wyników pomiarów temperatury podłoża. Maksymalne odchylenie obliczonych w trakcie tych badań temperatur do zmierzonych temperatur wyniosło $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

2.4 Metoda Hermanssona

W modelu obliczeniowym zastosowanym w pracy [HER 03] wykorzystuje się serię wyników pomiarów temperatury powierzchni nawierzchni asfaltowej. Aby obliczyć przenikanie ciepła model obliczeniowy reprezentujący konstrukcję nawierzchni dzieli się na dwie części. Dla każdej części określa się porowatość, stopień nasycenia wodą oraz występującą jako wartość zmienna temperaturę. Przewodność i pojemność cieplną warstw poniżej warstw asfaltowych oblicza się z wykorzystaniem danych o zawartości wody i gęstości objętościowej materiałów jak w typowych konstrukcjach. Dla każdej części określa się temperaturę początkową a następnie dokonuje się obliczeń temperatur kilkakrotnie dla każdej godziny. Obliczenia prowadzone są zgodnie z ogólną teorią przenikania ciepła, która mówi, że ciepło przechodzi z obszarów ciepłych do chłodnych w zależności od różnicy temperatur i przewodności termicznej. Zmiana temperatury obszaru zależy od ilości energii zatrzymanej lub straconej oraz pojemności termicznej.

Opisana procedura jest aproksymacją różnic skończonych jednowymiarowego wyrażenia przenikalności cieplnej:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

gdzie:

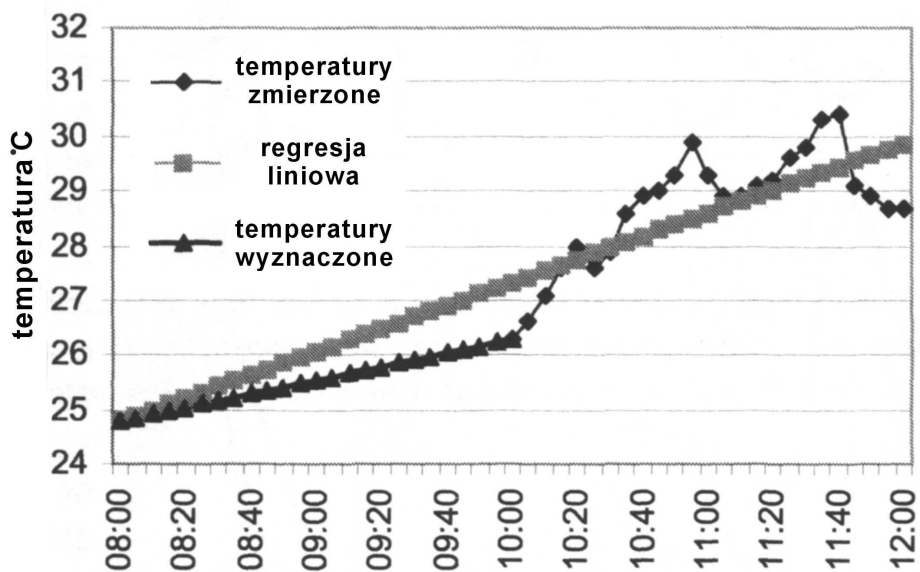
$u(t,x)$ - temperatura,

α - dyfuzyjność termiczna (stosunek przewodności termicznej do pojemności cieplnej),

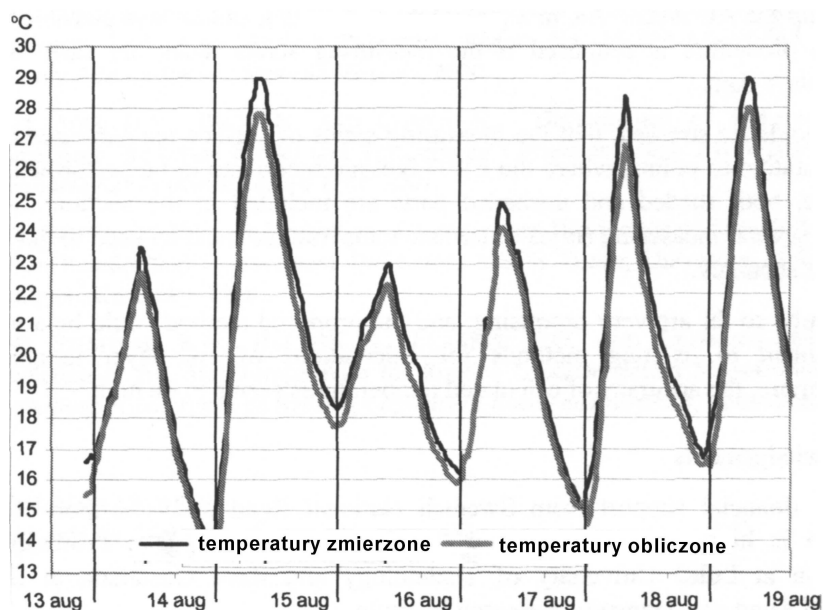
t – czas,

x – głębokość.

Proponowana metoda wymaga pełnej serii danych z pomiaru temperatury powierzchni. W omawianym modelu brakujące dane muszą być oszacowane poprzez ekstrapolację przy pomocy regresji liniowej wyznaczonej dla danych z godzin, w których przeprowadzono pomiar temperatury. Sposób uzupełniania danych proponowany w pracy [HER 03] przedstawiono na Rysunku 2.4



Rysunek 2.4 Sposób wyznaczenia temperatur dla okresu, w którym nie prowadzono ich pomiaru



Rysunek 2.5 Obliczone i zmierzone temperatury nawierzchni na głębokości 120 mm w funkcji czasu. Pionowe linie oznaczają wznowienie obliczeń o godzinie 8.

Na Rysunku 2.5 przedstawiono przykład wyników badań porównawczych, przeprowadzonych w pracy [HER 03], dla temperatur obliczonych metodą Hermanssona i temperatur zmierzonych na głębokości 120 mm

2.5 Bibliografia

[AAS 86] *The AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transport Officials, Washington, D.C. 1986.

[DEM 85] DEMPSEY B.J., HERLACHE W.A. and PATEL A.J., *Environmental effects on pavements. Volume 3. FHWA/RD-84/115*. Illinois University at Urbana-Campaign, Mclean, VA, 1985.

[HER 01] HERMANSSON Å. and KNUTSSON S., Discussion to Park D.Y., Buch N. and Chatti K. Development of effective layer temperature prediction model and temperature correction using FWD deflections, *Transportation Research Record 1764*, TRB National Research Council, Washington, D.C., pp.107-108, 2001.

[HER 01:2] HERMANSSON Å., Mathematical model for calculation of pavement temperatures: comparison of calculated and measured temperatures, *Transportation Research Record 1764*, TRB National Research Council, Washington, D.C., pp.180-188, 2001.

[HER 03] HERMANSSON Å., Simulation of asphalt concrete pavement temperatures for use with FWD, *Road Materials and Pavement Design Vol. 3*, HERMES Science Publishing Ltd, Stanmore, United Kingdom 2003.

[JOH 76] JOHANSEN O., Varmetekniske Egenskaper av Jord og Bygningmaterialer, *Frost I Jord NR 17*, Oslo, Norway 1976.

[LUK 00] LUKANEN E.O., STUBSTAD R.N and BRIGGS R., Temperature prediction and adjustment factors for asphalt pavement, Report No FHWA-RD-98-085, Federal Highway Administration. McLean Virginia, 2000.

[PAR 01] PARK D.Y., BUCH N. and CHATTI K., Development of effective layer temperature prediction model and temperature correction using FWD deflections, *Transportation Research Record 1764*, 2001.

[SOU 68] SOUTHGATE H.F., An evaluation of temperature distribution of asphalt pavements and its relationship to pavement deflection, MSCE Thesis, University of Kentucky, Lexington, Kentucky, 1968.

[STU 94] STUBSTAD R.N., BALTZER S., LUKANEN E.O. AND ERTMAN-LARSEN H.J., Prediction of AC mat temperature for routine load/deflection measurements, *4th International Conference on Bearing Capacity of Road and Airfields*, Minnesota, 1994.

[WIS 03] WISTUBA M., Determining design temperatures for asphalt pavements, *Road Materials and Pavement Design Vol. 4*, HERMES Science Publishing Ltd, Stanmore, United Kingdom 2003.

Rozdział 3 Prace badawczo-pomiarowe

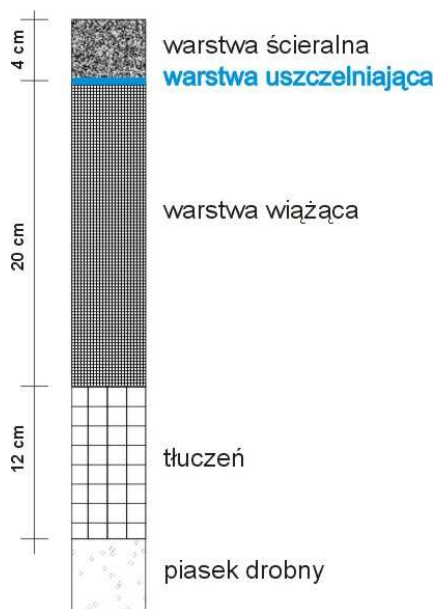
3.1 Wstęp

W ramach niniejszej pracy wykonano na terenie Instytutu Badawczego Dróg i Mostów odcinek doświadczalny, na którym prowadzone będą pomiary temperatur poszczególnych warstw nawierzchni oraz otoczenia w celu określenia wpływu rodzaju warstwy ścieralnej na trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni.

Lokalizację odcinka wybrano tak aby był on poddany jednakowemu działaniu warunków atmosferycznych, takich jak nasłonecznienie, wiatr, opady itp. Na lokalizację odcinka miały również wpływ względy techniczne – przewidziano zbieranie danych co pół godziny ze 100 czujników zainstalowanych w nawierzchni. Dodatkowo, jako dane uzupełniające, przewidziano zbieranie i archiwizację wyników pomiarów temperatury powierzchni nawierzchni przy pomocy pirometru ręcznego oraz danych pogodowych ze stacji pomiarowej umieszczonej na terenie Instytutu.

3.2 Założenia wykonawczo-pomiarowe

Przyjęto, że dla wszystkich badanych konstrukcji zostanie wykonana podbudowa z betonu asfaltowego o grubości 20 cm ułożona na podbudowie niezwiązanej z tłucznia grubości ok. 12 cm oraz warstwie odcinającej z piasku (Rysunek 3.1). Warstwa uszczelniająca przedstawiona na poniższym rysunku stanowić będzie jednocześnie spoinę płyt warstwy ścieralnej i warstwy wiążącej.

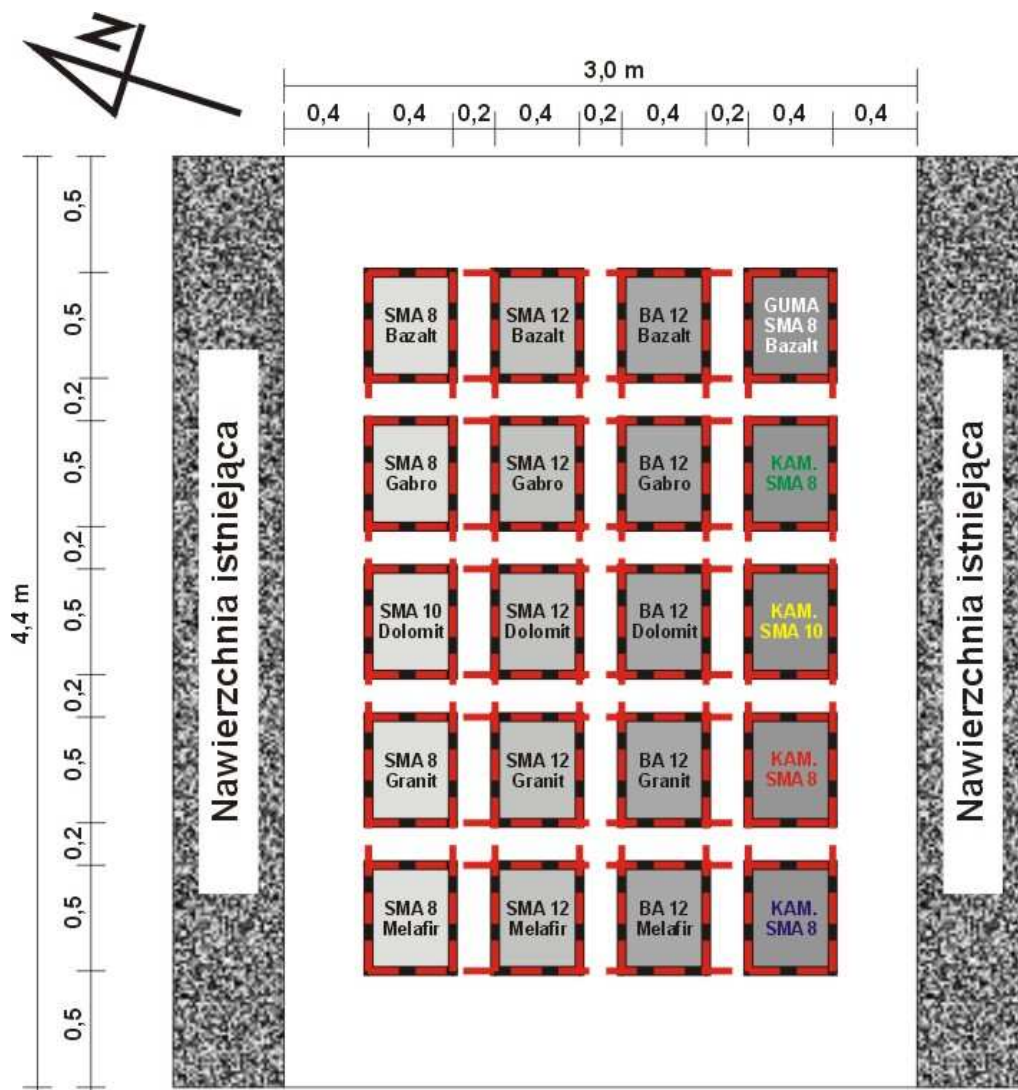


Rysunek 3.1 Przyjęty w badanych konstrukcjach układ warstw

W modelowanych konstrukcjach nawierzchni (próbkach), w których podłoże, podbudowa oraz warstwa wiążąca są takie same zastosowane zostaną różne, najczęściej stosowane w warunkach polskich, technologie wykonania warstw ścieralnych. Warstwy ścierane zostaną

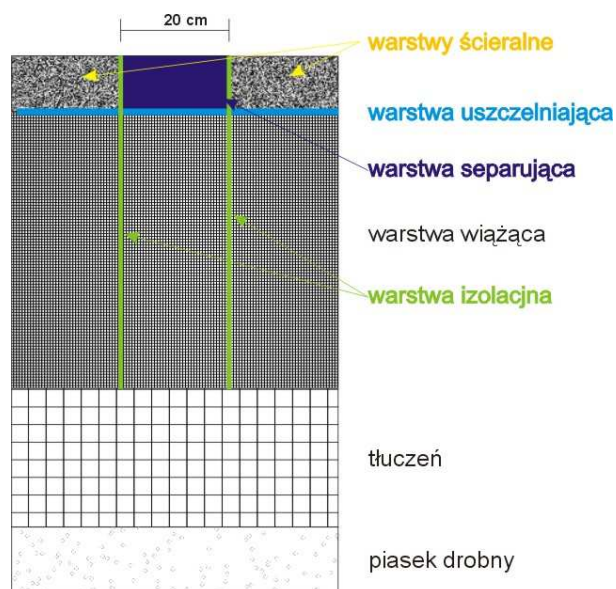
wykonane w laboratorium w formie płyt o wymiarach 50 x 40 cm. Grubość płyt powinna wynosić 4 cm. Przygotowane zostaną warstwy ścieralne w technologiach SMA8 oraz SMA12, BA12, KAMELEON8 w kolorach niebieski, czerwony, żółty i zielony oraz GUMA8. W mieszankach tych zastosowane zostaną następujące kruszywa: bazalt, gablo, dolomit, granit oraz melafir.

Gotowe płyty umieszczone zostaną na odcinku badawczym według schematu przedstawionego na Rysunku 3.2.



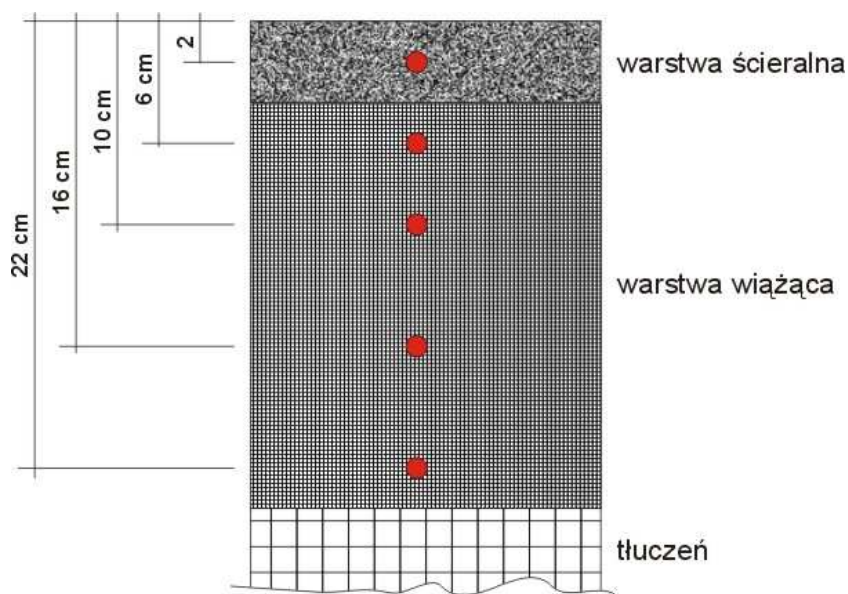
Rysunek 3.2 Rozmieszczenie płyt

Aby wyeliminować wzajemne oddziaływanie między poszczególnymi próbkami założono, że każda z nich zostanie odseparowana od pozostałych warstwą izolacyjną wg schematu zamieszczonego na Rysunku 3.3.



Rysunek 3.3 Schemat izolacji próbek

W celu wyznaczenia profilu temperatury dla każdej próbki zostaną zainstalowane czujniki temperatury na głębokościach 2, 6, 10, 16 oraz 22 cm od powierzchni (Rysunek 3.4).



Rysunek 3.4 Zakładany układ czujników

Do oceny warunków atmosferycznych wykorzystana zostanie stacja pogodowa zlokalizowana na terenie Instytutu (Rysunek 3.5). Wyniki pomiarów temperatur nawierzchni i powietrza rejestrowane będą automatycznie z częstotliwością 30 min.



Rysunek 3.5 Stacja pogodowa

Prowadzone będą dodatkowe pomiary temperatury powierzchni przy pomocy pirometru ręcznego (Rysunek 3.6). Pomiary te prowadzone będą w pojedynczych seriach w różnych warunkach atmosferycznych. Dokładny opis techniczny przedstawiono w Załączniku 3.



Rysunek 3.6 Pirometr do pomiaru temperatury powierzchni

3.3 Realizacja prac

Konstrukcję wykonanej nawierzchni przyjęto zgodnie z założeniami opisanymi w punkcie 3.2. W kolejnych etapach wykonano podłoże stanowiące piasek drobny, podbudowę niezwiązaną z tłucznia oraz warstwę wiążącą z betonu asfaltowego. Wyznaczono miejsca ułożenia płyt warstw ścieralnych (segmenty pomiarowe) a następnie wykonano nacięcia i izolacje w warstwie wiążącej. W odpowiednich miejscach zamontowano czujniki temperatury. Na tak przygotowanym odcinku rozmieszczono wykonane w laboratorium płyty warstw ścieralnych, które po zamontowaniu w nich czujników temperatury zostały

przyklejone do warstwy wiążącej. Każdą płytę zaizolowano a miejsca między płytami wypełniono odpowiednią masą. Na tym zakończono prace związane z przygotowaniem odcinka doświadczalnego.

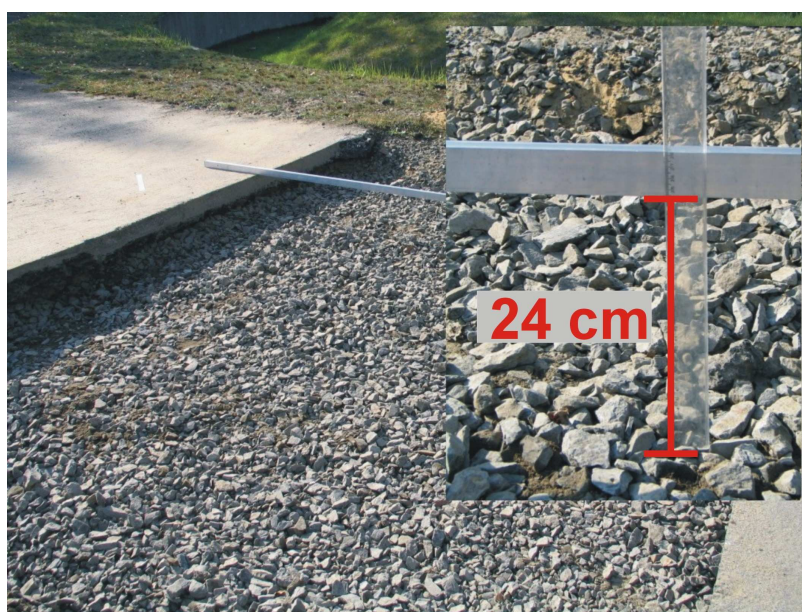
Poniżej przedstawiono w sposób szczegółowy przebieg poszczególnych etapów prac. Dokładne dane techniczne zamieszczono w odpowiednich załącznikach.

3.3.1 Podłoże i podbudowa nawierzchni

W pierwszym etapie prac wykonano warstwę odcinającą z piasku drobnego grubości ok. 40 cm (Rysunek 3.7) oraz warstwę tłucznia o grubości ok. 12 cm (Rysunek 3.8).



Rysunek 3.7 Przygotowanie warstwy odcinającej

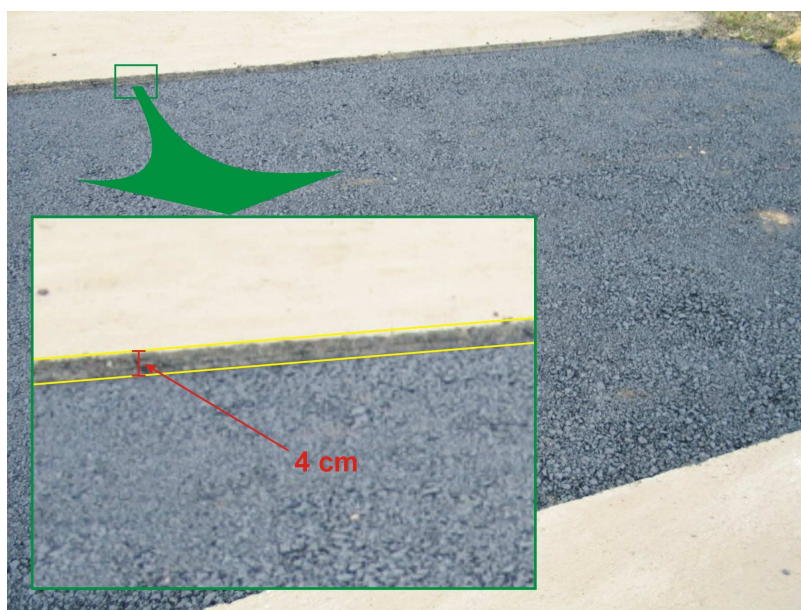


Rysunek 3.8 Przygotowanie warstwy podbudowy z tłucznia

Na tak przygotowanej podbudowie ułożono warstwę wiążącą o łącznej grubości 20 cm wykonaną z betonu asfaltowego BA25 (Rysunek 3.9).

