

Politechnika Opolska
Wydział Elektrotechniki Automatyki i Informatyki

Rozprawa doktorska

Analiza parametrów pracy pomp w systemach kanalizacji ścieków

mgr inż. Norbert Adamkiewicz

Promotor: prof. dr hab. inż. Dariusz Zmarzły

Opole 2021

<u>Spis treści</u>	<u>str.</u>
Abstract.....	4
1. Wprowadzenie.....	5
2. Cel i zakres pracy.....	6
3. Problematyka zagadnienia.....	7
3.1. Rodzaje systemów kanalizacji.....	7
3.2. Metody pompowania ścieków w systemach kanalizacji.....	8
3.3. Pompy w transporcie i oczyszczaniu ścieków.....	12
3.4. Przyczyny strat energii w pompowniach ścieków.....	12
3.5. Przegląd doniesień literaturowych.....	13
4. Obiekt badań i budowa układu pomiarowego.....	21
4.1. Pompownia ścieków.....	21
4.2. Budowa układu pomiarowego.....	24
5. Wyniki pomiarów i analiz parametrów pracy pomp w pompowni ścieków.....	28
5.1. Analiza czasów pracy pomp P1 i P2.....	28
5.2. Analizy wartości prądów pobieranych przez pompy P1 i P2.....	42
5.3. Analiza poziomu ścieków w zbiorniku.....	51
5.4. Analiza korelacyjna. Badania współzależności między parametrami pracy pompowni.....	57
6. Modelowanie rozkładów gęstości prawdopodobieństwa.....	62
7. Koncepcja systemu diagnostyki pompowni ścieków.....	66
8. Analiza przypadków awaryjnych w wybranych lokalizacjach.....	69
8.1. Case study: Lokalizacja nr 1, maj 2019.....	69
8.2. Case study: Lokalizacja nr 2, styczeń 2020.....	70
8.3. Case study: Lokalizacja nr 3, styczeń 2020.....	71
8.4. Case study: Lokalizacja nr 7, maj 2019.....	72
8.5. Case study: Lokalizacja nr 16, lipiec 2019.....	74
8.6. Case study: Lokalizacja nr 24, kwiecień 2020.....	75
8. Podsumowanie.....	76
Literatura.....	78
Spis załączników.....	84
Załącznik 1 Zdjęcia ekranów systemu SCADA z rozpatrywanej pompowni ścieków.....	85
Załącznik 2 Przebiegi czasowe czasów pracy pomp P1 i P1 rejestrowanych w kolejnych lokalizacjach.....	90
Załącznik 3 Przebiegi czasowe wartości prądu pobieranego przez pompy P1 i P2 w kolejnych lokalizacjach.....	106
Załącznik 4 Przebiegi czasowe poziomu ścieków w zbiorniku rejestrowane kolejnych lokalizacjach.....	122
Załącznik 5 Wyniki modelowania parametrów C1 i C2.....	130

Abstract

The subject of the thesis concerns diagnostics of pumps working in sewage pumping stations. The main objective of the conducted research was to develop a new method for diagnostics of pumping stations using results of analysis of changes in selected parameters, including pump operation time, level of sewage in the tank and current consumed by two pumps. The operation of the method is based on the continuous determination of the probability density distribution function and verification whether the current measurement value is within the probability limits associated with the correct operation or not.

The investigation used measurement data acquired from 79 pumping stations, which are components of the sewage system, during the period from May 2019 to May 2020. The dissertation presents the construction of the measurement system and the results of the analysis of parameters that can be used to make a diagnostic decision regarding the correctness of the operation of pumps operating in the sewage pumping station. In particular, the dissertation includes the results of temporal, statistical analyses and probability density distributions, for which compliance with Cauchy, Gauss, Weibull and Galton distributions was determined. In addition, correlation analysis and ANOVA analysis of variance were performed.

Based on the analyses, the concept of the diagnostic system was developed. The dissertation presents its scheme and the results of positive verification performed using selected emergency cases, the so-called "case study".

1. Wprowadzenie

Tematyka rozprawy dotyczy diagnostyki pomp pracujących w systemach kanalizacji ściekowej. Pompownia ścieków stanowi element systemu kanalizacyjnego, który bezpośrednio wpływa na jego sprawność. Prawidłowe funkcjonowanie całego systemu odprowadzania ścieków wymaga aby nieprzerwanie monitorować jego elementy składowe pod kątem prawidłowości działania. Wczesne wykrycie i identyfikacja błędów są istotne dla bezpieczeństwa całego systemu, ponieważ pozwalają uniknąć zniszczenia poszczególnych elementów systemu lub pogorszenia jego wydajności. Istotne jest aby na zaistniałe nieprawidłowości reagować jak najszybciej. Typowe problemy eksploatacyjne pompowni ścieków dzielą się na:

- awarie, do których zalicza się zdarzenia nagłe, nieodwracalne w krótkim czasie, skutkujące przerwą w działaniu urządzenia,
- anomalie to zdarzenia nie skutkujące przerwą w pracy urządzenia, utrudniają jednak eksploatację danej obiektu.

Awarie pomp mogą powodować przekroczenia zadanych parametrów pracy systemu, które mogą doprowadzić do niekontrolowanych przelewów lub podtapiania obiektów podłączonych do kanalizacji. Dzielimy je na dwa rodzaje: mechaniczne i elektryczne.

Wśród awarii mechanicznych wyróżnia się w szczególności uszkodzenia korpusu pompy, wirników, uszkodzenie przewodu tłocznego lub jego rozszczelnienie, całkowite zatkanie kanału lub wycieki. Do typowych awarii elektrycznych zalicza się uszkodzenia silnika, elementów sterujących, kabli i przewodów, akumulatorów lub elementów przełączających, utratę kalibracji lub awaria sondy poziomu [1]–[3].

Anomalie również można podzielić na mechaniczne i elektryczne. Do anomalii mechanicznych zalicza się zbyt duży niekontrolowany napływ ścieków spowodowany opadami, powódź, nielegalne dopływy z niewiadomych źródeł, niskie napływy w czasie suszy, zatory na kanałach doprowadzających, uszkodzenia oraz zanieczyszczenie pływaka lub sondy. Natomiast typowe anomalie elektryczne to krótkotrwała utrata komunikacji w systemie pomiarowym zainstalowanym w pompowniach i poszczególnych elementach układu sterowania lub nieprawidłowe zadziałanie zabezpieczenia termicznego [4]–[6].

Pompy są dzisiaj szeroko stosowane w przemyśle i stanowią ok. 20 % zużycia energii elektrycznej [7]. Zastosowanie regulacji polegającej na optymalizacji prędkości przepływu jest często stosowaną metodą poprawiającą wydajność pomp odśrodkowych.

Układ sieci kanalizacyjnej na obszarze o mało zróżnicowanej rzeźbie terenu charakteryzuje się dużą ilością pompowni, co powoduje wzrost prawdopodobieństwa wystąpienia problemów technicznych i zwiększa tym samym koszty operacyjne. Autorzy pracy [8] wskazują, że w Słowacji pompowanie ścieków odbywa się głównie na zasadzie włącz/wyłącz, co oznacza, że pompa albo nie działa albo działa na pełnej mocy. W praktyce spotyka się również stosowanie pomp o zbyt dużej mocy. Te i inne zjawiska prowadzą do zwiększenia poboru energii pomp. Stosowana przez autorów optymalizacja opiera się na modelu matematycznym FGP (funkcja gęstości prawdopodobieństwa).

Obecnie do celów diagnostycznych stosuje się systemy SCADA, które mają pozytywny wpływ na działanie, konserwację i oszczędności w branży ściekowej [9]. Ich implementacja w systemach kanalizacji umożliwia diagnostykę m.in. pompowni. Do detekcji nieprawidłowości

w działaniu pomp różnego typu najczęściej stosowane są metody analizy falkowej, algorytmy sztucznych sieci neuronowych i modele rozmyte. W literaturze naukowo-technicznej dostępnych jest wiele publikacji traktujących o rozwijanych nowych metodach, które w sposób bardziej szczegółowy opisano w rozdz. 3.2.

2. Cel i zakres pracy

Badania przedstawione w pracy mają na celu rozwój metod diagnostycznych w pompowniach ścieków. Celem pracy jest zbadanie możliwości i opracowanie nowej metody diagnostyki pompowni na podstawie analizy zmian wybranych parametrów, w tym czasu pracy pompy, poziomu ścieków w zbiorniku oraz prądu pobieranego przez pompy.

W ramach pracy zaproponowano nową metodę polegającą na permanentnym wyznaczaniu rozkładu gęstości prawdopodobieństwa, estymacji parametrów wcześniej dobranego modelu oraz weryfikacji czy bieżąca wartość pomiarowa mieści się w granicach prawdopodobieństwa powiązanego z działaniem prawidłowym czy też nie.

Teza pracy jest następująca:

Możliwe jest wykorzystanie rozkładu gęstości prawdopodobieństwa parametrów pracy pompy do skutecznej jej diagnostyki podczas pracy w systemach kanalizacyjnych.

Aby osiągnąć powyżej postawione cele wykonano następujące zadania:

- uzyskanie dostępu do danych pomiarowych: opracowanie procedur do komunikacji z układem sterowania, połączenie z bazą danych, konwersja danych cyfrowych na potrzeby analizy off-line,
- podział danych na wektory zawierające wartości pomiarowe z okresów: roczny, miesięczny, tygodniowy, dzienny, godzinny,
- interpolacja danych pomiarowych celem uzyskania spójnych wektorów jednoczynnikowych na potrzeby analiz,
- wykonanie analizy przebiegów czasowych oraz analizy statystycznej,
- określenie i wykonanie analizy empirycznych rozkładów gęstości prawdopodobieństwa,
- wykonanie jednoczynnikowej analizy wariancji z wykorzystaniem metody ANOVA,
- wykonanie analizy korelacji, celem zbadania współzależności liniowych między poszczególnymi parametrami pracy pompowni,
- wykonanie procesu regresji mającego na celu dobór modelu matematycznego opisującego rozkłady roczne czasów pracy pompy P1 i P2,
- zaproponowanie metody diagnostyki pracy pomp w pompowni,
- wykonanie analizy wybranych przypadków awaryjnych oraz weryfikacja za ich pomocą zaproponowanego systemu diagnostycznego.

3. Problematyka zagadnienia

3.1. Rodzaje systemów kanalizacji

Tematyka podjęta w niniejszej rozprawie dotyczy diagnostyki pomp pracujących w systemach kanalizacyjnych. Sieć kanalizacyjna zdefiniowana jest jako układ przewodów kanalizacyjnych wraz z uzbrojeniem i urządzeniami, służący do odprowadzania ścieków z miejsc ich powstawania do oczyszczalni ścieków lub do miejsc, skąd są odprowadzane do odbiornika np. wód powierzchniowych.

Domowe i przemysłowe ścieki odprowadzane są do oczyszczalni za pomocą rozgałęzionej sieci kanalizacyjnej, gdzie następnie są oczyszczane mechanicznie i biologicznie. Oczyszczanie ścieków stosuje się aby kontrolować zanieczyszczenie wód przed wprowadzeniem ścieków do naturalnych zbiorników wodnych - rzek, jezior, mórz i oceanów.

Wyróżniamy następujące dwa główne rodzaje kanalizacji:

- *kanalizacja sanitarna* - stosowana jest do zbierania ścieków bytowo-gospodarczych za wyjątkiem wód opadowych i gruntowych,
- *kanalizacja deszczowa* - nazywana również burzową, stosowana jest do zbierania wód opadowych.

Dodatkowo systemy kanalizacji można podzielić na grupy pod kątem łącznego bądź rozdzielnego odprowadzania ścieków:

- *kanalizacja ogólnospławna* - zbiera do wspólnego zbiornika zarówno ścieki bytowe jak i deszczowe. Proporcje ścieków bytowo-gospodarczych (BG) do opadowych (O) wynoszą: $Q_{BG} : Q_O = 1:20 - 1:100$ i zależą od wielkości miejscowości.
- *kanalizacja rozdzielcza* - występują w niej dwie niezależne i oddzielne sieci rurociągów, jedna dla ścieków bytowo-gospodarczych, druga dla wód opadowych. Zaletą tego systemu jest to, że ścieki opadowe kierowane są bezpośrednio do rzeki lub innego zbiornika naturalnego, w związku z czym nie stanowią obciążenia dla oczyszczalni ścieków. Kanały dla wód opadowych posiadają mniejsze rozmiary, a pompy w nich stosowane odpowiednio niższą moc. Ścieki pochodzące z ulic i chodników zawierające zawiesinę i substancje ropopochodne, przed wprowadzeniem do odbiorników są oczyszczane w osadnikach i separatorach substancji ropopochodnych.
- *kanalizacja pół-rozdzielcza* - występują w niej dwa systemy rurociągów, które są połączone w określonych lokalizacjach za pomocą separatorów. W separatorze umiejscowione są dwa kanały odprowadzające wody opadowe: jeden połączony z systemem kanalizacji sanitarnej, drugi połączony z kanalizacją deszczową. Pierwsze i zarazem najbardziej zanieczyszczone wody opadowe kierowane są do oczyszczalni ścieków, natomiast podczas ulewnych deszczów, gdy przepływ gwałtownie rośnie, woda opadowa wpada do kanału kierującego ją bezpośrednio do ujęć naturalnych, np. do rzeki.

Natomiast, zgodnie z europejską normą PN-EN 12056 systemy kanalizacyjne dzieli się w zależności od stopnia napełnienia przewodów kanalizacyjnych na:

- system I i II - są to systemy z pojedynczym pionem kanalizacyjnym, do którego przybory sanitarne podłączone są w sposób zbiorczy,
- system III - są to systemy z pojedynczym pionem kanalizacyjnym, do którego poszczególne przybory są podłączone niezależnie,

- system IV - jest to układ z osobnymi pionami kanalizacyjnymi dla tzw. ścieków czarnych (miska ustępowa, pisuar) i tzw. ścieków szarych (pozostałe przybory).

W krajach europejskich, w tym również w Polsce, najczęściej stosowanym systemem jest system I. W sytuacjach gdzie niezbędne są długie i rozległe podejścia pod przybory, stosowany jest również system II.

Systemy kanalizacji dzieli się również ze względu na budowę i zasadę działania na systemy [11]:

- grawitacyjne,
- podciśnieniowe,
- ciśnieniowe.

W kanalizacjach podciśnieniowych wszystkie przybory podłączone są do sieci przewodów podciśnieniowych. Podciśnienie wytwarzane jest przez stację próżniową umiejscowioną pod ziemią, która pracuje w sposób ciągły. W przydomowych studzienkach zamontowane są zawory opróżniające, które otwierają się gdy studzienka się zapełni, a zamykają po wysaniu wszystkich ścieków.

Zasada działania kanalizacji ciśnieniowej opiera się o transport ścieków pod ciśnieniem na wyższy poziom, do kanalizacji grawitacyjnej. Dodatkowymi elementami tego systemu są pompy ciśnieniowe i tzw. maceratory, które służą do rozdrabniania części stałych.

Rozróżnia się: 1) instalacje działania pośredniego, gdzie ścieki z przyborów spływają grawitacyjnie do zbiornika usytuowanego przy budynku, skąd pompowane są do kolektora kanalizacji sanitarnej; oraz 2) instalacje działania bezpośredniego, w których pompa znajduje się bezpośrednio w konstrukcji przyboru, a ścieki odprowadzane są po załączeniu urządzenia.

Do zalet systemu kanalizacji ciśnieniowej można zaliczyć:

- zmniejszenie przekrojów przewodów tłocznych, współpracujących z pompą w stosunku do kanałów grawitacyjnych,
- obniżenie kosztów robót ziemnych (przewody są posadowione na wyższych rzędnych),
- stosunkowo szybki transport ścieków do oczyszczalni ogranicza proces zagniwania ścieków w przewodach kanalizacyjnych.

Podstawowe wady tego typu systemu stanowią konieczność ciągłego dostarczania energii elektrycznej oraz możliwość wystąpienia anomalii i awarii związanych z działaniem pomp [12], [13].

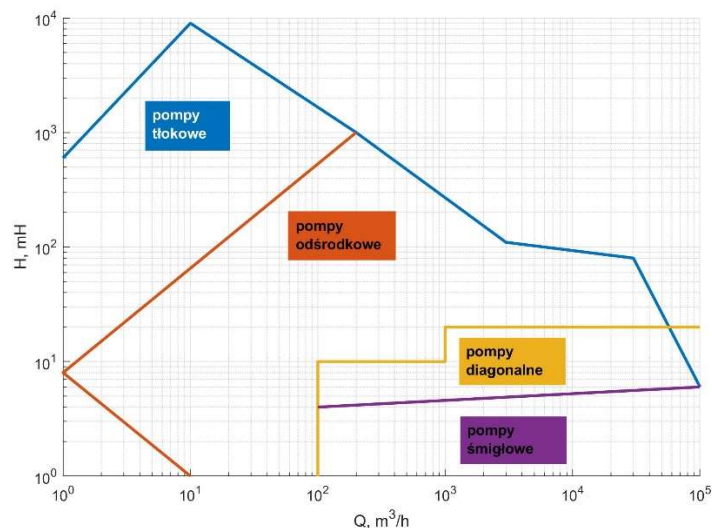
3.2. Metody pompowania ścieków w systemach kanalizacji

Do pompowania ścieków w systemach kanalizacji stosowane są pompy, których zadaniem jest wytworzenie różnicy ciśnień między stroną ssawną (wlotem do pompy) a tłoczną (wylotem z pompy), dzięki czemu możliwy jest transport cieczy lub osadów. Celem działania pompy jest sprężenie transportowanej cieczy poprzez przekazanie siły mechanicznej wytworzonej przez wirnik, tłok lub membranę pompy [14]. W niektórych instalacjach pompa powinna dodatkowo umożliwić cieczy pokonanie różnicy rzędnych terenu.

Podstawowymi parametrami charakteryzującymi pompy są:

- wydajność Q [l/s],
- wysokość podnoszenia (lub ciśnienie maksymalne) H [Pa] lub [m],
- moc $N=H*Q$.

Wartości parametrów pompy zależą m.in. od rodzaju i wielkości instalacji oraz warunków terenowych, dlatego każdorazowo dobiera się pompy o pożądanej wydajności Q i wysokości podnoszenia H aby efektywnie transportować ścieki i osady. Zastosowanie pomp obecnie dzieli się pod kątem przedziałów parametrów ich pracy H oraz Q , jak zobrazowano na rys. 3.1. Optymalne wartości parametrów pracy pompy czyli wydajność, wysokość podnoszenia i sprawność zależne są od wymogów eksploatacyjnych panujących w rzeczywistych warunkach jej pracy, w tym od specyfiki transportowanej cieczy.

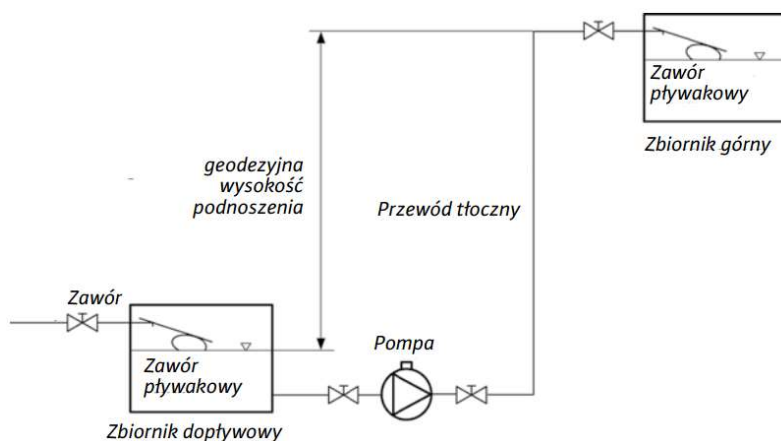


Rys. 3.1 Obszar stosowania pomp. Źródło: opracowanie własne na podstawie [14].

Pod kątem zastosowania i funkcji pompy dzieli się na:

- instalacje tłoczne,
- pompy zatapialne (cały agregat, pompa i silnik, są umieszczone bezpośrednio w cieczy),
- pompy instalowane w suchej części pompowni ścieków zainstalowane przy zbiorniku z cieczą,
- stacje pompowe w studzienkach (wyposażone w urządzenia rozdrabniające lub nie),
- pompy odwadniające,
- pompy mieszające.

Każdy system pompowy zawiera pompy, instalację rurową wraz z armaturą zaporowo – odcinającą oraz szafę sterowniczą. Na rys. 3.2 przedstawiono ogólny schemat obrazujący składowe elementy systemu pompowego tłoczącego ciecz z niżej położonego zbiornika dopływowego do zbiornika umiejscowionego wyżej. Rolą pompy jest wtłoczenie cieczy na żądaną wysokość. Wartość ciśnienia hydraulicznego na żądanej wysokości pomniejszone jest o straty powodowane przez przepływ cieczy w przewodzie tłocznym. Stąd wartość parametru wysokość podnoszenia H_c uwzględnia nie tylko geometryczną wysokość podnoszenia ale również wysokość strat ciśnienia w przewodzie tłocznym, jak zapisano w równaniu (3.1)



Rys. 3.2 Przykładowy otwarty układ pompowania wody. Instalacja pompowa do tłoczenia wody na wyższy poziom, źródło: [15]

$$H_c = h_g + p + s \quad (3.1)$$

gdzie: H_c - wysokość podnoszenia [m], h_g – geometryczna wysokość położenia [m], p - ciśnienie hydrauliczne [m], s - straty ciśnienia w rurociągach [m].

Na straty ciśnienia s (3.2) składają się straty wywołane tarciem s_t i straty wywołane oporami miejscowymi s_m .

$$s = s_t + s_m \quad (3.2)$$

Straty ciśnienia w przewodach kanalizacyjnych oblicza się zgodnie z normą PN-EN 12056-4:2002 przyjmując wartość lepkości kinematycznej tak jak dla czystej wody o temperaturze $T=10^\circ\text{C}$ przy całkowitym wypełnieniu przekroju poprzecznego rurociągu.

W branży wodno-kanalizacyjnej pompy klasyfikuje się głównie pod kątem rodzaju transportowanej cieczy, w szczególności istotne są jej parametry fizyko-chemiczne jak: gęstość, zawartość oraz wielkość ewentualnych części stałych:

- pompy do wody,
- pompy do ścieków,
- pompy do reagentów chemicznych.

Pompy do ścieków, stosowane w systemach kanalizacji klasyfikuje się pod kątem typu wirnika:

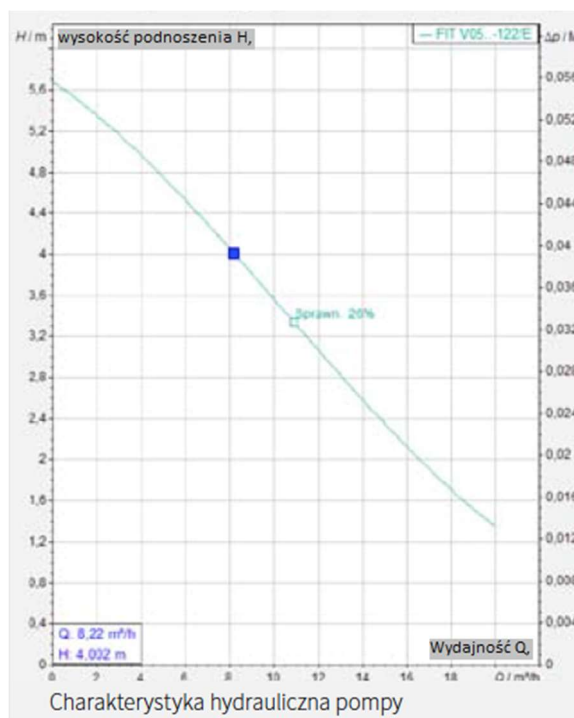
- pompa z rozdrabniaczem - wyposażona w ostry wirnik, który służy do rozcinania zbyt dużych części stałych,
- pompa z wirnikiem otwartym - pozwala na pompowanie ścieków zawierających części stałe o różnym rozmiarze,
- pompa z kanałem zamkniętym - w której zbyt duże elementy cieczy są usuwane za pomocą specjalnych krat lub sit.

Pompy do wody różnią się konstrukcyjnie od pomp do ścieków pod względem, wielkości i wykonania, gdyż zupełnie inna jest specyfika medium.

Ponadto pompy dzieli się ze względu na sposób wytwarzania różnicy ciśnień na [16]:

- pompy wirowe (przepływowe), w których wirnik łopatkowy powoduje zwiększenie momentu pędu przepływającej cieczy poprzez co we wlocie powstaje efekt ssania, a po stronie tłocznej nadwyżka ciśnienia,
- pompy wyporowe (objętościowe), w których za pomocą specjalnego ruchu tłoka, kół zębatych, śruby, membrany, elastycznych ścian pompy lub odpowiednio ukształtowanego przestrzeni uzyskuje się zmianę objętości pompy. Stosowane są gdy potrzebna jest niewielka wydajność lub znaczna wysokość podnoszenia lub cieczy charakteryzuje się wysoką lepkością, gęstością.

Na podstawie parametrów pracy danej pompy producent określa tzw. charakterystykę pracy pompy. Jest ona zależnością między wysokością podnoszenia H , a przepływem Q . Z charakterystyki pracy wynika, że maksymalną wysokość podnoszenia pompa osiąga przy zerowym przepływie, a maksymalny przepływ przy minimalnej wysokości podnoszenia. Na rys. 3.3 przedstawiono przykładową charakterystykę dotyczącą pompy Wilo Rexa Fit V05 DA-122 [15].



Rys. 3.3 Przykładowa charakterystyka hydrauliczna pompy. Źródło: [15].

Obecnie zatapialne pompy ściekowe są produktami zoptymalizowanymi pod kątem konstrukcyjnym, są bardzo wydajne i przeznaczone do długoletniej bezawaryjnej pracy [15]. Aktualnie na rynku istnieje wiele firm produkujących pompy, w szczególności można wymienić producentów pomp wirowych: KSB, Xylem - Flygt, Sarlin, Grundfos. Hydro-Vacuum oraz producentów pomp wyporowych: Seepex, Boerger, Vogelsang, Netsch. Zastosowanie nowoczesnej pompowni powoduje w późniejszym okresie obniżenie kosztów eksploatacyjnych wynikających z użytkowania tego urządzenia (niższe zużycie energii, trwalsza konstrukcja, niższa awaryjność). Ponadto zastosowanie nowoczesnych systemów pompowych umożliwia optymalizację kosztów budowy całej infrastruktury kanalizacyjnej np. poprzez optymalizację zagłębień i spadków systemów grawitacyjnych.

3.3. Pompy w transporcie i oczyszczaniu ścieków

Z uwagi na naturę ścieków, pompy ściekowe są bardziej narażone na zużycie niż ma to miejsce w innych dziedzinach [17]–[19]. Dlatego, pompy stosowane w oczyszczalniach oraz pompowniach ścieków różnią się konstrukcją i metodami instalowania. Częściej stosuje się pompy wirowe (odśrodkowe, diagonalne, śmigłowe i o swobodnym przepływie), natomiast pompy wyporowe (śrubowe, ślimakowe lub perystaltyczne) stosowane są głównie w kanalizacji ciśnieniowej [20], [21]. W oczyszczalni ścieków pracuje zwykle kilkanaście lub kilkadziesiąt różnych pomp, które przystosowane są do transportu cieczy zawierających ciała stałe, na które składają się elementy organiczne i mineralne, oraz różnych gazów, w tym łatwopalnych, które są wydzielone i rozpuszczone w transportowanych ściekach.

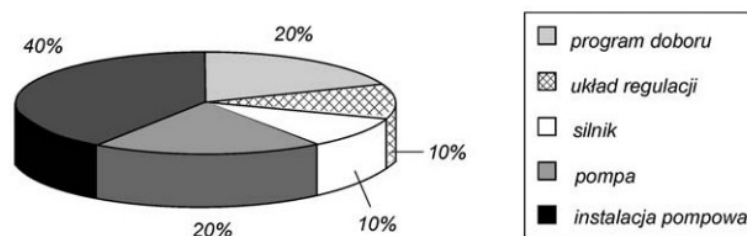
W klasyfikacji pomp wykorzystywanych w procesie technologicznym oczyszczania ścieków uwzględnia się m.in. pompy: ścieków surowych, pulpy piaskowej, odprowadzające tłuszcze, recyrkulacji osadów, osadu surowego (wstępnego), osadu nadmiernego, osadu chemicznego, dozujące, płuczące, ścieków oczyszczonych, osadu zagęszczonego, cyrkulacyjne osadu, osadu do przeróbki.

3.4. Przyczyny strat energii w pompowniach ścieków

Straty energii powstające w systemach pompowych klasyfikuje się na [22]:

- straty nieuniknione, które wynikają z ograniczonej sprawności każdego elementu składowego rzeczywistego procesu fizycznego, która jest mniejsza od 100%,
- straty niepotrzebne, które wynikają z zastosowania niewłaściwych rozwiązań technicznych, obniżających możliwy do uzyskania poziom sprawności.

Strukturę strat przedstawia rys. 3.3.



Rys. 3.3. Struktura strat w transporcie cieczy. Źródło: [22].

Do strat nieuniknionych zalicza się [22]:

- straty hydrauliczne, które występują w pompach o najwyższych sprawnościach,
- straty w silnikach elektrycznych,
- straty w elektronicznych układach regulacji prędkości obrotowej,
- straty wynikające z przepływu cieczy na skutek tarcia.

Natomiast straty, których można uniknąć lub ograniczyć wynikają m.in. z [22]:

- brak optymalnej struktury instalacji pompowej,
- nieodpowiednio dobrany rodzaj pompy pod kątem wysokości podnoszenia H , i/lub wydajności Q ,
- zmiana warunków pracy pompowni,
- niewłaściwy projekt instalacji pod względem hydraulicznym,
- nieracjonalny, nadmiernie energochłonny sposób regulacji wydajności,
- stosowanie przestarzałych, nieefektywnych pomp,

- niewłaściwie dobrane parametry elektryczne zastosowanych silników napędowych,
- błędy w eksploatacji pomp i instalacji pompowych.

Praca pompowni kanalizacyjnych jest ciągła, a jej obciążenie zależne jest od różnych czynników o charakterze stałym lub zmiennym, np. warunki pogodowe (susza, powódź, upał, mróz), pora dnia, pora roku, dzień wolny lub świąteczny, obecność uszkodzeń w systemie rurociągów (wyciek). Konieczne jest aby system diagnostyczny uwzględniał wpływ tych czynników na uzyskiwane wyniki.

Jedną z przyczyn powodujących zmniejszenie wydajności pompowni jest korozja siarczanowa, która stanowi problem głównie z powodu ograniczonych możliwości pomiarowych [23]–[25]. Autorzy pracy [26] stwierdzają konieczność prawidłowego monitorowania, diagnozowania, konserwacji lub wcześniejszej wymiany pomp w celu skrócenia czasu przestojów, kosztów materiału i kosztów robocizny. W artykule omówili główne problemy występujące w pompach odśrodkowych, zwłaszcza w przemyśle wodno-kanalizacyjnym.

Głównymi konsumentami energii w sieciach kanalizacyjnych są pompy ściekowe [19]. W celu zminimalizowania konsumpcji energii należy zapewnić im odpowiednie warunki pracy. Istotnym problemem dla operatorów pompowni ścieków, który często bywa bardzo kosztowny ze względu na możliwość zaprzestania działania pompowni, a w mniej drastycznych przypadkach ograniczając wydajność, jest obecność w ściekach szmat, które zatykają pompy [27], [28]. Na rys. 3.5 przedstawiono zlepek szmat usunięty z pompy.



Rys. 3.5 Typowy zlepek szmat "gałgan" usunięty z pompy. Źródło: strony WWW.

System do detekcji nieprawidłowości działania pomp spowodowanych zatknięciem zaproponowano w pracach [29], [30]. Systemy do monitorowania czynności eksploatacyjnych na sieci kanalizacyjnej przedstawiono np. w pracach [31], [32].

3.5. Przegląd doniesień literaturowych

Tematyka rozpatrywana w pracy jest szeroko badana w kraju i na świecie, co wynika z wieloletniej tradycji stosowania pomp w systemach kanalizacji i nie tylko [24], [33]–[36].

Tematyka związana z dobrem właściwego urządzenia w zależności od panujących warunków rozpatrywana jest m. in. w artykule [37], gdzie omówiono wybrane aspekty doboru pomp do instalacji wodociągowych, kanalizacyjnych oraz stosowanych w ciepłownictwie i ogrzewnictwie. Natomiast Autor pracy [38] przedstawił analizę techniczną dotyczącą problematyki prawidłowego doboru parametrów i wyboru konkretnych pomp do pracy w różnych instalacjach ciepłowniczych. Rolę pomp i kryteria ich doboru do pracy w pompowni, instalacjach wodociągowych i kanalizacyjnych, oczyszczalniach ścieków i ciepłowniach miejskich opisano m.in. w pracy [39], gdzie Autor przedstawia rodzaje strat występujących w

instalacjach pompowych wprowadzając przy tym pojęcie efektywności energetycznej i możliwości jej zwiększenia. Przykład doboru pośredniej pompowni ścieków wraz z podaniem metodologii wykonywania obliczeń dla miejscowości Jemiołów przedstawiono w artykule [40].

Szereg prac naukowych dotyczy zastosowania modelowania matematycznego w tym symulacji komputerowych. W pracy [41] Autorzy przebadali wyniki analiz numerycznych pojedynczej pompy odśrodkowej, typowej dla zastosowań w oczyszczalniach ścieków. Głównym celem było zidentyfikowanie podejścia do modelowania, które byłoby wystarczająco dokładne, a jednocześnie akceptowalne w odniesieniu do kosztów obliczeniowych. Uruchomiono testowy program dostarczający dane do sprawdzania poprawności modeli numerycznych. Oszacowano ogólną wydajność pompy pod względem wysokości ciśnienia, przepływu masy, konsumpcji energii i wydajności pompy. Zbadano pięć kombinacji trzech aproksymacji modelujących (dwu- i trójwymiarowych, $k\epsilon$ i modelu turbulencji naprężenia Reynolds'a, niestabilne i quasi-stabilne) i porównano z wynikami eksperymentalnymi. Rozbieżności w wielkości zużycia energii można uznać za brak uwzględniania strat, takich jak np. wycieki w modelach numerycznych. Analiza jakościowa wyników numerycznych identyfikuje krawędź końcową wirnika jako główne źródło strat mocy, przy czym przepływ w obszarze cięcia wody także w znaczący sposób obniża wydajność końcową.

Praca [42] dotyczy problematyki modelowania, w szczególności celem Autorów było opracowanie modelu do analizy wydajności energii w pompowniach. Realizacja zadania pozwoliła na określenie sekwencji aktywacji pomp, co zminimalizowało koszty energii. Model skalibrowano w pompowni poprzez pomiar parametrów hydraulicznych i elektrycznych dla każdej pompy. Autorzy uzyskali oszczędność kosztów rzędu 16% tylko dzięki zmianie metody regulacji pompowni.

Problematyka redukcji kosztów z wykorzystaniem modelowania matematycznego rozpatrywana jest także w pracy [43], gdzie Autorzy rozważają pompownię zaopatrującą w wodę z uwzględnieniem wszystkich istniejących czynników w celu określenia modelu matematycznego. Redukcję kosztów uzyskaną poprzez dostosowywanie przepływu wody w różnych odstępach czasu. Autorzy wysnuli wniosek, że pompa podczas nieprzerwanej pracy wbrew pozorom jest bardziej wydajna pod względem mocy niż przy pracy przerywanej. Również kąt pochylenia krawędzi wirnika pompy ma wpływ na optymalizację kosztów energii. Metoda programowania dynamicznego może być zastosowana w celu ustawienia kąta krawędzi wirnika aby zoptymalizować wydajność.

Zdaniem autorów pracy [44], których celem było uzyskanie niezawodnej metodologii pomiaru, kluczem do właściwego zarządzania sieciami kanalizacyjnymi jest dokładne zrozumienie obszaru zjawisk związanych z przepływem. Niestety pomiary przepływu w kanalizacji są często drogie, a ograniczenia technologii sprzętowych może prowadzić do niedokładnych wyników. Zastosowanie metody CFD (ang. Computational Fluid Dynamics) zdaniem Autorów może być użytecznym narzędziem do tego aby pomiary były bardziej reprezentatywne. Nowe podejście pomiaru przepływu oparte na oprogramowaniu CFD zostało opracowane w celu przeprowadzenia dokładnych pomiarów wartości przepływu w otwartych kanałach lub rurach nawet w utrudnionych warunkach hydraulicznych. Artykuł prezentuje zastosowanie CFD do obliczenia współczynnika korekcji, który musi być zastosowany do

mierzonej wartości prędkości, tak aby otrzymać średnią prędkość dla różnych czujników akustycznych Dopplera.

Praca [45] dotyczy pompy ciepła z źródłem ściekowym, która daje wymierne korzyści wynikające z oszczędności energii, a tym samym ma pozytywny wpływ na środowisko. Jednym z głównych wyzwań w stosowaniu tego typu pompy jest blokada wymiennika ciepła wywoływana przez zabrudzenia. Nieoczyszczone ścieki miejskie zawierają duże zanieczyszczenia (<4 mm), które są w przeważającej mierze trudne do odfiltrowania przez tradycyjne, mechaniczne urządzenia filtrujące. W artykule tym zaproponowano nowy hydrocyklon ściekowy z funkcją tzw. refluksu w celu usunięcia zanieczyszczeń z ścieków w sposób ciągły, co w rezultacie rozwiązuje problem blokady wymiennika. Wyniki eksperymentów wykazały, że nowa hydrokatoda ściekowa ma efektywną wydajność rozdzielania 99,53-99,94% w przypadku wód piaszczystych, 91-95% w przypadku ścieków o wysokim stężeniu oraz 56-72% w przypadku ścieków o niskiej koncentracji. Wskaźnik podziału pozostał poniżej 10%.

Tematyką wydajności pomp ściekowych zajmuje się praca [46], w której Autorzy przeprowadzili komputerowe symulacje przepływu turbulentnego w wirniku pompy ściekowej. W obliczeniach otrzymano prędkość i dystrybucję ciśnienia przepływu turbulentnego w pompie ściekowej co zdaniem autorów może być pomocne do optymalnego projektowania i przewidywania wydajności pomp ściekowych.

Również Autorzy pracy [47] są zdania, że zrozumienie zachowania niestabilnego przepływu jest konieczne do zaprojektowania pompy o dobrej wydajności i zwiększenia jej niezawodności w procesie projektowania układów hydraulicznych w różnych warunkach. Autorzy ci przedstawiają analizę porównawczą zachowania niestabilności przepływu poprzez rozwiązanie trójwymiarowych niestabilnych równań Reynoldsa i Naviera-Stokesa. Autorzy podają definicję niestabilności w pompie i stosują ją do analizy dystrybucji intensywności niestabilności, a także badają efekt natężenia przepływu na założonym niestabilnym przepływie w pompie jednocześnie analizując mechanizm przepływu. Wyniki CFD były walidowane eksperymentalnie. Wykazano, że efekt znacznego natężenia przepływu na niestabilności uśrednionej czasowo oraz dystrybucja intensywności turbulencji może być zaobserwowana zarówno na stojanie jak i w wirniku. Wyniki badań mogą być użyteczne do zmniejszenia niestabilności przepływu i zwiększenia wydajności pompy pracującej w różnych warunkach.

Autorzy pracy [48] opracowali nowy model dynamiczny dla dokładniejszego przewidywania kosztów pompowania w oczyszczaniu ścieków. Model był kalibrowany przy użyciu dwóch badań: pierwsze dotyczyło pomp odśrodkowych pracujących w miejskiej oczyszczalni w Eindhoven (Holandia), drugie pompy odśrodkowej pracującej w oczyszczalni w Bergara (Hiszpania). Niezbędne było rozwinięcie modelu aby wyznaczyć lepszą krzywą pompy, sprawiając że model był bardziej ogólny. Oba przypadki pokazały zgodność między przewidywaniami modelu i pożądanymi wartościami konsumpcji energii.

Praca [49] dotyczy projektowania pomp do kanalizacji pracujących w ekstremalnych warunkach przy wysokim poborze energii. Zdaniem autorów, w tym celu należy wykonać symulację numeryczną, stworzyć zaawansowany prototyp i zweryfikować eksperymentalnie dane projektowe. Autorzy dokładnie opisali m.in. sposób projektowania geometrii wirnika, symulację numeryczną przepływu, optymalizację i eksperymentalne badanie modelu pompy.

Autor pracy [50] opracował metodologię numeryczną celem przeprowadzenia symulacji przepływu turbulentnego w dwuwymiarowym wirniku pompy odśrodkowej i obliczenia charakterystyk krzywych wydajności dla całej pompy. Domena przepływu była dyskretyzowana przy użyciu siatki kartezyjskiej. Rozwiązywano równania Reynolds'a i Naviera-Stokes'a (RANS) przy użyciu metody kontroli objętości i modelu turbulencji $k\epsilon$. Po oszacowaniu dodatkowych strat hydraulicznych można przewidzieć wydajność pompy jedynie z sekcji wirnika. Autor opracował także algorytm optymalizacji numerycznej oparty na podejściu niewymuszonego gradientu i połączył z oprogramowaniem do ewaluacji w celu znalezienia geometrii wirnika która maksymalizuje wydajność pompy stosując takie zmienne jak kąty krawędzi wirnika.

Tematyką modelowania zajmują się Autorzy pracy [51], gdzie opisują rozwój i zalety stosowania zintegrowanego modelowania kontroli i zarządzania miejskimi systemami ściekowymi, oczyszczalniami ścieków i rzekami opartych na powszechnie akceptowanych podejściach modelowania.

Podstawowe zagadnienia związane z modelowaniem sieci kanalizacyjnej i metody modelowania zarówno odcinków sieci jak i całej sieci podjęli Autorzy pracy [52]. Zadaniem algorytmu dla sieci grawitacyjnej jest określenie wysokości napełnienia ściekami i ustalenie prędkości przepływu przy znanych prognozowanych wartościach ścieków. W pracy tej przyjęto, że segmenty sieci mają stałe parametry hydrauliczne takie jak kształt, wymiar kanału, spadek dna i szorstkość.

W pracy [53] Autorzy zajmują się tematyką efektywnego wykorzystania pompowni do zmniejszenia zanieczyszczenia środowiska. Zaproponowali oni model typu Pattern Search w celu zmierzenia się z nieliniowymi cechami stosowanego modelu przewidywania. Stosowana przez autorów technika jest zaimplementowana w systemie ściekowym w Kolumbii. W artykule przedstawiono rezultaty symulacji ilustrujące zalety takiego podejścia. Stosowanym modelem był MPC (ang. Model Predictive Control). Kontroler MPC używa wewnętrznego modelu układu w celu określenia jego przyszłego zachowania i zastosowania najlepszego rozwiązania tak aby zminimalizować skutki silnych opadów deszczu. Model przewidywania został zbudowany przy użyciu przybornika City Drain blockset w programie Matlab-Simulink.

Metoda optymalizacji kosztów pompowni rozpatrywana jest w pracy [54], gdzie Autorzy zaproponowali metodę zmiennej prędkości pomp. Obecne implementacje tej metody skupiają się głównie na mniejszym poziomie kontroli prędkości, bez rozważań operacyjnych na temat poziomu układu. Autorzy proponują metodę MPC w celu zwiększenia wydajności operacyjnej pompowni, rozważając TOU (ang. time-of-use tariff), zużycie wody i inne ograniczenia. Przewagę metody MPC autorzy potwierdzają wynikami symulacji.

W pracy [55] przedstawiono opracowanie wymiennika ciepła pracującego w oczyszczalniach ścieków, w postaci suchej powłoki z funkcją automatycznego odfiltrowania na zewnątrz rurek. Opierając się na określonych założeniach przedstawiony został stacjonarny i dwuwymiarowy model dla powłoki rury typu suchego parownika ściekowego. W celu potwierdzenia opracowanego algorytmu porównano wyniki symulacji z danymi eksperymentalnymi.

W pracy [56] opisano strategię sterowania harmonogramem dla pomp o zmiennej prędkości obrotowej w pompowni ścieków. W komputerowej symulacji systemu całkowity koszt pompy został zminimalizowany przy jednoczesnym spełnieniu wymaganych hydraulicznych.

Zdolność retencyjna kanalizacji została wykorzystana w celu osiągnięcia płynniejszej pracy pomp przy niższych kosztach.

W pracy [57] przedstawiono wyniki symulacji przepływów turbulentnych w cieczy przepływającej przez pompę odśrodkową do ścieków, wykonaną z wykorzystaniem modelu cząstek i oprogramowania ANSYS-CFX. Zastosowano model podwójnej turbulencji $k\epsilon$ w celu określenia fazy ciekłej i przyjęto algebraiczną nazwę równania zerowego fazy rozproszonej w celu określenia fazy stałej. Badano cząstki stałe w rozkładzie pompy i prędkość poślizgu w celu dalszej analizy zużycia elementów przepływu jak również wpływ pompy na charakterystykę zewnętrzną pompy hydraulicznej. Stwierdzono, że stałe cząstki gromadzą się głównie w pobliżu płynu w formie wiru. Prędkość poślizgu cząstek stałych znacznie zwiększa się po stronie ciśnienia i tylnej stronie zasysania tylnej osłony, co wskazuje, że zużycie ścianki jest większe, dlatego też, grubość należy zwiększyć. Ponadto, cząstki stałego rozmiaru i frakcji stałej objętości mają w różnym stopniu wpływ na charakterystykę pompy hydraulicznej.

W pracy [58] zaproponowano algorytm optymalizacji sterowania rozgałęzioną miejską siecią kanalizacyjną w Moskwie, w celu minimalizacji całkowitego zużycia energii elektrycznej na wszystkich pompowniach sieciowych. Kontrola polega na redystrybucji przepływu ścieków między elementami sieci. Algorytm jest oparty na modelu matematycznym. Model matematyczny składa się z zestawu równań algebraicznych ze strukturami transportowymi ujętymi jako ograniczenia.

W literaturze przedmiotu często omawiana jest tematyka wykrywania nieprawidłowości pracy pomp zainstalowanych w systemach kanalizacyjnych, w tym proponowane są algorytmy wykorzystujące zaawansowane metody obliczeniowe. Przykładowo w artykule [59], przedstawiono inteligentny układ do diagnozy nieprawidłowości pracy pompy tłokowej. Zaproponowane oprogramowanie kontroluje pobieranie danych takich jak ciśnienie, pozycja i sygnał przepływu w sposób synchroniczny. Różne rodzaje nieprawidłowości dla poszczególnych krzywych sygnału są także różne, więc główny sygnał nieprawidłowości to sygnał pomiaru ciśnienia podczas gdy sygnał pomiaru przepływu to sygnał pomocniczy. Wyniki diagnostyki z zastosowaniem falkowej sieci neuronowej pokazały, że inteligentny system wykrywania nieprawidłowości pompy tłokowej ma wysoką szybkość i dokładność działania.

Autorzy pracy [60] opracowali metodę opartą na transformacji falkowej, logice rozmytej i sieciach neuronowych w celu diagnozy nieprawidłowości pomp trójtłokowych. Charakterystyka nieprawidłowości (ang. fluid and dynamic-end) może być podzielona na transformację falkową w różnych skalach w tym samym czasie. Zmienne charakterystyki mogą być skonstruowane przy użyciu współczynników równania asymptotycznego spektrum ekspansji Edgeworth'a i rozmytej do sieci neuronowej.

Autorzy w pracy [61] opisują praktyczne zastosowanie opracowanej przez nich metody GAMM (ang. Graphical Analysis for Maintenance Management). Metoda wspiera podejmowanie decyzji dotyczących konserwacji i zarządzania poprzez wizualizację i analizę graficzną danych. Ponadto system pozwala na identyfikację anomalii w analizowanych urządzeniach, nieprawidłowego użycia tych urządzeń lub skutków złego ich zaprojektowania. Jako podstawę do analizy metoda GAMM wykorzystuje nieparametryczny estymator funkcji niezawodności przy użyciu wszystkich danych historycznych lub ich części. W prezentowanym

przypadku metoda GAMM została zastosowana na stacji oczyszczenia ścieków w Chile i analizowano dwie pompy PCP (ang. progressive cavity pump).

Tematyką diagnostyki sieci kanalizacyjnych pod kątem działania pompy zajmują się Autorzy prac [20], [62]. Tematyką detekcji nieprawidłowości mających miejsce w sieciach kanalizacyjnych zajmują się Autorzy pracy [63]. W szczególności artykuł koncentruje się na błędach wskaźników i czujników poziomu wody. Proponowana metodologia jest oparta na metodach interwałowych.

Autorzy pracy [64] zaproponowali indeks niezawodności hydraulicznej dla pompowni ścieków wraz z przykładem zastosowania. Jest on miarą zdolności pompy do pracy w przyszłości w warunkach, gdzie poszczególne jednostki pompowe są stosowane okazjonalnie. Indeks ten określa stosunek spodziewanej objętości ścieków nie pompowanych przez pompę (w zależności od możliwych uszkodzeń pomp), do spodziewanej objętości ścieków, które znajdują się w zbiorniku pompowni w tym samym czasie.

Autorzy pracy [65] zaproponowali metodę diagnozy błędów opartą na podejściu czasowym przy użyciu obserwatorów interwałowych w celu rozwiązania problemu detekcji i identyfikacji błędów w sieci kanalizacyjnej w Barcelonie. Sieć posiada system telemetrii używany dla kontroli w czasie rzeczywistym.

Tematyką uszkodzeń pompy i ich detekcją zajmują się Autorzy pracy [66], w której przedstawiają metodę diagnozowania sekwencyjnego przy zastosowaniu rozmytej sieci neuronowej zwaną częściowo linearyzowaną siecią neuronową PNN (ang. Partially-Linearized Neural Network), za pomocą której typy błędów maszyn wirujących mogą być precyzyjnie i skutecznie wykrywane na wczesnym etapie, w oparciu o prawdopodobieństwa parametrów symptomów. Niewymiarowe parametry symptomów NPS (ang. Non-dimensional Symptom Parameters) w dziedzinie czasowej są definiowane w celu odzwierciedlenia cech sygnałów czasowych mierzonych w celu diagnozy usterki w maszynie wirującej. Proponuje się także syntetyczny wskaźnik wykrywania SDI (ang. Synthetic Detection Index) w celu oceny wrażliwości NSP na wykrywanie usterek. Pokazano praktyczne zastosowanie diagnozy do detekcji i rozróżniania stanów usterek układu pompy odśrodkowej (np. kawitacja, uszkodzenie lub niewyważenie wirnika) często w niej występujących aby zweryfikować wydajność proponowanej metody.

Problematyką diagnozowania pomp z wykorzystaniem metody wibroakustycznej zajmują się Autorzy pracy [67], gdzie rozpatrywana jest technika diagnozowania stanu technicznego urządzenia wykorzystująca automatyczną klasyfikację sygnałów w celu zwiększenia dokładności i zmniejszania błędów spowodowanych przez subiektywne oceny ludzkie. Do diagnostyki Autorzy wykorzystali algorytmy logiki rozmytej aby opisać niepewny i niejednoznaczny związek między różnymi objawami uszkodzeń, analizować informacje występujące w różnych fazach diagnozy błędów i monitorowania warunków pomp oraz klasyfikować spektra częstotliwości odpowiadające różnym usterekom pompy. Prawidłowe rozpoznawanie klasyfikacji i stanu różnych widm błędów pompy są realizowane przy zastosowaniu rozmytej metody eliminacji. Zdaniem autorów, zaproponowane metoda identyfikacji usterek pompy w oparciu o technikę logiki rozmytej wykazuje duży potencjał do klasyfikacji i identyfikacji usterek maszyn.

Metoda wibroakustyki oraz analiza falkowa została zastosowana do diagnostyki pomp odśrodkowych przez Autorów pracy [68]. W celu wygenerowania reguł z sygnałów

wibracyjnych, stosuje się teorię zbiorów przybliżonych. W oparciu o siłę reguł, zidentyfikowano różne błędy: kawitacja, pompa z uszkodzonym wirnikiem, uszkodzonymi łożyskami lub z obiema błędami naraz. Funkcje cech falkowych są obliczone przy użyciu DWT (ang. Discrete Wavelet Transform) z sygnałów wibracyjnych i zasad generowanych dzięki zbiorom przybliżonym i klasyfikowanej logice rozmytej. Wyniki zaprezentowano w formie matrycy pomieszenia, która pokazuje zdolność klasyfikacji cech falkowych ze zbiorem przybliżonym i logiką rozmytą w celu diagnozowania uszkodzeń pompy odśrodkowej.

Diagnostyką pompy osrodkowej zajmowali się również Autorzy pracy [69], którzy przedstawili metodę diagnozowania z użyciem parametrów określonych w dziedzinie częstotliwości z pomocą transformacji falkowej, zestawów szorstkich i rozmytej sieci neuronowej w celu wykrywania i rozróżnienia typów usterek na wczesnym etapie. Transformacja falkowa była wykorzystywana do ekstrakcji w optymalnym zakresie częstotliwości. Wiedza o diagnozie w celu szkolenia sieci neuronowej może zostać uzyskana dzięki zestawom danych surowych. Autorzy proponują rozmytą sieć neuronową, za pomocą której można szybko i efektywnie rozpoznać rodzaje usterek maszyny, na bazie stopnia prawdopodobieństwa parametrów symptomów. Pokazali również praktyczne przykłady diagnozy dla pomp odśrodkowych w celu sprawdzenia skuteczności metody.

W artykule [70] rozpatrywano problematykę wynikającą z obecności w ściekach przetworzonych mulczujących folii. Opracowano samoadaptacyjny rozmyty sterownik PID dla pompy dozującej w zastosowaniu w systemie kanalizacyjnym, oparty na połączeniu oprogramowania do symulacji, PLC i MATLAB. Na podstawie eksperymentów wykazano, że system kanalizacyjny zaadaptowany w zaproponowany sposób osiąga lepszą dynamikę i własności statyczne, polepsza jakość oczyszczanych ścieków i powoduje obniżenie kosztów oczyszczania.

W pracy [71] omówiono problematykę monitorowania i diagnozy prawidłowości działania pomp jednoblokowych odśrodkowych z wykorzystaniem logiki rozmytej i algorytmu SVM (ang. Support Vector Machine). Autorzy obliczyli ciągłą transformację falkową dla różnych rodzin i poziomów. Obliczone współczynniki transformacji utworzyły zestaw cech komponentów pompy odśrodkowej oraz obliczono dokładności klasyfikacji.

W artykule [72] przedstawiono analizę danych o awariach pompy dostarczonych przez dwie instytucje zarządzające siecią kanalizacyjną z Holandii. Awarie pompy spowodowane były przez procedury obsługowe i eksploatacyjne, starzenie się pomp oraz zmianę środowiska w jakim pracują pompownie. Czas trwania awarii jest bardzo zmienny i niezależny od konkretnej funkcji pompy. W celu obliczenia wpływu awarii na przelew ściekowy zastosowano symulację Monte Carlo. Wyniki wskazują, że awaria pomp ma znaczący wpływ na sprawność systemów kanalizacyjnych.

W pracy [73] Autorzy opisują system monitorowania pomp odśrodkowych oparty metodzie wibroakustycznej. Zaprezentowano zastosowanie algorytmu Naive-Bayes'a i sieci Bayes'a w celu diagnozy usterek poprzez cechy dyskretnej analizy falkowej ekstrahowanych z sygnałów wibracyjnych wytwarzanych zarówno podczas działających jak i uszkodzonych elementów pompy odśrodkowej. Porównano dokładności klasyfikacji różnych rodzin falkowych, aby znaleźć metodę optymalną do diagnozowania uszkodzeń pompy odśrodkowej.

Liczba inteligentnych układów do sterowania pompami stale wzrasta zwłaszcza w sektorach wodociągowych i ściekowych. Artykuł [74] przedstawia zalety napędów o zróżnicowanych prędkościach i jak układy te wpływają na zredukowanie kosztów obsługi układów pompowych.

Artykuł [75] przedstawia podsumowanie rozwoju i realizacji układu niestandardowej kontroli i monitoringu obiektu zaopatrującego w wodę składającego się z pomp zasysających, zbiornika i pomp wylotowych o zmiennej pojemności. Na realizację projektu składały się: projekt i budowa układu sterowania i algorytmu załączania pomp. Autorzy podali szczegóły i etapy poszczególnych prac m. in. modelowanie procesu, formułowanie celu projektu, optymalizację algorytmu kontroli (z użyciem algorytmów genetycznych), symulacji i zastosowania systemu. Zaprezentowano działanie w czasie rzeczywistym.

Autorzy pracy [76] opracowali model matematyczny zarządzania miejską siecią wodociągową do ciągłego symulowania przepływu ścieków. Model posiada trzy funkcje: oszacowanie istniejących/planowanych wydajności systemu w zależności od innych obciążeń ścieków zarówno miejskich jak i w dorzeczach, określenie optimum operacji lub kontroli automatycznej istniejących lub planowanych systemów podczas opadów deszczu i określenie najbardziej ekonomicznej i wykonalnej kombinacji alternatyw dla polepszenia lub powiększenia układów w celu spełnienia określonych kryteriów wydajności. Model spełnia funkcję wydajnego narzędzia inżynierskiego do szacowania i kontrolowania rozkładu nieczystości ze złożonych układów ściekowych (W tym zakładów oczyszczania ścieków).

Autorzy pracy [77] opracowali system ekspercki do identyfikacji i klasyfikacji uszkodzeń występujących w rurociągach kanalizacji sanitarnej, w którym zastosowali metodę CCTV (ang. Closed Circuit Television).

Obecny rozwój czujników optycznych i technologii obliczeniowych umożliwia opracowywanie innowacyjnych metod i algorytmów do diagnostyki uszkodzeń podziemnych obiektów takich jak sieci wodociągowe, kanały i przewody telekomunikacyjne. Autorzy pracy [78] przedstawili w pełni zautomatyzowaną metodę uwzględniającą pobieranie danych pomiarowych, ich analizę i wynik diagnostyczny. Artykuł opisuje rozwój układu do automatycznej interpretacji danych dla instalacji kanalizacji sanitarnej. System uzyskuje dane optyczne z wykorzystaniem techniki SSET (ang. Sewer Scanner and Evaluation Technology). Proponowany system wykorzystuje sztuczne sieci neuronowe w celu rozpoznania różnych typów defektów. Struktura układu zawiera metody przetwarzania obrazów cyfrowych, segmentację cech obrazu, użycie wielu sieci neuronowych dla rozpoznawania cech rozkładów i połączenie wielu sieci neuronowych poprzez zastosowanie algorytmów logiki rozmytej.

Autorzy pracy [79] przedstawiają metodę służącą do inspekcji kanalizacji, która polega na pomiarze wewnętrznej geometrii rurociągu, a następnie analizie tych danych w celu detekcji, klasyfikacji i oceny defektów w sposób automatyczny, przy użyciu algorytmów sztucznej inteligencji. Autorzy opisują system pomiarowy i prezentują oraz omawiają wyniki pomiarów geometrii i przekrojów poprzecznych dla różnych rodzajów rurociągów.

Kolejne zagadnienie będące przedmiotem badań dotyczy sterowania pracą pompowni. Autorzy pracy [80] opisali informacyjny układ analityczny do kontroli trybów działania pompowni ścieków. Układ realizuje złożone podejście do procesów automatyzacji i rozwiązuje szeroki wachlarz zadań zarówno w dziedzinie telemetrii jak i kontroli trybów działania pompowni.

System do zastosowania w trudnych warunkach środowiskowych przedstawili Autorzy pracy [81], w których uwzględniono układy PLC i WLAN. Zaproponowany system komunikacji opiera się na protokole Ethernet i wykorzystuje protokół TCP/IP dla parametryzacji, konfiguracji i diagnostyki. Głównym celem PLC było wysłanie sygnału cyfrowego w celu załączenia pompy w zależności od poziomu w zbiorniku.

Autor pracy [82] zaproponował metodę optymalnej kontroli pomp z wykorzystaniem zależności aproksymowania wydajności pompy jako funkcji prędkości obrotowej oraz zdefiniował kryteria dla optymalnej kontroli pomp. Inne metody optymalizacji pomp zaproponowano m.in. w artykułach [17], [23], [83]–[88].

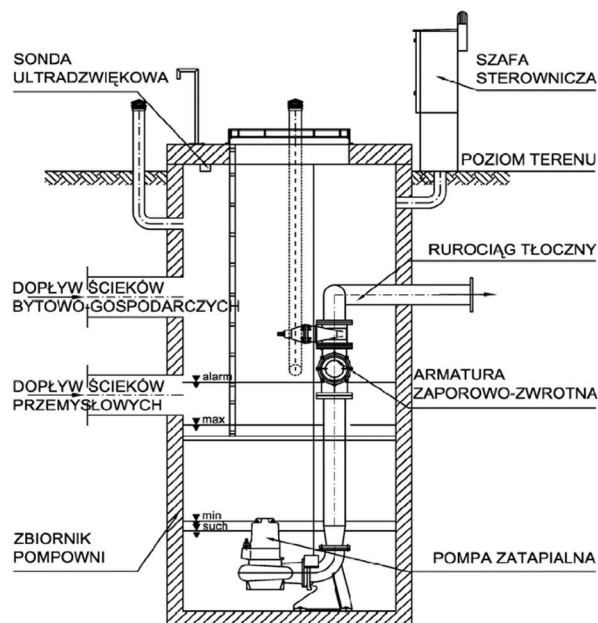
W ramach prac wstępnych [89], [90] wykonano analizy czasów działania pomp stosowanych w pompowni ścieków. W analizach użyto m.in. przykładowe tygodniowe przebiegi czasowe i wyznaczono rozkłady gęstości prawdopodobieństwa i dystrybuanty. W wyniku analizy uznano rozkład log-logistyczny Fiska jako najbardziej optymalny ponieważ uzyskiwał on najlepsze rezultaty dopasowania w większości przypadków. Stosowany model log-logistyczny jest stosunkowo prosty i zawiera dwa parametry. Jego wadą jest to, że parametry uzyskane z dopasowania nie odzwierciedlają wprost fizycznych cech rozkładu prawdopodobieństwa.

4. Obiekt badań i budowa układu pomiarowego

4.1. Pompownia ścieków

Jednym z kluczowych elementów systemu odprowadzania ścieków jest pompownia. Na rys. 4.1 przedstawiono schemat typowej pompowni z pompami zatapialnymi, zabudowanej na kanalizacji sanitarnej. Tego typu pompownia ścieków jest najczęściej stosowana z powodu niskich wymagań infrastrukturalnych, niewielkich kosztów budowy i eksploatacji oraz kompaktowej budowy obiektu. Ścieki bytowo-gospodarcze i przemysłowe pochodzące z aglomeracji miejskich gromadzone są w zbiorniku podziemnym, następnie za pomocą pomp tłoczone są przewodem ciśnieniowym do studni rozprężnej i dalej do dalszej części systemu kanalizacyjnego. Ostatecznie ścieki trafiają do oczyszczalni ścieków, gdzie są oczyszczane i odprowadzane do odbiornika.

Na rys. 4.2 i 4.3 przedstawiono przykładowe zdjęcia pompowni oraz jej wnętrza. Na rys. 4.4 zwizualizowano fragment systemu kanalizacji grawitacyjno-pompowej w aglomeracji miejskiej. Na rys. 4.5 przedstawiono zdjęcie ekranu przedstawiające wizualizację pompowni ścieków wraz z oznaczeniami postaci Px , dla $x=[1-79]$, które odpowiadają miejscowościom, w których były rejestrowane sygnały, zastosowane w badaniach. Na rys. 4.6 przedstawiono system zależności pomiędzy poszczególnymi elementami systemu kanalizacyjnego.



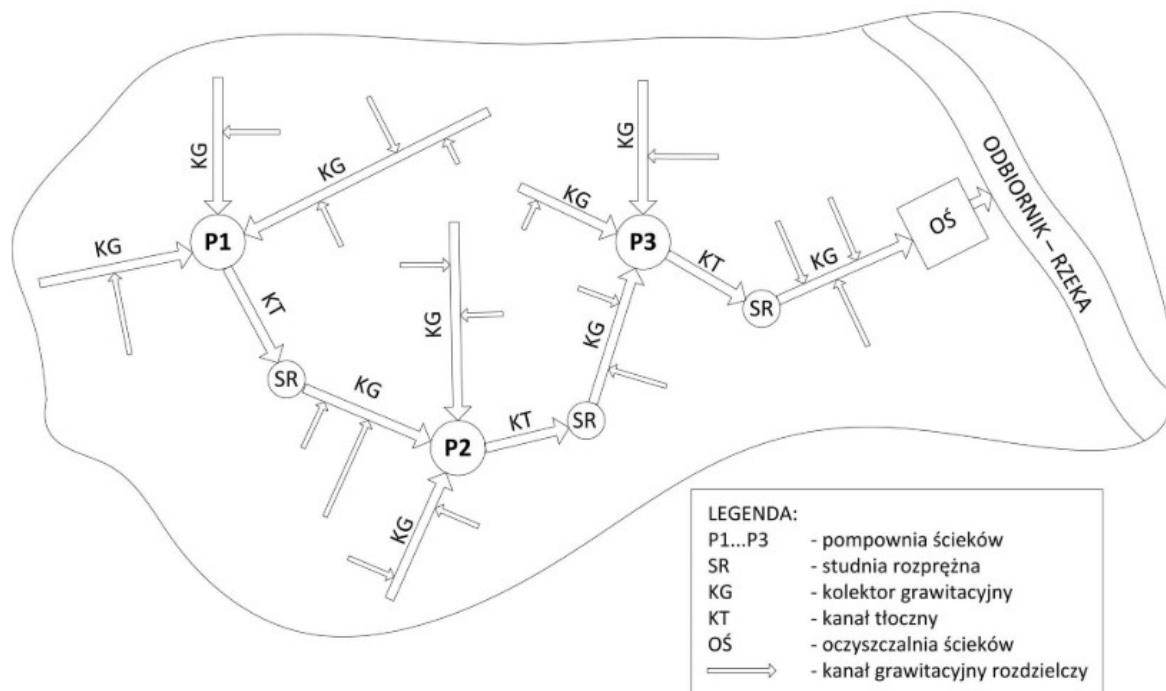
Rys. 4.1 Schemat pompowni z pompami zatapialnymi.



Rys. 4.2 Widok pompowni.



Rys. 4.3 Widok wnętrza pompowni z dwoma pompami tłocznymi.



Rys. 4.4 Wizualizacja fragmentu systemu kanalizacji grawitacyjno-pompowej w aglomeracji miejskiej.

Rys. 4.5 Oznaczenia

SYSTEM 2020-05-04 14:59:43.180

Padew Narodowa

P01 - Kopeć	P63 - Wygwizdów
P02 - Uzar	P64 - P.W.II
P03 - Ziuta	P65 - Gizińska
P04 - Kucharczyk	P66 - Popardowski
P05 - Kutys	P67 - Krępa K.
P06 - Burghardt	P68 - Krępa A.
P07 - Czerkies	P69 - Murzyn
P08 - Wał	P70 - Remiza
P09 - OPS	P71 - Węglarze
P10 - Karwan	P72 - Zielona
P11 - Cmentarz	P73 - Łukasiewiczza
P12 - Grunwald	P74 - Olszańska
P13 - Czajka	P75 - Kędzior
P62 - Nalepa	P76 - Wygwizdów II
P77 - Jana Pawła II	

Zaduszyniki

P45 - Wójcik
P46 - Remiza
P47 - Majdanek

Przykop

P48 - Mleczarnia
P49 - Błonie
P50 - Szkoła
P51 - Skrzyżowanie
PD - Wójcik

Domacyny

P52 - Chwałki
P53 - Cmentarz
P54 - Wójcik
P55 - Drzewiński
P56 - Kościół

Wojków

P57 - Remiza
P58 - Jezioro
P59 - Główna

Zarównie

P23 - Sipióra
P24 - Boisko
P28 - Polek
P29 - Główna

Zachwiejów

P21 - Kościół
P22 - Skrzyżowanie
P25 - Tynieć
P26 - Partyka
P27 - Pluta
P60 - Rusinów
P61 - Piątki

Piechoty

P17 - Plaza
P18 - Durda
P19 - Obara
P20 - Majka

Babuło

P14 - Plac Zabaw
P15 - Remiza
P16 - Popiołek

Rożniaty

P30 - Kwaśnik
P31 - Dwór
P32 - Błonie
P33 - Janik
P34 - Kościół
P35 - Kowal sklep
P36 - Babulka
P37 - Gaździać
P78 - Dul

Kębtów

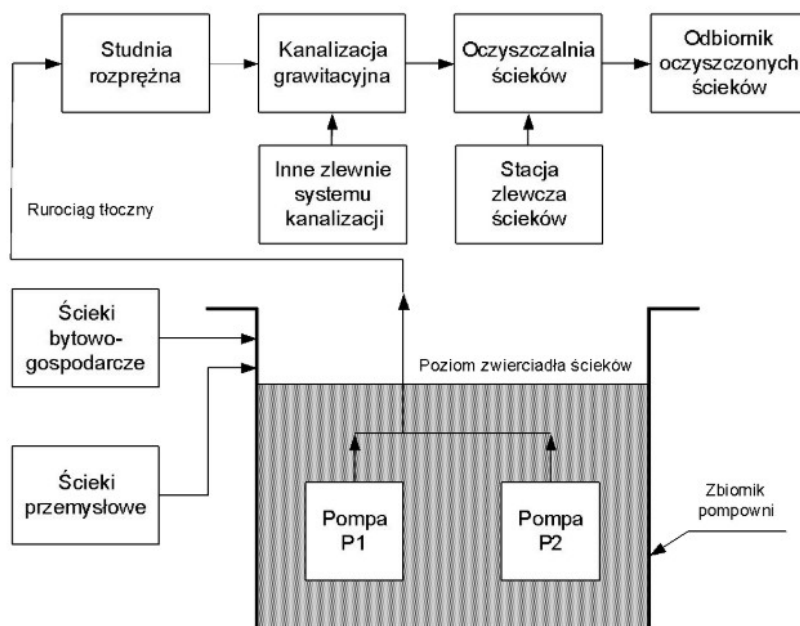
P38 - Maciuba
P39 - Szewc
P40 - Trznadel
P41 - Kolek
P42 - Tworek
P43 - Gawlik
P44 - Kołc

TRANSMISJA

OCZYSZCZALNIA

MAIN PAGE

lokalizacji zastosowane w rozprawie wraz z przyporządkowaniem miejscowości.



Rys. 4.6 System zależności pomiędzy poszczególnymi elementami systemu kanalizacyjnego.

4.2. Budowa układu pomiarowego

W rozprawie skupiono się na analizie parametrów działania pompowni w jednym z polskich przedsiębiorstw wodnokanalizacyjnych, która zaopatruje w wodę ok. 10000 mieszkańców. Rozpatrywana kanalizacja sanitarna funkcjonuje jako układ grawitacyjno-tłoczny, o łącznej długości przewodów kanalizacyjnych wynoszącej ok. 130 km.

Schemat blokowy układu pomiarowego zobrazowano na rys. 4.7. Pomiary parametrów pracy pompowni dwupompowej wykonano przy użyciu dostępnego systemu pomiarowego, który wykorzystuje sieć radiową do transmisji danych pomiarowych z urządzeń pomiarowych do serwera bazodanowego. Dane są również automatycznie publikowane w sieci Internet.

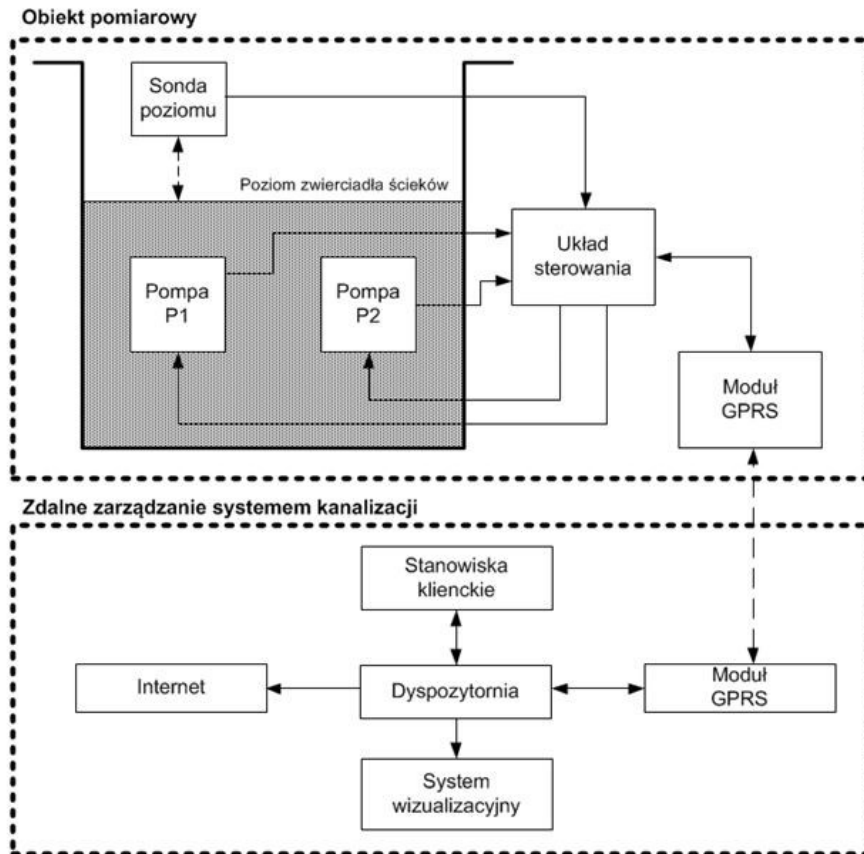
Przedmiotem analizy są dwie pompy pracujące naprzemiennie. Układ sterowania rejestruje czasy pracy tych pomp: w rozprawie oznaczone jako C1 i C2, wielkości prądu zużywanego przez obie pompy: P1 i P2 oraz poziom ścieków w zbiorniku Poziom.

W przedsiębiorstwie zainstalowany jest układ diagnostyki pompowni oparty jest o działanie sterownika, który zlokalizowany jest w szafie sterowniczej. Sterownik zbiera sygnały rejestrowane przez sondę pomiarową i przekazuje sygnały do dyspozytorni. Informacja o poziomie ścieków w zbiorniku pompowni wyświetlana jest za pomocą systemu SCADA. Ponadto sterownik wykrywa nieprawidłowości w pracy poszczególnych urządzeń poprzez rejestrację sygnałów z innych czujników, np. awarię styczników, awarię zasilania oraz wykrywa przeciążenia.

Cykl działania pompowni polega na naprzemiennym pompowaniu ścieków ze zbiornika do odbiornika. Włączanie i wyłączanie zadanej pompy odbywa za pomocą układu mierzącego poziom ścieków w zbiorniku (układ pływakowy lub sonda ultradźwiękowa). Poziomy minimalny i maksymalny ustalane są w oparciu o zależności hydrauliczne i biologiczno-chemiczne. Stan techniczny pompowni określany jest podczas cyklicznych objazdów obiektów, podczas których prowadzone są następujące czynności: wizualna weryfikacja stanu pompowni

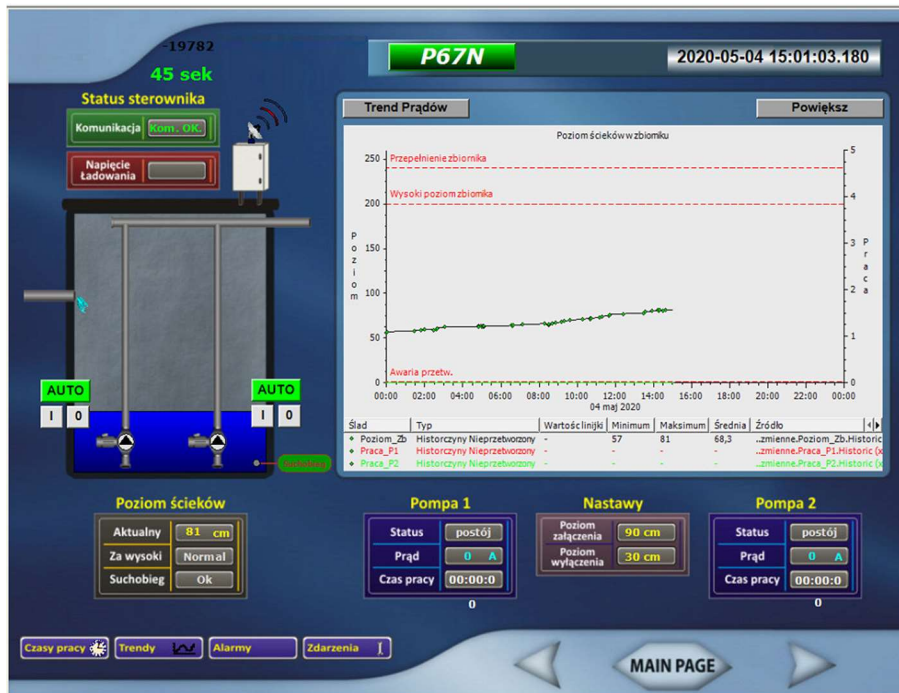
i urządzeń, ręczne sprawdzenie działania elementów pompy, sprawdzenie ręcznego sterowania pompowni, sprawdzenie działania armatury zaporowo-zwrotnej.

Obecny system diagnostyki pompowni w rozpatrywanym przedsiębiorstwie informuje o odchyleniach od stanu normalnego jedynie w zakresie zbyt niskiego lub zbyt wysokiego poziomu ścieków w poszczególnych zbiornikach oraz o innych rodzajach awarii przetworników. System nie informuje o innych odchyleniach pracy pomp od stanu normalnego.



Rys. 4.7 Schemat blokowy układu pomiarowego.

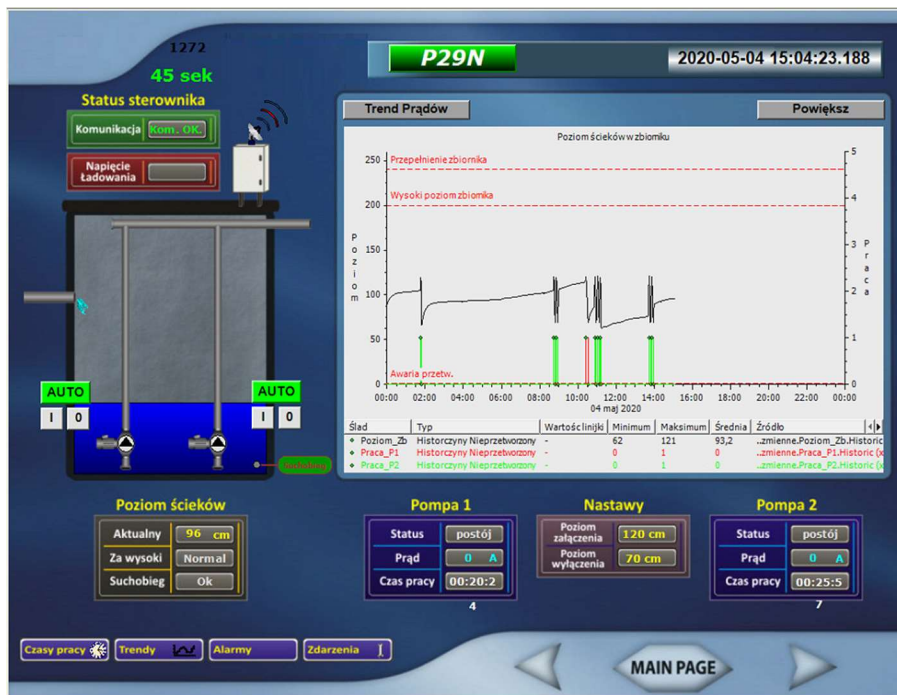
Na rys 4.8-4.10 przedstawiono przykładowe zdjęcia ekranów z systemu SCADA rozpatrywanej pompowni ścieków z wybranych lokalizacji. Więcej zdjęć ekranów znajduje się w załączniku nr 1.



