

MATERIAŁ ANTROPOGENICZNY W NAWIERZCHNI I PODTORZU – MONITORING WYBRANYCH PARAMETRÓW W ŚWIETLE WYMAGAŃ TECHNICZNYCH

Kazimierz Kłosek

dr hab. inż., Prof. Nzw. WST Katowice i Pol. Śl., Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach, ul. Rolna 43, 40-555 Katowice, e-mail: kasklo@onet.eu

Streszczenie. Praca dotyczy oceny i możliwości wykorzystania odpadów powęglowych jako antropogenicznych materiałów zastępujących konwencjonalne kruszywa kolejowe w nawierzchni. Przedstawiono wyniki rocznego cyklu monitoringu wybranych cech materiału w warunkach eksploatacyjnych.

Słowa kluczowe: materiał antropogeniczny, łupek przywęglowy, kruszywo kolejowe monitoring podtorza i nawierzchni

1. Wstęp

Wykorzystanie materiałów antropogenicznych w budownictwie komunikacyjnym [1,2], hydrotechnicznym, makroniwelacji, itp. stanowi istotny aspekt ich utylizacji, jak i praktycznego wykorzystania. Związane z tym aktualne wymogi i ograniczenia zostały sprecyzowane w [3]. W regionach uprzemysłowionych jak i post-industrialnych zaleganie tych materiałów na hałdach powoduje dużą zajętość terenu, zaburza walory krajobrazowe, sprzyja przenikaniu do podłoża i wód gruntowych wielu szkodliwych substancji z uwagi na brak separacji od wpływów atmosferycznych. Wykorzystanie tego typu materiałów jest jednak ograniczone do wybranych stref budowli inżynierskich i obwarowane licznymi ograniczeniami, co sprawia, że ich zastosowanie musi podlegać wielu dodatkowym badaniom i ograniczeniom normowym. Do głównych grup tych materiałów, będących w istocie odpadami po-przemysłowymi zalicza się z reguły żużle (wielkopieczowe, hutnicze, pocynkowe), łupki przywęglowe, popioły, itp. oraz ich mieszanki. Z uwagi na znacznie niższe koszty ich pozyskania, materiały te są często wykorzystywane w nowych lub modernizowanych obiektach, jako ekwiwalent pełnowartościowych materiałów tradycyjnych. Działania te mogą prowadzić do poważnych problemów w warunkach normalnej eksploatacji, nie gwarantując stabilności cech i parametrów fizycznych, mechanicznych, chemicznych, itp. Brak monitoringu tych cech uniemożliwia merytoryczną ocenę spraw spornych, często jeszcze w okresie gwarancyjnym.

W pracy przytoczono wstępne wyniki monitoringu z ponad 1,5 rocznych pomiarów zrealizowanych w ramach systemu kontroli nawierzchni monolitycznej i przejazdów (kolejowych i tramwajowych) zabudowanych w technologii nawierzchni zintegrowanych na prefabrykowanych, wielko-wymiarowych płytach betonowych (rys. 1). Opracowanie zawiera opis zastosowanych rozwiązań pomiarowych, a w szczególności opis zastosowanych czujników oraz budowę i lokalizację poszczególnych punktów pomiarowych w obrębie górnych warstw nawierzchni. Szczególną uwagę skupiono na warstwach kruszyw i podsypk zabudowanych w podłożu płyt, które w dokumentacji projektowej określono jako podsypkę kolejową. W rzeczywistości materiał ten został zamieniony na łupek przywęglowy o analogicznej (wyjściowo) granulacji, lecz zupełnie odmiennych parametrach fizyko-mechanicznych, co budzi istotne wątpliwości, co do zasadności takiej zamiany na materiały nie-ekwiwalentne ze specyfikacjami materiałowymi.



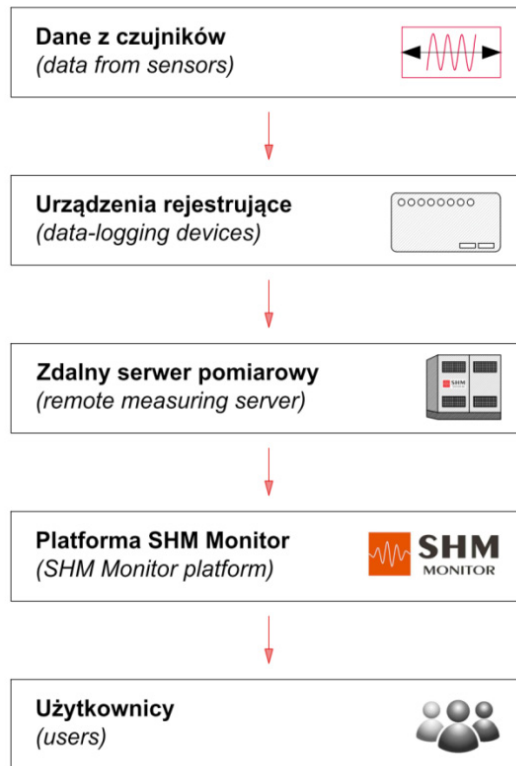
Rys. 1. Widok nawierzchni w strefie przejazdu