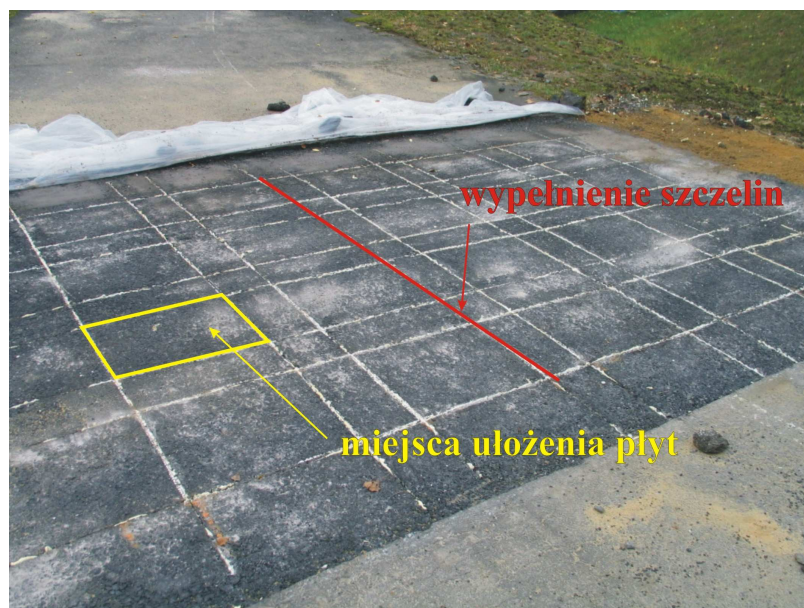


Rysunek 3.9 Wykonywanie warstwy wiążącej z betonu asfaltowego



Rysunek 3.10 Gotowa warstwa wiążąca

Gotową warstwę wiążącą (Rysunek 3.10) przygotowano do dalszych prac tj. wykonano nacięcia na głębokość warstwy wiążącej według schematu przedstawionego na Rysunku 3.2. Powstałą po pile szczelinę o szerokości ok. 5 mm wypełniono warstwowo pianką poliuretanową w taki sposób, aby nie doszło do powstania pustek. Warstwę wiążącą przygotowaną do instalacji czujników temperatury przedstawiono na Rysunku 3.11.



Rysunek 3.11 Wypełnienie szczelin

Instalację czujników temperatury przeprowadzono zgodnie z założeniami opisanymi w punkcie 3.2. W wyznaczonych miejscach zamontowano zastawy czujników rozmieszczonych w taki sposób aby po nałożeniu płyty warstwy ścieralnej znalazły się na głębokościach 6, 10, 16 i 22 cm licząc od powierzchni płyty (Rysunek 3.4).

Sposób montażu czujników w pojedynczym segmencie odbywał się następująco:

- wykonano płytkie nacięcie miejsca pomiarowego do wyprowadzenia przewodów czujników,
- wywiercono cztery otwory o średnicy 10 mm na głębokościach 2, 6, 10 i 18 cm, w których umieszczono czujniki temperatury,
- otwory z czujnikami zalano emulsją a zabezpieczoną wiązkę przewodów wyprowadzono do pasów rozdzielających, między miejsca pomiarowe.

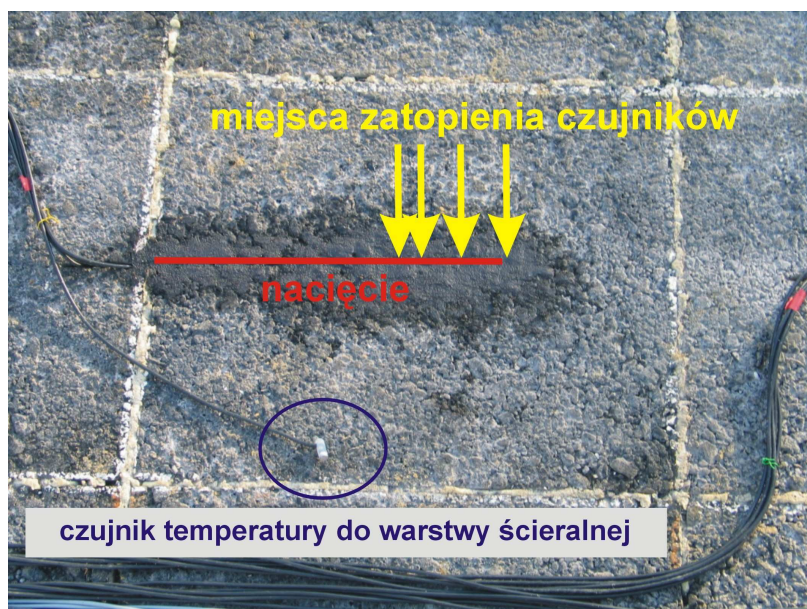
W zaprojektowanym układzie pomiarowym zastosowano czujniki pomiaru temperatury Pt 100 (Rysunek 3.12) będące opornikami platynowymi, których oporność zależy liniowo od temperatury. Pomiar temperatury za pomocą tego typu czujników polega w praktyce na określeniu napięcia na zaciskach. Uzyskane wartości napięć są odpowiednio przeskalowane do wartości rzeczywistych temperatur. Dokładność pomiarów każdego czujnika wynosi $\pm 0.1^\circ\text{C}$.



Rysunek 3.12 Czujnik temperatury

Szczegółowy opis techniczny przebiegu prac związanych z montażem czujników temperatury w warstwie wiążącej wraz z opisem technicznym układu pomiarowego zamieszczono w Załączniku 2.

Na Rysunku 3.13 przedstawiono zamontowany zestaw czujników z wyprowadzoną do boku wiązką przewodów oraz pozostawionym (do zamontowania w warstwie ścieralnej) pojedynczym czujnikiem temperatury.



Rysunek 3.13 Miejsce pomiarowe wyposażone w czujniki temperatury

Rysunek 3.14 przedstawia sposób wyprowadzenia wiązek przewodów z poszczególnych miejsc pomiaru temperatury natomiast na Rysunku 3.15 przedstawiono montaż przewodów w skrzynce zbiorczej.



Rysunek 3.14 Wyprowadzenia wiązek przewodów z miejsc pomiarowych



Rysunek 3.15 Montaż przewodów w skrzynce zbiorczej

3.3.2 Warstwa ścierna

Łącznie wykonano 20 sztuk płyt warstw ściernych o wymiarach 50x40x4 cm. Zgodnie z założeniami zostały one wykonane w różnych technologiach z zastosowaniem różnego rodzaju kruszyw (Tabela 3.1.). Dokładne informacje techniczne zawarto w Załączniku 1.

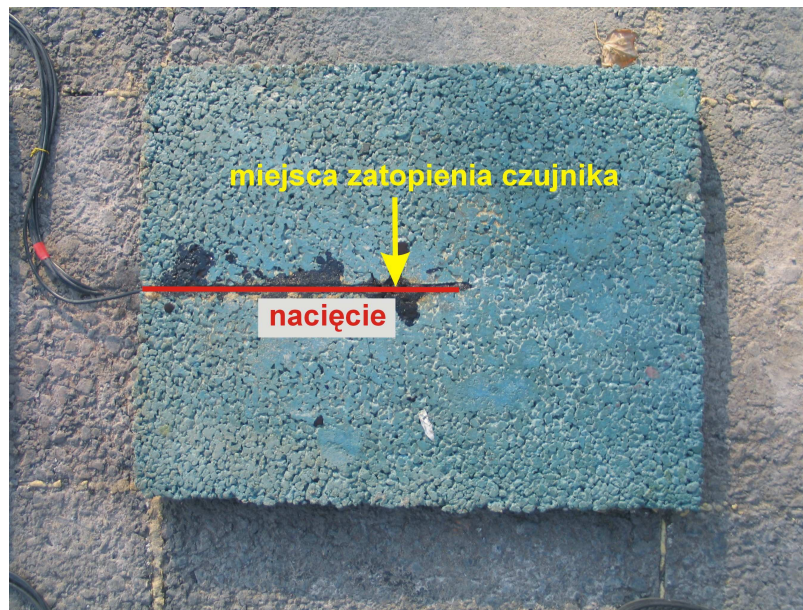
Tabela 3.1 Zestawienie wykonanych warstw ścieralnych

kruszywa technologie	BAZALT	GABRO	DOLOMIT	GRANIT	MELAFIR
SMA	SMA8	SMA8	SMA10	SMA8	SMA8
	SMA12	SMA12	SMA12	SMA12	SMA12
BA	BA12	BA12	BA12	BA12	BA12
KAMELEON		ZIELONY SMA8	ŻÓŁTY SMA10	NIEBIESKI SMA8	CZERWONY SMA8
GUFI	SMA8				

Gotowe płyty rozmieszczono na odcinku doświadczalnym (Rysunek 3.16) według schematu przedstawionego na Rysunku 3.2. W każdej płycie zamontowano czujnik temperatury na głębokości 2 cm. Sposób montażu czujników był analogiczny jak w przypadku warstwy ścieralnej z tym, że nacięcie i otwór wykonywane były od spodu płyty (Rysunek 3.17).



Rysunek 3.16 Rozmieszczenie płyt warstw ścieranych



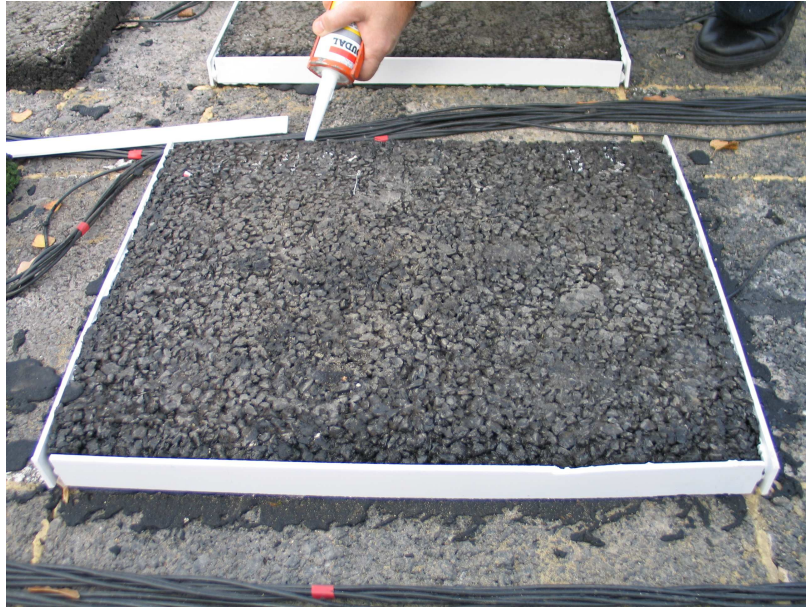
Rysunek 3.17 Spód płyty wyposażonej w czujnik temperatury

Po zmontowaniu czujników w płytach przystąpiono do ostatniego etapu prac tj do przyklejenia płyt do warstwy wiążącej oraz zabezpieczenia odcinka pomiarowego.

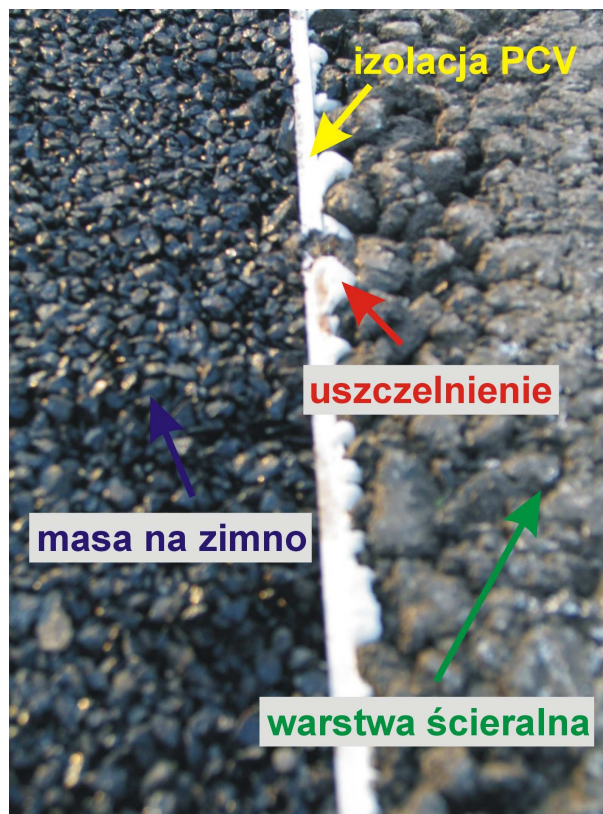
Płyty przyklejono do warstwy wiążącej za pomocą zaprawy asfaltowej BORNIT (Rysunek 3.18). Każdą płytę zaizolowano paskami izolacyjnymi z spienionego PCV uszczelniając połączenia silikonem (Rysunki 3.19 i 3.20).



Rysunek 3.18 Przyklejona do podłoża płyta

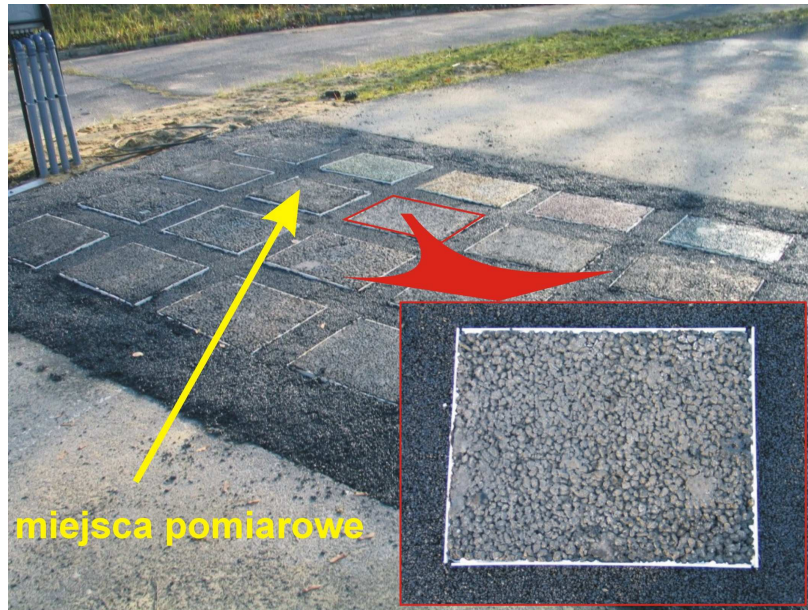


Rysunek 3.19 Izolacja płyt



Rysunek 3.20 Uszczelnienie płyt

Gotowy odcinek doświadczalny przedstawiono na Rysunku 3.21.



Rysunek 3.21 Odcinek doświadczalny po zakończeniu prac

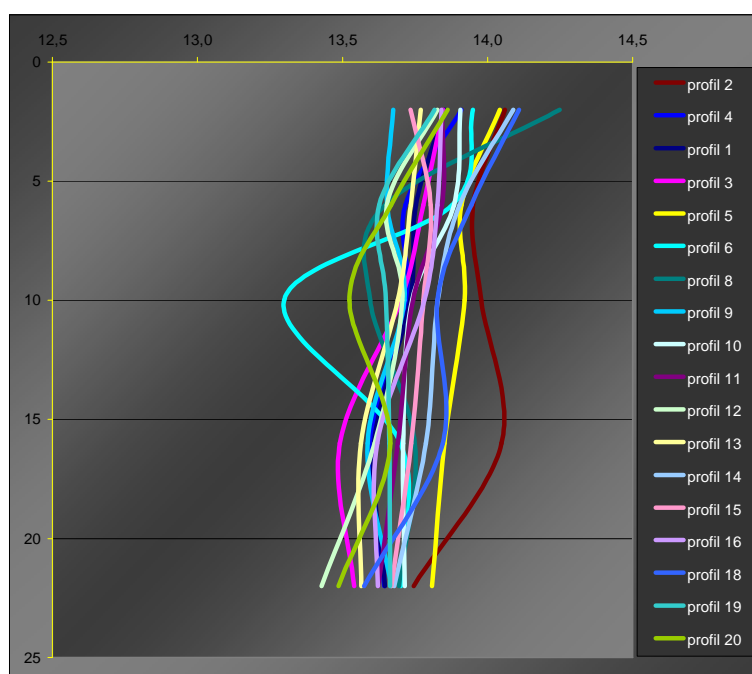
Rozdział 4 Wyniki pomiarów

4.1 Temperatury zarejestrowane dla miejsc pomiarowych w przekrojach

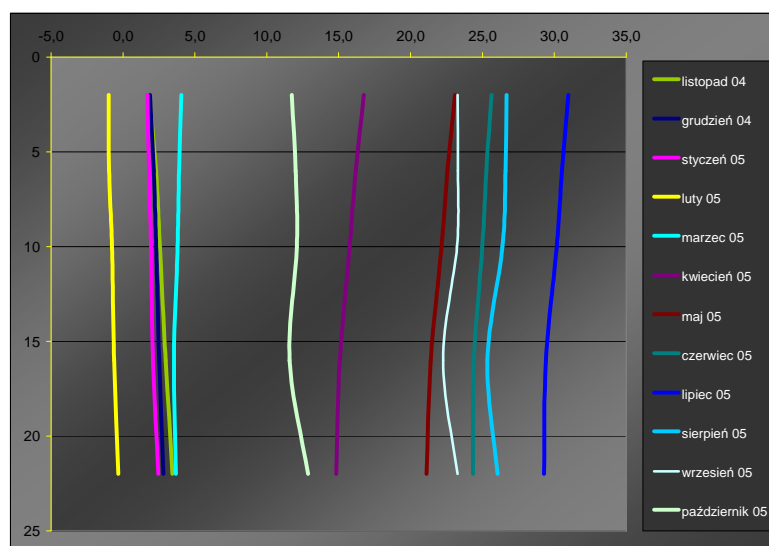
Dokładne dane na temat działania oraz sposobu monitorowania temperatur w poszczególnych próbkach przedstawiono w Załączniku 2. Dane uzyskane w trakcie pomiarów zestawiono w Załączniku 4

Poniżej przedstawiono średnie roczne (Rysunek 4.1) oraz średnie miesięczne (Rysunek 4.2) temperatury zarejestrowane w poszczególnych próbkach w ciągu roku pomiarowego.

W trakcie oceny wyników stwierdzono, że czujniki na głębokości 6 cm w próbce 7 oraz 16 cm w próbce 17 dają błędne wartości, tj znacznie mniejsze od tych rejestrowanych przez inne czujniki. W związku z tym w analizie danych wyniki z tych czujników zostaną pominięte.



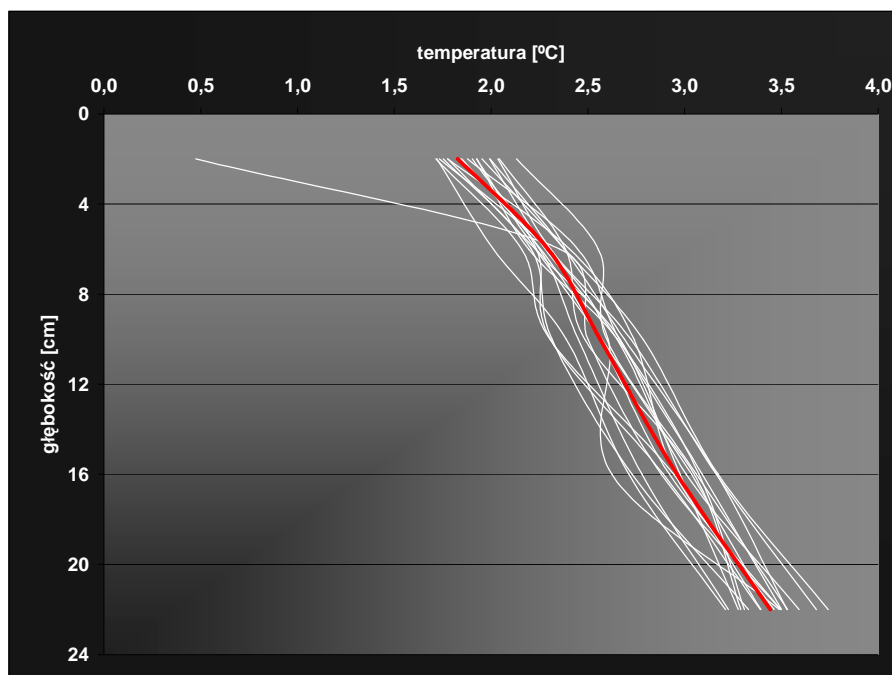
Rysunek 4.1 Średnie roczne profile temperatur wyznaczone dla każdej próbki w roku pomiarowym



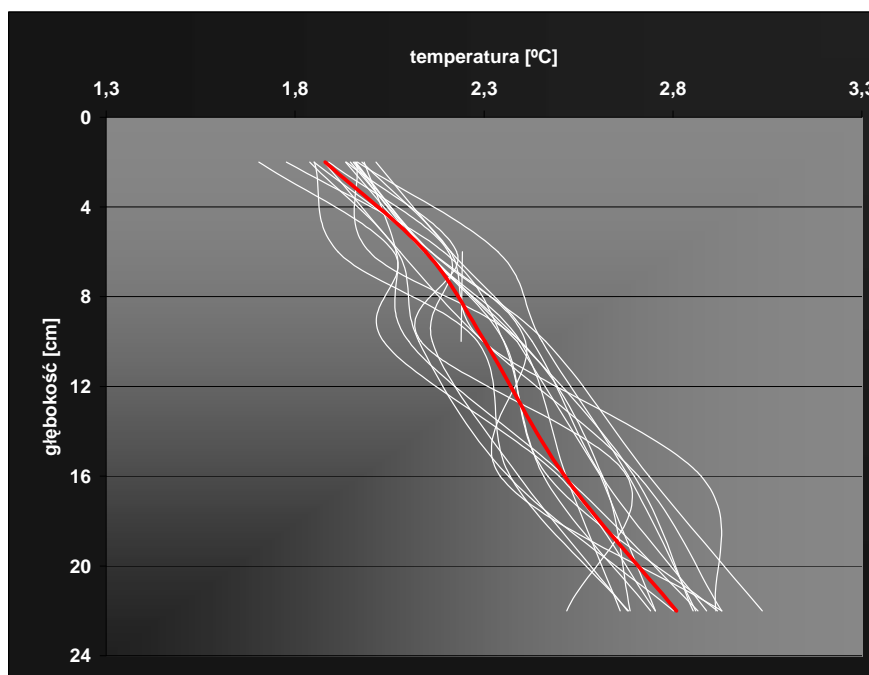
Rysunek 4.2 Średnie miesięczne profile temperatur wyznaczone dla wszystkich próbek w miesiącu

Z przedstawionych powyżej danych wynika, że zarejestrowane profile temperatur charakteryzują się nieznaczną zmiennością. Średnie wartości temperatur zarejestrowane w poszczególnych próbkach na różnych głębokościach w ciągu całego roku wahają się od 13,3°C do 14,2°C, natomiast różnice temperatur zarejestrowanych na tych samych głębokościach wynoszą średnio 0,5°C. W ciągu roku pomiarowego temperatura w próbkach (Rysunek 4.2) wahała się średnio od -1,0°C na głębokości 2cm i -0,3°C na głębokości 22cm do 31,0°C na głębokości 2cm i 29,3°C na głębokości 22cm

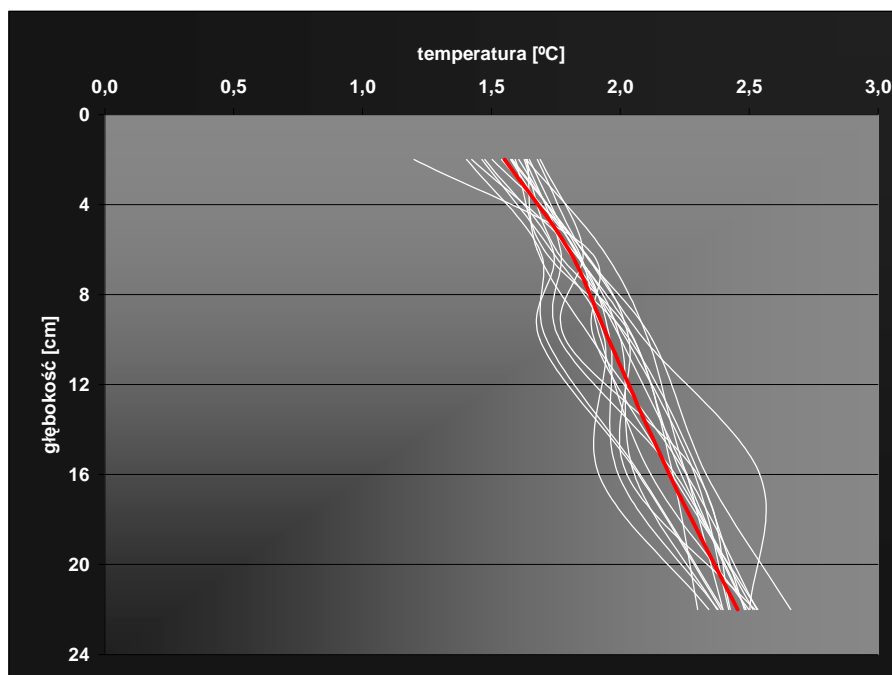
Na Rysunkach 4.3 – 4.14 oddzielnie dla każdego miesiąca przedstawiono w formie wykresów temperaturę powietrza rejestrowaną co 30 minut oraz obliczone średnie dobowe temperatury powietrza.