Rys. 4.8. Przykładowe zdjęcie ekranu obrazujące widok panelu sterującego w wybranej lokalizacji.



Rys. 4.9. Przykładowe zdjęcie ekranu obrazujące widok panelu sterującego w wybranej lokalizacji.



Rys. 4.10. Przykładowe zdjęcie ekranu obrazujące widok panelu sterującego w wybranej lokalizacji.

5. Wyniki pomiarów i analiz parametrów pracy pomp w pompowni ścieków

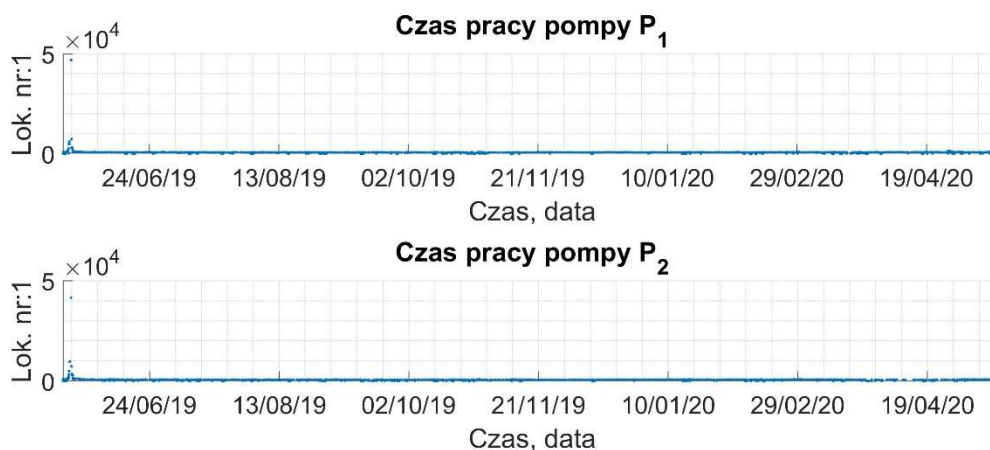
Zarejestrowane zmiany czasowe poziomu ścieków, czasu pracy pomp oraz prądu przez nie pobieranego w kolejnych lokalizacjach poddano analizom jak następuje:

- Zobrazowano przebiegi czasowe.
- Obliczono i zobrazowano histogramy dla danych podzielone na następujące okresy:
 - rocznym,
 - tygodniowym,
 - dniowym.
- Wykonano analizę statystyczną.
- Wykonano interpolację danych pomiarowych celem uzyskania spójnych wektorów danych próbkowanych z częstotliwością co jedną minutę, na potrzeby kolejnych analiz.
- Na danych interpolowanych wykonano jednoczynnikową analizę wariancji z wykorzystaniem metody ANOVA, przy czym rozpatrywano dane 24-godzinne.
- Na danych interpolowanych wykonano analizę korelacji, celem zbadania współzależności liniowych między poszczególnymi parametrami pracy pompowni, przy czym rozpatrywano zestawy danych:
 - 1-godzinnych,
 - 24-godzinnych,
 - 1-miesięcznych.
- Wykonano proces regresji mający na celu dobór modelu matematycznego opisującego rozkłady roczne czasów pracy pompy P1 i P2. W analizę przebadano przydatność następujących modeli FGP:
 - model Cauchy'ego
 - model Gaussa,
 - model Weibulla,
 - model Galtona.

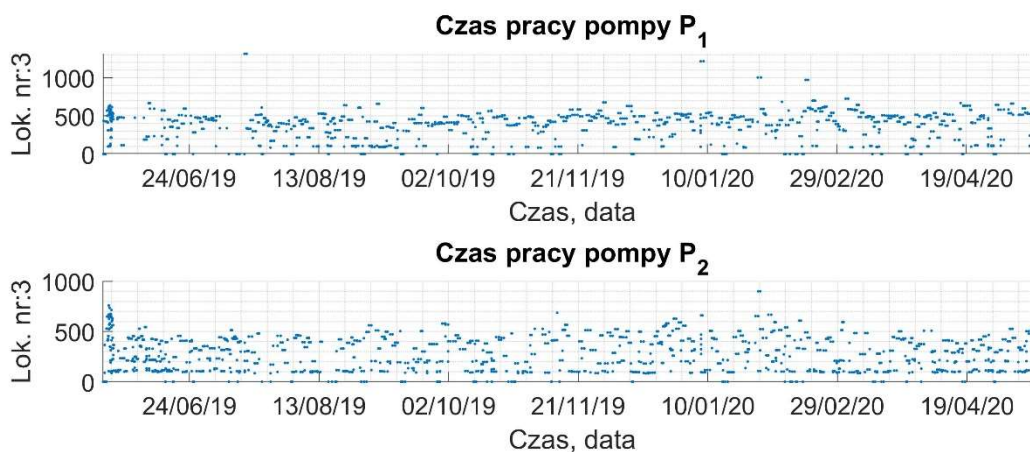
Proces dopasowania przeprowadzono przy pomocy optymalizacji nieliniowej wykorzystującej algorytm genetyczny.

5.1. Analiza czasów pracy pomp P1 i P2

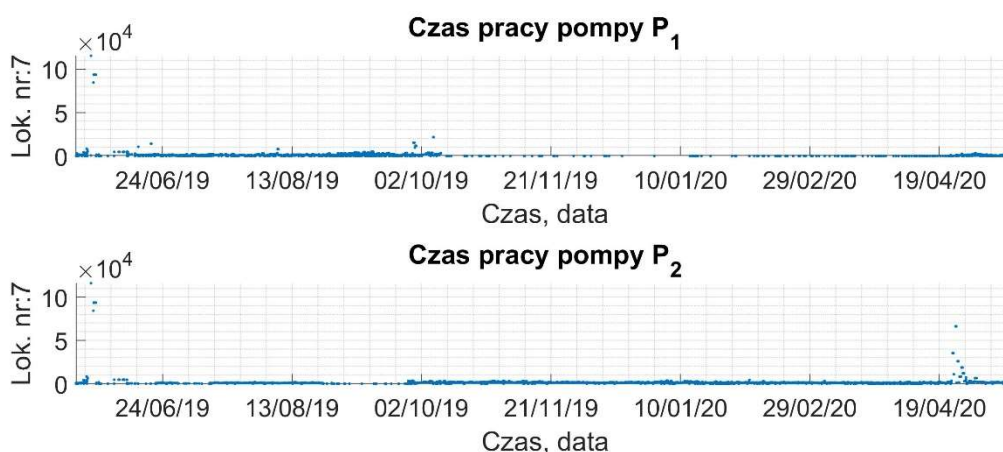
Czas pracy pompy, rejestrowany w sekundach, jest jednym z parametrów oceny prawidłowości działania systemu. System rejestruje czasy pracy obu pomp P1 i P2. Na potrzeby wizualizacji parametry pracy pomp oznaczono jako C1 – czas pracy pompy P1 i C2 – czas pracy pompy P2. Przebiegi czasowe wartości parametrów C1 i C2 w rozpatrywanym roku pomiarowych w przykładowo wybranych lokalizacjach nr 1, nr 3 i nr 7 przedstawiono na rys. 5.1.1 - 5.1.2. Zobrazowane przebiegi odzwierciedlają różne warunki pracy pomp, przy czym w lokalizacji nr 1 i nr 7 na początku roku występowały wydłużone czasy pracy, podczas gdy w lokalizacji nr 3, nie obserwowano istotnych różnic w rejestrowanych czasach. Przebiegi czasowe czasów pracy pomp P1 i P2 rejestrowane we wszystkich lokalizacjach zawarto w Załączniku nr 2.



Rys. 5.1.1 Przebieg czasowy czasów (sek.) pracy pomp P₁ i P₂ zarejestrowane w lokalizacji nr 1 w całym roku pomiarowym.



Rys. 5.1.2 Przebieg czasowy czasów (sek.) pracy pomp P₁ i P₂ zarejestrowane w lokalizacji nr 3 w całym roku pomiarowym.

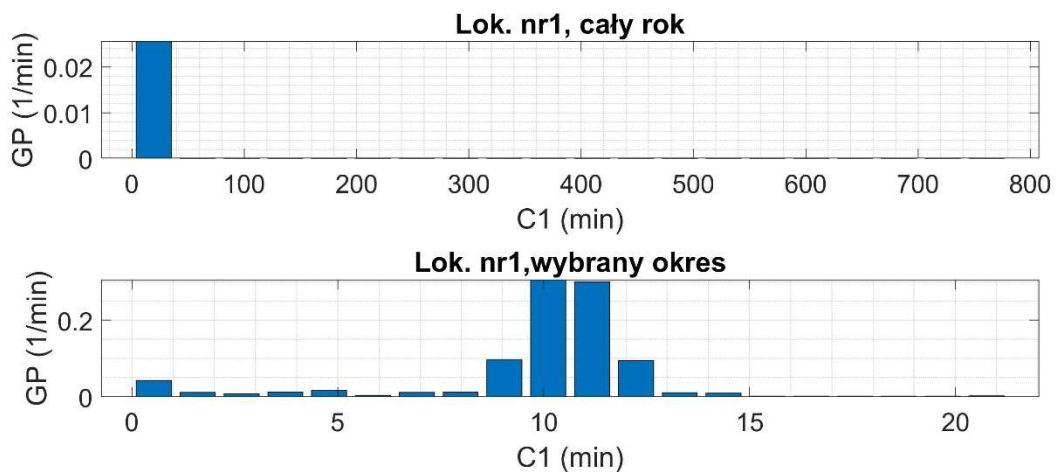


Rys. 5.1.3 Przebieg czasowy czasów (sek.) pracy pomp P₁ i P₂ zarejestrowane w lokalizacji nr 7 w całym roku pomiarowym.

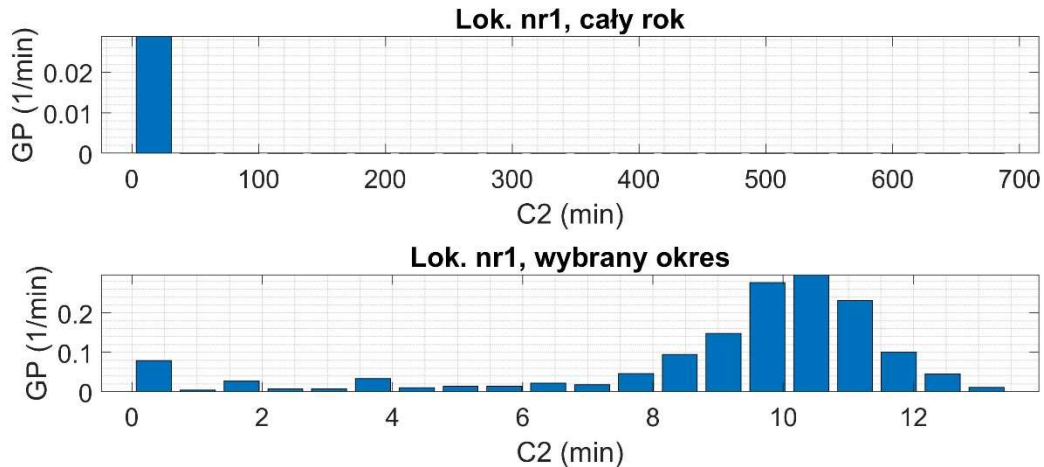
W pierwszej kolejności dla rozpatrywanych sygnałów zarejestrowanych w całym roku pomiarowym obliczono rozkłady gęstości w postaci histogramów. Na rys. 5.1.4 i 5.1.5 przedstawiono rozkłady gęstości prawdopodobieństwa obliczone dla czasów pracy pomp P₁ i

P2 w lokalizacji nr 1. U góry na rysunkach zobrazowano histogramy dla całego roku pomiarowego, natomiast u dołu – wyniki dla wybranych okresów pomiarowych, w których pompy pracowały normalnie. Dla porównania, na rys. 5.1.6 - 5.1.9 zobrazowano histogramy dla czasów pracy pomp pracujących w lokalizacjach nr 3 i nr 7.

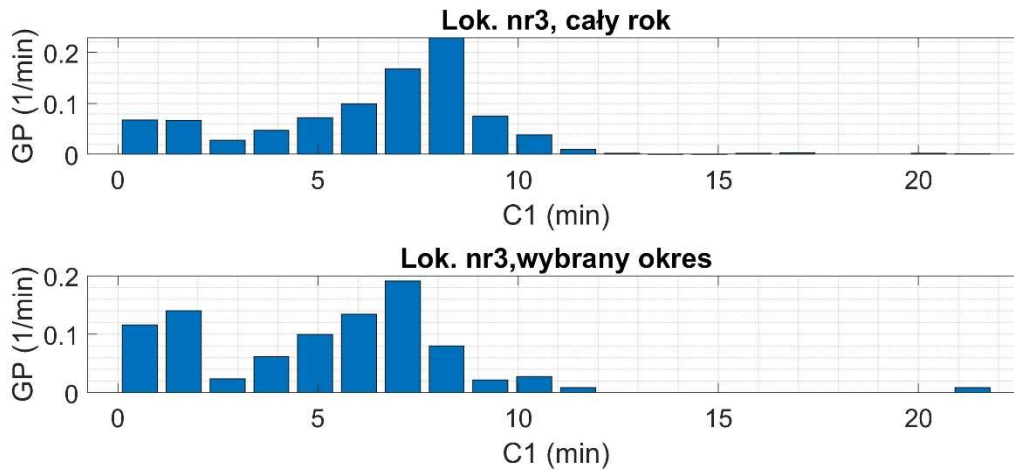
Na podstawie analizy histogramów z całego okresu dla danych z lokalizacji nr 1 można wywnioskować, że występują zdarzenia, gdy pompa pracowała nawet powyżej 10 godzin. Taka sytuacja to sytuacja awaryjna, ponieważ pompa zwykle pracuje 9-12 minut.



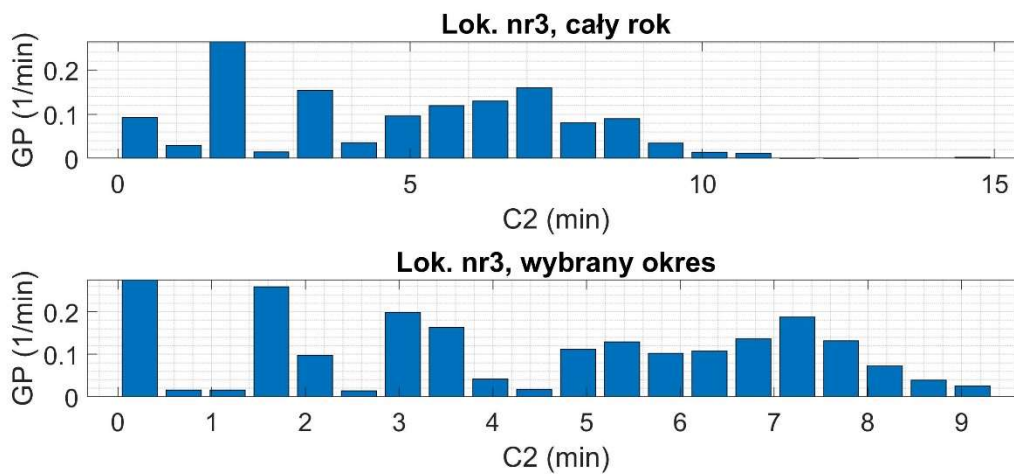
Rys. 5.1.4 Rozkład gęstości prawdopodobieństwa czasów pracy pompy P1 zarejestrowane w lokalizacji nr 1 w całym roku pomiarowym (u góry) i w wybranym okresie (u dołu).



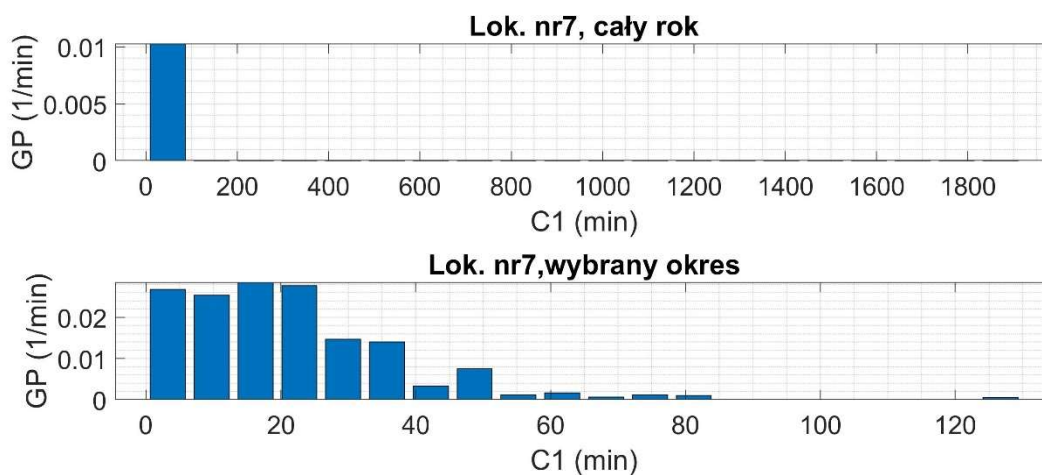
Rys. 5.1.5 Rozkład gęstości prawdopodobieństwa czasów pracy pompy P2 zarejestrowane w lokalizacji nr 1 w całym roku pomiarowym (u góry) i w wybranym okresie (u dołu).



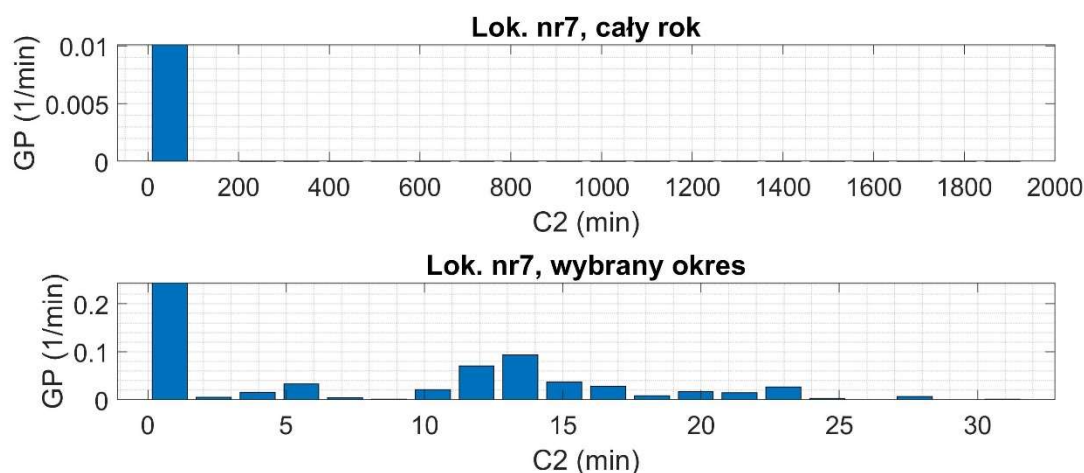
Rys. 5.1.6 Rozkład gęstości prawdopodobieństwa czasów pracy pompy P1 zarejestrowane w lokalizacji nr 3 w całym roku pomiarowym (u góry) i w wybranym okresie (u dołu).



Rys. 5.1.7 Rozkład gęstości prawdopodobieństwa czasów pracy pompy P2 zarejestrowane w lokalizacji nr 3 w całym roku pomiarowym (u góry) i w wybranym okresie (u dołu).

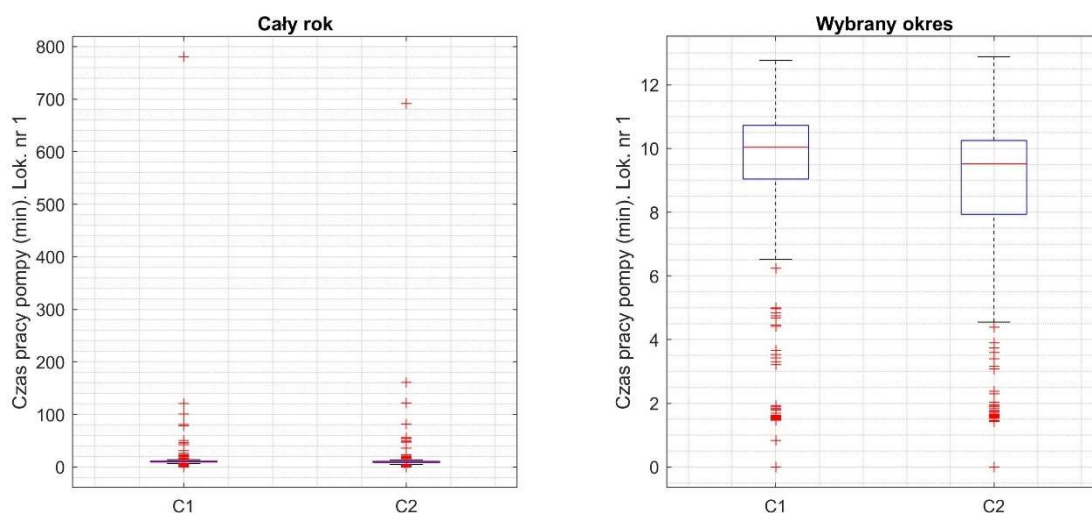


Rys. 5.1.8 Rozkład gęstości prawdopodobieństwa czasów pracy pompy P1 zarejestrowane w lokalizacji nr 7 w całym roku pomiarowym (u góry) i w wybranym okresie (u dołu).

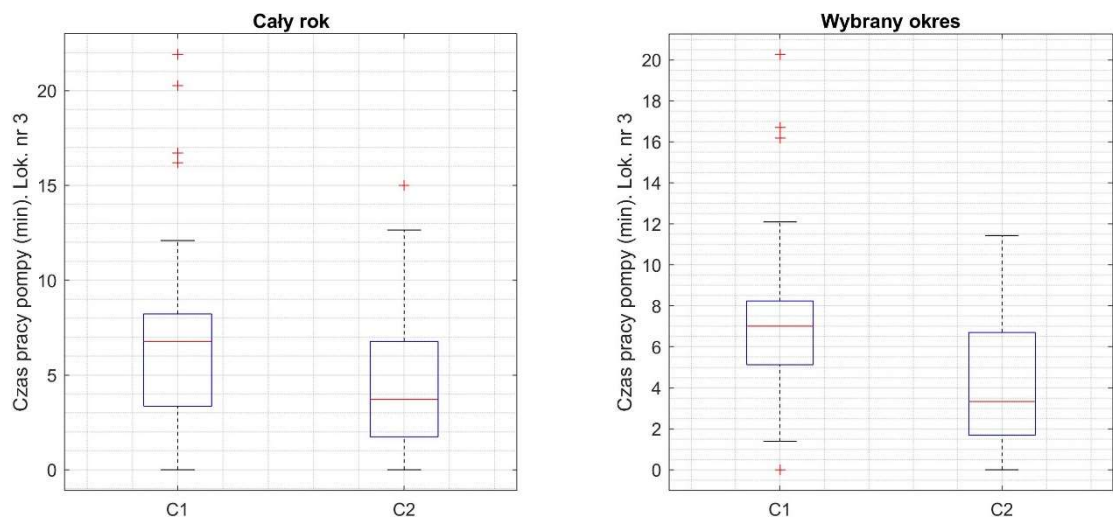


Rys. 5.1.9 Rozkład gęstości prawdopodobieństwa czasów pracy pompy P2 zarejestrowane w lokalizacji nr 7 w całym roku pomiarowym (u góry) i w wybranym okresie (u dołu).

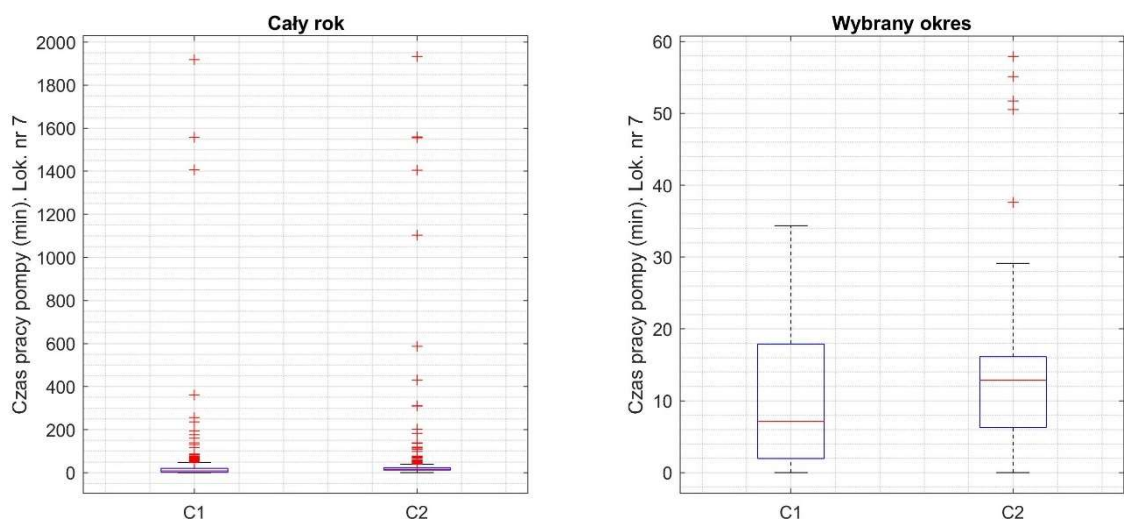
Na rys. 5.1.10 - 5.1.12 przedstawiono wykresy pudełkowe obliczone dla parametrów C1 i C2 zarejestrowanych w lokalizacjach nr 1, nr 3 i nr 7. Na wykresach po lewej zobrazowano analizy dotyczące całego roku pomiarowego, natomiast po prawej - wybrany okres, w których pompy pracowały prawidłowo. Wykresy pudełkowe pozwalają na wizualizację istotnego odchylenia wartości od średniej arytmetycznej, co widoczne jest w postaci czerwonych krzyżyków. Takie odchylenia można zaobserwować na rys. 5.1.10 i 5.1.11 po lewej. Dla danych z lokalizacji nr 3 (rys. 5.1.11) analiza statystyczna nie wykazała istotnych odchyżeń. Ponadto analiza wykresów pudełkowych pozwala na obserwację, która z pomp w danej lokalizacji pracuje średnio statystycznie dłużej.



Rys. 5.1.10 Wykresy pudełkowe obliczone dla czasów pracy pompy P1 i P2 zarejestrowane w lokalizacji nr 1. Po lewej: dane z całego okresu pomiarowego. Po prawej: dane z wybranego okresu.

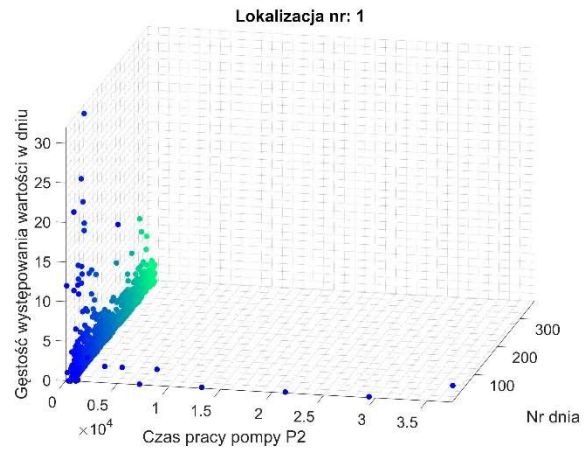
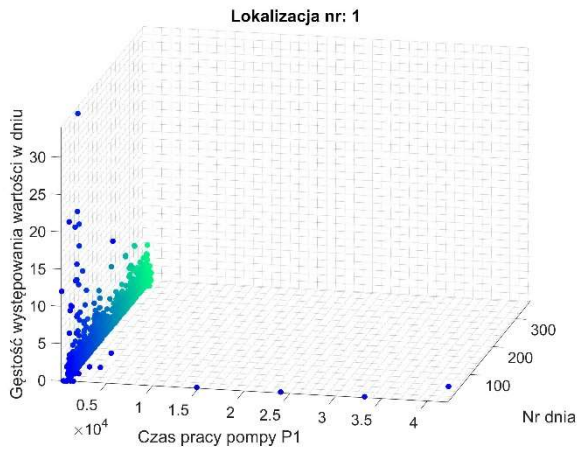


Rys. 5.1.11 Wykresy pudełkowe obliczone dla czasów pracy pompy P1 i P2 zarejestrowane w lokalizacji nr 3. Po lewej: dane z całego okresu pomiarowego. Po prawej: dane z wybranego okresu.

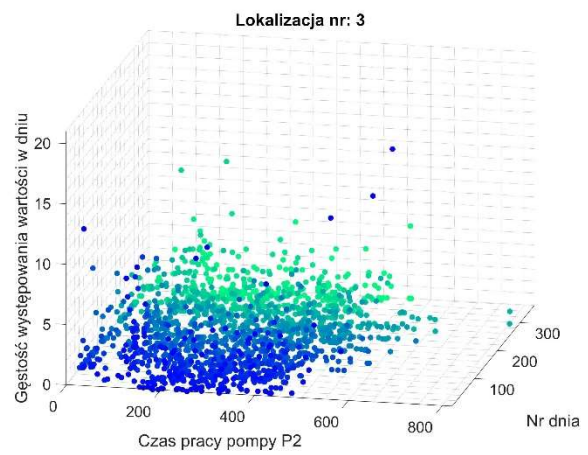
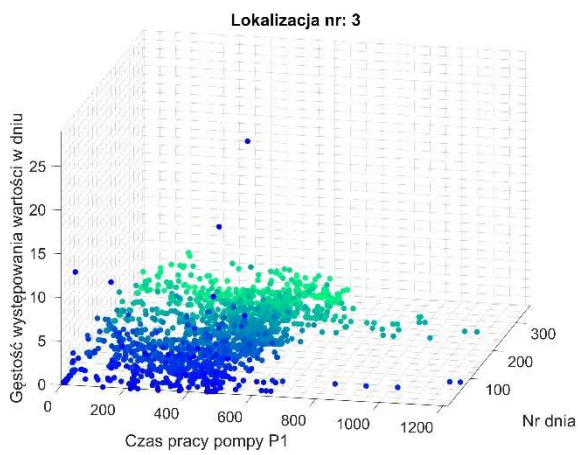


Rys. 5.1.12 Wykresy pudełkowe obliczone dla czasów pracy pompy P1 i P2 zarejestrowane w lokalizacji nr 7. Po lewej: dane z całego okresu pomiarowego. Po prawej: dane z wybranego okresu.

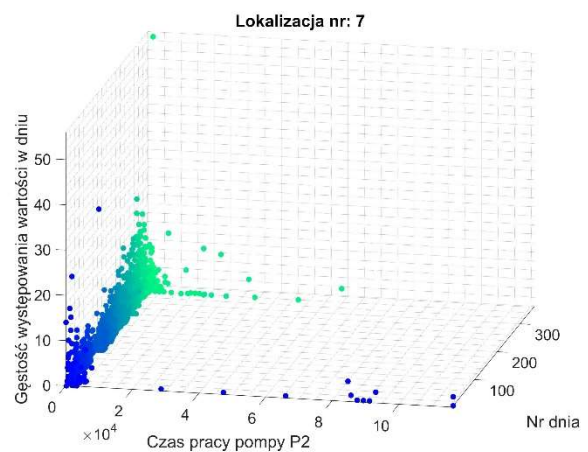
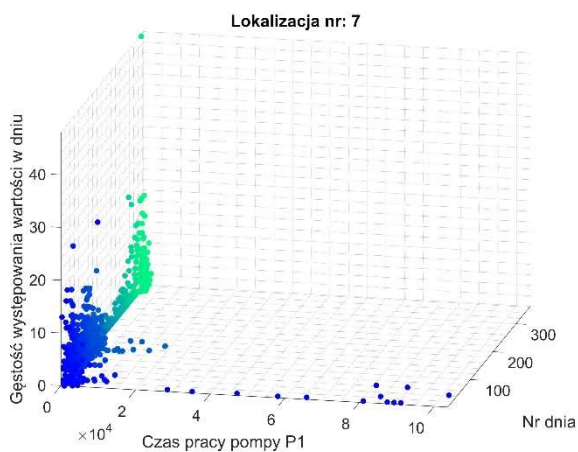
Następnie, w celu zobrazowania charakteru zmian w poszczególnych okresach czasowych, dane roczne podzielono na okresy tygodniowe i jednodniowe. Na rys. 5.1.13 - 5.1.15 przedstawiono histogramy obliczone dla parametrów C1 i C2 zarejestrowanych w lokalizacjach nr 1, nr 3 i nr 7, dla okresów jednodniowych (24-godzinnych). Natomiast na rys. 5.1.16 - 5.1.18 odpowiednio histogramy dla okresów tygodniowych. Na rysunkach dla lokalizacji nr 1 i nr 7 widoczne są istotne odstępstwa od normalnej pracy w pierwszych tygodniu rozpatrywanego roku pomiarowego. Dla lokalizacji nr 7 pod koniec roku pomiarowego, wydłużone czasu pracy wskazywała pompa P2. Dla lokalizacji nr 3 istotnych różnic nie obserwowano.



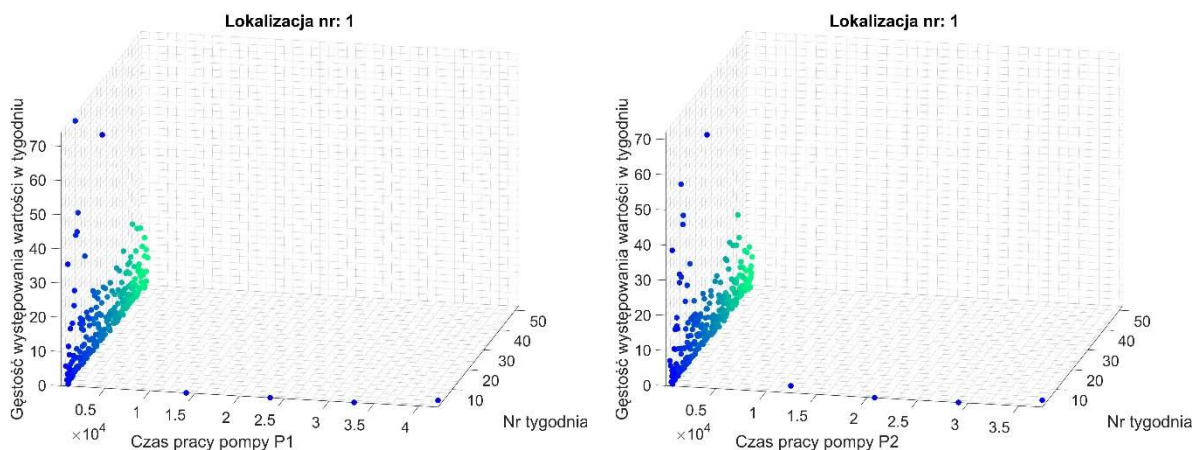
Rys. 5.1.13 Histogramy obliczone dla parametrów C1 i C2 (sek.) zarejestrowanych w lokalizacji nr 1. Dane dotyczą zestawów 24-godzinnych.



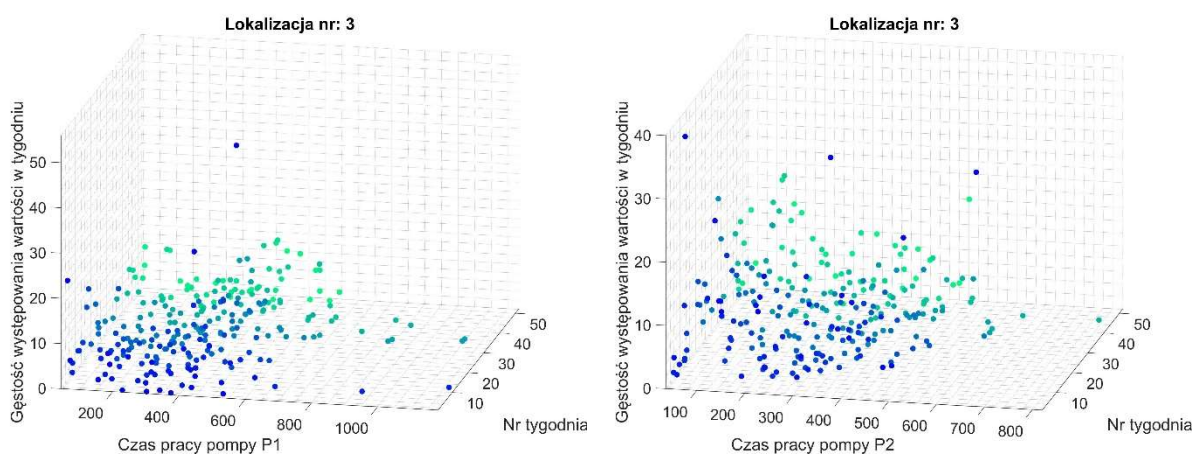
Rys. 5.1.14 Histogramy obliczone dla parametrów C1 i C2 (sek.) zarejestrowanych w lokalizacji nr 3. Dane dotyczą zestawów 24-godzinnych.



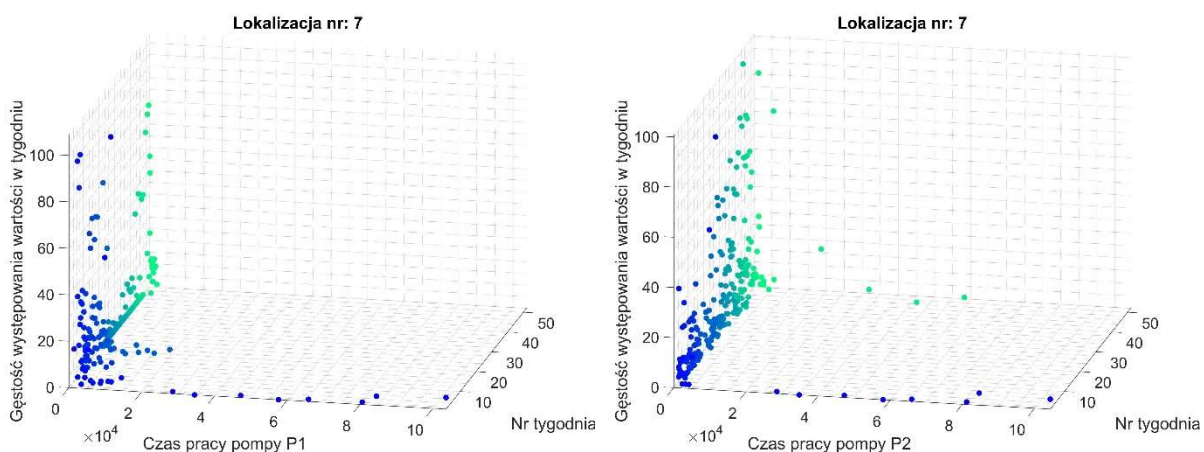
Rys. 5.1.15 Histogramy obliczone dla parametrów C1 i C2 (sek.) zarejestrowanych w lokalizacji nr 7. Dane dotyczą zestawów 24-godzinnych.



Rys. 5.1.16 Histogramy obliczone dla parametrów C1 i C2 (sek.) zarejestrowanych w lokalizacji nr 1. Dane dotyczą zestawów 7-dniowych. Widoczne są wydłużone czasy pracy w pierwszym tygodniu.



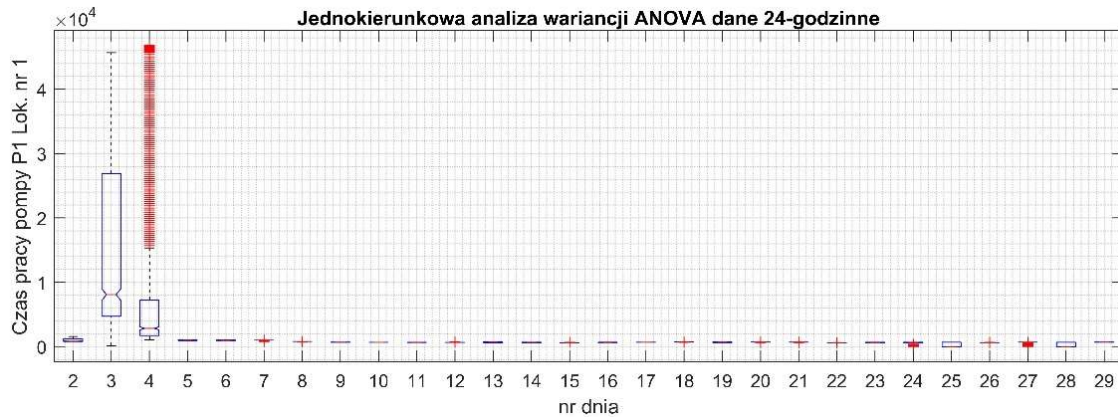
Rys. 5.1.17 Histogramy obliczone dla parametrów C1 i C2 (sek.) zarejestrowanych w lokalizacji nr 3. Dane dotyczą zestawów 7-dniowych. Brak jest widocznych istotnych odstępstw od pracy normalnej.



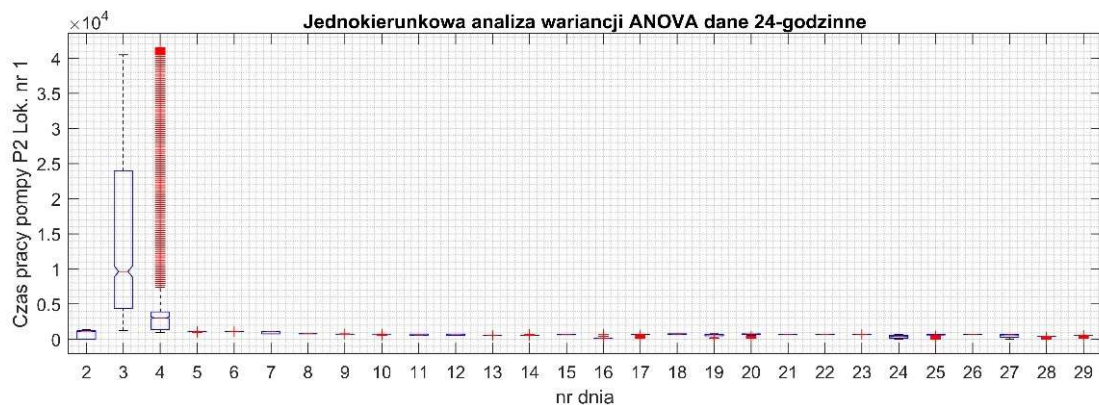
Rys. 5.1.18 Histogramy obliczone dla parametrów C1 i C2 (sek.) zarejestrowanych w lokalizacji nr 7. Dane dotyczą zestawów 7-dniowych. Widoczne są wydłużone czasy pracy na początku okresu (C1 i C2) oraz na końcu okresu (C2).

Podział danych rocznych na krótsze okresy pozwala na wizualizację nieprawidłowych wartości rozpatrywanych parametrów, co potwierdzono za pomocą przedstawionych powyżej histogramów. Celem oceny statystycznej istotności tych odchyżeń, przeprowadzono

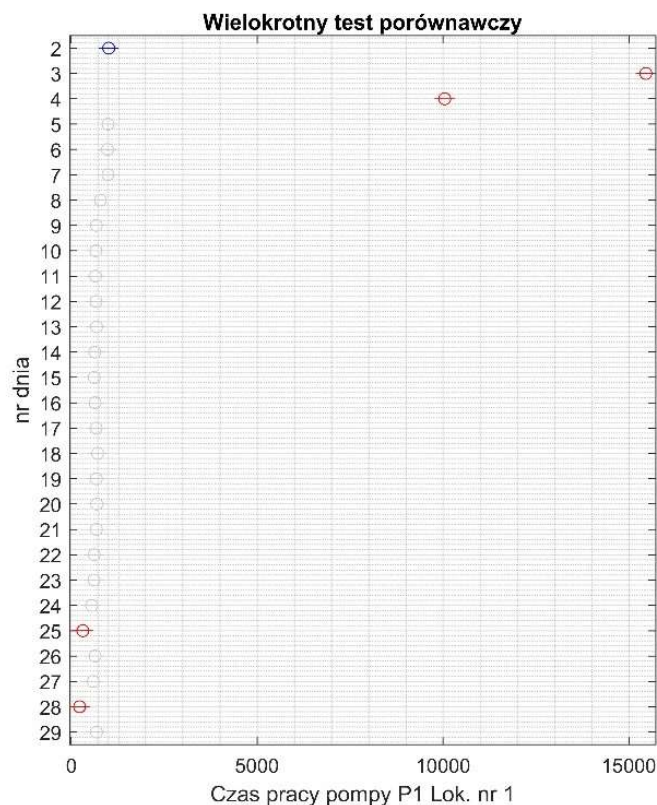
jednokierunkową analizę wariancji ANOVA. W zadaniu dane zarejestrowane w kolejnych dniach pomiarowych poddano analizie wariancji. Na rys. 5.1.19 i 5.1.20 przedstawiono wyniki analizy wariancji ANOVA dla czasu pracy pomp P1 i P2, zarejestrowane w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 1. Można zaobserwować, że w trzecim i czwartym dniu miesiąca obie pompy pracują zdecydowanie dłużej niż w pozostałych dniach miesiąca. Na rys. 5.1.21 i 5.1.22 przedstawiono wyniki wielokrotnego testu porównawczego dla obu parametrów, które obrazują, że obliczane różnice są istotne statystycznie.



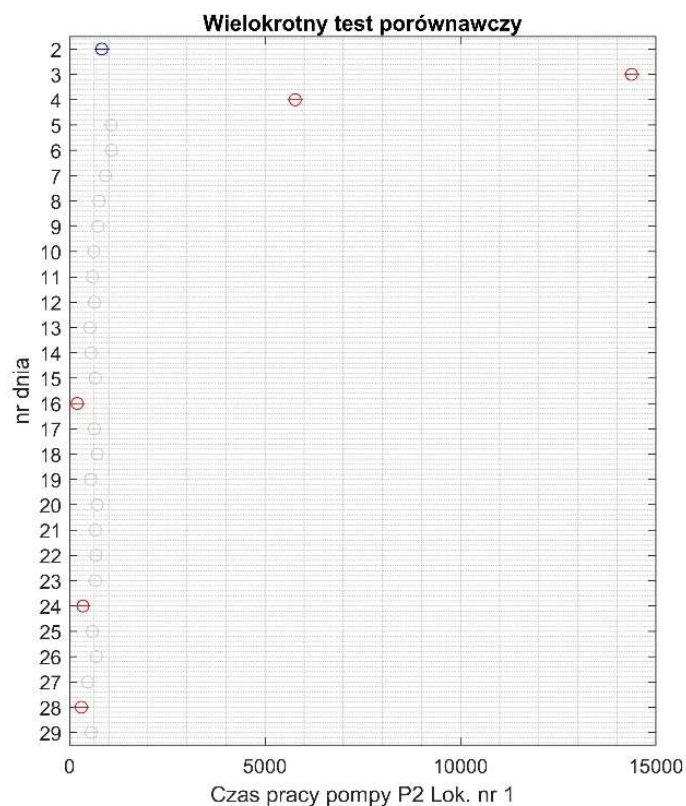
Rys. 5.1.19 Wyniki analizy wariancji ANOVA dla czasu pracy (sek.) pompy P1 zarejestrowane w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 1.



Rys. 5.1.20 Wyniki analizy wariancji ANOVA dla czasu pracy (sek.) pompy P2 zarejestrowane w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 1.

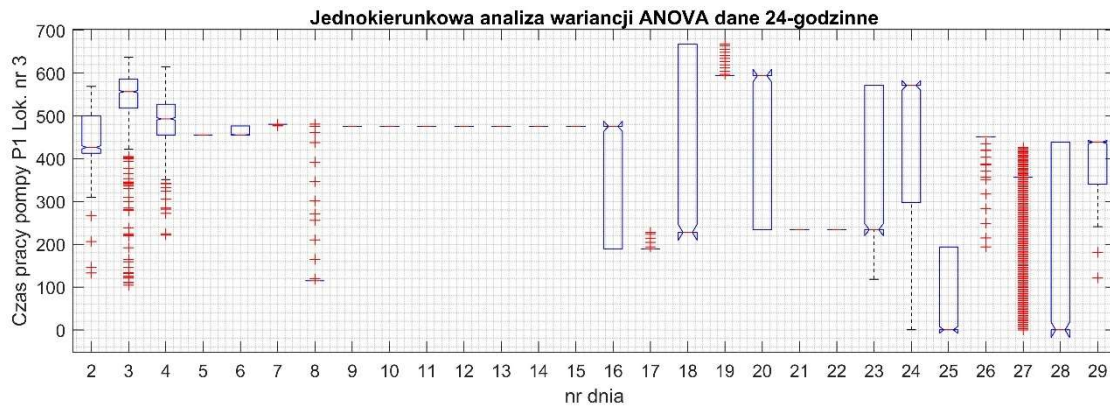


Rys. 5.1.21 Wyniki wielokrotnego testu porównawczego dla czasu pracy (sek.) pompy P1 zarejestrowane w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 1.

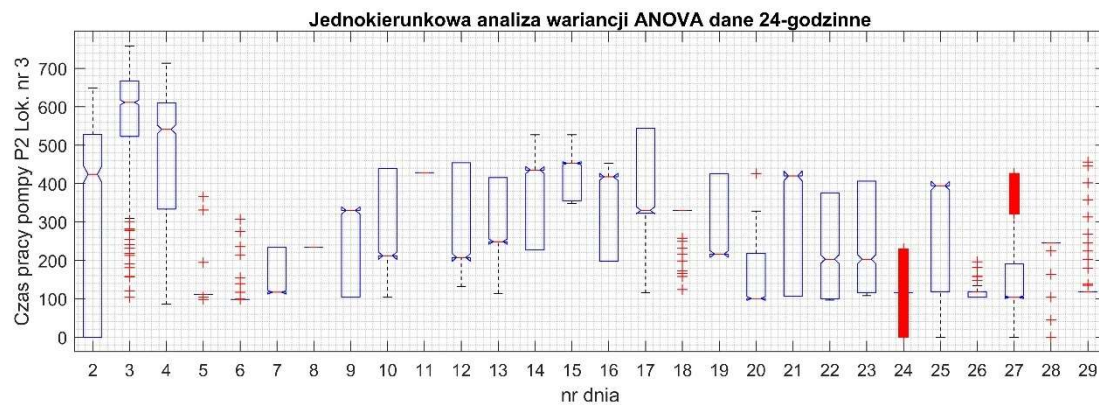


Rys. 5.1.22 Wyniki wielokrotnego testu porównawczego dla czasu pracy (sek.) pompy P2 zarejestrowane w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 1.

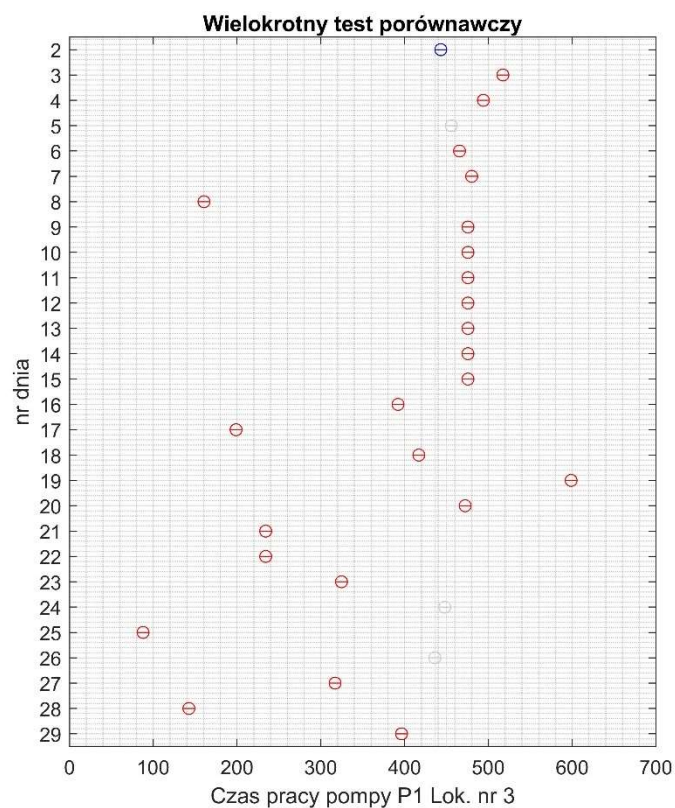
Na rys. 5.1.24 i 5.1.24 przedstawiono wyniki analizy wariancji ANOVA dla czasu pracy pomp P1 i P2, zarejestrowane w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 3. Na rys. 5.1.25 i 5.1.26 przedstawiono odpowiadające im wyniki wielokrotnego testu porównawczego.



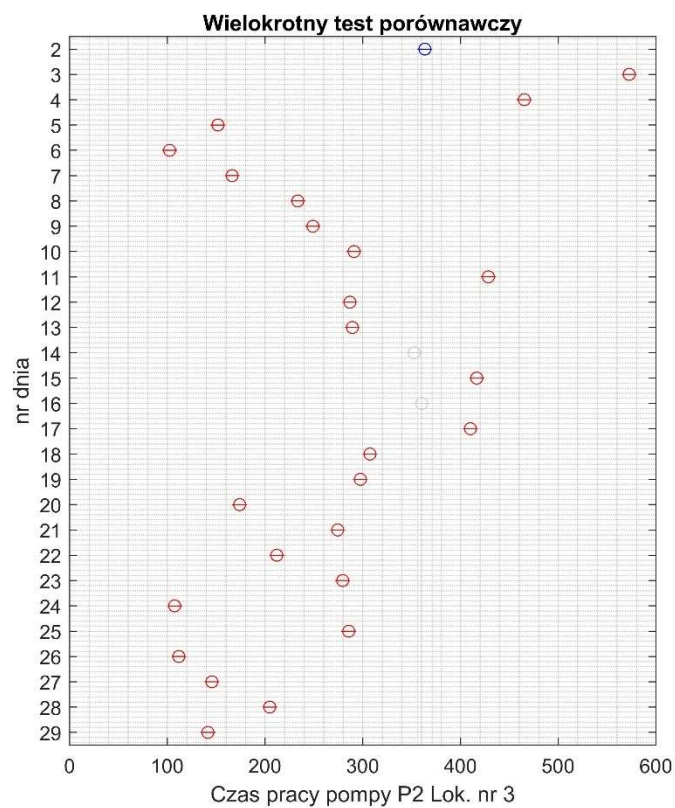
Rys. 5.1.23 Wyniki analizy wariancji ANOVA dla czasu pracy (sek.) pompy P1 zarejestrowane w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 3.



Rys. 5.1.24 Wyniki analizy wariancji ANOVA dla czasu pracy (sek.) pompy P2 zarejestrowane w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 3.

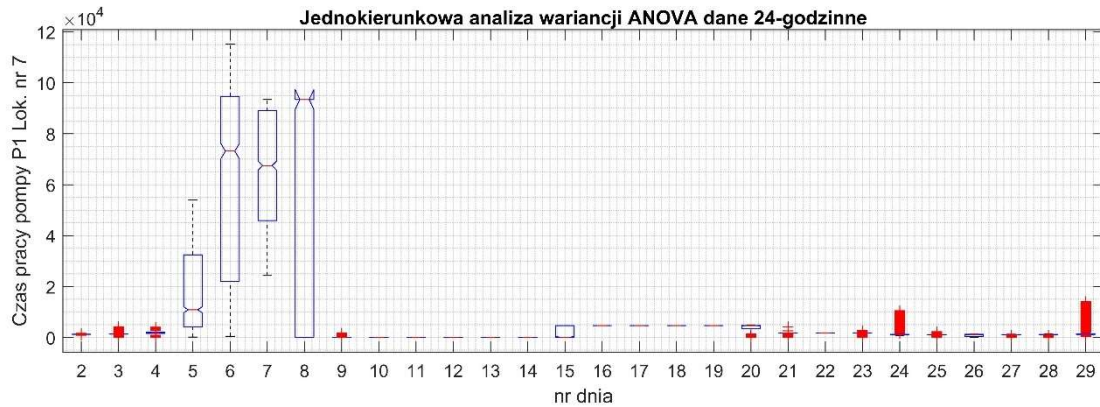


Rys. 5.1.25 Wyniki wielokrotnego testu porównawczego dla czasu pracy (sek.) pompy P1 zarejestrowane w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 3.

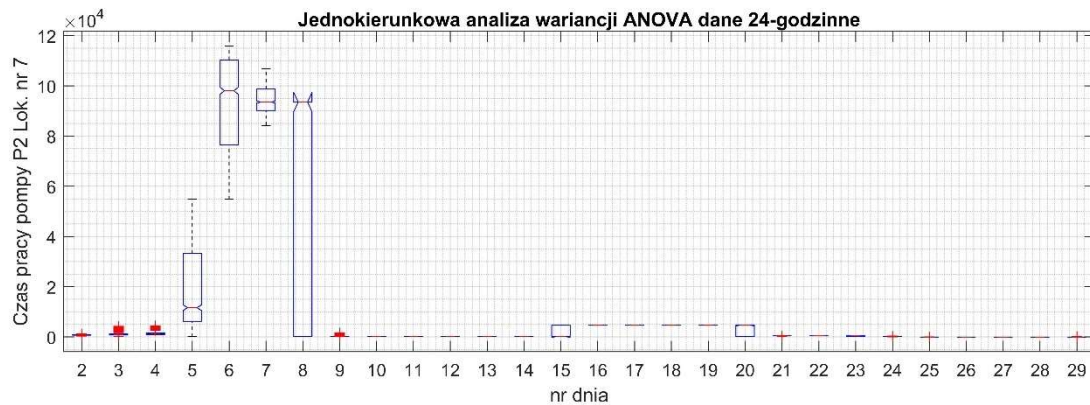


Rys. 5.1.26 Wyniki wielokrotnego testu porównawczego dla czasu pracy (sek.) pompy P2 zarejestrowane w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 3.

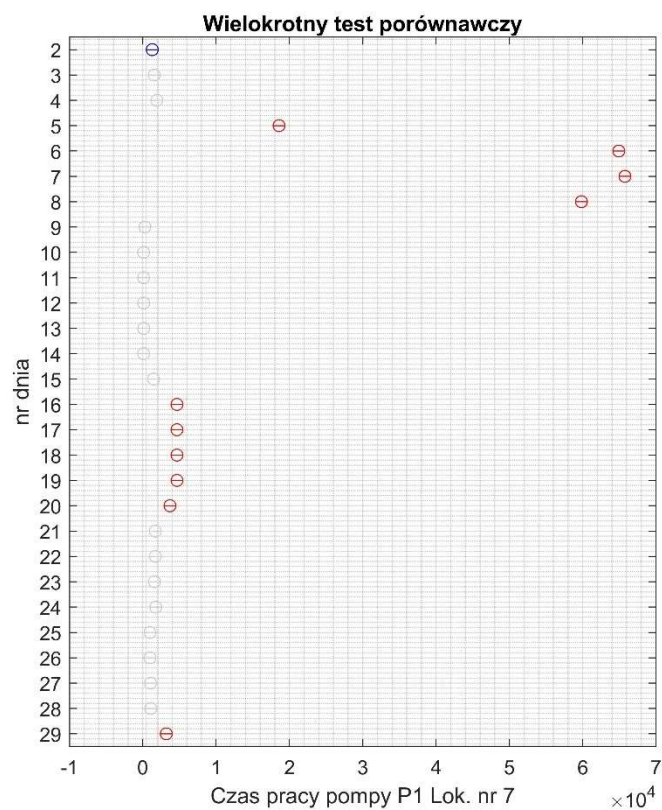
Na rys. 5.1.27 i 5.1.28 przedstawiono wyniki analizy wariancji ANOVA dla czasu pracy pomp P1 i P2, zarejestrowane w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 7. Na rys. 5.1.29 i 5.1.30 przedstawiono odpowiadające im wyniki wielokrotnego testu porównawczego.



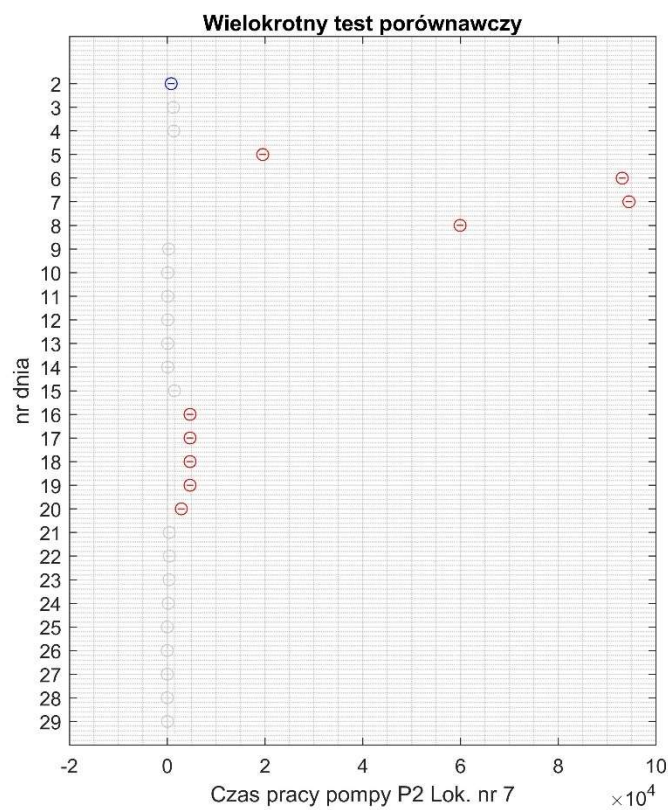
Rys. 5.1.27 Wyniki analizy wariancji ANOVA dla czasu pracy (sek.) pompy P1 zarejestrowane w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 7.



Rys. 5.1.28 Wyniki analizy wariancji ANOVA dla czasu pracy (sek.) pompy P2 zarejestrowane w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 7.



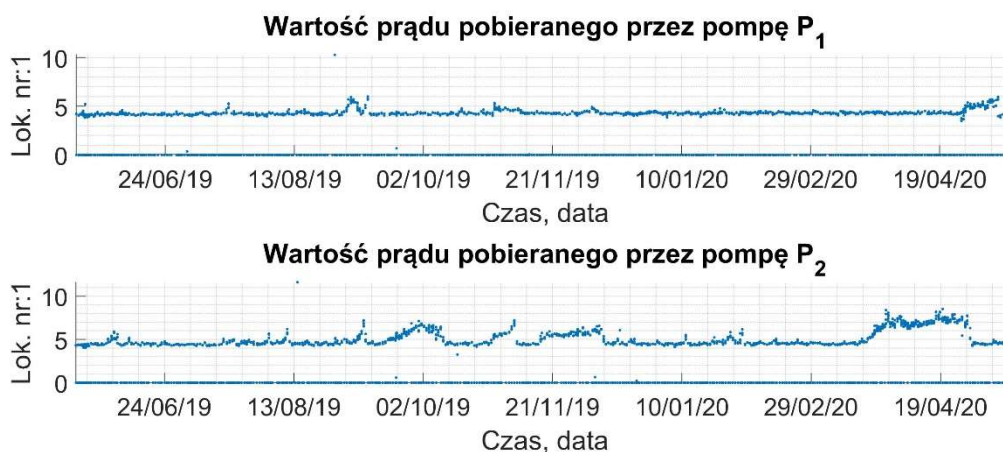
Rys. 5.1.29 Wyniki wielokrotnego testu porównawczego dla czasu pracy (sek.) pompy P1 zarejestrowane w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 7.



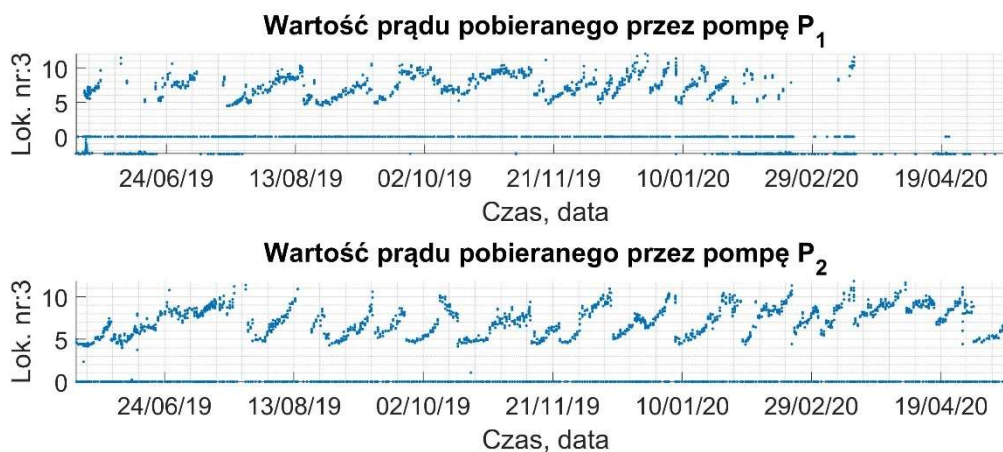
Rys. 5.1.30 Wyniki wielokrotnego testu porównawczego dla czasu pracy (sek.) pompy P2 zarejestrowane w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 7.

5.2. Analizy wartości prądów pobieranych przez pompy P1 i P2

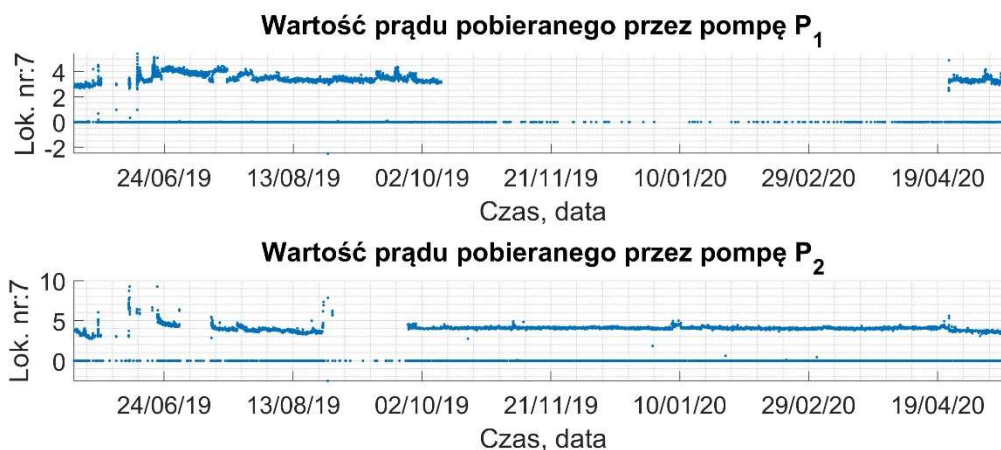
Kolejnym parametrem poddanym analizie jego przydatności do oceny prawidłowości działania systemu jest wartość prądu (wyrażonego w amperach [A]) pobieranego przez pompy. System rejestruje wartość prądu pobieranego przez obie pompy P1 i P2. Na potrzeby pracy parametry te oznaczono jako P1 – wartość prądu pobieranego przez pompę P1 i P2 – wartość prądu pobieranego przez pompę P2. Przebiegi czasowe wartości parametrów P1 i P2 w rozpatrywanym roku pomiarowych w przykładowo wybranych lokalizacjach nr 1, nr 3 i nr 7 przedstawiono na rys. 5.2.1 - 5.2.3. Przebiegi czasowe wartości prądu pobieranego przez pompy P1 i P2, rejestrowane we wszystkich lokalizacjach zawarto w Załączniku nr 3.



Rys. 5.2.1 Przebieg czasowy prądu (A) pobieranego przez pompy P1 i P2 zarejestrowane w lokalizacji nr 1 w całym roku pomiarowym.

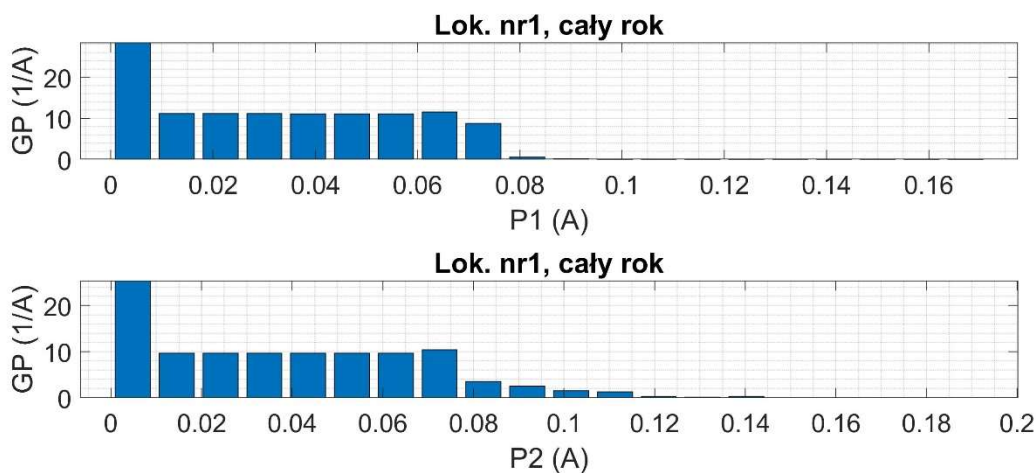


Rys. 5.2.2 Przebieg czasowy prądu (A) pobieranego przez pompy P1 i P2 zarejestrowane w lokalizacji nr 3 w całym roku pomiarowym.

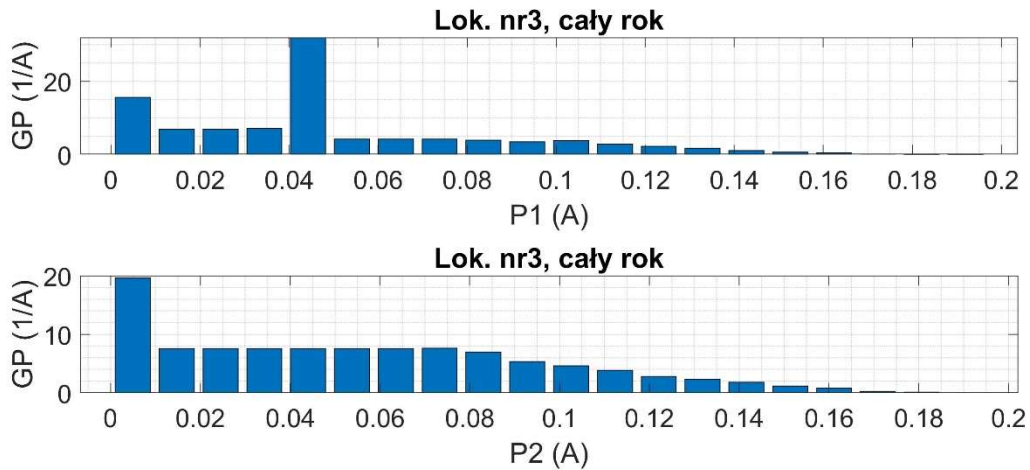


Rys.6.2.3 Przebieg czasowy prądu (A) pobieranego przez pompy P1 i P2 zarejestrowane w lokalizacji nr 7 w całym roku pomiarowym.

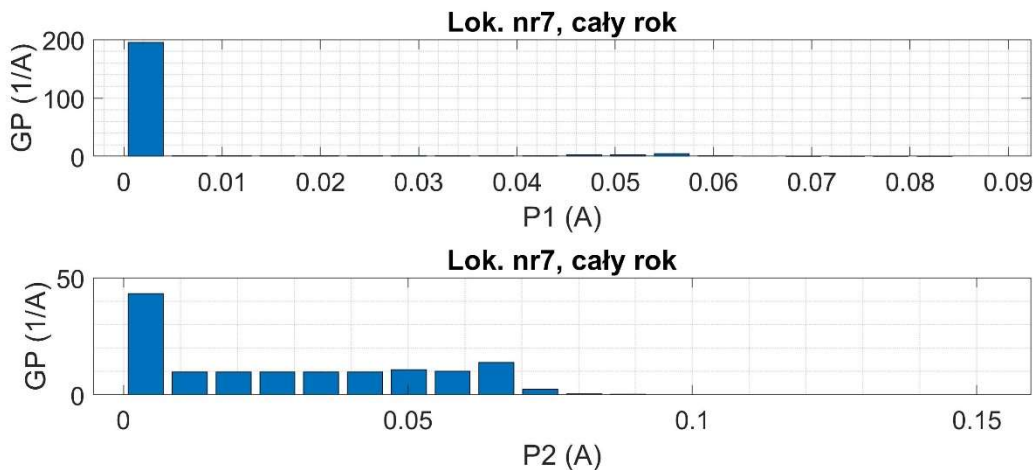
Na rys. 5.2.4 - 5.2.6 przedstawiono rozkłady gęstości prawdopodobieństwa obliczone dla prądów pobieranych przez pompy P1 i P2 w lokalizacji nr 1, nr 3 i nr 7. U góry na rysunkach zobrazowano histogramy dla całego roku pomiarowego wartości odpowiadające pompie P1, natomiast u dołu – wyniki dla pompy P2.



Rys. 5.2.4 Rozkład gęstości prawdopodobieństwa prądu pobieranego przez pompy P1 (u góry) i P2 (u dołu) zarejestrowane w lokalizacji nr 1 w całym roku pomiarowym.

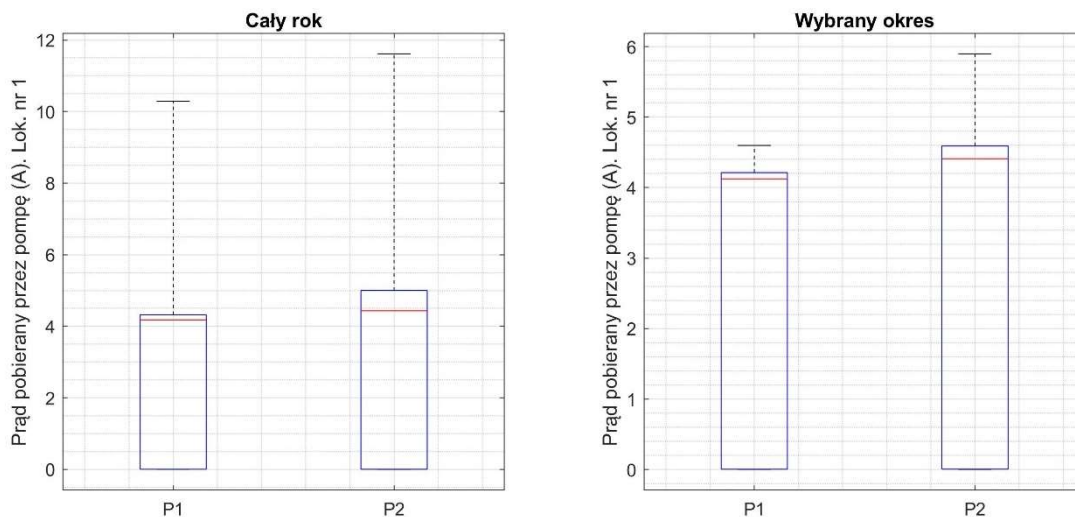


Rys. 5.2.5 Rozkład gęstości prawdopodobieństwa prądu pobieranego przez pompy P1 (u góry) i P2 (u dołu) zarejestrowane w lokalizacji nr 3 w całym roku pomiarowym.

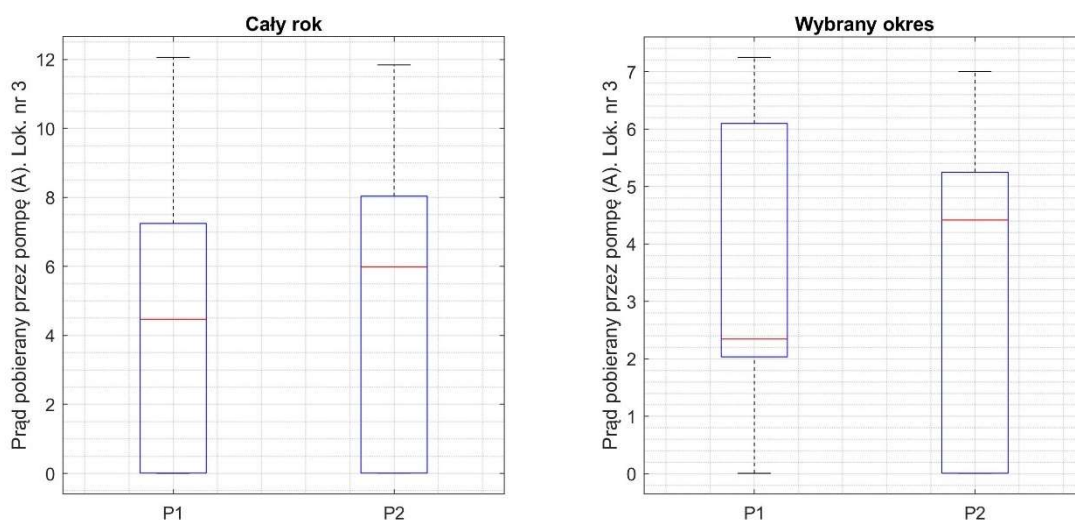


Rys. 5.2.6 Rozkład gęstości prawdopodobieństwa prądu pobieranego przez pompy P1 (u góry) i P2 (u dołu) zarejestrowane w lokalizacji nr 7 w całym roku pomiarowym.

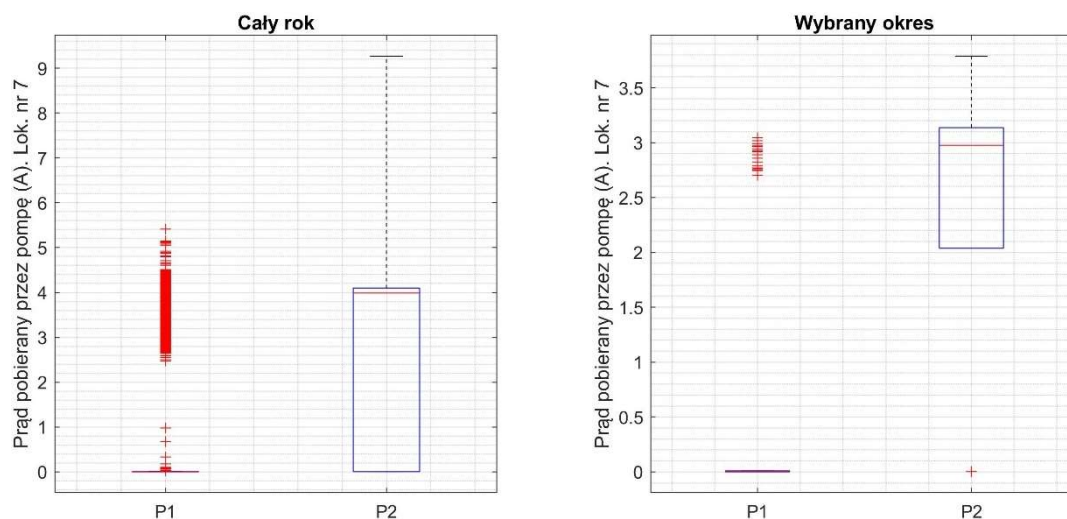
Na rys. 5.2.7 - 5.2.9 przedstawiono wykresy pudełkowe obliczone dla parametrów P1 i P2 zarejestrowanych w lokalizacjach nr 1, nr 3 i nr 7. Na wykresach po lewej zobrazowano analizy dotyczące całego roku pomiarowego, natomiast po prawej-wybrany okres, w których pompy pracowały prawidłowo. Analiza wykresów pudełkowych pozwala na stwierdzenie, że w lokalizacjach nr 1 i nr 3, pompy pracowały równomiernie przez cały okres. Natomiast w lokalizacji nr 7 pompa P1 zwykle nie pobierała prądu, co jest potwierdzone niską częstotliwością wskazań czasów pracy, pokazanych na rys. 5.1.8.