2. Opis systemu monitorowania. Struktura systemu

Fizyczna struktura systemu monitorowania zastosowanego do monitorowania zmian grubości warstw podsypki i gruntu składa się z następujących komponentów:

- CZUJNIKI, realizujące pomiary wybranych wielkości fizycznych, istotnych z punktu widzenia analizowanego zagadnienia technicznego,
- REJESTRATORY, obsługujące czujniki i przesyłające dane pomiarowe do zdalnego serwera,
- SERWER, komputer pomiarowy z zainstalowanym oprogramowaniem do zbierania, analizy i prezentacji danych pomiarowych,
- OKABLOWANIE.

Schemat przepływu danych pomiarowych w ramach systemu monitorowania przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat przepływu informacji w ramach systemu monitorowania

a. Mierzone wielkości fizyczne

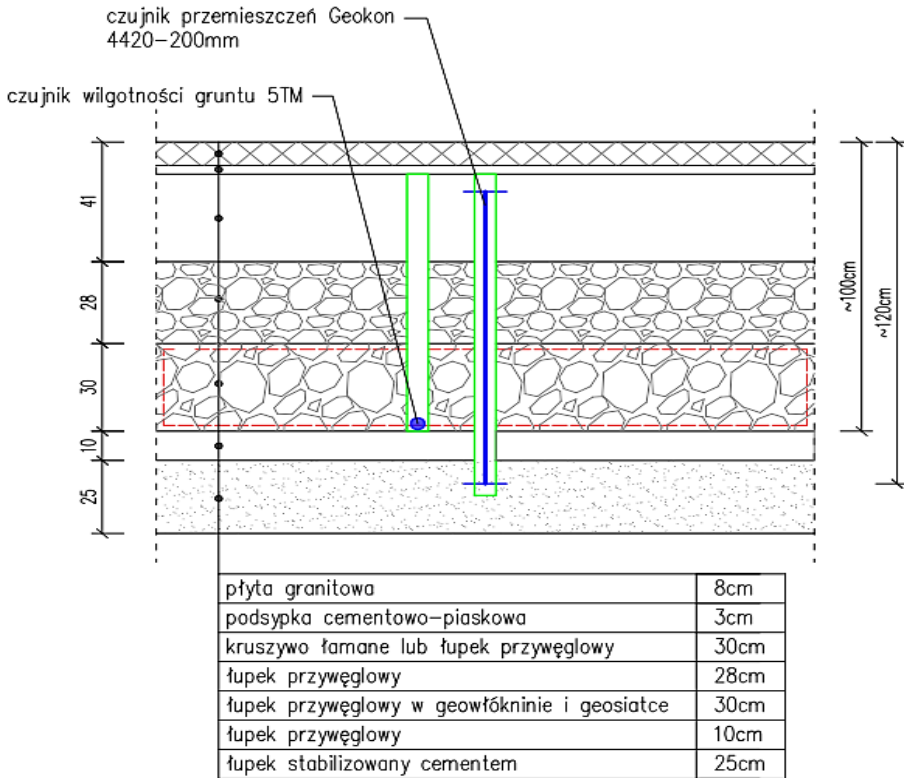
System monitorowania podłoża nawierzchni składa się z trzech punktów pomiarowych. W ramach każdego punktu pomiarowego realizowane są pomiary następujących wielkości fizycznych:

- ZMIANA GRUBOŚCI WARSTWY PODBUDOWY NAWIERZCHNI MONOLITYCZNEJ [mm], za pomocą strunowych czujników przemieszczeń Geokon model 4420 o zakresie pomiarowym równym 200 [mm],
- TEMPERATURA MIERZONEJ WARSTWY [°C], przy pomocy rezystancyjnych termistorów zintegrowanych z czujnikami strunowymi,
- WILGOTNOŚĆ PODŁOŻA [%], przy pomocy cyfrowych sond wilgotności i temperatury Decagon 5TM,
- TEMPERATURA PODŁOŻA [°C], przy pomocy cyfrowych sond wilgotności i temperatury Decagon 5TM.

Na rysunkach 3 oraz 4 przedstawiono konstrukcję poszczególnych punktów pomiarowych, zrealizowanych w ramach systemu monitorowania.