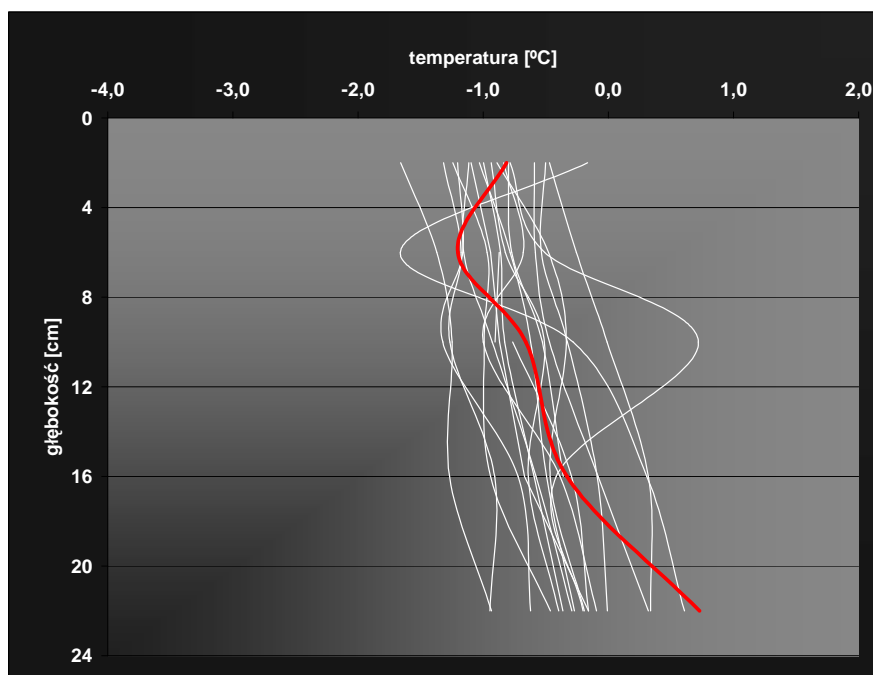
Rysunek 4.3 Średnie profile temperatury zarejestrowanej na wszystkich próbkach w listopadzie (kolorem czerwonym oznaczono średni profil miesięczny)



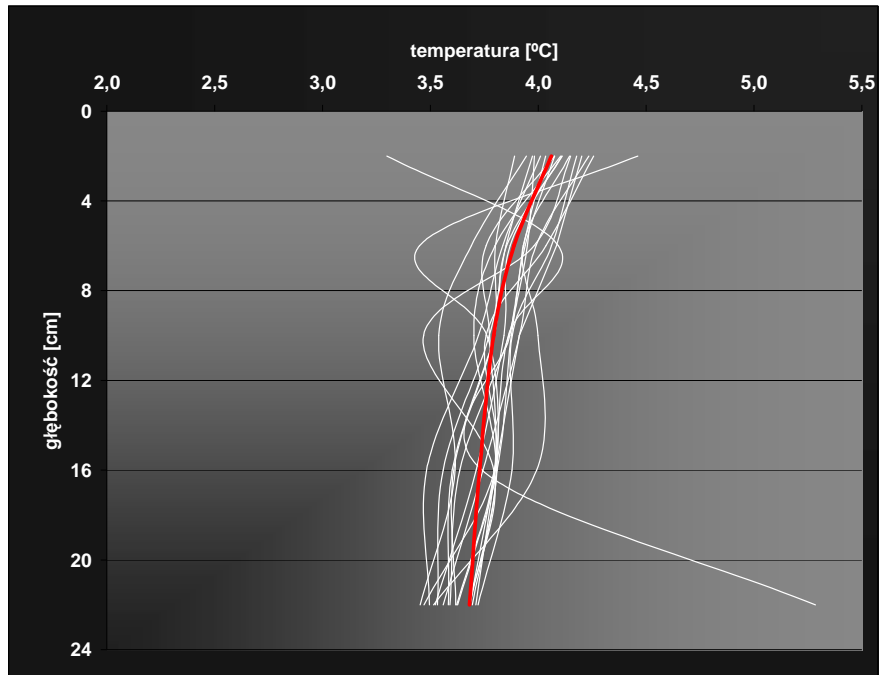
Rysunek 4.4 Średnie profile temperatury zarejestrowanej na wszystkich próbkach w grudniu (kolorem czerwonym oznaczono średni profil miesięczny)



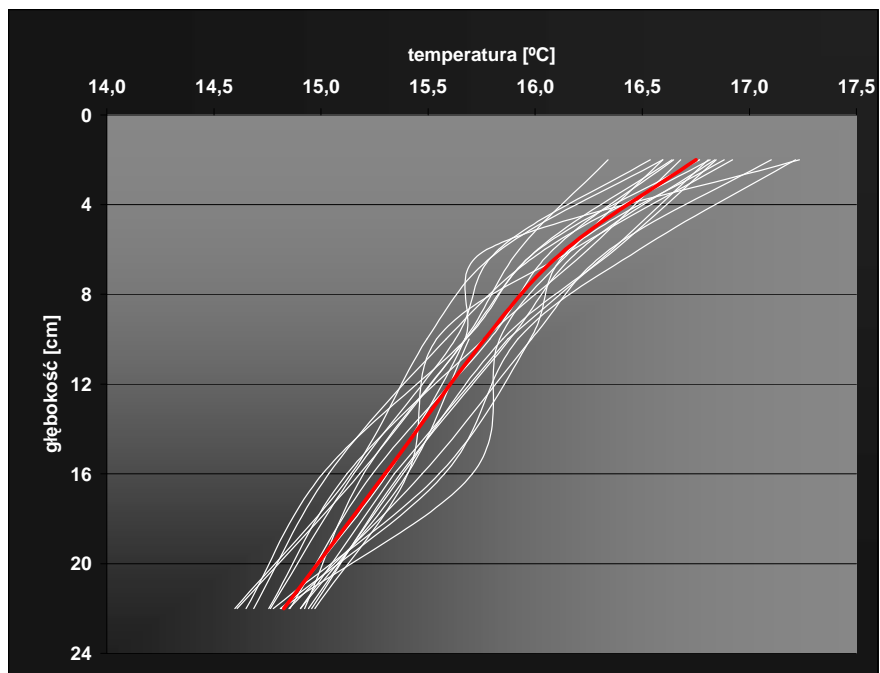
Rysunek 4.5 Średnie profile temperatury zarejestrowanej na wszystkich próbkach w styczniu (kolorem czerwonym oznaczono średni profil miesięczny)



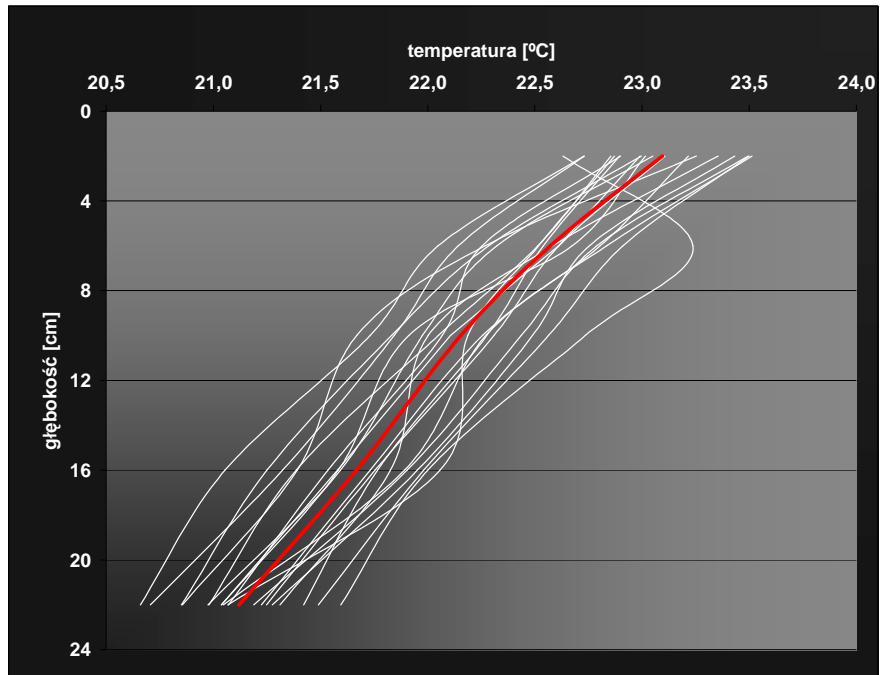
Rysunek 4.6 Średnie profile temperatury zarejestrowanej na wszystkich próbkach w lutym (kolorem czerwonym oznaczono średni profil miesięczny)



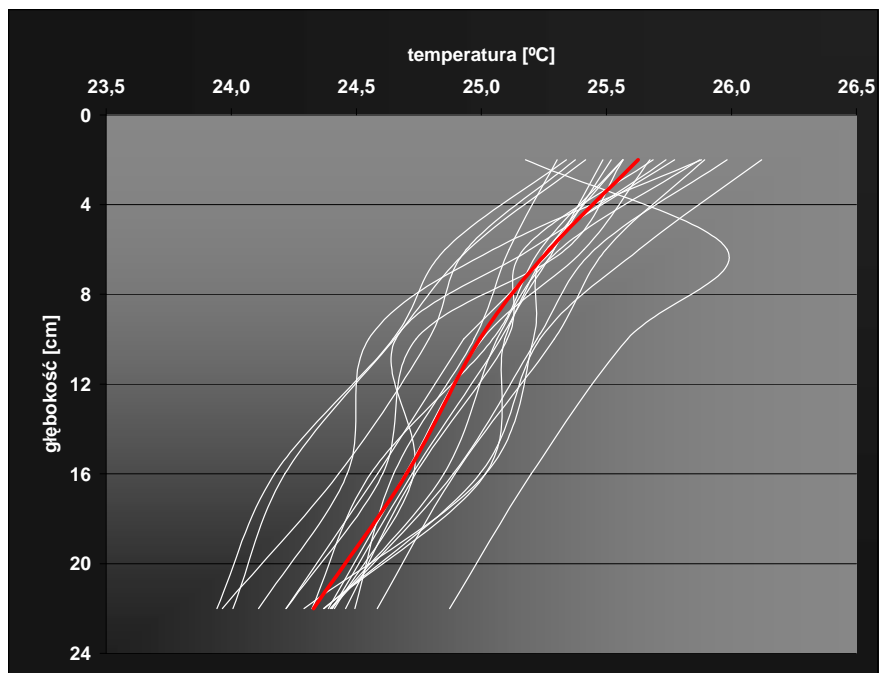
Rysunek 4.7 Średnie profile temperatury zarejestrowanej na wszystkich próbkach w marcu (kolorem czerwonym oznaczono średni profil miesięczny)



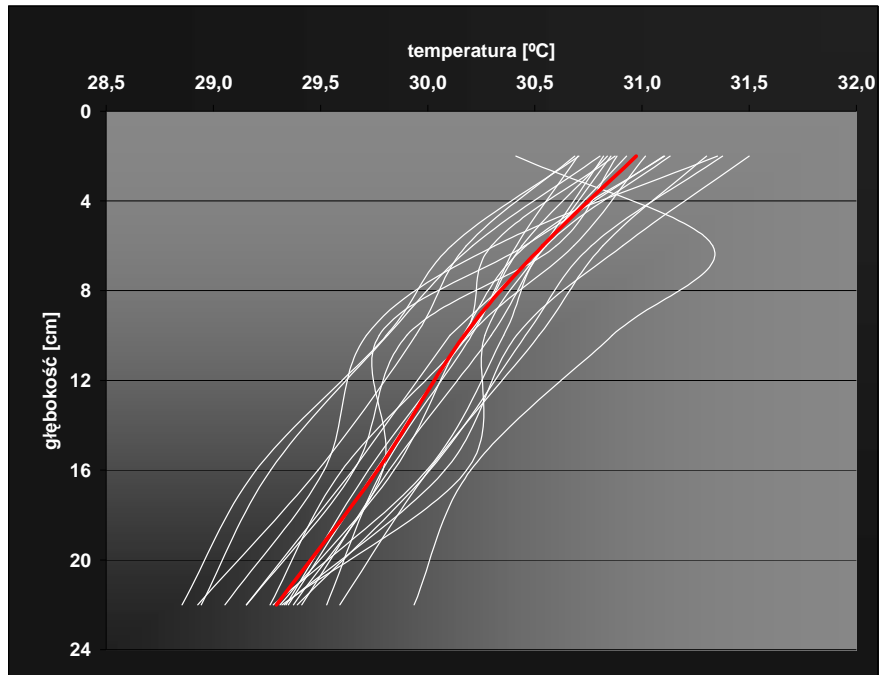
Rysunek 4.8 Średnie profile temperatury zarejestrowanej na wszystkich próbkach w kwietniu (kolorem czerwonym oznaczono średni profil miesięczny)



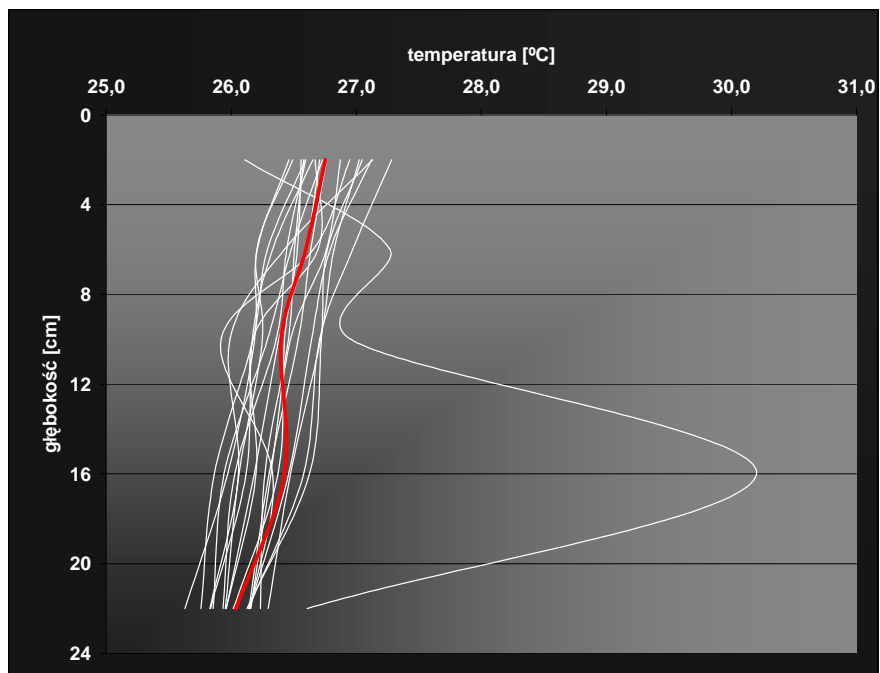
Rysunek 4.9 Średnie profile temperatury zarejestrowanej na wszystkich próbkach w maju (kolorem czerwonym oznaczono średni profil miesięczny)



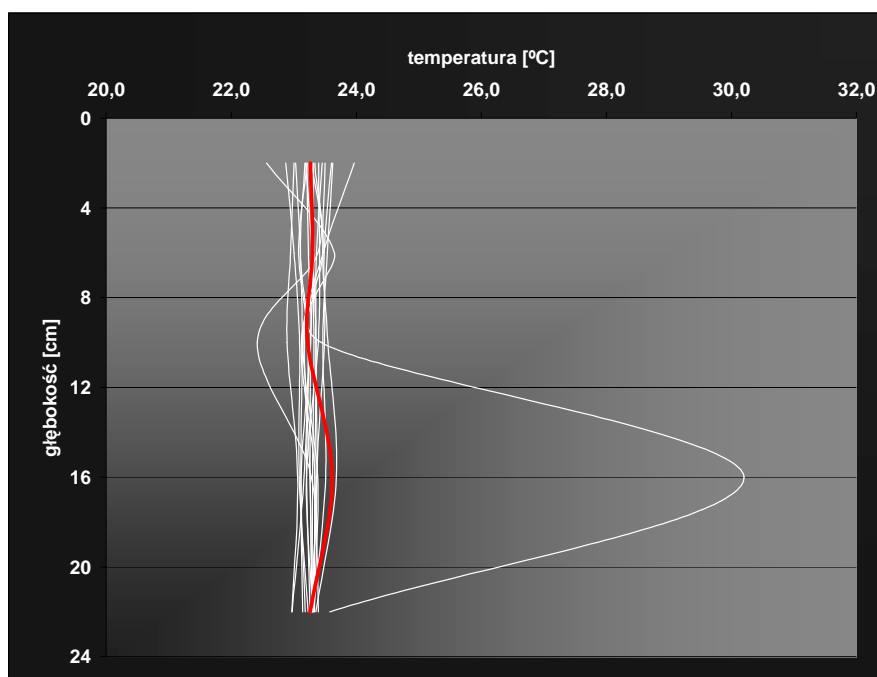
Rysunek 4.10 Średnie profile temperatury zarejestrowanej na wszystkich próbkach w czerwcu (kolorem czerwonym oznaczono średni profil miesięczny)



Rysunek 4.11 Średnie profile temperatury zarejestrowanej na wszystkich próbkach w lipcu (kolorem czerwonym oznaczono średni profil miesięczny)



Rysunek 4.12 Średnie profile temperatury zarejestrowanej na wszystkich próbkach w sierpniu (kolorem czerwonym oznaczono średni profil miesięczny)



Rysunek 4.13 Średnie profile temperatury zarejestrowanej na wszystkich próbkach w wrześniu (kolorem czerwonym oznaczono średni profil miesięczny)



Rysunek 4.14 Średnie profile temperatury zarejestrowanej na wszystkich próbkach w październiku (kolorem czerwonym oznaczono średni profil miesięczny)

4.2 Temperatury powierzchni warstw ściernalnych zarejestrowane pirometrem ST20

W niniejszym punkcie przedstawiono wyniki pomiarów powierzchni nawierzchni przeprowadzonych w kilku seriach pomiarowych w ciągu roku pomiarowego. Pomiaru dokonano przy pomocy pirometru ST20, którego charakterystyki są bardzo zbliżone do czujników podczerwieni montowanych w ugięciomierzach FWD. Szczegółowe dane z pomiarów pirometrem zamieszczono w Załączniku 6.

Niestety pierwsze serie pomiarowe pokazały, że wbrew zapewnieniom producenta, pirometr jest bardzo wrażliwy na czynniki zewnętrzne. Temperatury rejestrowane przez urządzenie były obciążone dość dużym błędem, szczególnie przy temperaturach otoczenia poniżej 20°C. W związku z tym zdecydowano się ograniczyć ilość serii pomiarowych w miesiącach o niskich temperaturach powietrza.

W Tabeli 4.1 zestawiono średnie temperatury zarejestrowane na próbkach wykonanych w technologii BA i SMA w ramach serii pomiarowych, natomiast w Tabeli 4.2 zestawiono średnie temperatury zarejestrowane na próbkach kolorowych. Na Rysunku 4.15 dokonano porównania uzyskanych danych.

Tabela 4.1 Zestawienie średnich temperatur powierzchni płyt zmierzonych pirometrem

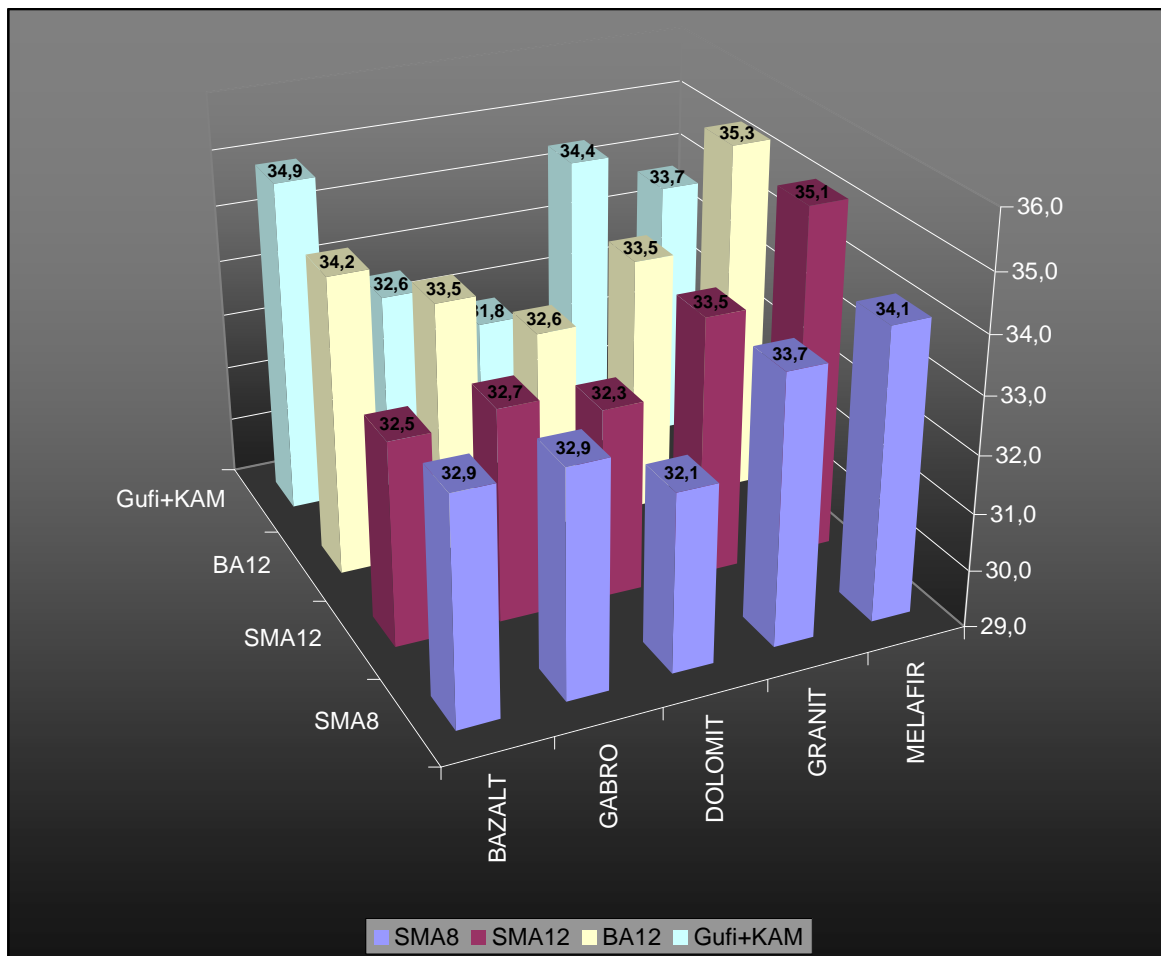
	SMA8	SMA12	BA12	średnia
BAZALT	32,9	32,5	34,2	33,2
GABRO	32,9	32,7	33,5	33,0
DOLOMIT	32,1	32,3	32,6	32,2
GRANIT	33,7	33,5	33,5	33,6
MELAFIR	34,1	35,1	35,3	34,8
średnia	33,1	33,2	33,8	33,4

Tabela 4.2 Zestawienie średnich temperatur powierzchni płyt nawierzchni kolorowych zmierzonych pirometrem

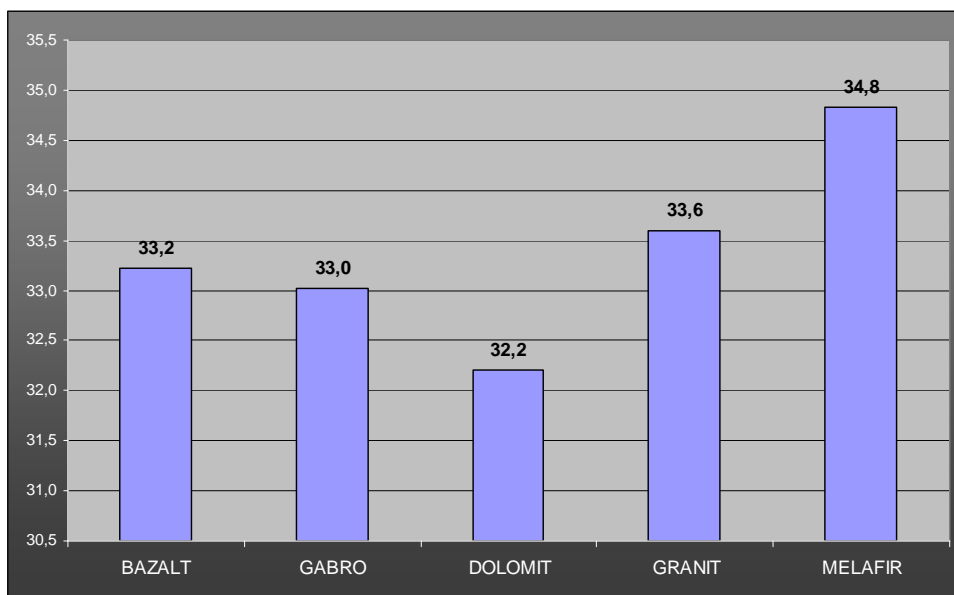
GUFİ (SMA8, bazalt)	34,9
Kameleon (zielony, gabro)	32,6
Kameleon (żółty, gabro)	31,8
Kameleon (czerwony, melafir)	34,4
Kameleon (niebieski, gabro+granit)	33,7
średnia	33,5

Na podstawie przedstawionych wyników (Tabela 4.1 i Rysunek 4.15) można stwierdzić, że w grupie próbek wykonanych w technologii BA i SAM najwyższe temperatury (35,1°C i 35,3°C) zarejestrowano na próbkach, w których zastosowano melafir, natomiast najniższe dla próbek wykonanych z zastosowaniem dolomitu (31,8°C).