Rys. 5.2.7 Wykresy pudełkowe obliczone dla wartości prądów pobieranych przez pompy P1 i P2 zarejestrowane w lokalizacji nr 1. Po lewej: dane z całego okresu pomiarowego. Po prawej: dane z wybranego okresu.

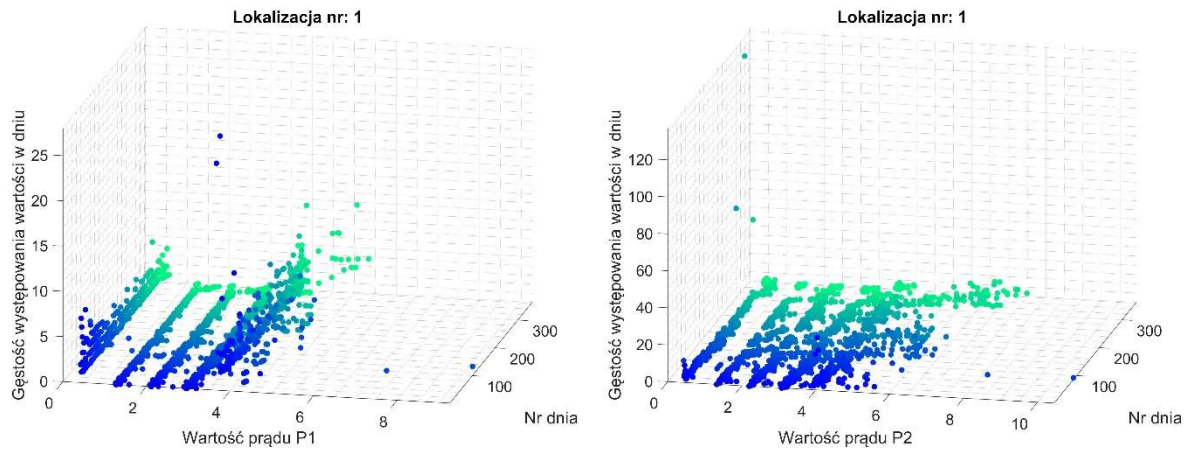


Rys. 5.2.8 Wykresy pudełkowe obliczone dla wartości prądów pobieranych przez pompy P1 i P2 zarejestrowane w lokalizacji nr 3. Po lewej: dane z całego okresu pomiarowego. Po prawej: dane z wybranego okresu.

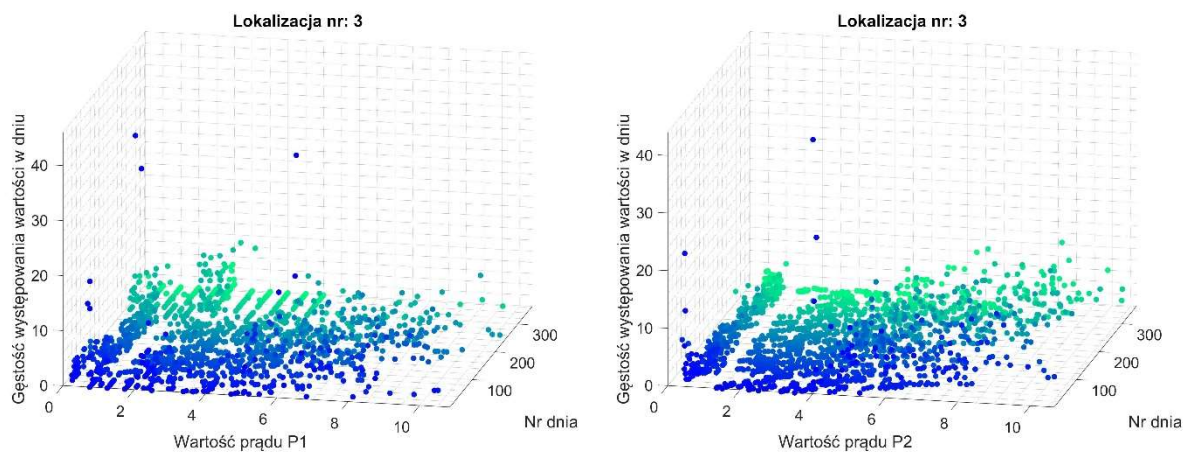


Rys. 5.2.9 Wykresy pudełkowe obliczone dla wartości prądów pobieranych przez pompy P1 i P2 zarejestrowane w lokalizacji nr 7. Po lewej: dane z całego okresu pomiarowego. Po prawej: dane z wybranego okresu.

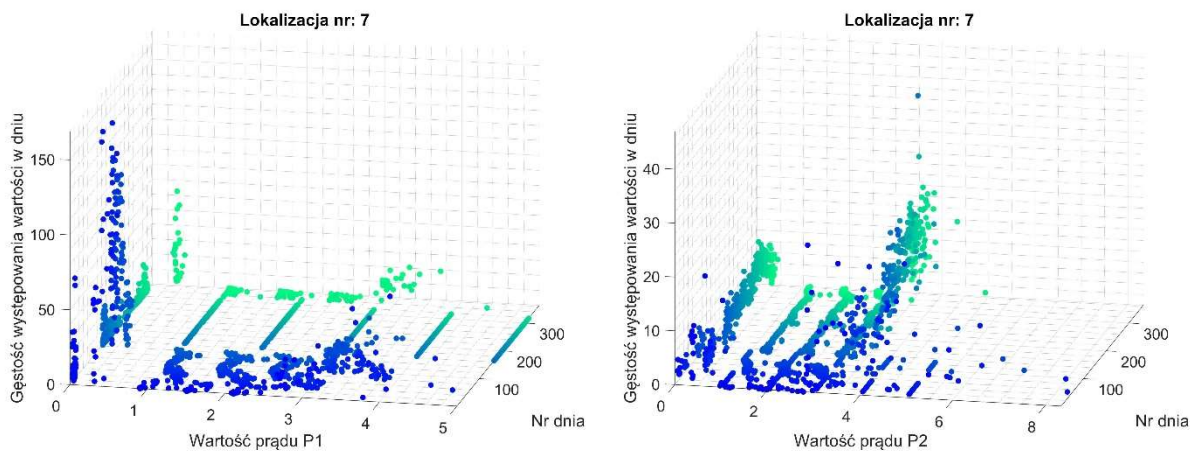
Na rys. 5.2.10 - 5.2.12 przedstawiono histogramy obliczone dla parametrów P1 i P2 zarejestrowanych w lokalizacjach nr 1, nr 3 i nr 7, dla okresów jednodniowych (24-godzinnych). Natomiast na rys. 5.2.13 - 5.2.15 odpowiednio histogramy dla okresów tygodniowych.



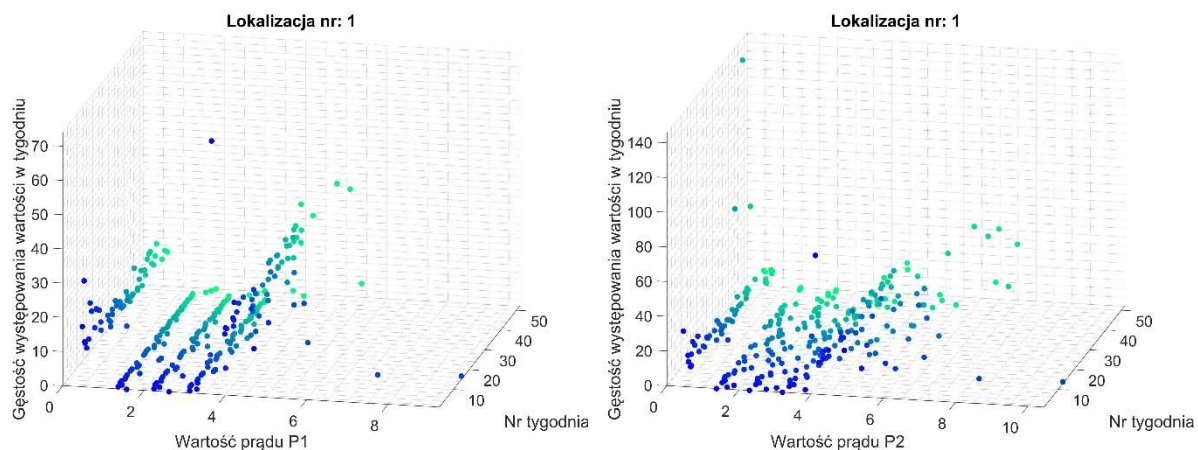
Rys. 5.2.10 Histogramy obliczone dla parametrów P1 i P2 (A) zarejestrowanych w lokalizacji nr 1. Dane dotyczą zestawów 24-godzinnych.



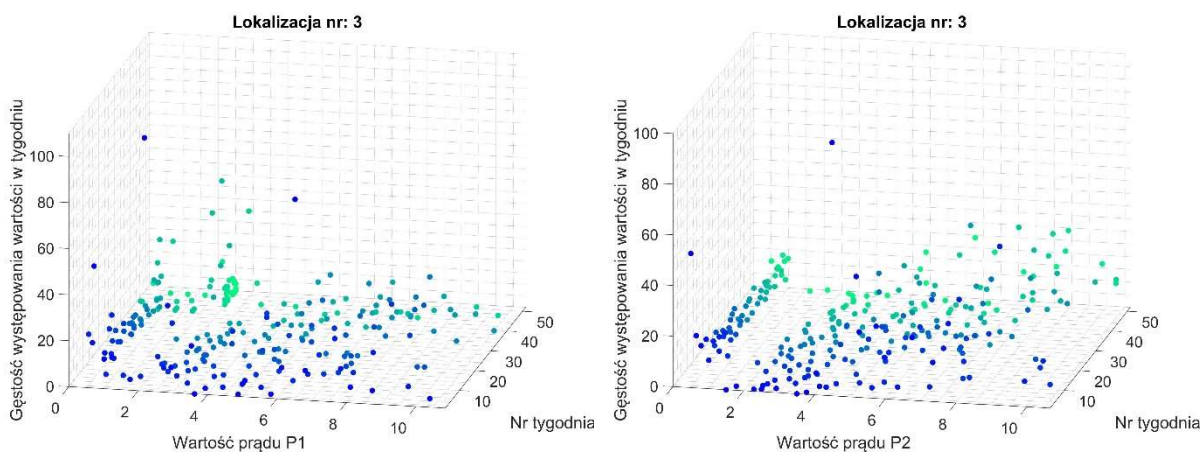
Rys. 5.2.11 Histogramy obliczone dla parametrów P1 i P2 (A) zarejestrowanych w lokalizacji nr 3. Dane dotyczą zestawów 24-godzinnych.



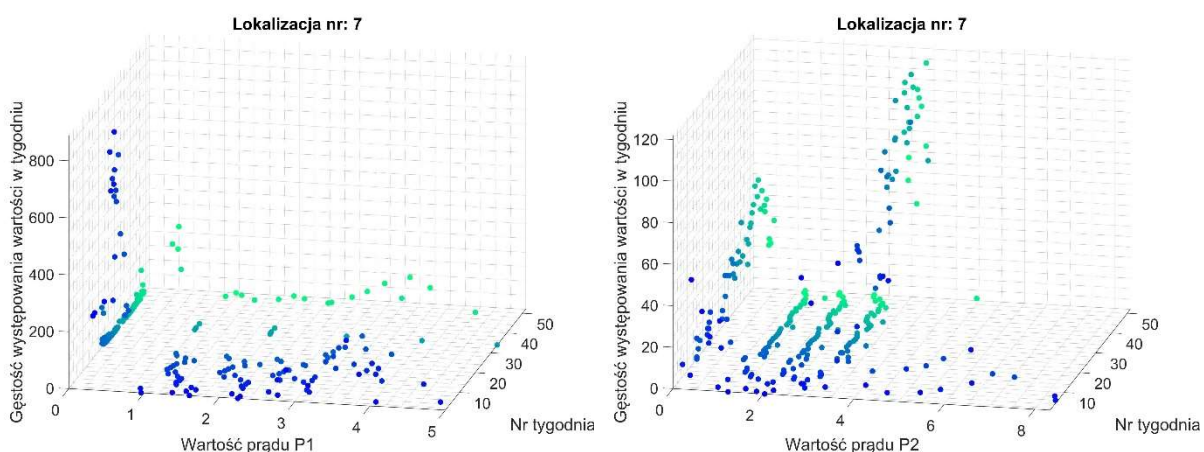
Rys. 5.2.12 Histogramy obliczone dla parametrów P1 i P2 (A) zarejestrowanych w lokalizacji nr 7. Dane dotyczą zestawów 24-godzinnych.



Rys. 5.2.13 Histogramy obliczone dla parametrów P1 i P2 (A) zarejestrowanych w lokalizacji nr 1. Dane dotyczą zestawów 7-dniowych.



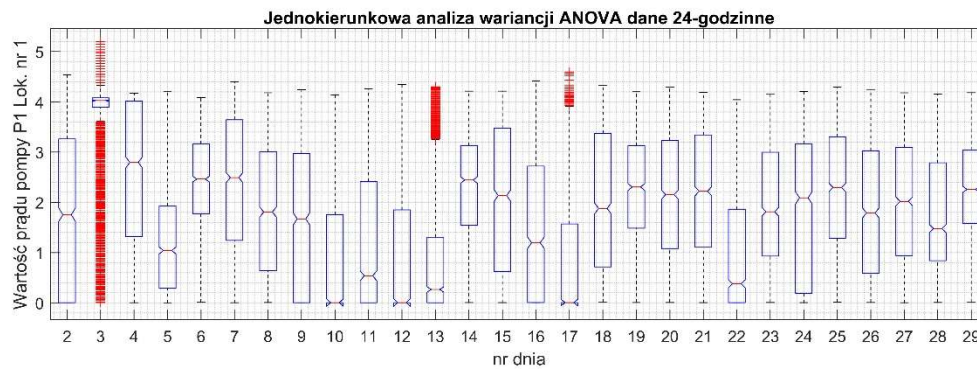
Rys. 5.2.14 Histogramy obliczone dla parametrów P1 i P2 (A) zarejestrowanych w lokalizacji nr 3. Dane dotyczą zestawów 7-dniowych.



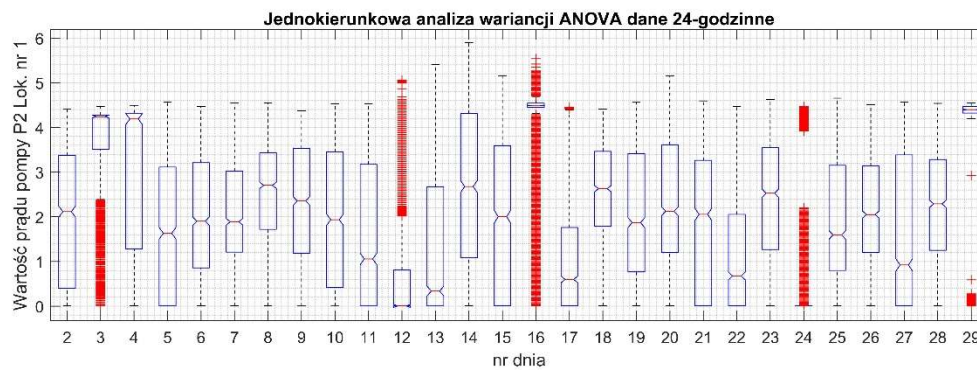
Rys. 5.2.15 Histogramy obliczone dla parametrów P1 i P2 (A) zarejestrowanych w lokalizacji nr 7. Dane dotyczą zestawów 7-dniowych.

Na rys. 5.2.16 i 5.2.17 przedstawiono wyniki analizy wariancji ANOVA dla wartości prądu pobieranego przez pompy P1 i P2, zarejestrowanych w pierwszym miesiącu rozpatrywanego

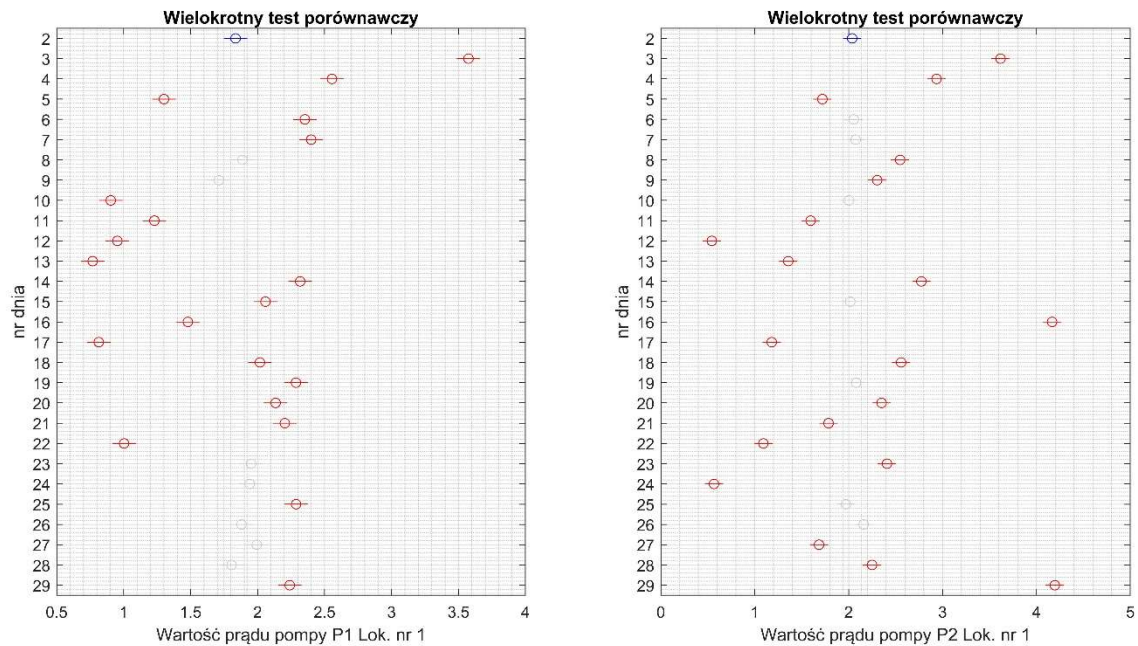
roku dla lokalizacji nr 1. Na rys. 5.2.18 przedstawiono wyniki wielokrotnego testu porównawczego dla obu parametrów.



Rys. 5.2.16 Wyniki analizy wariancji ANOVA dla wartości parametru P1 (A) zarejestrowanych w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 1.

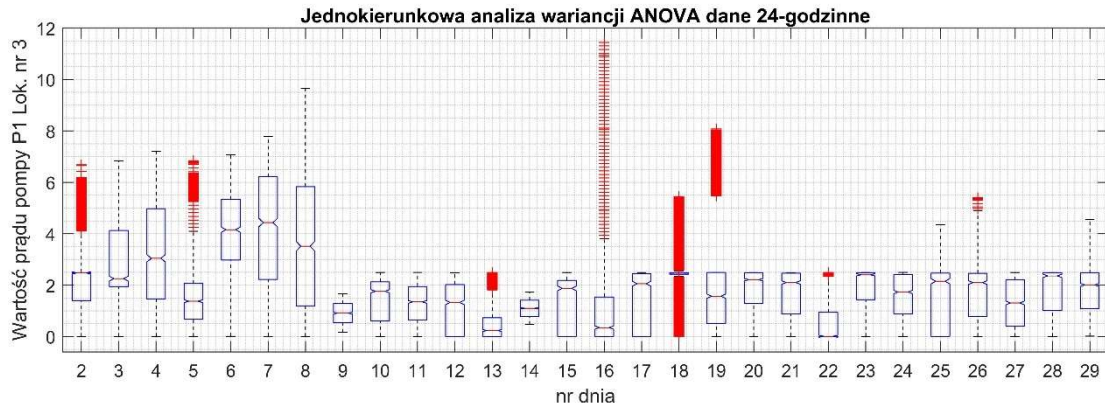


Rys. 5.2.17 Wyniki analizy wariancji ANOVA dla wartości parametru P2 (A) zarejestrowanych w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 1.

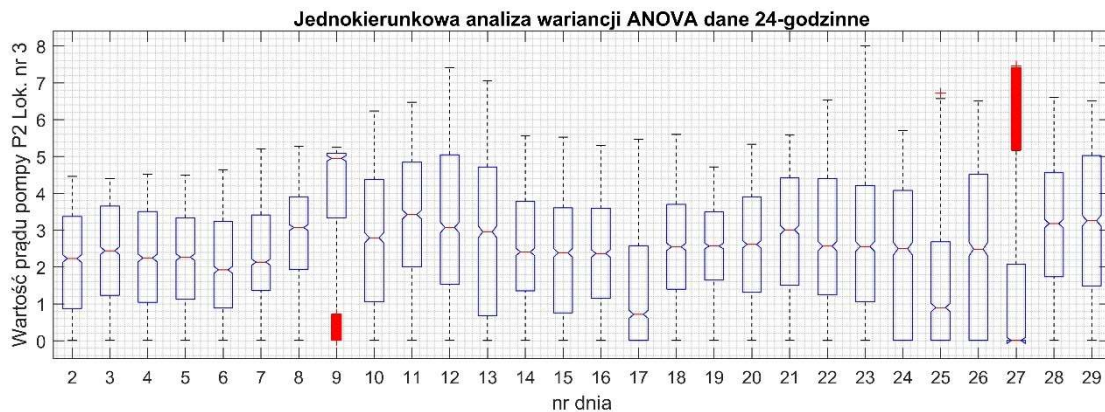


Rys. 5.2.18 Wyniki wielokrotnego testu porównawczego dla wartości parametru P1 (po lewej) i P2 (po prawej) (A) zarejestrowanych w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 1.

Na rys. 5.2.19 i 5.2.20 przedstawiono wyniki analizy wariancji ANOVA dla wartości prądu pobieranego przez pompy P1 i P2, zarejestrowanych w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 3. Na rys. 5.2.21 przedstawiono wyniki wielokrotnego testu porównawczego dla obu parametrów.

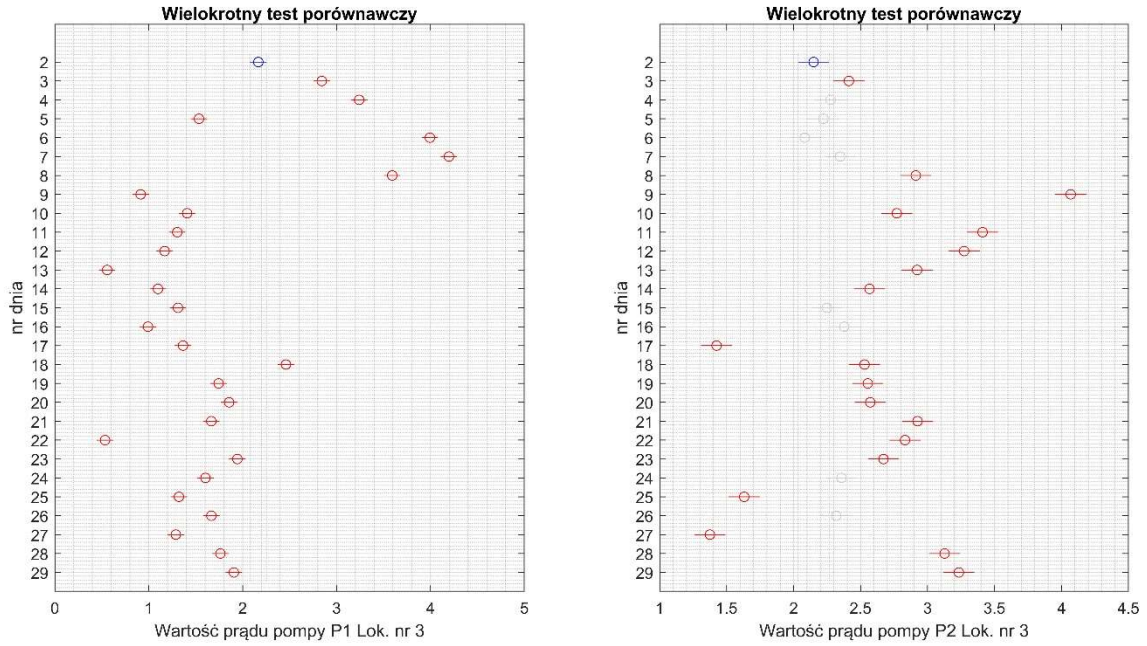


Rys. 5.2.19 Wyniki analizy wariancji ANOVA dla wartości parametru P2 (A) zarejestrowanych w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 3.

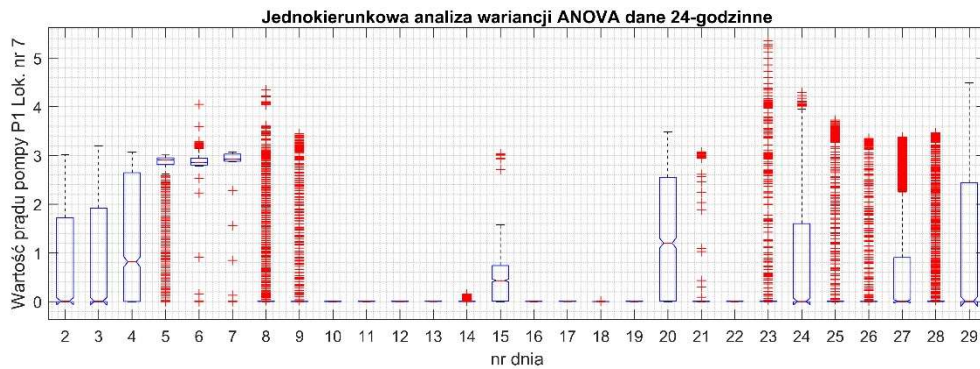


Rys. 5.2.20 Wyniki analizy wariancji ANOVA dla wartości parametru P2 (A) zarejestrowanych w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 3.

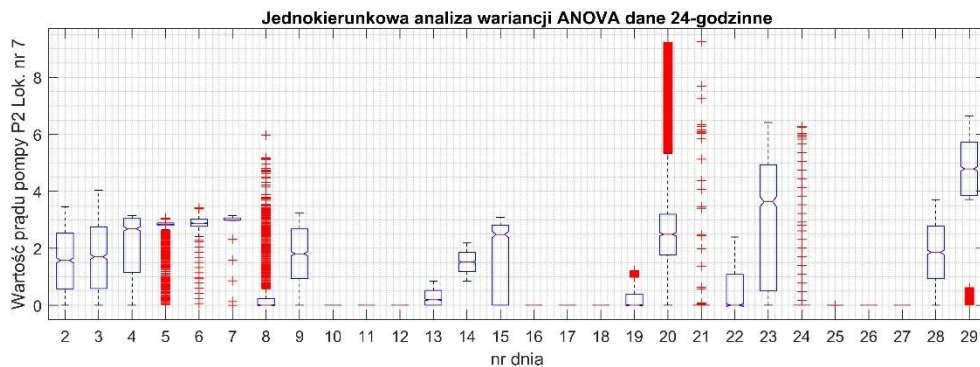
Na rys. 5.2.22 i 5.2.23 przedstawiono wyniki analizy wariancji ANOVA dla wartości prądu pobieranego przez pompy P1 i P2, zarejestrowanych w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 7. Na rys. 5.2.24 przedstawiono wyniki wielokrotnego testu porównawczego dla obu parametrów.



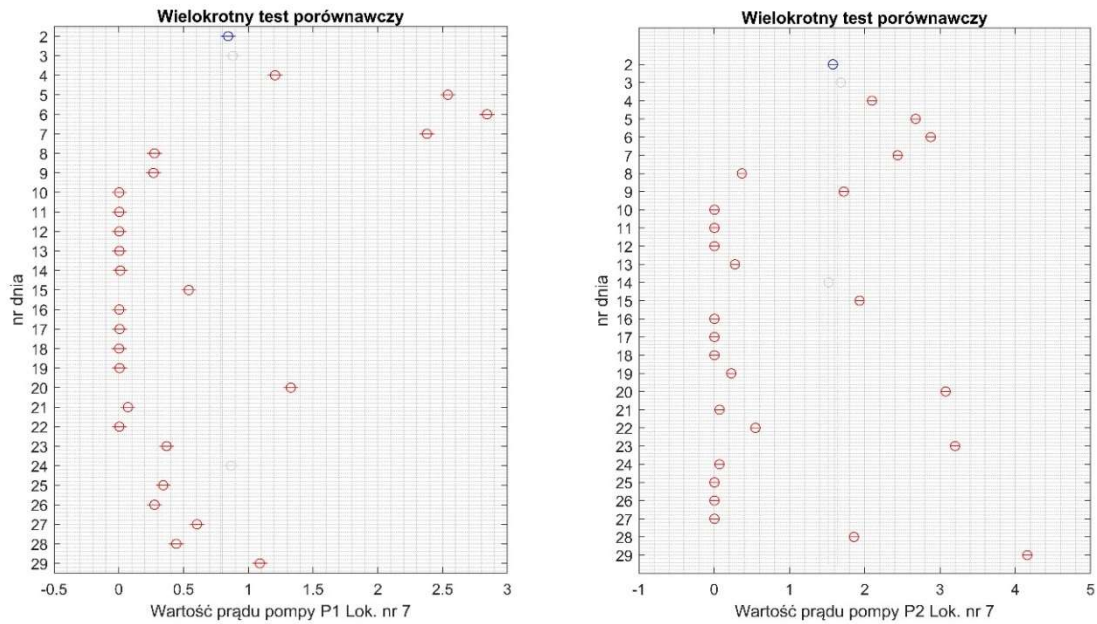
Rys. 5.2.21 Wyniki wielokrotnego testu porównawczego dla wartości parametru P1 (po lewej) i P2 (po prawej) (A) zarejestrowanych w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 3.



Rys. 5.2.22 Wyniki analizy wariancji ANOVA dla wartości parametru P1 (A) zarejestrowanych w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 7.



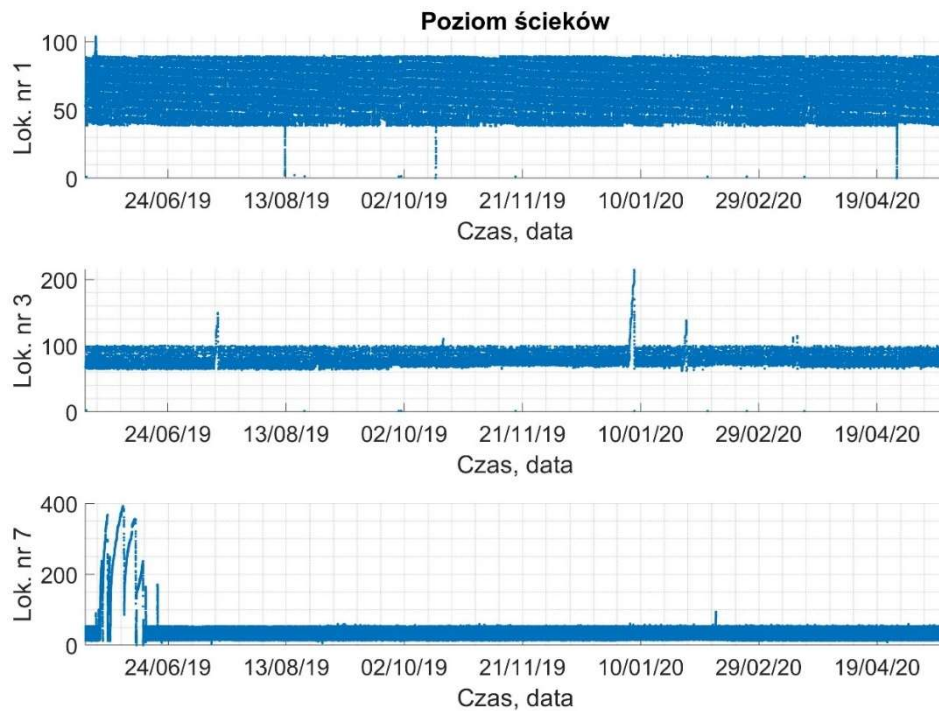
Rys. 5.2.23 Wyniki analizy wariancji ANOVA dla wartości parametru P2 (A) zarejestrowanych w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 7.



Rys. 5.2.24 Wyniki wielokrotnego testu porównawczego dla wartości parametru P1 (po lewej) i P2 (po prawej) (A) zarejestrowanych w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 7.

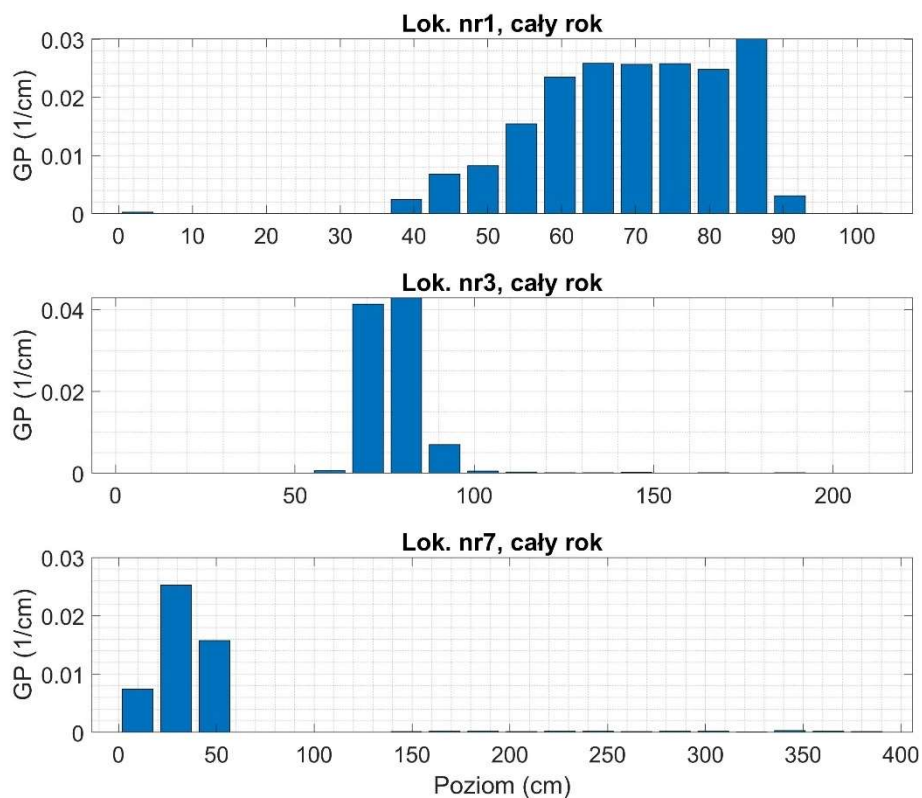
5.3. Analiza poziomu ścieków w zbiorniku

Poziom ścieków w zbiorniku (cm) jest kluczowym parametrem oceny prawidłowości działania całego systemu. W badaniach dla tego parametru przyjęto oznaczenie Poziom. Przebieg czasowy parametru Poziom w rozpatrywanym roku pomiarowych w lokalizacjach nr 1, nr 3 i nr 7 przedstawiono na rys. 5.3.1. Przebiegi czasowe poziomu ścieków w zbiorniku rejestrowane we wszystkich lokalizacjach zawarto w Załączniku nr 4.



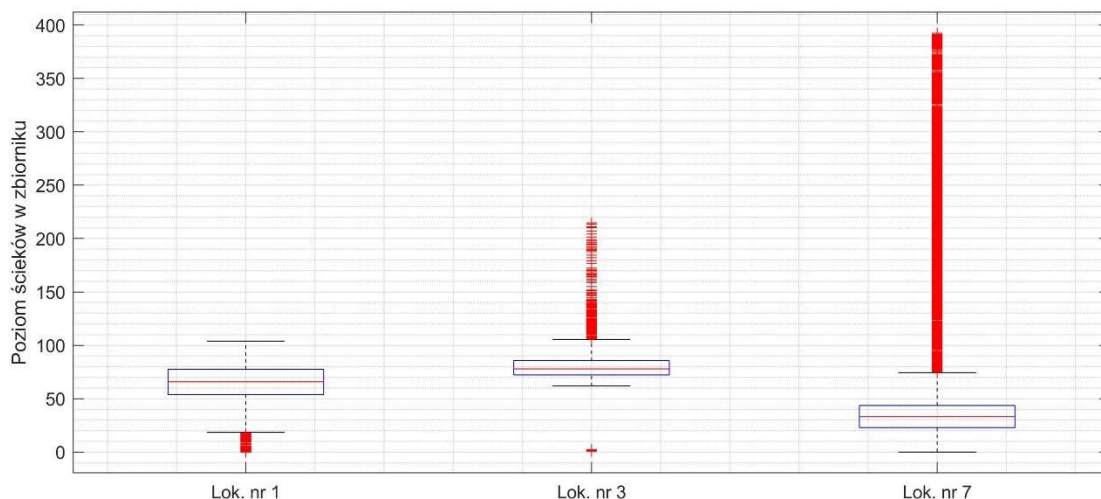
Rys.5.3.1 Przebieg czasowy poziomu ścieków (cm) w zbiorniku w całym roku pomiarowym dla lokalizacji nr 1 (u góry), nr 3 (w środku) i nr 7 (u dołu).

Na rys. 5.3.2 przedstawiono rozkłady gęstości prawdopodobieństwa obliczone dla poziomu ścieków w zbiorniku w lokalizacji nr 1, nr 3 i nr 7.



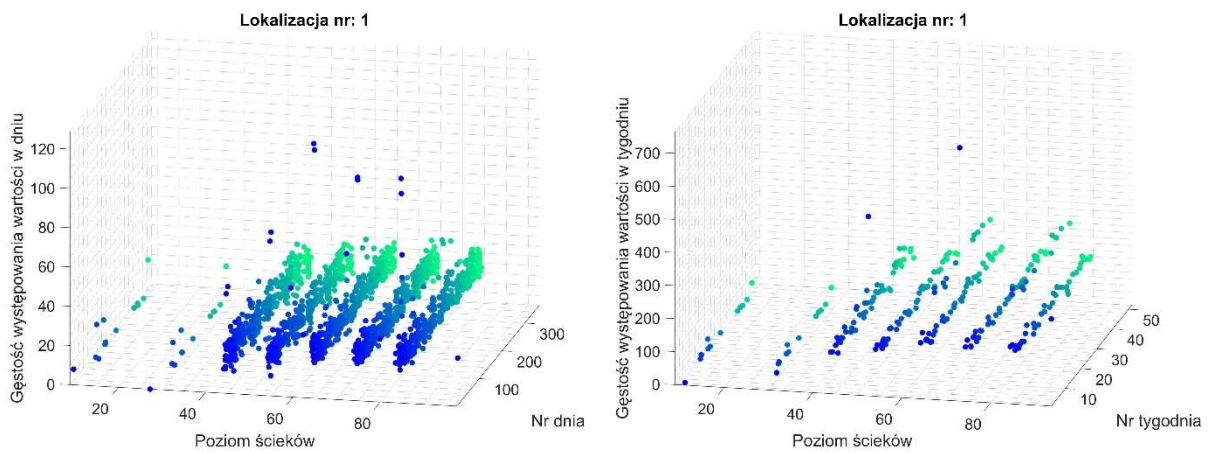
Rys. 5.3.2 Rozkład gęstości prawdopodobieństwa czasów pracy pompy P1 (u góry) i P2 (u dołu) zarejestrowane w lokalizacji nr 7 w całym roku pomiarowym.

Na rys. 5.3.3 przedstawiono wykresy pudełkowe obliczone dla poziomów ścieków zarejestrowanych w lokalizacjach nr 1, nr 3 i nr 7. Można zaobserwować, że wartości odstające występowały najczęściej w lokalizacji nr 7.

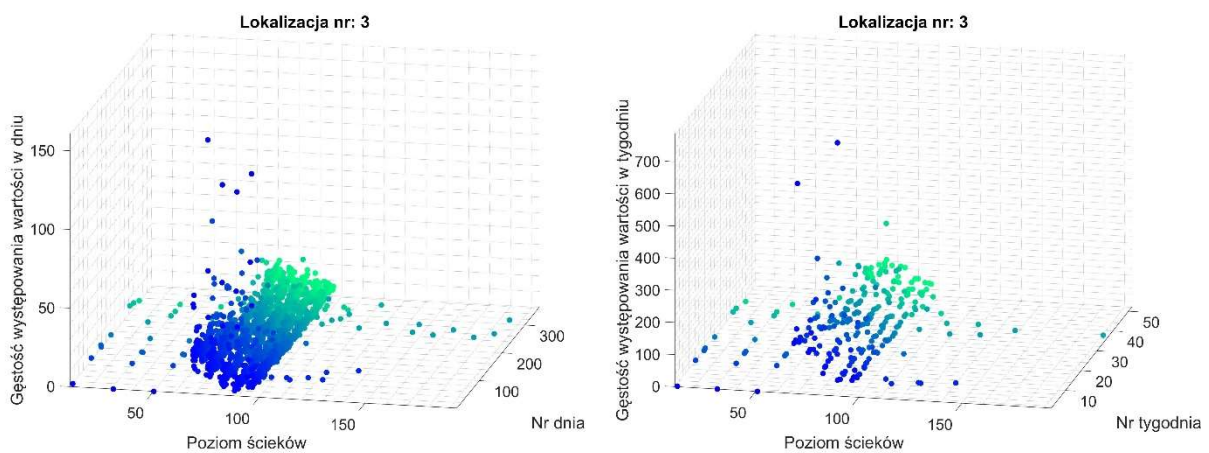


Rys. 5.3.3 Wykresy pudełkowe obliczone dla poziomu ścieków (cm) w lokalizacjach nr 1 , nr 3 i nr 7. Dane dotyczą całego roku pomiarowego.

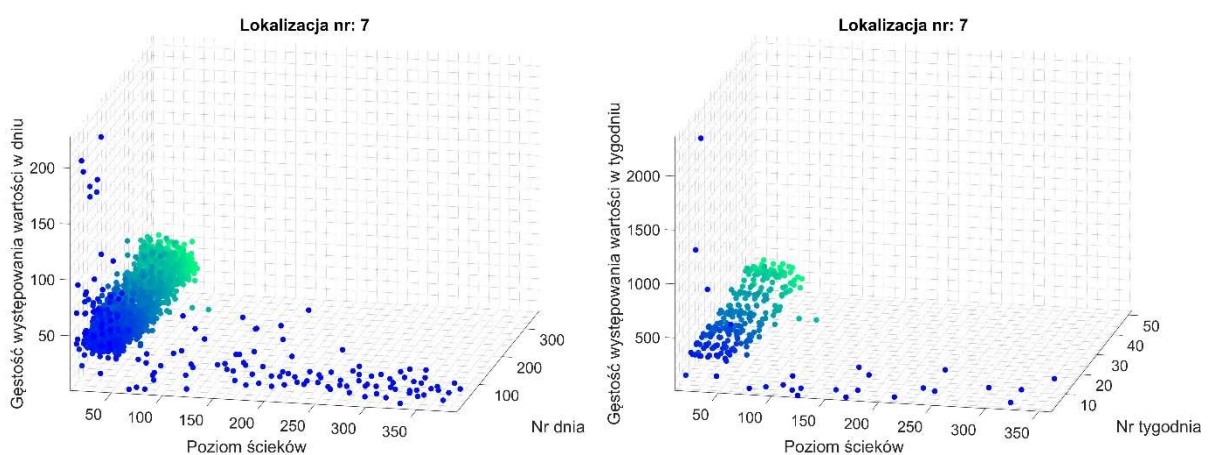
Na rys. 5.3.4 - 5.3.6 przedstawiono histogramy obliczone dla poziomów ścieków zarejestrowanych w lokalizacjach nr 1, nr 3 i nr 7, po lewej dla okresów jednodniowych (24-godzinnych) oraz po prawej dla okresów tygodniowych.



Rys. 5.3.4 Histogram obliczony dla poziomu ścieków (cm) w zbiorniku w lokalizacji nr 1. Po lewej: Dane dotyczą zestawów 24-godzinnych. Po prawej: Dane dotyczą zestawów 7-dniowych.

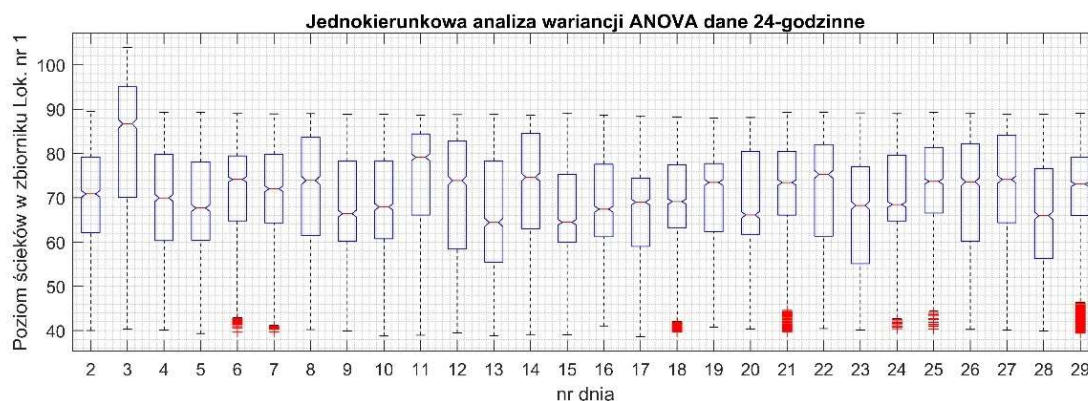


Rys. 5.3.5 Histogram obliczony dla poziomu ścieków (cm) w zbiorniku w lokalizacji nr 3. Po lewej: Dane dotyczą zestawów 24-godzinnych. Po prawej: Dane dotyczą zestawów 7-dniowych.

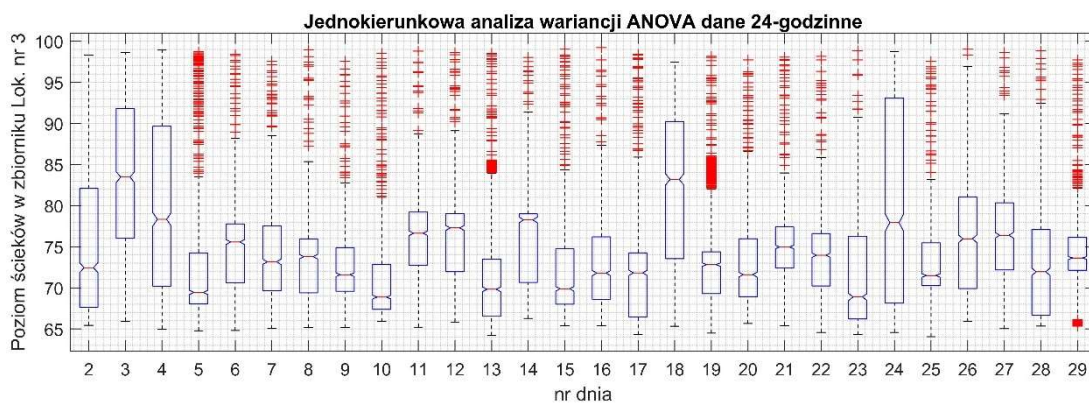


Rys. 5.3.6 Histogram obliczony dla poziomu ścieków (cm) w zbiorniku w lokalizacji nr 7. Po lewej: Dane dotyczą zestawów 24-godzinnych. Po prawej: Dane dotyczą zestawów 7-dniowych.

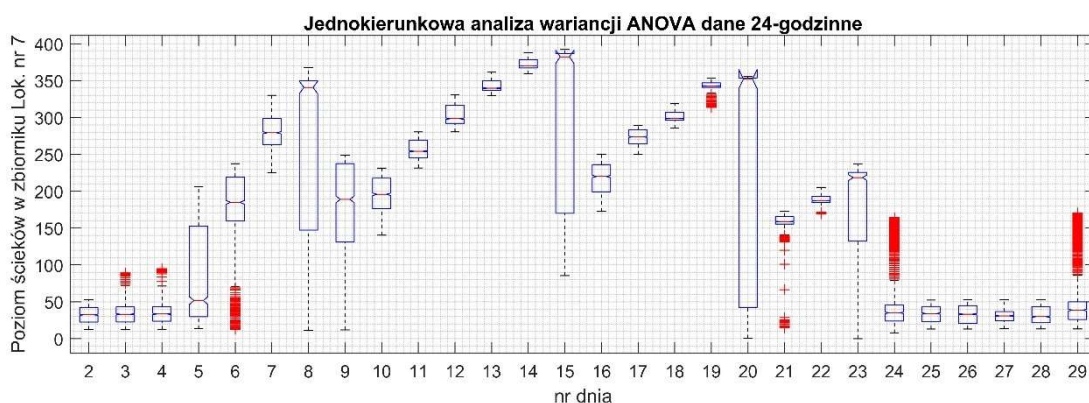
Na rys. 5.3.7 - 6.3.9 przedstawiono wyniki analizy wariancji ANOVA poziomów ścieków zarejestrowanych w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 1, nr 3 i nr 7.



Rys. 5.3.7 Wyniki analizy wariancji ANOVA dla poziomów ścieków (cm) w zbiorniku zarejestrowanych w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 1.

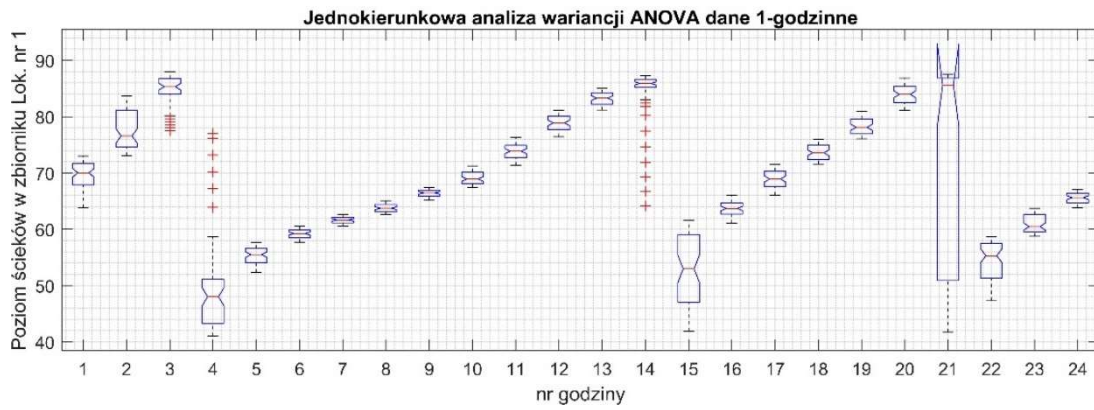


Rys. 5.3.8 Wyniki analizy wariancji ANOVA dla poziomów ścieków (cm) w zbiorniku zarejestrowanych w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 3.

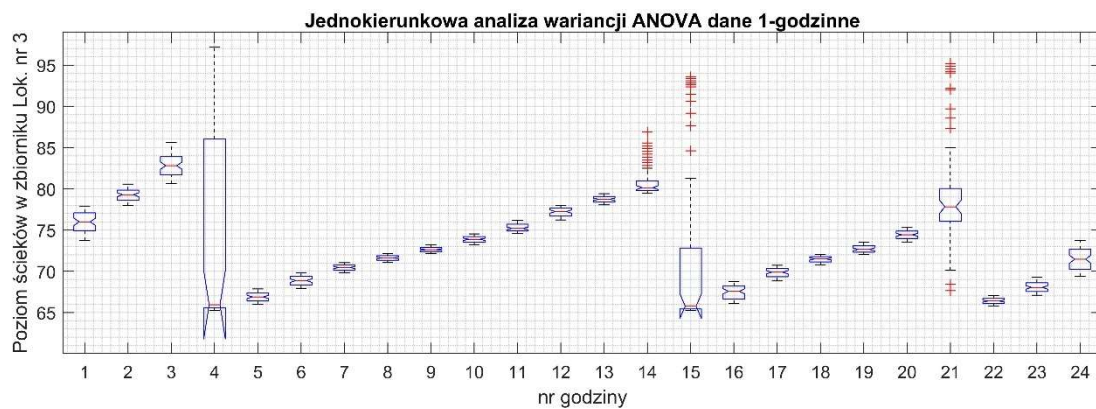


Rys. 5.3.9 Wyniki analizy wariancji ANOVA dla poziomów ścieków (cm) w zbiorniku zarejestrowanych w pierwszym miesiącu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 7.

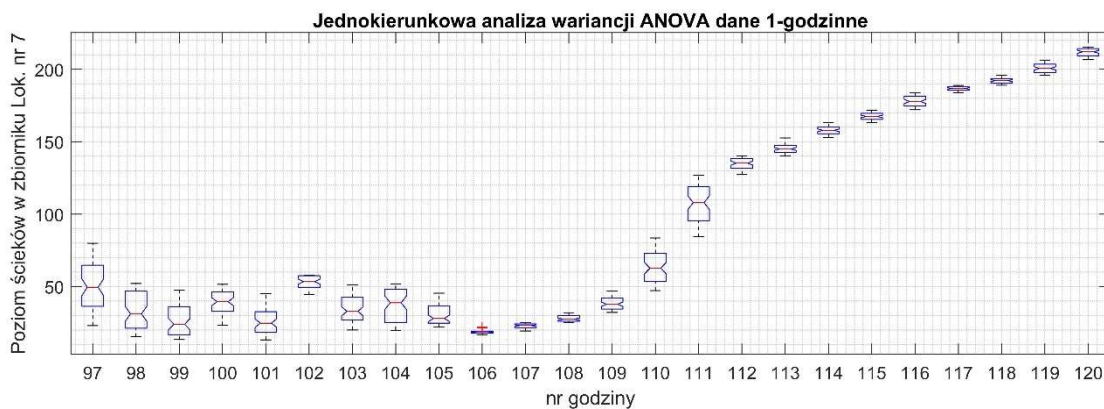
Dla wartości poziomów ścieków w zbiornikach dane pomiarowe podzielono również na okresy 1-godzinne. Na rys. 5.3.10 - 6.3.12 przedstawiono wyniki analizy wariancji ANOVA poziomów ścieków zarejestrowanych w pierwszym i piątym dniu pomiarowym. Na rys. 5.3.13 - 6.3.15 przedstawiono odpowiadające im wyniki wielokrotnego testu porównawczego.



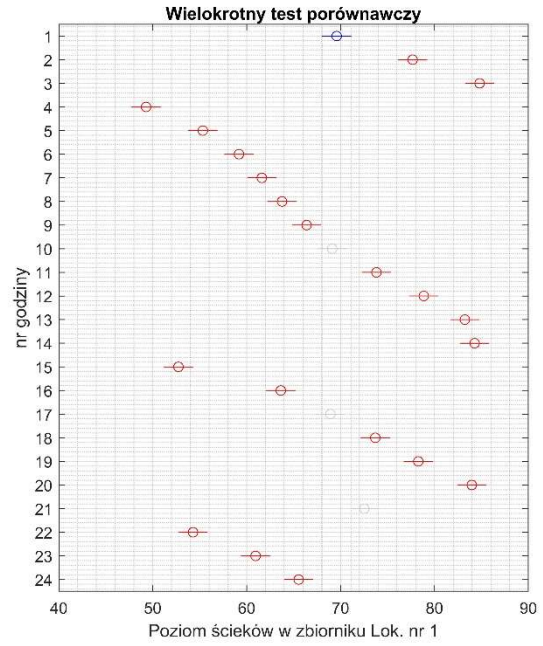
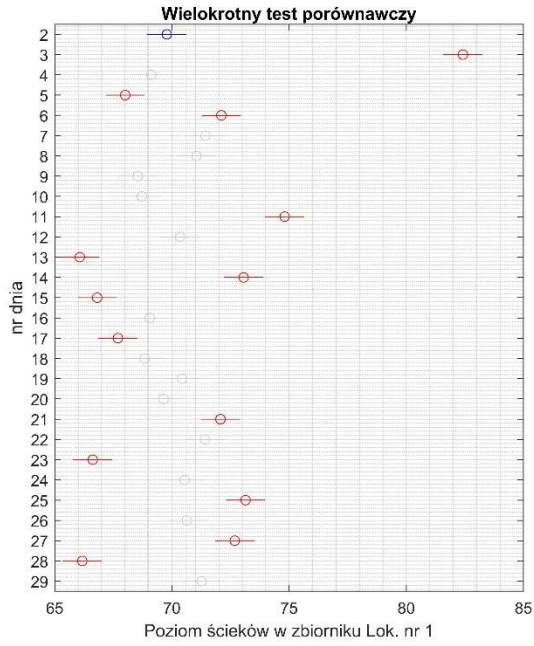
Rys. 5.2.10 Wyniki analizy wariancji ANOVA dla poziomów ścieków (cm) w zbiorniku zarejestrowanych w pierwszym dniu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 1.



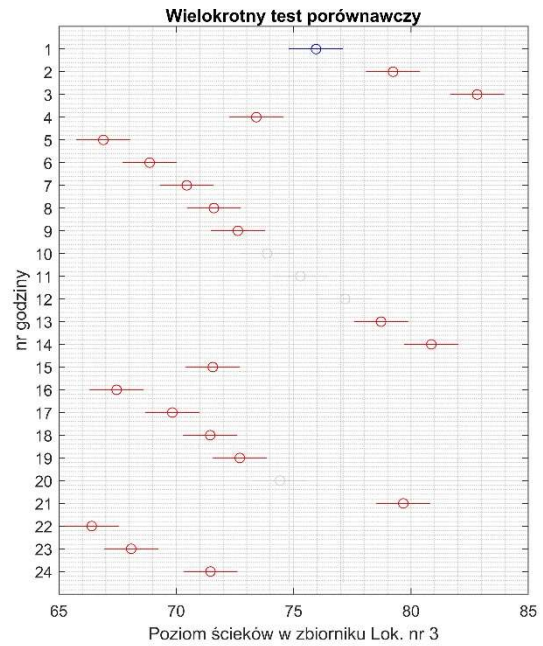
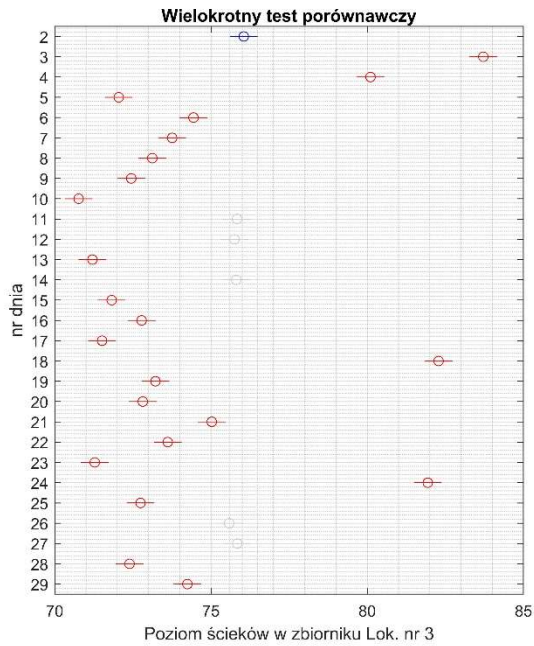
Rys. 5.2.11 Wyniki analizy wariancji ANOVA dla poziomów ścieków (cm) w zbiorniku zarejestrowanych w pierwszym dniu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 3.



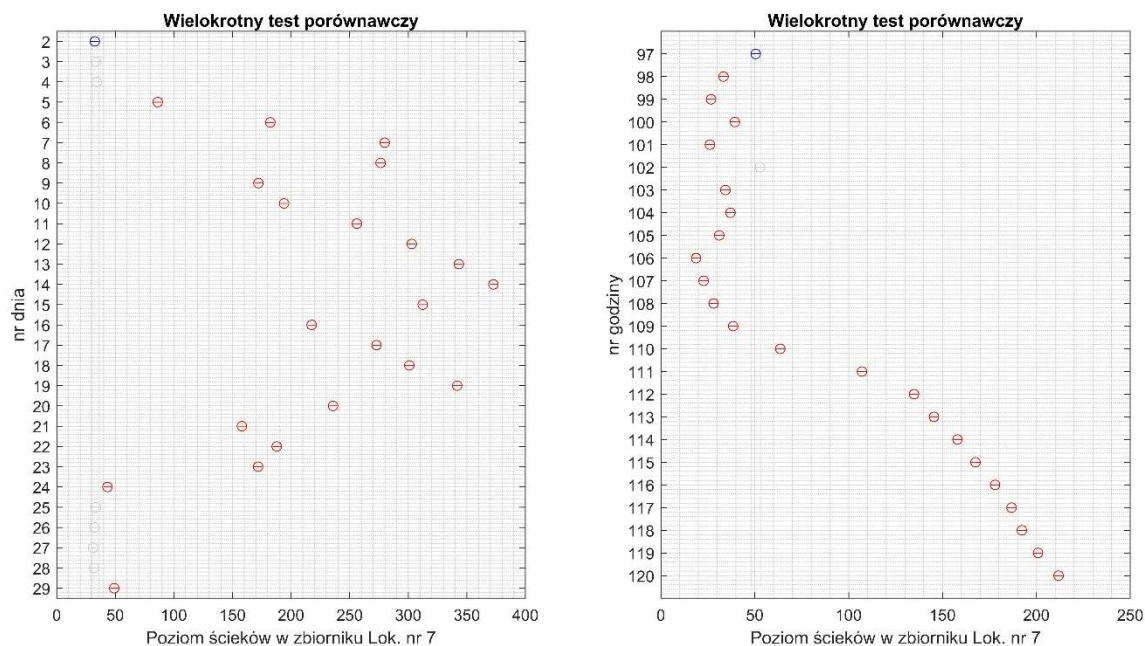
Rys. 5.2.12 Wyniki analizy wariancji ANOVA dla poziomów ścieków (cm) w zbiorniku zarejestrowanych w piątym dniu rozpatrywanego roku dla lokalizacji nr 7.



Rys. 5.3.13 Wyniki wielokrotnego testu porównawczego dla poziomu ścieków (cm) w lokalizacji nr 1. Po lewej: Dane dotyczą zestawów 24-godzinnych (pierwszy miesiąc). Po prawej: Dane dotyczą zestawów 1-godzinnych (pierwszy dzień).



Rys. 5.3.14 Wyniki wielokrotnego testu porównawczego dla poziomu ścieków (cm) w lokalizacji nr 3. Po lewej: Dane dotyczą zestawów 24-godzinnych (pierwszy miesiąc). Po prawej: Dane dotyczą zestawów 1-godzinnych (pierwszy dzień).



Rys. 5.3.15 Wyniki wielokrotnego testu porównawczego dla poziomu ścieków (cm) w lokalizacji nr 7. Po lewej: Dane dotyczą zestawów 24-godzinnych (pierwszy miesiąc). Po prawej: Dane dotyczą zestawów 1-godzinnych (pierwszy dzień).

5.4. Analiza korelacyjna. Badania współzależności między parametrami pracy pompowni

Celem zbadania czy istnieją liniowe zależności wzajemne między poszczególnymi parametrami pracy pompowni, wykonano analizę korelacyjną, przy czym obliczano współczynnik korelacji Pearsona (1). Współczynnik korelacji Pearsona wykorzystywany jest do badania związków prostoliniowych badanych zmiennych x i y , w których zwiększenie wartości jednej z cech powoduje proporcjonalne zmiany średnich wartości drugiej cechy (wzrost lub spadek).

$$r_{xy} = \frac{cov(x,y)}{Sd_x Sd_y} \quad (1)$$

$$cov(x,y) = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n} \quad (2)$$

$$Sd_x = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (3)$$

$$Sd_y = \frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{n} \quad (4)$$

gdzie: x_i - i-ta składowa wektora danych \mathbf{x} , y_i - i-ta składowa wektora danych \mathbf{y} , \bar{x} , \bar{y} - średnie arytmetyczne obu wektorów, n - długość wektorów danych.

Korelacja, czyli współzależność cech (wektorów danych), określa wzajemne powiązania pomiędzy wybranymi zmiennymi. Charakteryzując korelację dwóch wektorów oblicza się dwa czynniki: kierunek (dodatni/ujemny) oraz siłę (wartość r).

- korelacja dodatnia (wartość współczynnika korelacji od 0 do 1) – informuje, że wzrostowi wartości jednej zmiennej towarzyszy wzrost średnich wartości drugiej zmiennej,
- korelacja ujemna (wartość współczynnika korelacji od -1 do 0) - informuje, że wzrostowi wartości jednej zmiennej towarzyszy spadek średnich wartości drugiej zmiennej.

Siłę związków korelacyjnych klasyfikuje się następująco:

- poniżej 0,2 - korelacja słaba (praktycznie brak związku),
- 0,2 – 0,4 - korelacja niska (zależność wyraźna),
- 0,4 – 0,6 - korelacja umiarkowana (zależność istotna),
- 0,6 – 0,8 - korelacja wysoka (zależność znaczna),
- 0,8 – 0,9 - korelacja bardzo wysoka (zależność bardzo duża),
- 0,9 – 1,0 - zależność praktycznie pełna.

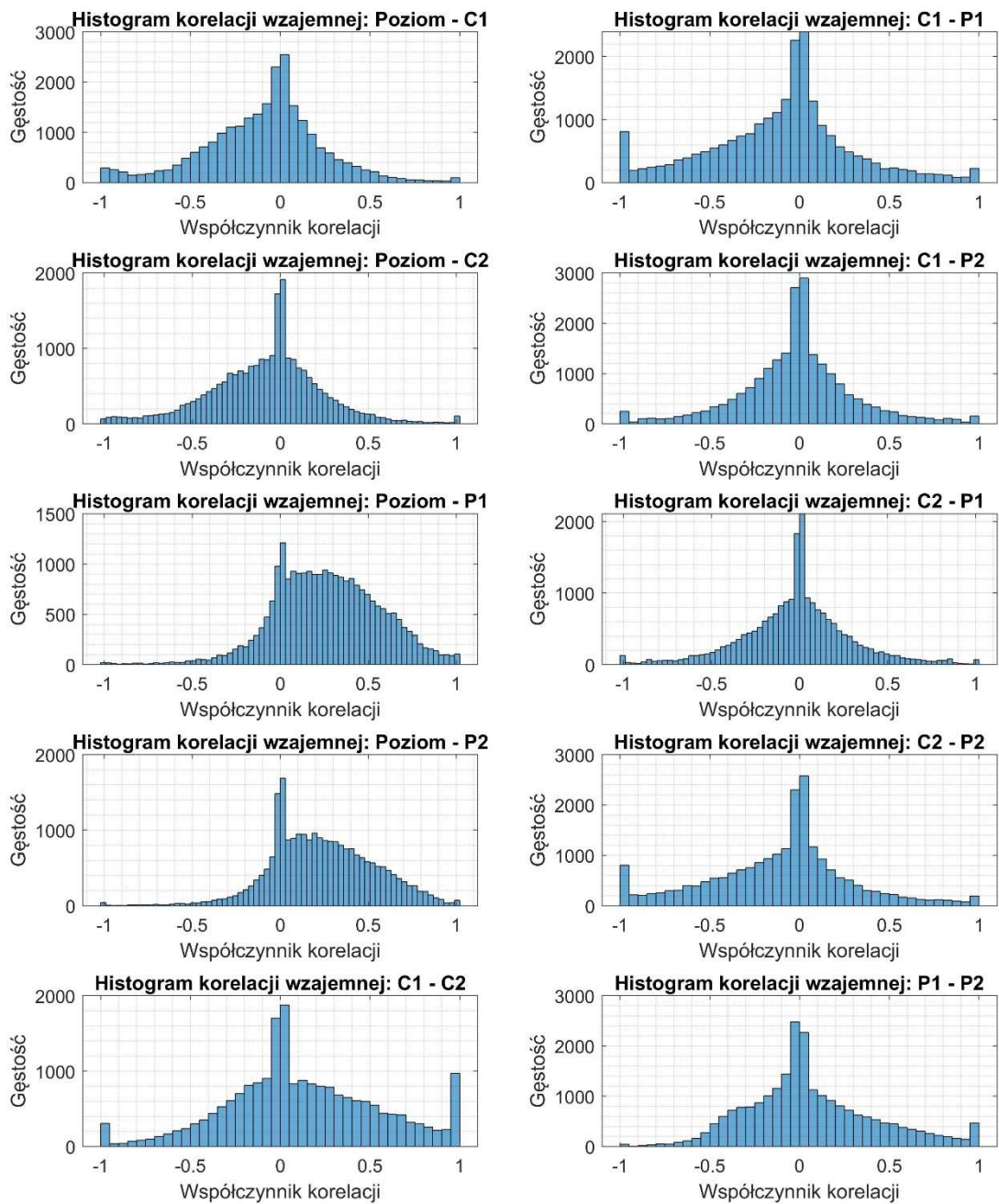
Analizę korelacyjną wykonano na danych interpolowanych, przy czym rozpatrywano następujące zbiory danych:

- dane podzielone na okresy 1-godzinne,
- dane podzielone na okresy 24-godzinne,
- dane podzielone na okresy 1-miesięczne.

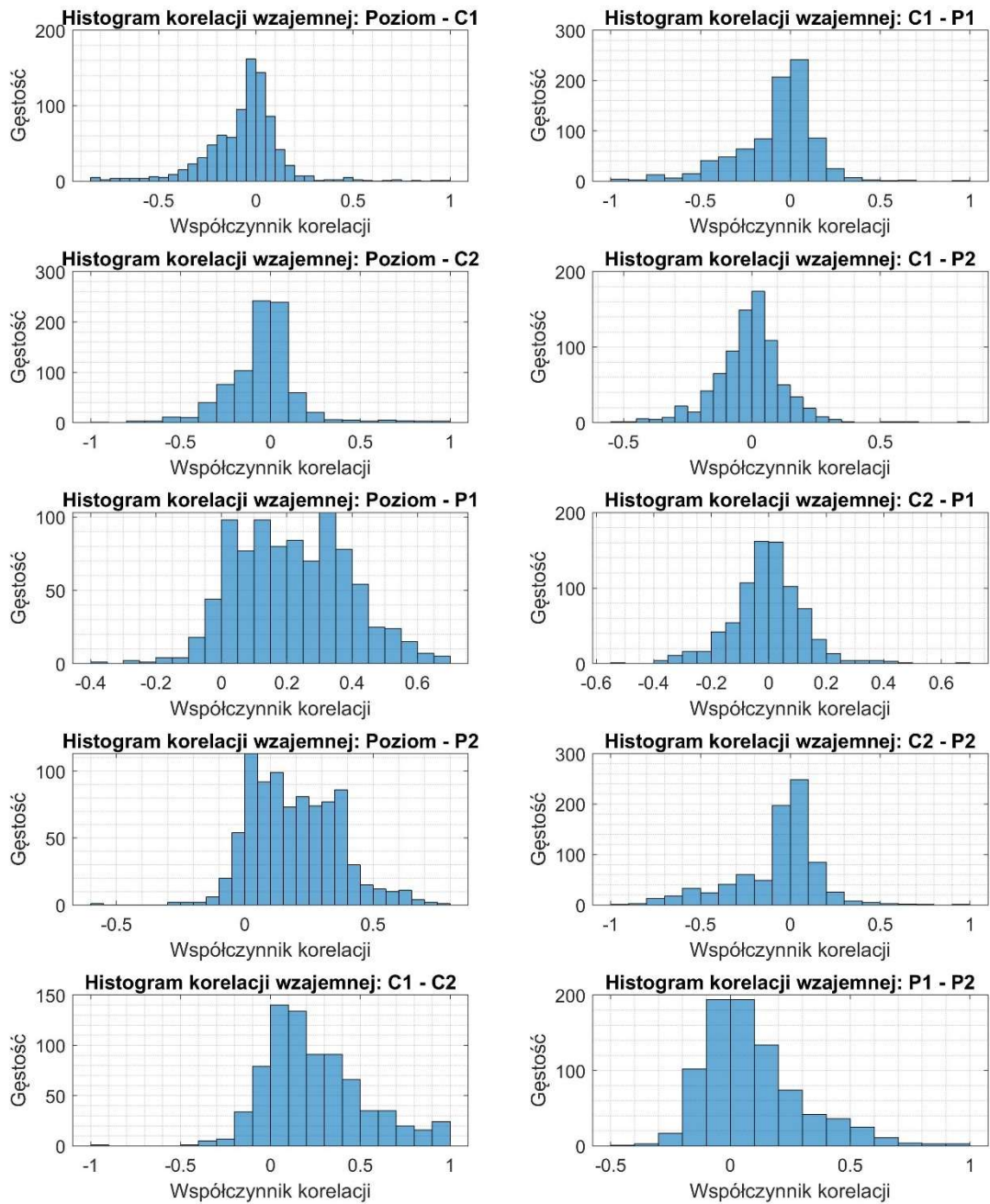
W następnej kolejności obliczone współczynniki uśredniono dla poszczególnych lokalizacji oraz obliczono histogramy. Na rys. 5.4.1 – 5.4.3 przedstawiono rozkłady gęstości występowania współczynnika korelacji wzajemnej dla poszczególnych par parametrów.

Analiza zależności dla okresów jednodniowych i miesięcznych, poza zależnością czasów pracy C1 i C2, nie wykazała istnienia zależności w większości przypadków.

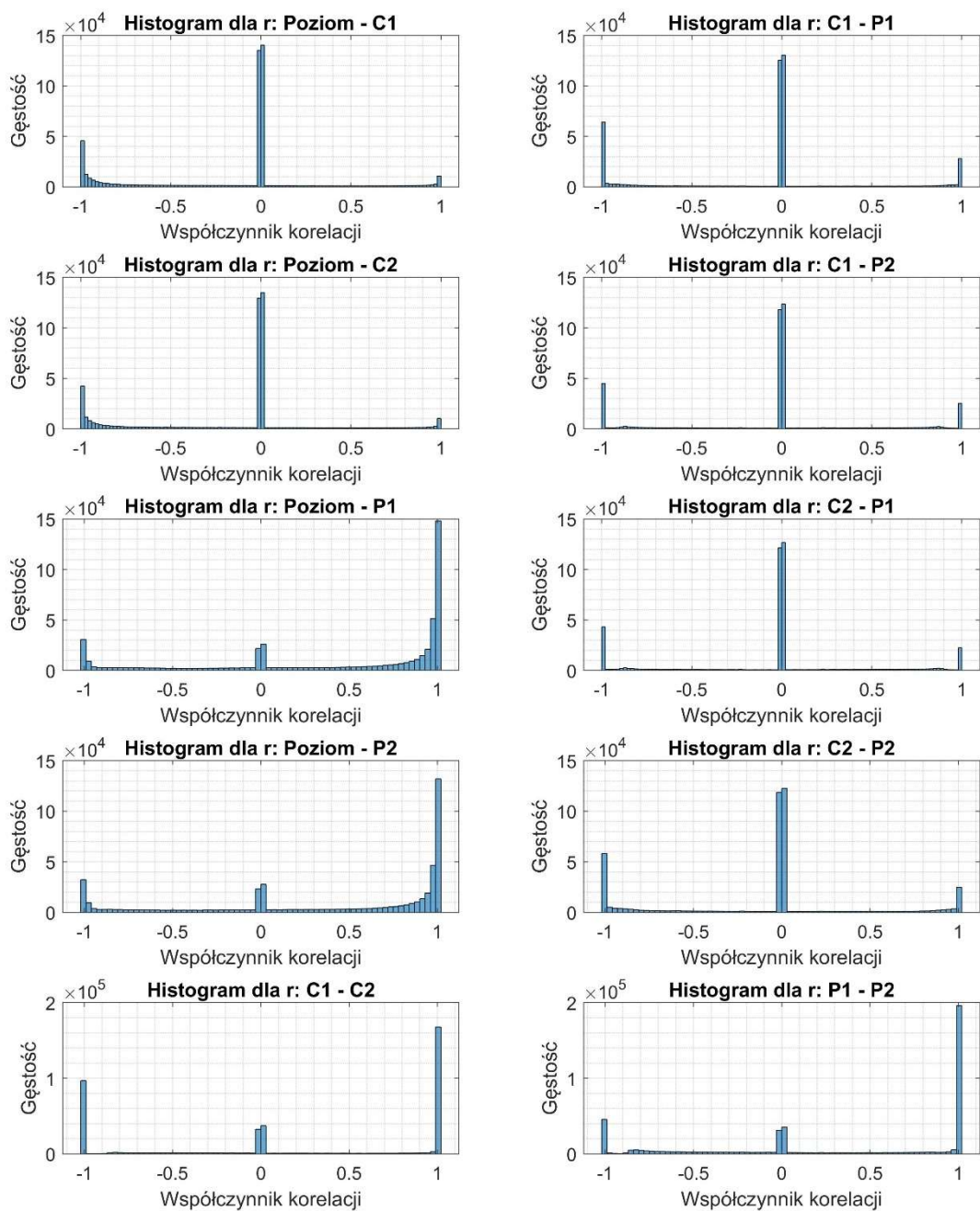
Dla okresów jednodniowych, widoczna jest jednak pewna część pomiarów gdzie obserwowano ujemną zależność między C2 i P2 oraz C1 i C2.



Rys. 5.4.1 Histogramy obliczone dla wartości współczynników korelacji wzajemnej między poszczególnymi parametrami, dla wszystkich lokalizacji. Korelacja wzajemna obliczona na podstawie danych podzielonych na okresy jednodniowe.



Rys. 5.4.2 Histogramy obliczone dla wartości współczynników korelacji wzajemnej między poszczególnymi parametrami, dla wszystkich lokalizacji. Korelacja wzajemna obliczona na podstawie danych podzielonych na okresy miesięczne.



Rys. 5.4.3 Histogramy obliczone dla wartości współczynników korelacji wzajemnej między poszczególnymi parametrami, dla wszystkich lokalizacji. Korelacja wzajemna obliczona na podstawie danych podzielonych na okresy jednogodzinne.

Najbardziej czytelne zależności dodatnie lub ujemne obserwuje się dla analizy danych podzielonych na okresy jednogodzinne. W tym wypadku obserwuje się silne zależności Poziomu i prądu zużywanego przez pompy P1 i P2 oraz silną zależność między wartościami prądów obu pomp. Obserwowano również silną zależność czasów pracy C1 i C2 jednak, w również dużej mierze, były one odwrotnie proporcjonalne.

Ciekawą obserwacją jest też silna ujemna zależność między poziomem ścieków a czasami pracy C1 i C2. Wynika z tej obserwacji, że podnoszenie się poziomu ścieków powoduje skracanie czasu pracy pomp, przy czym obie pompy zużywają wtedy więcej prądu.