System wyposażony jest również w **DESZCZOMIERZ** korytkowy TPG-124-H24 (1 sztuka) (rys. 6), który służy do mierzenia i rejestrowania wielkości opadów atmosferycznych (ciekłych oraz stałych) w ciągu całego roku (deszczomierz wyposażony jest zespół grzewczy).

PRZEKRÓJ PKT. POMIAROWEGO NR 1 i 2



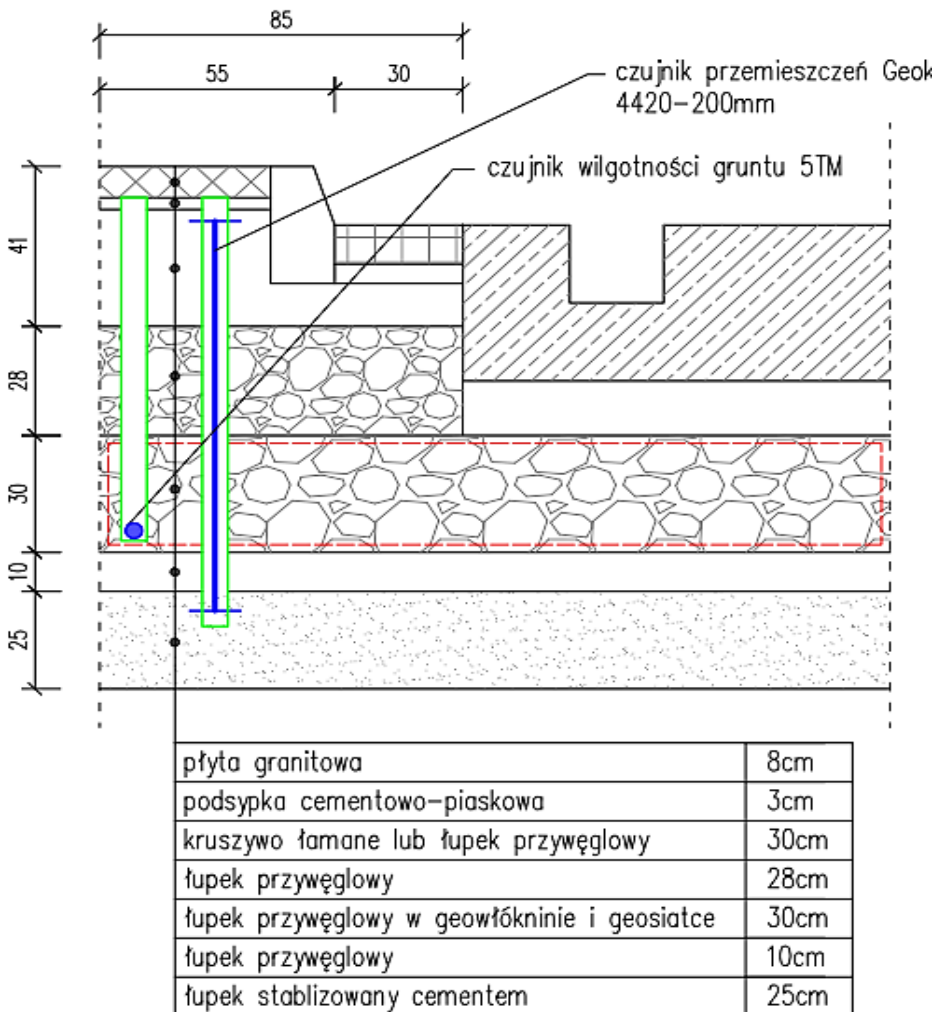
Rys. 3. Budowa punktów pomiarowych P1 oraz P2 systemu monitorowania

b. Lokalizacja i nazewnictwo punktów pomiarowych

W ramach systemu przyjęto następującą konwencję nazewnictwa punktów pomiarowych oraz mierzonych i obliczanych wielkości fizycznych:

- $i = 1, 2, 3$ – indeks oznaczający kolejne numery punktów pomiarowych zgodnie z powyższym schematem,
- P_i - punkt pomiarowy zmian grubości warstwy podbudowy nawierzchni szynowej, temperatury mierzonej warstwy oraz wilgotności i temperatury podłoża,
- D - deszczomierz,
- n – zmierzona wielkość opadu skumulowanego [$\text{mm} = \text{l/m}^2$],
- d_i - wartość zmiany grubości warstwy podbudowy nawierzchni szynowej [mm],
- Td_i - wartości temperatury [$^{\circ}\text{C}$], zmierzonej przy pomocy termistorów zintegrowanych ze strunowymi czujnikami przemieszczeń,
- Tw_i - wartości temperatury [$^{\circ}\text{C}$], zmierzonej przy pomocy cyfrowych sond wilgotności i temperatury.