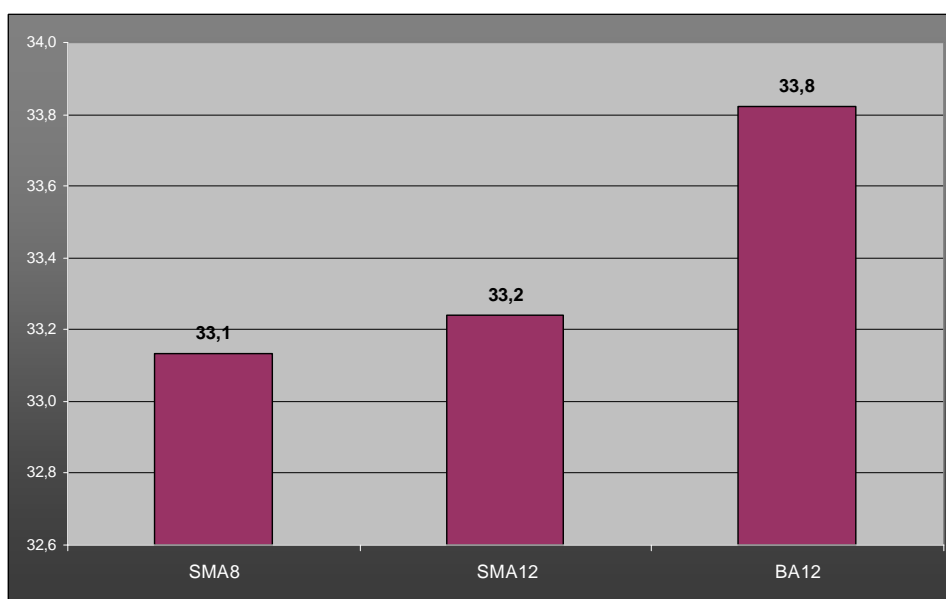
Na Rysunkach 4.16 i 4.17 przedstawiono średnie temperatury dla grup próbek podzielonych ze względu na zastosowane kruszywo oraz rodzaj technologii. O ile różnice między próbkami o różnym kruszywie są dość znaczne tj od 32,2°C do 34,8°C, o tyle różnice między poszczególnymi rodzajami technologii wykonania mieszanek są niewielkie i wahają się od 33,1°C do 33,8°C. Najniższą średnią temperaturę uzyskano dla próbek, w których zastosowano kruszywo dolomitowe (32,2°C), natomiast najwyższą dla próbek z melafirem (34,8°C).



Rysunek 4.15 Średnie temperatury dla poszczególnych próbek uzyskane z pomiaru pirometrem w ciągu roku pomiarowego



Rysunek 4.16 Średnie temperatury dla próbek w technologii BA i SMA z różnymi kruszywami



Rysunek 4.17 Średnie temperatury dla próbek wykonanych w różnych technologiach

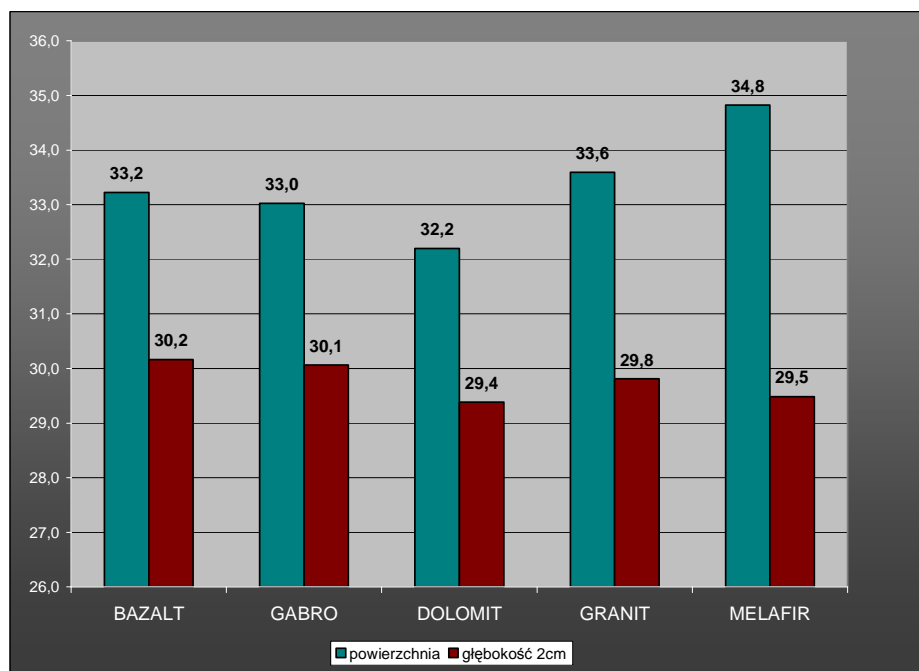
Na podstawie przedstawionych powyżej danych można podzielić wszystkie próbki na trzy grupy (Tabela 4.3), w których:

1. średnia temperatura powierzchni wynosi $32,6^{\circ}\text{C}$ – próbki wykonane w technologii BA z kruszywem dolomitowym oraz SMA z kruszywami: bazaltowym, gabro i dolomitowym,
2. średnia temperatura powierzchni wynosi $33,6^{\circ}\text{C}$ – próbki z kruszywem granitowym oraz próbka wykonana w technologii BA z kruszywem gabro,
3. średnia temperatura powierzchni wynosi $34,7^{\circ}\text{C}$ – próbki z melafirem oraz próbka wykonana w technologii BA z bazaltem

Tabela 4.3 Podział próbek na grupy

kruszywa technologie	BAZALT	GABRO	DOLOMIT	GRANIT	MELAFIR
SMA	SMA8 grupa 1	SMA8 grupa 1	SMA10 grupa 1	SMA8 grupa 2	SMA8 grupa 3
	SMA12 grupa 1	SMA12 grupa 1	SMA12 grupa 1	SMA12 grupa 2	SMA12 grupa 3
BA	BA12 grupa 3	BA12 grupa 2	BA12 grupa 1	BA12 grupa 2	BA12 grupa 3

W celach porównawczych na Rysunku 4.18 przedstawiono średnie temperatury powierzchni próbek i średnie temperatury zarejestrowane na głębokości 2cm.



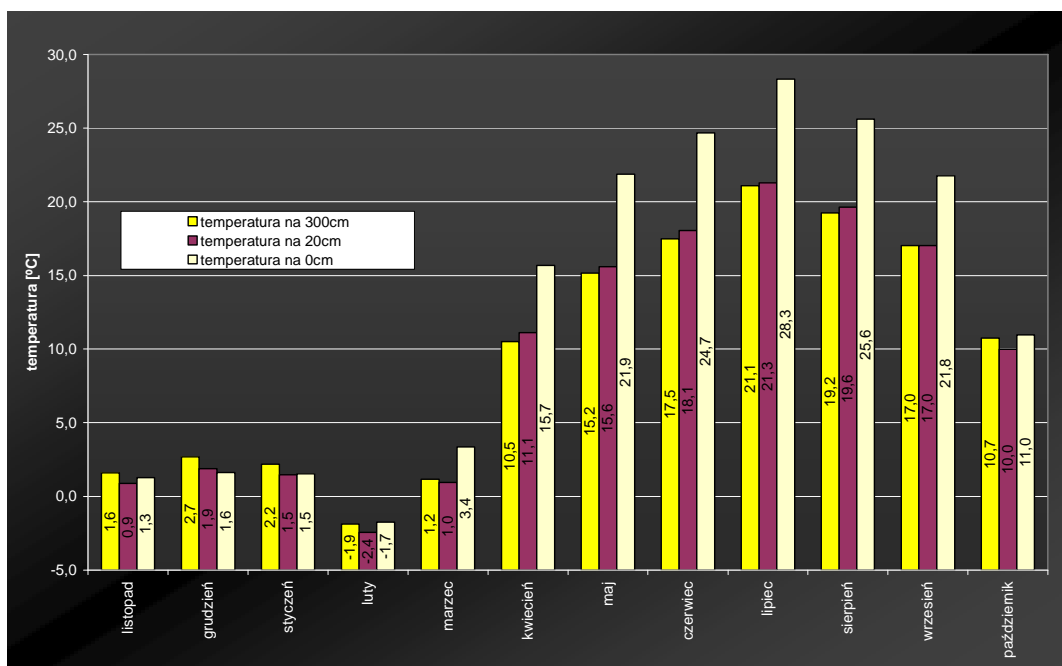
Rysunek 4.18 Średnie temperatury z powierzchni i na głębokości 2cm

Przedstawione dane wskazują na brak zależności między temperaturą powierzchni rejestrowaną pirometrem a temperaturą zmierzoną na głębokości 2cm. W obu przypadkach najmniejsze temperatury zarejestrowano dla próbek wykonanych z zastosowaniem kruszywa dolomitowego.

4.3 Monitoring warunków atmosferycznych

Dokładne dane na temat działania stacji pogodowej oraz sposobu monitorowania warunków atmosferycznych przedstawiono w Załączniku 2. Dane uzyskane w trakcie pomiarów zestawiono w Załączniku 5

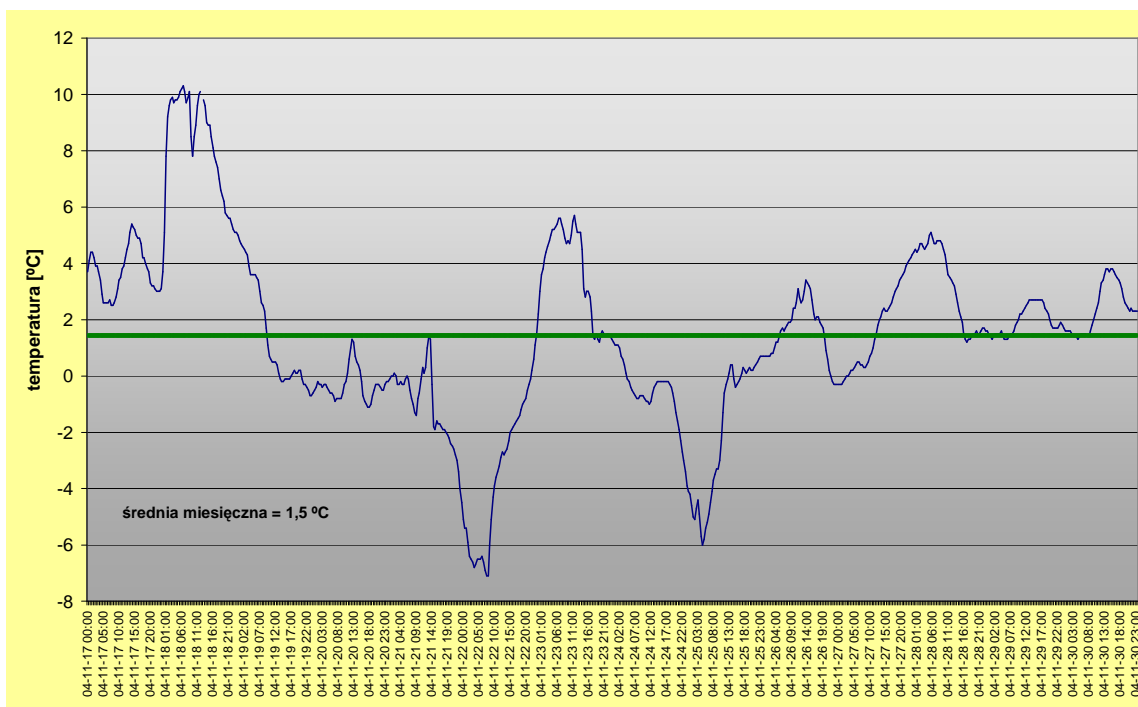
Poniżej przedstawiono średnie miesięczne temperatury powietrza zarejestrowane na wysokości 3 m, 0,2 m oraz przy powierzchni gruntu.



Rysunek 4.19 Średnie miesięczne temperatury powietrza na wysokości 300cm, 20 cm oraz przy powierzchni gruntu

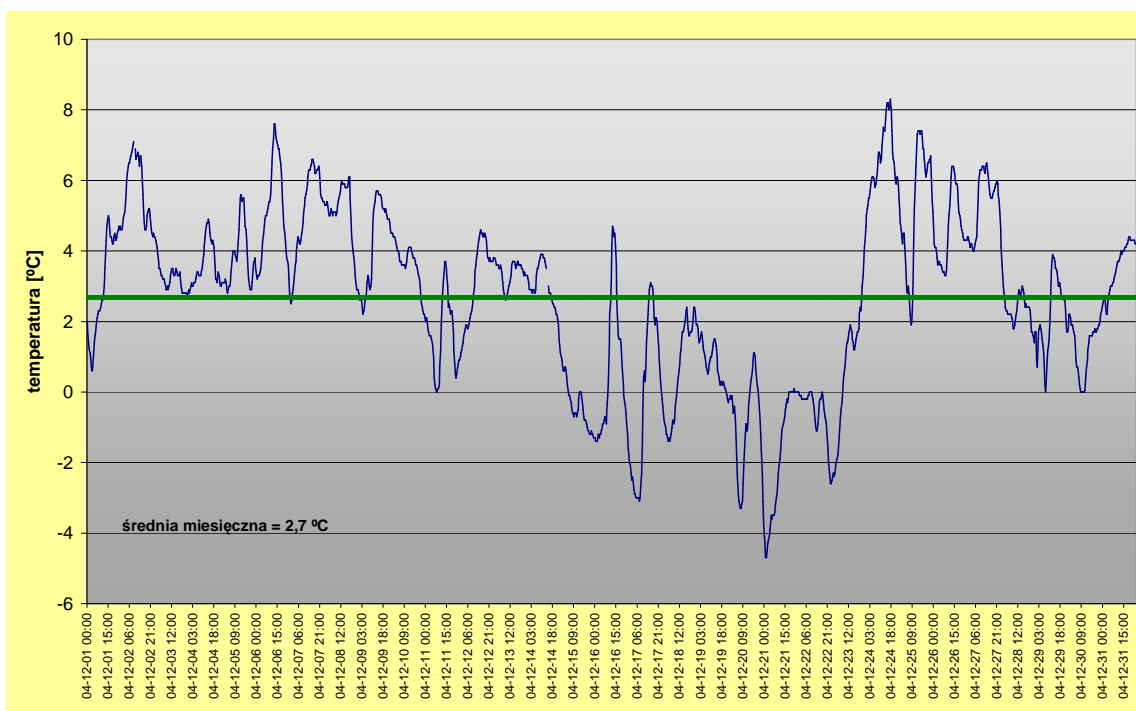
Jak wynika z przedstawionego powyżej rysunku średnie temperatury powietrza w ciągu całego roku pomiarowego wahały się od $-2,4^{\circ}\text{C}$ na wysokości 20 cm do $28,3^{\circ}\text{C}$ przy gruncie. Przedstawione dane pokazują, że temperatury przy gruncie są niższe od tych zarejestrowanych na wysokości 3 m o $0,3-2,2^{\circ}\text{C}$ w miesiącach z niskimi temperaturami powietrza natomiast wyższe o $0,2-7,3^{\circ}\text{C}$ w miesiącach z wysokimi temperaturami powietrza.

Na Rysunkach 4.20 – 4.31 oddzielnie dla każdego miesiąca przedstawiono w formie wykresów temperaturę powietrza rejestrowaną co 30 minut oraz obliczone średnie dobowe temperatury powietrza.



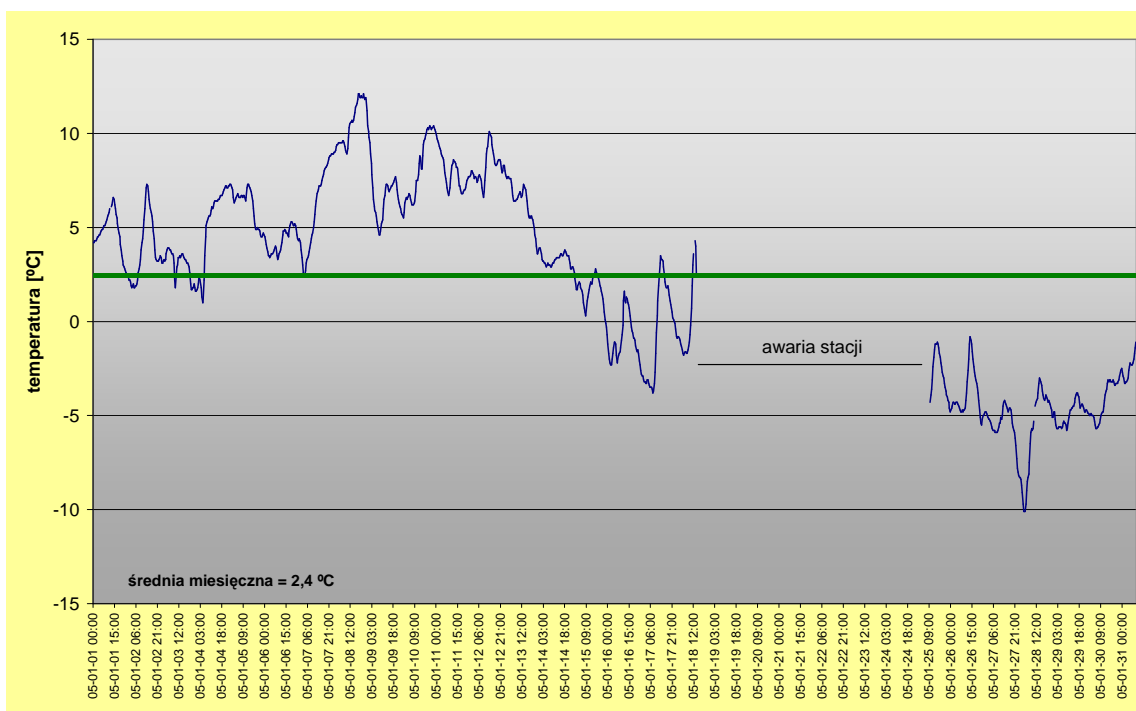
	średnia temperatura dobowa		
	3m	20cm	0
04-11-17	3,7	3,1	3,9
04-11-18	8,1	7,0	6,0
04-11-19	1,4	0,6	1,2
04-11-20	-0,3	-0,7	0,4
04-11-21	-1,1	-1,6	0,2
04-11-22	-3,4	-3,9	-0,8
04-11-23	3,6	2,7	0,5
04-11-24	-0,7	-1,4	-0,7
04-11-25	-1,9	-2,7	-1,7
04-11-26	1,6	0,8	-0,2
04-11-27	1,7	1,0	0,6
04-11-28	3,2	2,4	2,3
04-11-29	2,0	1,3	2,0
04-11-30	2,4	1,8	2,5

Rysunek 4.20 Temperatura powietrza rejestrowana co 30 minut(wykres) oraz średnie dobowe temperatury powietrza w listopadzie (tabela)



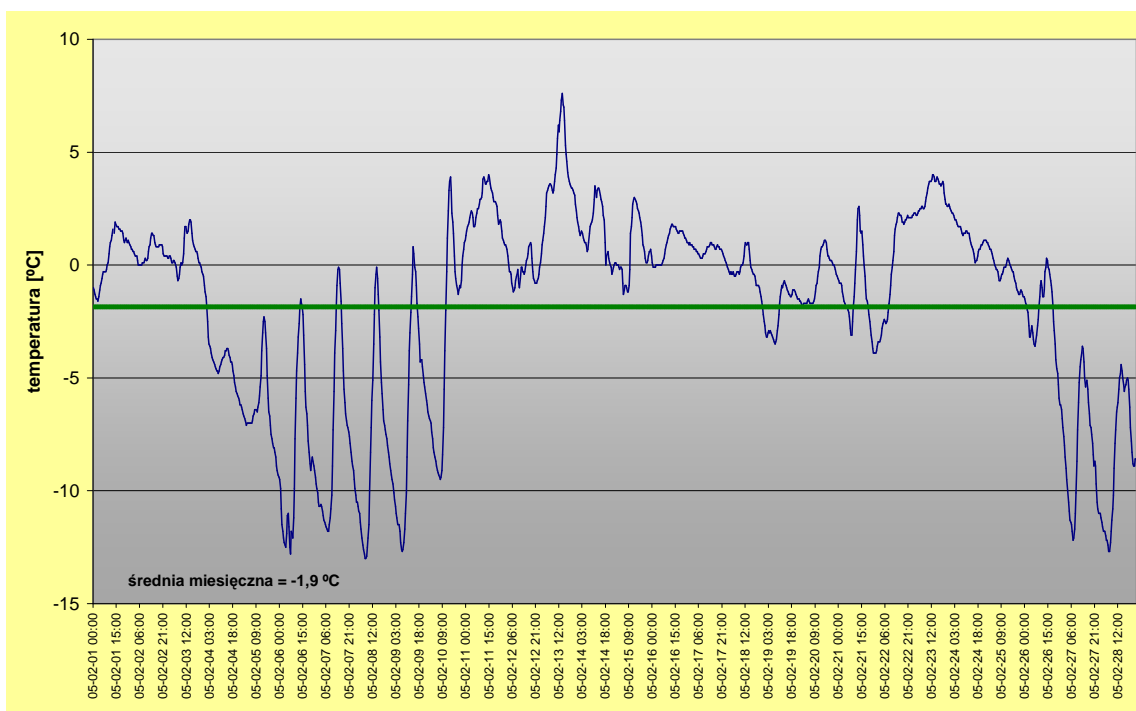
	średnia temperatura dobowa		
	3m	20cm	0
04-12-01	3,1	2,4	2,1
04-12-02	5,7	4,7	3,9
04-12-03	3,3	2,6	3,0
04-12-04	3,6	2,8	3,0
04-12-05	3,8	3,1	2,4
04-12-06	5,1	4,1	3,3
04-12-07	5,1	4,4	3,8
04-12-08	5,1	4,2	3,7
04-12-09	4,2	3,4	1,9
04-12-10	3,6	3,0	3,3
04-12-11	1,6	1,0	0,9
04-12-12	3,1	2,5	2,3
04-12-13	3,4	2,7	3,0
04-12-14	2,9	2,2	2,6
04-12-15	-0,4	-1,1	0,1
04-12-16	0,6	-0,5	-1,5
04-12-17	-0,1	-1,0	-1,9
04-12-18	0,6	-0,3	-1,0
04-12-19	0,8	-0,1	-0,2
04-12-20	-1,1	-2,1	-1,3
04-12-21	-1,8	-2,3	-1,1
04-12-22	-0,6	-1,3	-0,9
04-12-23	0,8	-0,1	-0,5
04-12-24	6,5	5,3	2,8
04-12-25	5,2	4,1	1,7
04-12-26	4,6	3,7	3,0
04-12-27	5,4	4,3	4,0
04-12-28	2,4	1,7	2,7
04-12-29	2,2	1,3	1,4
04-12-30	1,3	0,7	1,2
04-12-31	3,6	2,7	2,6

Rysunek 4.21 Temperatura powietrza rejestrowana co 30 minut(wykres) oraz średnie dobowe temperatury powietrza w grudniu (tabela)