6. Modelowanie rozkładów gęstości prawdopodobieństwa

W następnej kolejności dla parametrów C1 i C2 przeprowadzono proces regresji, który miała na celu dobór optymalnego modelu funkcji gęstości prawdopodobieństwa (FGP) do obliczonych rozkładów. W badaniach zaproponowano cztery modele, które zdefiniowane są w równaniami (5)-(8). Modele te, poza modelem M3 (7), charakteryzują się tym, że są to modele dwuparametryczne. Ich złożoność obliczeniowa jest niewielka, co stanowi dużą zaletę do zastosowań w procesach diagnostyki-online w warunkach przemysłowych. Istotnym argumentem jest również fakt, że zaproponowane modele charakteryzują się stabilnością obliczeniową z punktu widzenia implementacji programistycznej w mikroprocesorowym systemie diagnostycznym.

$$M1 = \frac{1}{\pi\sigma\left[1+\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]} \quad (5)$$

gdzie: M1 – model Cauchy’ego, μ to położenie, wartość $\sigma > 0$ to parametr skali.

$$M2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (6)$$

gdzie: M2 – model Gaussa, μ to wartość oczekiwana, wartość $\sigma > 0$ to odchylenie standardowe.

$$M3 = \frac{\gamma}{\sigma} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^\gamma} \quad (7)$$

gdzie: M3 – model Weibulla, μ to położenie, wartość $\sigma > 0$ to parametr skali, wartość $\gamma > 0$ to parametr kształtu.

$$M4 = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (8)$$

gdzie: M4 – model Galtona, μ to wartość oczekiwana, wartość $\sigma > 0$ to odchylenie standardowe.

W celu określenia stopnia dopasowania modeli rozkładów do danych wyliczono współczynnik korelacji liniowej Pearsona r (3) dla wektora danych empirycznych względem wektora danych estymowanych oraz wartość normy Euklidesowej (9) dla różnicy obu wektorów (tzw. norma reszt lub norma rezyduów).

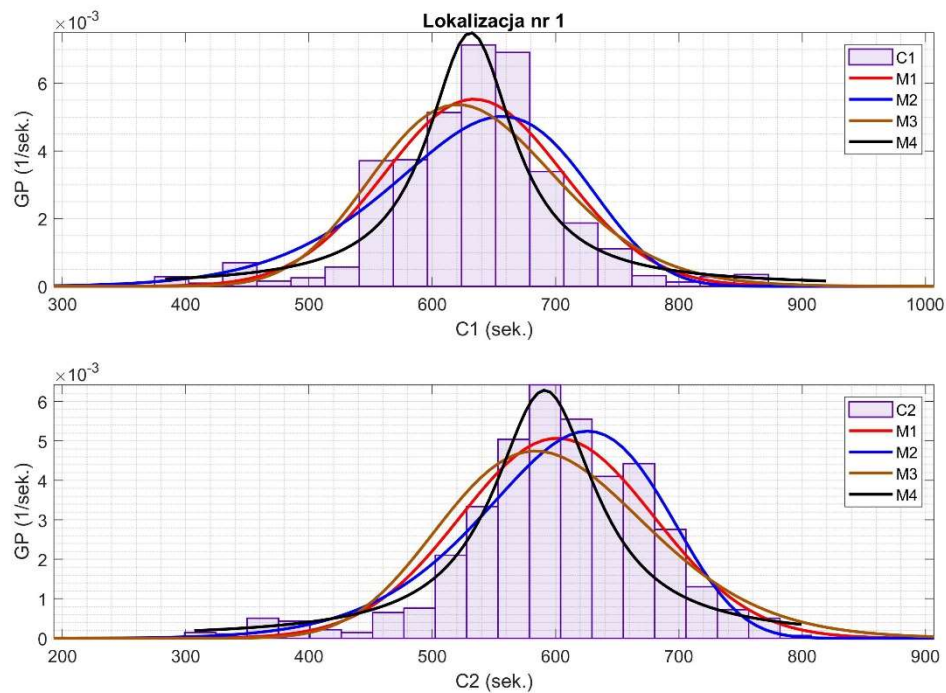
$$\|X_p - X_e\| = \|\vartheta\| = \sqrt{\sum_{k=1}^n |\vartheta_k|^2} \quad (9)$$

gdzie: X_p - wektor danych pomiarowych, X_e - wektor danych estymowanych, n - długość wektora danych.

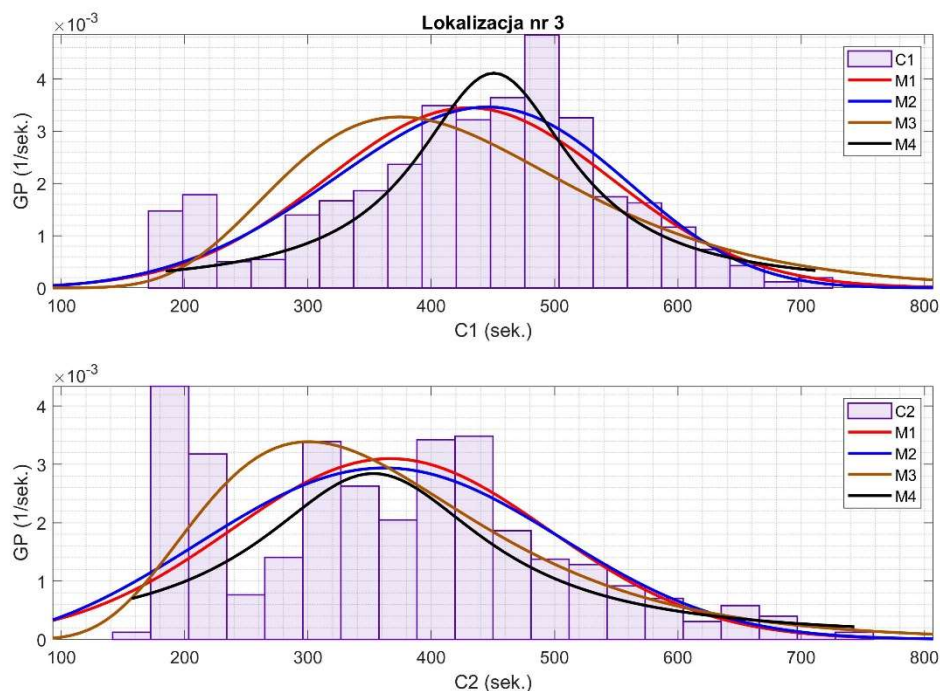
Przed przystąpieniem do procesu modelowania, należy dokonać wyboru zestawów danych pomiarowych, co zwane jest potocznie „czyszczeniem danych”. Dopasowanie modeli FGP wykonano dla lokalizacji, które posiadały wystarczającą liczbę danych pomiarowych. Z

powodu niepełności lub niespójności dostępnych danych, z analiz wyłączono dane pomiarowe zarejestrowane w następujących lokalizacjach: 6, 13, 14, 50, 54, 71 i 72. Analizę przeprowadzono dla 72 lokalizacji, wyłączając zestawy danych niepełnych lub niespójnych. W procesie regresji zastosowano algorytm genetyczny, który optymalizował parametry czterech modeli M1, M2, M3 i M4, minimalizując funkcję celu, którą stanowiła norma rezyduów.

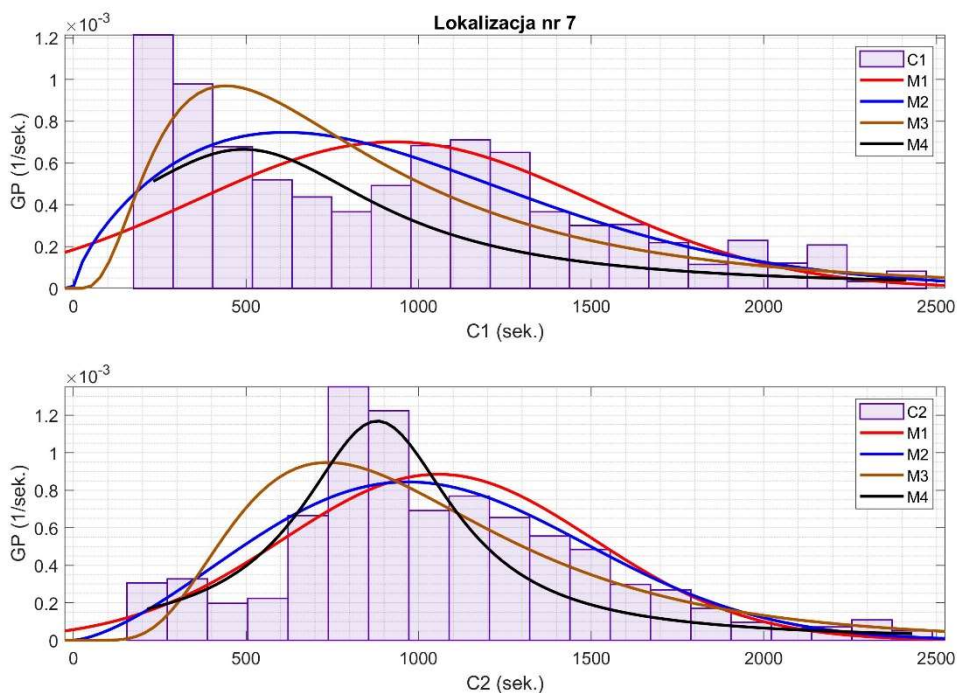
Obrazy przedstawiające histogramy obliczone dla parametrów C1 i C2, zarejestrowanych w pozostałych lokalizacjach wraz z dopasowaniem modeli zawarto w Załączniku nr 5. Na rys. 6.1 - 6.3 przedstawiono wyniki procesu modelowania dla rozpatrywanych w rozprawie lokalizacji, tj. nr 1, nr 3 i nr 7. Rysunki przedstawiają histogramy dla danych pozyskanych z okresów prawidłowej pracy pompowni. U góry rysunków przedstawiono wyniki dla parametru C1, u dołu, dla parametru C2.



Rys. 6.1 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 1 wraz z dopasowaniem modeli.



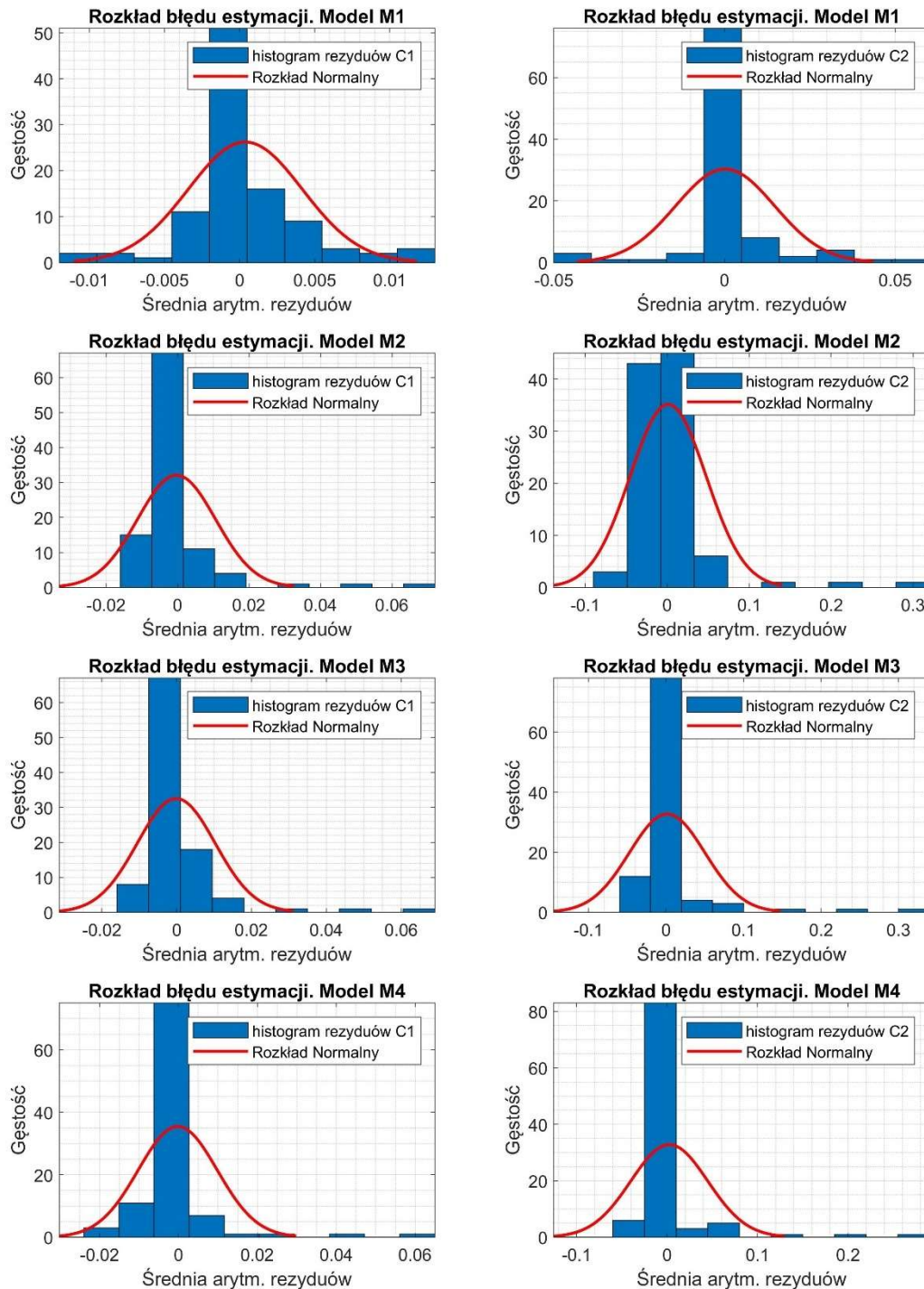
Rys.6.2 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 3 wraz z dopasowaniem modeli.



Rys. 6.3 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 7 wraz z dopasowaniem modeli.

Na rys. 6.4 przedstawiono w sposób zbiorczy uśrednione dla wszystkich lokalizacji rozkłady błędów estymacji modeli M1-M4. Dodatkowo na wykresach zaznaczono estymaty modeli rozkładu normalnego, co pozwoliło na potwierdzenie, że błędy estymacji, poza wartościami w większości bliskimi zera, mają rozkład zbliżony do normalnego. Wykonana analiza

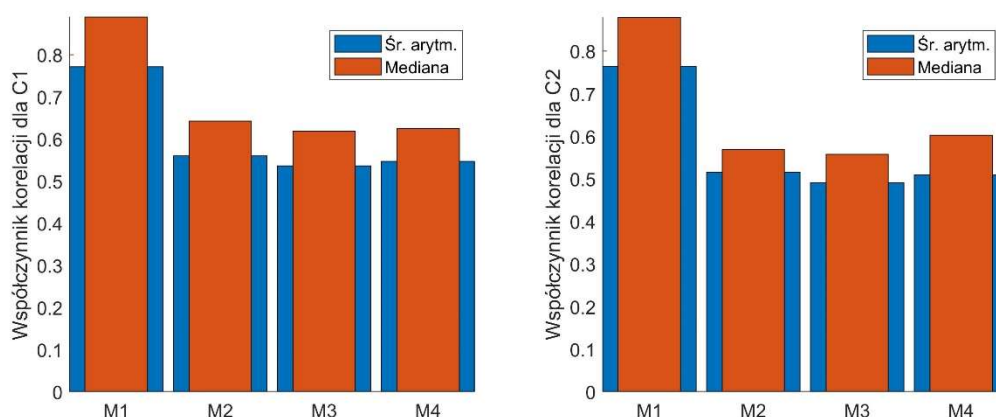
potwierdziła tym samym dobre dopasowanie wszystkich rozpatrywanych modeli do danych empirycznych



Rys. 6.4 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 7 wraz z dopasowaniem modeli.

Aby w sposób jakościowy określić stopień dopasowania zaproponowanych modeli FGP, poza wartością normy rezyduów, określano również wartość współczynnika korelacji Pearsona. Na rys. 6.5 przedstawiono zestawienie porównawcze wartości współczynnika korelacji obliczonego dla rozpatrywanych modeli dla parametrów C1 i C2 w poszczególnych lokalizacjach, jako wartości średnie arytmetyczne oraz wartości medianowe. Na rysunku

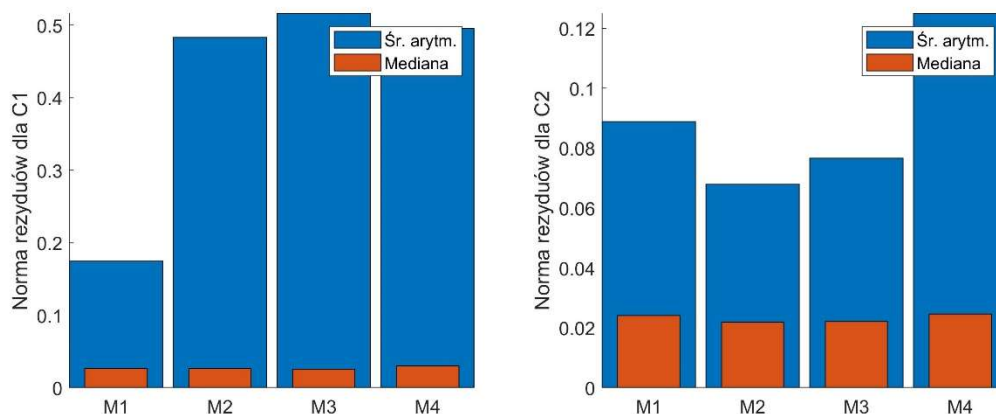
można zaobserwować, że najlepsze dopasowanie pod kątem współczynnika korelacji uzyskano dla modelu M1, niezależnie od pompy.



Rys. 6.5 Zestawienie wyników procesu doboru modelu FGP na podstawie wartości współczynnika korelacji uzyskanego dla wszystkich rozpatrywanych lokalizacji.

Na rys. 6.6 przedstawiono zestawienie porównawcze wartości normy rezyduów obliczonych dla rozpatrywanych modeli, jako wartości średnie i medianowe. Z rysunku można odczytać, że najlepsze dopasowanie uzyskano dla modelu M1 w przypadku pompy P1, natomiast dla danych rejestrowanych dla pompy P2, lepsze dopasowanie uzyskano dla modelu M2 i M3. Wartości medianowe w obu przypadkach są na podobnym poziomie.

Ostatecznie na potrzeby systemu diagnostycznego wybrano model M1, jednak dla każdej z pomp i lokalizacji, parametry modelu mogą być inne.



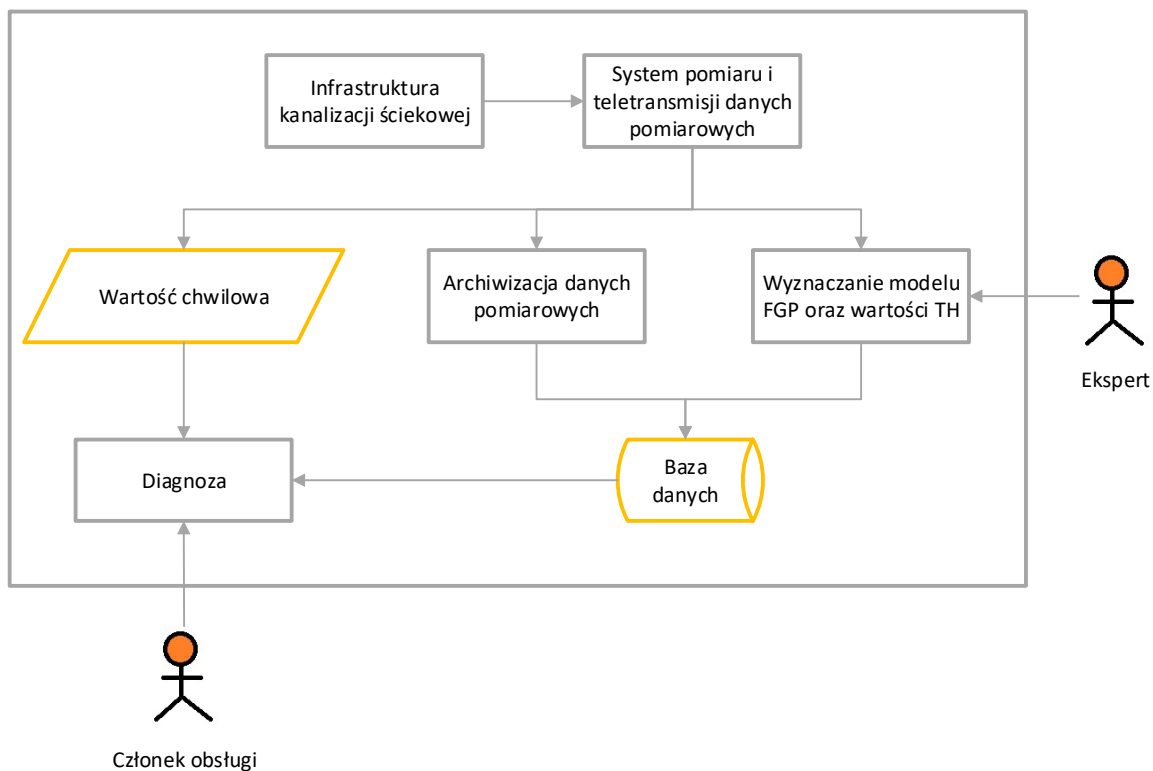
Rys. 6.6 Zestawienie wyników procesu doboru modelu FGP na podstawie wartości normy rezyduów uzyskanych dla wszystkich rozpatrywanych lokalizacji.

7. Koncepcja systemu diagnostyki pompowni ścieków

Wyniki prac wykonanych w ramach realizacji pracy doktorskiej stanowiły podstawę do zaproponowania koncepcji systemu do zastosowania w diagnostyce pomp pracujących w warunkach rzeczywistych podczas ich normalnej pracy. Na podstawie wyników analiz stwierdzono, że parametrem o największym potencjale diagnostycznym, poza poziomem ścieków, który jest aktualnie monitorowany przez system SCADA, jest czas pracy pomp,

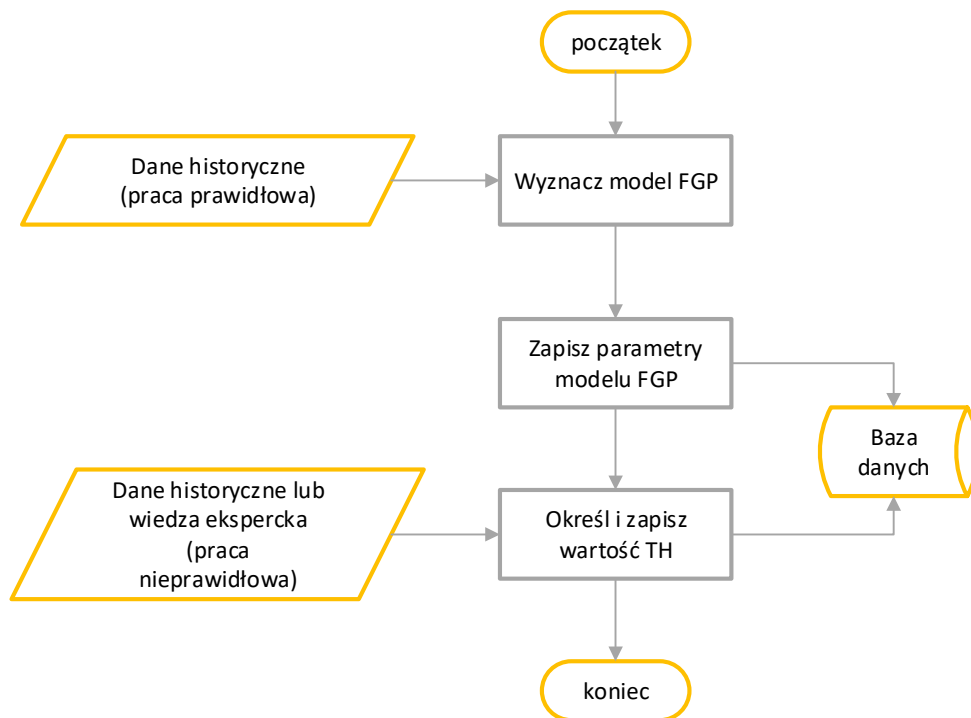
zanurzonych w zbiorniku. Wartość prądu ma relatywnie stabilny charakter, dlatego ten parametr może co najwyżej świadczyć o tym, że pompa jest załączona lub wyłączona.

Zaproponowany ogólny schemat działania systemu diagnostycznego przedstawiono na rys. 7.1. Proponowany prototypowy układ przeznaczony jest do oceny bieżących wyników pomiarów parametrów pracy pomp P1 i P2 pod kątem prawidłowości działania pompowni. Proponowany system może zostać relatywnie łatwo zintegrowany z istniejącym systemem SCADA oraz z systemem pomiaru i teletransmisji danych pomiarowych. Bieżąca praca systemu będzie opierała się na archiwizacji danych pomiarowych, cyklicznym procesie wyznaczania modeli FGP i wartości parametrów TH, które zapisywane będą w bazie danych oraz na procesie diagnostycznym wartości chwilowej parametrów pracy pompy P1 i P2.

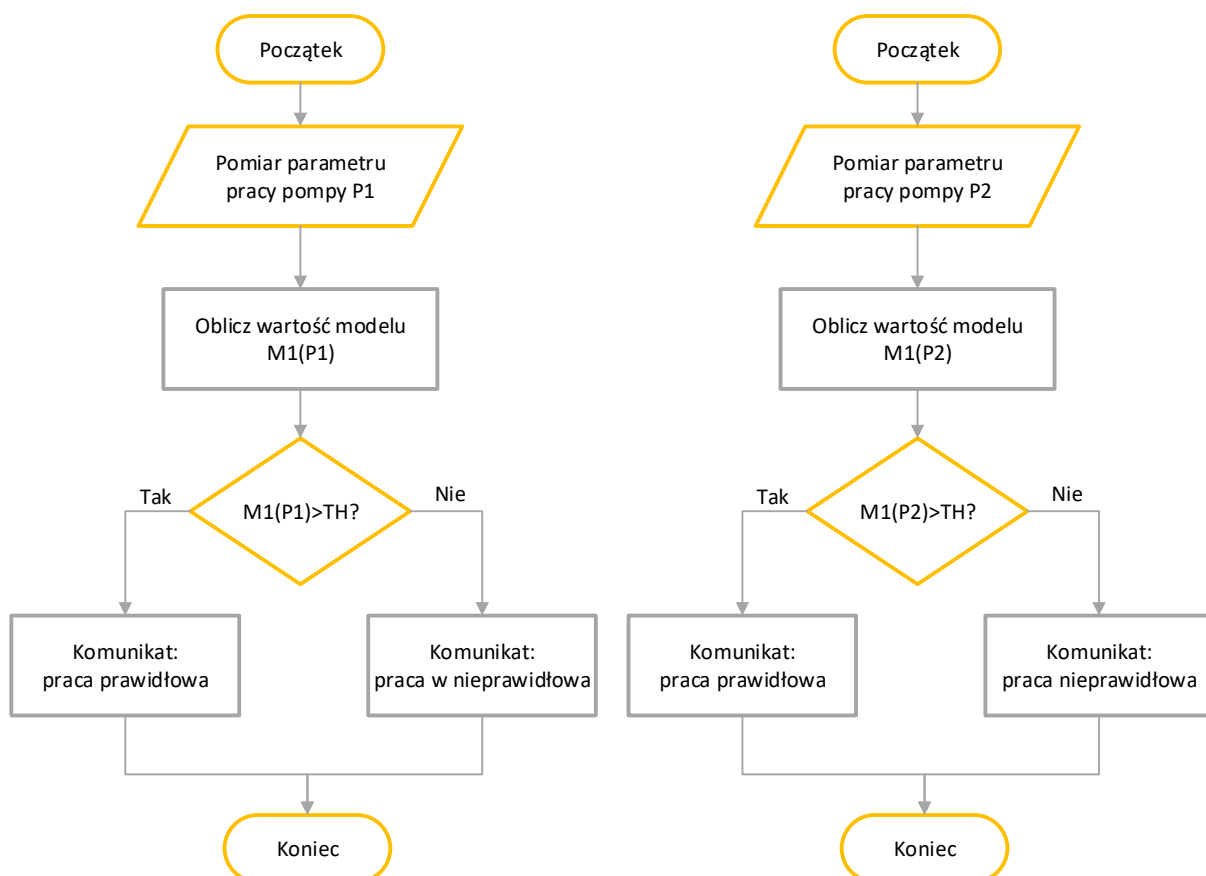


Rys. 7.1 Schemat ogólny działania systemu diagnostycznego

Czasy pracy obu pomp mogą się różnić w zależności od lokalizacji i rodzaju pomp w nich zainstalowanych, podobnie poziomy ścieków w zbiorniku są zależne od gabarytów zbiornika zainstalowanego w danej lokalizacji. Dlatego przed implementacją systemu diagnostycznego konieczne jest wyznaczenie dla każdej z lokalizacji, na podstawie danych historycznych dotyczących prawidłowej pracy, indywidualnych modeli FGP, tj. modeli M1(P1) i M1(P2), dla każdej z pomp. Diagramy przepływu procesu wyznaczania modeli FGP oraz parametrów TH, zapisywanych do bazy danych zobrazowano na rys. 7.2. W procesie wyznaczania TH należy wykorzystać wiedzę ekspercką dotyczącą stanów prawidłowego/nieprawidłowego działania pompy.



Rys. 7.2. Diagramy przepływu procesu wyznaczania modelu FGP oraz parametru TH, zapisywanych do bazy danych.



Rys. 7.3 Diagramy przepływu procesu diagnozy pompy P1 (po lewej) i pompy P2 (po prawej).

Algorytm diagnostyki ma postać prostej reguły decyzyjnej: Jeśli wartość modelu w funkcji wartości chwilowej danego parametru pracy pompy P1 lub P2 jest mniejsza niż wartość TH, to

nastąpiła awaria i zostanie wysłany komunikat: „praca nieprawidłowa”. Jeśli wartość modelu w funkcji wartości chwilowej danego parametru przekracza TH, to oznacza, że pompownia pracuje normalnie i zostanie wysłany komunikat: „praca prawidłowa”. Komunikaty odbiera obsługa pompowni, lub obsługa w dyspozytorni.

Wartość TH jest wartością progową, wyliczoną na podstawie położenia jednego z kwartyli. Może ona być wyznaczana automatycznie na podstawie danych historycznych. Wartość ta stanowi jednocześnie parametr czułości systemu diagnostycznego, który może być adjustowany.

8. Analiza przypadków awaryjnych w wybranych lokalizacjach

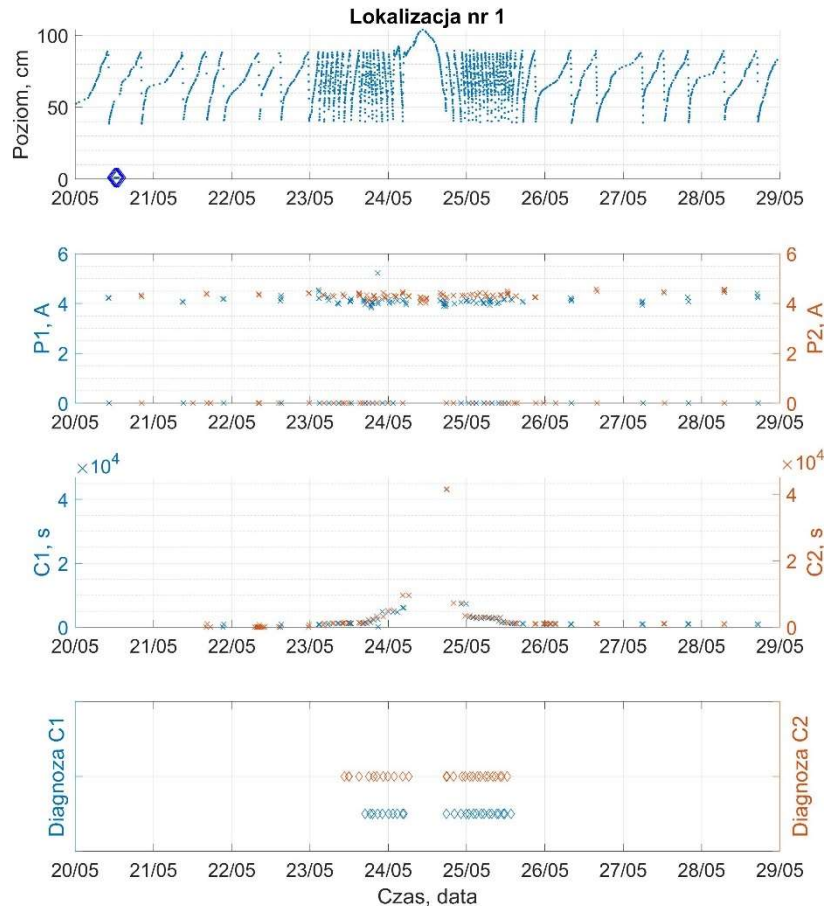
W ramach prac badawczych wykonano weryfikację prawidłowego działania zaproponowanego systemu diagnostycznego wykorzystując dostępne dane pomiarowe. W trakcie analiz przebadano wybrane przypadki awaryjne, które miały na celu:

- Wykrywanie intensywnych opadów: obie pompy pracują długo, a poziom ścieków spada podczas ich pracy.
- Wykrywanie awarii pompy:
 - poziom ścieków jest duży ale obie pompy nie pracują,
 - występują istotne różnice między pompami.
- Przytkanie rurociągów: pompy pracują długo ale poziom ścieków w zbiorniku nie spada.

8.1. Case study: Lokalizacja nr 1, maj 2019

Na rys. 8.1 przedstawiono przebiegi czasowe wartości wszystkich parametrów, rejestrowanych w lokalizacji nr 1 w maju 2019r. Wartości anormalne czasu pracy pomp, tj. wartości przekraczające ustaloną wartość TH, wynoszącą w tym przypadku $3 \cdot 10^{-5}$, zaznaczono na wykresie u dołu diamentem w kolorze czerwonym (pompa P2) lub niebieskim (pompa P1), a niskie poziomy ścieków, tj. poniżej odchylenia standardowego, zaznaczono na wykresie u góry diamentem ciemnoniebieskim.

W rozpatrywanym okresie widoczne jest zagęszczenie cyklu załączeń pompy, wydłużone czasy pracy obu pomp oraz zwiększenie poziomu ścieków. System diagnostyczny zgłasza stan pracy nieprawidłowej, gdy czasy pracy pompy przekraczają zdefiniowaną wartość TH.

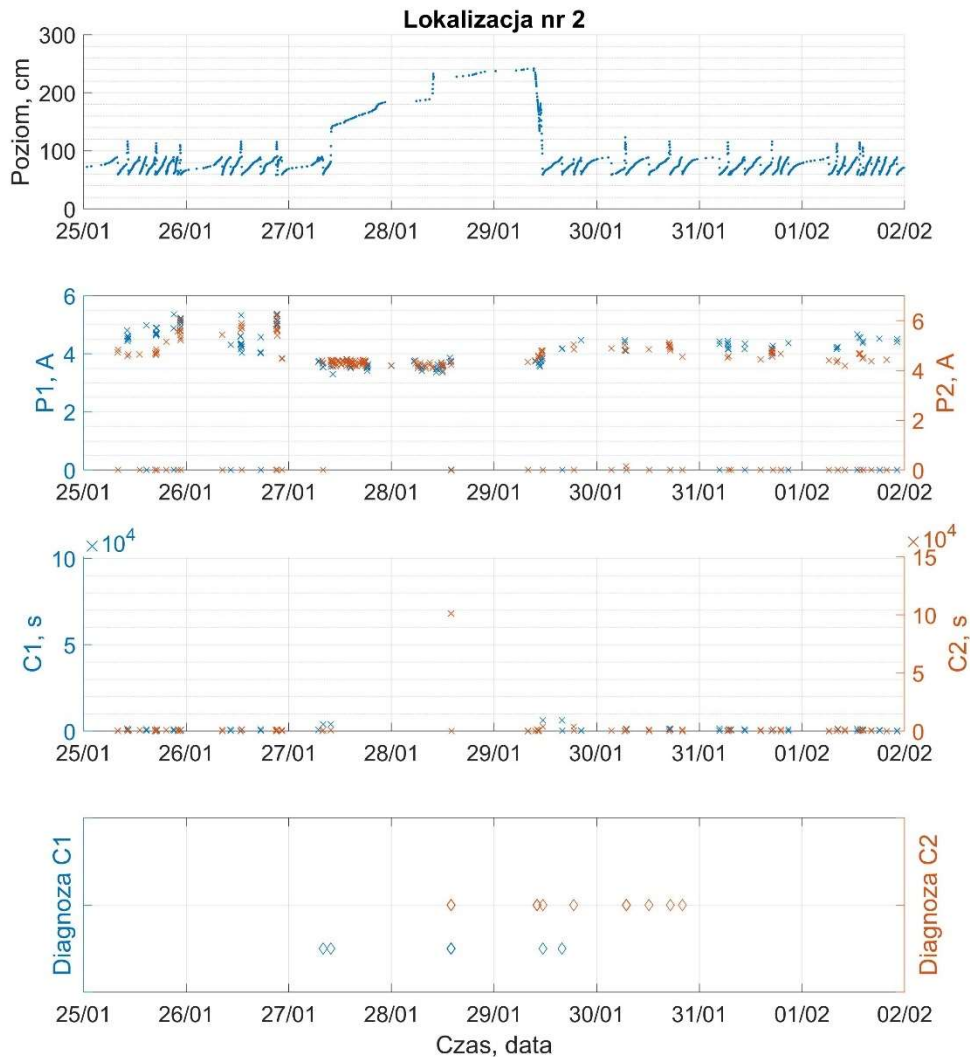


Rys. 8.1 Zestawienie zbiorcze przebiegów czasowych wartości parametrów rejestrowanych w lokalizacji nr 1 maju 2019r wraz z wynikiem diagnozy dla parametru C1 i C2. Rysunki dotyczą parametrów w kolejności od góry: (1) poziom ścieków w zbiorniku, (2) wartość prądu pobieranego przez pompy P1 (kolor niebieski) i P2 (kolor czerwony), (3) czas pracy pompy P1 (kolor niebieski) i P2 (kolor czerwony), (4) wynik diagnozy parametru C1 (kolor niebieski) i C2 (kolor czerwony).

8.2. Case study: Lokalizacja nr 2, styczeń 2020

Na rys. 8.2 przedstawiono przebiegi czasowe wartości wszystkich parametrów, rejestrowanych w lokalizacji nr 2 w styczniu 2020r. Wartości anormalne czasu pracy pomp, tj. wartości przekraczające ustaloną wartość TH, wynoszącą w tym przypadku $3 \cdot 10^{-5}$, dla pompy P1 i $6 \cdot 10^{-6}$ dla pompy P2, zaznaczono na wykresie u dołu diamentem w kolorze czerwonym (pompa P2) lub niebieskim (pompa P1).

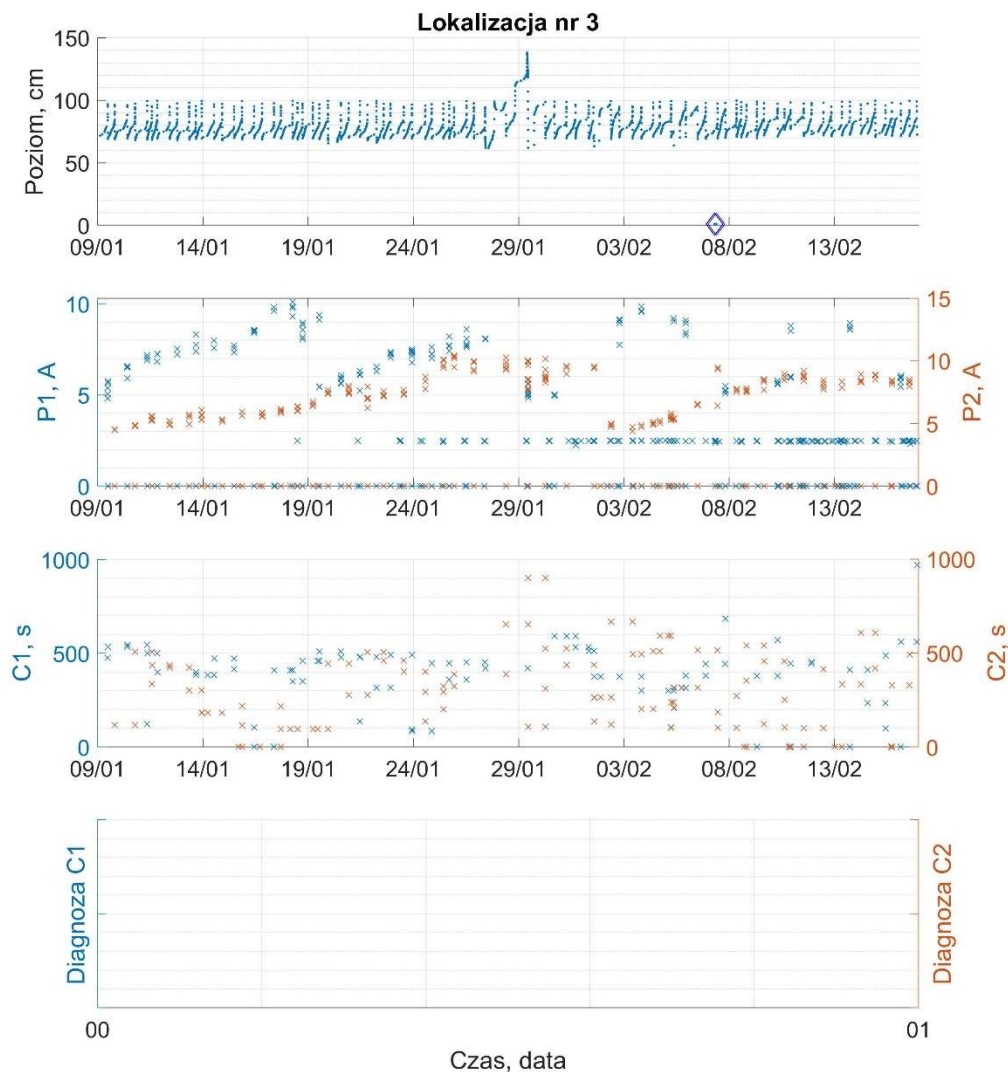
W rozpatrywanym okresie widoczne jest znaczne zwiększenie poziomu ścieków. System diagnostyczny zgłasza stan pracy nieprawidłowej, gdy czasu pracy pompy przekraczają zdefiniowane wartości TH.



Rys. 8.2 Zestawienie zbiorcze przebiegów czasowych wartości parametrów rejestrowanych w lokalizacji nr 2 w styczniu 2020r wraz z wynikiem diagnozy dla parametru C1 i C2. Rysunki dotyczą parametrów w kolejności od góry: (1) poziom ścieków w zbiorniku, (2) wartość prądu pobieranego przez pompy P1 (kolor niebieski) i P2 (kolor czerwony), (3) czas pracy pompy P1 (kolor niebieski) i P2 (kolor czerwony), (4) wynik diagnozy parametru C1 (kolor niebieski) i C2 (kolor czerwony).

6.3. Case study: Lokalizacja nr 3, styczeń 2020

Na rys. 6.3 przedstawiono przebiegi czasowe wartości wszystkich parametrów, rejestrowanych w lokalizacji nr 3 w styczniu 2020r. Dla tego przypadku, pomimo wzrostu poziomu ścieków, nie rejestrowano anormalnych czasów pracy pomp, stąd wykres dla diagnozy nie pokazuje żadnych wartości.

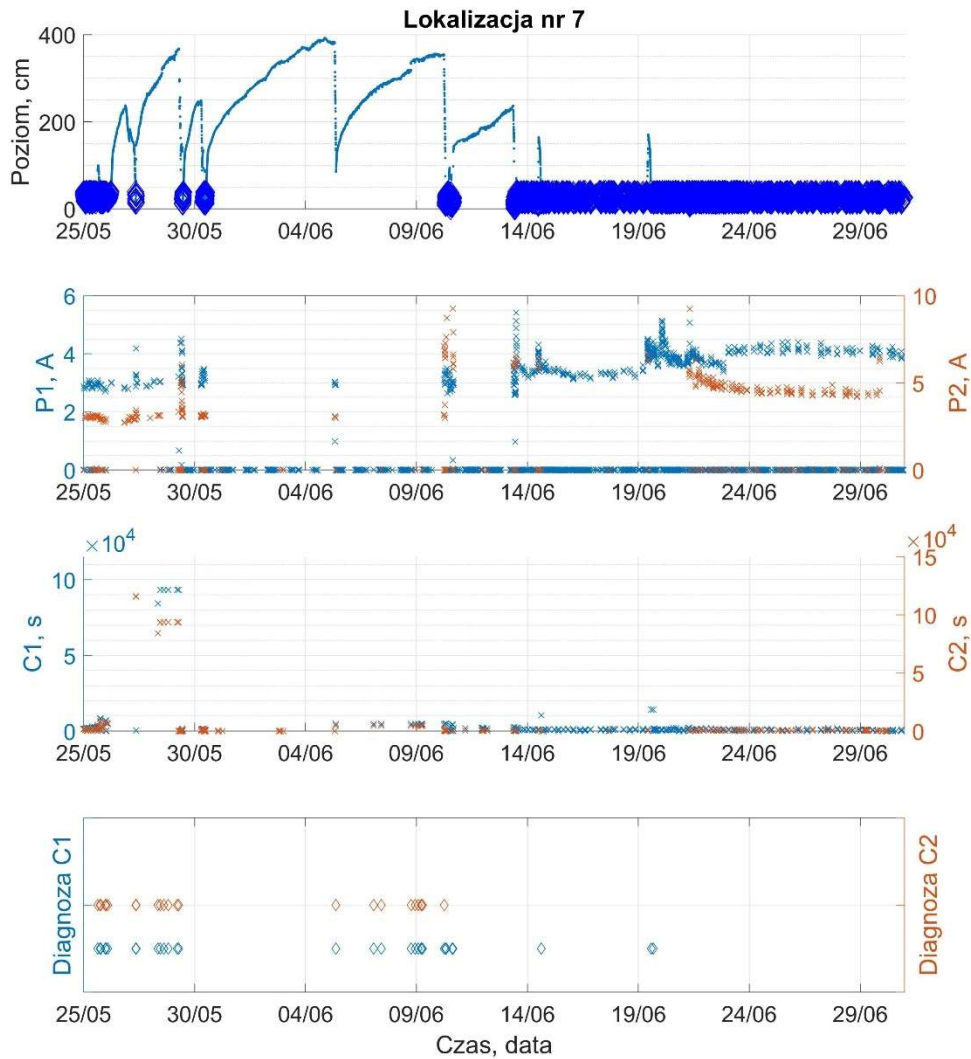


Rys. 8.3 Zestawienie zbiorcze przebiegów czasowych wartości parametrów rejestrowanych w lokalizacji nr 3 w styczniu 2020r wraz z wynikiem diagnozy dla parametru C1 i C2. Rysunki dotyczą parametrów w kolejności od góry: (1) poziom ścieków w zbiorniku, (2) wartość prądu pobieranego przez pompy P1 (kolor niebieski) i P2 (kolor czerwony), (3) czas pracy pompy P1 (kolor niebieski) i P2 (kolor czerwony), (4) wynik diagnozy parametru C1 (kolor niebieski) i C2 (kolor czerwony).

8.4. Case study: Lokalizacja nr 7, maj 2019

Na rys. 8.4 przedstawiono przebiegi czasowe wartości wszystkich parametrów, rejestrowanych w lokalizacji nr 7 na przełomie maja i czerwca 2019r. Wartości anormalne czasu pracy pomp, tj. wartości przekraczające ustaloną wartość TH, wynoszącą w tym przypadku $6 \cdot 10^{-6}$, dla pompy P1 i $7 \cdot 10^{-6}$ dla pompy P2, zaznaczono na wykresie u dołu diamentem w kolorze czerwonym (pompa P2) lub niebieskim (pompa P1), a niskie poziomy ścieków, tj. poniżej odchylenia standardowego, zaznaczono na wykresie u góry diamentem ciemnoniebieskim.

W rozpatrywanym okresie widoczne jest znaczące zwiększenie poziomu ścieków. System diagnostyczny zgłasza stan pracy nieprawidłowej, gdy czasy pracy pomp przekraczają zdefiniowaną wartość TH.

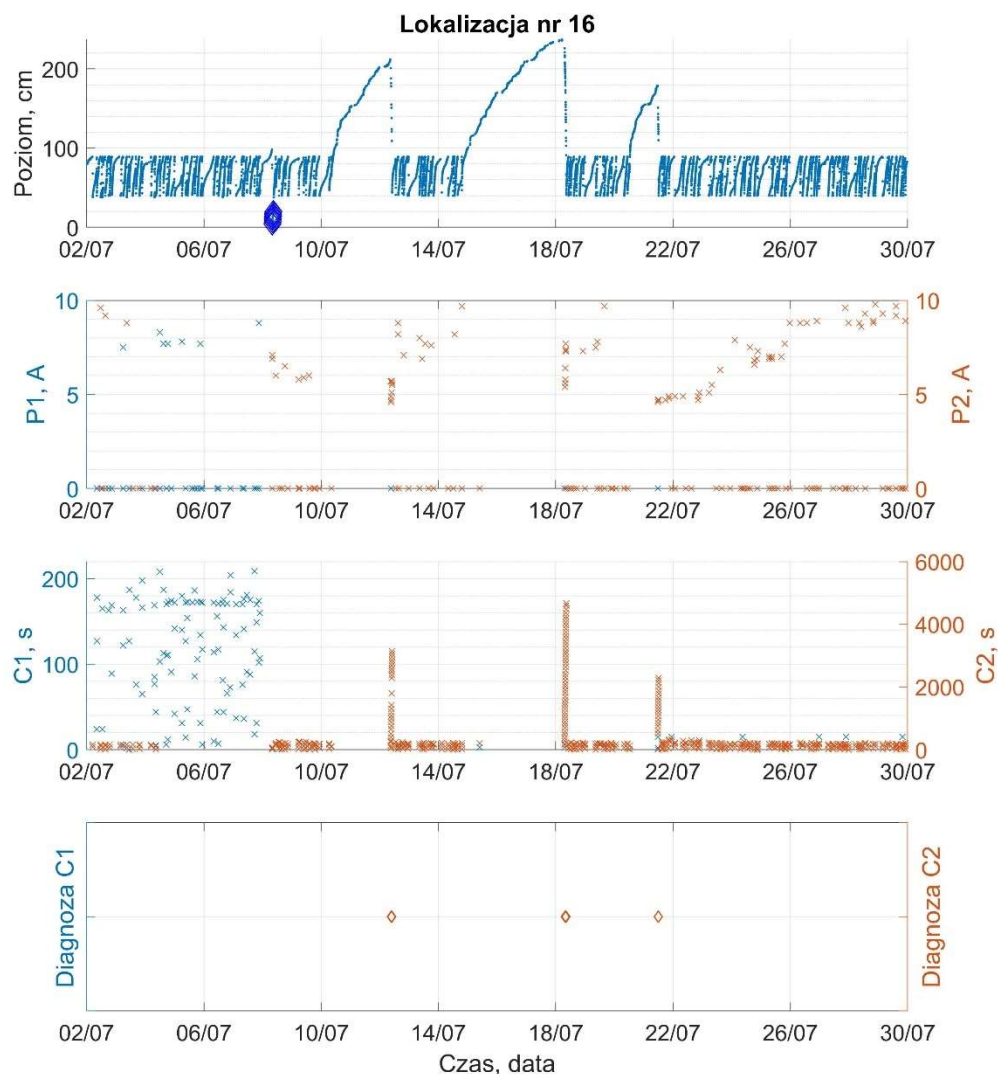


Rys. 8.4 Zestawienie zbiorcze przebiegów czasowych wartości parametrów rejestrowanych w lokalizacji nr 7 na przełomie maja i czerwca 2019r wraz z wynikiem diagnozy dla parametru C1 i C2. Rysunki dotyczą parametrów w kolejności od góry: (1) poziom ścieków w zbiorniku, (2) wartość prądu pobieranego przez pompy P1 (kolor niebieski) i P2 (kolor czerwony), (3) czas pracy pompy P1 (kolor niebieski) i P2 (kolor czerwony), (4) wynik diagnozy parametru C1 (kolor niebieski) i C2 (kolor czerwony).

8.5. Case study: Lokalizacja nr 16, lipiec 2019

Na rys. 8.5 przedstawiono przebiegi czasowe wartości wszystkich parametrów, rejestrowanych w lokalizacji nr 16 w lipcu 2019r. Wartości anormalne czasu pracy pomp, tj. wartości przekraczające ustaloną wartość TH, wynoszącą w tym przypadku $3 \cdot 10^{-6}$, dla pompy P1 i $1 \cdot 10^{-4}$ dla pompy P2, zaznaczono na wykresie u dołu diamentem w kolorze czerwonym (pompa P2) lub niebieskim (pompa P1), a niskie poziomy ścieków, tj. poniżej odchylenia standardowego, zaznaczono na wykresie u góry diamentem ciemnoniebieskim.

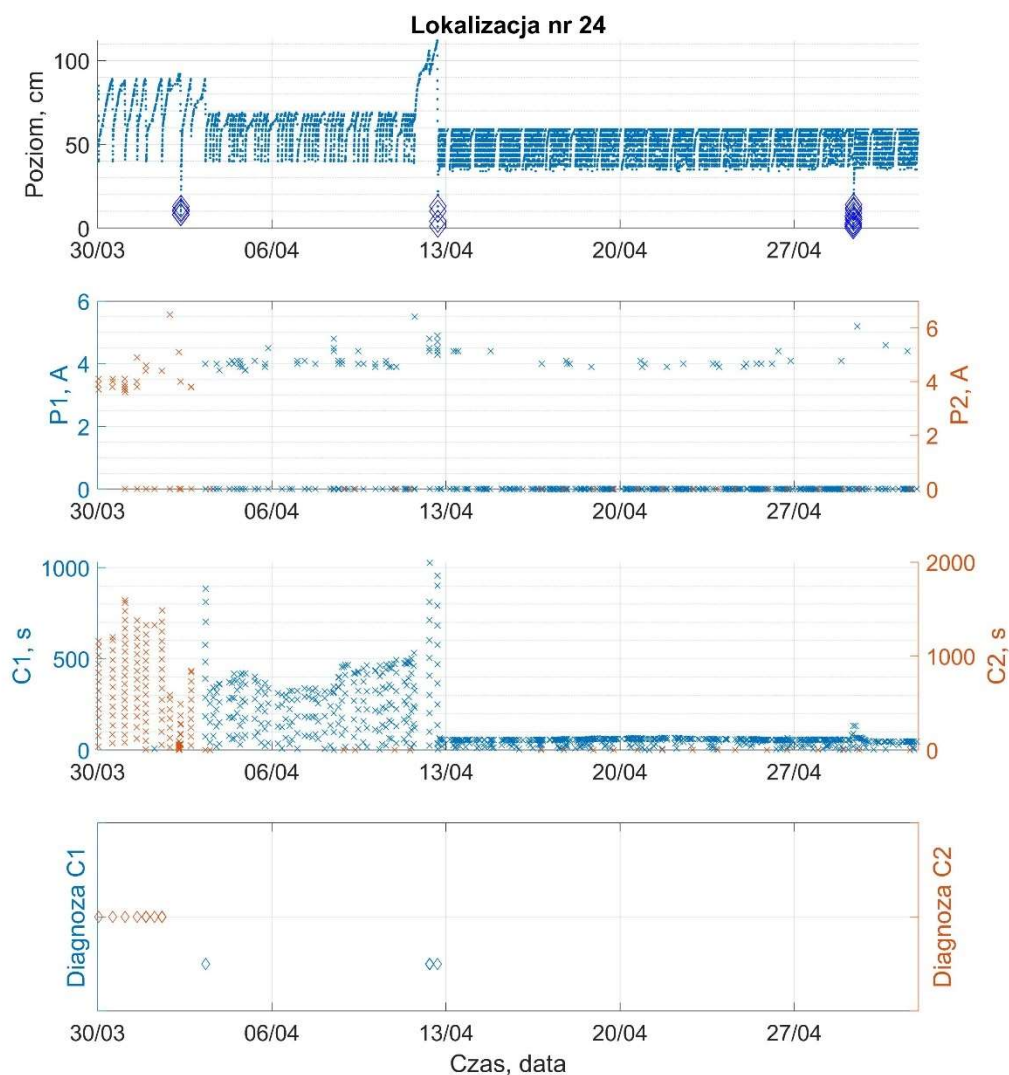
W rozpatrywanym okresie widoczne jest trzykrotne znaczące zwiększenie poziomu ścieków. Jednocześnie widoczne jest, że brak jest danych pomiarowych zarówno dla wartości prądów, jak i dla czasów pracy pomp. W chwili gdy pojawiają się wartości pomiarowe, system diagnostyczny zgłasza stan pracy nieprawidłowej, ponieważ czas pracy pompy przekraczają zdefiniowaną wartość TH. W rozpatrywanym okresie pompa P1 w dużej mierze nie pracowała.



Na rys. 8.5 Zestawienie zbiorcze przebiegów czasowych wartości parametrów rejestrowanych w lokalizacji nr 16 w lipcu 2019r wraz z wynikiem diagnozy dla parametru C1 i C2. Rysunki dotyczą parametrów w kolejności od góry: (1) poziom ścieków w zbiorniku, (2) wartość prądu pobieranego przez pompy P1 (kolor niebieski) i P2 (kolor czerwony), (3) czas pracy pompy P1 (kolor niebieski) i P2 (kolor czerwony), (4) wynik diagnozy parametru C1 (kolor niebieski) i C2 (kolor czerwony).

8.6. Case study: Lokalizacja nr 24, kwiecień 2020

Na rys. 8.6 przedstawiono przebiegi czasowe wartości wszystkich parametrów, rejestrowanych w lokalizacji nr 24 w kwietniu 2020r. Wartości anormalne czasu pracy pomp, tj. wartości przekraczające ustaloną wartość TH, wynoszącą w tym przypadku $4 \cdot 10^{-6}$, dla pompy P1 i $2 \cdot 10^{-4}$ dla pompy P2, zaznaczono na wykresie u dołu diamentem w kolorze czerwonym (pompa P2) lub niebieskim (pompa P1), a niskie poziomy ścieków, tj. poniżej odchylenia standardowego, zaznaczono na wykresie u góry diamentem ciemnoniebieskim. Wzrost poziomu ścieków powoduje wydłużenie czasów pracy pomp. Widoczne są zmiany ustawień nastaw wartości krytycznych poziomów ścieków w zbiorniku, które powodują załączanie pomp przy niższych wartościach. Zmiany spowodowały również znaczące skrócenie czasu pracy pomp.



Na rys. 8.6 Zestawienie zbiorcze przebiegów czasowych wartości parametrów rejestrowanych w lokalizacji nr 24 na przełomie marca i kwietnia 2020r wraz z wynikiem diagnozy dla parametru C1 i C2. Rysunki dotyczą parametrów w kolejności od góry: (1) poziom ścieków w zbiorniku, (2) wartość prądu pobieranego przez pompy P1 (kolor niebieski) i P2 (kolor czerwony), (3) czas pracy pompy P1 (kolor niebieski) i P2 (kolor czerwony), (4) wynik diagnozy parametru C1 (kolor niebieski) i C2 (kolor czerwony).

8. Podsumowanie

W ramach prac badawczych wykonano analizy wartości wybranych parametrów, które mogą być zastosowane do podjęcia decyzji diagnostycznej dotyczącej prawidłowości działania pomp pracujących w pompowni ścieków. Rozpatrywano pracę pomp w 79-ciu lokalizacjach, składających się na złożony system kanalizacji ściekowej, w poszczególnych miejscowościach. Badane sygnały zostały zarejestrowane w ciągu jednego roku kalendarzowego w okresie od maja 2019 do maja 2020. Najbardziej istotne wyniki przeprowadzonych analiz przedstawiono w rozdziale 5 i 6 oraz zawarto w załącznikach.

W szczególności w ramach pracy doktorskiej wykonano następujące zadania badawcze:

- Pozyskano dane pomiarowe z 79-ciu pompowni ścieków.
- Wykonano analizy pozyskanych danych w zakresie czasu pracy pomp. Dokonano ich podziału na różne okresy pomiarowe: roczny, miesięczny, tygodniowy, dniowy, godzinny oraz interpolowano dane, w celu ujednoczenia i uzupełnienia brakujących próbek pomiarowych. Dane zwizualizowano w postaci przebiegów czasowych.
- Wykonano analizę statystyczną oraz obliczono empiryczne rozkłady gęstości prawdopodobieństwa.
- Wykonano jednoczynnikową analizę wariancji z wykorzystaniem metody ANOVA.
- Wykonano analizę korelacji i wskazano istnienie bądź brak współzależności liniowych między poszczególnymi parametrami pracy pompowni.
- Przebadano cztery modele matematyczne funkcji gęstości prawdopodobieństwa, w tym modele Cauchy'ego, Gaussa, Weibulla i Galtona, oraz wskazano najbardziej optymalny model opisujący rozkłady roczne czasów pracy pomp P1 i P2 w poszczególnych lokalizacjach.
- Zaproponowano schemat układu na potrzeby diagnostyki pomp pracujących w pompowni oraz wykonano analizę wybranych przypadków awaryjnych wraz z weryfikacją zaproponowanego systemu diagnostycznego.

W wyniku prac stwierdzono, że konieczne jest każdorazowe porównanie bieżących danych pomiarowych zarówno z danymi rejestrowanymi w ostatnich dniach, tygodniach jak i w okresach dłuższych, np. miesięcznych i rocznych. Istotne jest, aby rozpatrywać dane pompownie indywidualnie, gdyż parametry pracy pomp w kolejnych lokalizacjach mogą znacząco się różnić.

Na podstawie uzyskanych rezultatów stwierdzono, że do modelowania czasu pracy pomp w pompowni ścieków można zastosować model Cauchy'ego, który osiąga dobre dopasowanie zarówno podczas poprawnej pracy jak i podczas występowania krótkotrwałych sytuacji awaryjnych. Model ten jest nieskomplikowany obliczeniowo, ponieważ zawiera jedynie dwa parametry, dlatego może zostać zaimplementowany w systemach automatycznej detekcji nieprawidłowej pracy pomp, pracującej w oczyszczalni ścieków. Wadą modelu Cauchy'ego jest brak odzwierciedlenia jego parametrów w fizycznych cechach rozkładu prawdopodobieństwa, tj. wartości średniej i odchylenia standardowego. W takim przypadku jako lepszy model można zastosować model Gaussa lub Galtona, których parametry odwzorowują rzeczywistą wartość oczekiwaną i odchylenie standardowe.

Zaproponowany system diagnostyczny może zostać zrealizowany poprzez cykliczne wyznaczanie rozkładu gęstości prawdopodobieństwa dla wybranego okresu czasowego np. tygodnia lub miesiąca. Reguła decyzyjna może mieć następującą postać: Jeśli bieżąca wartość

czasu działania pompy P1 mieści się w przedziale 99 % wartości rozkładu modelowego, to stan pracy danej pompy można uznać za normalny. Jeśli wartość funkcji dystrybuanty dla wartości pomiarowej przekracza 0,99 to czas jest zbyt długi w porównaniu z czasem normalnym w ostatnim przedziale czasowym. Odpowiednio jeśli jest mniejszy niż 0,01 to jest to zbyt krótki czas w porównaniu z typowym. Wartości progowe (w pracy przyjęte oznaczeniem TH) mogą stanowić parametr czułości detekcji awarii (nieprawidłowej pracy) danej pompy.

W ramach dalszych prac możliwe jest rozszerzenie zaproponowanego systemu o inne metody decyzyjne lub integrację elementów logiki rozmytej lub sztucznej inteligencji, przy czym koniecznym wydaje się rozpatrywanie większej liczby danych pomiarowych, z okresów wieloletnich.

Literatura

- [1] R. Ocampo, "Fatigue failures in pumps - part 1," *World Pumps*, no. 505, 2008.
- [2] R. Ocampo and B. Ruiz, "Fatigue failures in pumps - part 2," *World Pumps*, no. 502, 2008.
- [3] R. Ocampo, "Fatigue failures in pumps - part 3," *World Pumps*, no. 505, 2008.
- [4] S. Rajakarunakaran, P. Venkumar, D. Devaraj, and K. S. P. Rao, "Artificial neural network approach for fault detection in rotary system," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 8, no. 1, pp. 740–748, 2008.
- [5] K. et al. Attila, "Monitorowanie i diagnostyka stanu technicznego pomp krytycznych napędzanych silnikami elektrycznymi," *Napędy i Sterow.*, no. 5, pp. 72–83, 2015.
- [6] J. Kowal and J. Stojek, "Ocena stanu zużycia pompy tłokowej osiowej przy użyciu nieparametrycznych metod analizy sygnału," *Przegląd Mech.*, vol. nr 1, pp. 26–33, 2011.
- [7] T. Ahonen, J. Tamminen, J. Ahola, J. Viholainen, N. Aranto, and J. Kestilä, "Estimation of pump operational state with model-based methods," *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, no. 6, pp. 1319–1325, 2010.
- [8] L. Chabal and S. Stanko, "Sewerage Pumping Station Optimization Under Real Conditions," *Geosci. Eng.*, vol. 60, no. 4, pp. 19–28, 2016.
- [9] B. Dieu, "Application of the SCADA system in wastewater treatment plants," *ISA Trans.*, vol. 40, no. 3, pp. 267–281, 2001.
- [10] "Kanalizacja – Wikipedia, wolna encyklopedia." [Online]. Available: <https://pl.wikipedia.org/wiki/Kanalizacja>. [Accessed: 07-Jul-2021].
- [11] A. Adamczewski, "Kanalizacja sanitarna," 2011.
- [12] P. Matysiak and G. Wilkoszewski, "Kanalizacja ciśnieniowa : ogólne zasady projektowania sieci i doboru pomp," *Forum Eksploatatora*, vol. Nr 4 (85), 2016.
- [13] J. Ryńska, "Sieć a instalacja kanalizacyjna - E-instalacje," 2017. [Online]. Available: <http://www.e-instalacje.pl/a/siec-a-instalacja-kanalizacyjna-3265.html>. [Accessed: 06-Jul-2021].
- [14] M. Lewandowska, "Pompy wod-kan. Definicje oraz konstrukcja.," *Srodowisko.pl*, 2012. [Online]. Available: <https://www.srodowisko.pl/artykuly/pompy-wod-kan-definicje-oraz-konstrukcja--58852-6>. [Accessed: 07-Jul-2021].
- [15] Wilo, "Podstawy techniki pompowej Elementarz techniki pompowej."
- [16] M. Lewandowska, "Pompy w branży wodno-ściekowej. Klasyfikacja funkcjonalna.," *Srodowisko.pl*, 2012. [Online]. Available: <https://www.srodowisko.pl/artykuly/pompy-w-branzy-wodno-ściekowej-klasyfikacja-funkcjonalna--58899-6>. [Accessed: 07-Jul-2021].
- [17] C. S. Kallesøe, J. Skødt, and M. Eriksen, "Optimal control in sewage applications," *World Pumps*, no. 4, pp. 20–23, 2011.
- [18] C. S. Kallesøe and T. Knudsen, "Self calibrating flow estimation in waste water pumping stations," *2016 Eur. Control Conf. ECC 2016*, pp. 55–60, 2016.

- [19] C. S. Kallesøe and M. Eriksen, "Supervision of Pumps and their Operating Conditions in Sewage Pumping Stations," *Water Pract. Technol.*, vol. 5, no. 2, 2010.
- [20] J. Bagiński, "Pompy w oczyszczalniach ścieków." [Online]. Available: <https://www.kierunekpompy.pl/arttykul,14896,pompy-w-oczyszczalniach-sciekow.html>. [Accessed: 06-Jul-2021].
- [21] W. Jędral, "Jaką pompę wybrać?," *Ochr. Środowiska*, vol. 5, 2011.
- [22] Jędral and Waldemar, "Efektywność energetyczna pomp i instalacji pompowych," Warszawa, 2007.
- [23] "Optimization Guidance Manual for Sewage Works," 2010.
- [24] W. Dąbrowski, "Projektowanie pompowni ścieków - wybrane zagadnienia," *Rynek Instalacyjny*. 2013.
- [25] J. M. Makar, "Diagnostic Techniques for Sewer Systems," *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 5, no. 2, pp. 69–78, Jun. 1999.
- [26] Kristoffer K. McKee, G. Forbes, I. Mazhar, R. Entwistle, and I. Howard, "A review of major centrifugal pump failure modes with application to the water supply and sewerage industries," *ICOMS Asset Manag. Conf. , Gold Coast, QLD, Aust.*, pp. 1–12, 2011.
- [27] G. Moore, "Intelligent control of sewage pumps," *World Pumps*, vol. 2011, no. 6, pp. 26–28, 2011.
- [28] P. U. Thamsen, "Cutting clogging in wastewater," *World Pumps*, vol. 2009, no. 511, pp. 22–25, 2009.
- [29] "Sewage treatment alarm protects against pump failure," *World Pumps*, no. 514, p. 7, Jul. 2009.
- [30] "Sewage blockages cut by pump control," *World Pumps*, no. 514, pp. 10–12, Jul. 2009.
- [31] "Gliwice: autorski system do monitorowania sieci." [Online]. Available: <https://www.kierunekwodkan.pl/arttykul,26682,gliwice-autorski-system-do-monitorowania-sieci.html>. [Accessed: 07-Jul-2021].
- [32] G. Warsztocki, "Ciągła kontrola jakości ścieków przemysłowych – pomiar ChZT," *OMC ENVAG sp. z o.o.*
- [33] H. Holka and T. Jarzyna, "Modelling of vertical shaft of mixed-flow pump," *Arch. Mech. Eng.*, vol. 60, no. 4, pp. 531–544, 2013.
- [34] D. Hast, R. Findeisen, and S. Streif, "Detection and isolation of parametric faults in hydraulic pumps using a set-based approach and quantitative-qualitative fault specifications," *Control Eng. Pract.*, vol. 40, pp. 61–70, 2015.
- [35] P. van Daal-Rombouts, S. Sun, J. Langeveld, J. L. Bertrand-Krajewski, and F. Clemens, "Design and performance evaluation of a simplified dynamic model for combined sewer overflows in pumped sewer systems," *J. Hydrol.*, vol. 538, pp. 609–624, 2016.
- [36] J. Da Wu and C. C. Hsu, "Fault gear identification using vibration signal with discrete wavelet transform technique and fuzzy-logic inference," *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no.

2 PART 2, pp. 3785–3794, 2009.

- [37] W. Jędral, “Dobór pomp wodociągowych, kanalizacyjnych i ciepłowniczych oraz sposobów ich regulacji,” *Rynek Instal.*, 2009.
- [38] W. Jędral, “Optymalizacja parametrów i wybór najlepszych pomp odśrodkowych dla potrzeb ciepłownictwa,” *Rynek Instal.*, 2010.
- [39] W. G. Zieliński, “Problemy Związane Z Doborem Pomp W Instalacjach,” *Masz. Elektr.*, vol. 98, no. 1, pp. 127–130, 2013.
- [40] R. Fruzińska and J. Kostecki, “Kanalizacja bytowo-gospodarcza na przykładzie miejscowości Jemiołów. Część II przepompownie ścieków,” *Inżynieria Środowiska*, vol. 26, 2012.
- [41] J. Keays and C. Meskell, “A Study of the Behaviour of a Single-Bladed Waste-Water Pump:,” in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2006, vol. 220, no. 2, pp. 79–87.
- [42] M. A. Moreno, P. A. Carrión, P. Planells, J. F. Ortega, and J. M. Tarjuelo, “Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations,” *Biosyst. Eng.*, vol. 98, no. 4, pp. 479–486, 2007.
- [43] K. Li, K. Zuo, J. Wang, and W. Gao, “Dynamic Programming Example Analysis of a Pump Station,” *Phys. Procedia*, vol. 24, pp. 1796–1800, 2012.
- [44] H. Bonakdari and A. A. Zinatizadeh, “Influence of position and type of Doppler flow meters on flow-rate measurement in sewers using computational fluid dynamic,” *Flow Meas. Instrum.*, vol. 22, no. 3, pp. 225–234, 2011.
- [45] L. Ni, J. Tian, C. Shen, and J. Zhao, “Experimental study of the separation performance of a novel sewage hydrocyclone used in sewage source heat pump,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 106, pp. 1300–1310, 2016.
- [46] H. Chen, Y. Wang, and G. Shi, “Flow numerical simulation in the impeller of sewage pump,” *Proc. 2011 Int. Conf. Electron. Mech. Eng. Inf. Technol. EMEIT 2011*, vol. 6, pp. 3217–3220, 2011.
- [47] J. Pei, S. Q. Yuan, J. P. Yuan, and W. J. Wang, “The influence of the flow rate on periodic flow unsteadiness behaviors in a sewage centrifugal pump,” *J. Hydrodyn.*, vol. 25, no. 5, pp. 702–709, 2013.
- [48] W. De Keyser, Y. Amerlinck, G. Urchegui, T. Harding, T. Maere, and I. Nopens, “Detailed dynamic pumping energy models for optimization and control of wastewater applications,” *J. Water Clim. Chang.*, vol. 5, no. 3, pp. 299–314, 2014.
- [49] M. Hirschberger, J. Kuhlmann, and F. K. Benra, “Designing high-power sewage water pumps,” *World Pumps*, vol. 2009, no. 514, pp. 20–25, 2009.
- [50] J. S. Anagnostopoulos, “A fast numerical method for flow analysis and blade design in centrifugal pump impellers,” *Comput. Fluids*, vol. 38, no. 2, pp. 284–289, 2009.
- [51] D. Butler and M. Schütze, “Integrating simulation models with a view to optimal control of urban wastewater systems,” *Environ. Model. Softw.*, vol. 20, no. 4 SPEC. ISS., pp. 415–426, 2005.
- [52] L. Bogdan, G. Petriczek, and J. Studziński, “Algorytmy modelowania komputerowego

- miejskich sieci kanalizacyjnych,” *Stud. i Mater. Inform. Stosow.*, vol. 4, no. 9, pp. 35–42, 2012.
- [53] S. Leirens, J. M. Giraldo, R. R. Negenborn, and B. De Schutter, *A pattern search method for improving the operation of sewer systems*, vol. 43, no. 8 PART 1. IFAC, 2010.
- [54] Y. Tang and S. Zhang, “A model predictive control approach to operational efficiency of intake pump stations,” *Proc. - Int. Conf. Electr. Control Eng. ICECE 2010*, no. 1, pp. 92–95, 2010.
- [55] C. Shen, Y. Q. Jiang, and Y. Yao, “Model and algorithm for simulation of a novel dry-type shell-tube evaporator used in sewage source heat pump,” *Proc. - Int. Conf. Comput. Distrib. Control Intell. Environ. Monit. CDCIEM 2011*, pp. 446–449, 2011.
- [56] P. C. Tan, K. P. Dabke, and R. G. Mein, “Modelling and Control of Sewer Flow for Reduced Cost Operation of a Sewage Pumping Station,” *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. 18, no. 5, pp. 807–813, 1988.
- [57] C. Cheng, W. Shi, D. Zhang, W. Cao, and J. Xing, “Numerical simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in swept-back sewage centrifugal pump,” *IET Conf. Publ.*, vol. 2014, no. CP658, 2014.
- [58] Y. A. Ermolin, “Mathematical modelling for optimized control of Moscow’s sewer network,” *Appl. Math. Model.*, vol. 23, no. 7, pp. 543–556, 1999.
- [59] W. Yong, “A Fault Diagnosis Monitoring System of Reciprocating Pump International organization of Scientific Research,” *IOSR J. Eng.*, vol. 5, no. 9, pp. 1–6, 2015.
- [60] F. Kong and R. Chen, “A combined method for triplex pump fault diagnosis based on wavelet transform, fuzzy logic and neuro-networks,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 18, no. 1, pp. 161–168, 2004.
- [61] L. Barberá, A. Crespo, P. Viveros, and R. Stegmaier, “A case study of GAMM (Graphical Analysis for Maintenance Management) applied to water pumps in a sewage treatment plant, Chile,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 45, no. 31, pp. 157–162, 2012.
- [62] W. Jędral, “Przykłady niewłaściwego doboru i nieodpowiedniej regulacji pomp w gospodarce wodno-ściekowej,” *Instal*, vol. nr 11, 2004.
- [63] V. Puig, *Fault Detection and Isolation in Sewer Networks*, vol. 42, no. 8. IFAC, 2009.
- [64] Y. A. Ermolin, L. I. Zats, and T. Kajisa, “Hydraulic reliability index for sewage pumping stations,” *Urban Water*, vol. 4, no. 3, pp. 301–306, 2002.
- [65] J. Meseguer, V. Puig, and T. Escobet, “Fault diagnosis using a timed discrete-event approach based on interval observers: Application to sewer networks,” *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part A Systems Humans*, vol. 40, no. 5, pp. 900–916, Sep. 2010.
- [66] H. Wang and P. Chen, “Sequential Condition Diagnosis for Centrifugal Pump System Using Fuzzy Neural Network,” *Neural Inf. Process. – Lett. Rev.*, vol. 11, no. 3, pp. 41–50, 2007.
- [67] J. Wang and H. Hu, “Vibration-based fault diagnosis of pump using fuzzy technique,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 39, no. 2, pp. 176–185, 2006.
- [68] V. Muralidharan and V. Sugumaran, “Rough set based rule learning and fuzzy

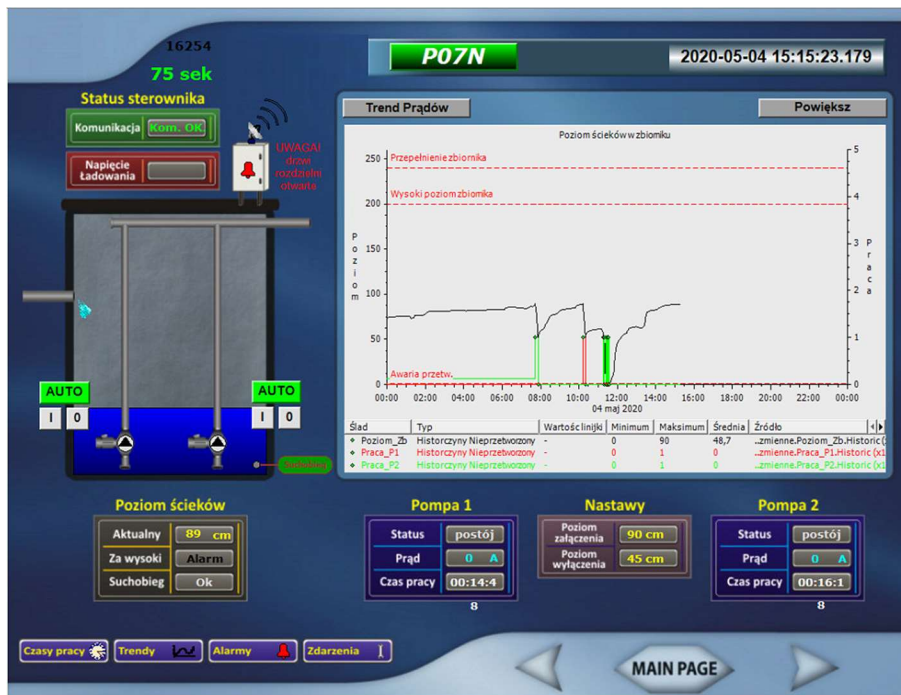
- classification of wavelet features for fault diagnosis of monoblock centrifugal pump,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 46, no. 9, pp. 3057–3063, 2013.
- [69] H. Q. Wang and P. Chen, “Fault Diagnosis of Centrifugal Pump Using Symptom Parameters in Frequency Domain,” *Agric. Eng. Int. CIGR eJournal*, vol. IX, pp. 1–14, 2007.
- [70] L. Xu, Z. Li, and J. Cheng, “The study of fuzzy PID control of dosing pump in sewerage system,” *Proc. - 2012 9th Int. Conf. Fuzzy Syst. Knowl. Discov. FSKD 2012*, pp. 497–500, 2012.
- [71] V. Muralidharan, V. Sugumaran, and V. Indira, “Fault diagnosis of monoblock centrifugal pump using SVM,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 17, no. 3, pp. 152–157, 2014.
- [72] M. G. R. Sause, A. Gribov, A. R. Unwin, and S. Horn, “Pattern recognition approach to identify natural clusters of acoustic emission signals,” *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 33, no. 1, pp. 17–23, 2012.
- [73] V. Muralidharan and V. Sugumaran, “A comparative study of Naïve Bayes classifier and Bayes net classifier for fault diagnosis of monoblock centrifugal pump using wavelet analysis,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 12, no. 8, pp. 2023–2029, 2012.
- [74] J. Johansson, “Intelligent drives on the rise again,” *World Pumps*, no. 10, pp. 40–42, 2009.
- [75] D. Borkowski, A. Wetula, and A. Bie, “Design, optimization, and deployment of a waterworks pumping station control system,” *ISA Trans.*, vol. 51, no. 4, pp. 539–549, 2012.
- [76] A. Brandstetter, R. L. Engel, and D. B. Cearlock, “A Mathematical Model for Optimum Design and Control of Metropolitan Wastewater Management Systems,” *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.*, vol. 9, no. 6, pp. 1188–1200, 1973.
- [77] T. Iseley, “Sewer Scanner and Evaluation Technology,” *Emerg. Constr. Technol. Fact Sheets*, vol. Paper 102, pp. 1–5, 2007.
- [78] M. J. Chae and D. M. Abraham, “Neuro-Fuzzy Approaches for Sanitary Sewer Pipeline Condition Assessment,” *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 15, no. 1, pp. 4–14, Jan. 2001.
- [79] R. Kirkham, P. D. Kearney, K. J. Rogers, and J. Mashford, “PIRAT - A System for Quantitative Sewer Pipe Assessment,” *Int. J. Rob. Res.*, vol. 19, no. 11, pp. 1033–1053, 2000.
- [80] A. Tevjashev and P. Schulik, “Informational analytical system of control of master schedules of sewer pump station,” *Mod. Probl. Radio Eng. Telecommun. Comput. Sci. Proc. Int. Conf. TCSET'2004*, p. 393, 2004.
- [81] R. Bayindir and Y. Cetinceviz, “A water pumping control system with a programmable logic controller (PLC) and industrial wireless modules for industrial plants-An experimental setup,” *ISA Trans.*, vol. 50, no. 2, pp. 321–328, 2011.
- [82] L. Szychta, “System for optimising pump To attain optimum control of a pump assembly , the electrical power consumed needs to be,” *World Pumps*, no. February, pp. 45–48, 2004.
- [83] A. A. Ilemobade, N. J. Manson, and D. Stephenson, “Pump and reservoir system

- operational optimisation using a non-linear tool,” *J. South African Inst. Civ. Eng.*, vol. 47, no. 4, pp. 2–11, 2005.
- [84] K. Kantyka and A. Papierski, “Optymalizacja wirnika pompy-wpływ niektórych parametrów geometrycznych opisujących kształt łopatki,” *Turbomachinery, Ciepl. Masz. Przepływowe*, vol. 144, pp. 9–20, 2013.
- [85] Aintenance, M.; Ystems, C.O.S.; Poltak, R.F. *Optimizing Operation, Maintenance, and Rehabilitation of Sanitary Sewer Collection Systems*; New England Interstate Water Pollution Control Commission: St, Lowell, MA, USA, 2003.
- [86] M. Jaworowska, “Automatyka procesowa w branży wodociągowo-kanalizacyjnej,” *Automatyka B2B*, 2012. [Online]. Available: <https://automatykab2b.pl/temat-miesiaca/41620-automatyka-procesowa-w-branzy-wodociagowo-kanalizacyjnej>. [Accessed: 07-Jul-2021].
- [87] G. M. Jones, R. L. Sanks, G. Tchobanoglous, and B. E. Bosserman, *Pumping station design*. Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2008.
- [88] C. G. Stolberg, “Variable speed pumping for submersible wastewater pumping systems,” *World Pumps*, no. 439, pp. 29–31, 2003.
- [89] N. Adamkiewicz and D. Zmarzły, “Charakterystyczne parametry pracy pomp w miejskich systemach kanalizacji bytowo-gospodarczej,” *Pozn. Univ. Technol. Acad. Journals. Electr. Eng.*, no. 75, pp. 173–179, 2013.
- [90] N. Adamkiewicz and D. Zmarzły, “Analiza czasu działania pomp w wybranej sieci kanalizacji sanitarnej,” *Pomiary Autom. Kontrola*, vol. R. 59, nr, no. 1, pp. 51–54, 2013.