PRZEKRÓJ PKT. POMIAROWEGO NR 3



Rys. 4. Budowa punktu pomiarowego P3 systemu monitorowania

c. Specyfikacje techniczne urządzeń pomiarowych

Poniżej przedstawiono parametry techniczne czujników i urządzeń pomiarowych wykorzystanych do budowy systemu monitorowania.

- czujniki strunowe do pomiaru zmian grubości warstwy podbudowy; (Geokon model 4420):
 - o zakres pomiarowy: 200 mm,
 - o dokładność pomiaru: $\pm 0,1\%$ zakresu pomiarowego,
 - o nieliniowość pomiaru: $< 0,5\%$ zakresu pomiarowego,

- o rozdzielczość: 0,025% zakresu pomiarowego,
- o średnica cewki: 25 mm,
- o temperatura pracy: -20 do +80°C,
- czujniki do pomiaru temperatury;
(zintegrowane z czujnikami strunowymi model 4420)
(YSI 44005, Dale #1C3001-B3, Alpha #13A3001-B3):
 - o zakres pomiarowy: -80 do +150°C,
 - o dokładność pomiaru: $\pm 0,5^\circ\text{C}$.
- cyfrowe sondy do pomiaru wilgotności i temperatury podłoża;
(Decagon 5TM):
 - o zakres pomiarowy wilgotności: 0 – 100%,
 - o zakres pomiarowy temperatury: -40 do +50°C,
 - o dokładność pomiaru wilgotności: $\pm 3\%$ zakresu pomiarowego,
 - o dokładność pomiaru temperatury: $\pm 1^\circ\text{C}$ zakresu pomiarowego,
 - o rozdzielczość pomiaru wilgotności: 0,08% w zakresie od 0 do 50%,
 - o rozdzielczość pomiaru temperatury: 0,1°C,
 - o wymiary: 10 x 3,2 cm,

Wszystkie czujniki zainstalowane w punktach „P” umożliwiają prowadzenie równoległych pomiarów temperatury, dzięki czemu możliwe jest wprowadzenie korekcy termicznej do uzyskiwanych wyników pomiarów oraz globalną ocenę pracy warstw podbudowy obciążonych oddziaływaniem temperatury

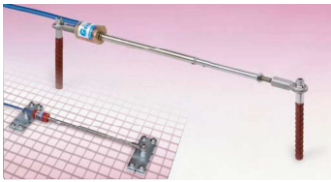


- Deszczomierz korytkowy;
(Aster TPG-124-H24):
 - o Mechanizm pomiarowy: korytkowy, przelewowy,
 - o Powierzchnia pomiarowa: 200 cm²,
 - o Rozdzielczość pomiaru opadu: 0,1 mm,
 - o Dokładność: $\pm 0,1$ mm dla opadu < 5 mm przy intensywności 10 mm/h,
 - o Czujnik przelewu: kontaktronowy,
 - o Zakres pomiarowy: nieograniczony,
 - o Zakres temperatur pracy: -30 do +60°C.

W tab. 1 przedstawiono zestawienie ilościowe i krótką charakterystykę czujników pomiarowych przedmiotowego systemu monitorowania.



Rys. 5. Widok punktu pomiarowego po instalacji przed położeniem płyty

Tabela 1. Zestawienie urządzeń pomiarowych systemu monitorowania

Lp.	Opis czujnika	Funkcja	Wygląd czujnika	Liczba czujników
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
1	Czujniki strunowe – Geokon model 4420	Pomiar zmian grubości warstwy gruntowej oraz temperatury		3 szt.
2	Sondy cyfrowe – Decagon 5TM	Pomiar zmian wilgotności gruntu oraz temperatury		3 szt.
3	Deszczomierz korytkowy Aster TPG-124-H24	Pomiar wielkości opadów		1 szt.



Rys. 6. Widok deszczomierza przymocowanego do słupa po instalacji



Rys. 7. Widok rejestratora danych przymocowanego do słupa po instalacji

3. Zarządzanie danymi pomiarowymi

a. Pomiary strunowymi czujnikami przemieszczeń

Zasada działania czujników strunowych opiera się na pomiarze zmian częstotliwości drgań własnych struny wewnątrz korpusu czujnika, związanych z jej wydłużeniem bądź skróceniem pod wpływem oddziaływań mechanicznych i/lub termicznych. Zmierzona zmiana jest przeliczana na odpowiednią wielkość inżynierską, w tym przypadku na zmianę grubości warstwy podbudowy nawierzchni szynowej, wyrażoną w [mm]. Integralnie wbudowany termistor pozwala na równoległe pomiary temperatury, które są podstawą do właściwego skompensowania wpływów termicznych na pracę czujnika. Aby wyznaczyć wartość zmiany grubości warstwy konieczne jest wykonanie obliczeń kalibracyjnych. W przedmiotowym systemie skorzystano z kalibracji liniowej z indywidualnymi współczynnikami dla każdego czujnika.