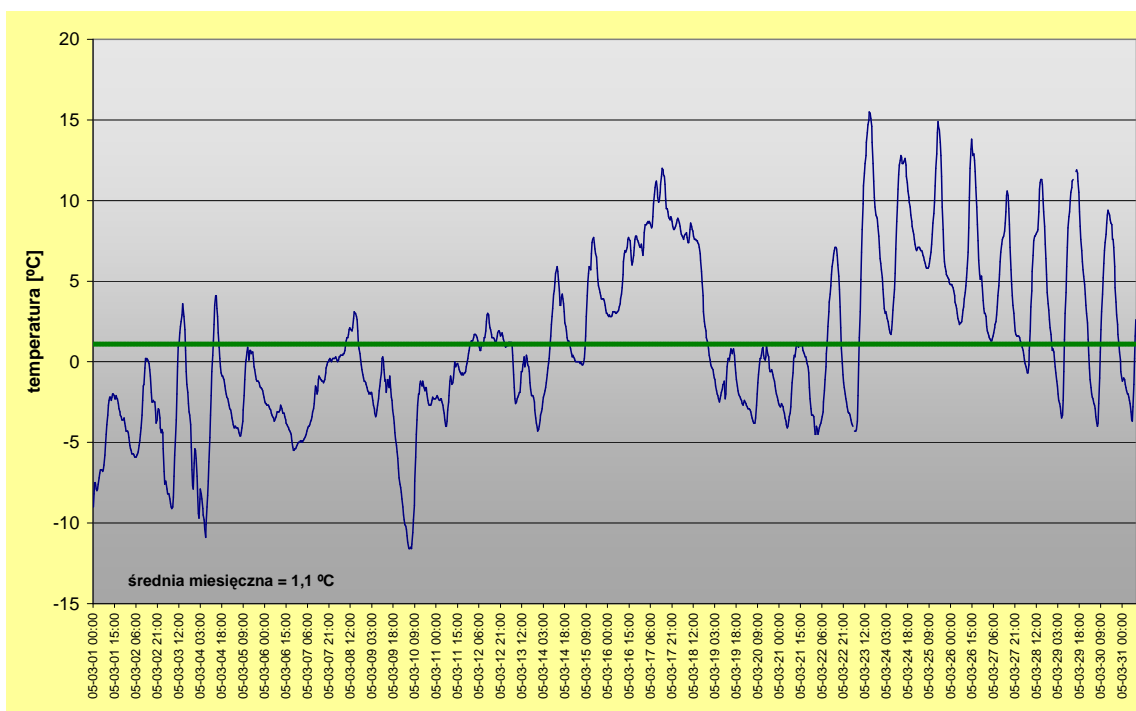
	średnia temperatura dobowa		
	3m	20cm	0
05-01-01	4,7	3,8	3,9
05-01-02	3,8	2,9	2,2
05-01-03	3,0	2,3	1,5
05-01-04	5,2	4,1	3,5
05-01-05	6,1	5,2	4,3
05-01-06	4,3	3,4	3,2
05-01-07	6,0	5,1	3,7
05-01-08	10,5	9,7	6,4
05-01-09	6,8	5,9	3,8
05-01-10	8,2	7,2	5,1
05-01-11	7,9	7,1	5,8
05-01-12	8,3	7,8	6,0
05-01-13	6,3	5,5	4,9
05-01-14	3,3	2,4	2,6
05-01-15	1,5	0,9	1,4
05-01-16	-1,0	-1,5	-1,1
05-01-17	-0,5	-1,1	-2,9
05-01-18	-0,2	-0,5	-2,2
05-01-19	Awaria stacji		
05-01-20			
05-01-21			
05-01-22			
05-01-23			
05-01-24			
05-01-25	-2,9	-3,3	-0,6
05-01-26	-3,9	-4,4	-0,9
05-01-27	-5,5	-5,9	-1,3
05-01-28	-5,8	-6,4	-2,4
05-01-29	-4,9	-5,4	-3,1
05-01-30	-4,1	-4,6	-2,8
05-01-31	-2,5	-3,4	-2,9

Rysunek 4.22 Temperatura powietrza rejestrowana co 30 minut(wykres) oraz średnie dobowe temperatury powietrza w styczniu (tabela)



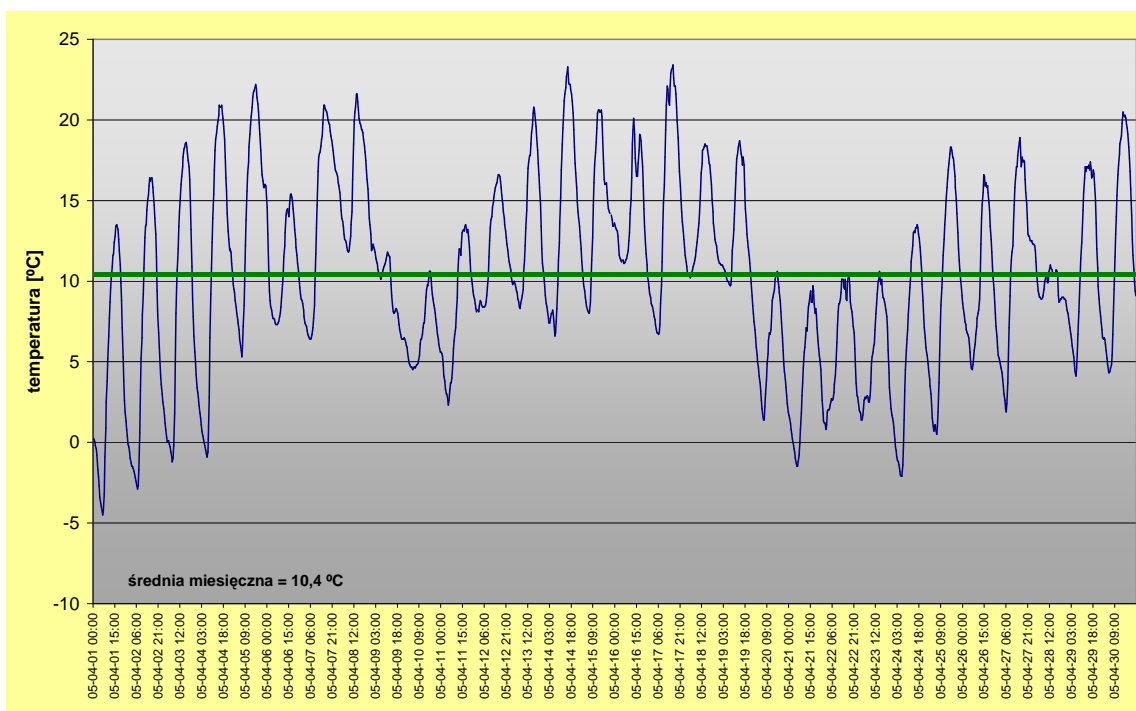
	średnia temperatura dobowa		
	3m	20cm	0
05-02-01	0,4	-0,3	-0,9
05-02-02	0,6	-0,2	-0,1
05-02-03	0,4	-0,4	-0,2
05-02-04	-4,4	-4,6	-2,0
05-02-05	-6,5	-6,8	-4,5
05-02-06	-8,3	-8,6	-7,7
05-02-07	-7,6	-7,9	-8,5
05-02-08	-8,0	-8,3	-8,9
05-02-09	-6,7	-7,2	-8,7
05-02-10	-3,2	-3,5	-5,5
05-02-11	2,6	1,6	-0,1
05-02-12	-0,1	-0,9	-1,0
05-02-13	3,8	3,0	0,1
05-02-14	1,5	0,6	0,0
05-02-15	0,7	0,2	0,3
05-02-16	0,9	0,1	-0,1
05-02-17	0,6	0,0	0,0
05-02-18	-0,3	-0,9	0,0
05-02-19	-2,0	-2,6	0,0
05-02-20	-0,5	-1,2	-0,1
05-02-21	-1,3	-1,6	0,0
05-02-22	-0,1	-0,7	-0,1
05-02-23	3,1	1,9	1,5
05-02-24	1,3	0,3	0,7
05-02-25	-0,3	-1,0	0,0
05-02-26	-2,5	-2,9	-0,3
05-02-27	-8,1	-7,6	-1,0
05-02-28	-8,6	-8,8	-1,9

Rysunek 4.23 Temperatura powietrza rejestrowana co 30 minut(wykres) oraz średnie dobowe temperatury powietrza w lutym (tabela)



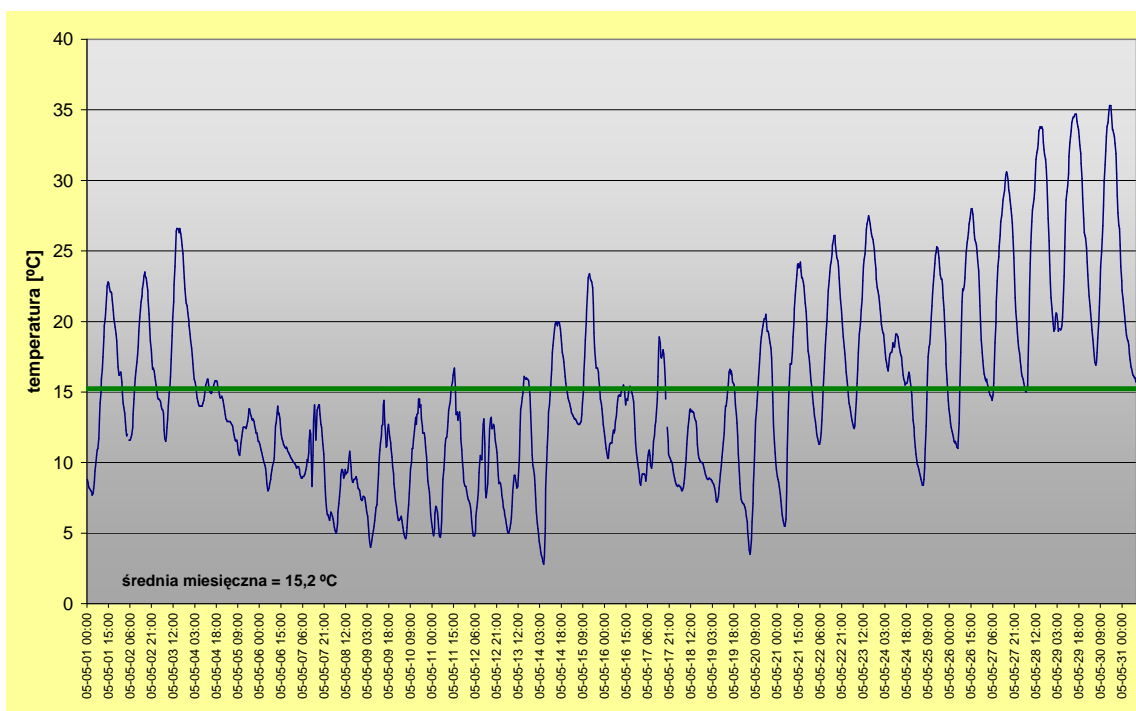
	średnia temperatura dobowa		
	3m	20cm	0
05-03-01	-4,5	-5,2	-1,1
05-03-02	-3,4	-4,0	-0,8
05-03-03	-4,0	-4,4	-1,2
05-03-04	-3,6	-3,8	-1,4
05-03-05	-2,0	-2,0	-0,6
05-03-06	-3,7	-3,9	-0,5
05-03-07	-2,3	-2,6	-0,4
05-03-08	0,7	0,0	-0,1
05-03-09	-2,9	-3,3	-0,2
05-03-10	-5,4	-5,3	-0,4
05-03-11	-1,3	-1,8	-0,1
05-03-12	1,6	0,7	0,0
05-03-13	-1,1	-1,3	0,0
05-03-14	1,4	0,7	2,2
05-03-15	3,2	2,7	3,9
05-03-16	5,4	3,8	4,6
05-03-17	9,4	7,9	7,3
05-03-18	6,2	5,1	6,1
05-03-19	-1,2	-0,6	2,3
05-03-20	-1,5	-1,5	1,2
05-03-21	-1,4	-1,6	1,0
05-03-22	0,5	0,6	3,9
05-03-23	5,8	6,0	7,6
05-03-24	7,5	7,1	8,9
05-03-25	7,9	8,5	11,5
05-03-26	6,1	6,4	9,9
05-03-27	4,3	4,3	7,4
05-03-28	4,4	4,5	7,5
05-03-29	4,4	4,7	8,5
05-03-30	2,5	3,2	8,1
05-03-31	3,4	4,3	8,9

Rysunek 4.24 Temperatura powietrza rejestrowana co 30 minut(wykres) oraz średnie dobowe temperatury powietrza w marcu (tabela)



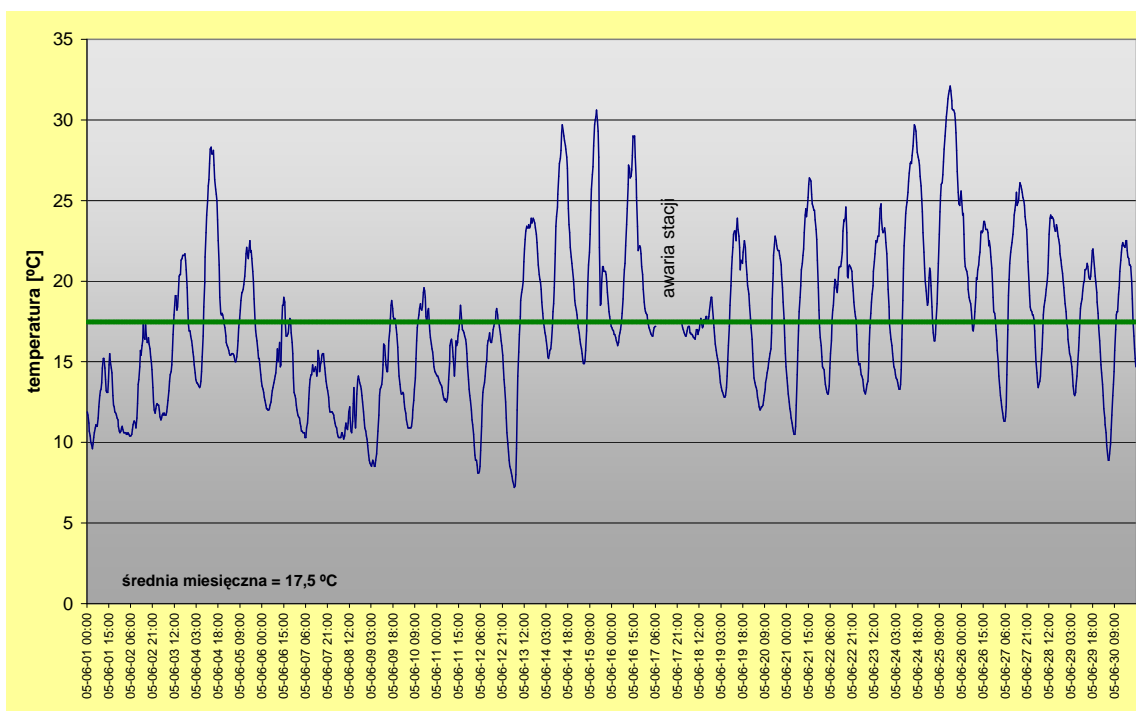
	średnia temperatura dobowa		
	3m	20cm	0
05-04-01	4,3	5,3	9,9
05-04-02	6,4	7,4	11,6
05-04-03	8,3	9,1	13,2
05-04-04	10,7	11,0	14,4
05-04-05	14,5	14,3	16,5
05-04-06	10,8	11,3	15,9
05-04-07	14,1	13,4	14,4
05-04-08	16,1	15,9	18,1
05-04-09	9,5	8,7	11,6
05-04-10	6,8	6,7	10,2
05-04-11	8,3	8,3	12,6
05-04-12	12,1	12,0	14,8
05-04-13	13,3	14,1	18,8
05-04-14	14,5	15,2	19,9
05-04-15	14,2	14,0	18,2
05-04-16	14,0	14,0	17,4
05-04-17	14,9	15,4	19,0
05-04-18	13,7	14,7	19,7
05-04-19	12,8	14,1	20,4
05-04-20	5,8	7,7	15,0
05-04-21	4,1	5,6	12,9
05-04-22	5,8	6,3	12,1
05-04-23	5,2	6,2	13,0
05-04-24	6,2	8,3	15,2
05-04-25	9,8	11,1	17,1
05-04-26	9,7	9,9	14,5
05-04-27	11,2	12,5	17,5
05-04-28	10,0	9,1	12,1
05-04-29	11,2	12,5	17,1
05-04-30	12,4	14,2	20,7

Rysunek 4.25 Temperatura powietrza rejestrowana co 30 minut(wykres) oraz średnie dobowe temperatury powietrza w kwietniu (tabela)



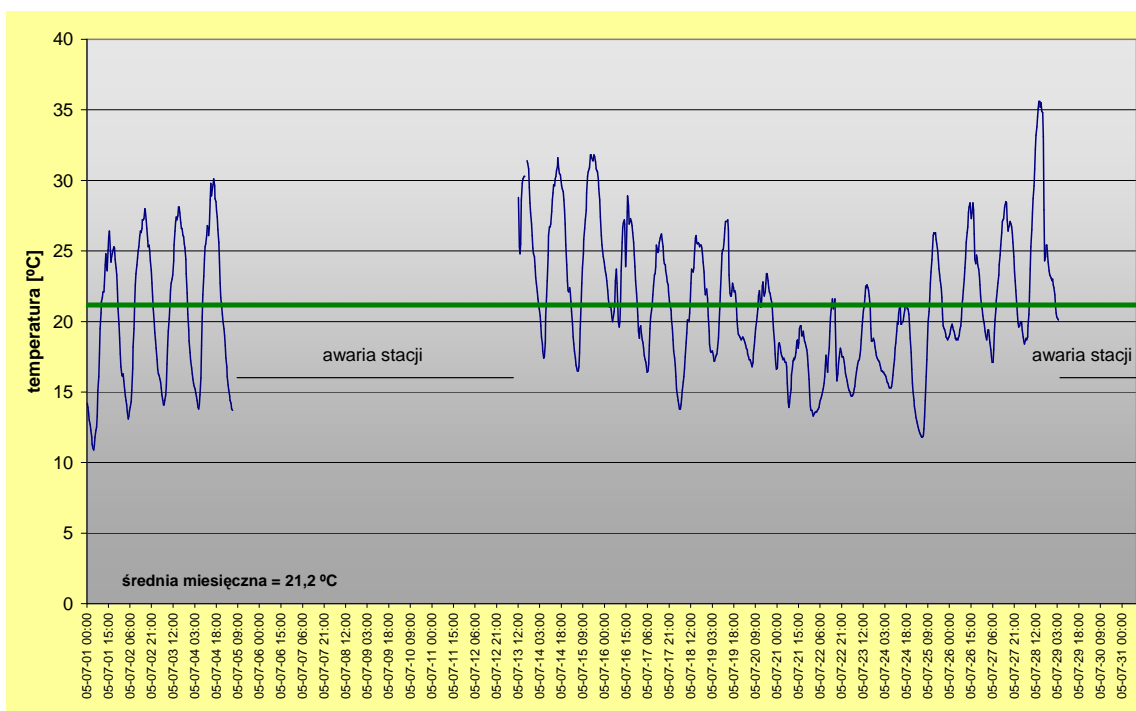
	średnia temperatura dobowa		
	3m	20cm	0
05-05-01	15,5	16,3	22,3
05-05-02	17,1	18,6	25,3
05-05-03	19,0	19,7	24,6
05-05-04	15,2	14,4	17,9
05-05-05	12,4	12,0	15,0
05-05-06	10,7	10,7	14,7
05-05-07	10,3	10,9	15,5
05-05-08	7,9	7,3	10,9
05-05-09	8,7	9,1	13,9
05-05-10	9,2	10,5	17,0
05-05-11	10,3	11,7	19,3
05-05-12	9,1	9,8	15,5
05-05-13	10,1	10,0	14,0
05-05-14	13,0	14,3	20,5
05-05-15	16,2	16,1	22,1
05-05-16	13,0	13,8	19,8
05-05-17	12,1	11,4	15,1
05-05-18	10,3	10,3	15,1
05-05-19	11,1	12,2	19,2
05-05-20	12,7	14,4	22,8
05-05-21	16,1	17,8	25,8
05-05-22	18,7	19,9	27,5
05-05-23	20,4	21,4	28,8
05-05-24	17,0	16,4	21,3
05-05-25	16,9	18,6	26,4
05-05-26	19,9	21,1	29,4
05-05-27	22,4	23,5	31,4
05-05-28	24,9	24,5	33,8
05-05-29	27,2	25,7	35,6
05-05-30	26,2	25,0	35,6
05-05-31	16,4	16,0	22,4

Rysunek 4.26 Temperatura powietrza rejestrowana co 30 minut(wykres) oraz średnie dobowe temperatury powietrza w maju (tabela)



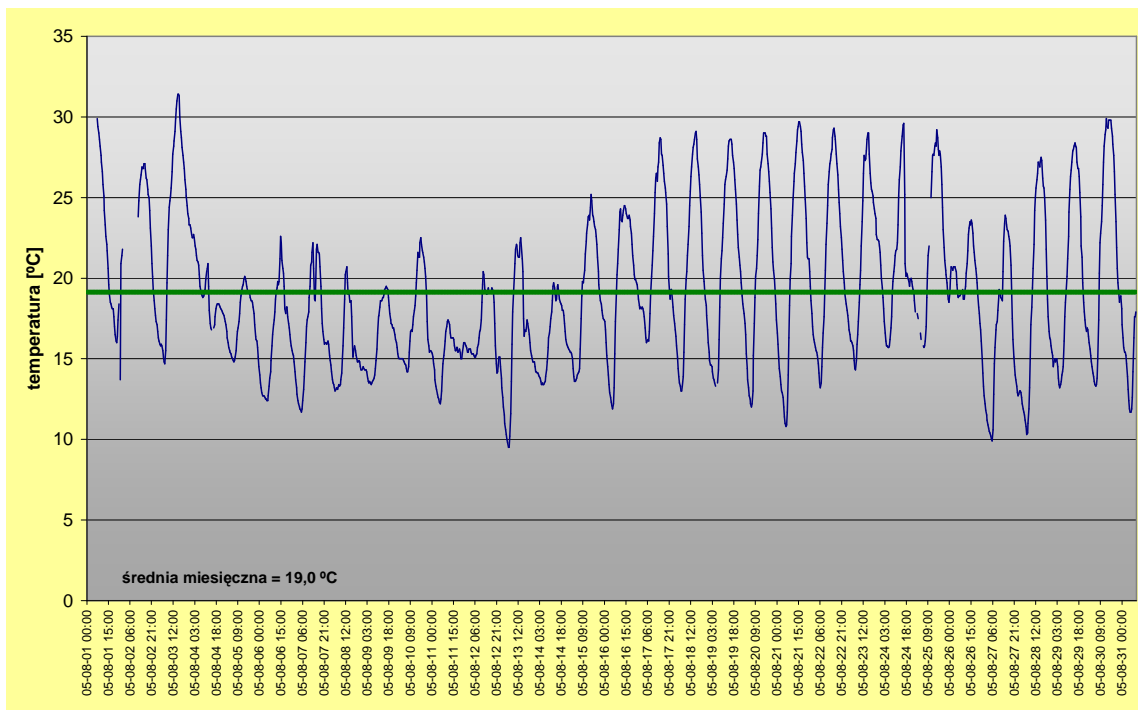
	średnia temperatura dobowa		
	3m	20cm	0
05-06-01	12,2	12,5	19,3
05-06-02	13,1	14,2	20,6
05-06-03	16,2	15,9	20,3
05-06-04	19,8	20,2	25,3
05-06-05	17,7	19,1	26,3
05-06-06	14,7	14,6	20,2
05-06-07	13,1	13,5	18,9
05-06-08	11,5	11,4	15,9
05-06-09	13,4	13,9	18,8
05-06-10	15,0	15,2	20,1
05-06-11	14,8	15,4	20,5
05-06-12	13,8	13,9	20,6
05-06-13	17,4	18,3	25,2
05-06-14	21,6	22,3	29,3
05-06-15	20,8	21,1	27,0
05-06-16	21,3	21,5	27,1
05-06-17	awaria stacji		
05-06-18	17,2	16,7	20,7
05-06-19	18,5	19,5	25,7
05-06-20	16,4	16,7	23,4
05-06-21	18,8	20,2	28,5
05-06-22	18,6	18,2	23,5
05-06-23	18,5	19,6	27,3
05-06-24	21,9	23,1	31,4
05-06-25	24,9	25,6	34,1
05-06-26	20,7	21,5	30,6
05-06-27	19,8	20,9	29,8
05-06-28	19,5	20,3	28,9
05-06-29	17,7	18,4	26,4
05-06-30	16,6	18,0	26,8

Rysunek 4.27 Temperatura powietrza rejestrowana co 30 minut(wykres) oraz średnie dobowe temperatury powietrza w czerwcu (tabela)