Spis załączników

- Załącznik 1 Zdjęcia ekranów w systemie SCADA z rozpatrywanej pompowni ścieków
- Załącznik 2 Przebiegi czasowe czasów pracy pomp P1 i P2 rejestrowane w kolejnych lokalizacjach
- Załącznik 3 Przebiegi czasowe wartości prądu pobieranego przez pompy P1 i P2, rejestrowane w kolejnych lokalizacjach
- Załącznik 4 Przebiegi czasowe poziomu ścieków w zbiorniku rejestrowane w kolejnych lokalizacjach
- Załącznik 5 Wyniki modelowania parametrów C1 i C2

Załącznik 1 Zdjęcia ekranów systemu SCADA z rozpatrywanej pompowni ścieków.



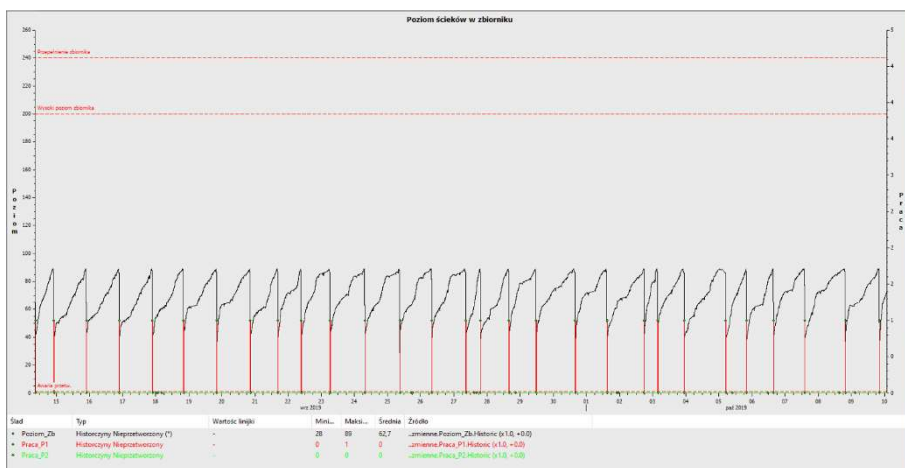
Rys. 1. Przykładowe zdjęcie ekranu obrazujące widok panelu sterującego SCADA.



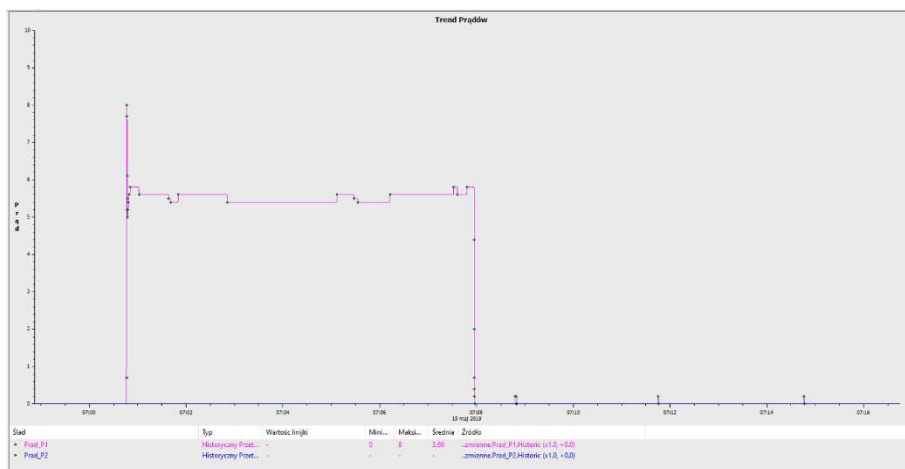
Rys. 2. Przykładowe zdjęcie ekranu obrazujące widok panelu sterującego SCADA.



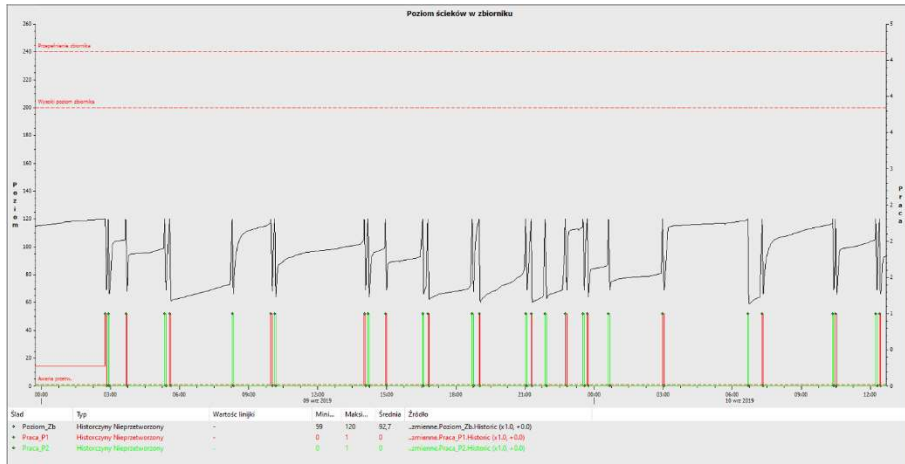
Rys. 3. Przykładowe zdjęcie ekranu obrazujące widok panelu sterującego SCADA.



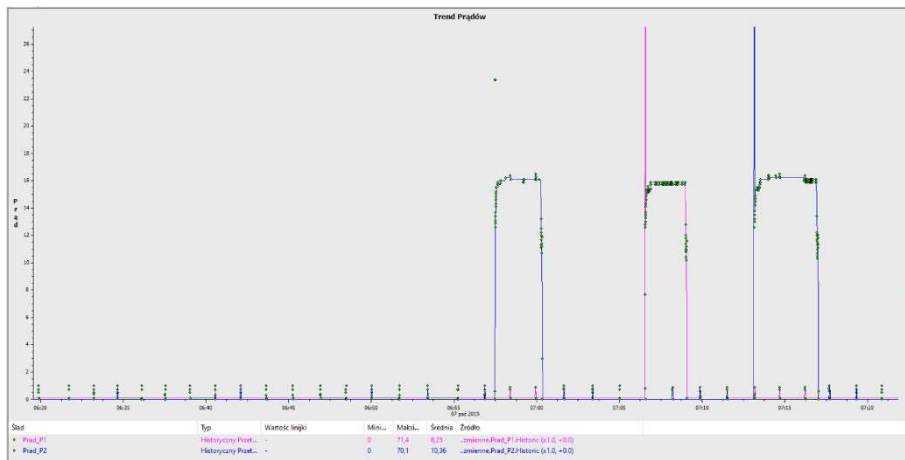
Rys. 4. Przykładowe zdjęcie ekranu obrazujące poziom ścieków w zbiorniku (lewa oś) oraz pracę pomp P1 i P2 (oś prawa).



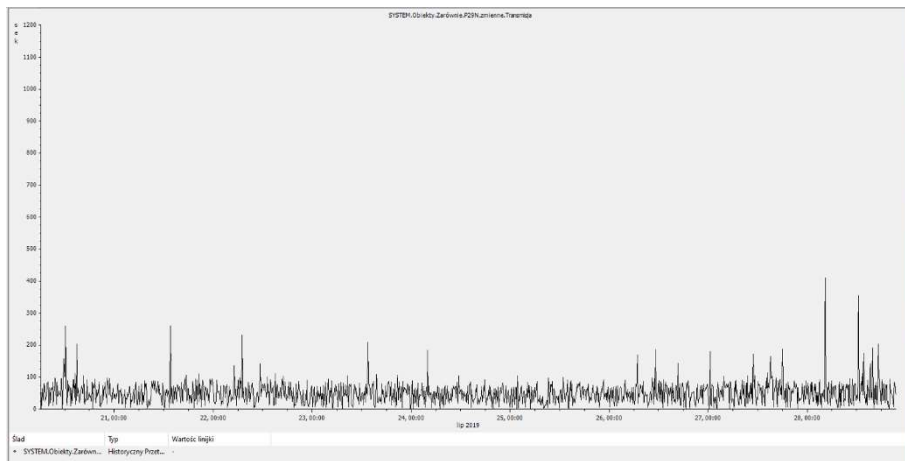
Rys. 5 Przykładowe zdjęcie ekranu obrazujące wartość prądu pomp P1 i P2.



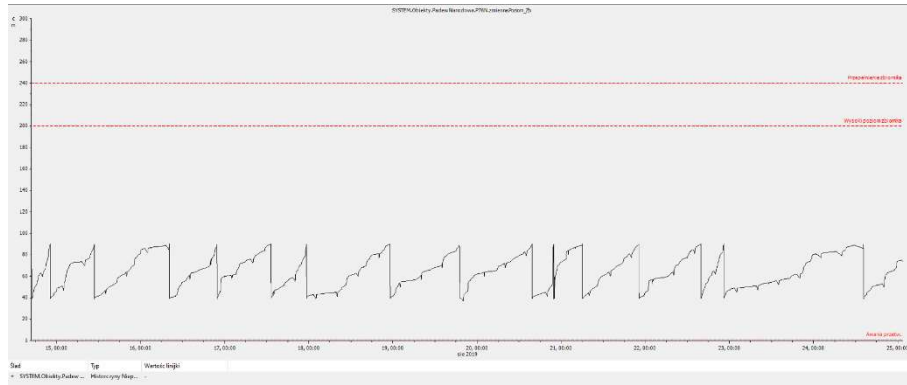
Rys. 6. Przykładowe zdjęcie ekranu obrazujące poziom ścieków w zbiorniku (lewa oś) oraz pracę pomp P1 i P2 (oś prawa).



Rys. 7. Przykładowe zdjęcie ekranu obrazujące wartość prądu pomp P1 i P2.



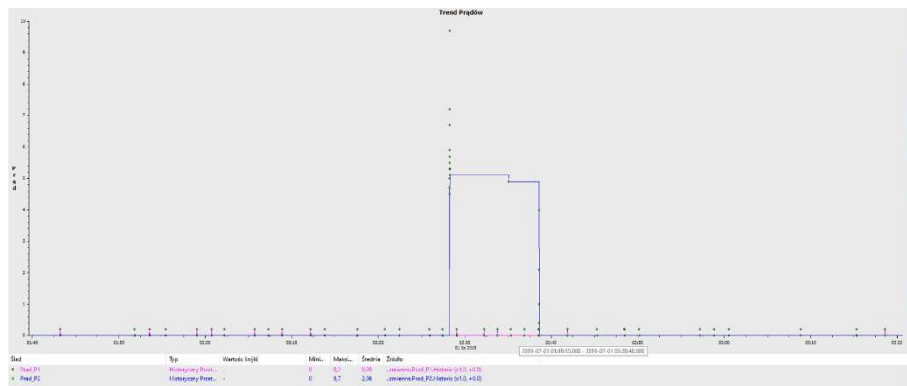
Rys. 8. Przykładowe zdjęcie ekranu obrazujące wartość



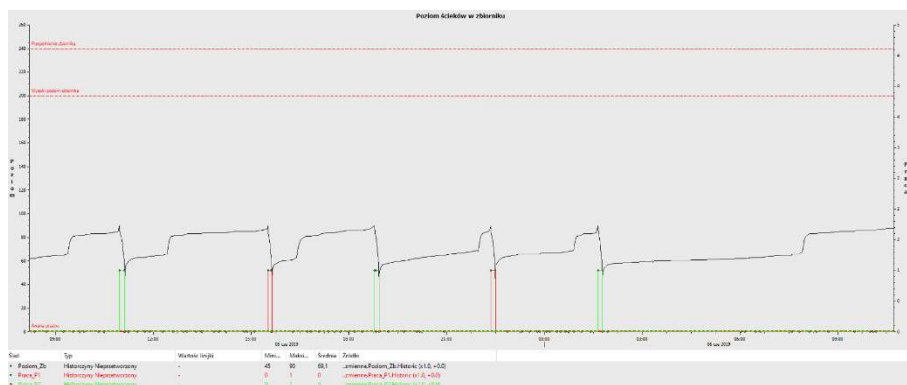
Rys. 9. Przykładowe zdjęcie ekranu obrazujące poziom ścieków w zbiorniku



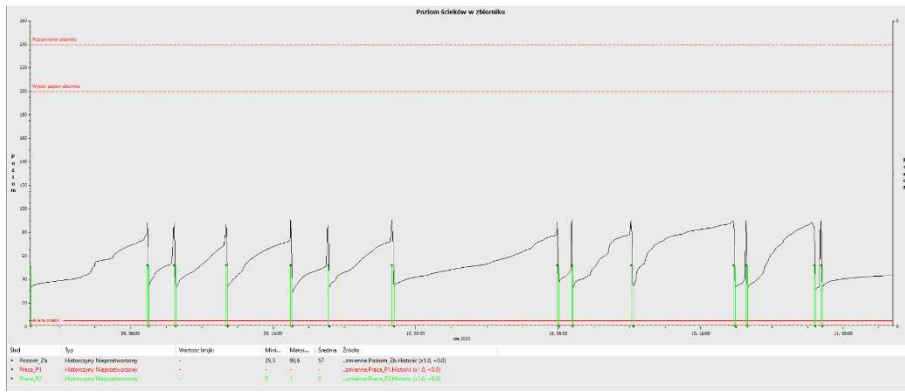
Rys. 10. Przykładowe zdjęcie ekranu obrazujące poziom ścieków w zbiorniku (lewa oś) oraz pracę pomp P1 i P2 (oś prawa).



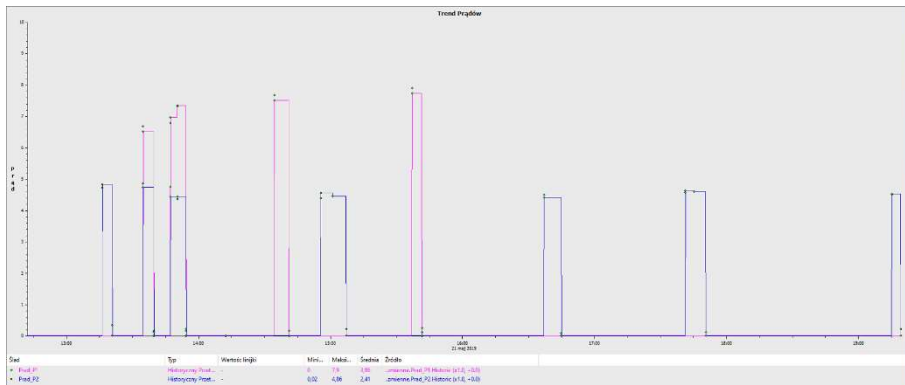
Rys. 11. Przykładowe zdjęcie ekranu obrazujące wartość prądu pomp P1 i P2.



Rys. 12. Przykładowe zdjęcie ekranu obrazujące poziom ścieków w zbiorniku (lewa oś) oraz pracę pomp P1 i P2 (oś prawa).

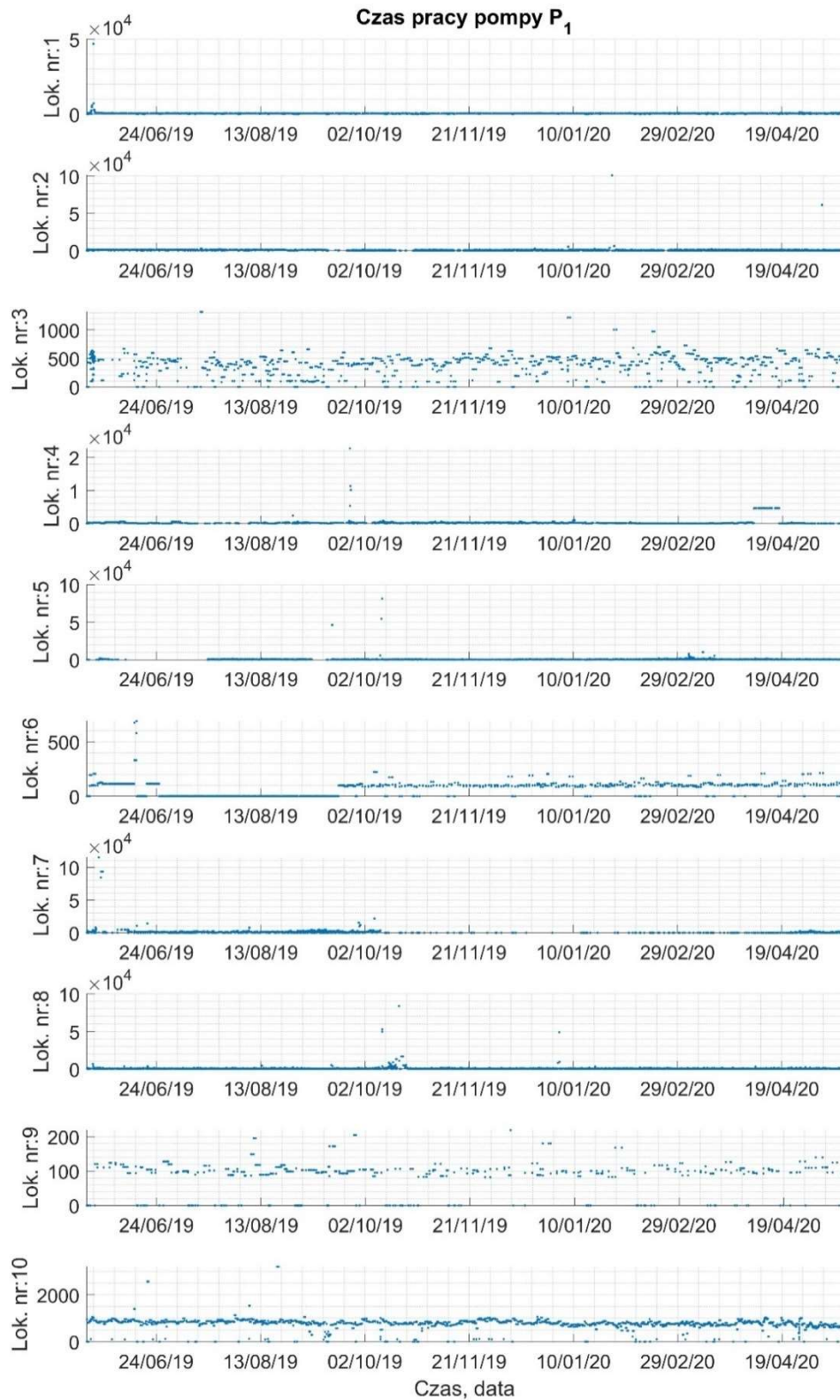


Rys. 13. Przykładowe zdjęcie ekranu obrazujące poziom ścieków w zbiorniku (lewa oś) oraz pracę pomp P1 i P2 (oś prawa).

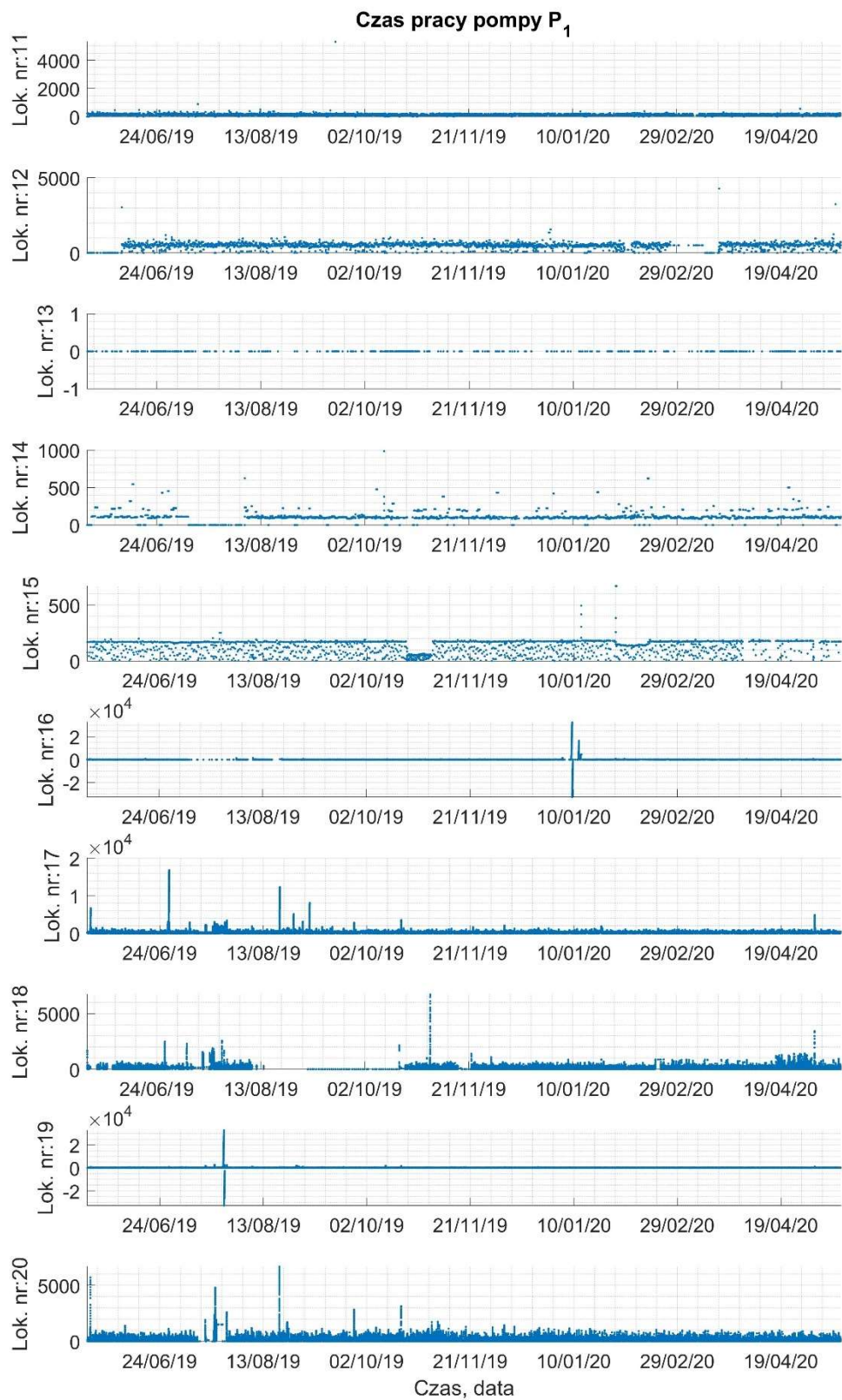


Rys. 14. Przykładowe zdjęcie ekranu obrazujące wartość prądu pomp P1 i P2.

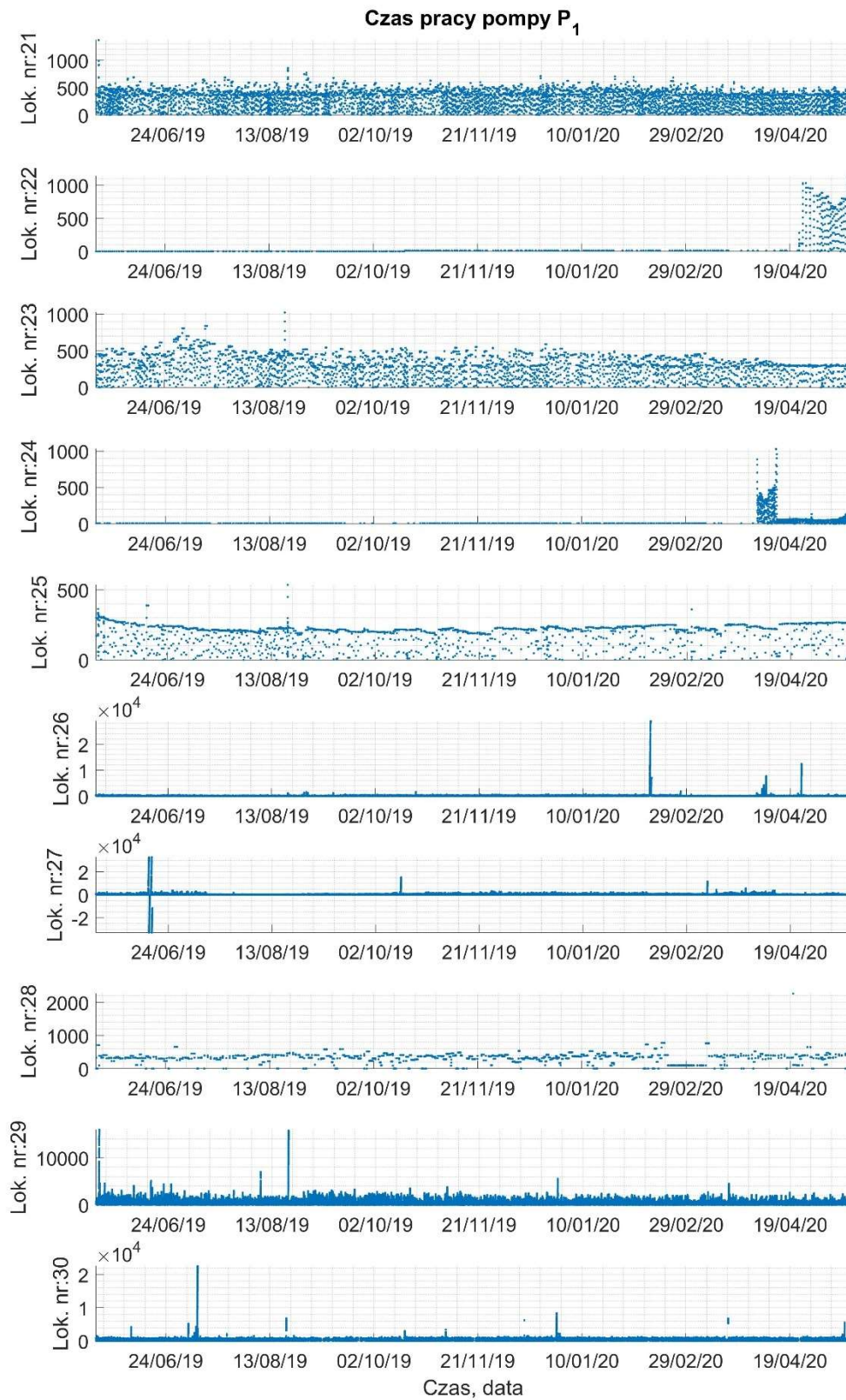
Załącznik 2 Przebiegi czasowe czasów pracy pomp P1 i P1 rejestrowanych w kolejnych lokalizacjach



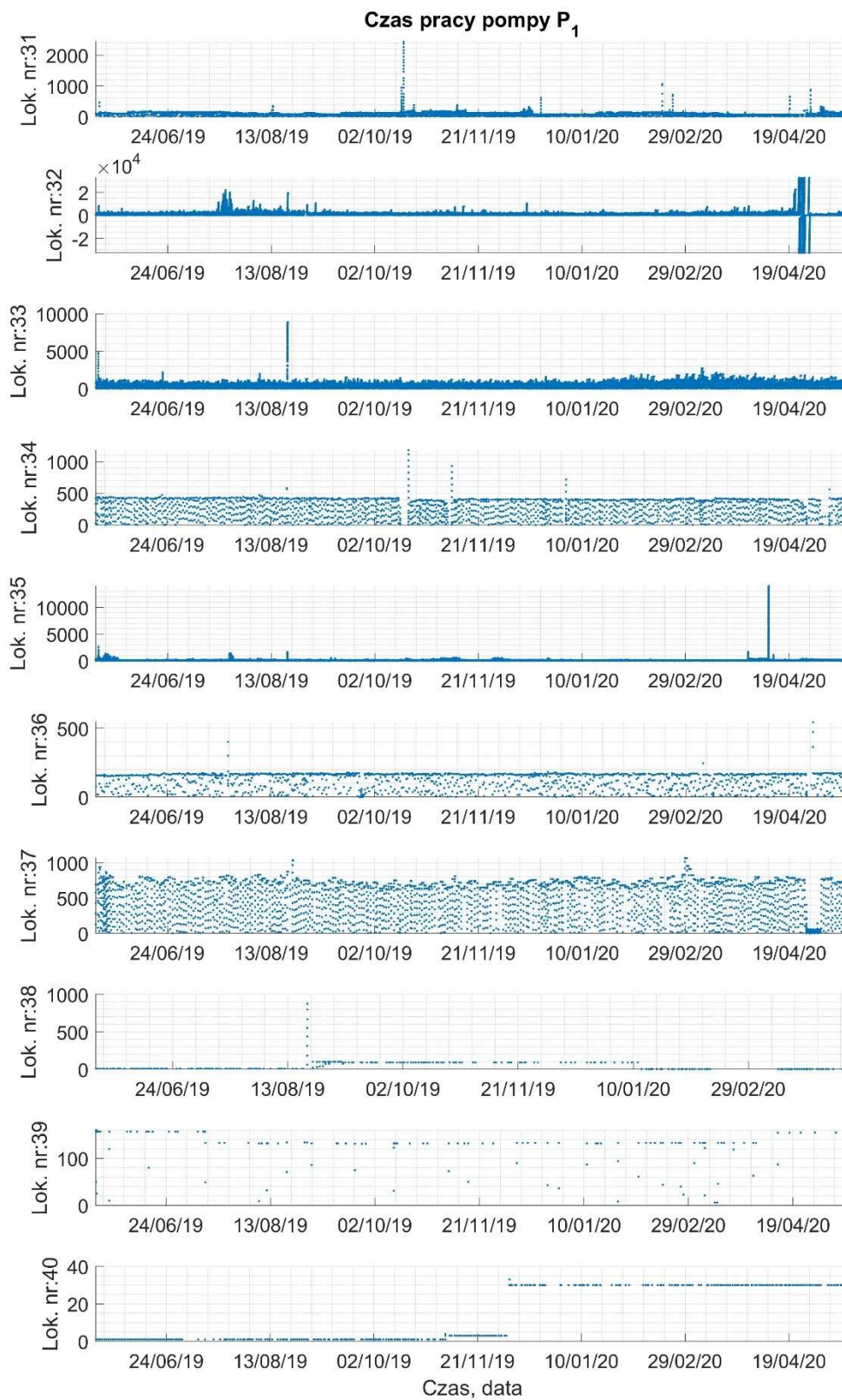
Rys. 1 Czas pracy pomp P1 rejestrowany w kolejnych lokalizacjach w okresie V/2019-V/2020.



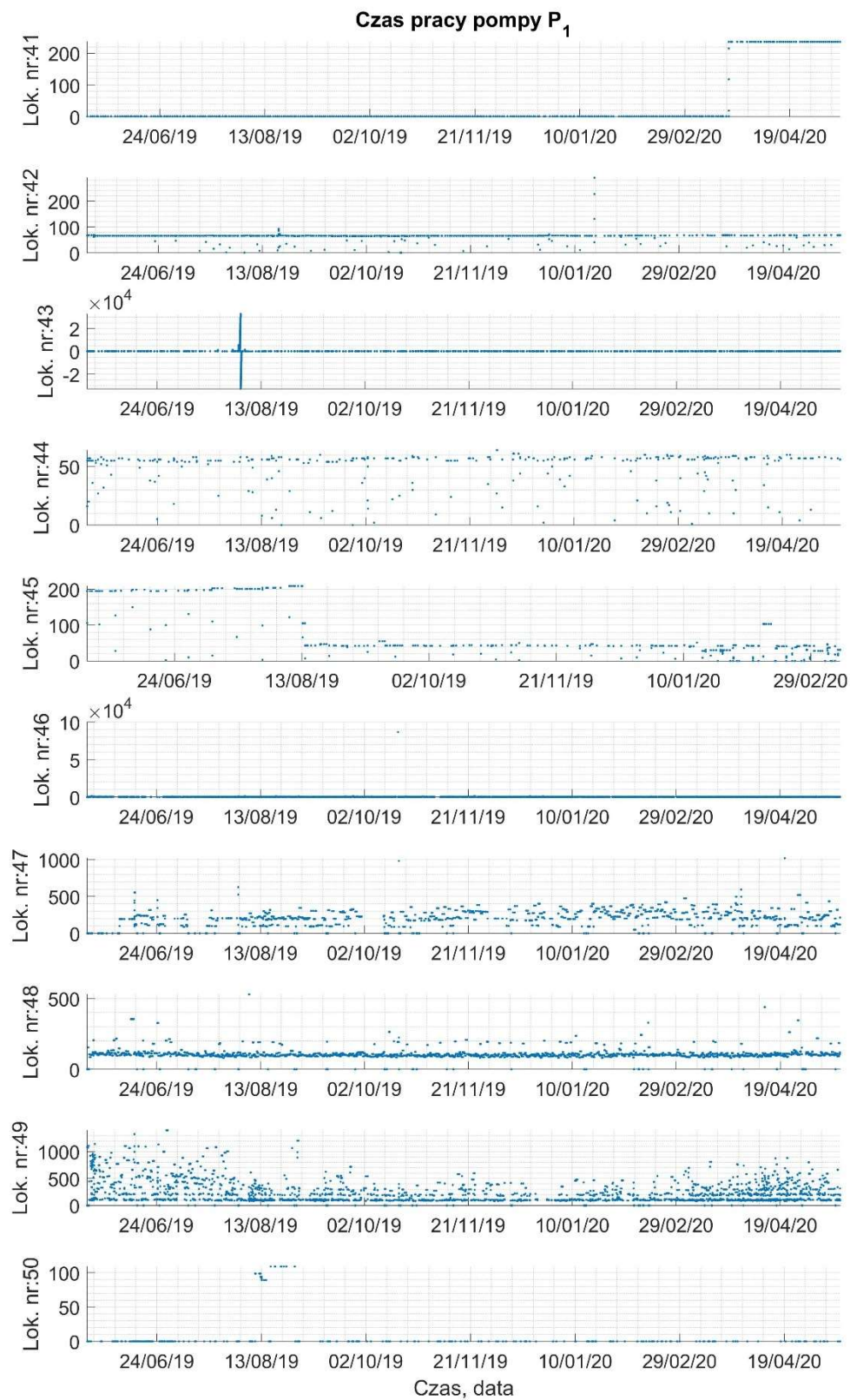
Rys. 2 Czas pracy pomp P1 rejestrowany w kolejnych lokalizacjach w okresie V/2019-V/2020.



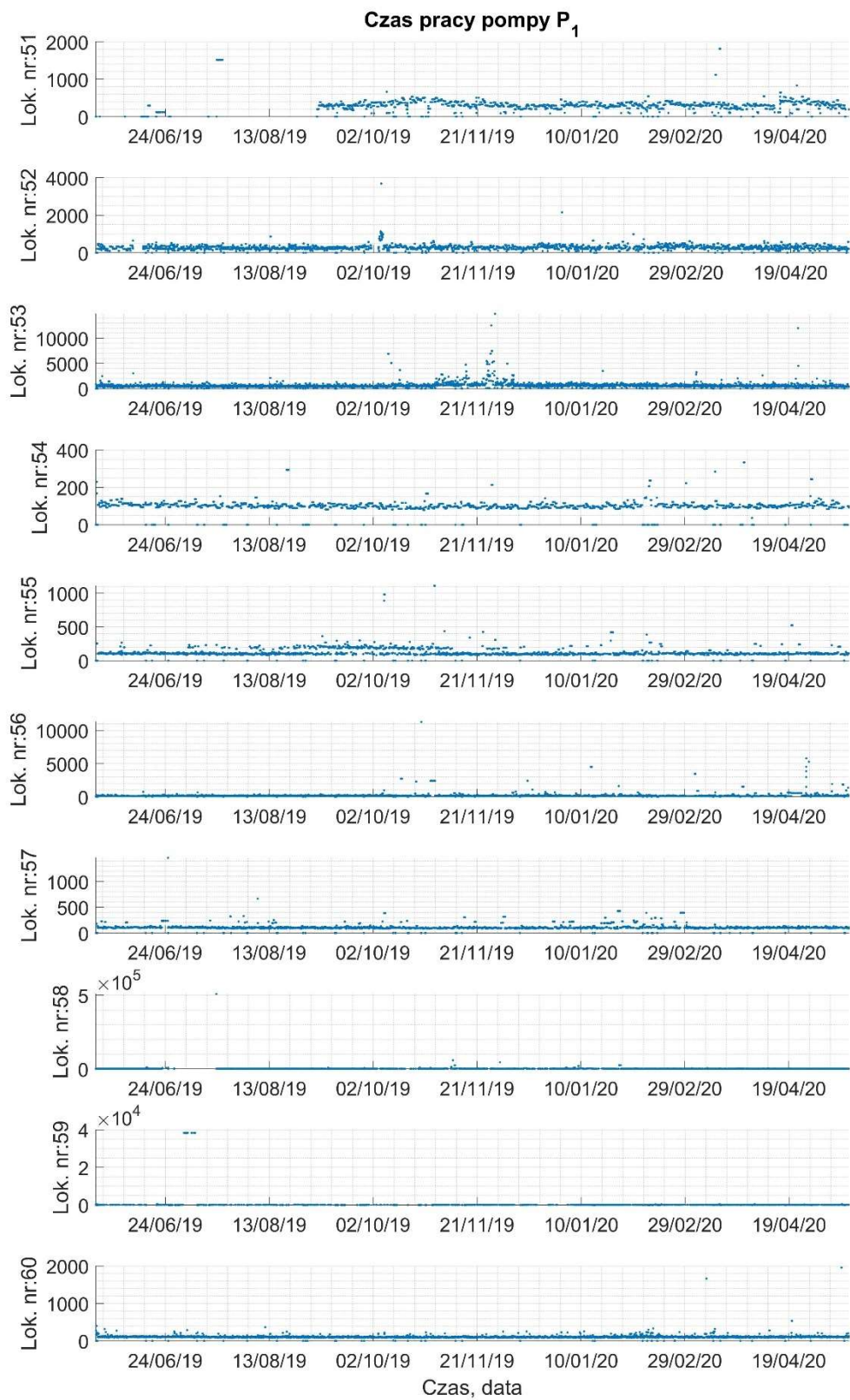
Rys. 3 Czas pracy pomp P1 rejestrowany w kolejnych lokalizacjach w okresie V/2019-V/2020.



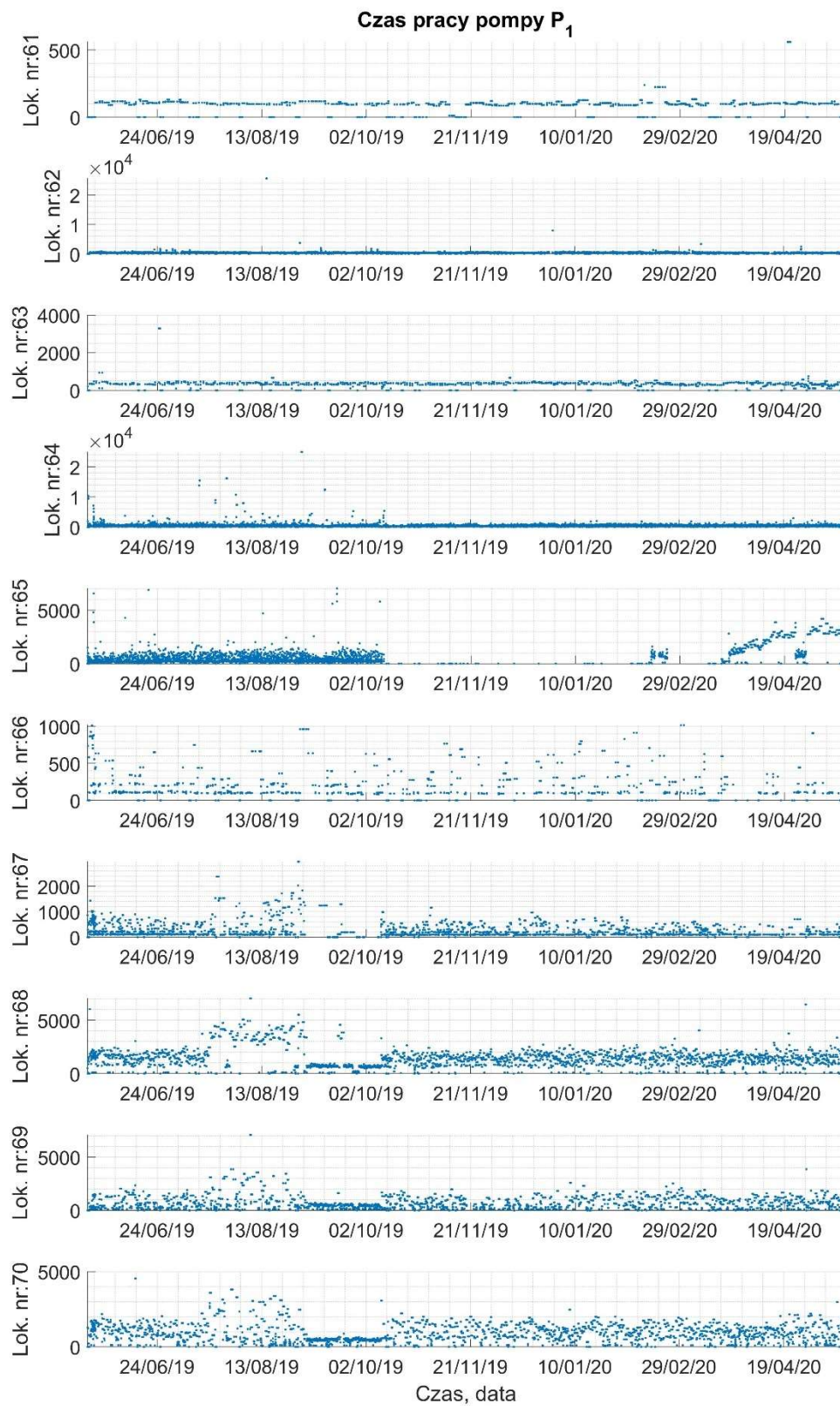
Rys. 4 Czas pracy pomp P1 rejestrowany w kolejnych lokalizacjach w okresie V/2019-V/2020.



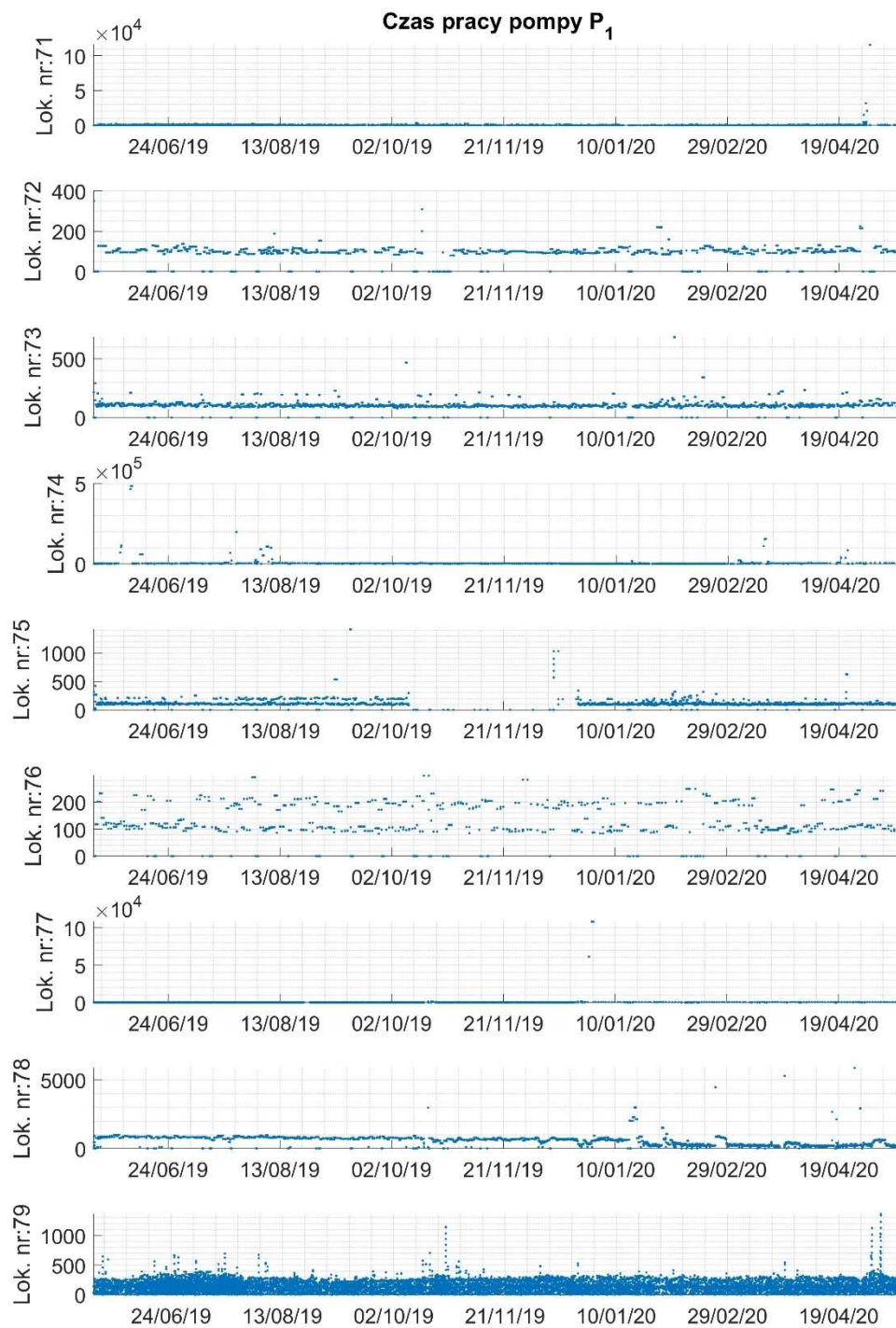
Rys. 5 Czas pracy pomp P1 rejestrowany w kolejnych lokalizacjach w okresie V/2019-V/2020.



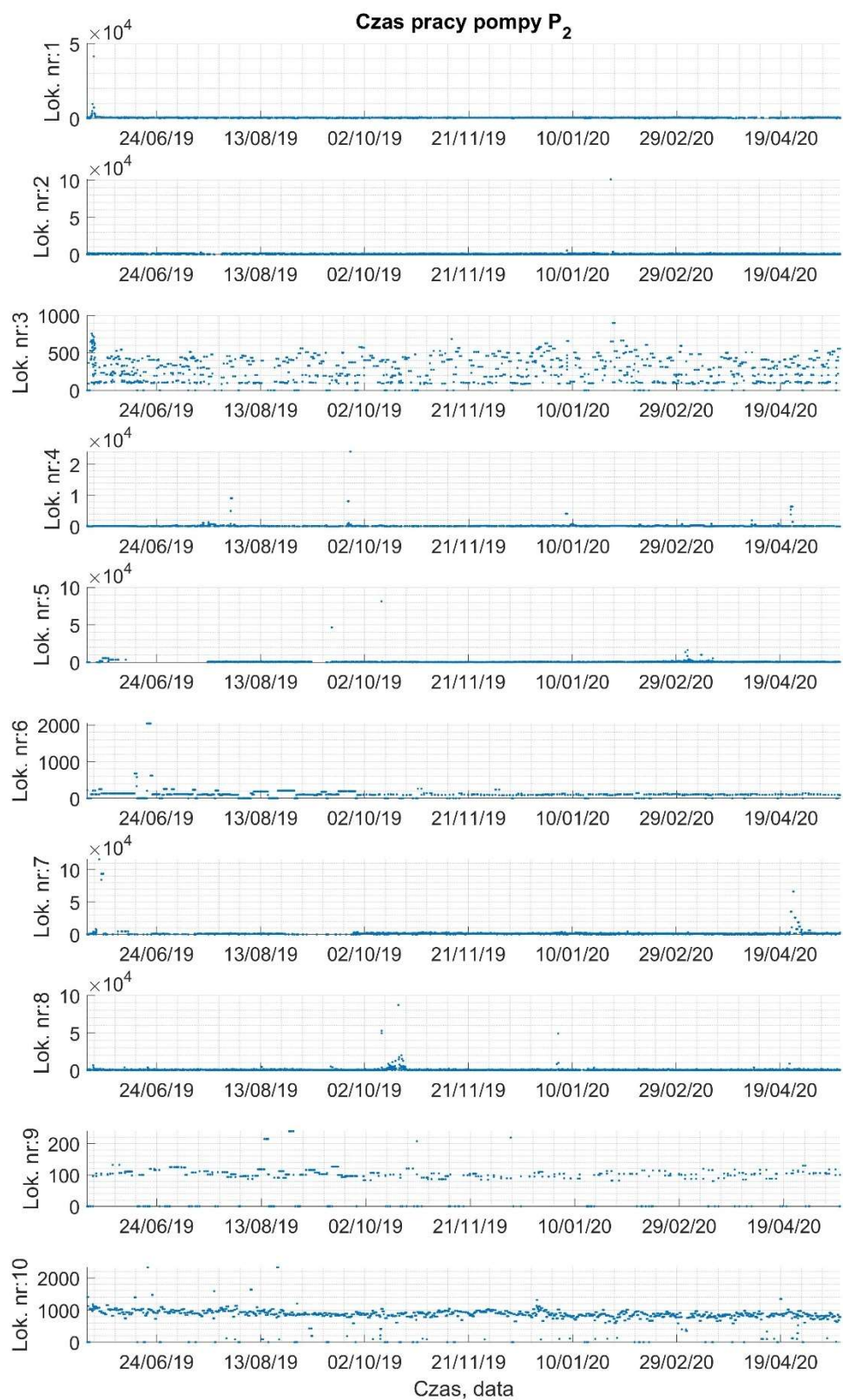
Rys. 6 Czas pracy pomp P1 rejestrowany w kolejnych lokalizacjach w okresie V/2019-V/2020.



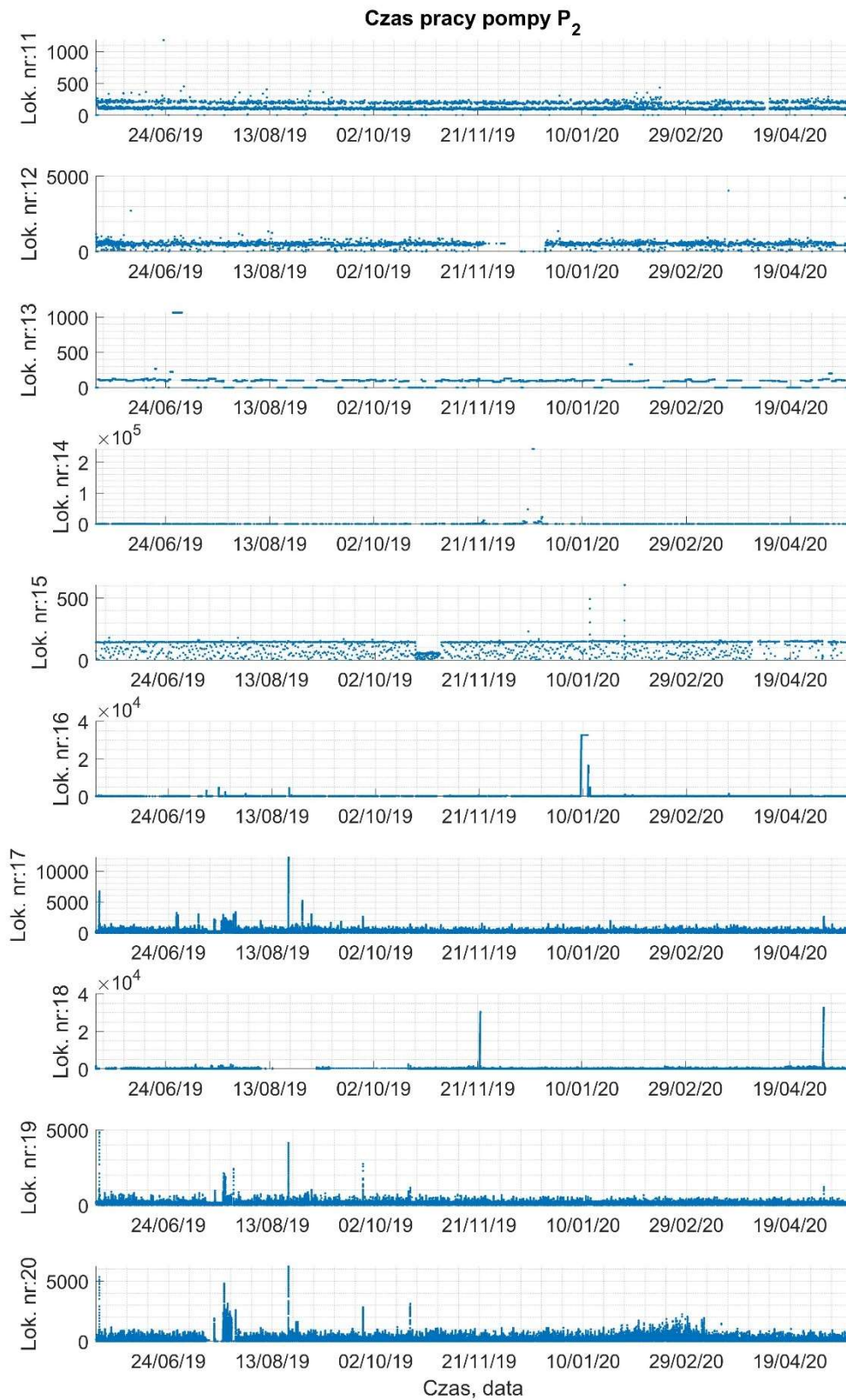
Rys. 7 Czas pracy pomp P1 rejestrowany w kolejnych lokalizacjach w okresie V/2019-V/2020.



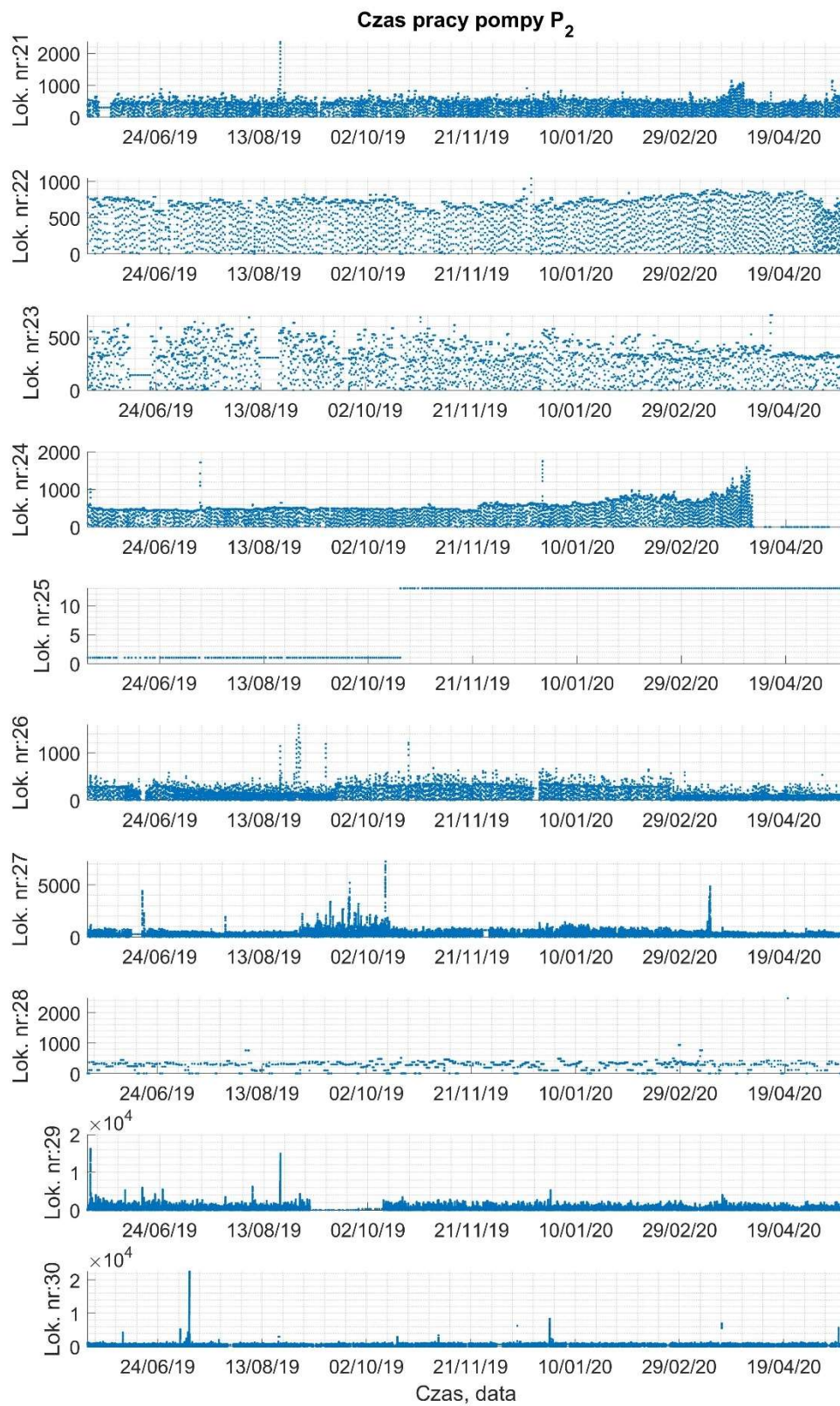
Rys. 8 Czas pracy pompy P1 rejestrowany w kolejnych lokalizacjach w okresie V/2019-V/2020.



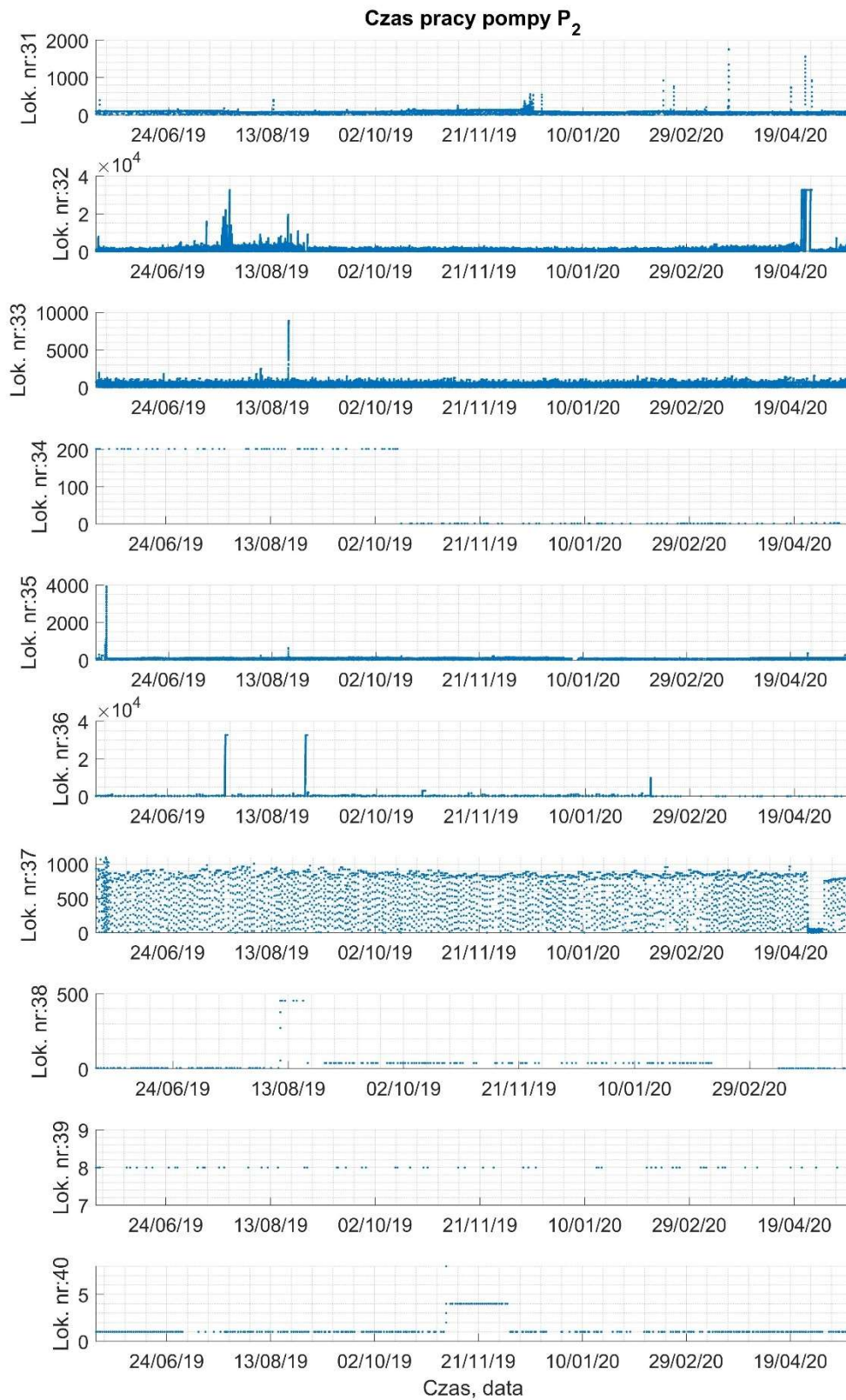
Rys. 9 Czas pracy pomp P2 rejestrowany w kolejnych lokalizacjach w okresie V/2019-V/2020.



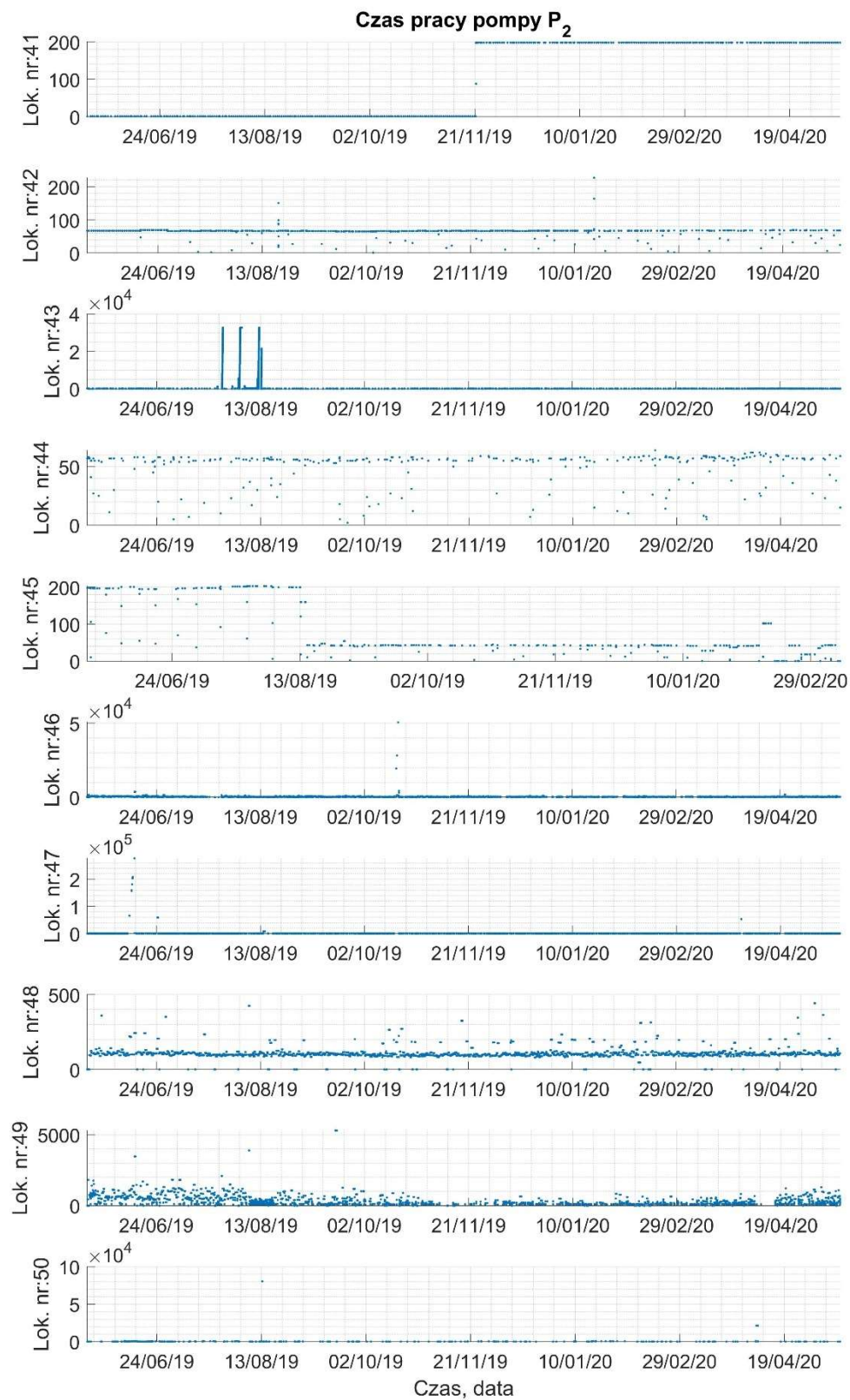
Rys. 10 Czas pracy pomp P₂ rejestrowany w kolejnych lokalizacjach w okresie V/2019-V/2020.



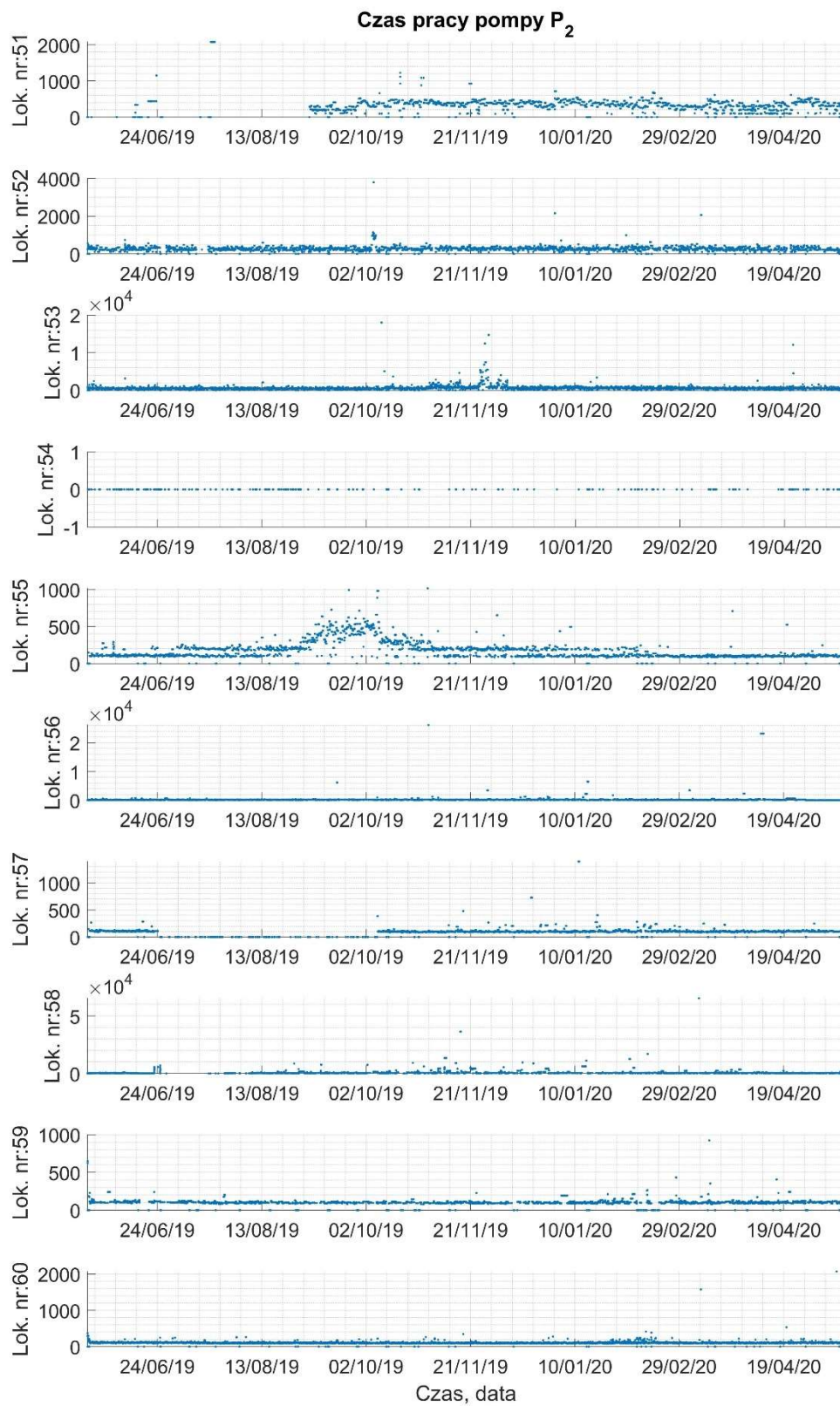
Rys. 11 Czas pracy pomp P2 rejestrowany w kolejnych lokalizacjach w okresie V/2019-V/2020.



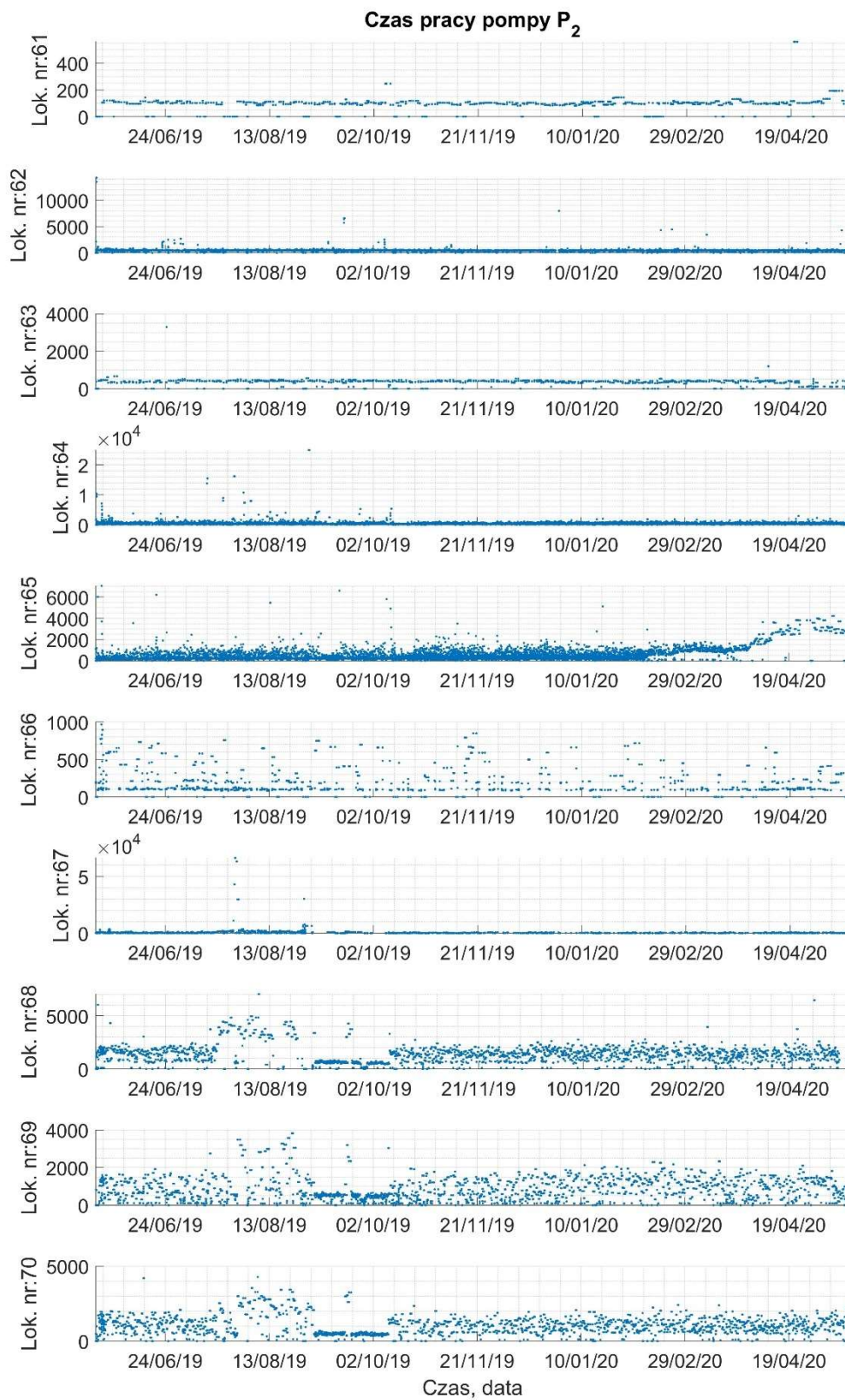
Rys. 12 Czas pracy pomp P2 rejestrowany w kolejnych lokalizacjach w okresie V/2019-V/2020.