b. Pomiar zerowy dla czujników strunowych i konwencja znakowania

Czujniki realizują pomiary zmian wartości określonych wielkości fizycznych względem wartości zerowej (początkowej, referencyjnej), zarejestrowanej w dowolnie zdefiniowanej chwili czasowej. Do poprawnej analizy i interpretacji danych pomiarowych konieczne jest zatem jednoznaczne odniesienie bieżących wskazań

czujników zmian grubości warstwy podbudowy do pomiarów zerowych. Przyjętą konwencję znakowania w modelu obliczeniowym przedstawiono w poniższej tab. 2.

Tabela 2. Przyjęta konwencja znakowania wyników pomiarów zmian grubości warstwy gruntowej

L.P.	Model czujnika	Zmiana na (+)	Zmiana na (-)	Jednostka
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
1	Geokon 4420	zwiększenie grubości warstwy gruntowej	zmniejszenie grubości warstwy gruntowej	mm

Pomiar zerowy (referencyjny) dla wszystkich czujników strunowych został przyjęty w dniu **rozpoczęcia monitoringu**.

c. Częstotliwość pomiarów

W przypadku prowadzenia pomiarów wielkości wolnozmiennych, nie ma potrzeby znacznego skracania czasu pomiędzy poszczególnymi pomiarami. W ramach systemu monitorowania pomiary realizowane są co **15 minut**. Taka częstotliwość pomiaru (4 razy na godzinę) pozwala na obserwację wpływów dobowych zmian temperatury na mierzone wielkości fizyczne.

d. Pomiary czujnikiem wilgotności i temperatury

Sonda Decagon 5TM wykorzystuje pole elektromagnetyczne do pomiaru przenikalności dielektrycznej ϵ_a otaczającego czujnik gruntu, na podstawie której wyznaczana jest jego wilgotność. Obliczenia na platformie pomiarowej SHM Monitor wykonywane są zgodnie z równaniem zalecanym przez producenta urządzenia oraz znanym z literatury, dzięki któremu spełniona zostaje założona dokładność pomiaru. Wilgotność gruntu (VWC [%]) wyznaczana jest na podstawie poniższej formuły, stosowanej najczęściej do różnego rodzaju gruntów mineralnych:

$$VWC = 4.3 * 10^{-6} \epsilon_a^3 - 5.5 * 10^{-4} \epsilon_a^2 + 2.92 * 10^{-2} \epsilon_a - 5.3 * 10^{-2} \quad (1)$$

Do pomiaru temperatury wykorzystywany jest termistor przymocowany do powierzchni czujnika, który podaje wartości temperatury bezpośrednio w stopniach Celsjusza.

e. Pomiary deszczomierzem

Deszczomierz służy do mierzenia i rejestrowania ciekłych oraz stałych opadów atmosferycznych. Zespół grzewczy umożliwia jego ciągłą pracę przez cały rok i nie ma wpływu na otrzymywane wyniki. Obudowa, wykonana z laminatu poliestrowo-szklanego, składa się z trzech elementów: pokrywy, obudowy bocznej i pod-

stawy. Wewnątrz obudowy znajduje się korytkowy mechanizm pomiarowy z magnetycznym czujnikiem kontaktronowym, zespołem termostatu oraz grzejnikiem. Całość osadzona jest na stalowym wsporniku (rys. 8).

Opad zbierany jest przez kolektor zbiorczy, który stanowi podstawową część pokrywy. Unikalny kształt leja i pierścienia zbiorczego powoduje łatwe ściekanie nawet małych ilości opadu i zapobiega wywiewaniu mgły deszczowej. System podgrzewania gwarantuje również pomiar opadu stałego (śniegu) przy ujemnych temperaturach.

Z kolektora opad trafia do głównego mechanizmu pomiarowego: poprzez lejek do dwukomorowego korytka wahliwie ułożyskowanego, który może przyjmować dwa stabilne stany. Zmiana położenia korytka następuje po wypełnieniu komory wodą o objętości 2 [cm³]. Regulacja mechanizmu odbywa się za pomocą odpowiednich śrub i polega na zmianie położenia punktów podparcia korytka w obu położeniach spoczynkowych. Magnes trwały zamocowany do korytka, przemieszczając się obok magnetycznego czujnika kontaktronowego wywołuje w obwodzie elektrycznym impuls zwarciowy odpowiadający opadowi o wartości 0,1 [mm].