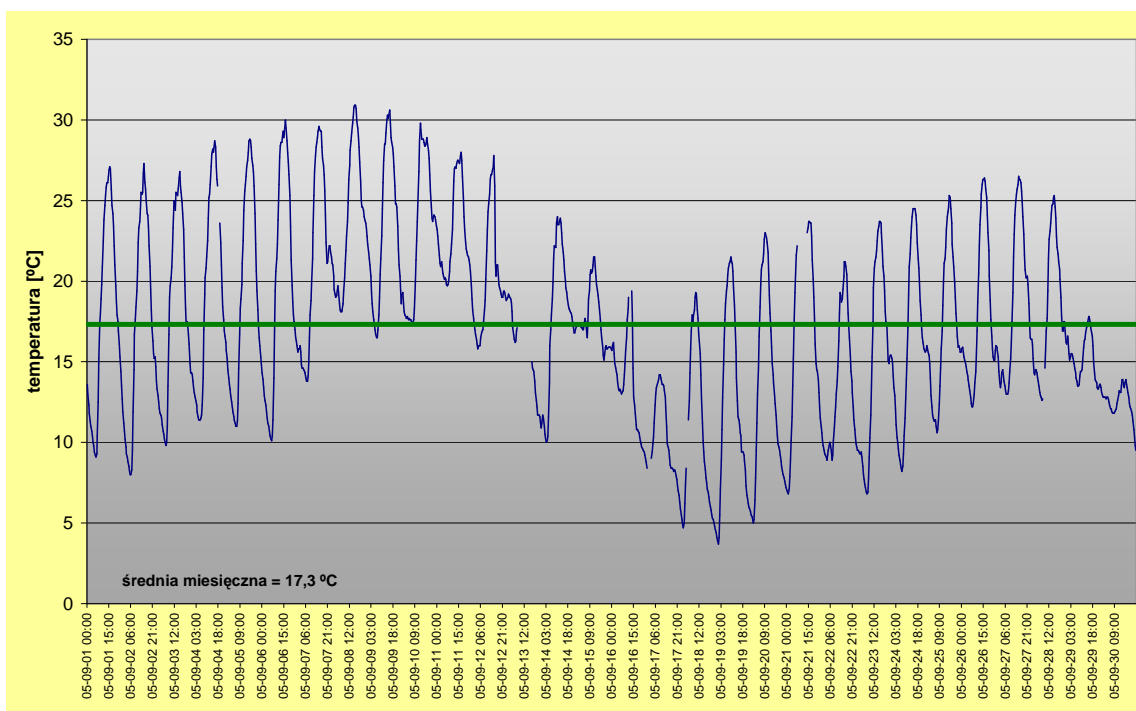
	średnia temperatura dobowa		
	3m	20cm	0
05-07-01	19,1	20,0	27,9
05-07-02	21,0	22,4	31,1
05-07-03	21,1	22,8	32,7
05-07-04	22,0	23,1	31,8
05-07-05	15,5	14,0	21,5
05-07-06	Awaria stacji		
05-07-07			
05-07-08			
05-07-09			
05-07-10			
05-07-11			
05-07-12			
05-07-13	27,7	26,2	36,8
05-07-14	25,1	26,3	34,7
05-07-15	25,3	26,4	34,5
05-07-16	23,4	23,6	29,7
05-07-17	21,4	22,4	30,9
05-07-18	20,5	20,9	28,4
05-07-19	21,1	20,7	25,9
05-07-20	19,8	20,2	26,1
05-07-21	17,2	17,1	23,2
05-07-22	16,6	16,6	21,8
05-07-23	18,0	18,2	23,4
05-07-24	17,8	18,1	24,1
05-07-25	19,0	19,2	24,6
05-07-26	22,6	23,2	28,6
05-07-27	22,8	23,6	30,5
05-07-28	25,6	24,9	32,7
05-07-29	21,2	18,3	22,7
05-07-30	Awaria stacji		
05-07-31			

Rysunek 4.28 Temperatura powietrza rejestrowana co 30 minut(wykres) oraz średnie dobowe temperatury powietrza w lipcu (tabela)



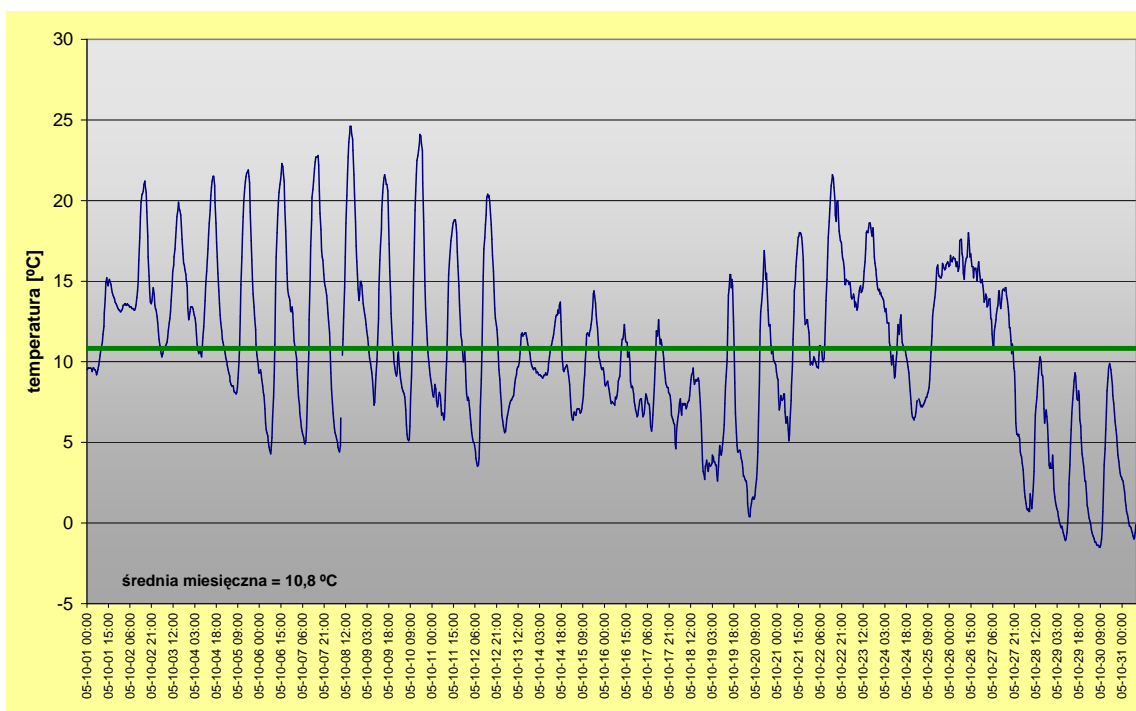
	średnia temperatura dobowa		
	3m	20cm	0
05-08-01	21,6	23,3	27,7
05-08-02	23,6	26,1	36,9
05-08-03	23,4	24,4	32,2
05-08-04	19,4	18,5	23,0
05-08-05	17,2	17,0	21,9
05-08-06	16,4	16,6	22,5
05-08-07	16,8	17,8	24,6
05-08-08	15,5	15,5	21,0
05-08-09	16,3	16,0	20,1
05-08-10	17,4	17,4	22,7
05-08-11	15,2	14,7	18,6
05-08-12	16,8	16,6	20,8
05-08-13	16,1	15,8	19,6
05-08-14	16,3	16,5	21,3
05-08-15	19,1	19,7	25,8
05-08-16	19,5	19,4	24,6
05-08-17	21,5	22,2	28,0
05-08-18	20,7	21,7	29,1
05-08-19	21,3	21,9	28,7
05-08-20	20,8	21,5	28,6
05-08-21	20,7	21,3	28,5
05-08-22	21,1	21,5	28,9
05-08-23	21,5	21,5	27,6
05-08-24	20,6	21,0	27,2
05-08-25	22,3	22,5	28,0
05-08-26	19,7	19,4	24,6
05-08-27	16,3	16,8	22,4
05-08-28	18,5	19,4	25,8
05-08-29	20,2	21,1	27,9
05-08-30	21,6	22,1	28,1
05-08-31	18,7	19,7	27,5

Rysunek 4.29 Temperatura powietrza rejestrowana co 30 minut(wykres) oraz średnie dobowe temperatury powietrza w sierpniu (tabela)



	średnia temperatura dobowa		
	3m	20cm	0
05-09-01	17,7	18,6	26,5
05-09-02	17,1	17,9	25,7
05-09-03	17,9	18,6	25,8
05-09-04	19,2	20,2	26,7
05-09-05	19,1	20,2	27,0
05-09-06	19,6	20,1	26,4
05-09-07	21,2	21,5	26,8
05-09-08	23,9	24,2	28,4
05-09-09	23,2	22,9	27,7
05-09-10	23,1	22,7	27,2
05-09-11	23,0	22,3	26,3
05-09-12	20,1	19,6	23,7
05-09-13	15,3	13,9	17,9
05-09-14	18,0	18,1	22,8
05-09-15	17,7	17,5	21,3
05-09-16	13,1	11,9	15,4
05-09-17	10,2	10,1	14,9
05-09-18	10,5	11,5	16,4
05-09-19	12,2	12,8	18,6
05-09-20	13,4	13,9	19,3
05-09-21	15,8	16,4	21,7
05-09-22	13,6	13,3	17,9
05-09-23	14,9	14,7	18,7
05-09-24	16,2	15,9	19,4
05-09-25	17,1	16,6	19,5
05-09-26	18,0	17,9	20,7
05-09-27	18,7	18,4	21,2
05-09-28	18,2	18,1	21,4
05-09-29	15,2	14,7	18,2
05-09-30	12,5	12,0	15,8

Rysunek 4.30 Temperatura powietrza rejestrowana co 30 minut(wykres) oraz średnie dobowe temperatury powietrza w wrześniu (tabela)



	średnia temperatura dobowa		
	3m	20cm	0
05-10-01	12,0	11,8	15,5
05-10-02	15,3	15,3	17,8
05-10-03	14,3	13,7	16,4
05-10-04	14,4	14,3	16,8
05-10-05	13,1	13,2	15,7
05-10-06	12,6	12,4	14,6
05-10-07	13,5	13,3	14,5
05-10-08	13,9	13,7	14,5
05-10-09	13,4	13,3	14,2
05-10-10	12,9	12,7	13,8
05-10-11	11,6	11,1	12,5
05-10-12	11,0	10,5	12,3
05-10-13	9,1	8,3	10,5
05-10-14	10,3	9,7	11,6
05-10-15	9,6	8,4	9,8
05-10-16	8,8	8,3	9,3
05-10-17	8,4	7,2	8,8
05-10-18	6,8	5,2	7,4
05-10-19	6,6	5,2	6,4
05-10-20	7,6	6,5	6,6
05-10-21	11,2	9,7	9,0
05-10-22	14,9	13,2	11,4
05-10-23	15,4	13,6	12,2
05-10-24	10,7	9,7	10,9
05-10-25	11,8	10,7	10,7
05-10-26	16,0	14,4	12,9
05-10-27	12,1	10,7	10,9
05-10-28	4,8	4,0	5,5
05-10-29	3,2	2,7	2,8
05-10-30	3,0	2,7	2,1
05-10-31	4,7	4,3	2,6

Rysunek 4.31 Temperatura powietrza rejestrowana co 30 minut(wykres) oraz średnie dobowe temperatury powietrza w październiku (tabela)

Rozdział 5 Opracowanie algorytmu wyznaczania temperatury miarodajnej

Jednym z celów niniejszej pracy było opracowanie nowego lub wdrożenia istniejącego algorytmu oceny temperatury warstw asfaltowych na podstawie pomiaru temperatury powierzchni czujnikami IR.

Istniejące metody zostały przedstawione w Rozdziale 2. W kolejnych punktach zostaną przedstawione porównania wyników obliczeń tymi metodami z faktycznie zmierzonymi temperaturami warstw asfaltowych dla wybranego okresu pomiarowego.

Jak już wcześniej wspomniano (punkt 4.2) w trakcie badań napotkano na znaczne problemy z dokładnością pomiaru pirometrem. W związku z tym ograniczono ilość pomiarów tym urządzeniem do miesięcy o wysokich temperaturach, co z kolei spowodowało ograniczenie ilości dostępnych w trakcie analizy danych. Mimo tych ograniczeń podjęto próbę opracowania algorytmu wyznaczania temperatury miarodajnej przy założeniu, że danymi początkowymi w nowym algorytmie będą:

- temperatura powietrza rejestrowana na wysokości 20 cm (wysokość na jakiej rejestrowana jest temperatura powietrza w urządzeniach FWD wynosi ok50 cm),
- temperatura powierzchni mierzona czujnikiem IR.

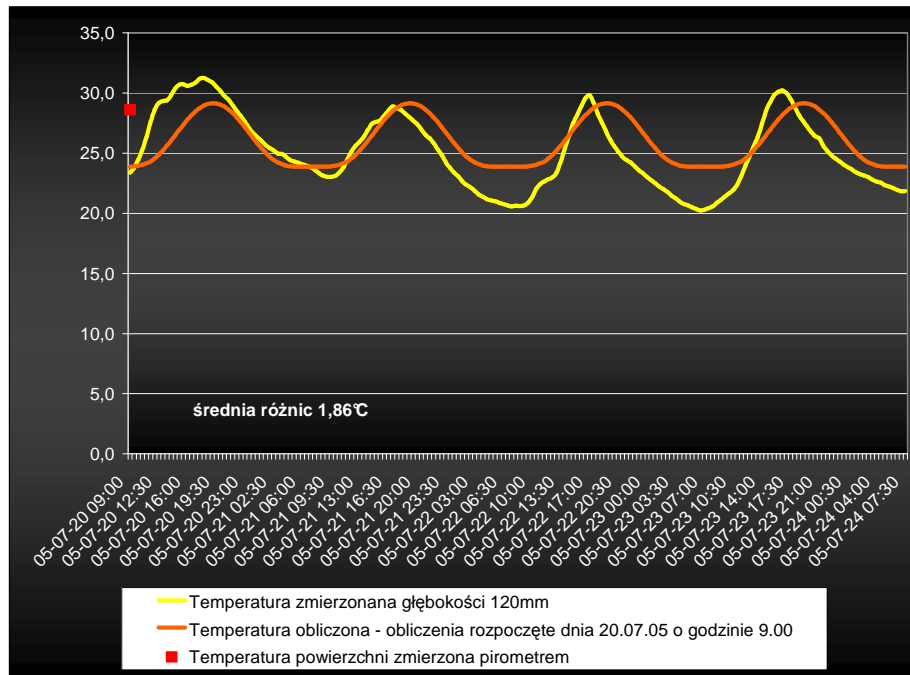
5.1 Analiza i weryfikacja rozkładu temperatur w nawierzchni z zastosowaniem wybranych metod pod kątem uzyskanych w trakcie badań wyników pomiarów

Przedstawione w niniejszym punkcie analizy porównawcze dokonano dla wytypowanego okresu pomiarowego, tj. od 20 do 24 lipca 2005. Dane pomiarowe z tego okresu przedstawiono w Załączniku 6.

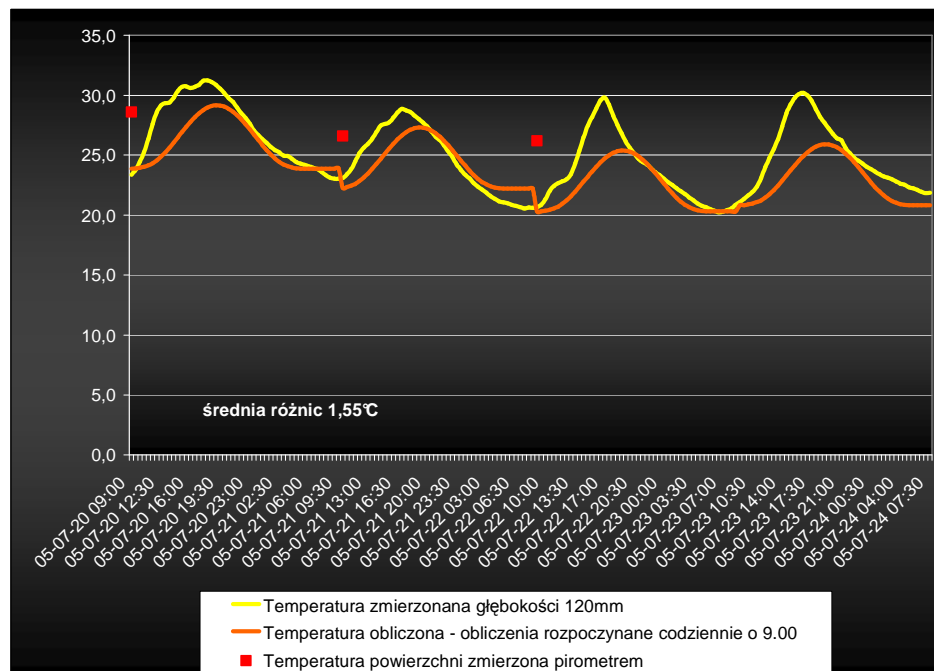
Obliczeń dokonano dla jednej głębokości tj. w połowie warstw asfaltowych (120mm), według metod: BELLS 3, Wistuby i Hermanssona. Każda z tych metod wymaga innych danych początkowych. W metodzie BELLS3 konieczne jest wprowadzenie średniej dobowej temperatury powietrza z dnia poprzedniego oraz temperatury powierzchni zarejestrowanej przez czujnik IR. W metodzie Wistuby niezbędne jest określenie początkowego profilu temperatury oraz współczynnika dyfuzji termicznej nawierzchni. Metoda Hermanssona wymaga, oprócz współczynnika dyfuzji termicznej nawierzchni, serii pomiarów powierzchni nawierzchni, przy czym nie chodzi tu o temperaturę zmierzoną czujnikiem IR lecz o temperaturę zmierzoną na głębokości 15mm.

Uwzględniając rodzaj danych zbieranych w trakcie standardowych pomiarów FWD (między innymi: temperatura powietrza i temperatura powierzchni mierzona czujnikiem IR) wydaje się, że metoda BELLS3 jest najlepiej przystosowana do obliczeń temperatury miarodajnej dla potrzeb oceny trwałości nawierzchni.

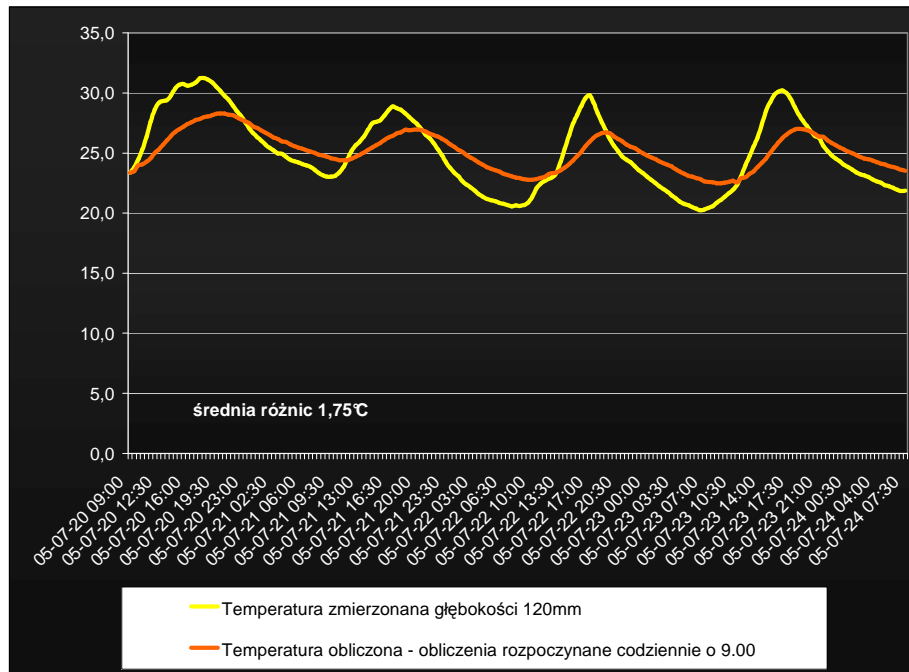
Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń temperatury nawierzchni na głębokości 12 cm metodą BELLS3 (Rysunki 5.1 i 5.2), metodą Wistuby (Rysunek 5.3) oraz metodą Hermanssona (Rysunek 5.4). W celach porównawczych dla każdej metody obliczono średnią różnic między temperaturami obliczonymi a temperaturami zmierzonymi.



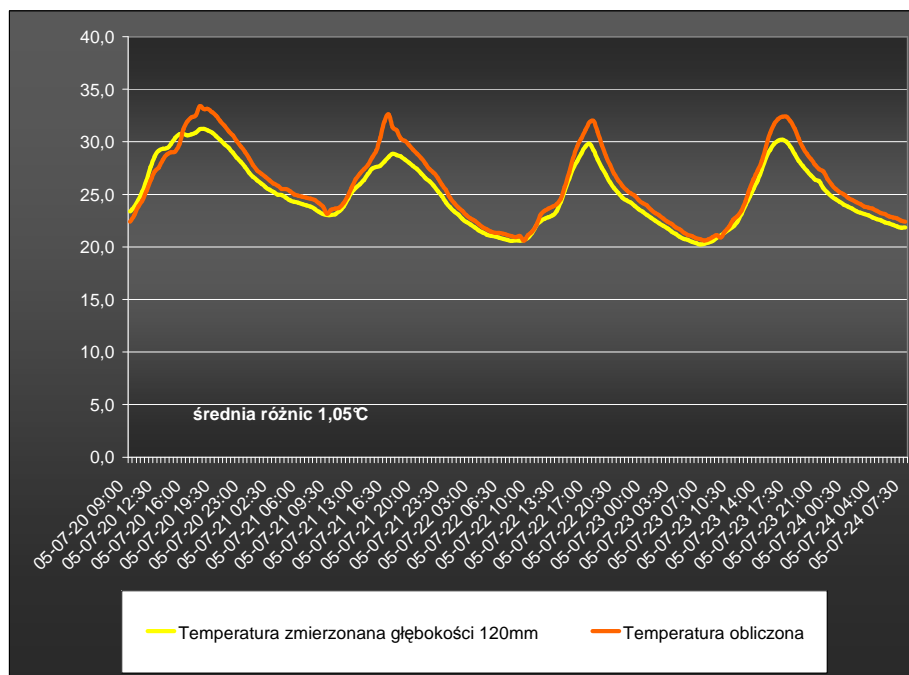
Rysunek 5.1 Porównanie temperatur zmierzonych i obliczonych metodą BELLS3 – obliczenia temperatur rozpoczęto o godzinie 9.00 20 lipca



Rysunek 5.2 Porównanie temperatur zmierzonych i obliczonych metodą BELLS3 - obliczenia temperatur rozpoczynano codziennie o godzinie 9.00



Rysunek 5.3 Porównanie temperatur zmierzonych i obliczonych metodą Wistuby



Rysunek 5.4 Porównanie temperatur zmierzonych i obliczonych metodą Hermanssona

Z przedstawionych danych wynika, że najlepsze odwzorowanie temperatur uzyskano za pomocą metody Hermanssona (średnia różnic 1,05°C). Należy jednak pamiętać, że w metodzie tej korzysta się z serii pomiarów temperatury na głębokości 15mm.

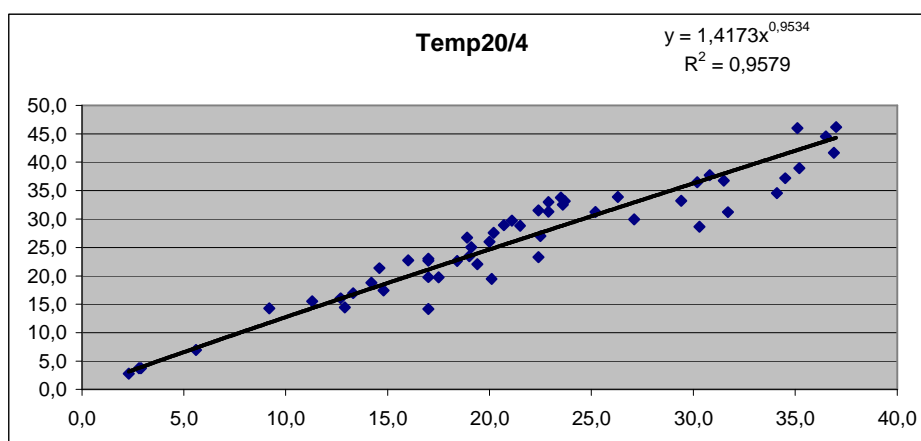
Porównywalne temperatury uzyskano metodą BELLS3, gdzie średnia różnic wyniosła 1,86°C i 1,55°C. Niższą wartość, a więc lepsze odwzorowanie uzyskano wznawiając obliczenia codziennie o godzinie 9.00. Można sądzić, że w przypadku danych z standardowych pomiarów FWD, w których temperatura powierzchni rejestrowana jest w

każdym punkcie pomiarowym, różnica między temperaturą zmierzoną i obliczoną będzie znacznie mniejsza. Tym nie mniej już na tym etapie widać konieczność weryfikacji tej metody w warunkach polskich z wykorzystaniem danych rejestrowanych przez czujnik IR zamontowany na ugięciomierzu FWD. W trakcie takich badań należałoby przeprowadzić również testy nad wprowadzeniem kontaktowego czujnika temperatury powierzchni nawierzchni.

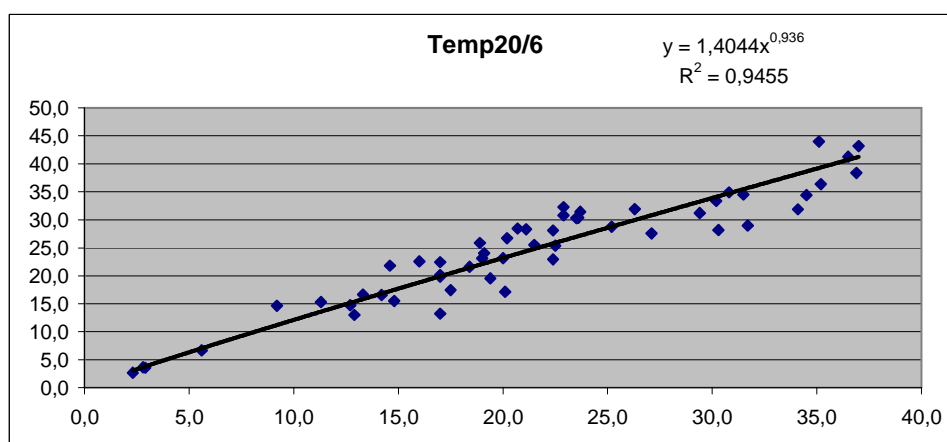
5.2 Opracowanie algorytmu wyznaczania temperatury miarodajnej warstw asfaltowych na podstawie pomiarów temperatury powierzchni i otoczenia

W opracowaniu algorytmu wyznaczania temperatury miarodajnej wykorzystano dane z wybranych dni roku pomiarowego. Dane te przedstawiono w Załączniku 7.