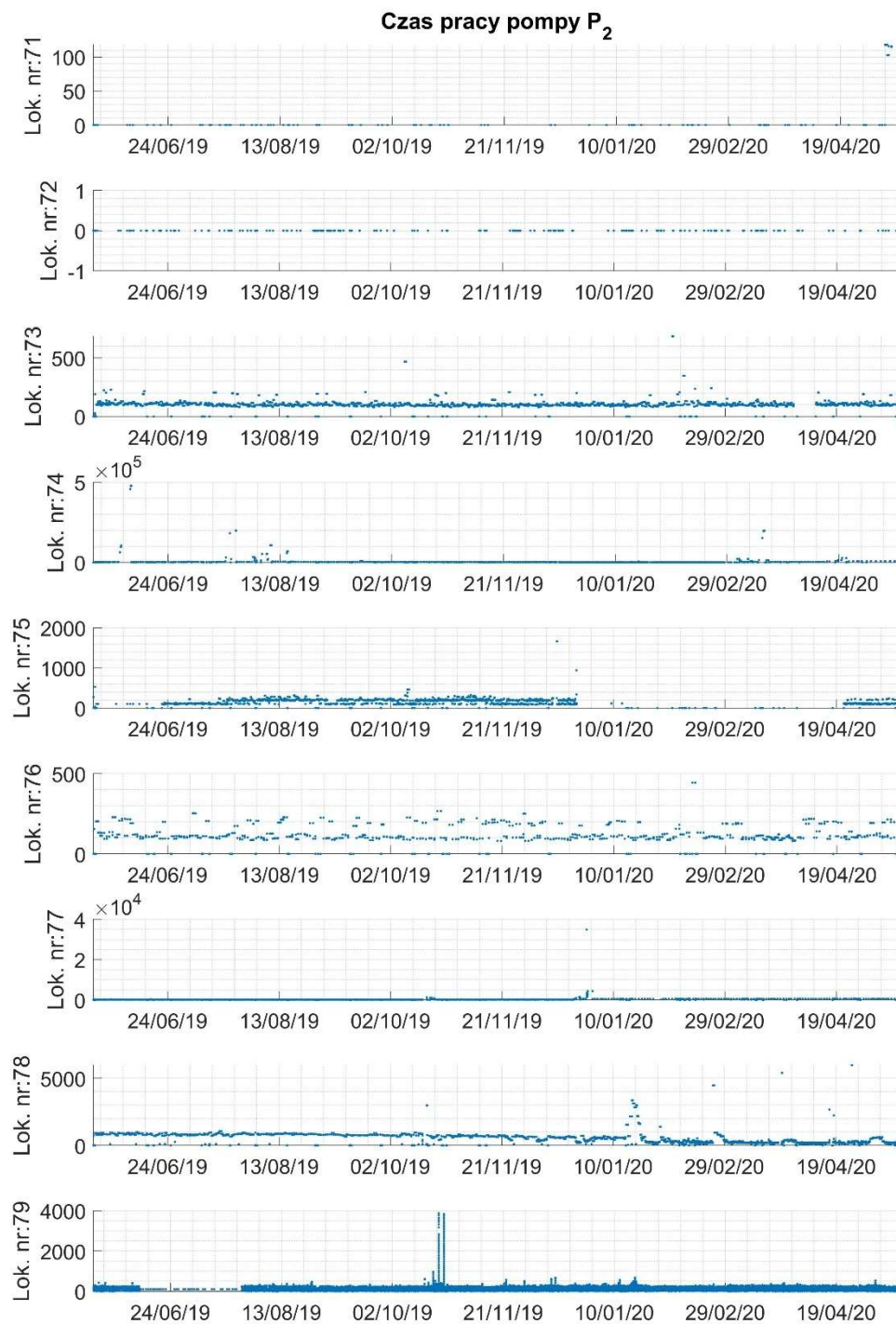
Rys. 13 Czas pracy pomp P2 rejestrowany w kolejnych lokalizacjach w okresie V/2019-V/2020.



Rys. 14 Czas pracy pomp P₂ rejestrowany w kolejnych lokalizacjach w okresie V/2019-V/2020.

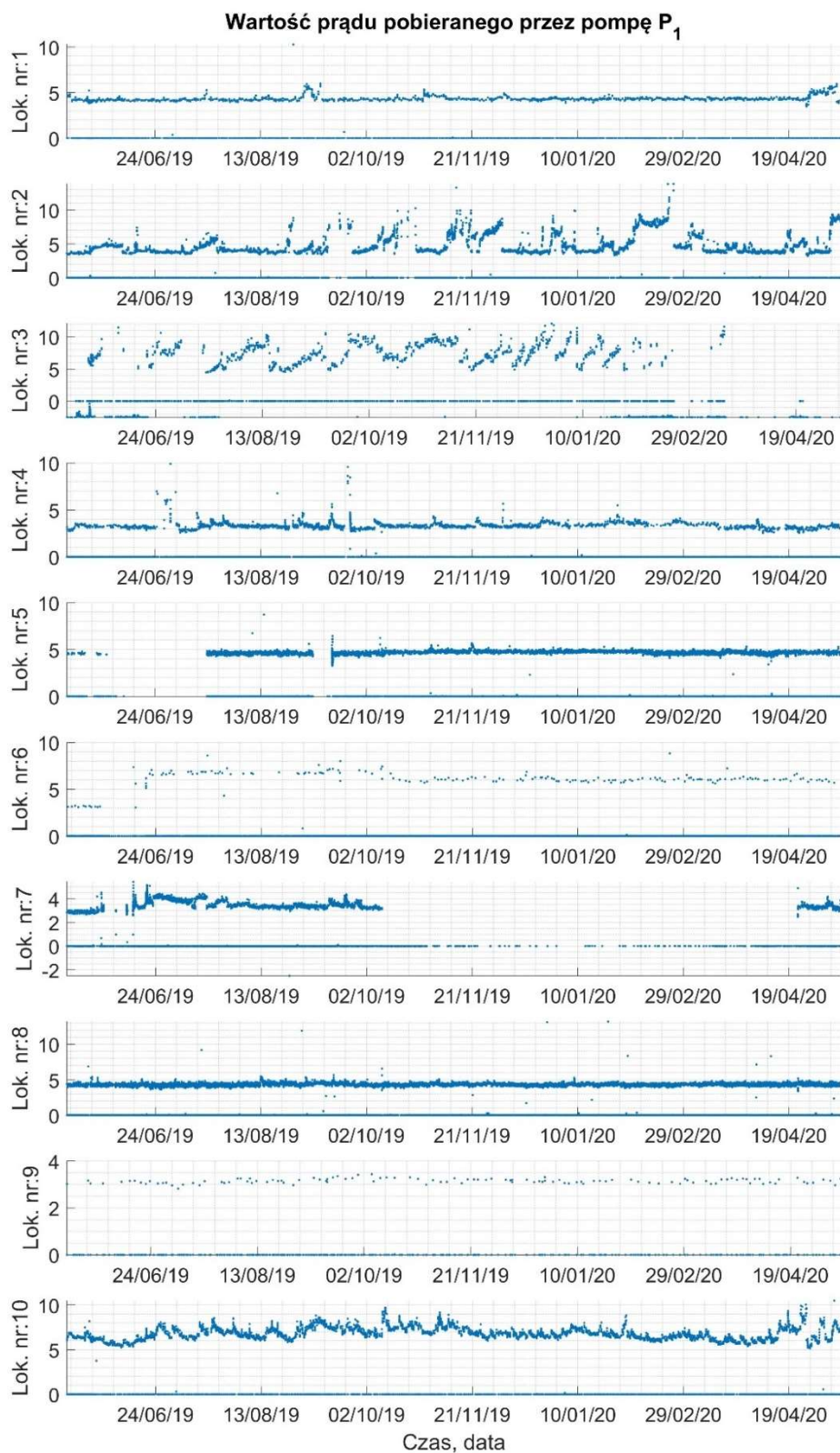


Rys. 15 Czas pracy pomp P2 rejestrowany w kolejnych lokalizacjach w okresie V/2019-V/2020.

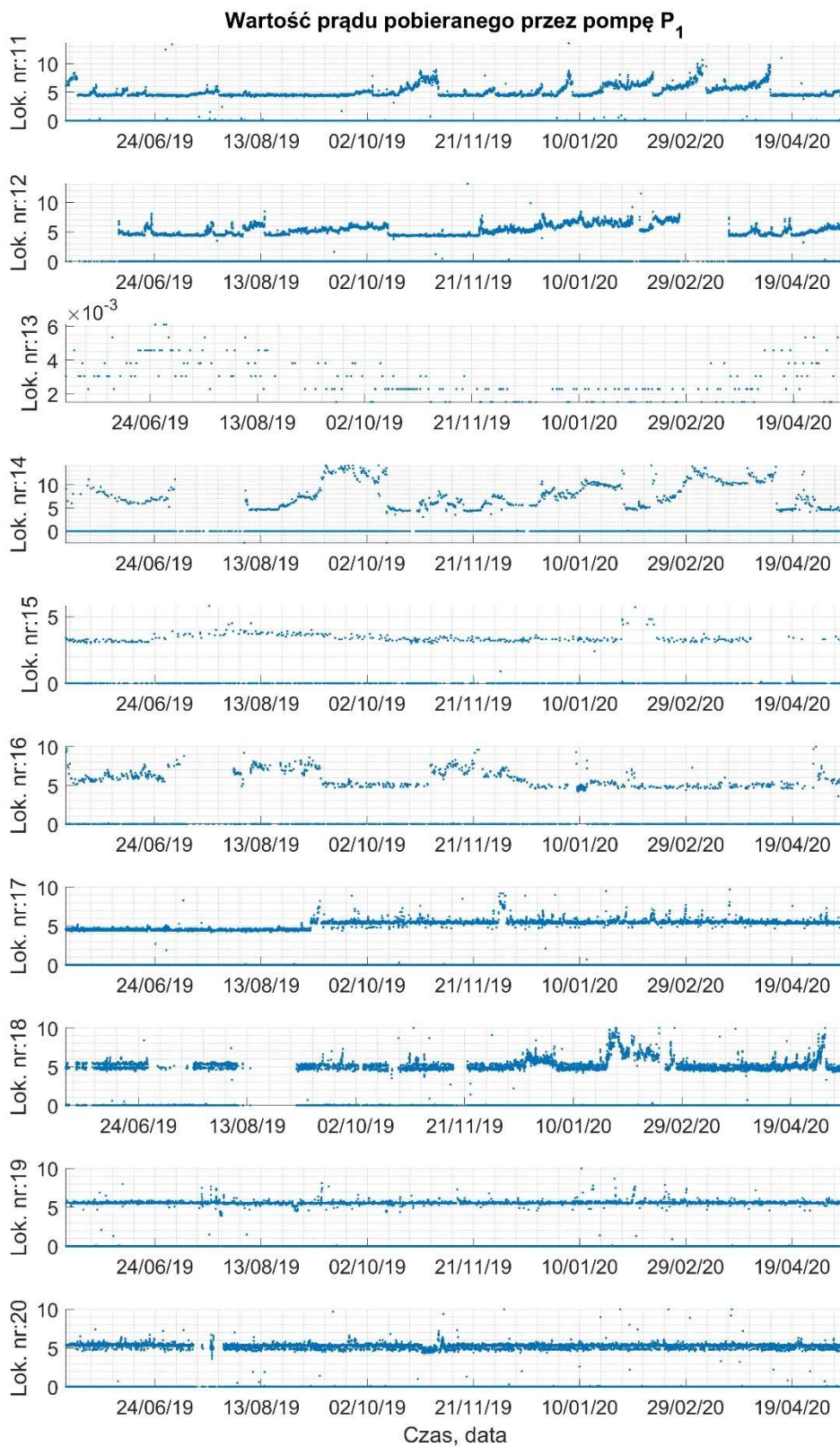


Rys. 16 Czas pracy pomp P2 rejestrowany w kolejnych lokalizacjach w okresie V/2019-V/2020.

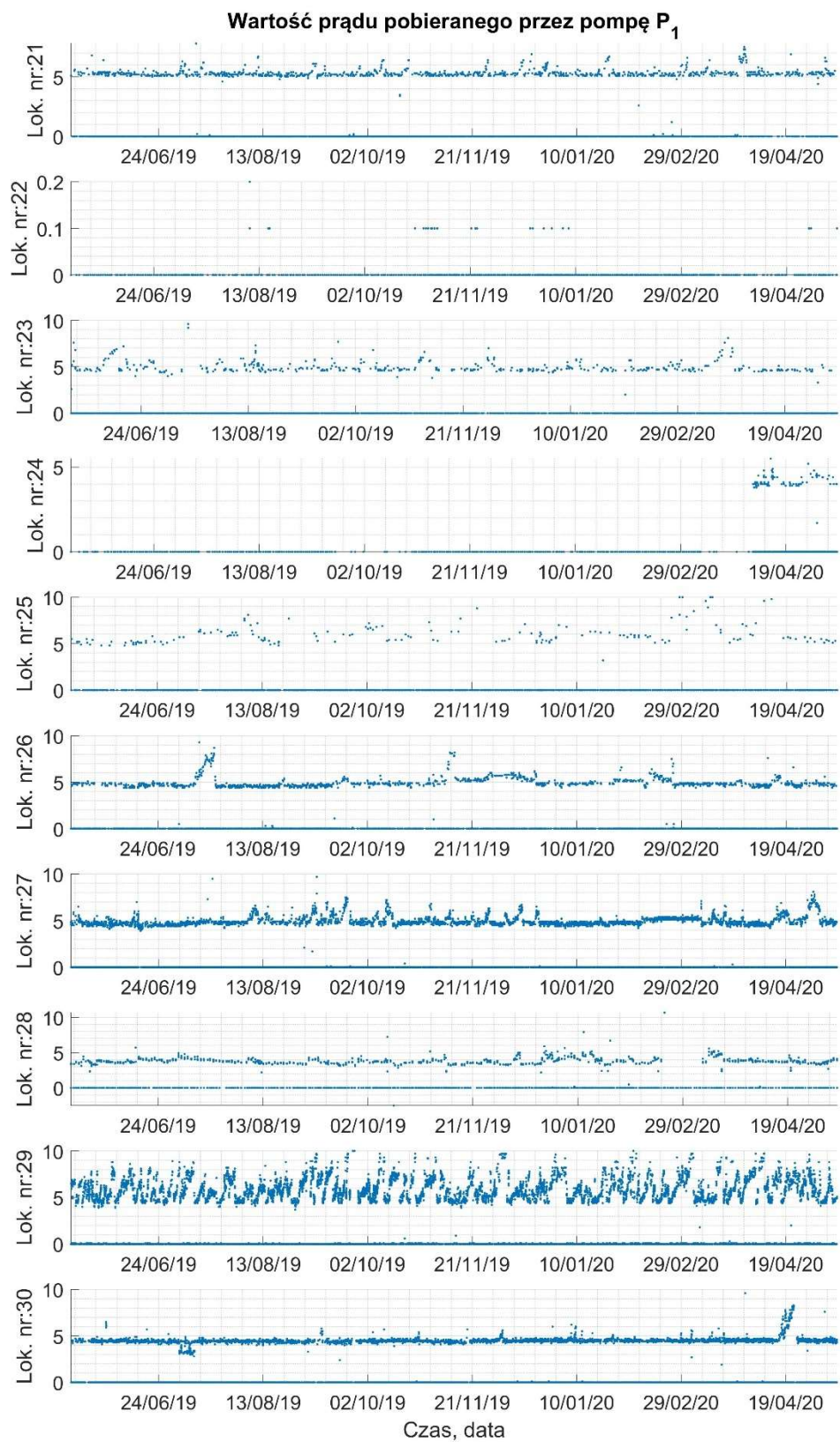
Załącznik 3 Przebiegi czasowe wartości prądu pobieranego przez pompy P1 i P2 w kolejnych lokalizacjach



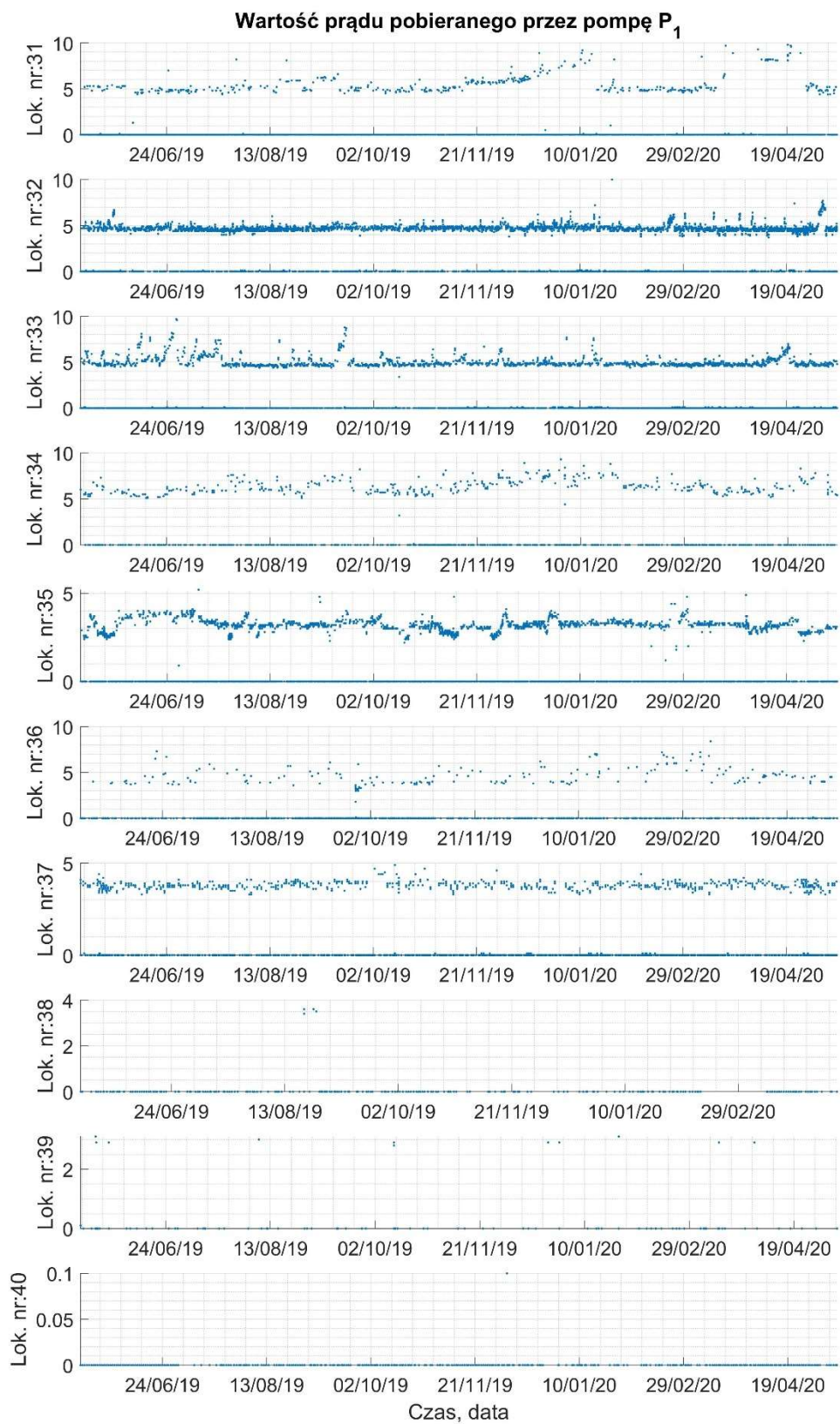
Rys. 1 Wartość prądu pobieranego przez pompę P1, rejestrowana dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.



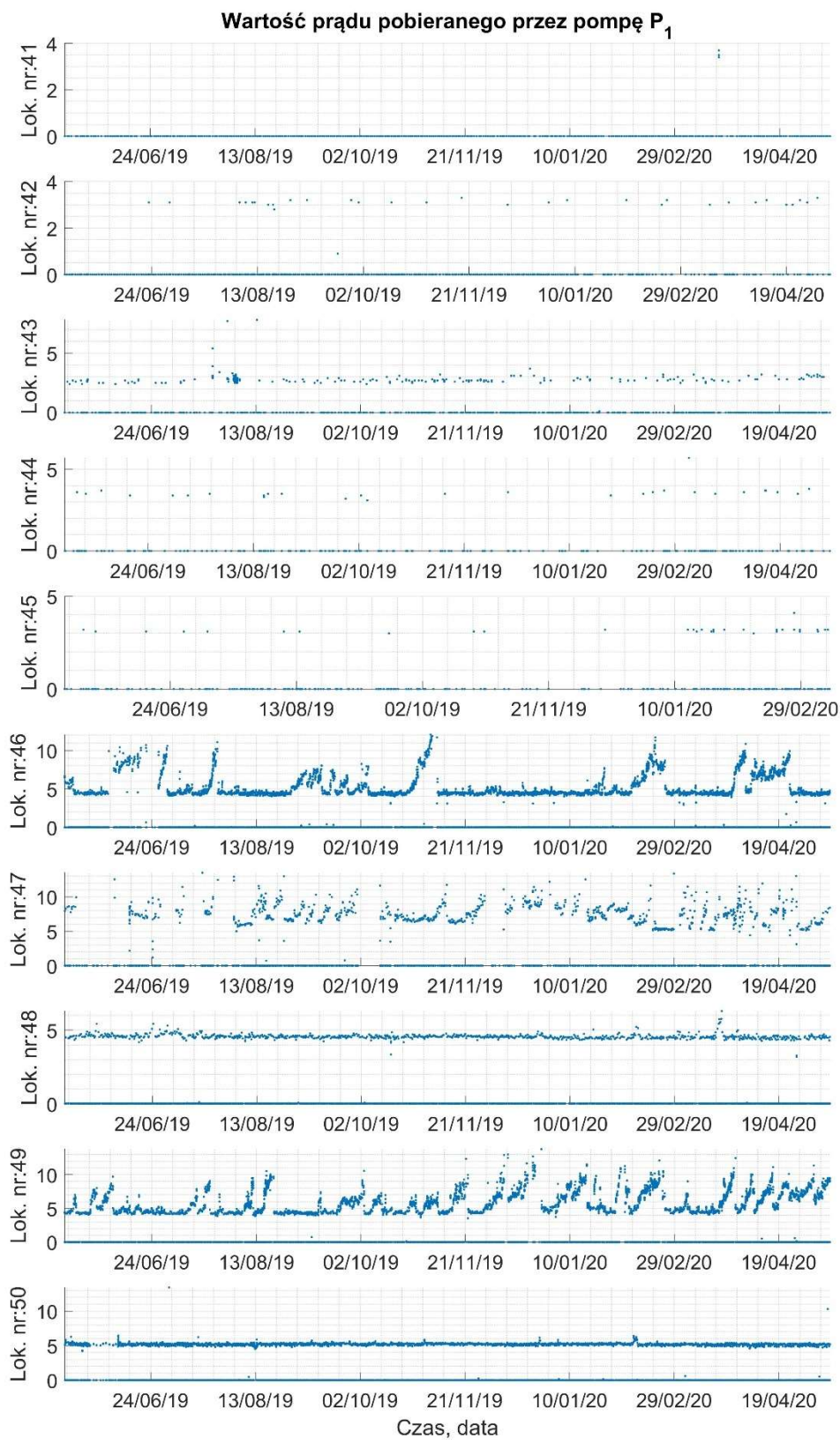
Rys. 2 Wartość prądu pobieranego przez pompę P1, rejestrowana dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.



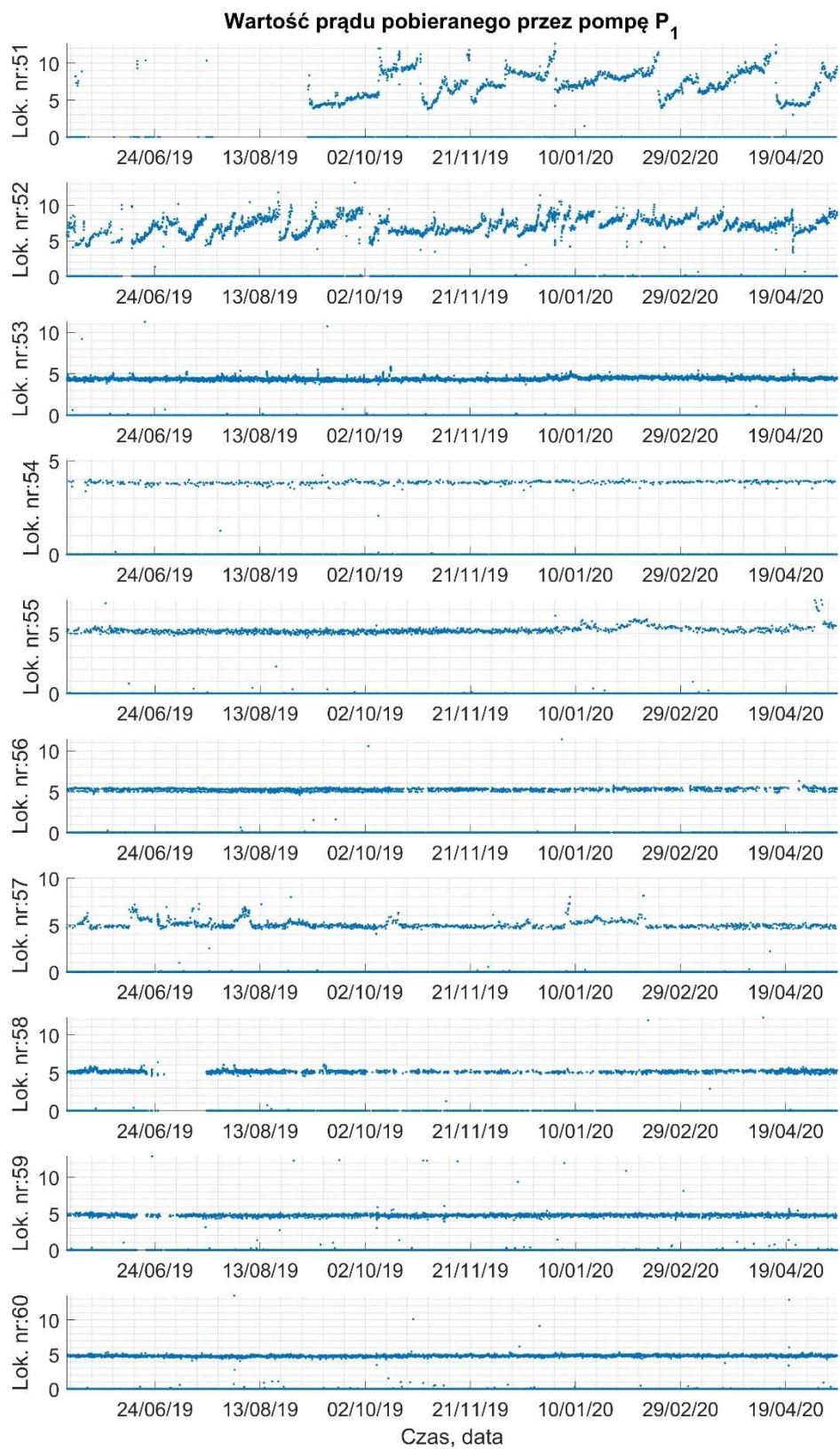
Rys. 3 Wartość prądu pobieranego przez pompę P₁, rejestrowana dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.



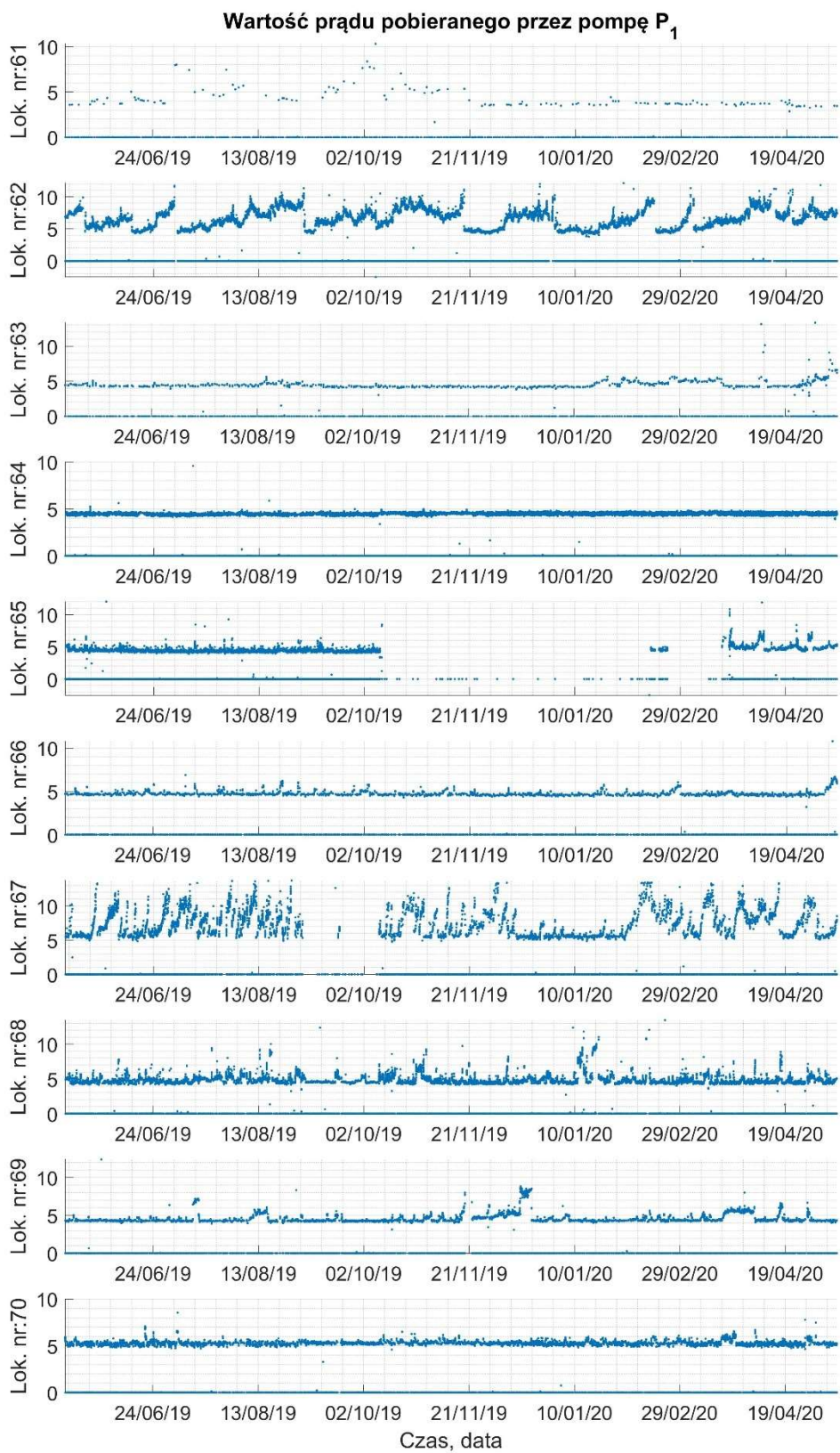
Rys. 4 Wartość prądu pobieranego przez pompę P₁, rejestrowana dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.



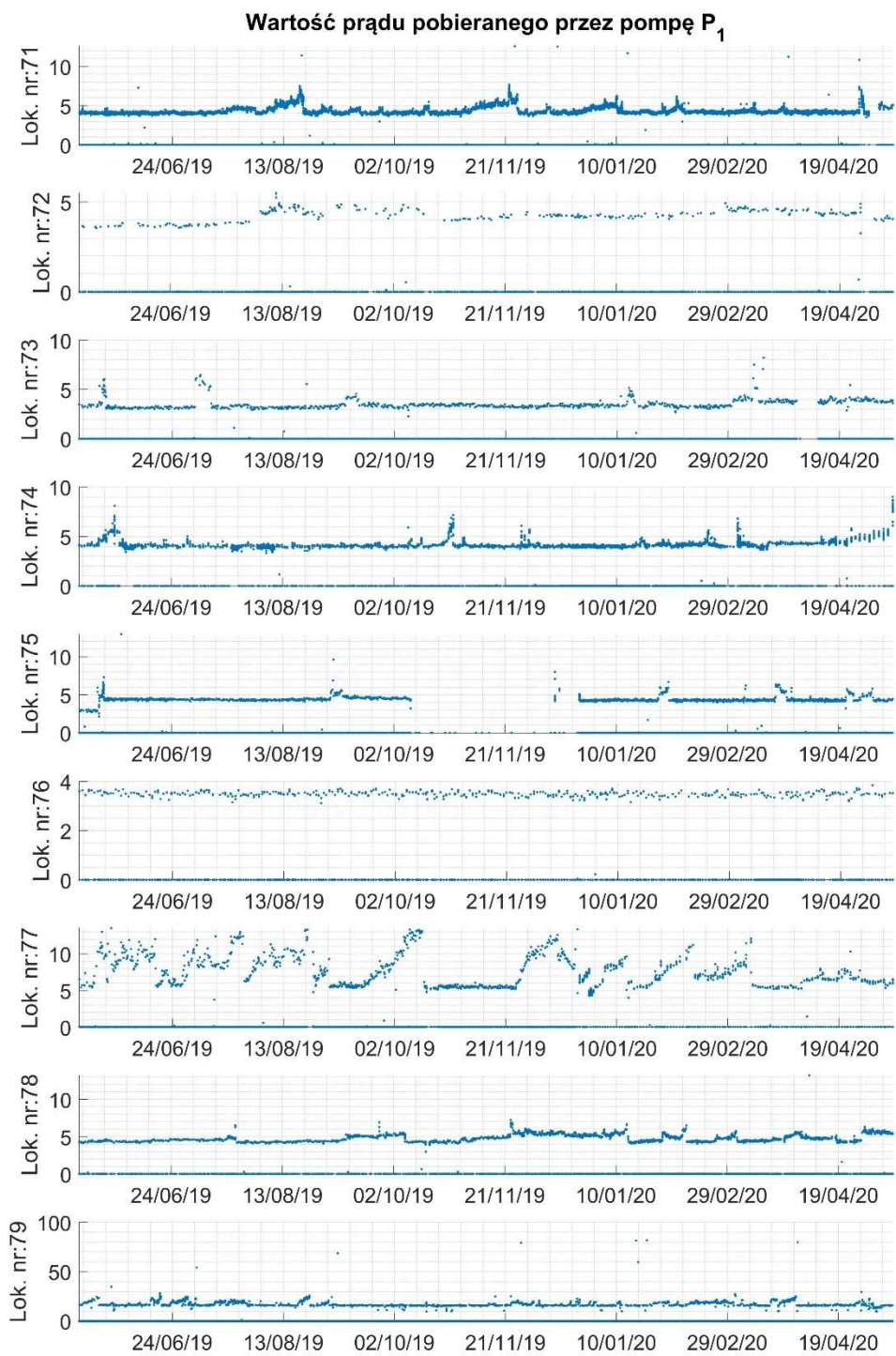
Rys. 5 Wartość prądu pobieranego przez pompę P1, rejestrowana dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.



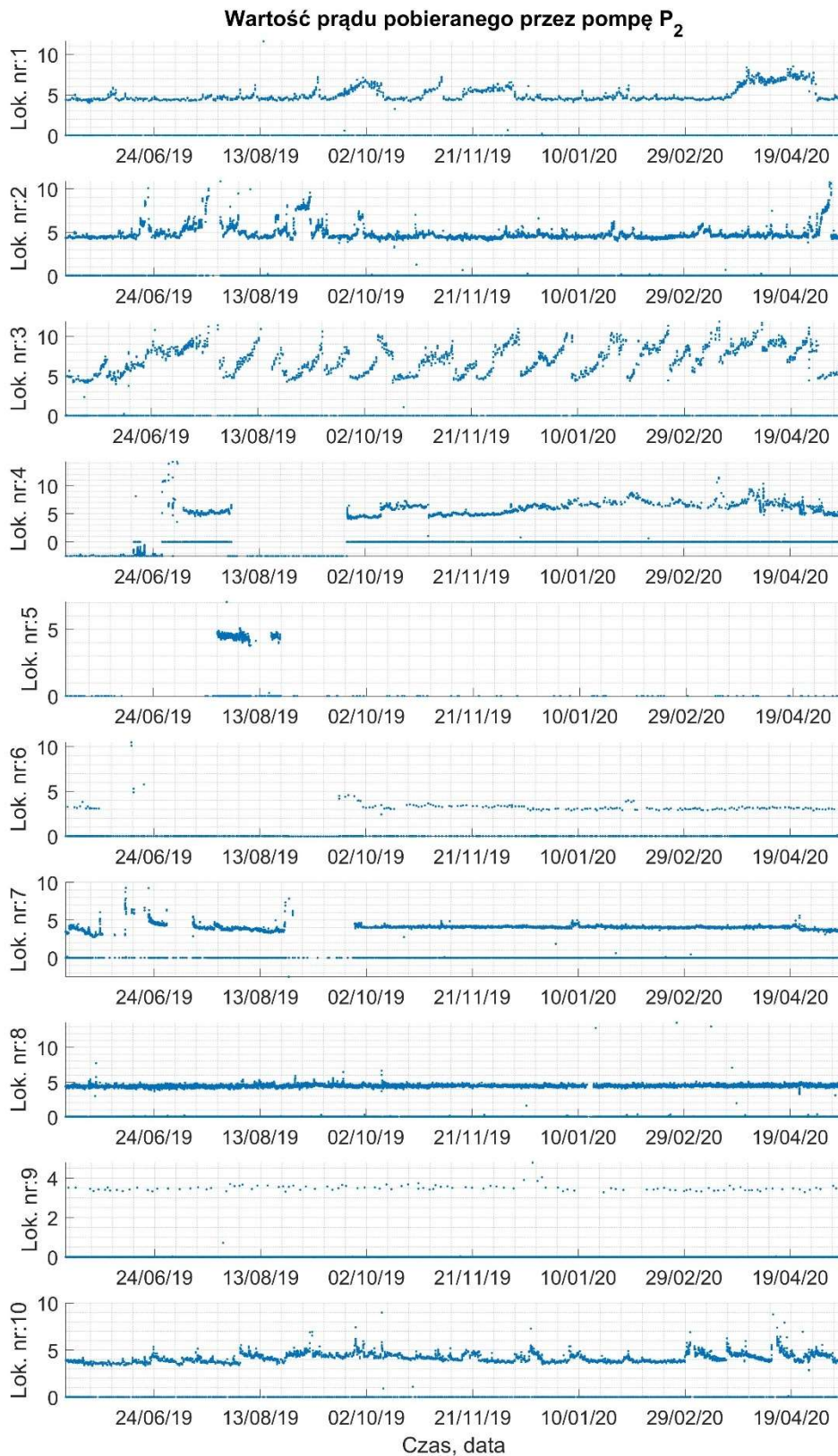
Rys. 6 Wartość prądu pobieranego przez pompę P₁, rejestrowana dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.



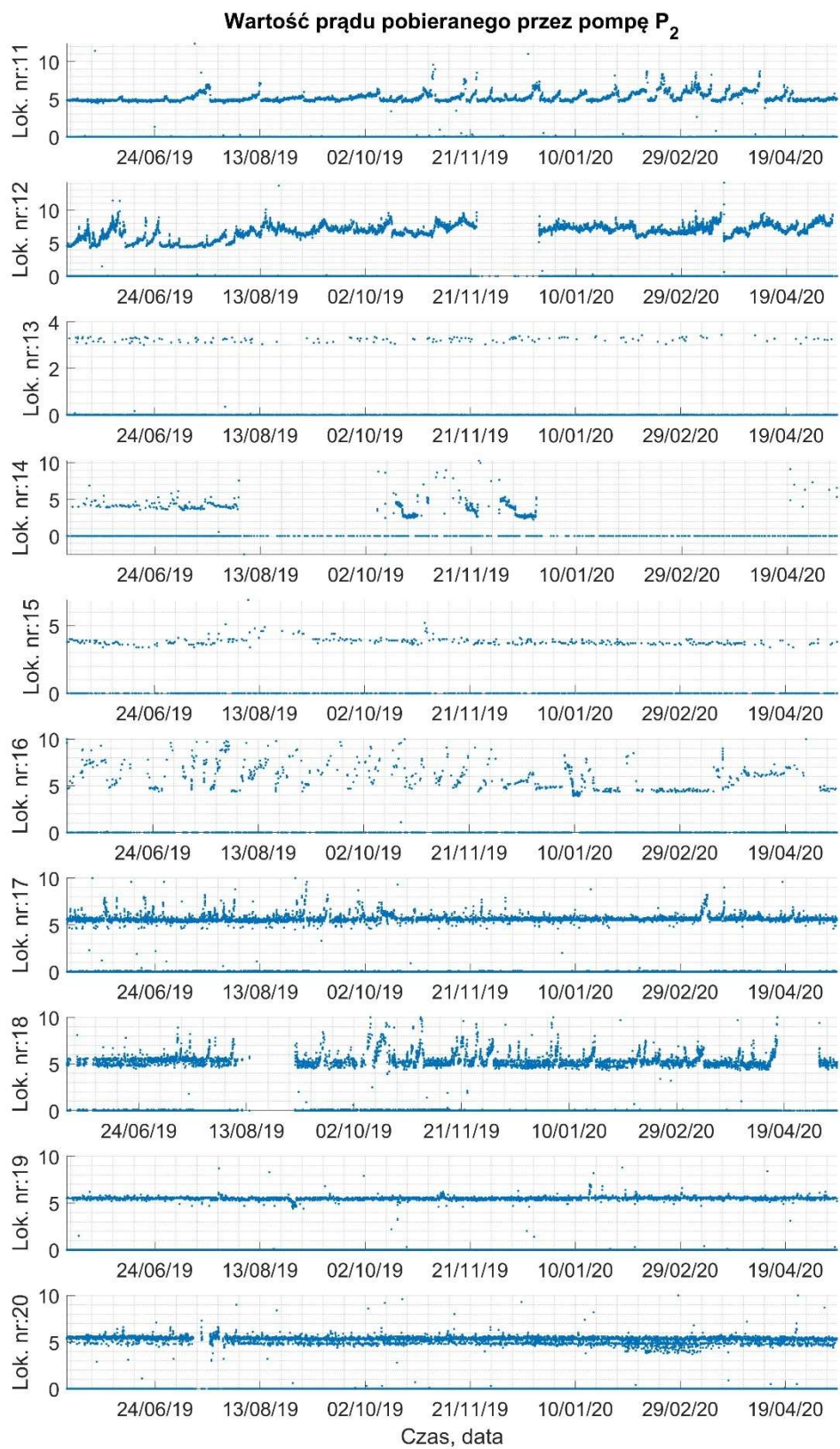
Rys. 7 Wartość prądu pobieranego przez pompę P₁, rejestrowana dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.



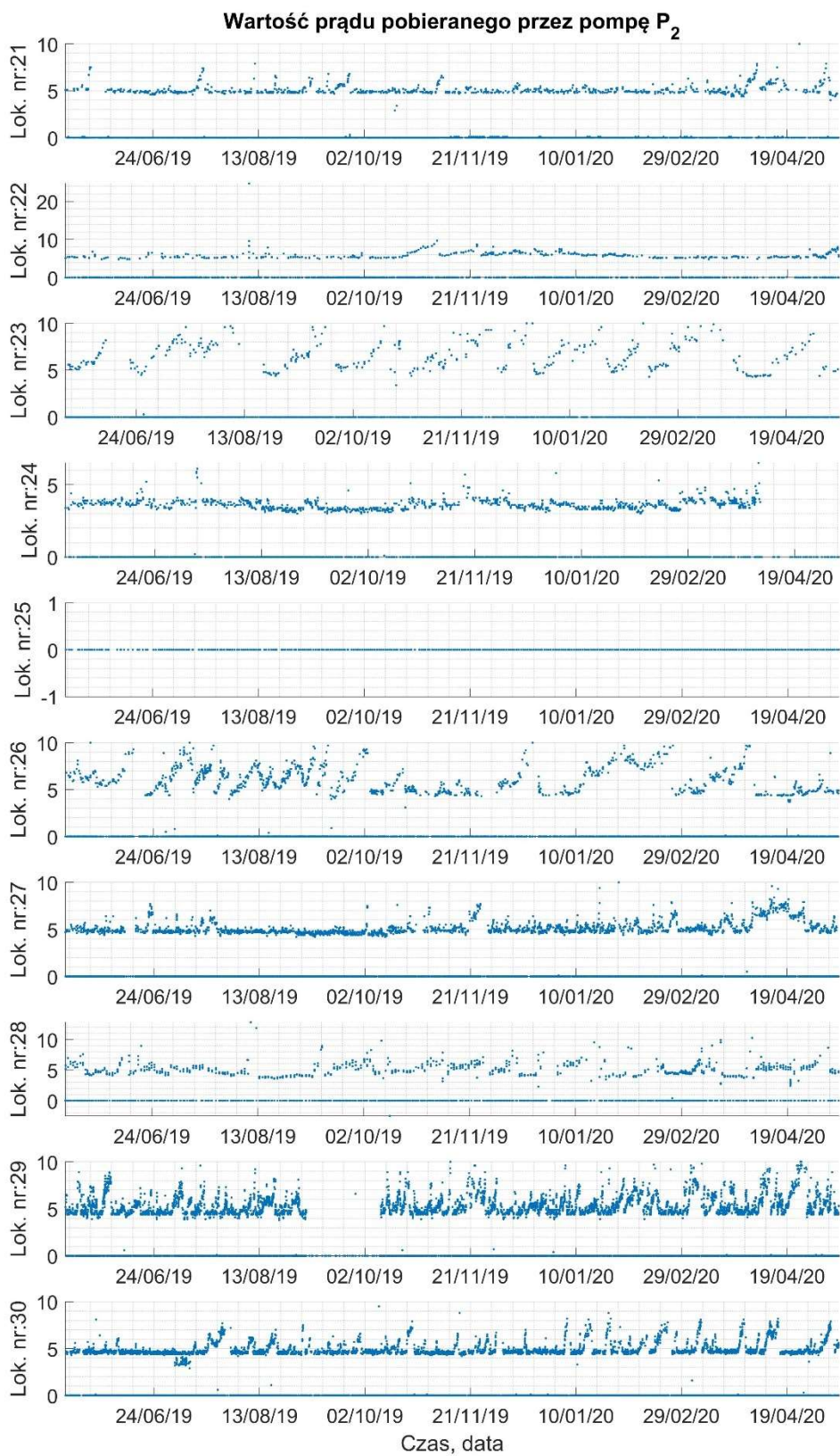
Rys. 8 Wartość prądu pobieranego przez pompę P₁, rejestrowana dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.



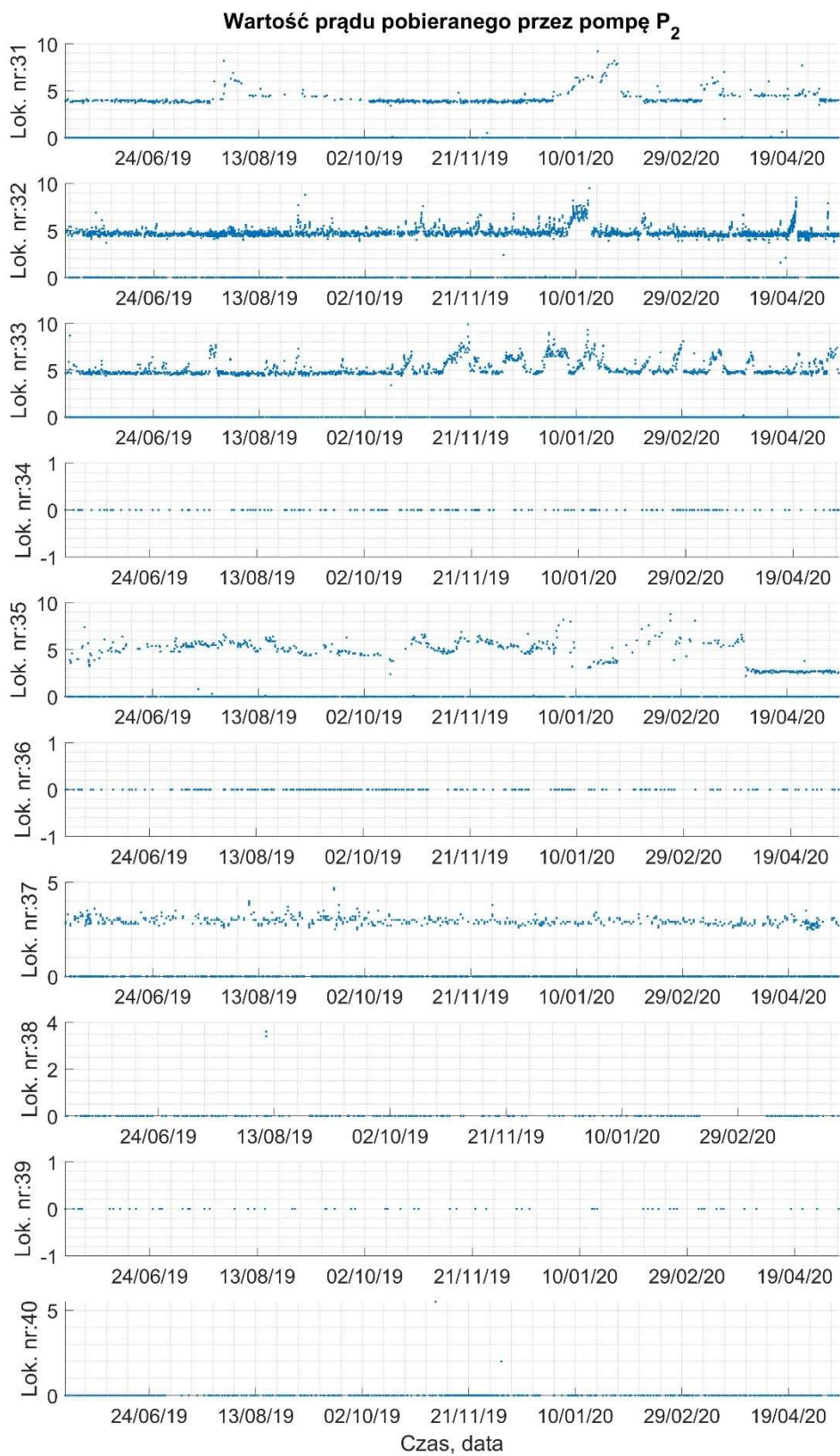
Rys. 9 Wartość prądu pobieranego przez pompę P₂, rejestrowana dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.



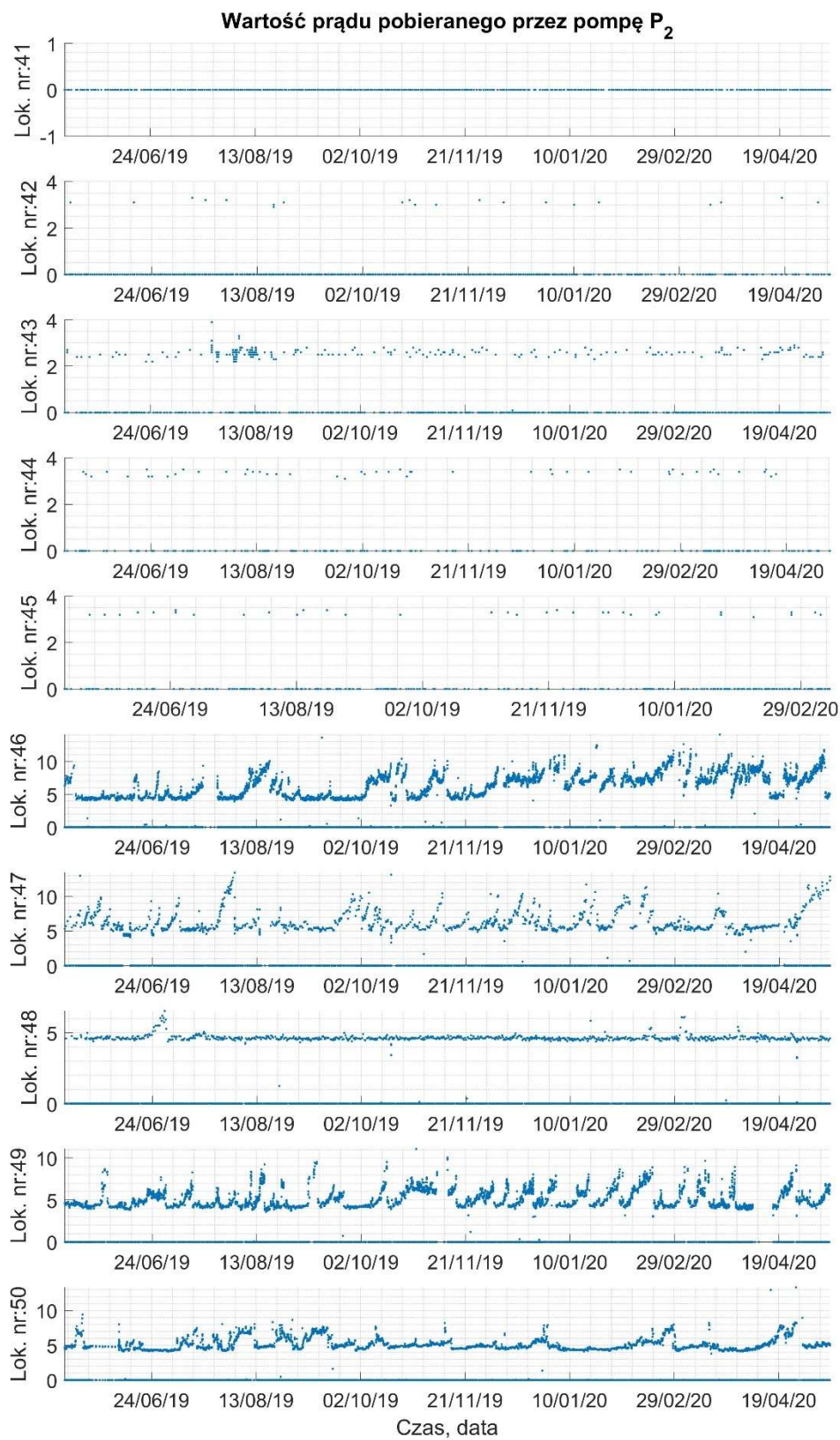
Rys. 10 Wartość prądu pobieranego przez pompę P₂, rejestrowana dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.



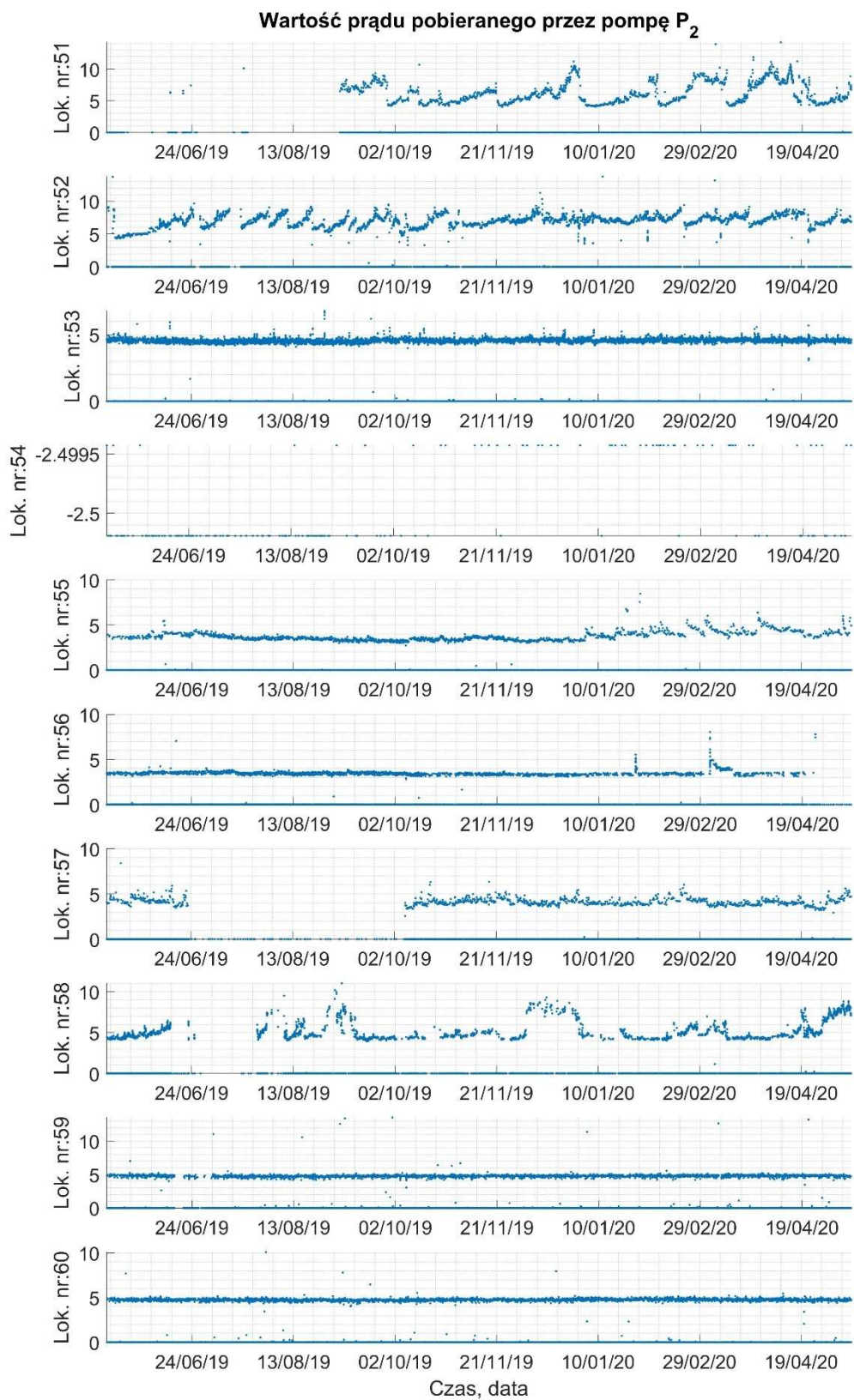
Rys. 11 Wartość prądu pobieranego przez pompę P₂, rejestrowana dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.



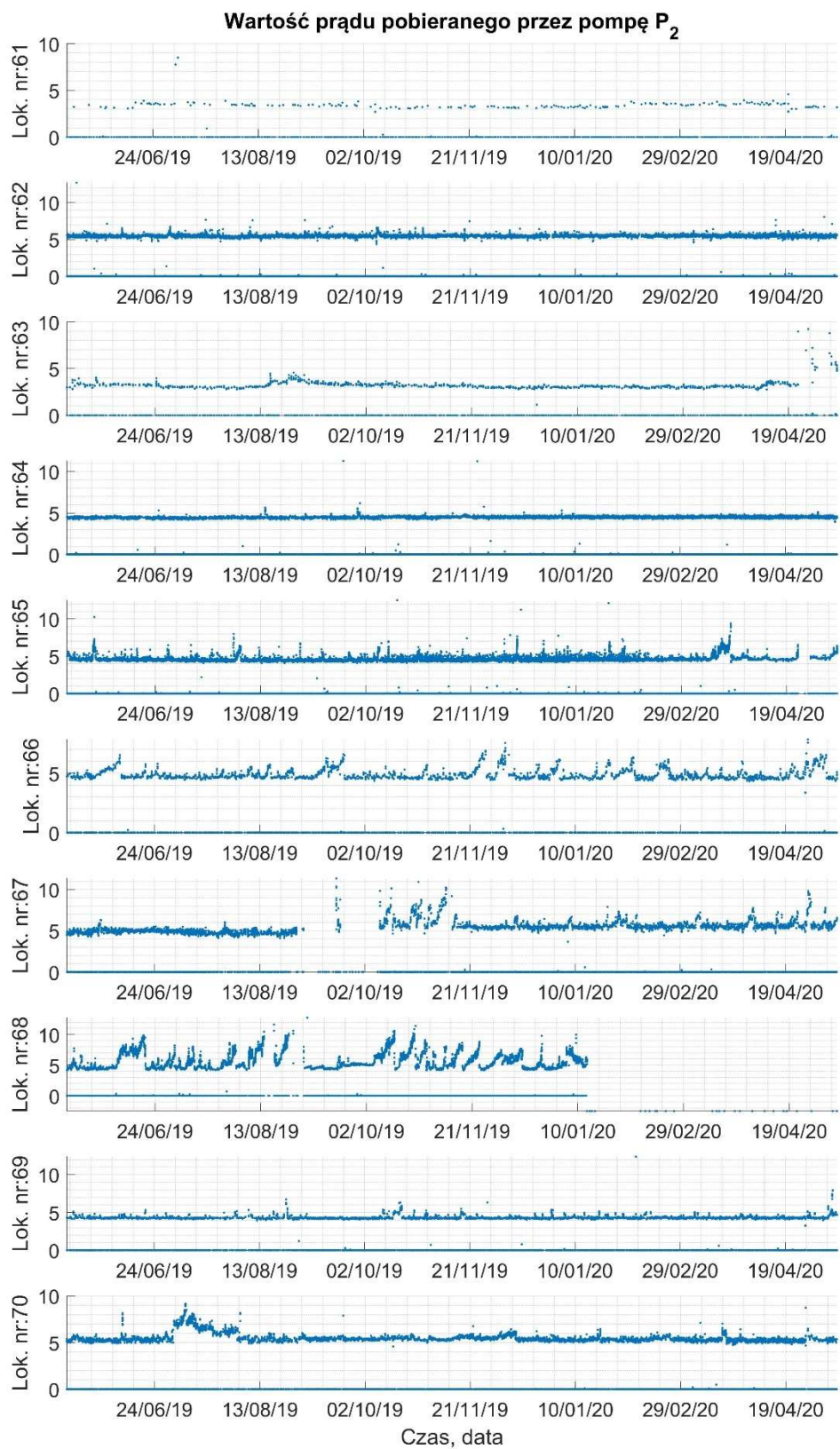
Rys. 12 Wartość prądu pobieranego przez pompę P₂, rejestrowana dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.



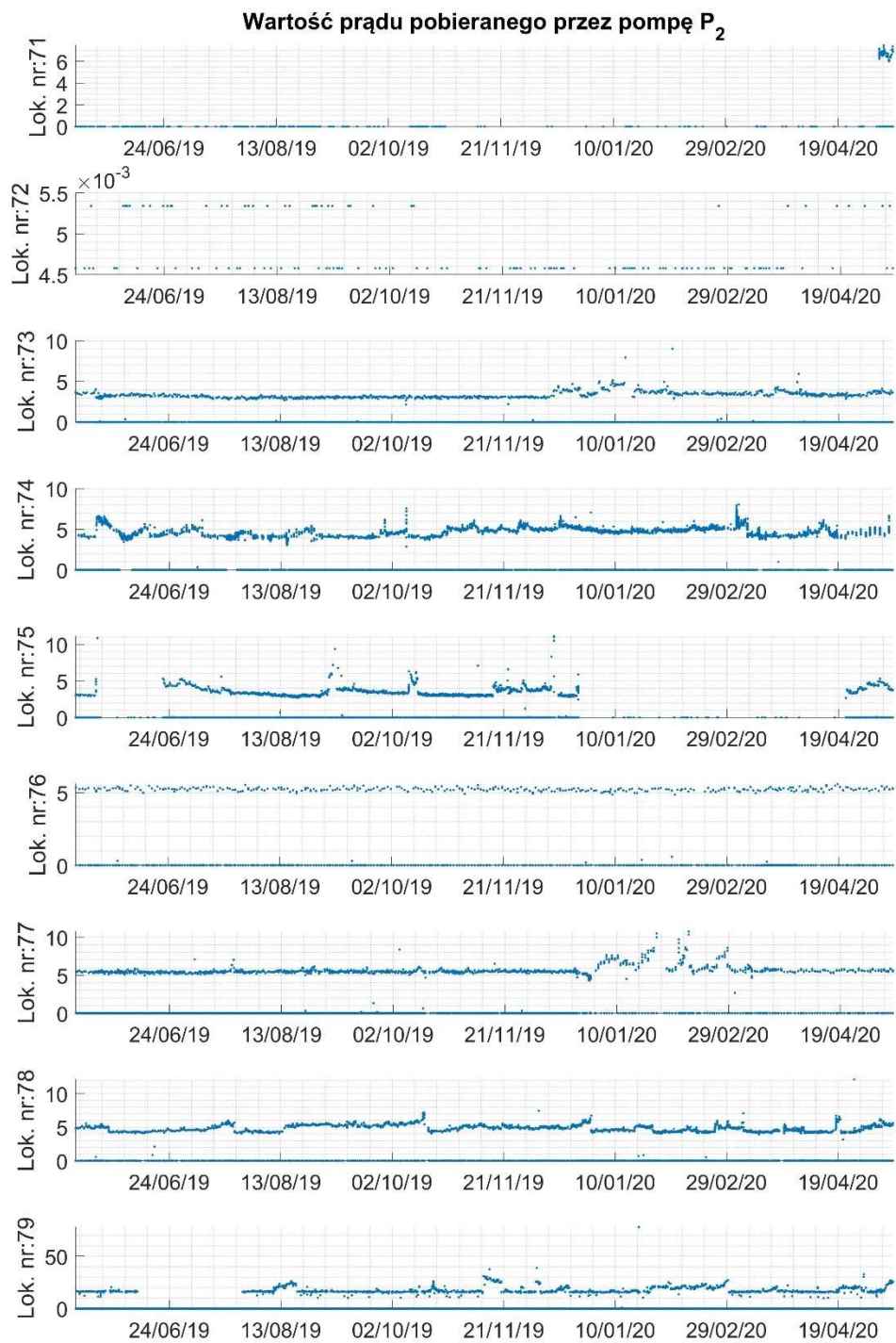
Rys. 13 Wartość prądu pobieranego przez pompę P₂, rejestrowana dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.



Rys. 14 Wartość prądu pobieranego przez pompę P₂, rejestrowana dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.

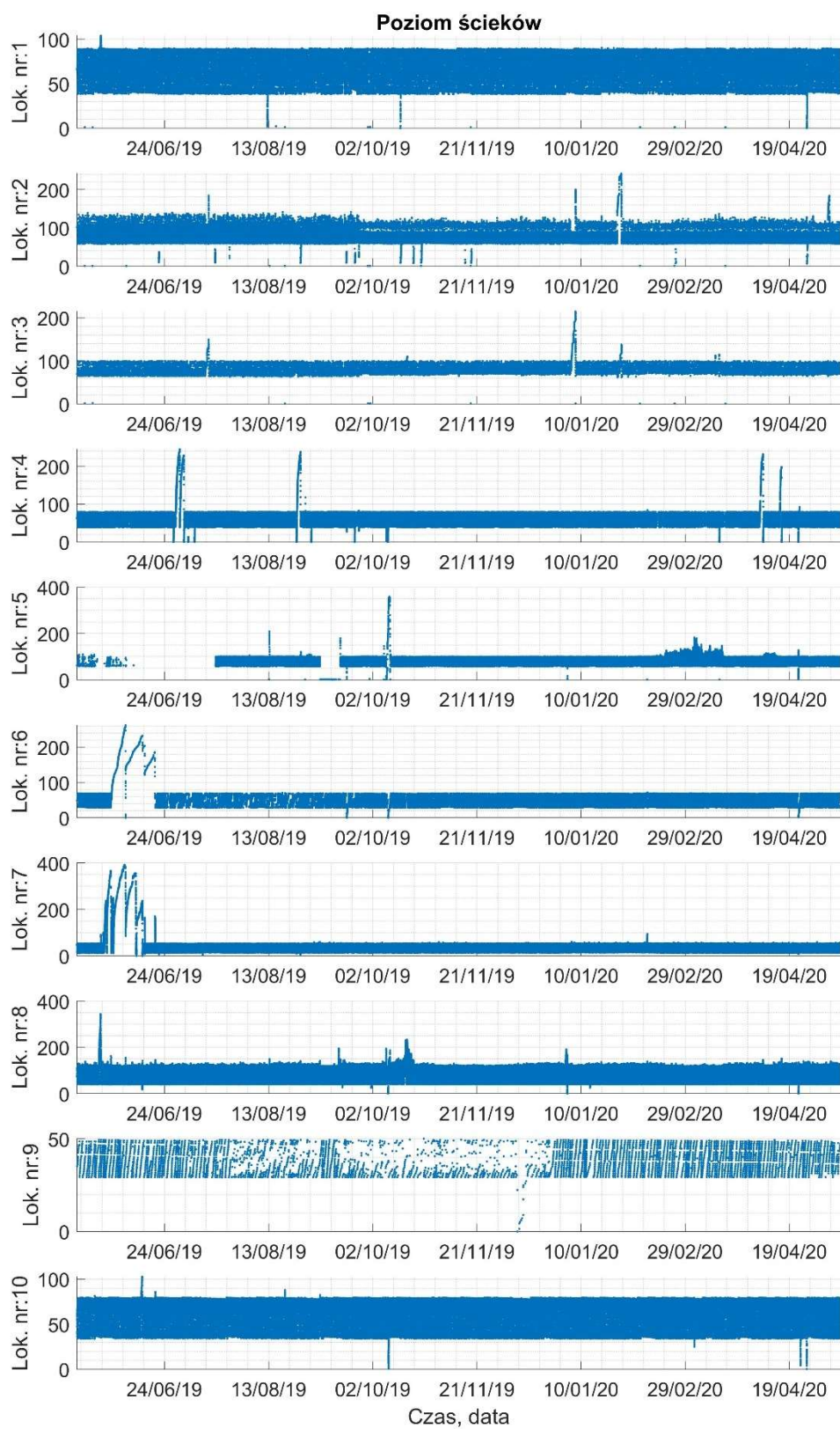


Rys. 15 Wartość prądu pobieranego przez pompę P₂, rejestrowana dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.

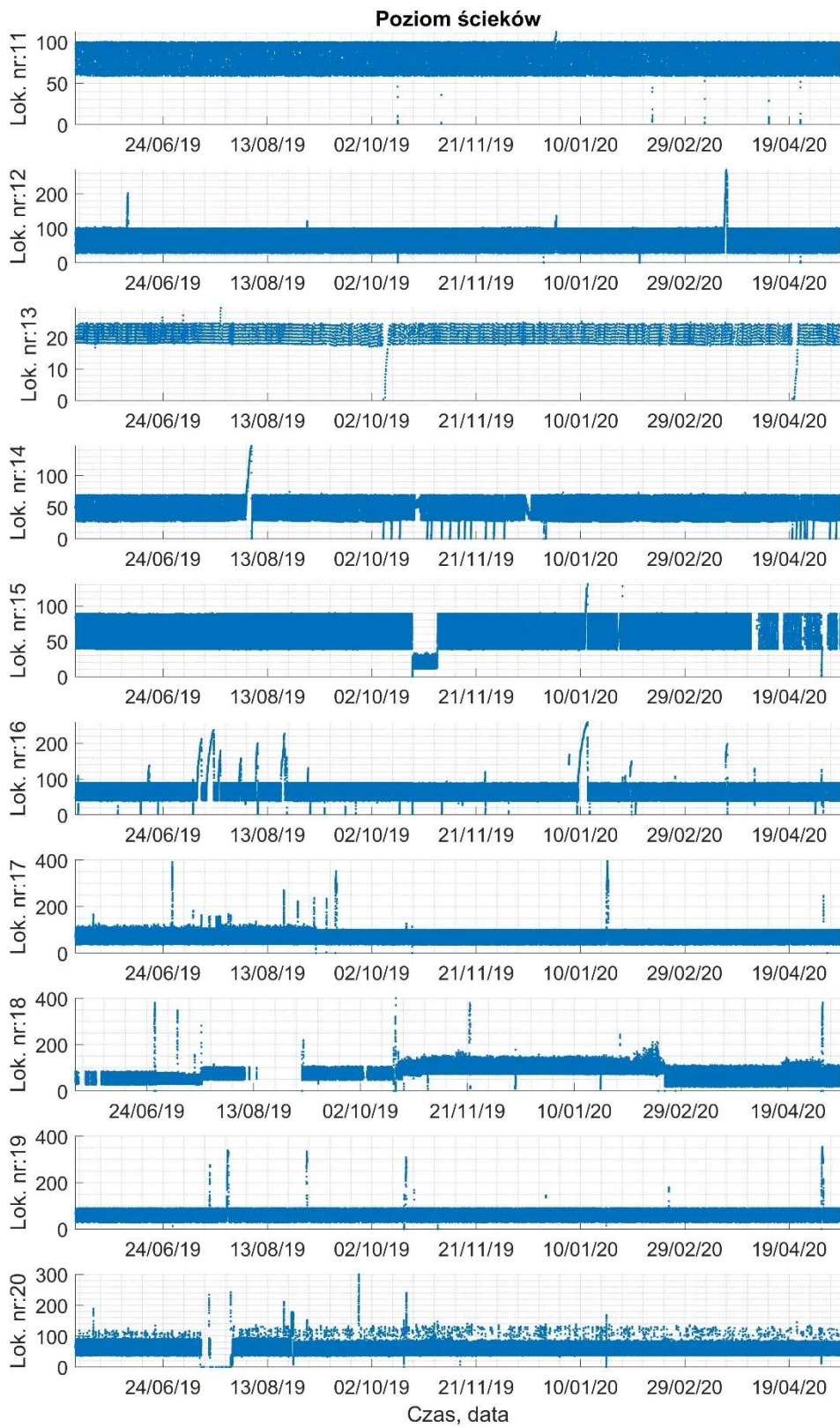


Rys. 16 Wartość prądu pobieranego przez pompę P₂, rejestrowana dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.

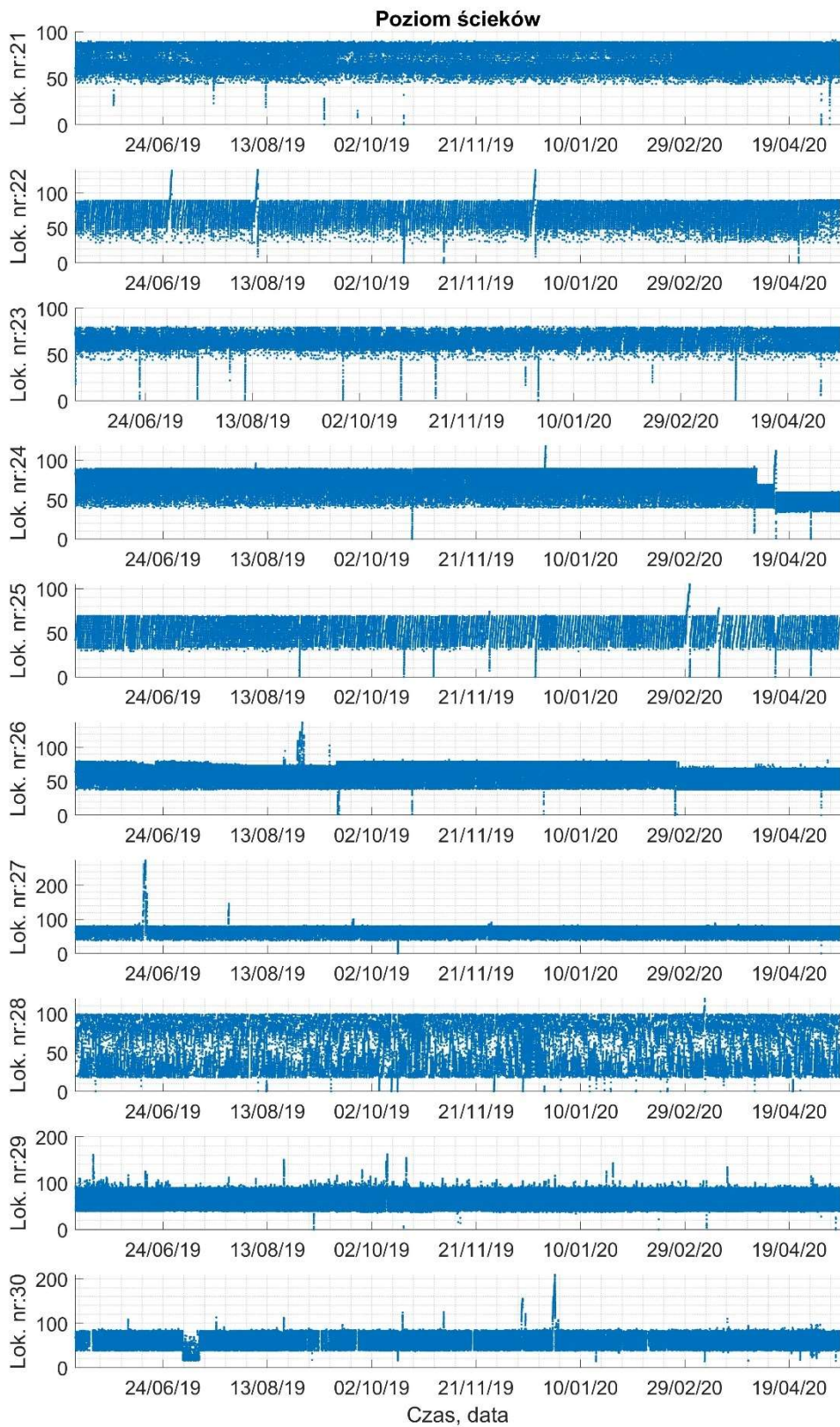
Załącznik 4 Przebiegi czasowe poziomu ścieków w zbiorniku rejestrowane w kolejnych lokalizacjach



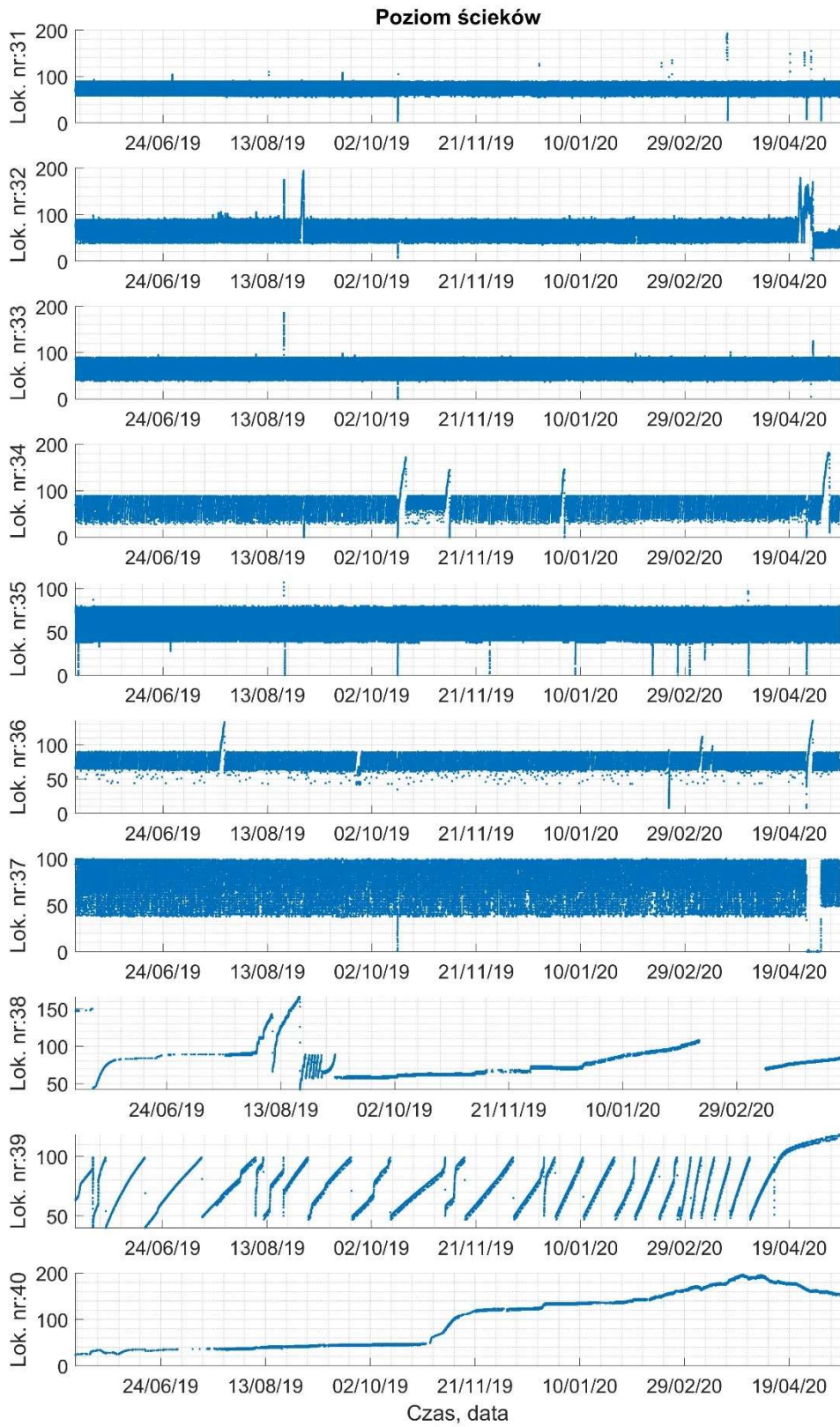
Rys. 1 Poziom ścieków w zbiorniku dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.