Rys. 8. Budowa deszczomierza: pokrywa (po lewej) oraz mechanizm pomiarowy (po prawej)

Interpretacja pomiaru

Czujnik generuje impulsowe sygnały elektryczne (odczytana wartość „n”), w liczbie proporcjonalnej do ilości opadu: jeden impuls co każde 0,1 [mm] opadu. Jego wartość należy zatem obliczyć ze wzoru:

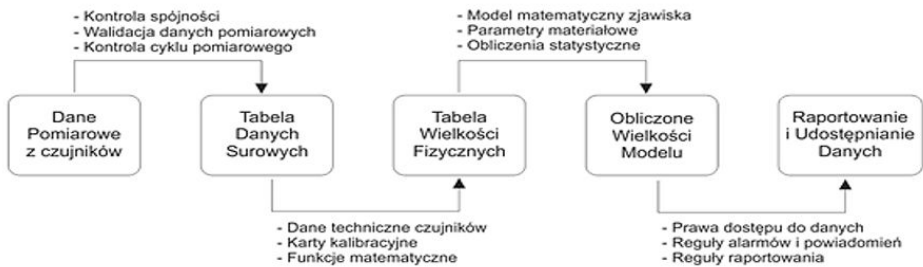
$$\text{Opad} = n \cdot 0,1 \text{ [mm} \equiv \text{l/m}^2\text{]} \quad (2)$$

Należy zwrócić uwagę, że w tym przypadku jednostką równoważną dla [mm] jest litr na metr kwadratowy [litr/m²].

f. Platforma pomiarowa SHM Monitor

Dane pomiarowe z czujników obsługiwane są poprzez platformę pomiarową **SHM Monitor**. Jest to specjalistyczne oprogramowanie przeznaczone do zbierania, przetwarzania i udostępniania danych pomiarowych oraz zarządzania systemami pomiarowymi.

Dane pomiarowe uzyskiwane bezpośrednio z czujników (tzw. dane surowe) przeliczane są na odpowiednie wielkości inżynierskie przy pomocy wzorów kalibracyjnych. Istnieje możliwość dowolnego rozbudowania modelu obliczeniowego w oparciu o dane surowe wg poniższego schematu (rys. 9).



Rys. 9. Schemat procesu przetwarzania danych pomiarowych na platformie SHM Monitor

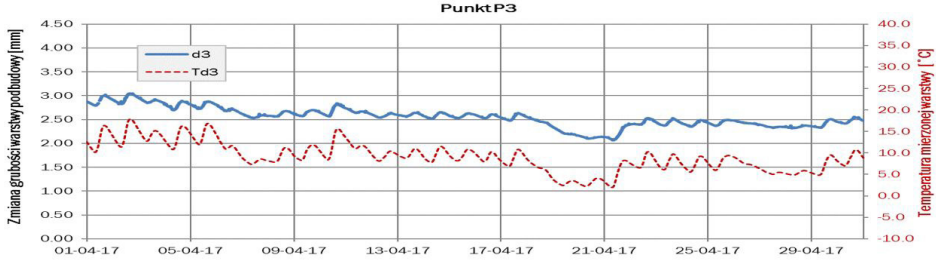
Platforma Pomiarowa **SHM Monitor** realizuje obliczenia oraz przechowuje wszystkie dane związane z tym procesem. Przechowywane i udostępniane są zarówno dane pomiarowe jak i wszystkie informacje wykorzystywane do ich przetwarzania:

- [1] **Dane surowe** – dane przesyłane bezpośrednio przez urządzenia pomiarowe (czujniki). Dane te nie są poddane żadnym operacjom matematycznym.
- [2] **Wielkości fizyczne** – dane uzyskane w wyniku przeliczania danych surowych wg wzorów i kart kalibracyjnych, charakterystycznych dla poszczególnych czujników. W wyniku tej operacji dane reprezentują konkretne wielkości fizyczne tj.: przemieszczenia (zmiana grubości warstwy podbudowy), temperaturę, wilgotność, wielkość opadu.

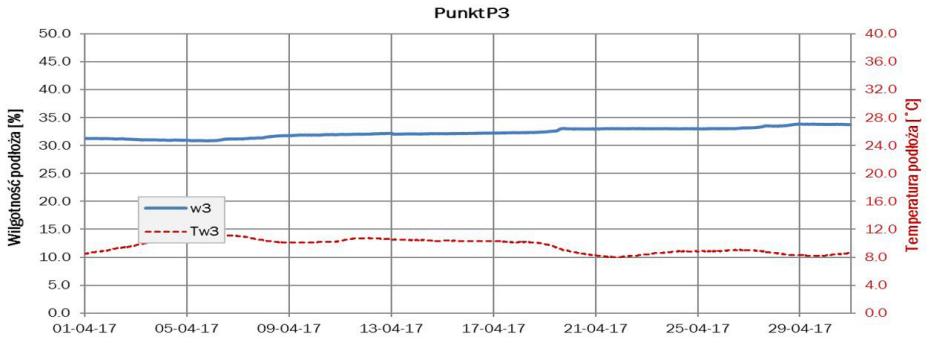
W dalszej części publikacji przedstawiono przykładowe wykresy wielkości fizycznych dla typowego punktu pomiarowego oraz deszczomierza, podane w odpowiednich jednostkach inżynierskich, zarejestrowane w bieżącym miesiącu oraz od początku użytkowania systemu (rys. 10, 11, 12, 13, 14, 15).