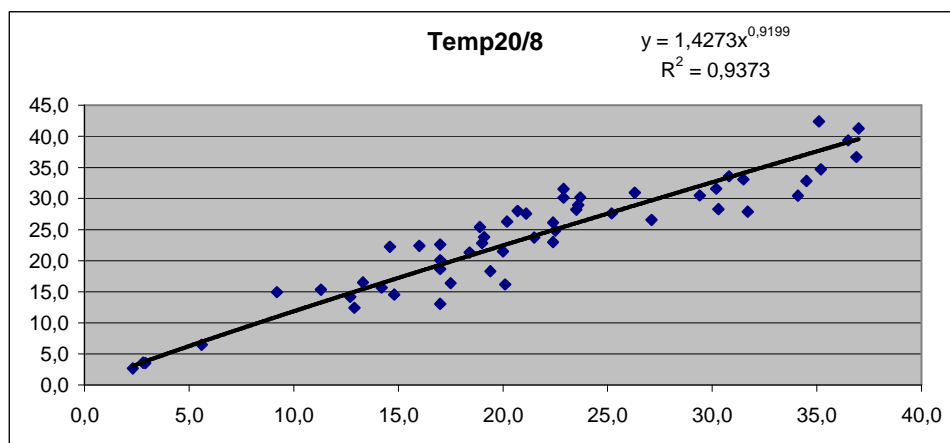
W celu wyznaczenia funkcji przeliczeniowych przeprowadzono szereg obliczeń mających na celu porównanie i wyznaczenie zależności między wynikami pomiarów temperatury powietrza na wysokości 20 cm (Temp20), temperatury powierzchni (Temp naw) i wartościami temperatury zmierzonymi na głębokości 4, 6, 8, 10 i 12 cm. Wyniki obliczeń przedstawiono na Rysunkach 5.5-5.14.



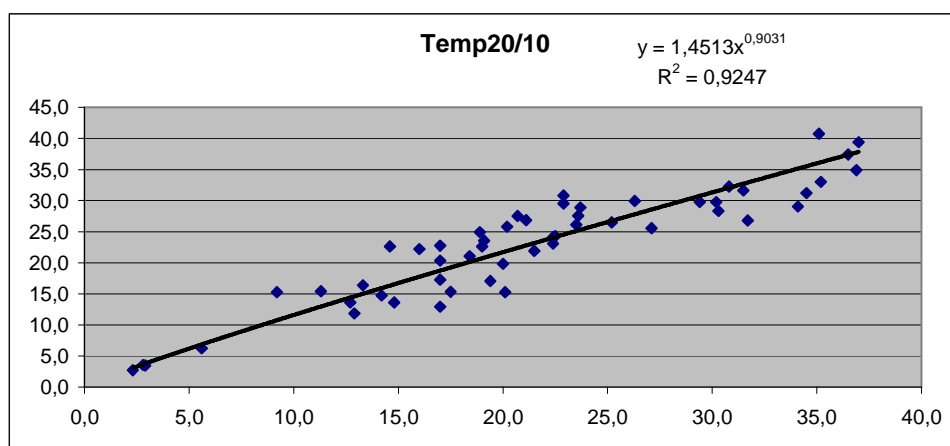
Rysunek 5.5 Porównanie temperatur powietrza zmierzonych na wysokości 20 cm i temperatur zmierzonych na głębokości 4cm



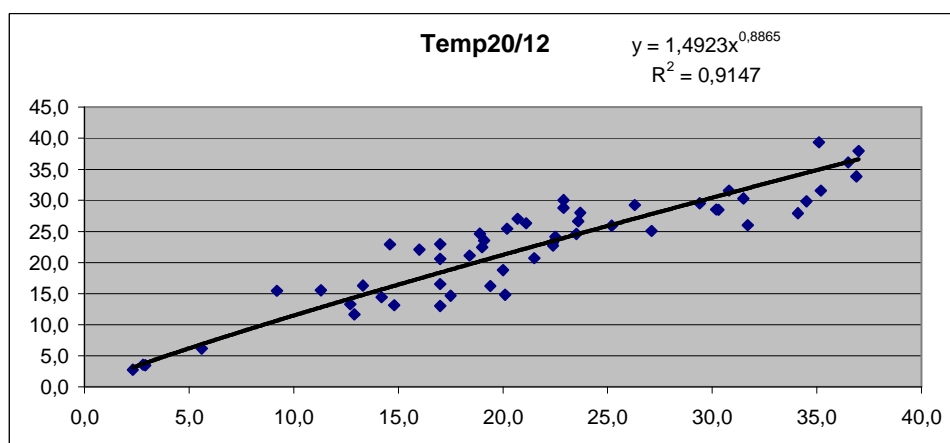
Rysunek 5.6 Porównanie temperatur powietrza zmierzonych na wysokości 20 cm i temperatur zmierzonych na głębokości 6cm



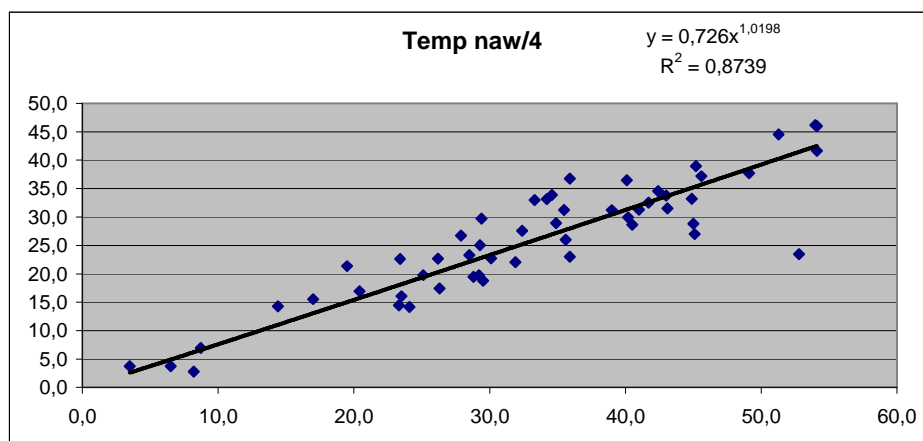
Rysunek 5.7 Porównanie temperatur powietrza zmierzonych na wysokości 20 cm i temperatur zmierzonych na głębokości 8cm



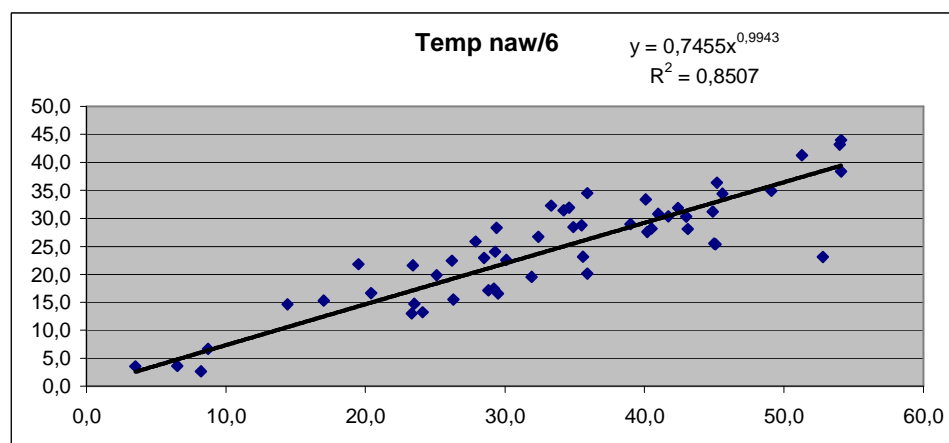
Rysunek 5.8 Porównanie temperatur powietrza zmierzonych na wysokości 20 cm i temperatur zmierzonych na głębokości 10cm



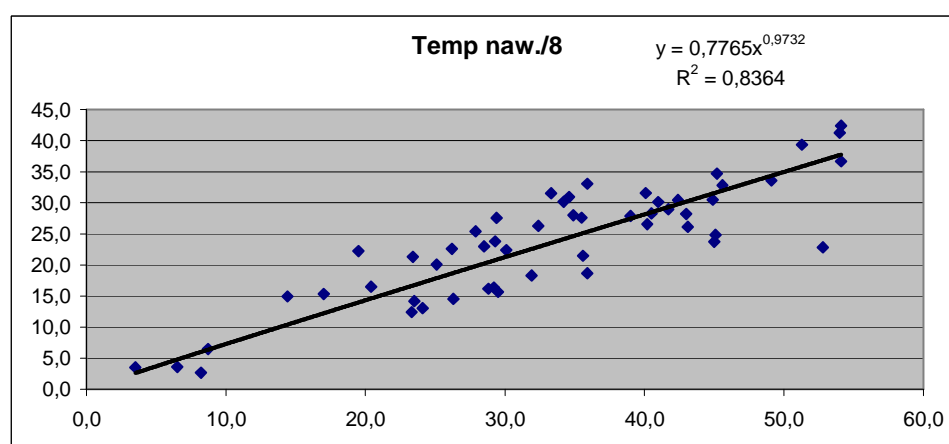
Rysunek 5.9 Porównanie temperatur powietrza zmierzonych na wysokości 20 cm i temperatur zmierzonych na głębokości 12cm



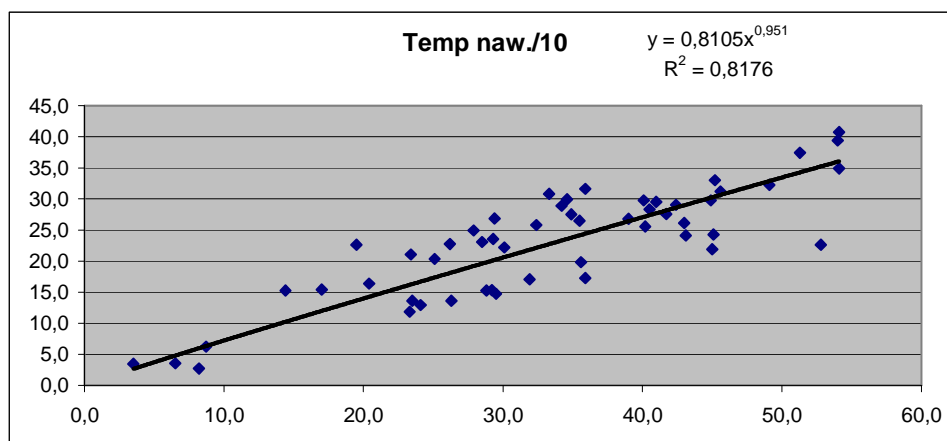
Rysunek 5.10 Porównanie temperatur nawierzchni zmierzonych pirometrem i temperatur zmierzonych na głębokości 4cm



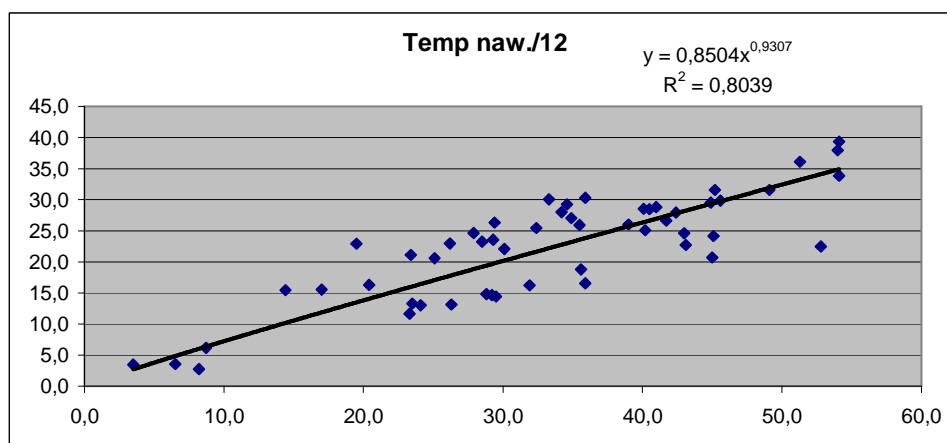
Rysunek 5.11 Porównanie temperatur nawierzchni zmierzonych pirometrem i temperatur zmierzonych na głębokości 6cm



Rysunek 5.12 Porównanie temperatur nawierzchni zmierzonych pirometrem i temperatur zmierzonych na głębokości 8cm

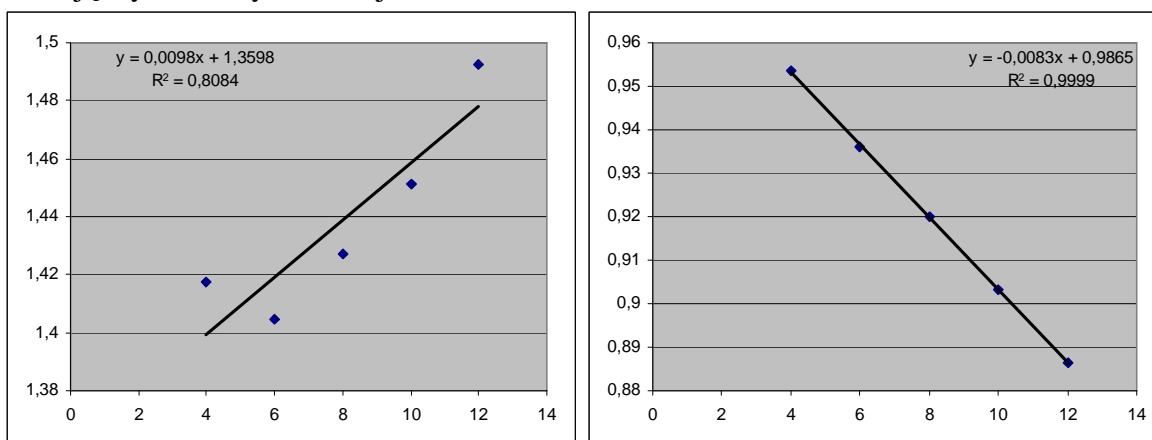


Rysunek 5.13 Porównanie temperatur nawierzchni zmierzonych pirometrem i temperatur zmierzonych na głębokości 10cm

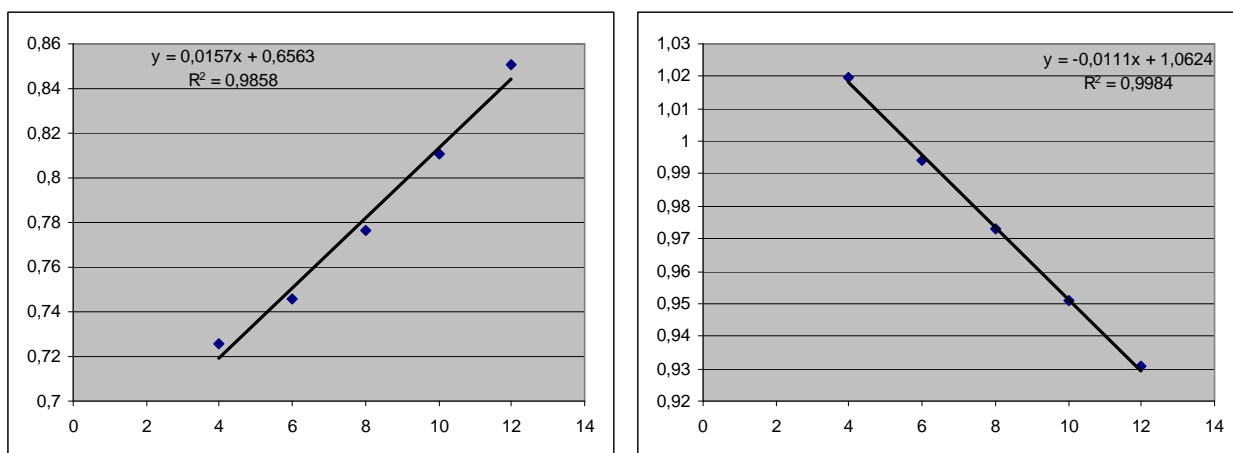


Rysunek 5.14 Porównanie temperatur nawierzchni zmierzonych pirometrem i temperatur zmierzonych na głębokości 12cm

Porównano również wartości współczynników funkcji wyznaczonych dla temperatury powietrza, powierzchni i temperatur zmierzonych na różnych głębokościach warstw asfaltowych. Przedstawione na Rysunkach 5.15-5.16 wyniki obliczeń wskazują na dobrą korelację wyznaczonych funkcji.



Rysunek 5.15 Porównanie współczynników funkcji wyznaczonych dla temperatur powietrza zmierzonych na wysokości 20 cm i temperatur zmierzonych na głębokości 12cm



Rysunek 5.16 Porównanie współczynników funkcji wyznaczonych dla temperatur nawierzchni zmierzonych pirometrem i temperatur zmierzonych na głębokości 12cm

W efekcie przeprowadzonych analiz wyznaczono dwie funkcje przeliczeniowe:

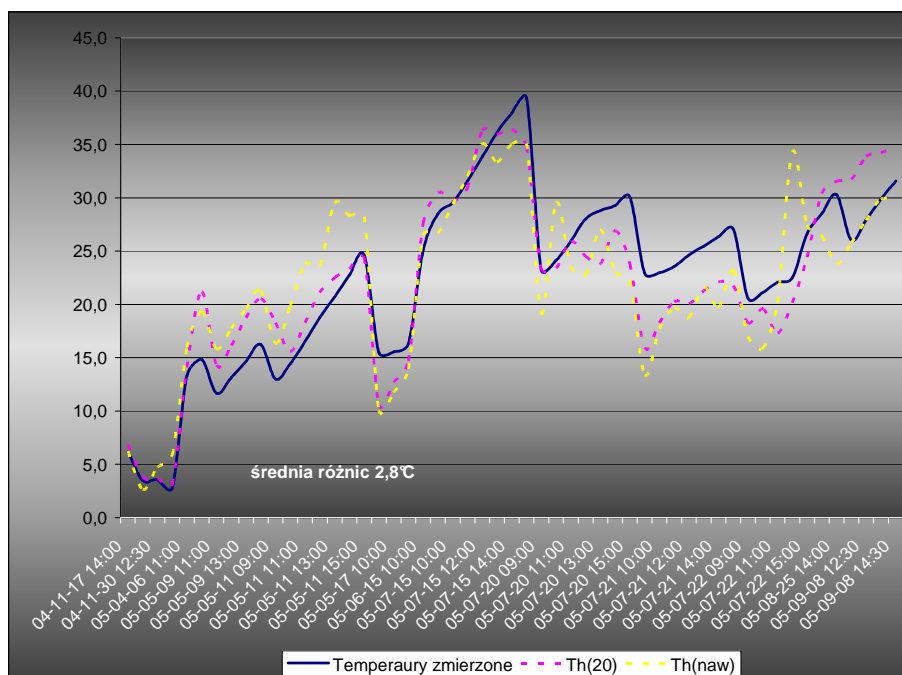
- funkcję wyznaczania temperatury nawierzchni na głębokości h w zależności od temperatury powietrza zarejestrowanej na wysokości 20 cm

$$T_{h(20)} = (1,36 + 0,01 h) T_{20}^{(0,9865 - 0,0083 h)}$$

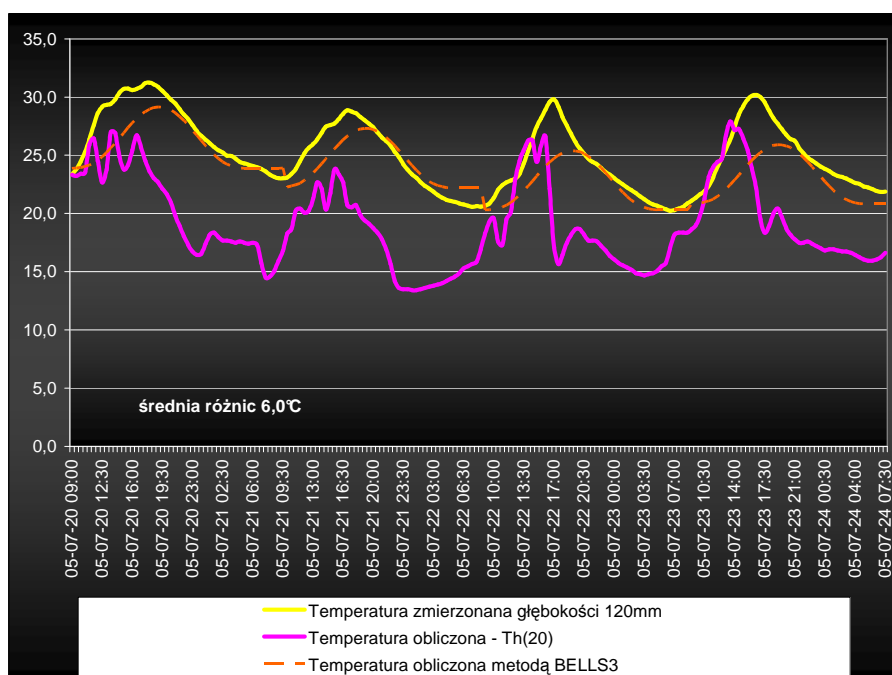
- oraz funkcję wyznaczania temperatury nawierzchni na głębokości h w zależności od temperatury powierzchni zarejestrowanej pirometrem

$$T_{h(\text{naw})} = (0,6126 + 0,0162 h) T_{\text{naw}}^{(1,0845 - 0,0116 h)}$$

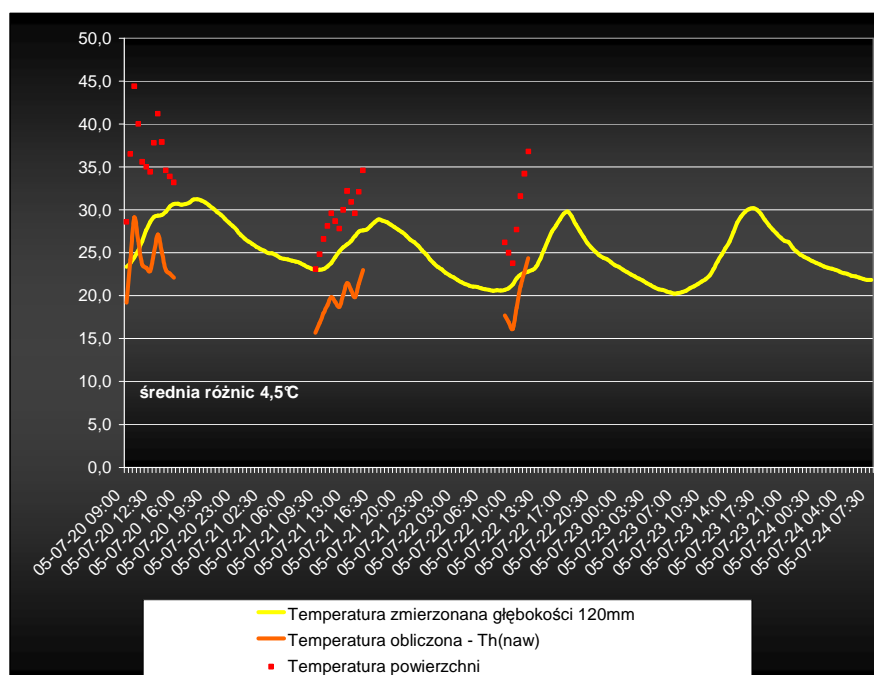
Na zamieszczonych poniżej rysunkach przedstawiono wyniki obliczeń temperatur na głębokości 12 cm wykonanych przy użyciu nowych funkcji przeliczeniowych. Na Rysunku 5.17 przedstawiono obliczenia dla danych wykorzystanych w analizie nowych funkcji przeliczeniowych, natomiast na Rysunku 5.18 przedstawiono porównanie wyników obliczeń opracowanymi funkcjami przeliczeniowymi, metodą BELLS3 oraz danymi zmierzonymi w okresie od 20 do 24 lipca 2005 na głębokości 12 cm.



Rysunek 5.17 Porównanie temperatur powierzchni obliczonych nowymi funkcjami przeliczeniowymi oraz temperatur zmierzonych na głębokości 12cm



Rysunek 5.18 Porównanie temperatur powierzchni obliczonych funkcją $T_{h(20)}$, metodą BELL33 oraz temperatur zmierzonych na głębokości 12cm



Rysunek 5.19 Porównanie temperatur nawierzchni obliczonych funkcją $T_{h(naw)}$ oraz temperatur zmierzonych na głębokości 12cm

Na podstawie zaprezentowanych wyników obliczeń można stwierdzić, że wyznaczone funkcje przeliczeniowe w sposób dostateczny odwzorowują temperaturę nawierzchni dla serii pomiarowej, której dane wykorzystano do wyznaczenia tych funkcji. Znacznie gorzej (Rysunki 5.18 i 5.19) jest w przypadku niezależnej serii pomiarowej. Różnice w wyznaczonych temperaturach są znaczne i wynoszą od 4,5 do 6,0°C. Oznacza to, że wyznaczone funkcje powinny zostać wzbogacone (tak jak jest to w metodzie BELLS3) o dane o temperaturze powietrza z dnia poprzedniego. Wydają się, że tego rodzaju analiza może zostać przeprowadzona w oparciu o szczegółową weryfikację uzyskanej w ramach niniejszej pracy bazy danych.