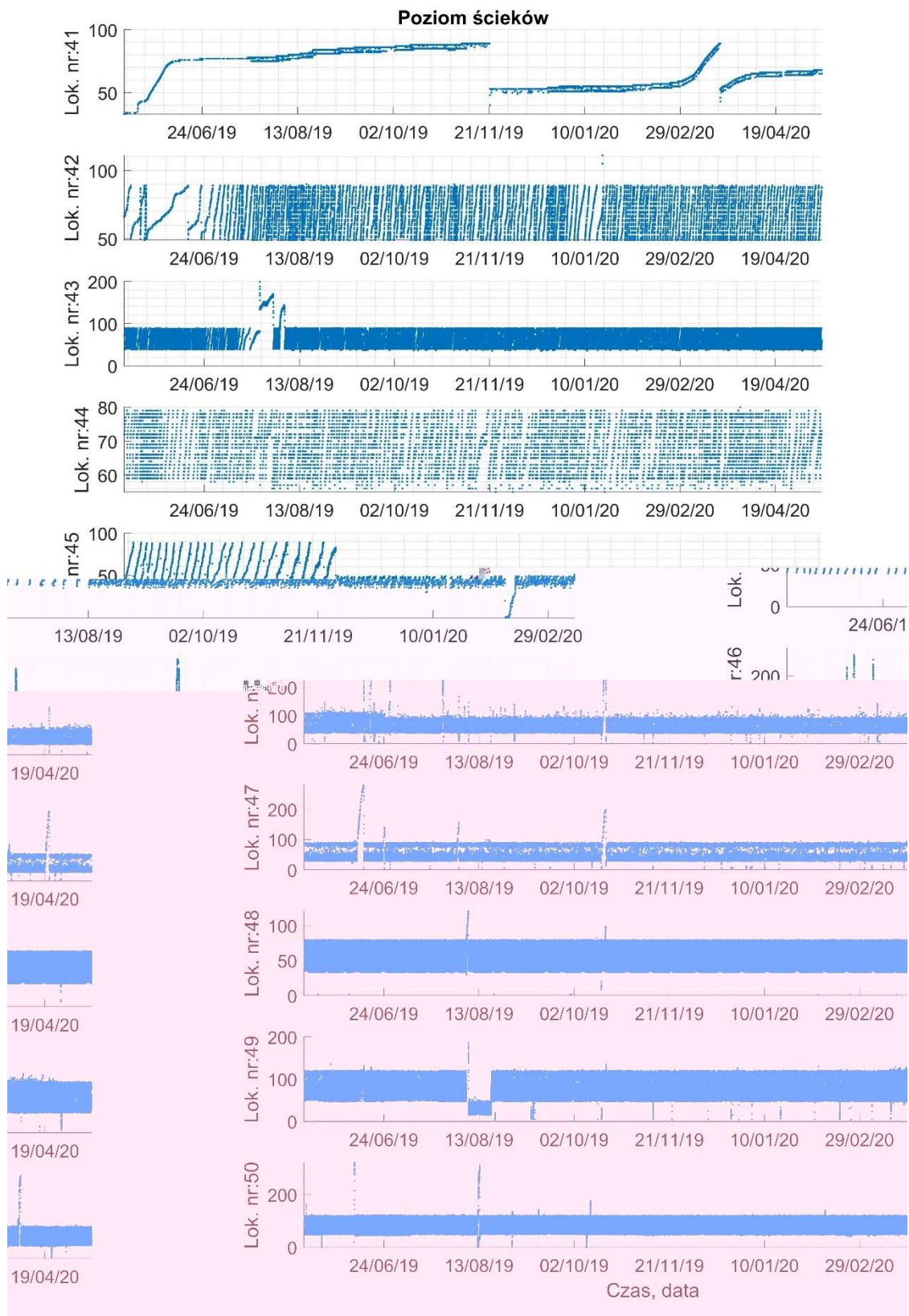
Rys. 2 Poziom ścieków w zbiorniku dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.



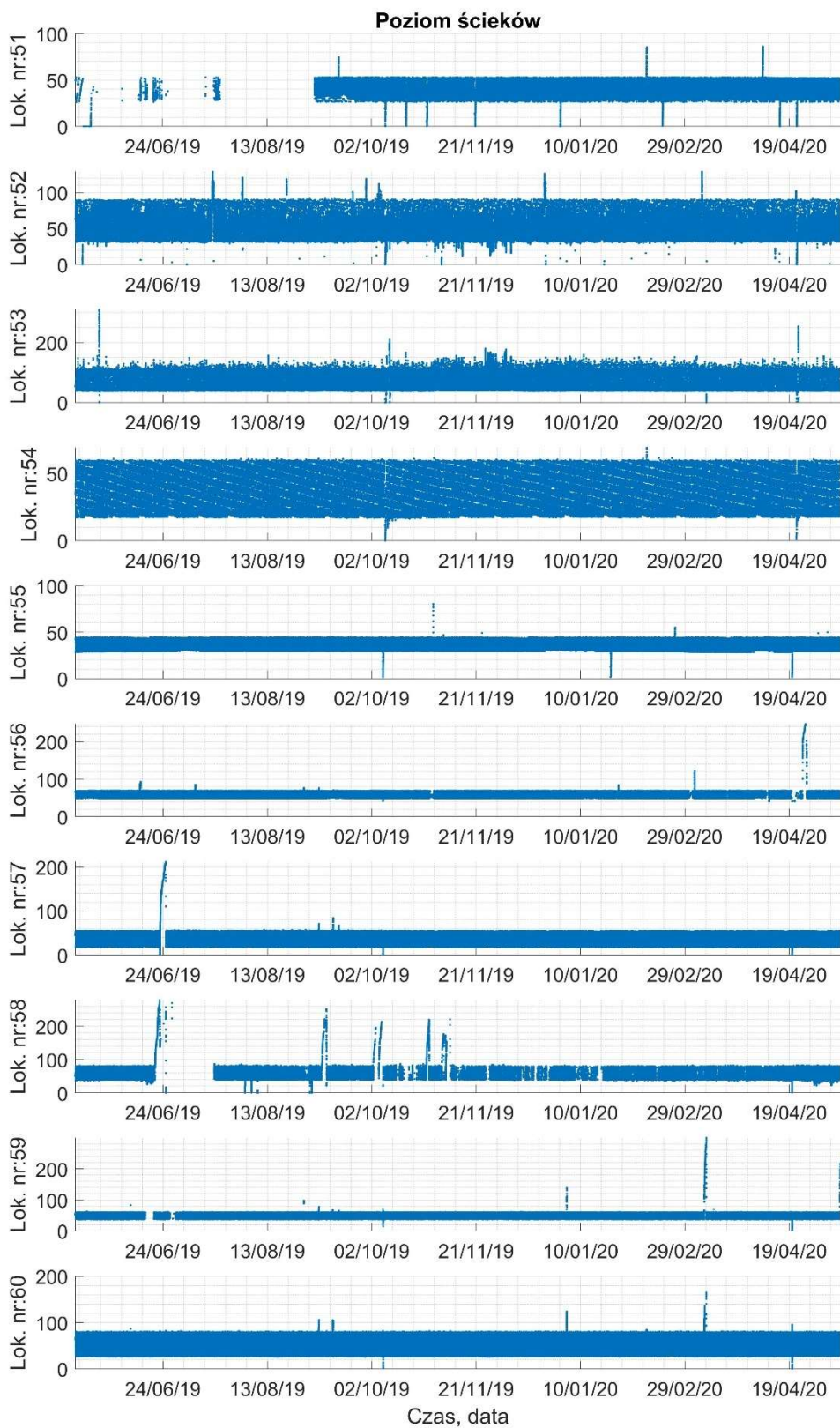
Rys. 3 Poziom ścieków w zbiorniku dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.



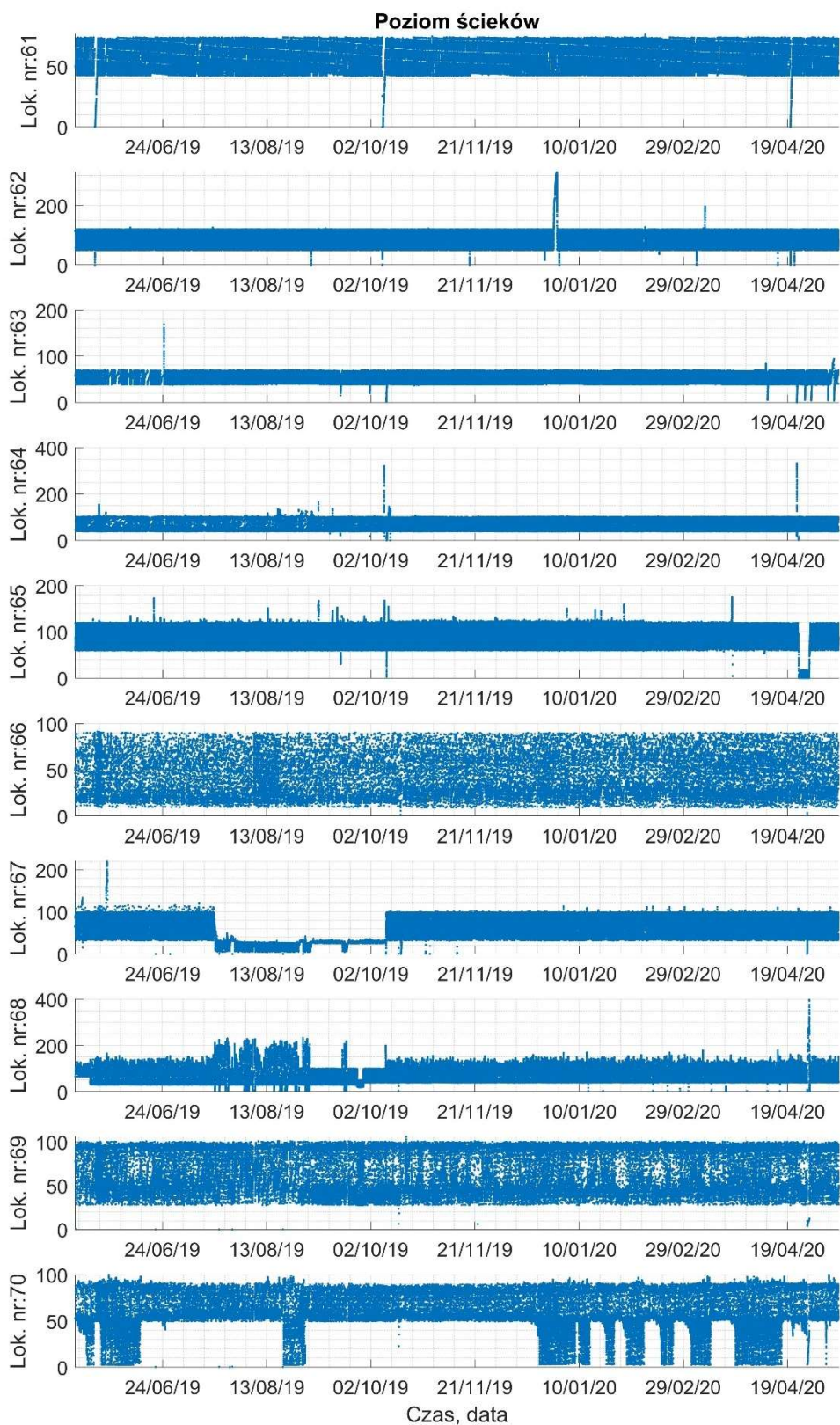
Rys. 4 Poziom ścieków w zbiorniku dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.



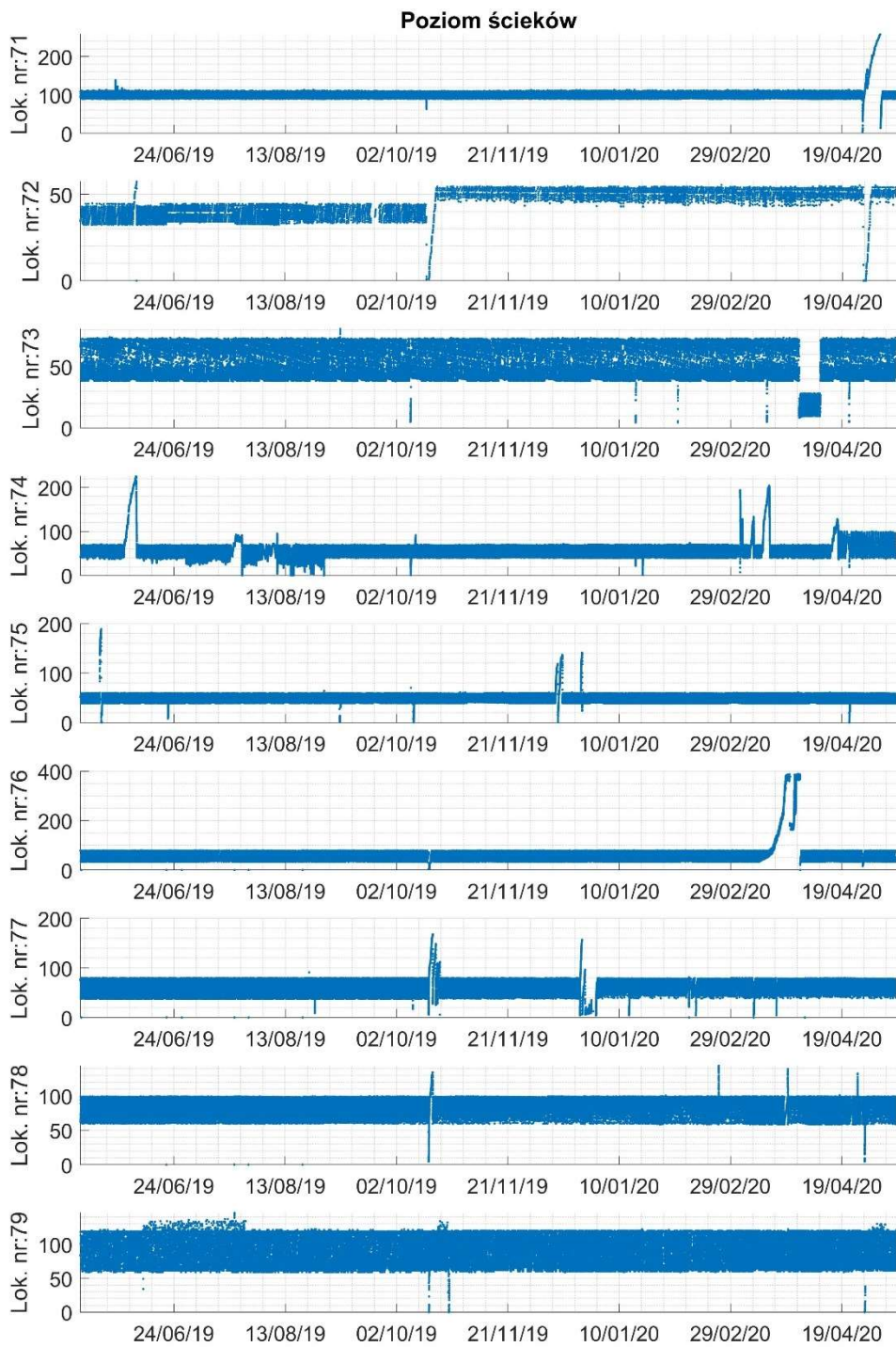
Rys. 5 Poziom ścieków w zbiorniku dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.



Rys. 6 Poziom ścieków w zbiorniku dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.

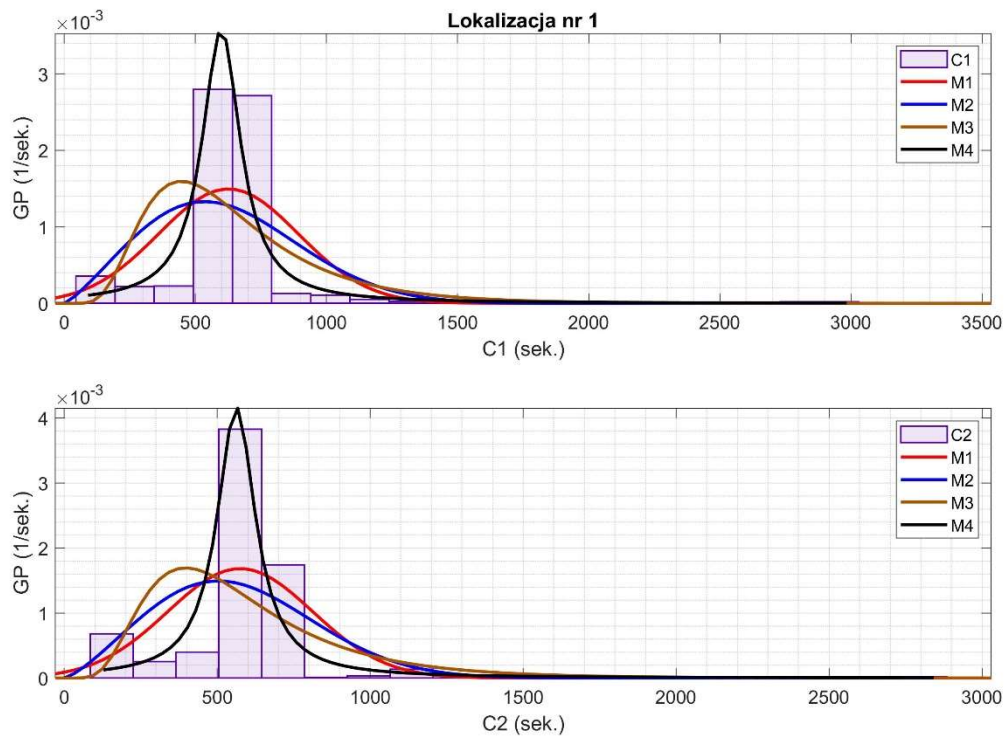


Rys. 7 Poziom ścieków w zbiorniku dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.

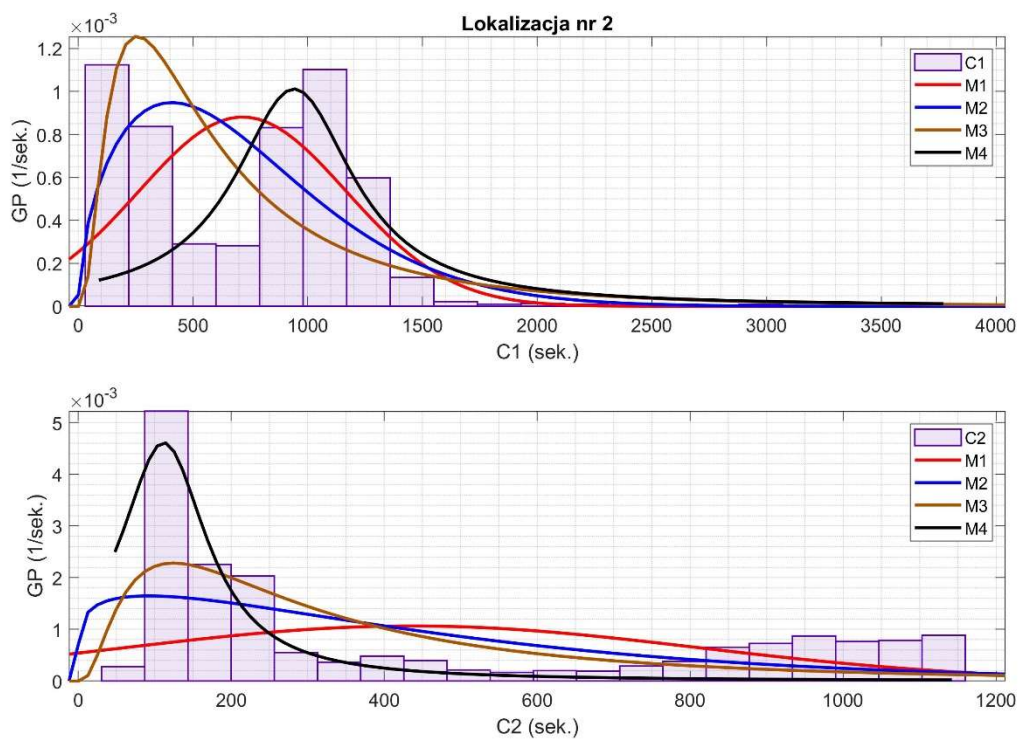


Rys. 8 Poziom ścieków w zbiorniku dla kolejnych lokalizacji w okresie V/2019-V/2020.

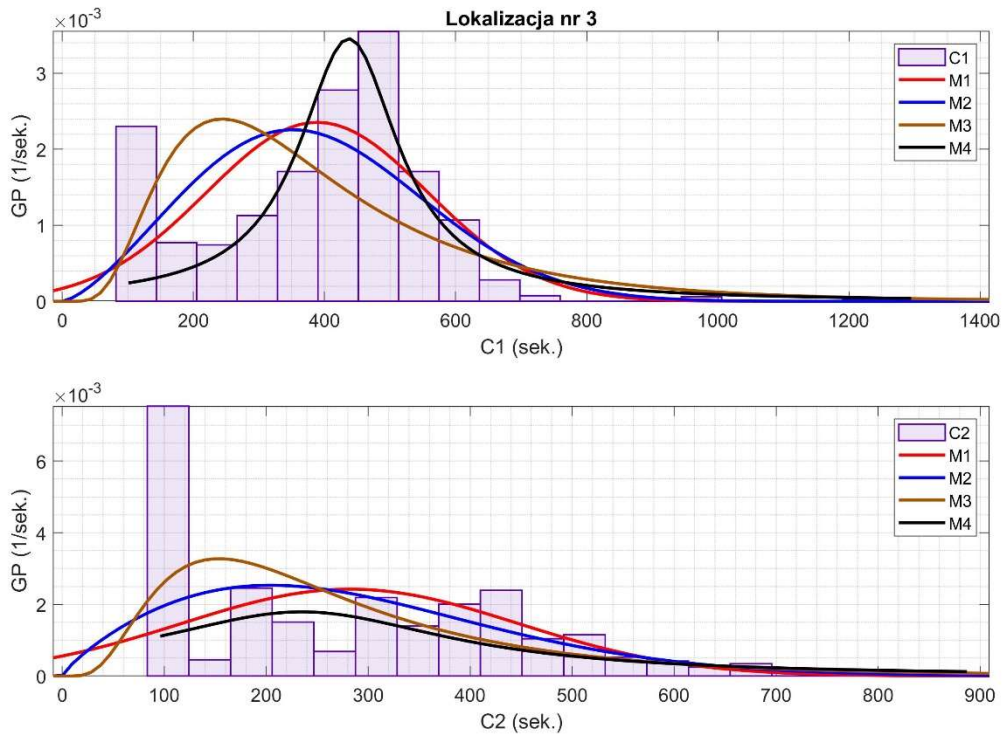
Załącznik 5 Wyniki modelowania parametrów C1 i C2



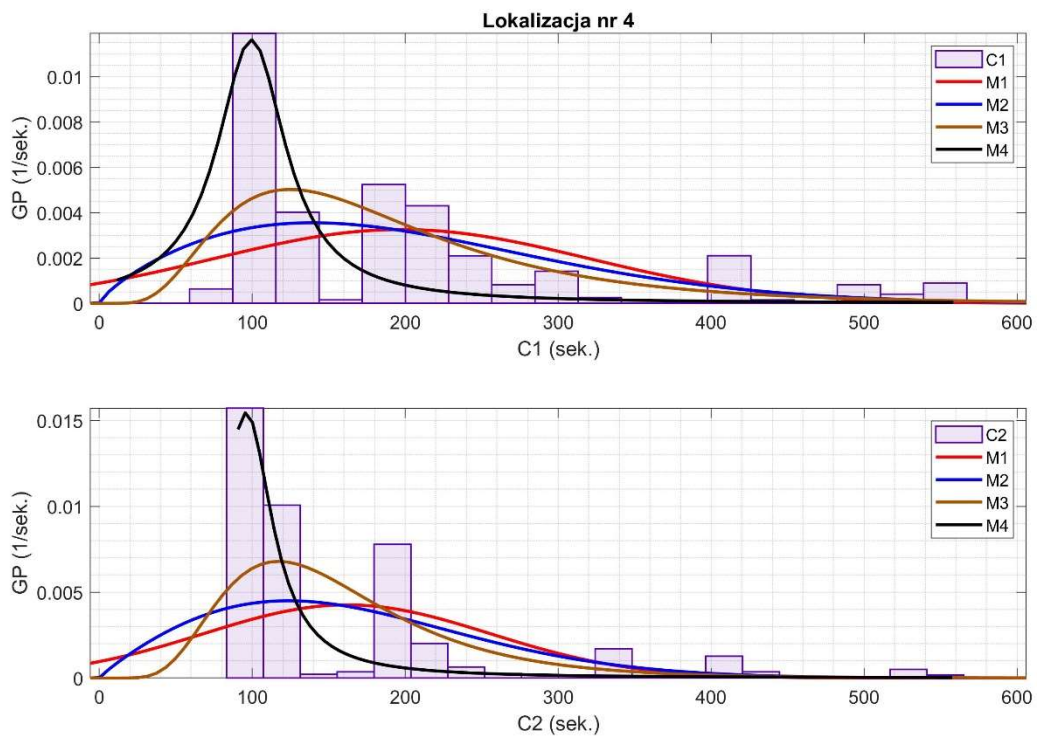
Rys. 1 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 1 wraz z dopasowaniem modeli.



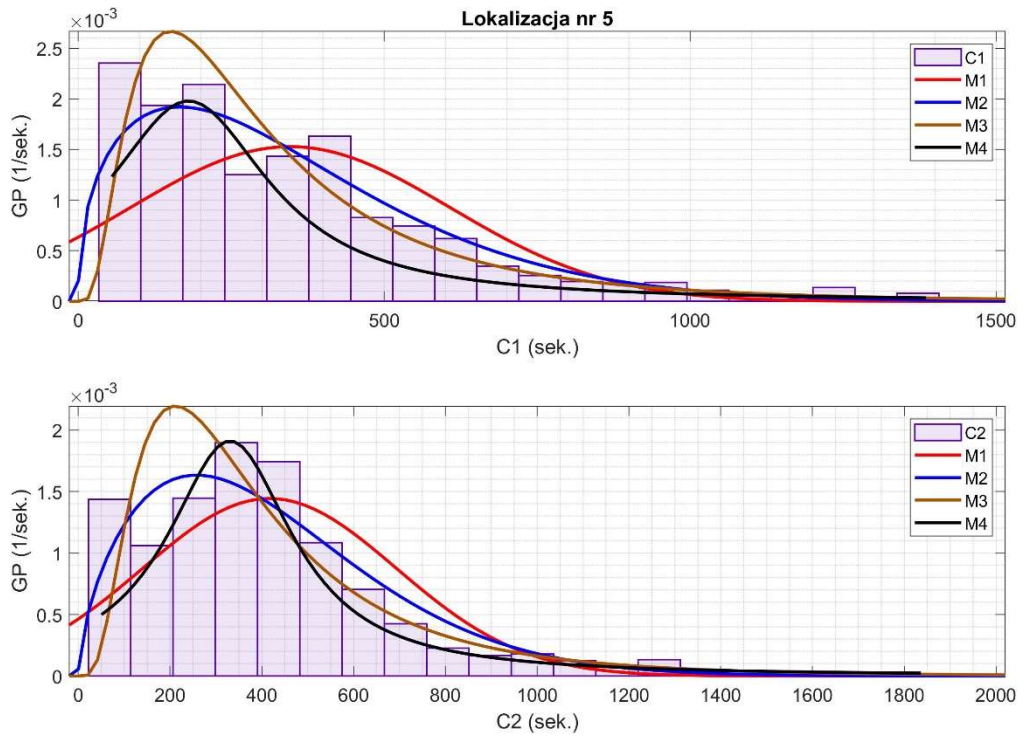
Rys. 2 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 2 wraz z dopasowaniem modeli.



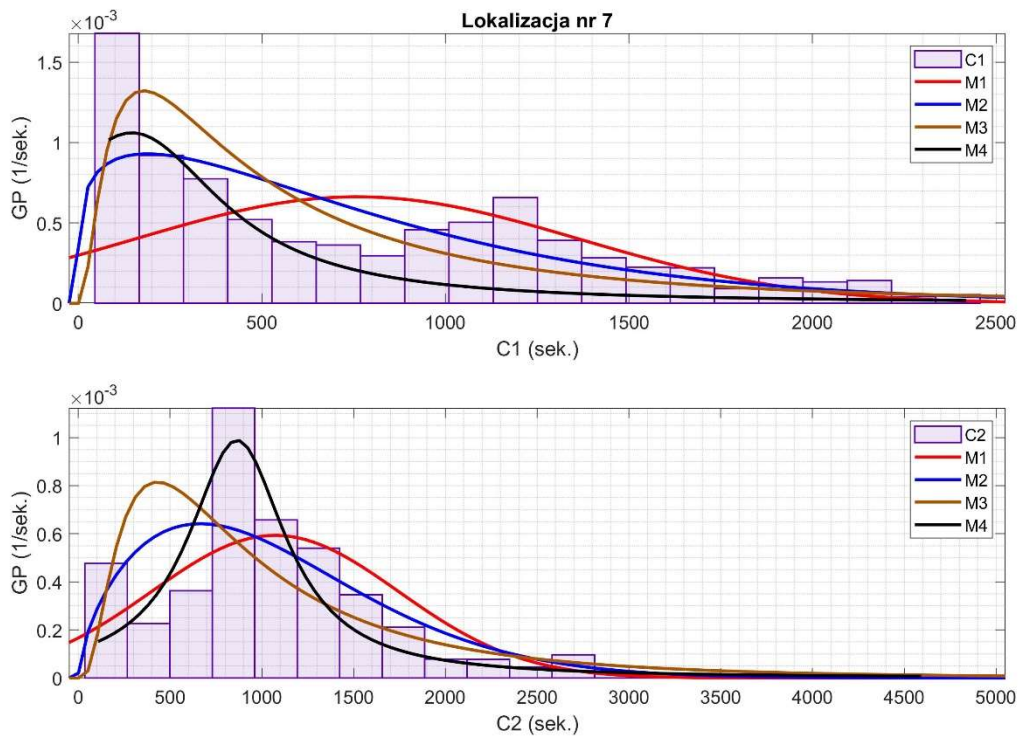
Rys. 3 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 3 wraz z dopasowaniem modeli.



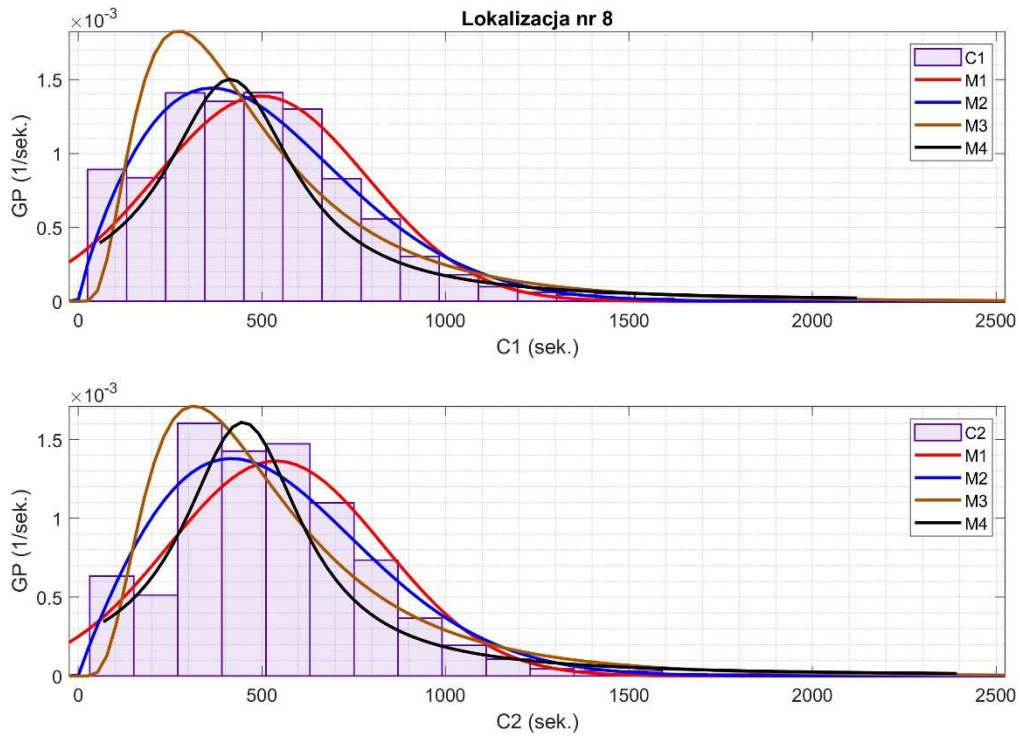
Rys. 4 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 4 wraz z dopasowaniem modeli.



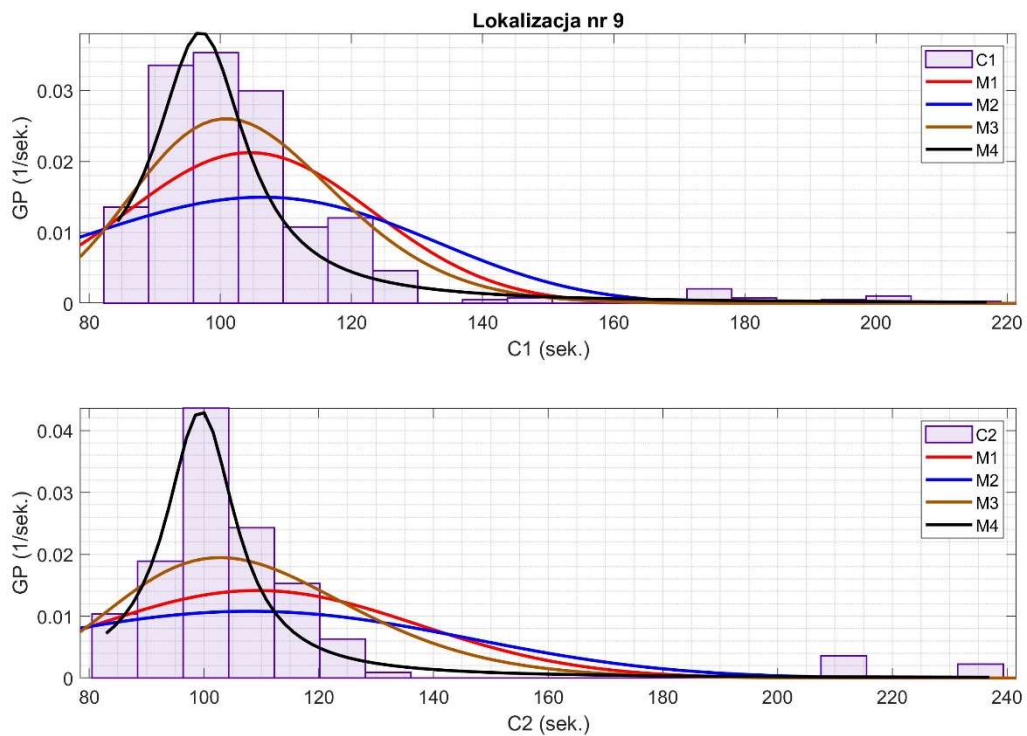
Rys. 5 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 5 wraz z dopasowaniem modeli.



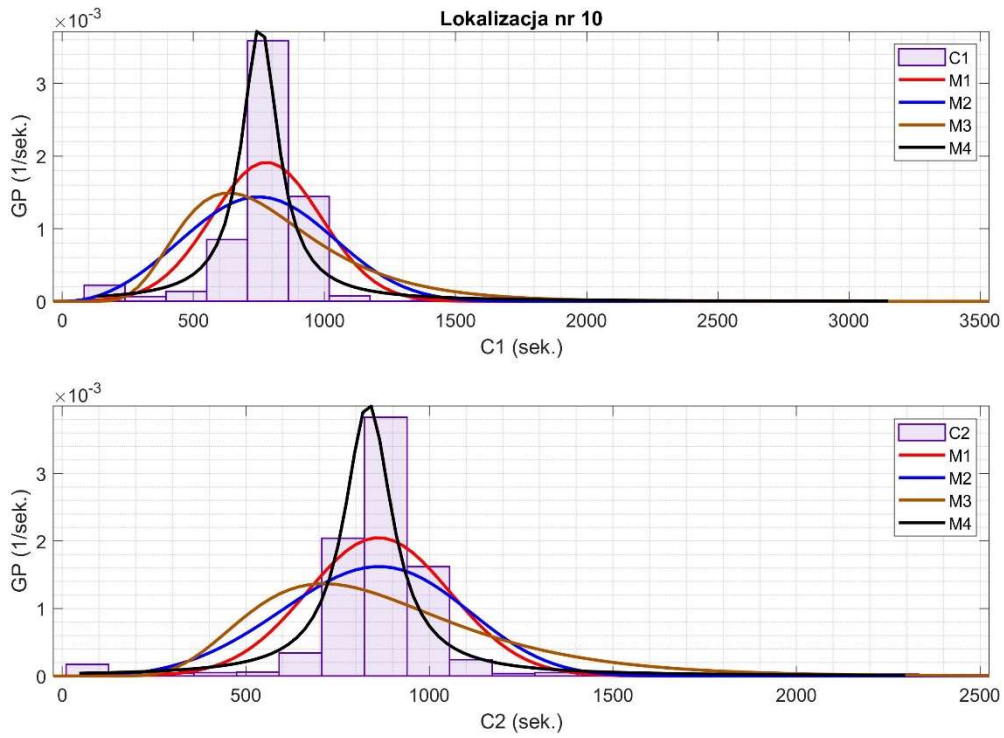
Rys. 6 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 7 wraz z dopasowaniem modeli.



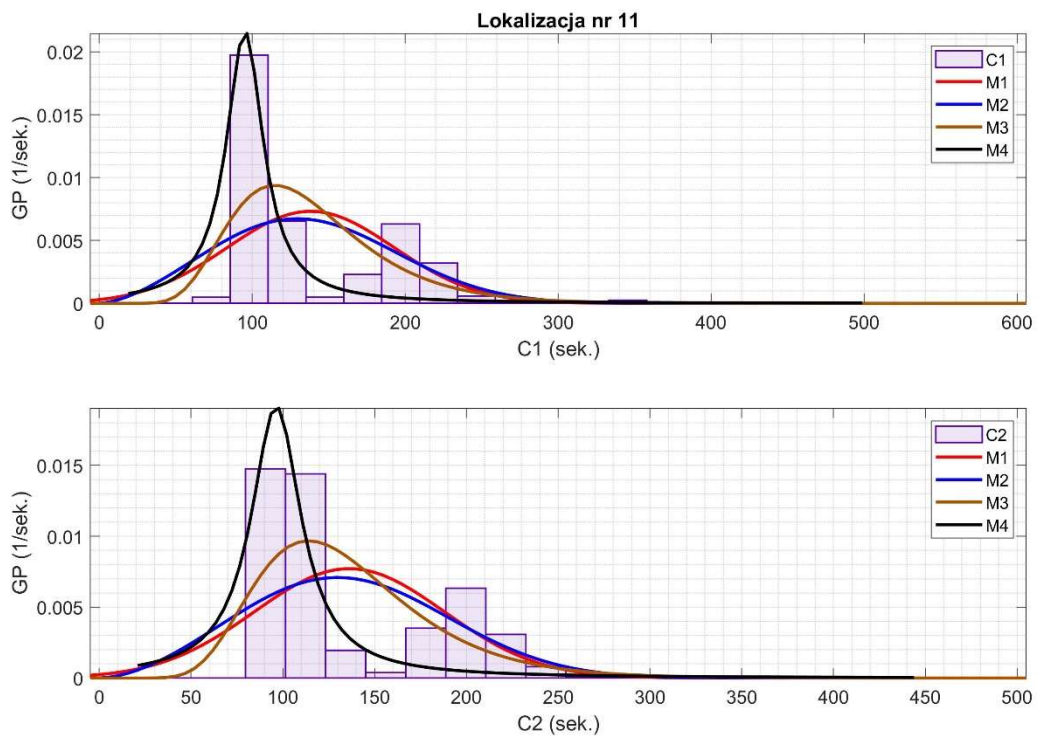
Rys. 7 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 8 wraz z dopasowaniem modeli.



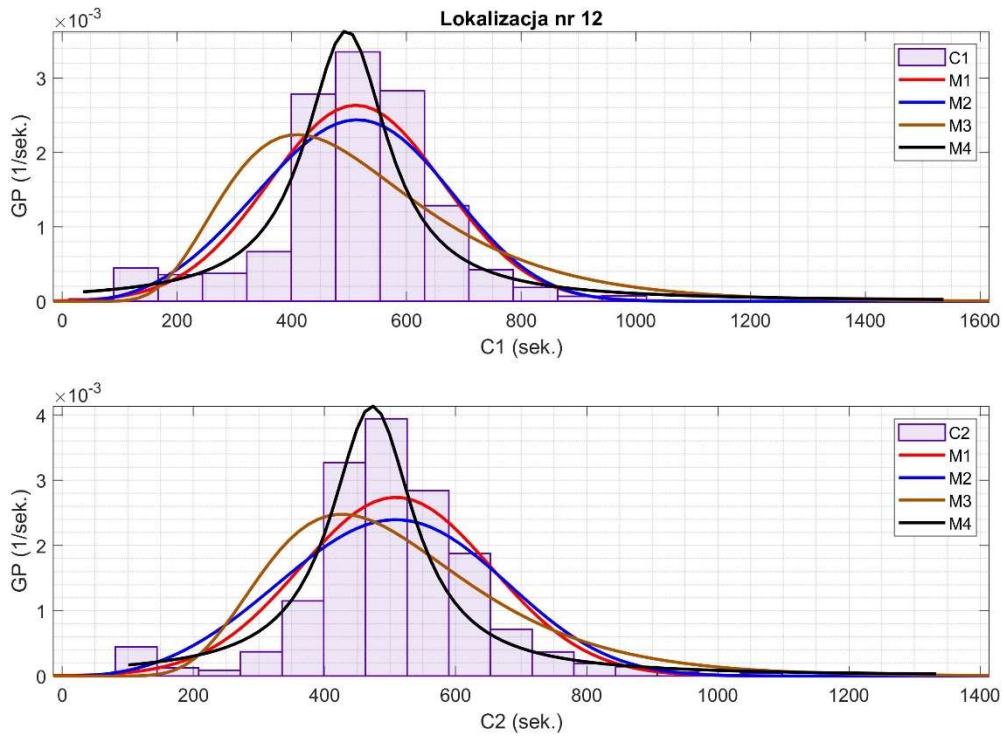
Rys. 8 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 9 wraz z dopasowaniem modeli.



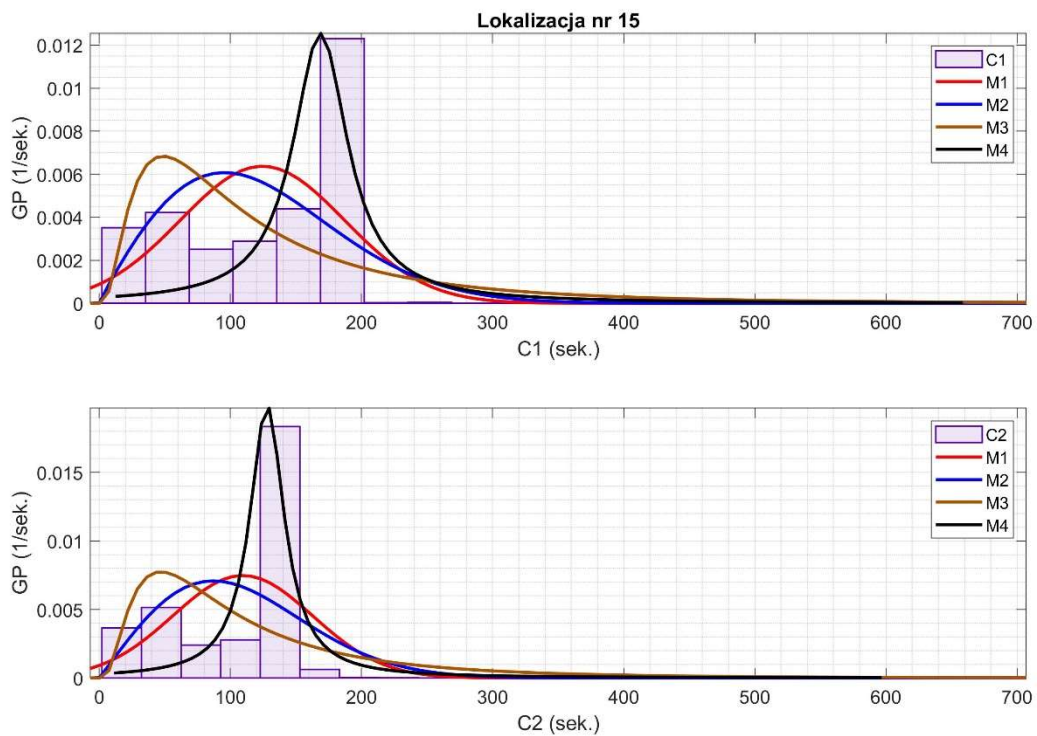
Rys. 9 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 10 wraz z dopasowaniem modeli.



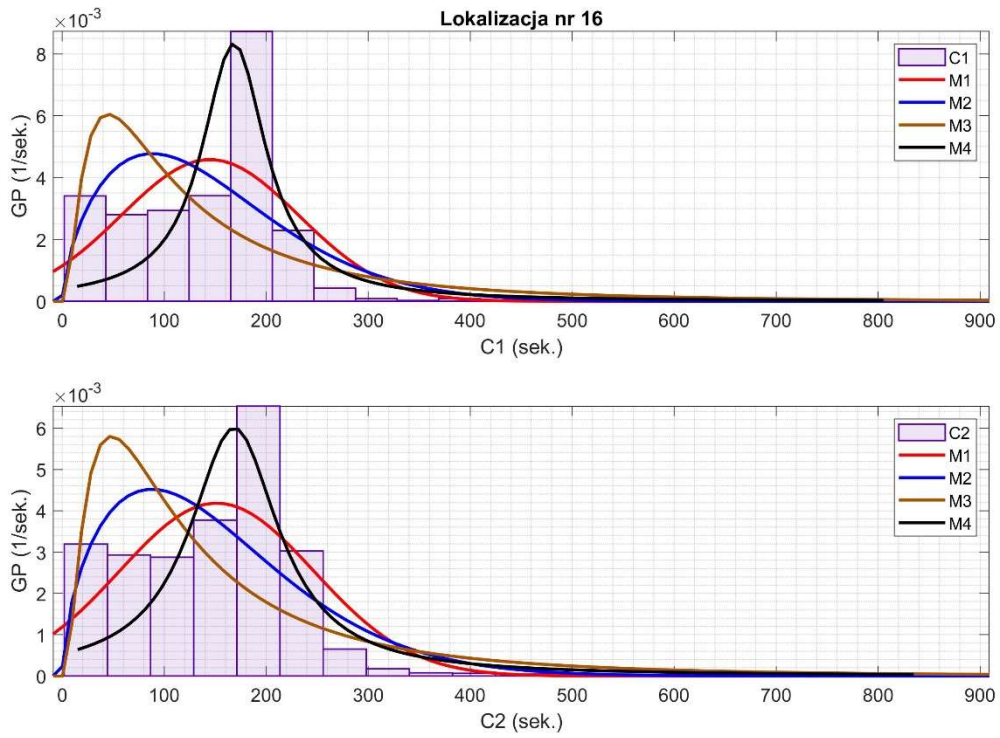
Rys. 10 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 11 wraz z dopasowaniem modeli.



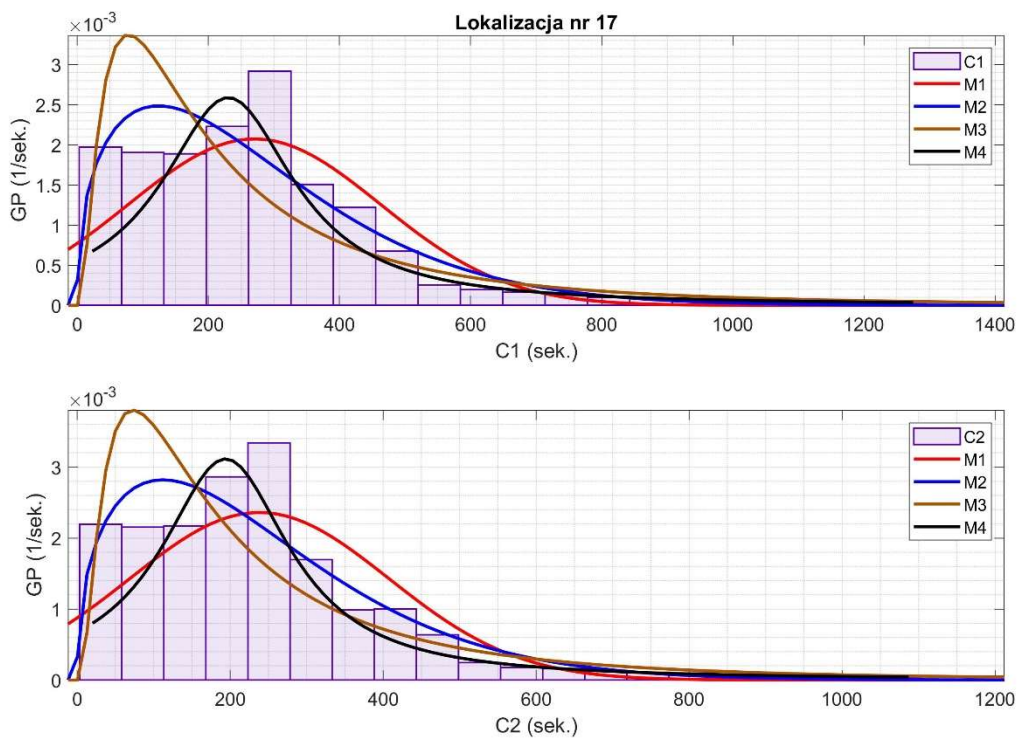
Rys. 11 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 12 wraz z dopasowaniem modeli.



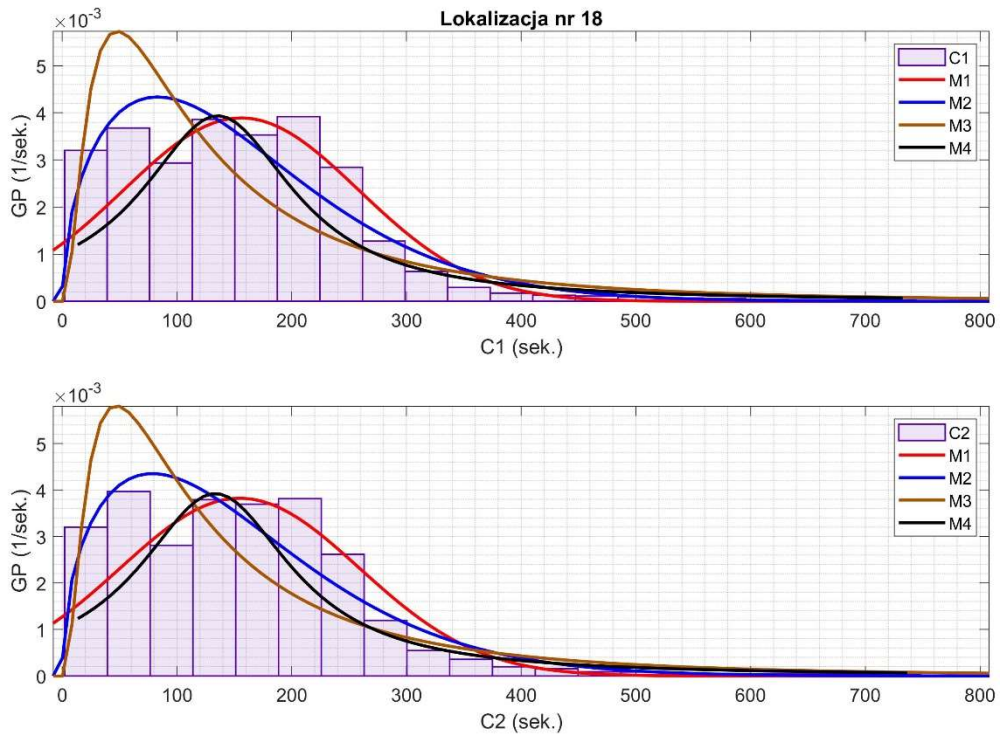
Rys. 12 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 15 wraz z dopasowaniem modeli.



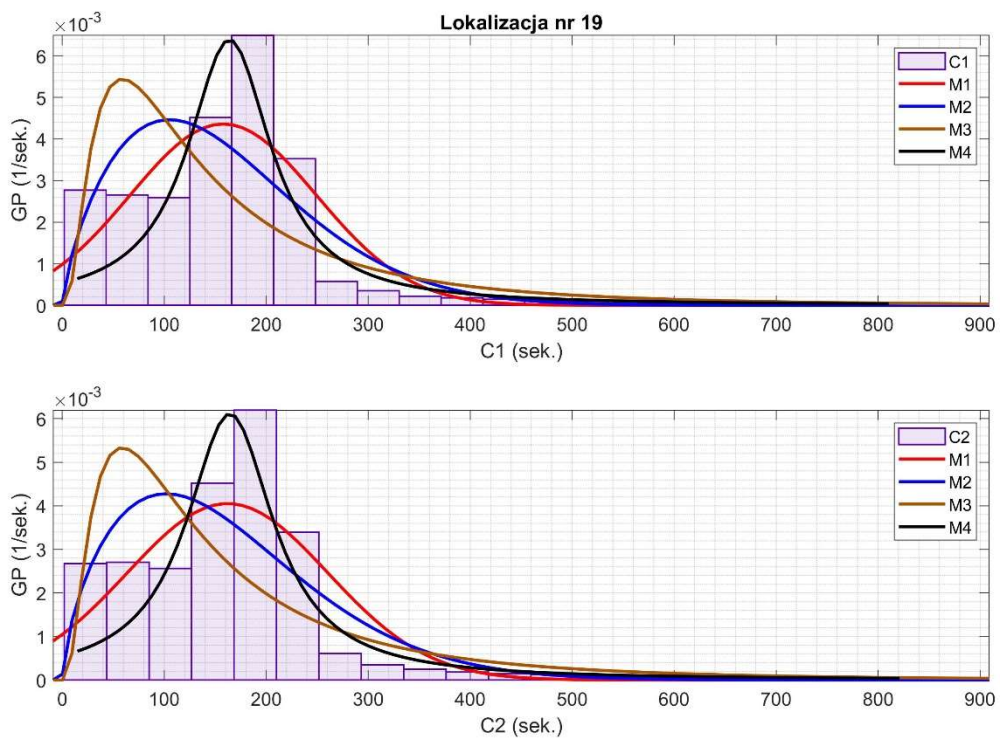
Rys. 13 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 16 wraz z dopasowaniem modeli.



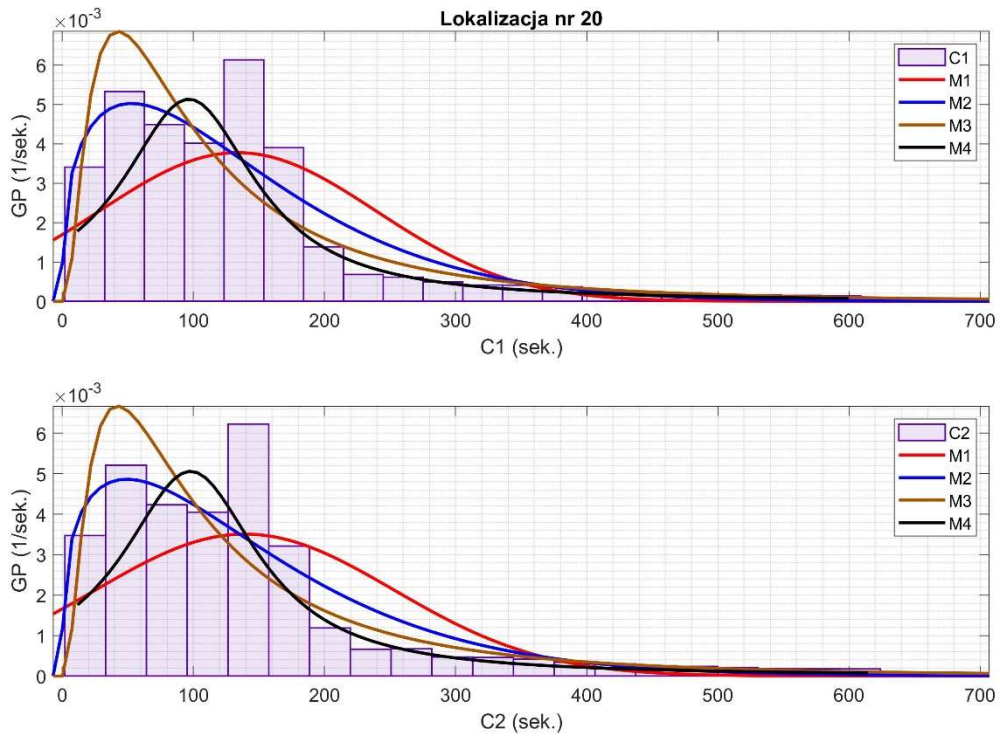
Rys. 14 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 17 wraz z dopasowaniem modeli.



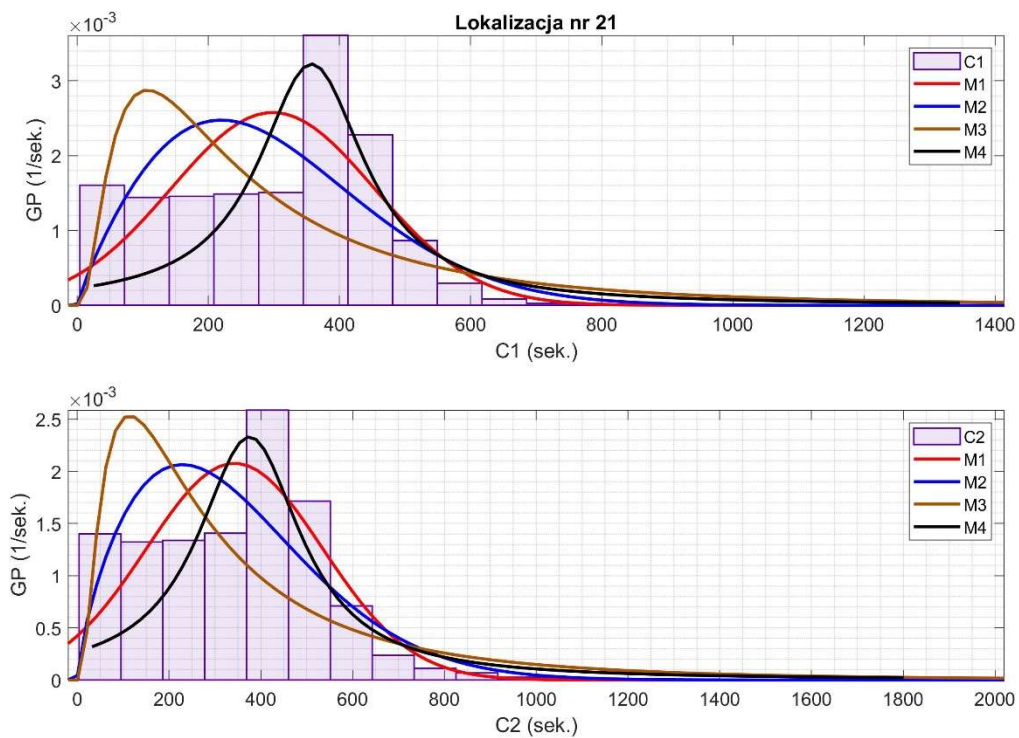
Rys. 15 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 18 wraz z dopasowaniem modeli.



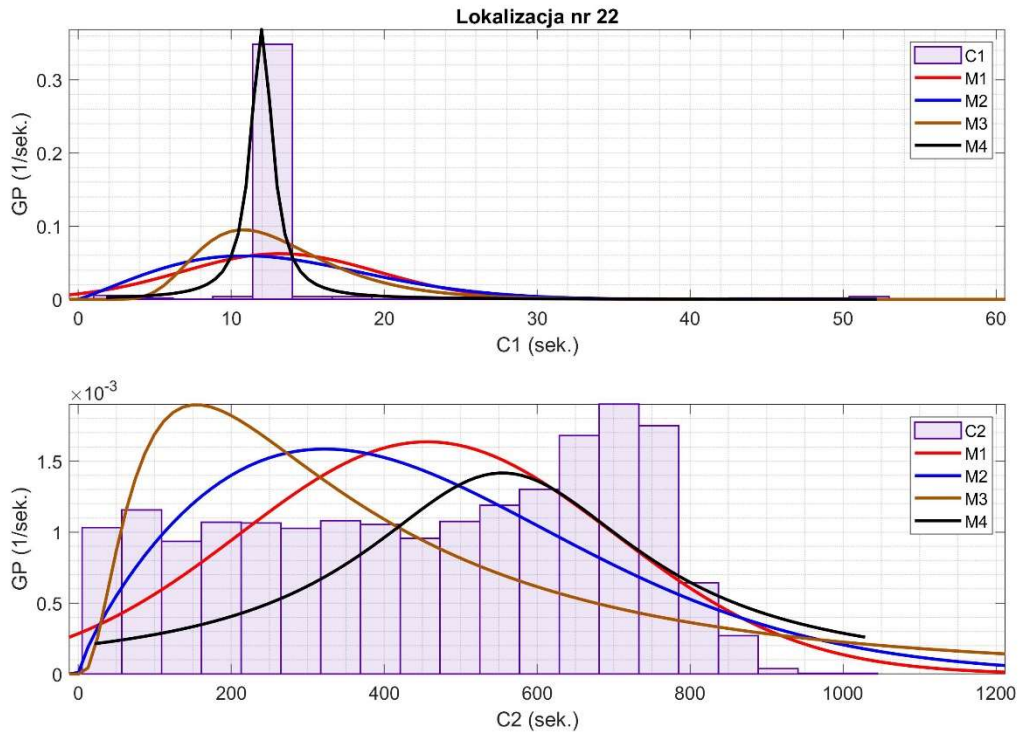
Rys. 16 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 19 wraz z dopasowaniem modeli.



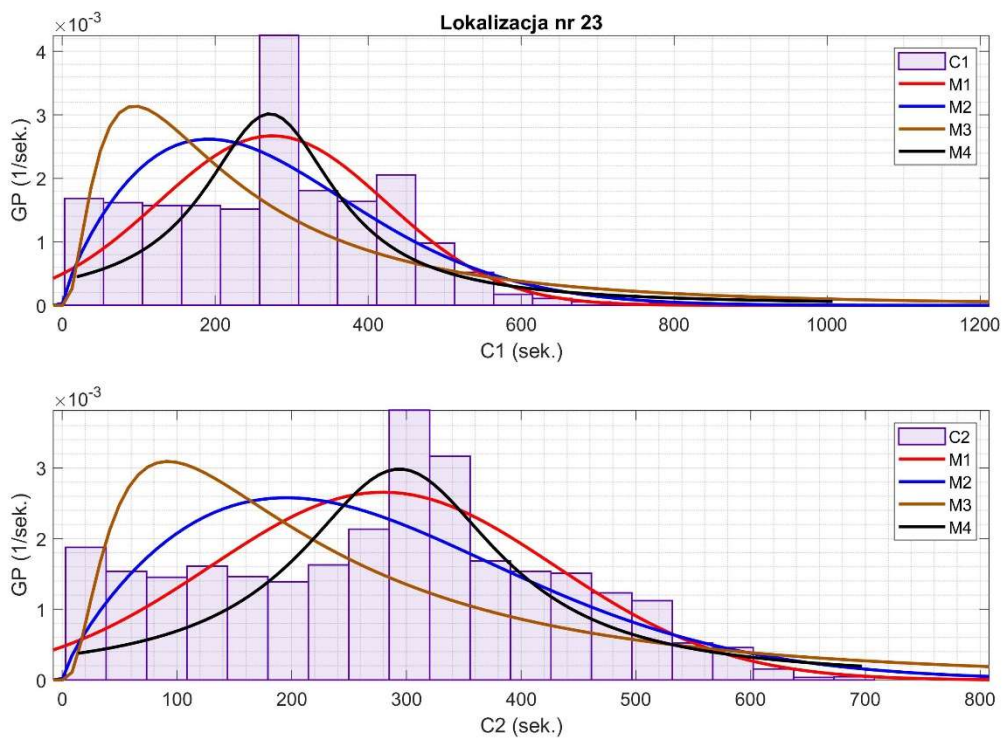
Rys. 17 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 20 wraz z dopasowaniem modeli.



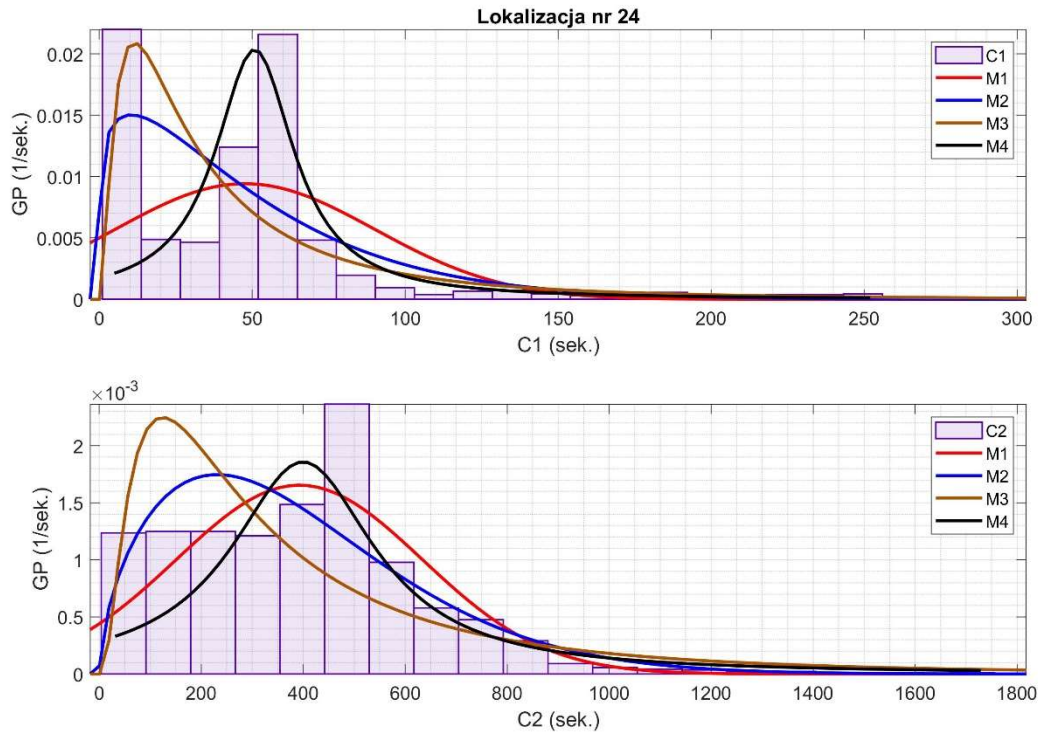
Rys. 18 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 21 wraz z dopasowaniem modeli.



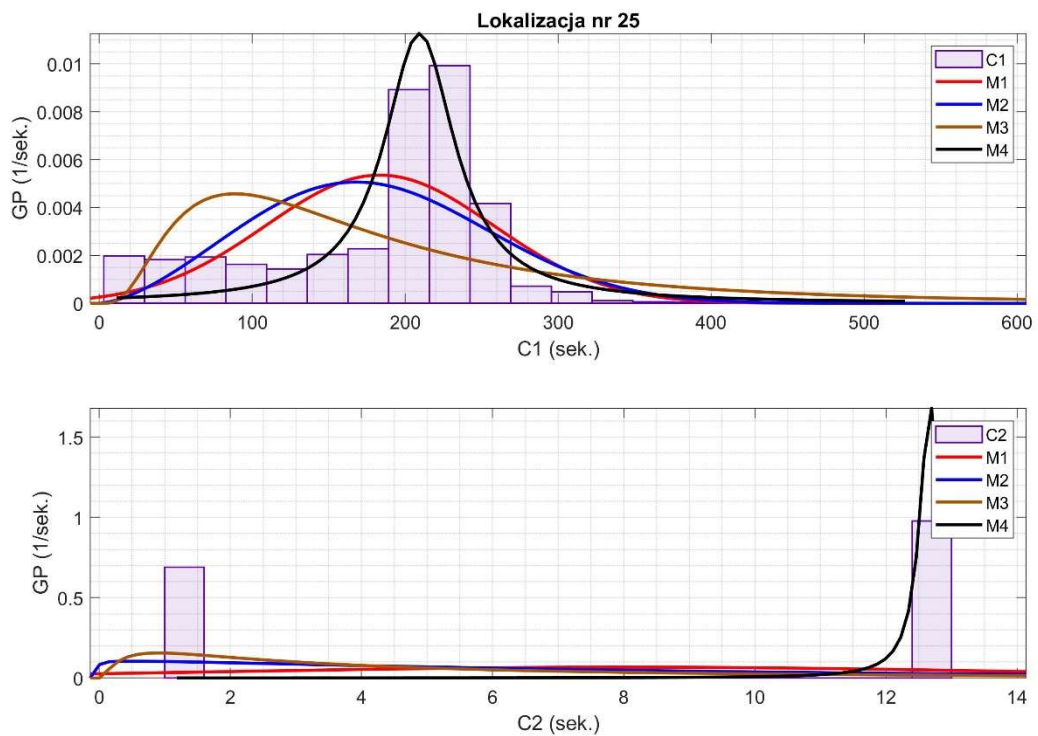
Rys. 19 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 22 wraz z dopasowaniem modeli.



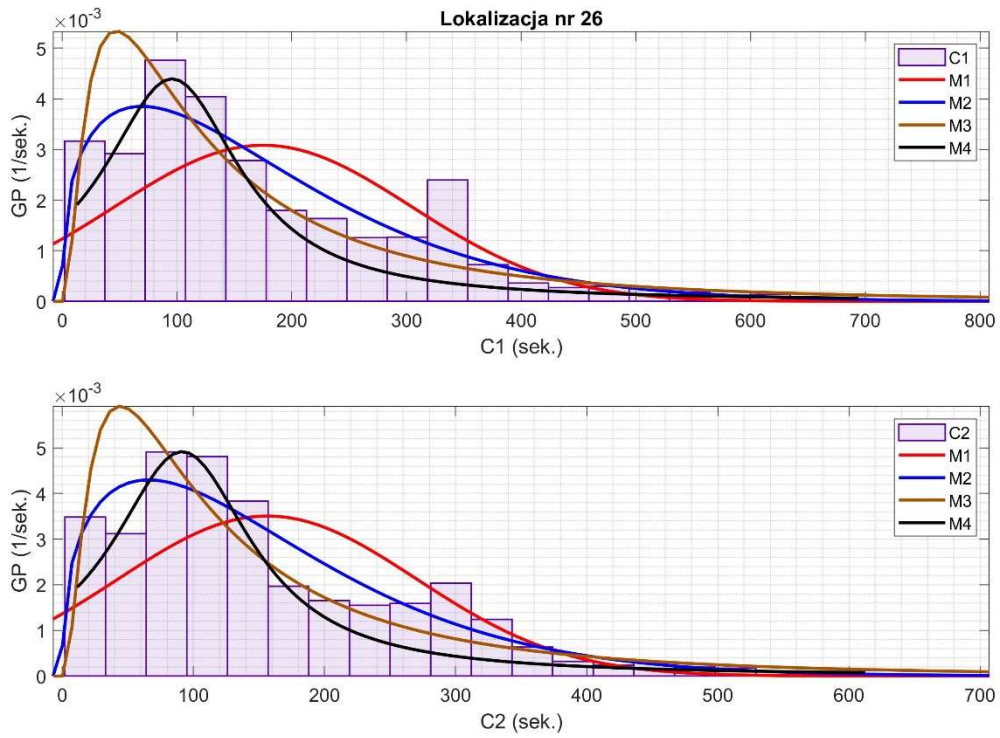
Rys. 20 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 23 wraz z dopasowaniem modeli.



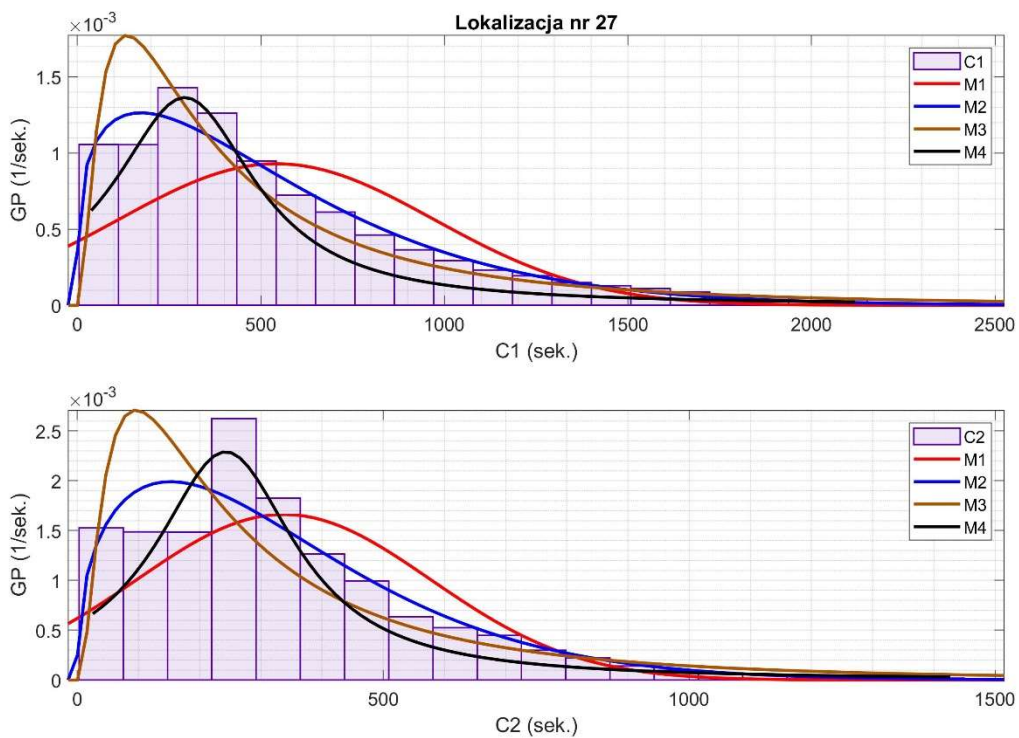
Rys. 21 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 24 wraz z dopasowaniem modeli.



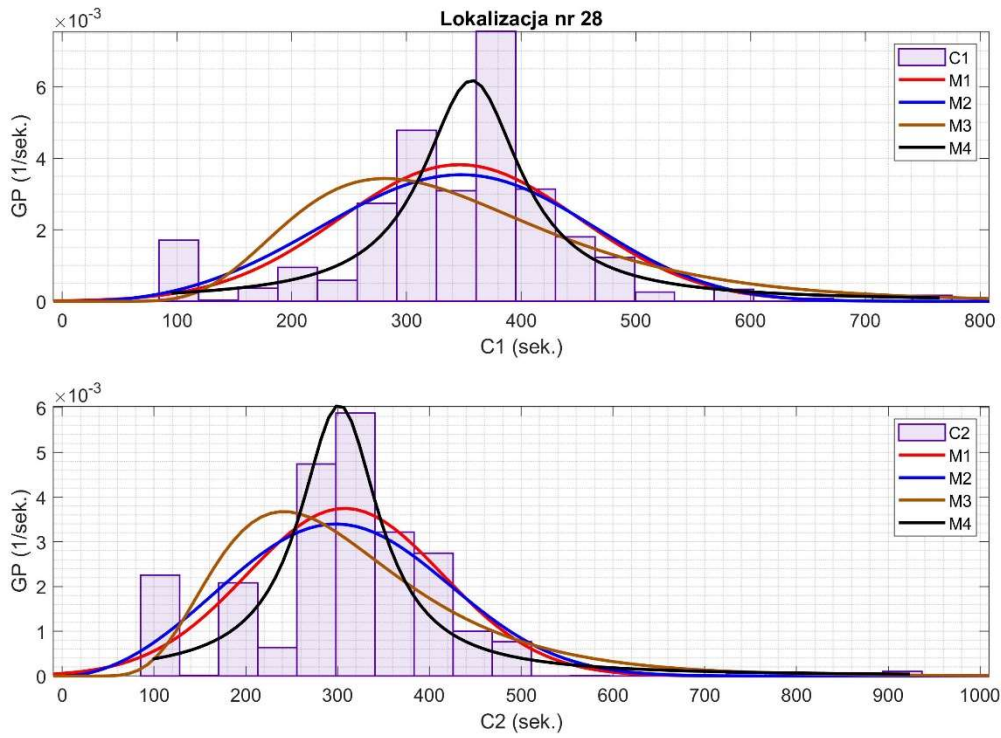
Rys. 22 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 25 wraz z dopasowaniem modeli.



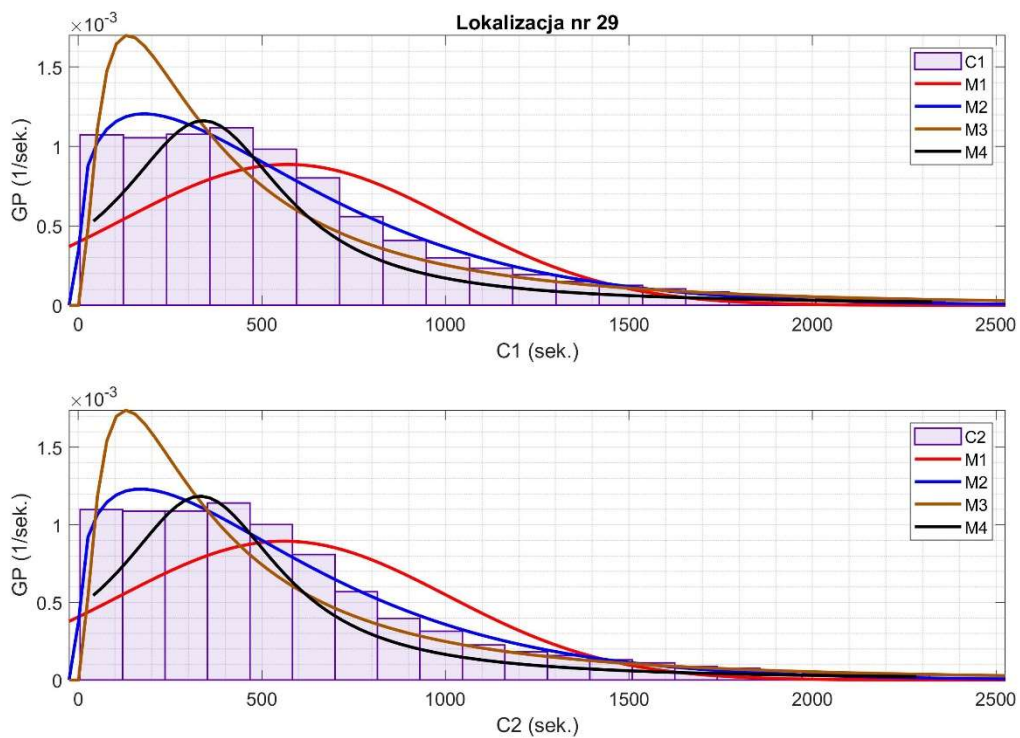
Rys. 23 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 26 wraz z dopasowaniem modeli.