Prezentacja danych pomiarowych

Wykresy z bieżącego miesiąca

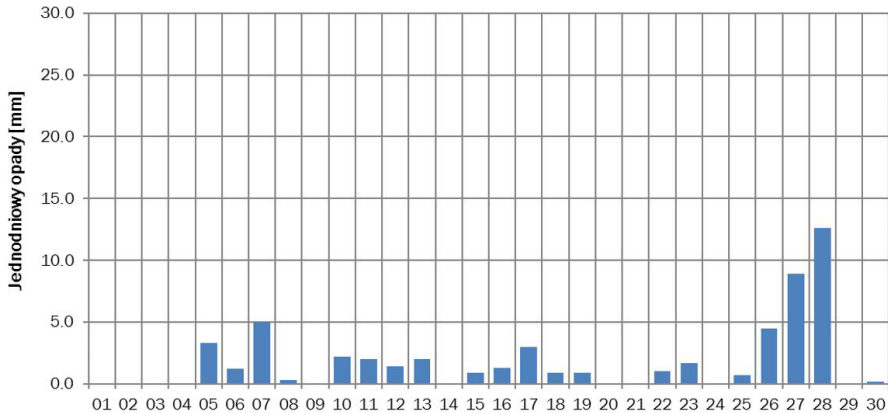


Rys. 10. Punkt P3: zmiana grubości warstwy na długości bazy pomiarowej (1 m) oraz temperatura mierzonej warstwy w bieżącym miesiącu



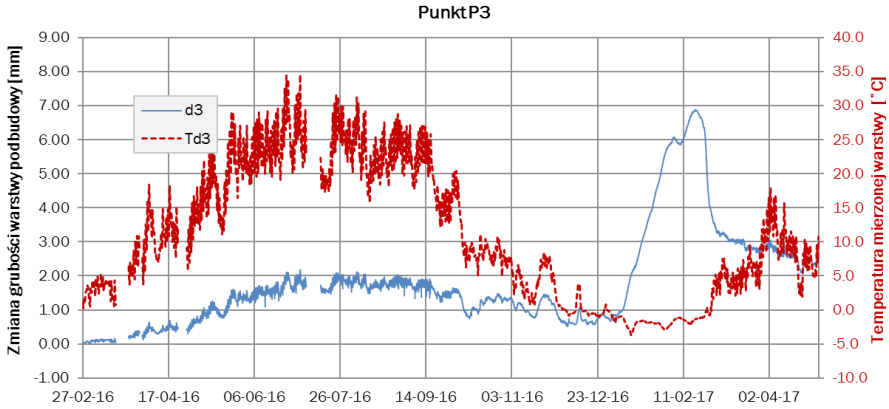
Rys. 11. Punkt P3: wilgotność i temperatura podłoża w bieżącym miesiącu