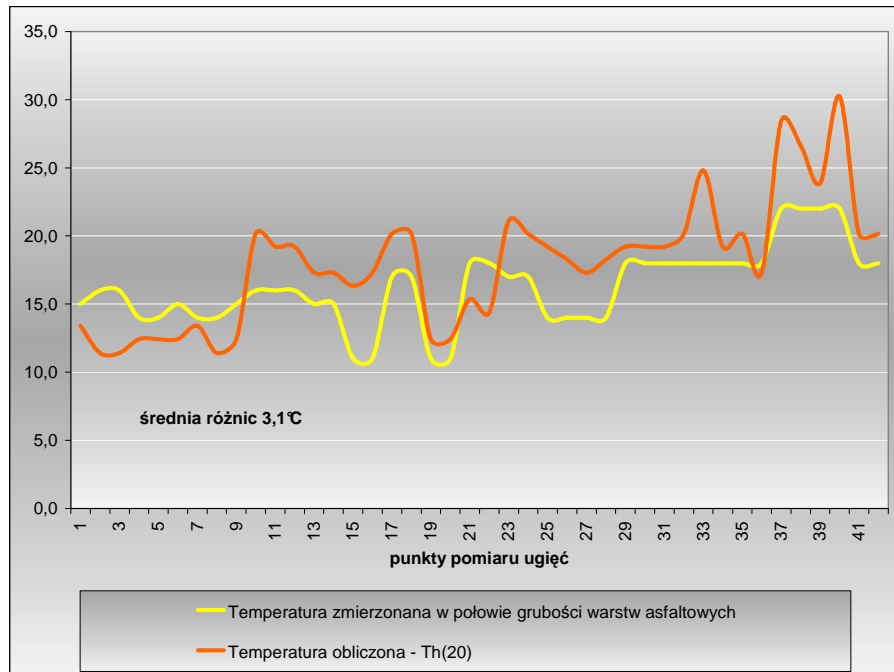
5.3 Weryfikacja opracowanego algorytmu w warunkach terenowych dla badań FWD

Zgodnie z programem pracy przeprowadzono weryfikację opracowanego algorytmu dla danych uzyskanych w trakcie standardowych badań FWD. Do analizy wybrano 42 punkty, w których wykonano pomiar ugięć oraz zarejestrowano temperaturę powietrza, powierzchni oraz temperaturę w połowie warstw asfaltowych. Dane wykorzystane w analizie przedstawiono w Tabeli 5.1.

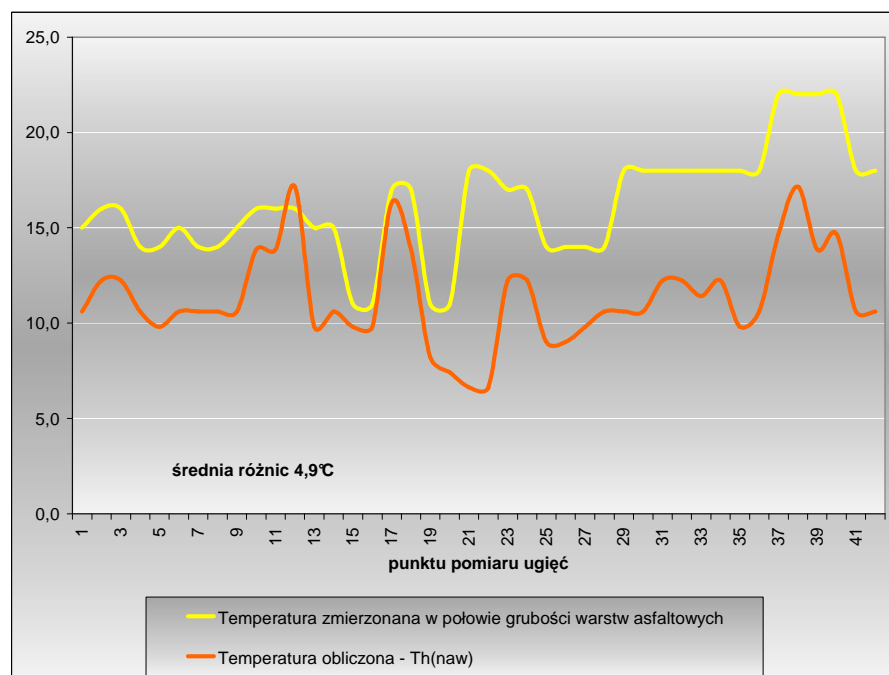
Na Rysunkach 5.20 oraz 5.21 przedstawiono wyniki obliczeń dokonanych według opracowanego algorytmu przeliczeniowego w porównaniu z wynikami pomiarów temperatur w połowie warstw asfaltowych.

Tabela 5.2 Dane z badań terenowych

Lp	Temperatura powietrza	Temperatura powierzchni zmierzona czujnikiem podczerwieni IR	Temperatura zmierzona na w połowie grubości warstw asfaltowych	Temperatura obliczona - Th(20)	Temperatura obliczona - Th(naw)
1	11	14,0	15,0	12,4	9,8
2	10	16,0	16,0	11,4	11,1
3	10	16,0	16,0	11,4	11,1
4	11	14,0	14,0	12,4	9,8
5	11	13,0	14,0	12,4	9,1
6	11	14,0	15,0	12,4	9,8
7	12	14,0	14,0	13,4	9,8
8	10	14,0	14,0	11,4	9,8
9	11	14,0	15,0	12,4	9,8
10	19	18,0	16,0	20,2	12,4
11	18	18,0	16,0	19,2	12,4
12	18	22,0	16,0	19,2	15,0
13	16	13,0	15,0	17,3	9,1
14	16	14,0	15,0	17,3	9,8
15	15	13,0	11,0	16,3	9,1
16	16	13,0	11,0	17,3	9,1
17	19	21,0	17,0	20,2	14,3
18	19	18,0	17,0	20,2	12,4
19	11	11,0	11,0	12,4	7,8
20	11	10,0	11,0	12,4	7,1
21	14	9,0	18,0	15,4	6,4
22	13	9,0	18,0	14,4	6,4
23	20	16,0	17,0	21,1	11,1
24	19	16,0	17,0	20,2	11,1
25	18	12,0	14,0	19,2	8,5
26	17	12,0	14,0	18,3	8,5
27	16	13,0	14,0	17,3	9,1
28	17	14,0	14,0	18,3	9,8
29	18	14,0	18,0	19,2	9,8
30	18	14,0	18,0	19,2	9,8
31	18	16,0	18,0	19,2	11,1
32	19	16,0	18,0	20,2	11,1
33	24	15,0	18,0	24,8	10,4
34	18	16,0	18,0	19,2	11,1
35	19	13,0	18,0	20,2	9,1
36	16	14,0	18,0	17,3	9,8
37	28	19,0	22,0	28,4	13,1
38	26	19,0	22,0	26,6	13,1
39	23	18,0	22,0	23,9	12,4
40	30	19,0	22,0	30,2	13,1
41	19	14,0	18,0	20,2	9,8
42	19	14,0	18,0	20,2	9,8



Rysunek 5.20 Porównanie temperatur nawierzchni obliczonych funkcją $T_{h(naw)}$ oraz temperatur zmierzonych w połowie grubości warstw asfaltowych podczas badań FWD



Rysunek 5.21 Porównanie temperatur nawierzchni obliczonych funkcją $T_{h(naw)}$ oraz temperatur zmierzonych w połowie grubości warstw asfaltowych podczas badań FWD

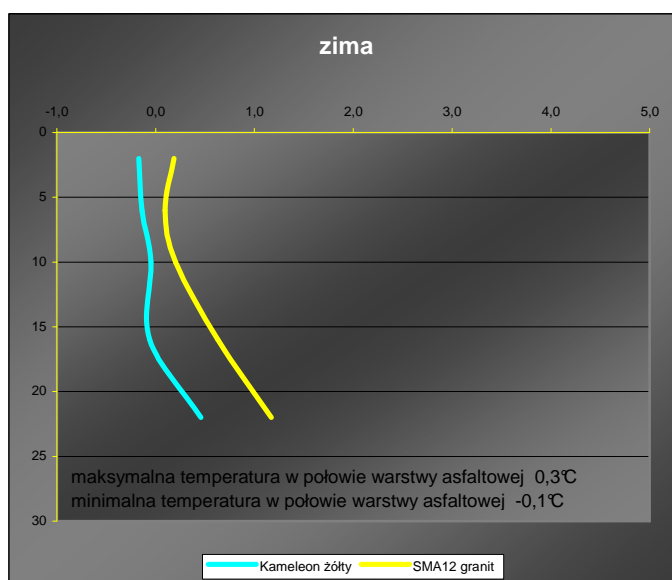
Na podstawie przedstawionych powyżej danych można stwierdzić, że obliczone wartości temperatur znacznie różnią się od temperatur zmierzonych (średnia różnica wynosi od 3,1°C do 4,9°C). Przyczyną tego słabego odwzorowania temperatur nawierzchni może być, jak to stwierdzono w punkcie 5.2, brak w funkcjach przeliczeniowych danych o temperaturze powietrza z dnia poprzedniego.

Przedstawione wyniki badań potwierdzają konieczność szczegółowej weryfikacji opracowanych funkcji z uwzględnieniem danych rejestrowanych przez czujnik IR zamontowany na ugięciomierzu FWD. Rejestrowanie danych w taki sposób pozwoli wyeliminować te czynniki, które w znaczny sposób wpływają na dokładność i powtarzalność pomiarów. Takie podejście pozwoli na dokładniejsze wyznaczenie funkcji przeliczeniowych oraz wprowadzenie innych parametrów wyznaczania temperatury miarodajnej warstw asfaltowych.

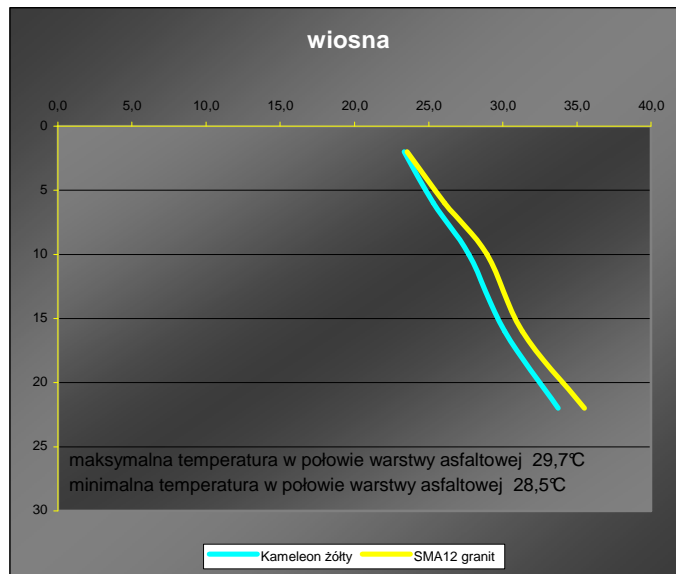
Rozdział 6 Wpływ rodzaju warstwy ścieralnej na trwałość zmęczeniową konstrukcji

W niniejszym rozdziale przedstawiono wpływ rozkładu temperatury w nawierzchni o różnych, pod względem technologii wykonania, warstwach ścieralnych na trwałość zmęczeniową konstrukcji. W tym celu uzyskane w trakcie roku pomiarowego dane o temperaturze nawierzchni podzielono na pory roku. Dla każdej z pór wybrano losowo tydzień reprezentujący daną porę roku. Dla tak przygotowanych danych dokonano obliczeń w celu wyznaczenia temperatur minimalnych i maksymalnych dla danej pory roku.

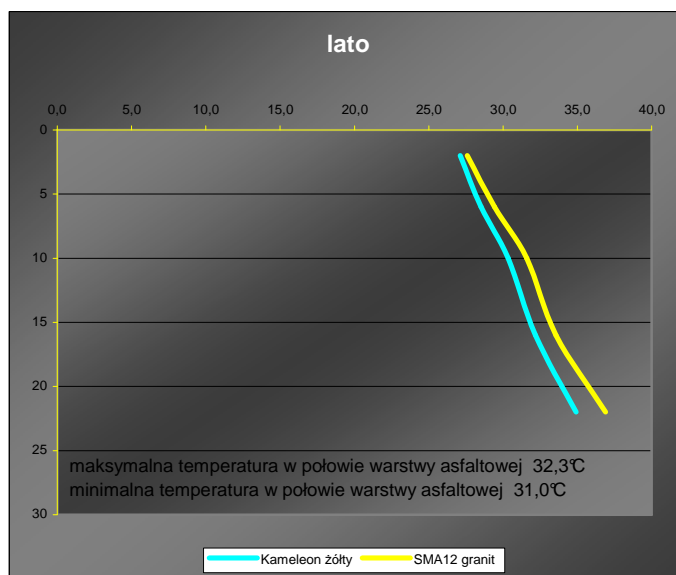
Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że dla większości pór roku (wiosny, lata i jesieni) najniższe temperatury rejestrowane są na próbce Kameleon koloru żółtego z kruszywem dolomitowym, natomiast najwyższe na próbce SMA12 z kruszywem granitowym. Zestawienie profili temperatur dla tych próbek przedstawiono na Rysunkach 6.1-6.4.



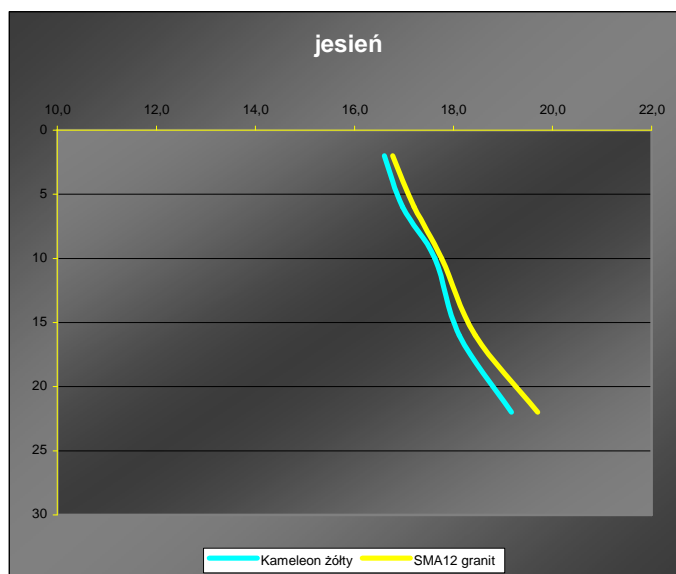
Rysunek 6.1 Profile temperatur wyznaczone dla zimy (próbka Kameleon żółty – temperatury minimalne, SMA12 granit – temperatura maksymalne)



Rysunek 6.2 Profile temperatur wyznaczone dla wiosny (próbka Kameleon żółty – temperatury minimalne, SMA12 granit – temperatura maksymalne)



Rysunek 6.3 Profile temperatur wyznaczone dla lata (próbka Kameleon żółty – temperatury minimalne, SMA12 granit – temperatura maksymalne)



Rysunek 6.4 Profile temperatur wyznaczone dla jesieni (próbka Kameleon żółty – temperatury minimalne, SMA12 granit – temperatura maksymalne)

Obliczenia trwałość zmęczeniowej przeprowadzono dla dwóch modeli obliczeniowych, z których pierwszy reprezentuje konstrukcję typu A dla KR2 (wg Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych - KTKNPP), natomiast drugi reprezentuje konstrukcję typu A dla KR5. W pierwszym modelu grubość warstw asfaltowych wynosi 12 cm, natomiast w drugim 27 cm. Dane materiałowe dla modeli obliczeniowych przyjęto zgodnie z Katalogiem KTKNPP. Wartości modułów warstw asfaltowych przeliczono do temperatur minimalnych i maksymalnych wyznaczonych w połowie grubości warstw na podstawie przyjętych dla danej pory roku profili temperatur. W Tabelach 6.1 i 6.2 zestawiono dane przyjęte w modelach obliczeniowych.

Tabela 6.1 Dane wejściowe dla modelu obliczeniowego KR2

Pora roku	Temperatura [°C]		Moduł sztywności warstwy asfaltowej [MPa]		Moduł podbudowy [MPa]	Moduł podłoża [MPa]
	minimalna	maksymalna	minimalny	maksymalny		
zima	-0,1	0,1	20274	20263	200	100
wiosna	25,3	26,1	2555	2392		
lato	28,5	29,4	1964	1824		
jesień	17	17,2	5054	4971		

Tabela 6.2 Dane wejściowe dla modelu obliczeniowego KR5

Pora roku	Temperatura [°C]		Moduł sztywności warstwy asfaltowej [MPa]		Moduł podbudowy [MPa]	Moduł podłoża [MPa]
	minimalna	maksymalna	minimalny	maksymalny		
zima	-0,1	0,3	20274	19943	200	100
wiosna	28,5	29,7	1964	1779		
lato	31	32,3	1599	1437		
jesień	17,8	18	4732	4655		

Obliczenia trwałości zmęczeniowej przeprowadzono zgodnie z Katalogiem Wzmocnień i Remontów Nawierzchni Podatnych i Pólsztynowych KWRNPP. Wyniki przeprowadzonych obliczeń przedstawiono w Tabelach 6.3 i 6.4.

Z przedstawionych danych wynika, że różnice trwałości konstrukcji nawierzchni obliczonych dla wyznaczonych temperatur minimalnych i maksymalnych wynoszą:

- dla modelu KR2 od 3,5% dla warstw asfaltowych do 8,5% dla podłoża gruntowego,
- dla modelu KR5 od 9,0% dla warstw asfaltowych do 20,0% dla podłoża gruntowego.

Oznacza to, że w przypadku zastosowania w mieszance mineralno-asfaltowej kruszywa jaśniejszego np. dolomitowego trwałość konstrukcji nawierzchni w okresie 20 lat może być większa o 0,003-0,043 mln osi 100 kN w przypadku konstrukcji nawierzchni dla kategorii ruchu KR2 i o 0,657-2,900 mln osi 100 kN większa w przypadku konstrukcji nawierzchni dla kategorii ruchu KR5. Daje to żywotność nawierzchni dłuższą średnio o 1,2 roku dla konstrukcji nawierzchni dla kategorii ruchu KR2 i 2,9 roku dla konstrukcji nawierzchni dla kategorii ruchu KR5.

Tabela 6.3 Obliczona trwałość zmęczeniowa dla modelu obliczeniowego KR2

Pora roku	Odształcenia (x 10E-6)				Trwałość nawierzchni w [mln] osi 100 kN			
	rozciągające w warstwie asfaltowej	pionowe w podłożu gruntowym	rozciągające w warstwie asfaltowej	pionowe w podłożu gruntowym	dla temperatury minimalnej		dla temperatury maksymalnej	
	dla temperatury minimalnej		dla temperatury maksymalnej		warstwy asfaltowe	podłoże gruntowe	warstwy asfaltowe	podłoże gruntowe
zima	106	390	106	390	0,641	2,587	0,641	2,587
wiosna	362	872	374	890	0,066	0,070	0,063	0,064
lato	405	932	418	952	0,057	0,052	0,055	0,047
jesień	254	692	256	696	0,118	0,198	0,117	0,193
trwałość wg teorii Minera					0,087	0,094	0,084	0,086

Tabela 6.4 Obliczona trwałość zmęczeniowa dla modelu obliczeniowego KR5

Pora roku	Odształcenia (x 10E-6)				Trwałość nawierzchni w [mln] osi 100 kN			
	rozciągające w warstwie asfaltowej	pionowe w podłożu gruntowym	rozciągające w warstwie asfaltowej	pionowe w podłożu gruntowym	dla temperatury minimalnej		dla temperatury maksymalnej	
	dla temperatury minimalnej		dla temperatury maksymalnej		warstwy asfaltowe	podłoże gruntowe	warstwy asfaltowe	podłoże gruntowe
zima	32	68	33	69	30,250	6518,000	29,830	6105,000
wiosna	172	241	182	252	0,957	22,390	0,864	18,330
lato	191	256	203	272	0,808	17,080	0,724	13,020
jesień	97	155	98	156	2,973	162,100	2,915	157,400
trwałość wg teorii Minera					1,382	33,000	1,256	26,109

Rozdział 7 Wnioski

W ramach niniejszej pracy udało się stworzyć obszerną bazę danych o temperaturach nawierzchni. Ilość uzyskanych danych (1,75 mln wartości temperatur nawierzchni i powietrza) może świadczyć o dokładności przeprowadzonych badań. Utworzona baza danych może stanowić podstawę wielu dalszych, dokładniejszych analiz rozkładu temperatur w nawierzchniach o różnych warstwach ścieralnych.

Analiza zabranych danych wykazała, że pirometr wykorzystywany do pomiaru temperatury powierzchni jest zbyt czuły na czynniki zewnętrzne. Temperatury rejestrowane przez urządzenie są obarczone znacznym błędem, szczególnie przy temperaturach otoczenia poniżej 20°C. W związku z tym ilość danych, która mogła być wykorzystana w opracowaniu algorytmu wyznaczania temperatury nawierzchni na podstawie temperatur powietrza i powierzchni była dość ograniczona. Dlatego wyznaczone funkcje przeliczeniowe wymagają szczegółowej weryfikacji w oparciu o dane z pomiarów czujnikiem IR zamontowanym na ugięciomierzu FWD. Przedstawione wyniki analiz wykazały, że wyznaczone funkcje powinny zostać wzbogacone (tak jak jest to w metodzie BELLS3) o dane dotyczące temperatury powietrza z dnia poprzedniego. Wydaje się, że tego rodzaju analiza może zostać przeprowadzona w oparciu o szczegółową weryfikację uzyskanej w ramach niniejszej pracy bazy danych.

Przeprowadzona analiza porównawcza metod wyznaczania temperatur nawierzchni wykazała, że najlepszą, dającą zbliżone wartości temperatur nawierzchni i jednocześnie wymagającą jedynie danych wejściowych takich jak średnia dobową temperaturę powietrza z dnia poprzedniego oraz temperaturę powierzchni, jest metoda BELLS3. Chociaż przedstawione dane wskazują, że różnice między temperaturą zmierzoną a obliczoną wynoszą średnio od 1,86°C i 1,55°C to należy pamiętać, że dysponowano dość małą ilością danych o temperaturze powierzchni. Można sądzić, że w przypadku danych z standardowych pomiarów FWD, w których temperatura powierzchni rejestrowana jest w każdym punkcie pomiarowym, różnica między temperaturą zmierzoną i obliczoną będzie znacznie mniejsza. Tym niemniej już na tym etapie widać konieczność weryfikacji tej metody w warunkach polskich z wykorzystaniem danych rejestrowanych przez czujnik IR zamontowany na ugięciomierzu FWD.

Z przedstawionych danych wynika, że różnice trwałości konstrukcji nawierzchni obliczonych dla wyznaczonych temperatur minimalnych i maksymalnych wynoszą średnio od 6% dla warstw asfaltowych do 14% dla podłoża gruntowego. Oznacza to, że w przypadku zastosowania w mieszance mineralno-asfaltowej kruszywa jaśniejszego np. dolomitowego trwałość konstrukcji nawierzchni w okresie 20 lat może być większa średnio o 0,023 mln osi 100 kN w przypadku konstrukcji nawierzchni o kategorii ruchu KR2 i o 1,778 mln osi 100 kN większa w przypadku konstrukcji nawierzchni o kategorii ruchu KR5. Daje to żywotność nawierzchni dłuższą średnio o 1,2 roku dla konstrukcji nawierzchni o kategorii ruchu KR2 i 2,9 roku dla konstrukcji nawierzchni o kategorii ruchu KR5.

INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW
Zakład Technologii Nawierzchni

ZAŁĄCZNIK 1
zaprojektowanie i wykonanie płyt z MMA typu SMA8, SMA12, BA12,
GUF1 oraz kolorowych MMA z lepiszczem KAMELEON, z zastosowaniem
różnego rodzaju kruszyw

INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW
Zakład Systemów Zarządzania i Telematyki

ZAŁĄCZNIK 2
**Opis stanowiska do pomiarów temperatur nawierzchni oraz stacji
pogodowej**

INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW
Zakład Systemów Zarządzania i Telematyki

ZAŁĄCZNIK 3
Specyfikacja techniczna pirometru ST20

INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW
Zakład Systemów Zarządzania i Telematyki

ZAŁĄCZNIK 4
Wyniki pomiarów temperatur w przekrojach

INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW
Zakład Systemów Zarządzania i Telematyki

ZAŁĄCZNIK 5
Wyniki pomiarów z stacji pogodowej

INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW
Zakład Systemów Zarządzania i Telematyki

ZAŁĄCZNIK 6
Wyniki pomiarów pirometrem