Deszczomierz- opady jednodniowe: 01 - 30.04.2017

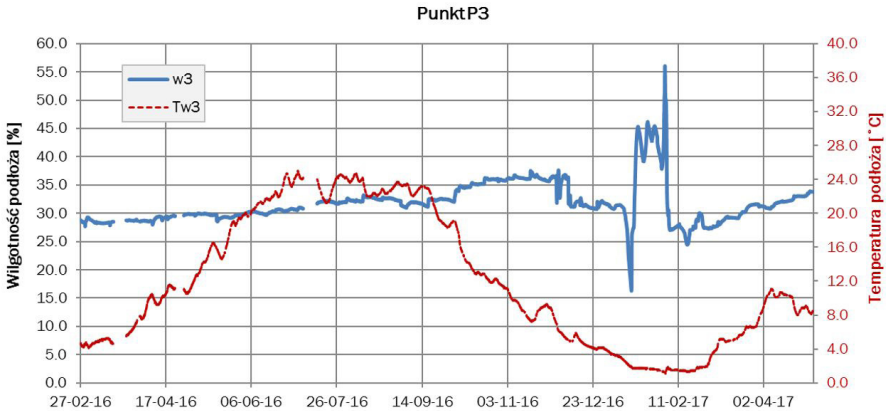


Rys. 12. Deszczomierz: opady jednodniowe w bieżącym miesiącu

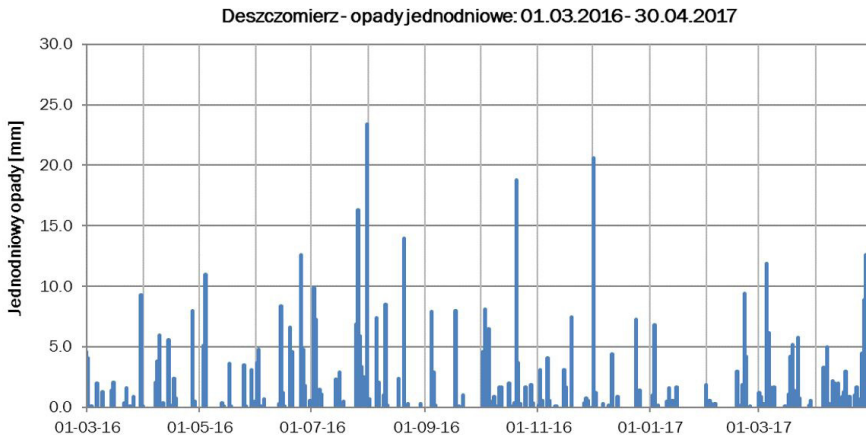
Wykresy od początku użytkowania systemu



Rys. 13. Punkt P3: zmiana grubości warstwy na długości bazy pomiarowej (1 m) oraz temperatura mierzonej warstwy od początku użytkowania systemu



Rys. 14. Punkt P3: wilgotność i temperatura podłoża od początku użytkowania systemu



Rys. 15. Deszczomierz: opady jednodniowe od początku użytkowania systemu

4. Podsumowanie

Analiza danych pomiarowych uzyskanych z przedmiotowego systemu monitorowania pozwala stwierdzić, że:

- Zastosowany system monitoringu umożliwia bezobsługowe, ciągle pozyskiwanie wielu danych pomiarowych, nie tylko podłoża, ale również nawierzchni, co w przypadkach spornych stanowi istotny argument merytorycznej oceny pracy nawierzchni lub przejazdu.
- Monitorowane wielkości fizyczne, zwłaszcza grubość warstw łupka, która jest zmienna i zależy w dużym stopniu od temperatury (w cyklu dobowym jak i rocznym) oraz wilgotności warstwy - nie pozwala uznać tego materiału za ekwiwalentny w stosunku do kruszywa kolejowego.
- W monitorowanych punktach pomiarowych nawierzchni i przejazdu (P1-P3) nie zarejestrowano, w stosunku do wybranego miesiąca (marca br.) zmian grubości tych warstw; przyrosty te wynoszą odpowiednio ~ 4 mm w pkt. P1, 2,5 mm w pkt. P2 oraz 3 mm w pkt P3, co było związane z zanikiem niskich temperatur okresu zimowego i przemarzaniem górnych warstw nawierzchni oraz wypiętrzeniem w obrębie łupka przywęglowego; wykazuje on wyraźne cechy materiału wysadzinowego.
- 'Klawiszowanie' płyt nawierzchniowych, będące następstwem wysadzin, doprowadziło do braku ciągłości podparcia szyn oraz ich pęknięć na styku betonowych płyt przejazdowych; naprawa tych uszkodzeń okazała się dość kłopotliwa z uwagi na brak dostępu do tych miejsc (szyna zagłębiona w płycie).
- Pomiaru umożliwiają lokalizację miejsc trwałych (nie-sprężystych) deformacji nawierzchni, mających wpływ na trwałość i niezawodność jej eksploatacji.
- Czujniki wilgotności zarejestrowały zmiany wskazujące na jej wzrost w pkt P2 z 5% do $\sim 10\%$ (m-c III i IV) oraz po chwilowej redukcji ponowny wzrost do $\sim 35\%$ w pkt. P3, wilgotność podłoża w pkt. P1 jest stała i wynosi 10%,
- Konieczna jest weryfikacja wilgotności w pkt. 3 metodą geotechniczną.
- Pomiaru będą kontynuowane z uwagi na niekorzystne, trwałe zmiany parametrów rejestrowanych w podłożu konstrukcji monolitycznej nawierzchni.

Bibliografia

- [1] Skarżyńska K., Odpady powęglowe i ich zastosowanie w inżynierii lądowej i wodnej, Kraków 1997.
- [2] Zawisza E., Odpady hutnicze jako antropogeniczne grunty budowlane. Metody badań i właściwości geotechniczne, Kraków 2012.
- [3] Skrzyński E., Nowe wymagania dla podsypki kolejowej. Problemy Kolejnictwa, 2007, z.145.