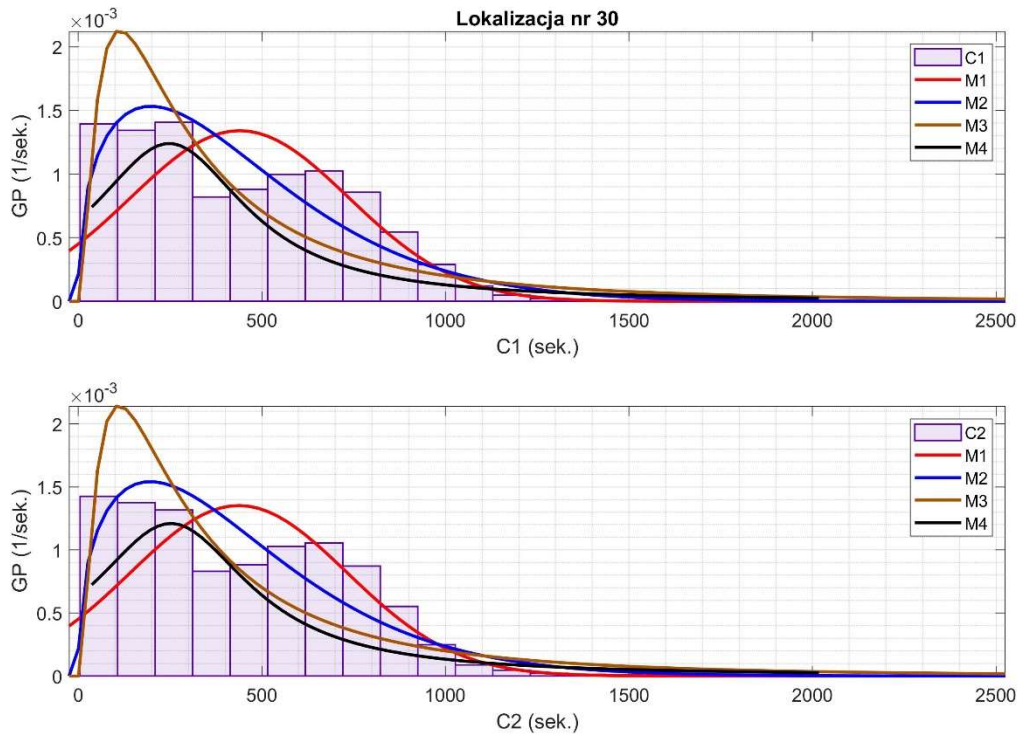
Rys. 24 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 27 wraz z dopasowaniem modeli.



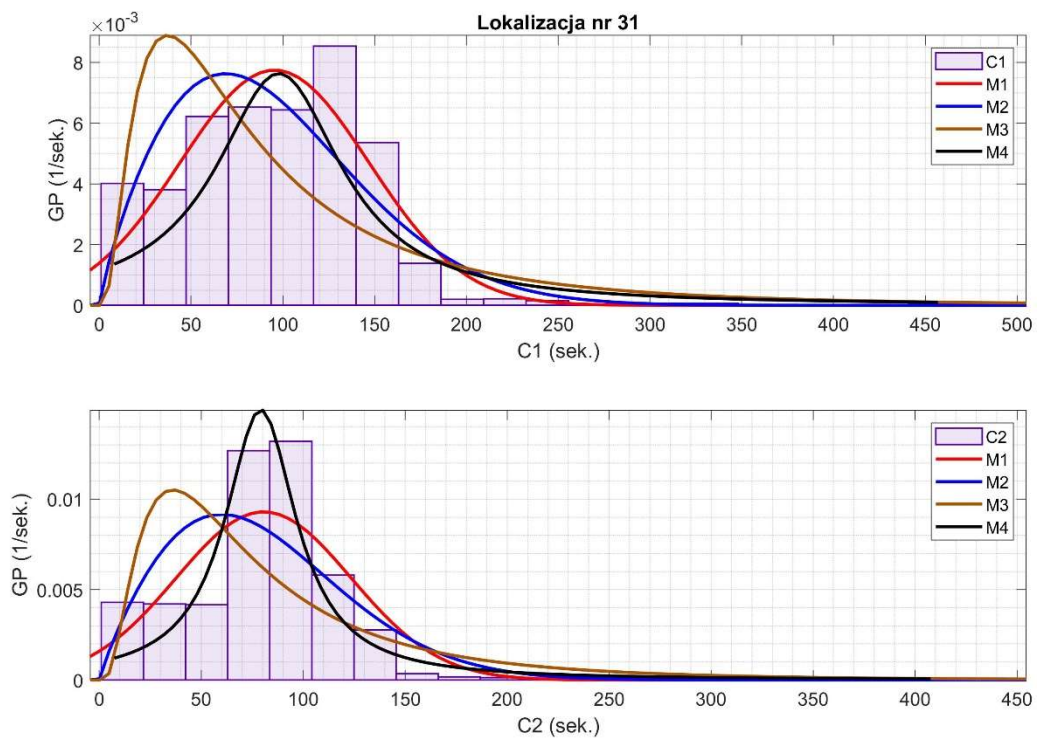
Rys. 25 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 28 wraz z dopasowaniem modeli.



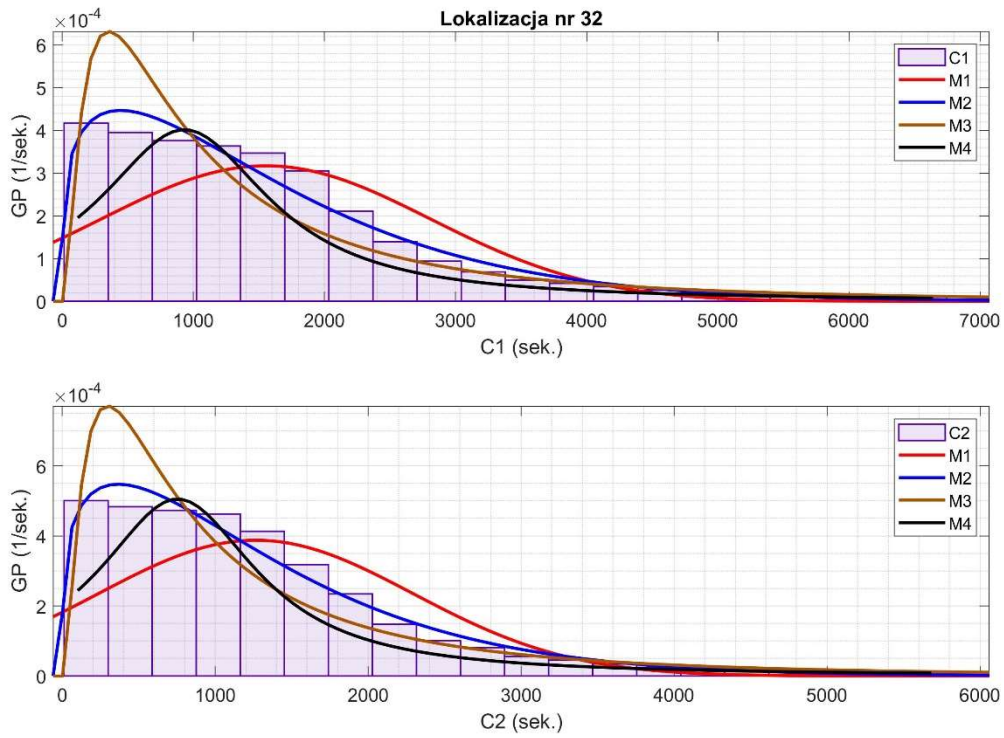
Rys. 26 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 29 wraz z dopasowaniem modeli.



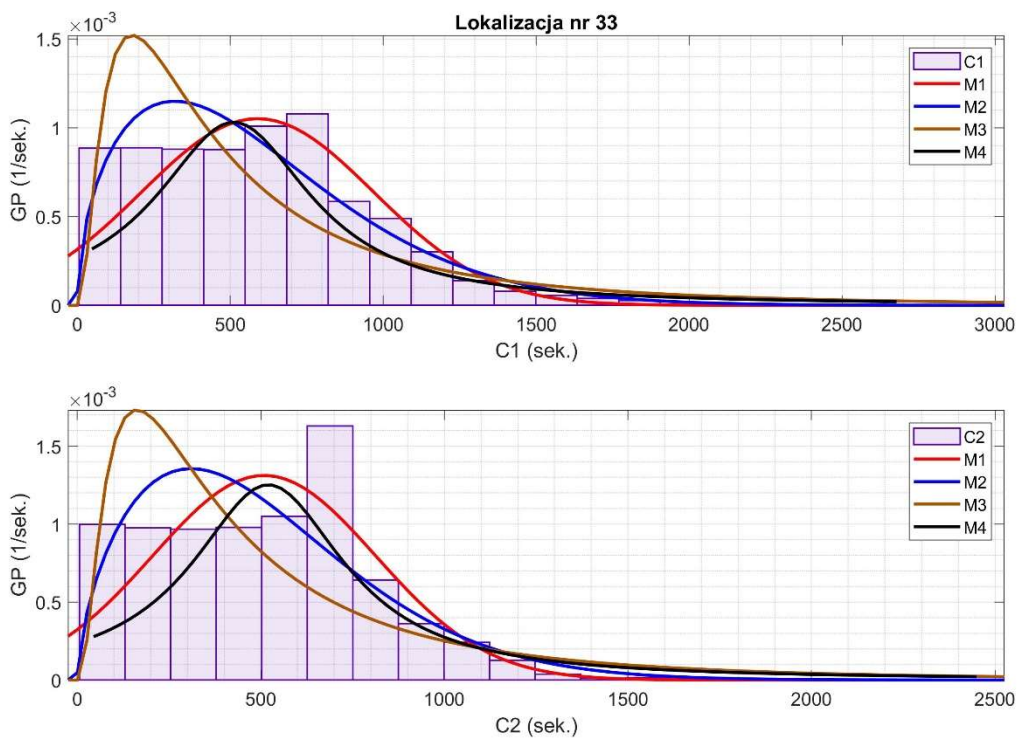
Rys. 27 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 30 wraz z dopasowaniem modeli.



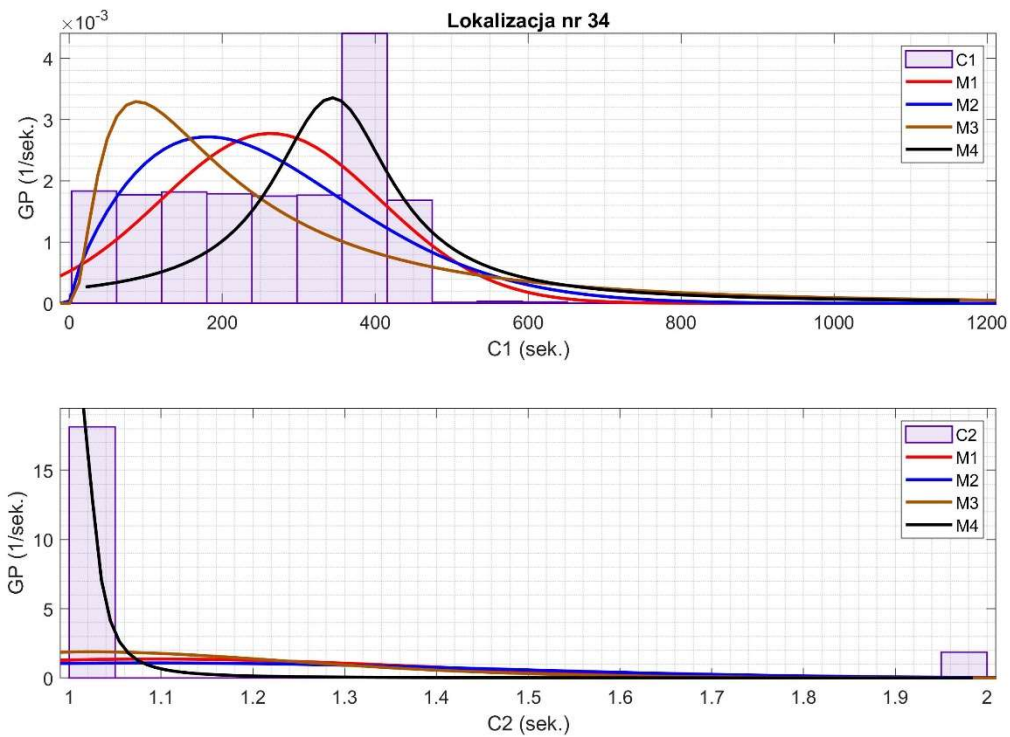
Rys. 28 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 31 wraz z dopasowaniem modeli.



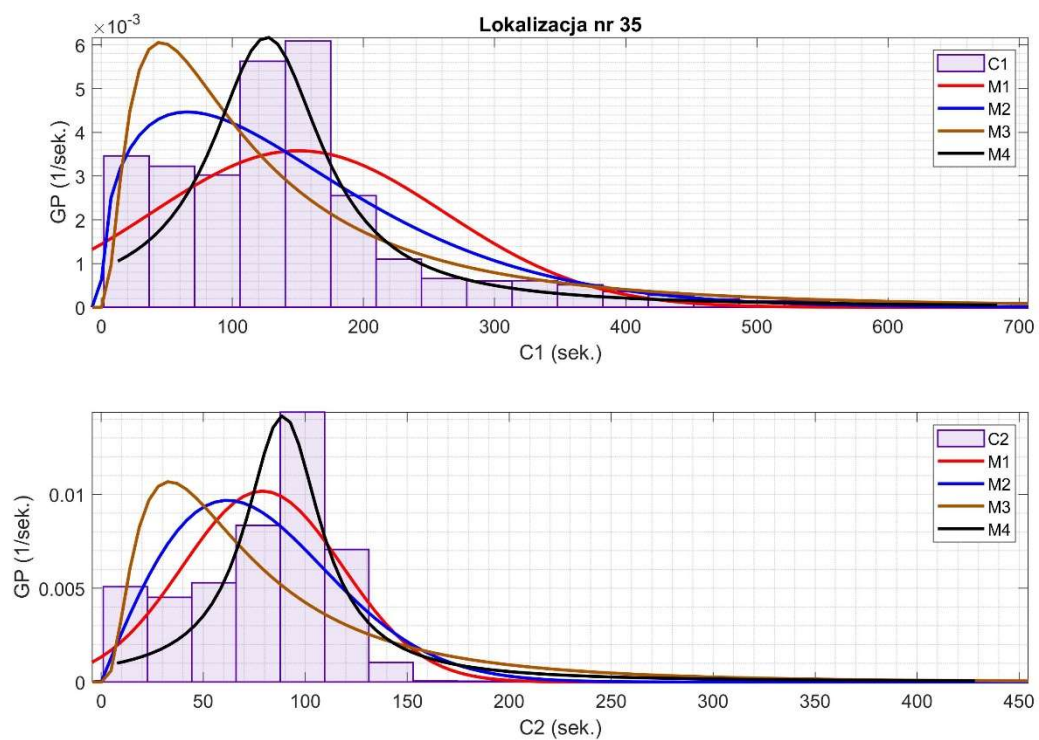
Rys. 29 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 32 wraz z dopasowaniem modeli.



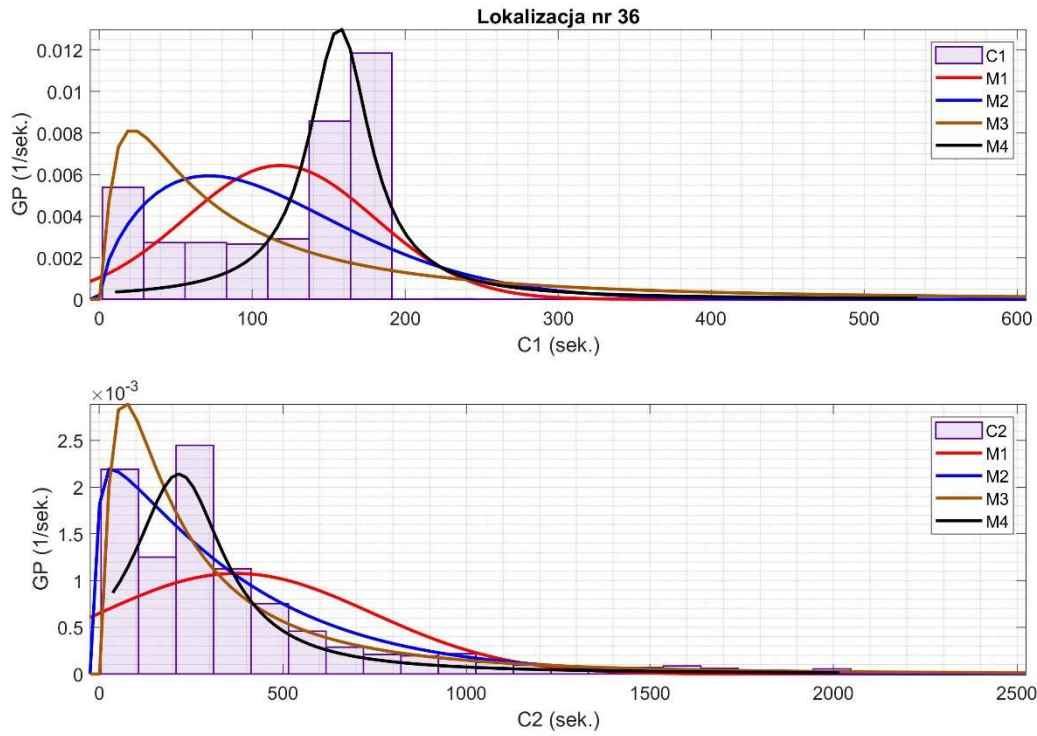
Rys. 30 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 33 wraz z dopasowaniem modeli.



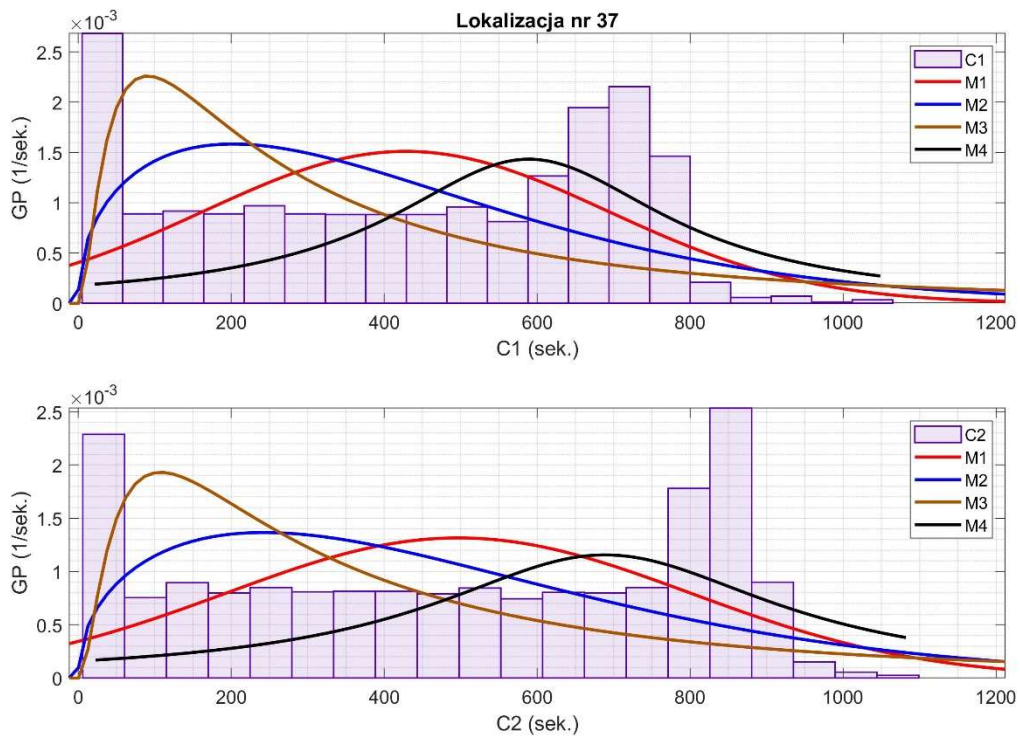
Rys. 31 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 34 wraz z dopasowaniem modeli.



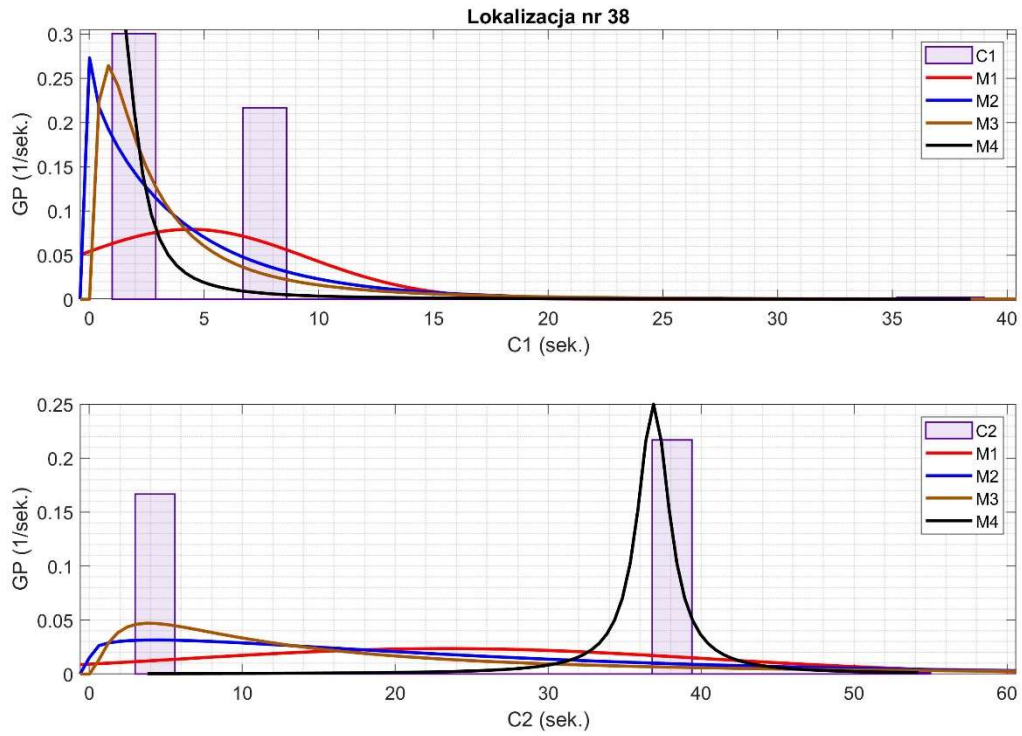
Rys. 32 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 35 wraz z dopasowaniem modeli.



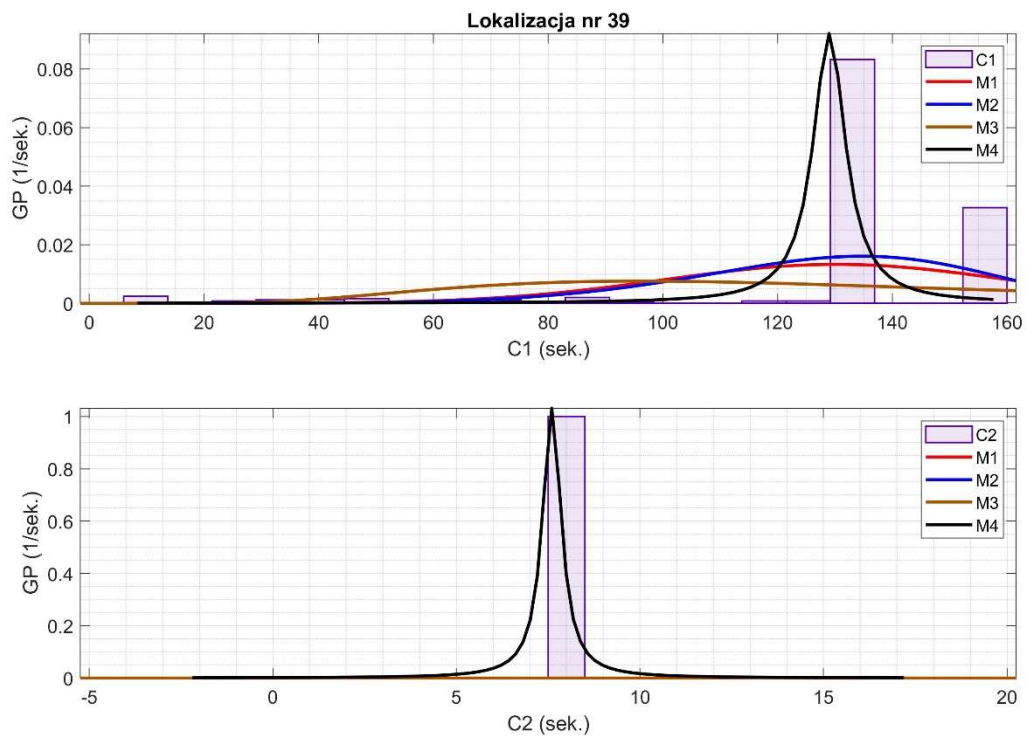
Rys. 33 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 36 wraz z dopasowaniem modeli.



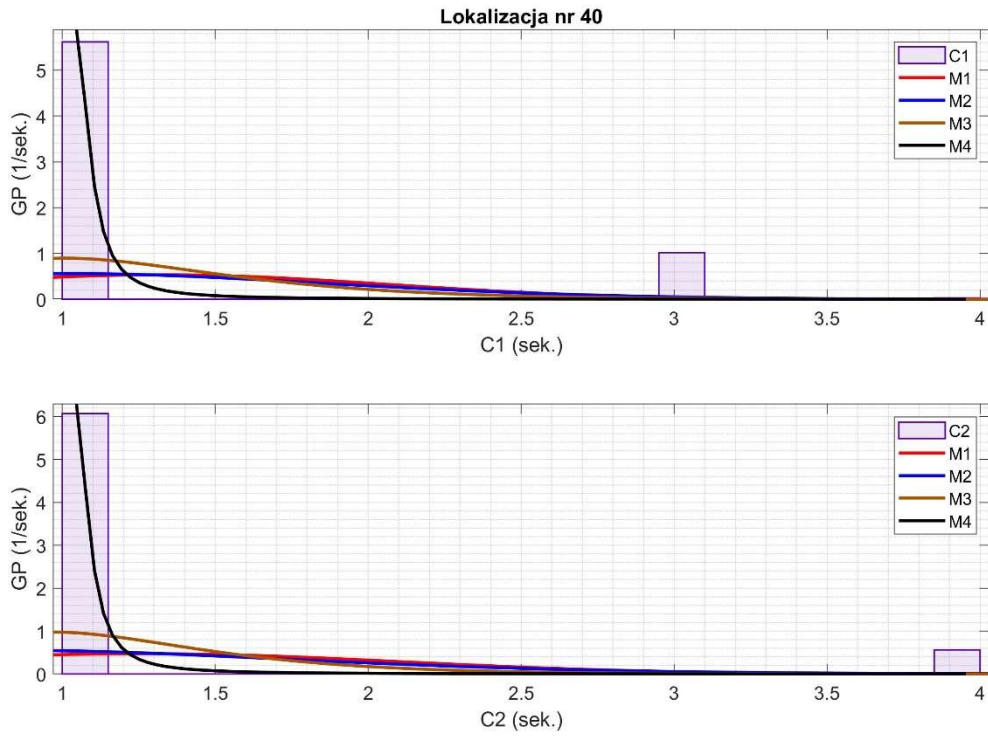
Rys. 34 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 37 wraz z dopasowaniem modeli.



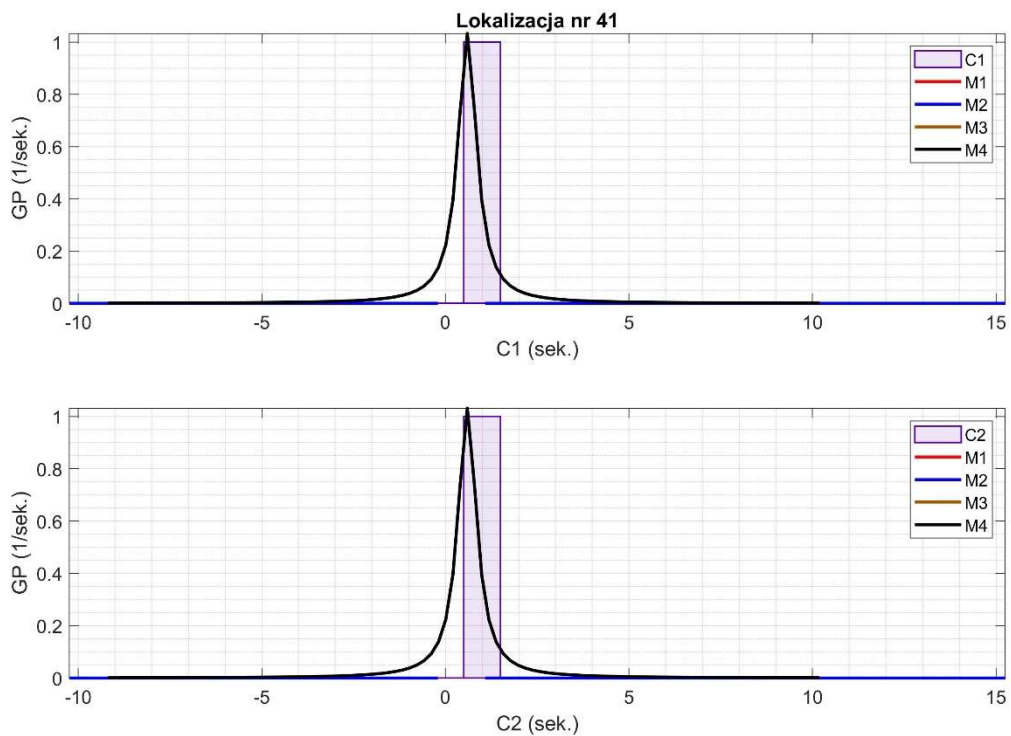
Rys. 35 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 38 wraz z dopasowaniem modeli.



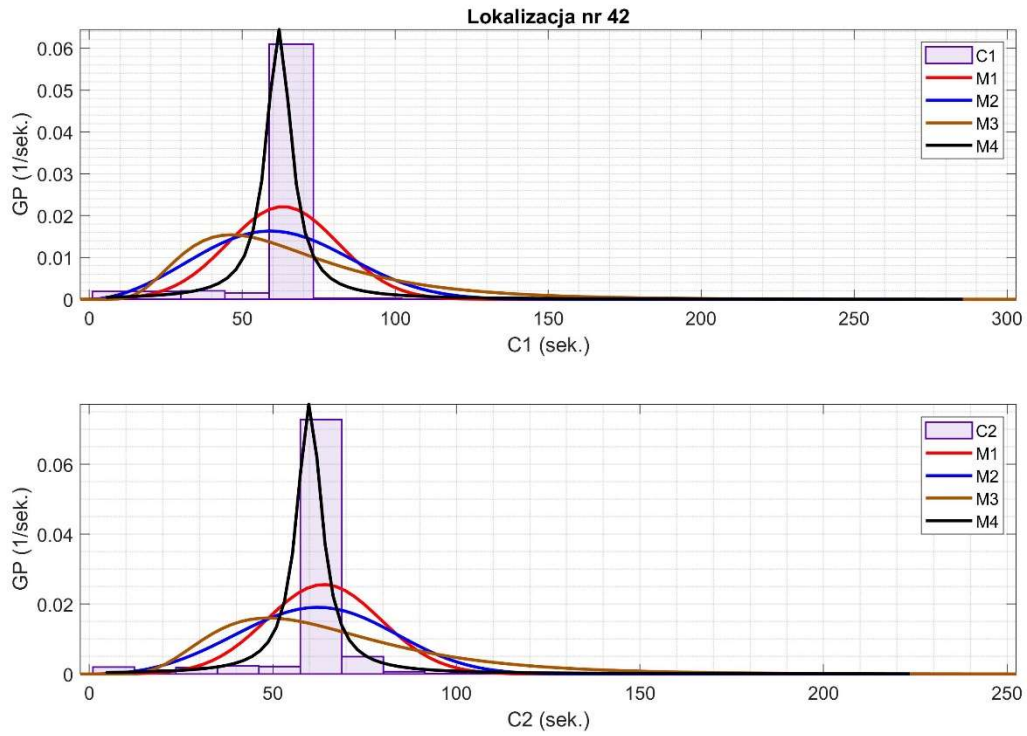
Rys. 36 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 39 wraz z dopasowaniem modeli.



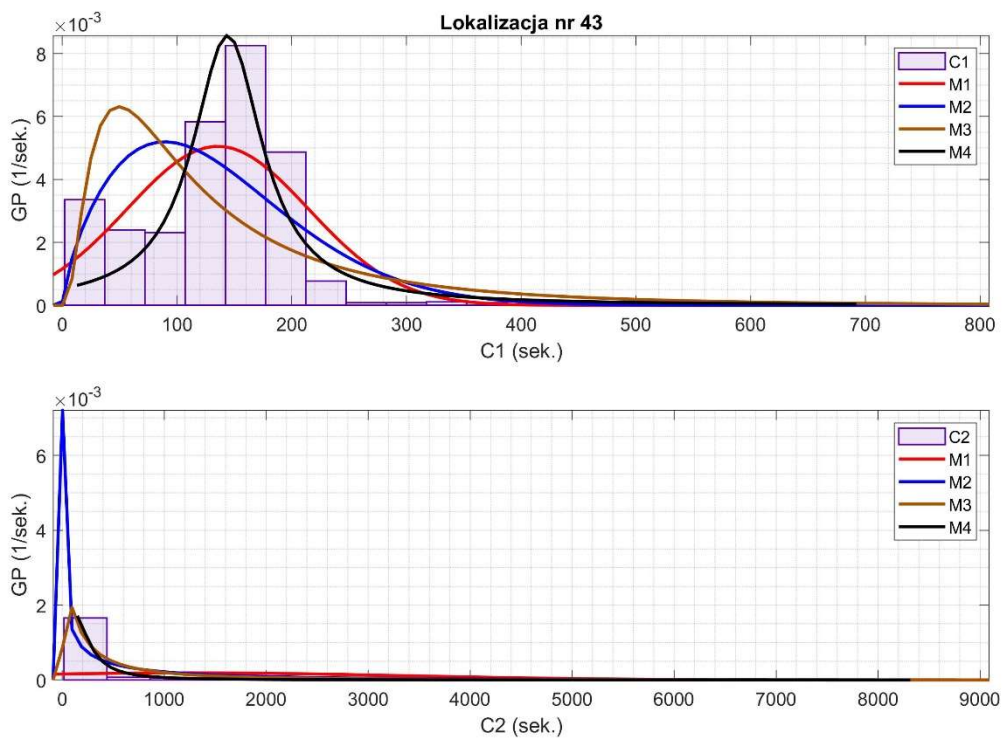
Rys. 37 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 40 wraz z dopasowaniem modeli.



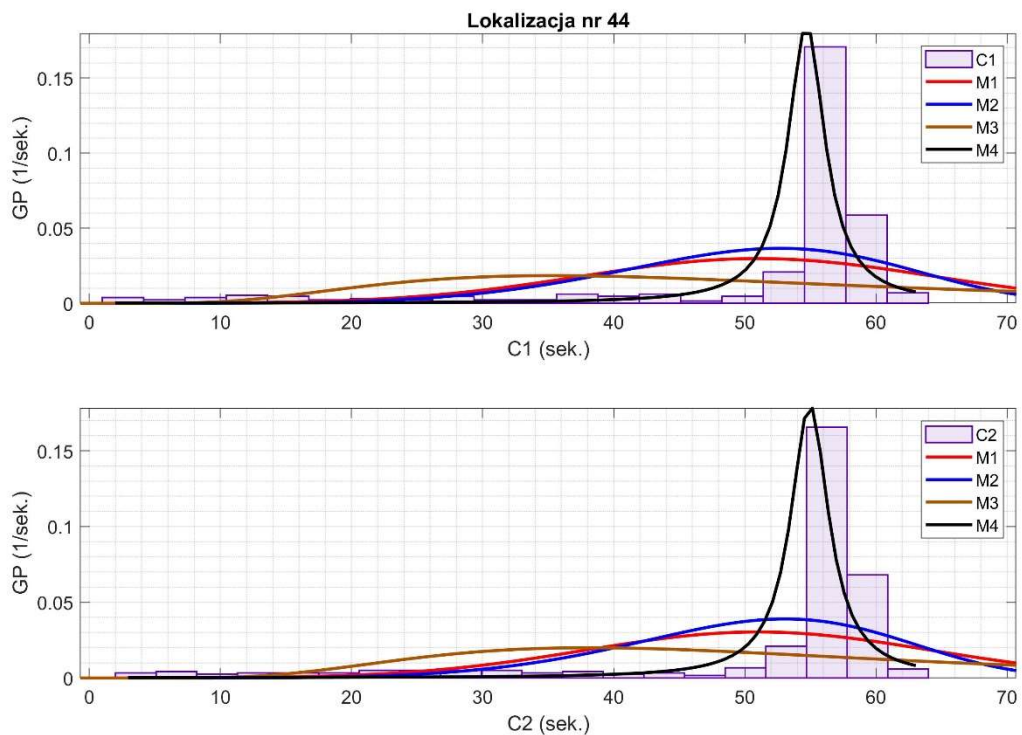
Rys. 38 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 41 wraz z dopasowaniem modeli.



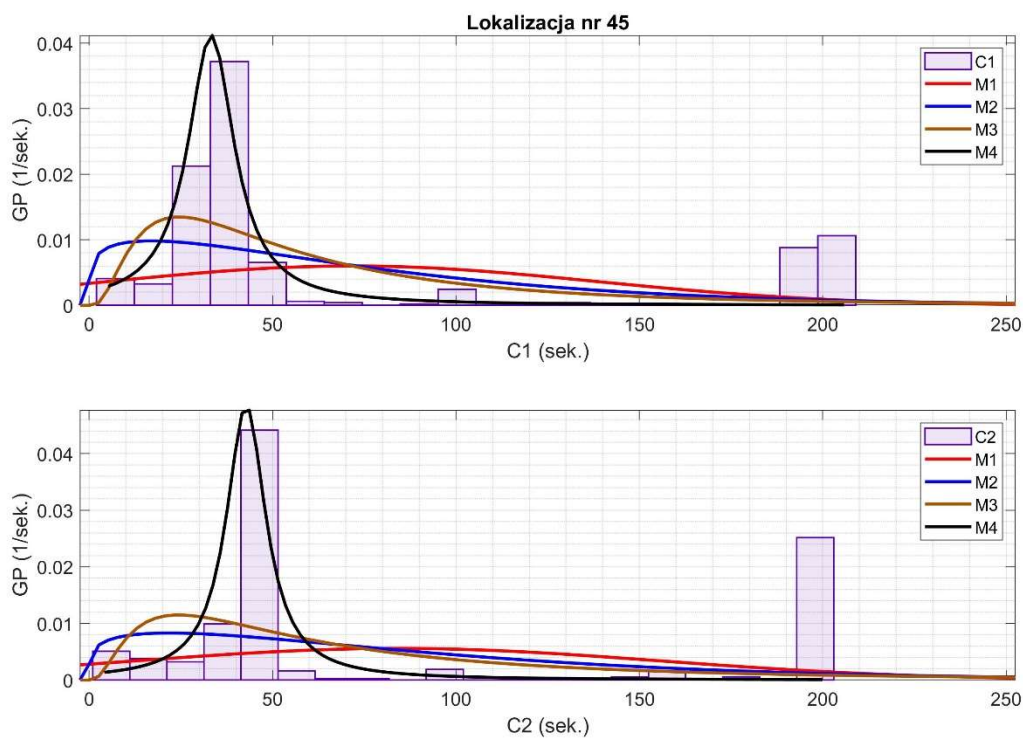
Rys. 39 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 42 wraz z dopasowaniem modeli.



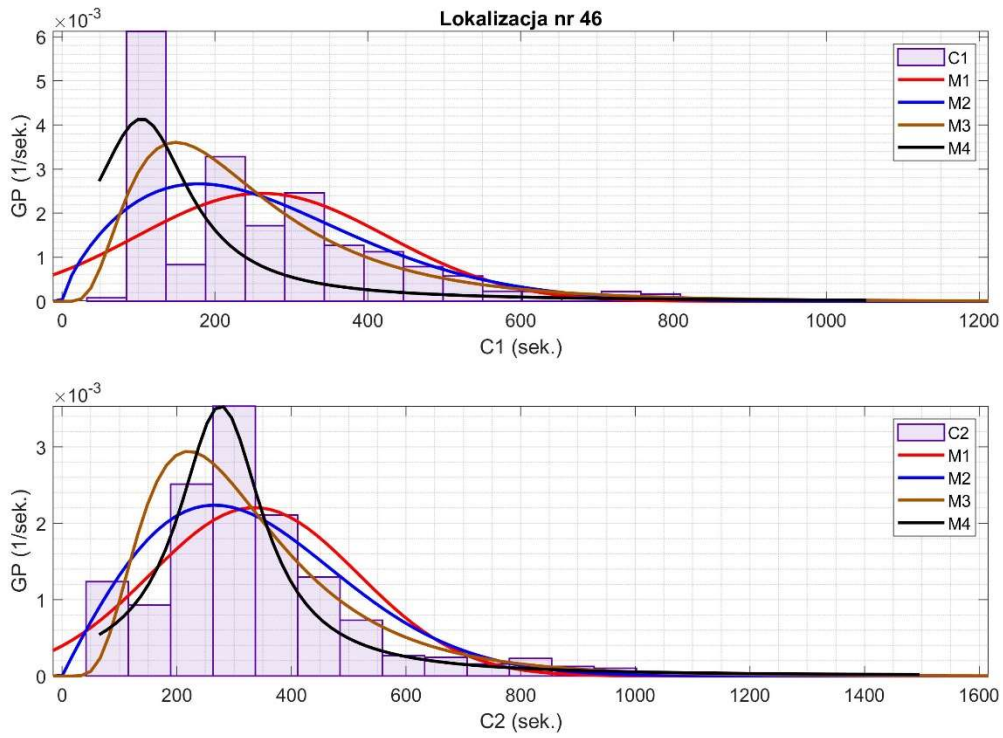
Rys. 40 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 43 wraz z dopasowaniem modeli.



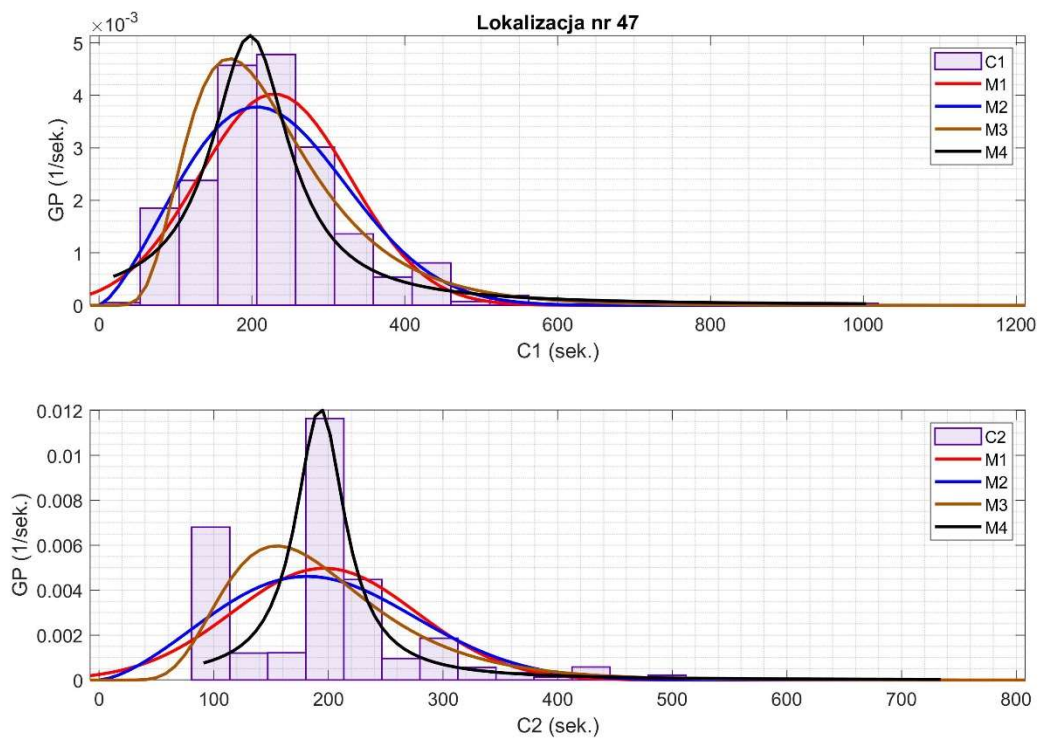
Rys. 41 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 44 wraz z dopasowaniem modeli.



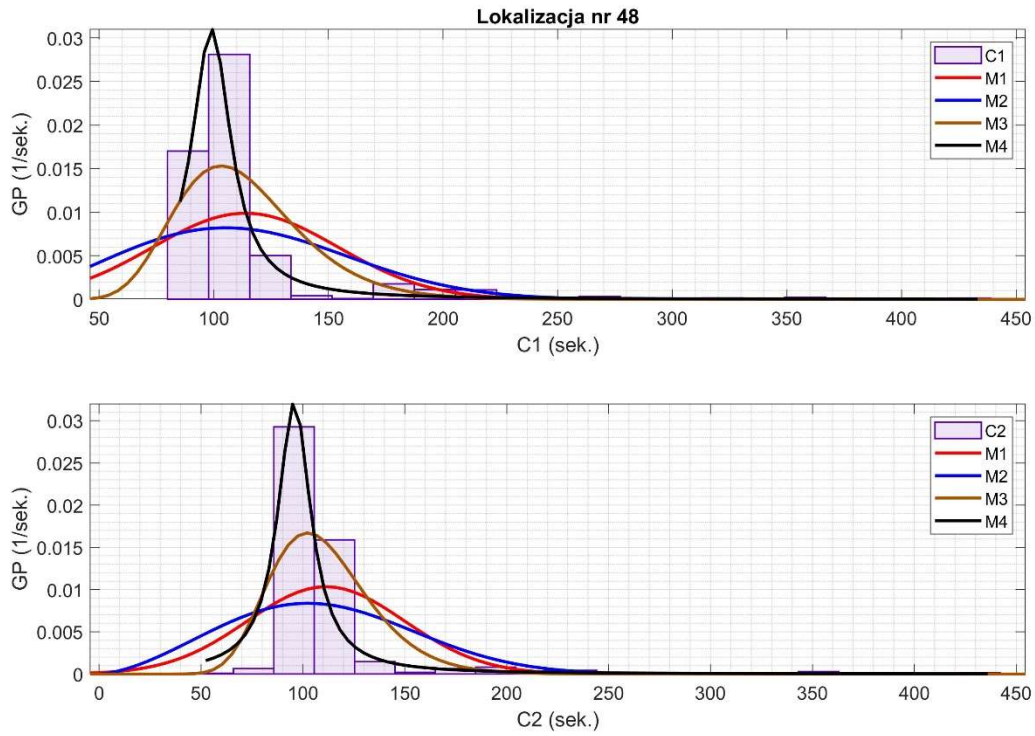
Rys. 42 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 45 wraz z dopasowaniem modeli.



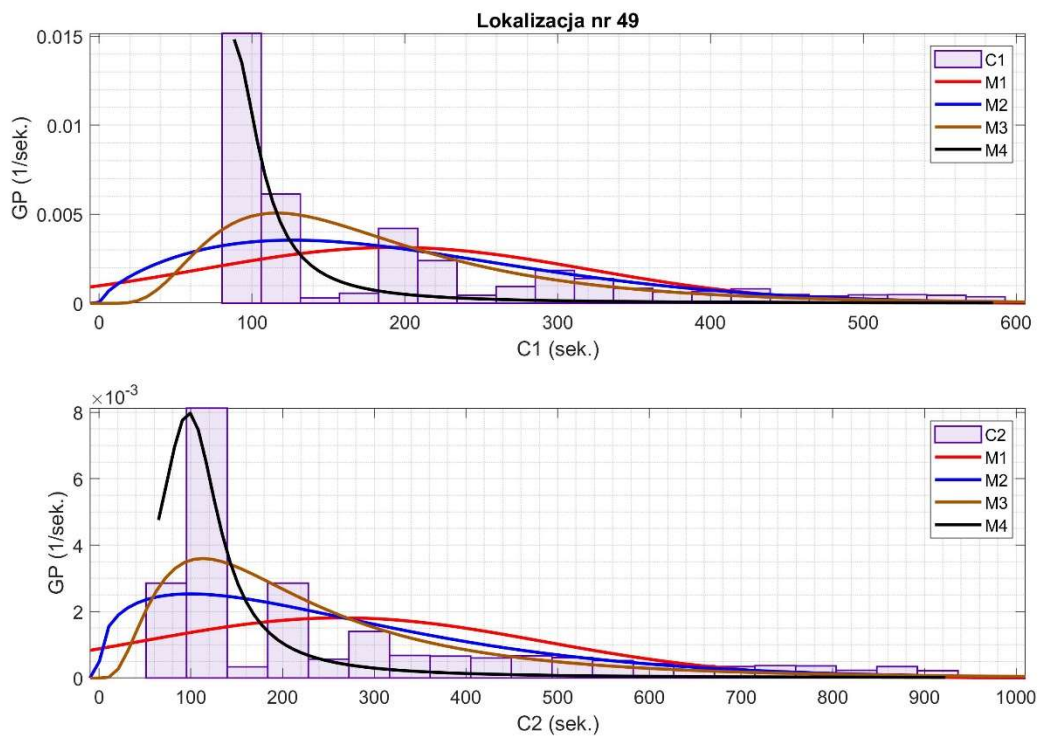
Rys. 43 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 46 wraz z dopasowaniem modeli.



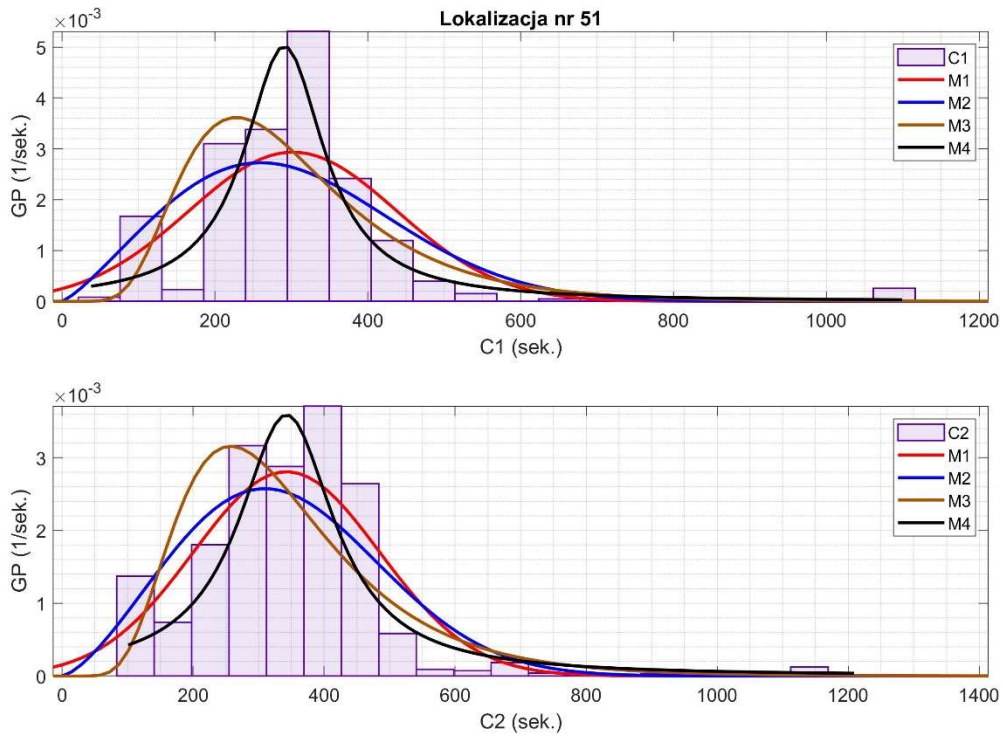
Rys. 44 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 47 wraz z dopasowaniem modeli.



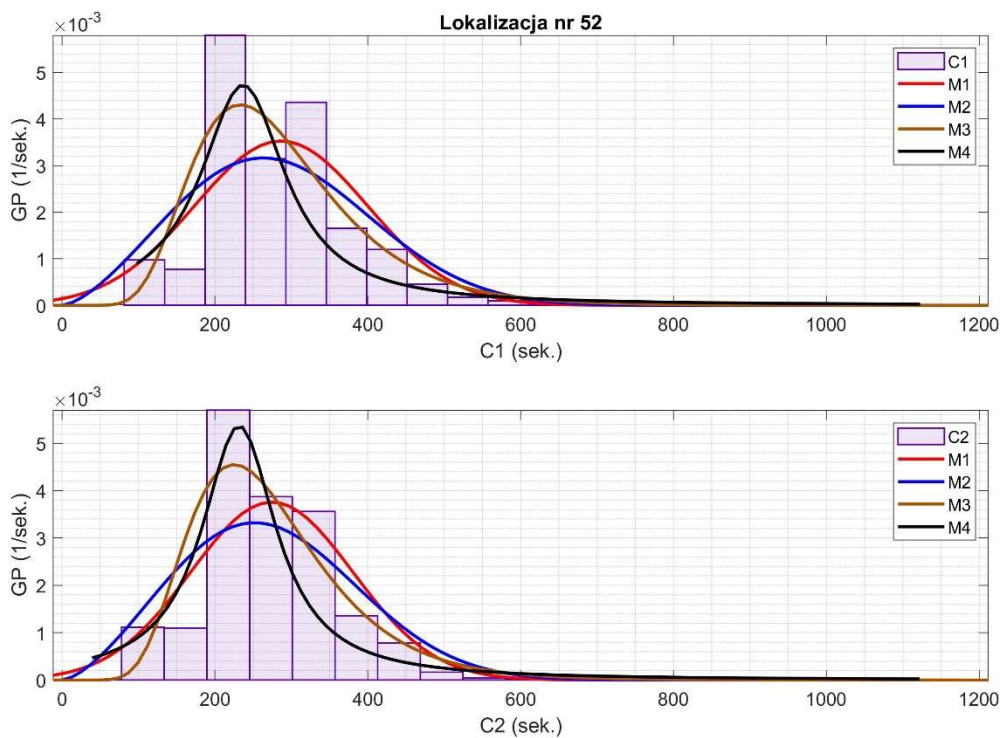
Rys. 45 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 48 wraz z dopasowaniem modeli.



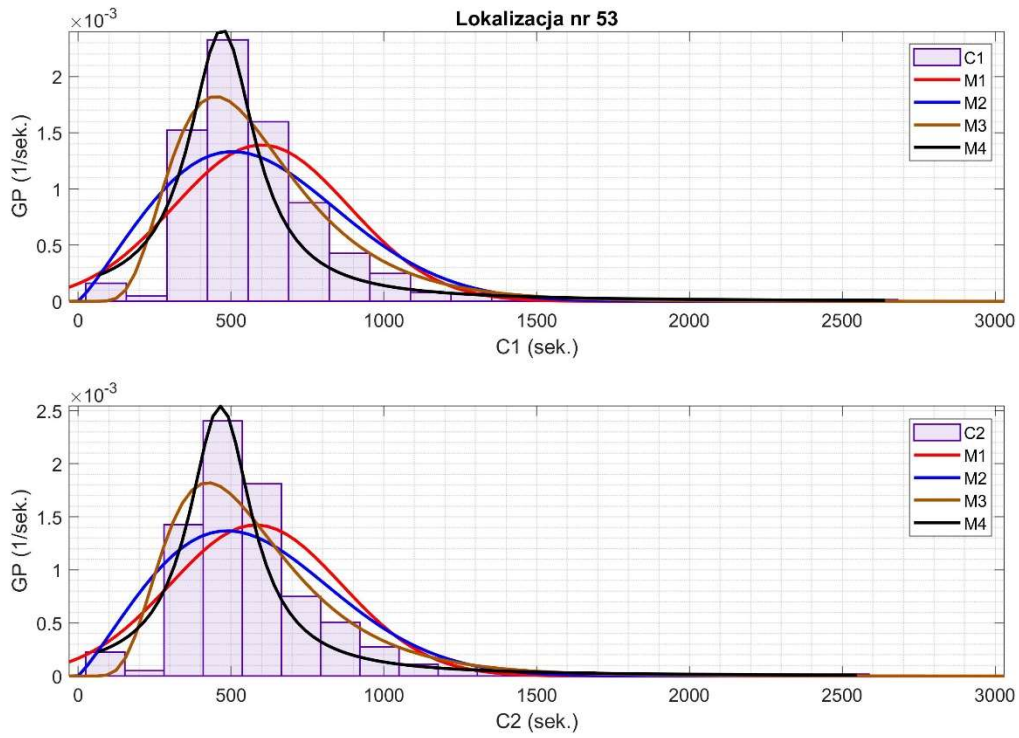
Rys. 46 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 49 wraz z dopasowaniem modeli.



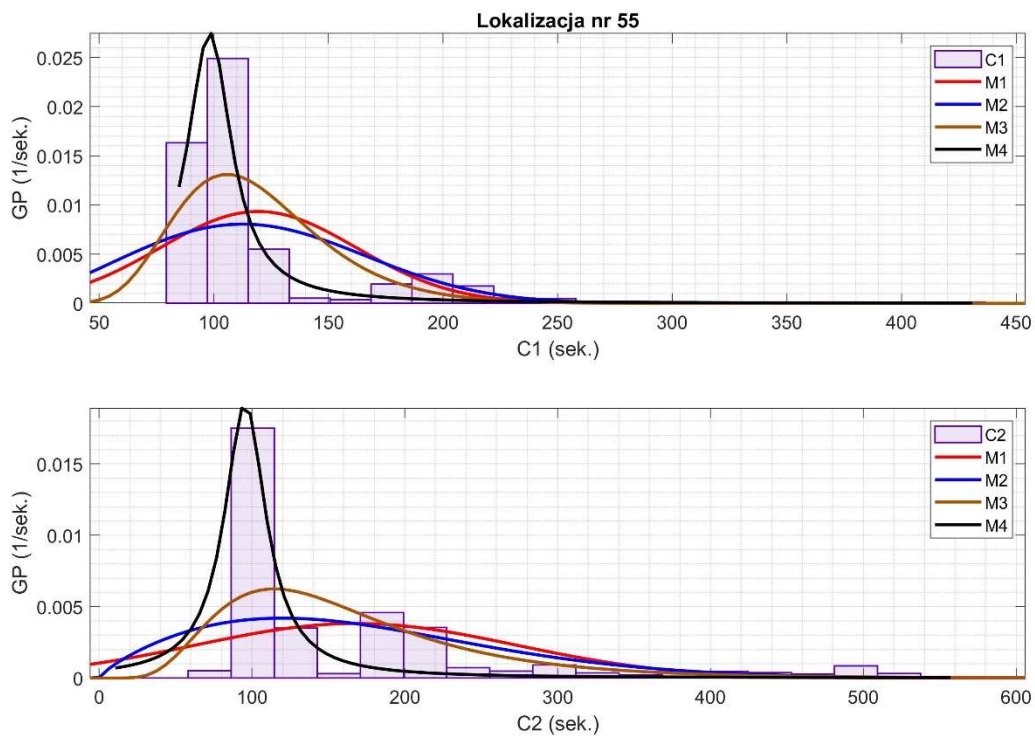
Rys. 47 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 51 wraz z dopasowaniem modeli.



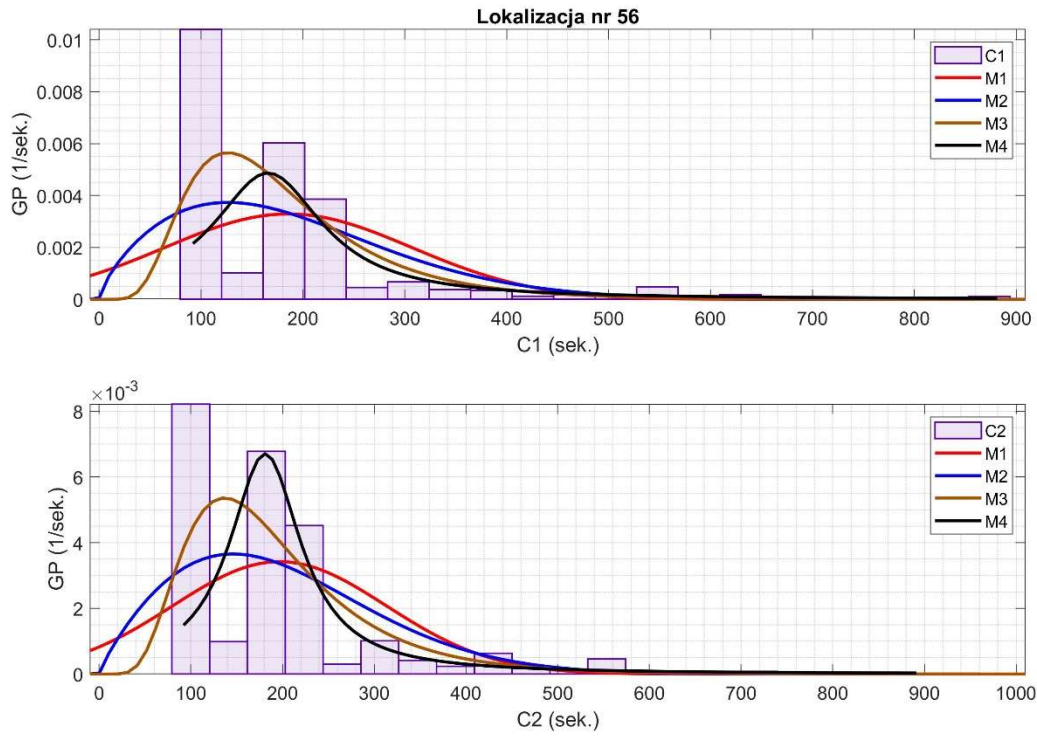
Rys. 48 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 52 wraz z dopasowaniem modeli.



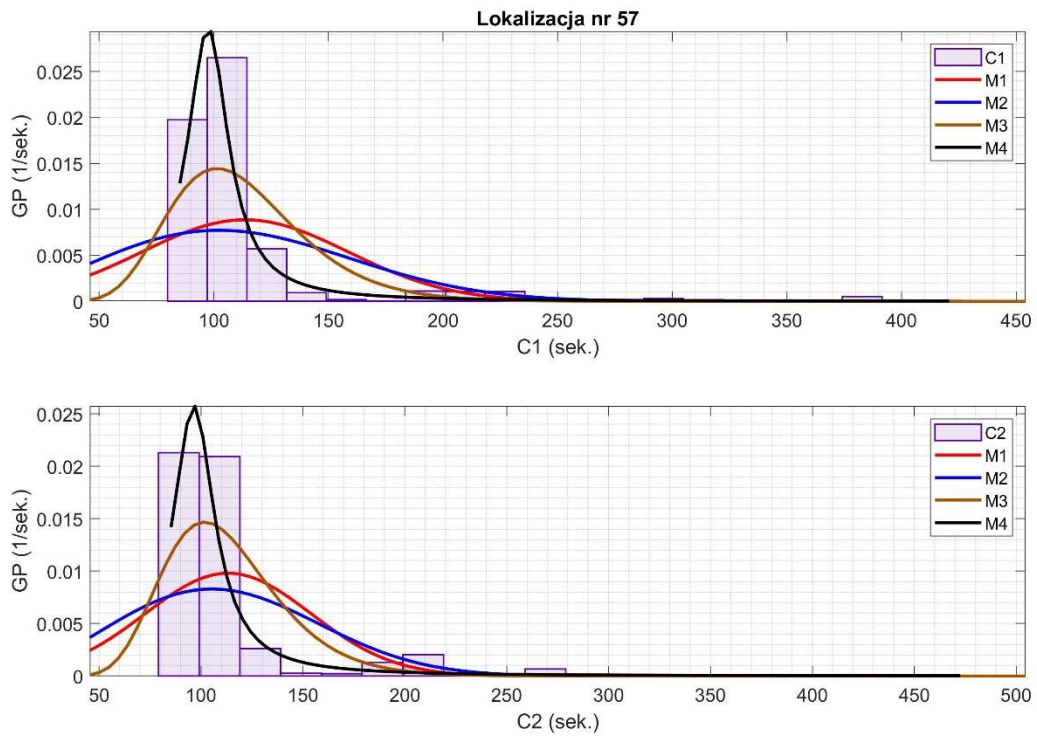
Rys. 49 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 53 wraz z dopasowaniem modeli.



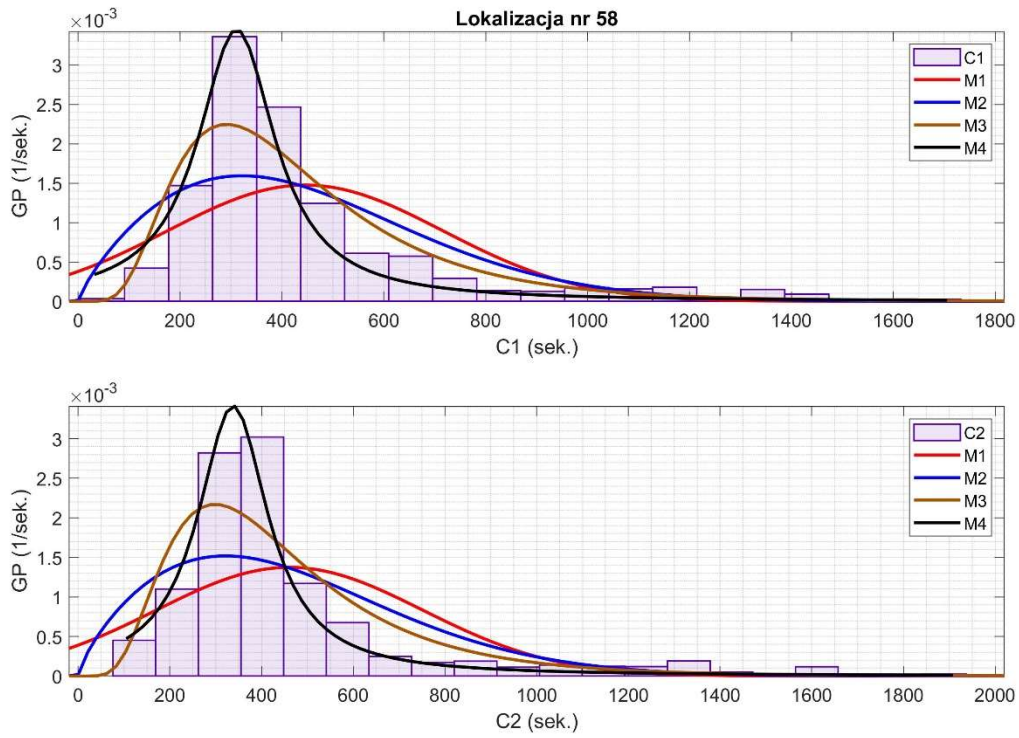
Rys. 50 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 55 wraz z dopasowaniem modeli.



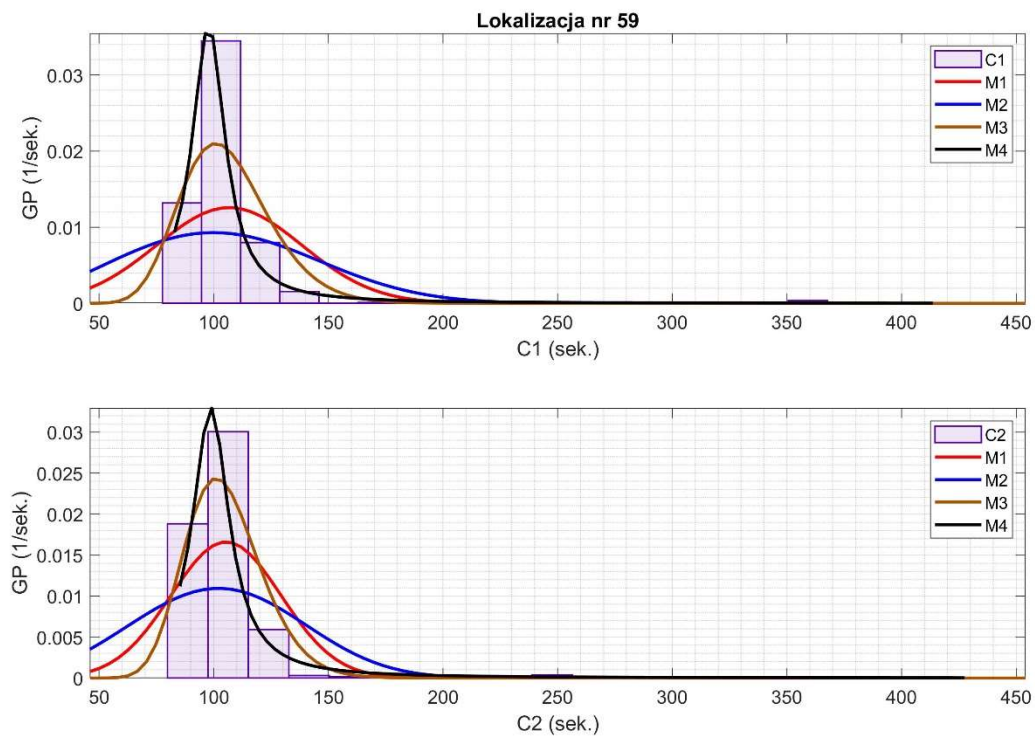
Rys. 51 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 56 wraz z dopasowaniem modeli.



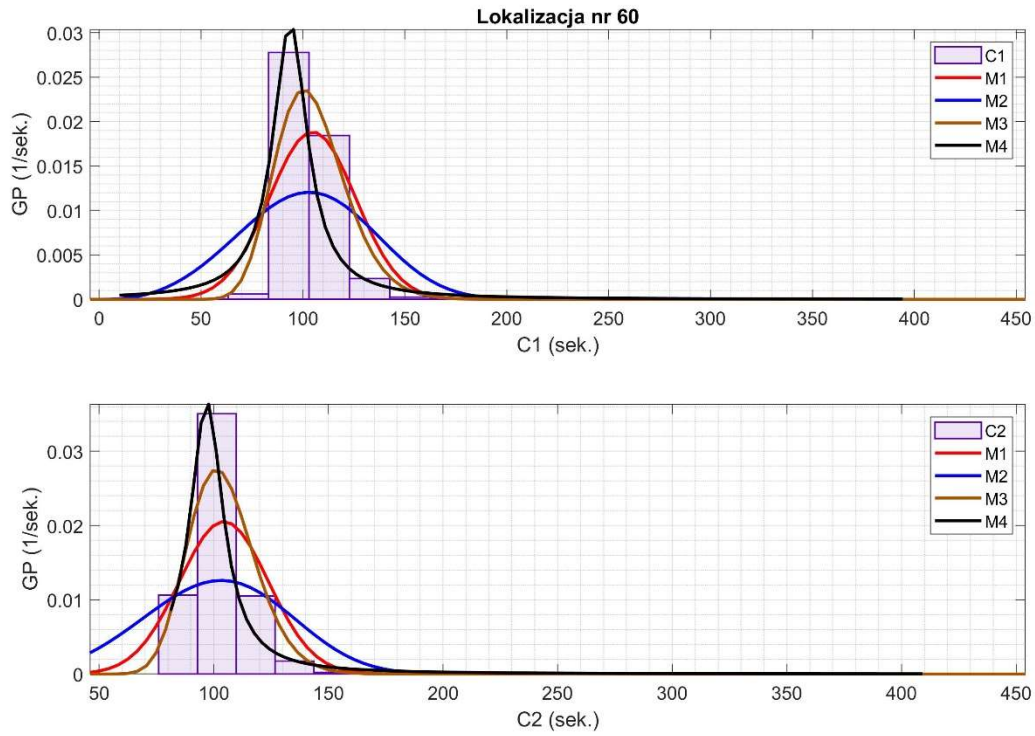
Rys. 52 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 57 wraz z dopasowaniem modeli.



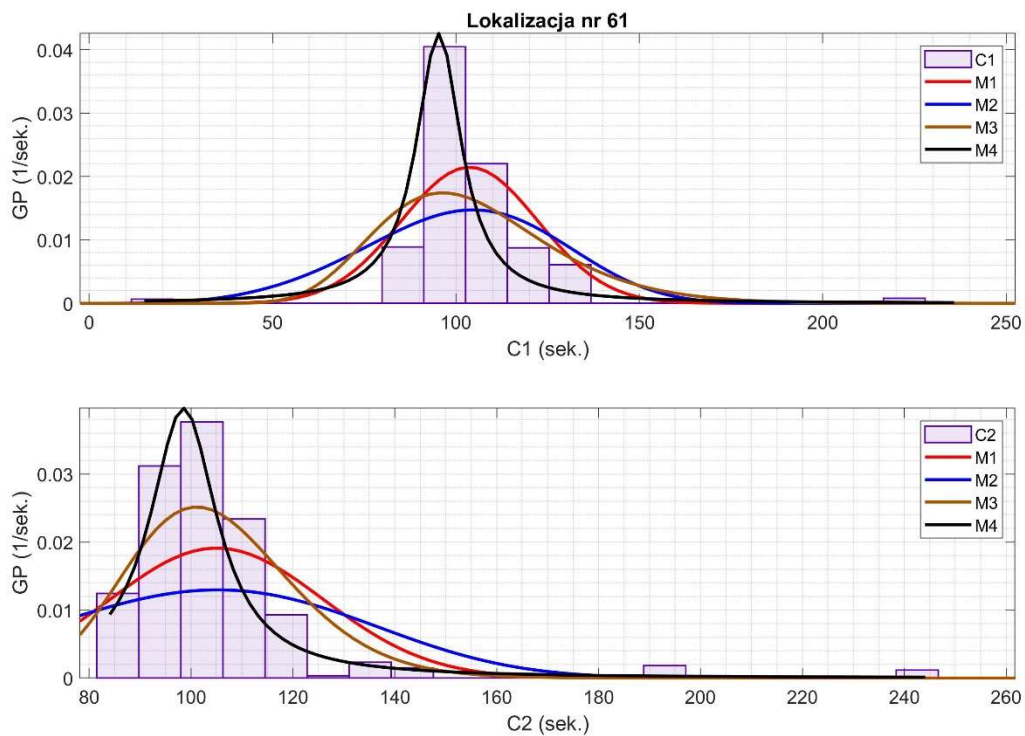
Rys. 53 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 58 wraz z dopasowaniem modeli.



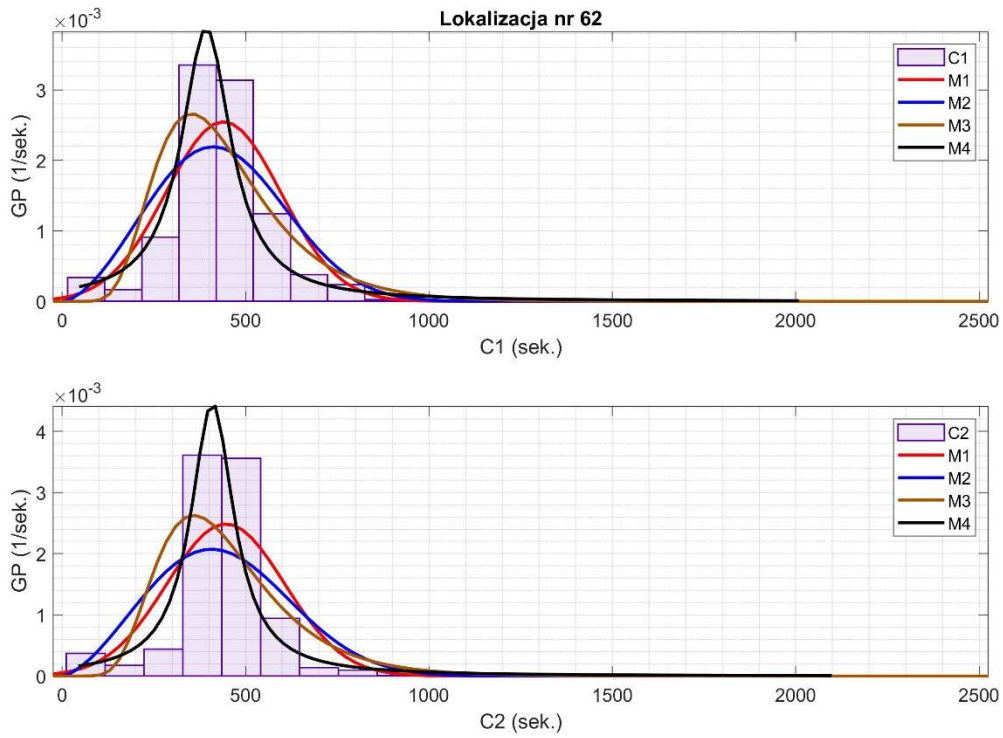
Rys. 54 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 59 wraz z dopasowaniem modeli.



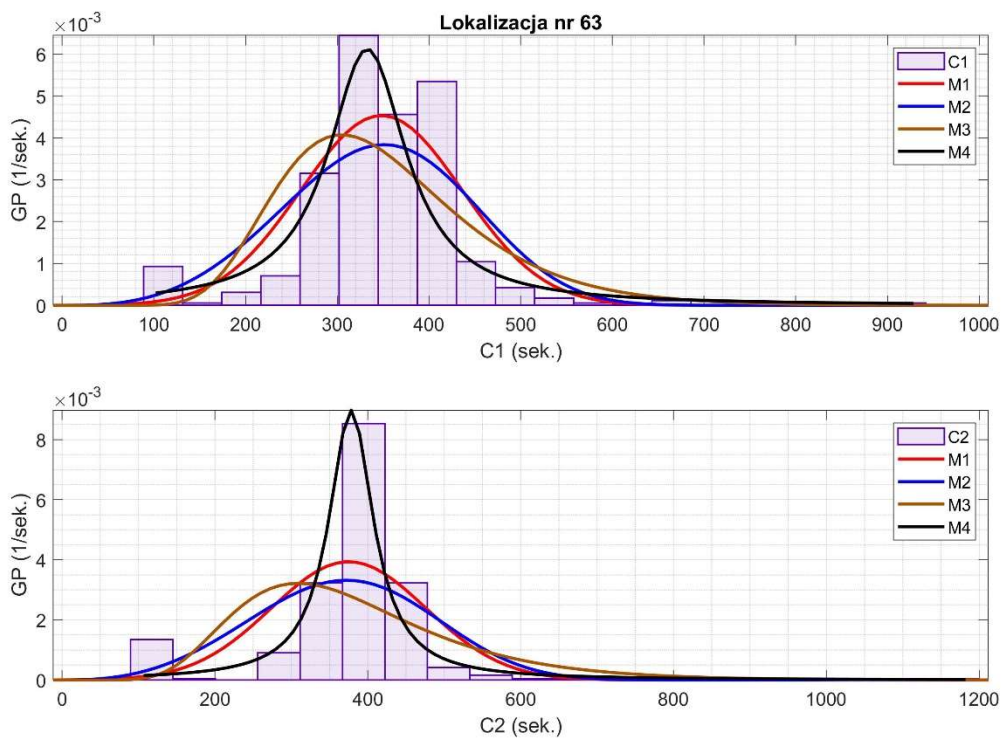
Rys. 55 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 60 wraz z dopasowaniem modeli.



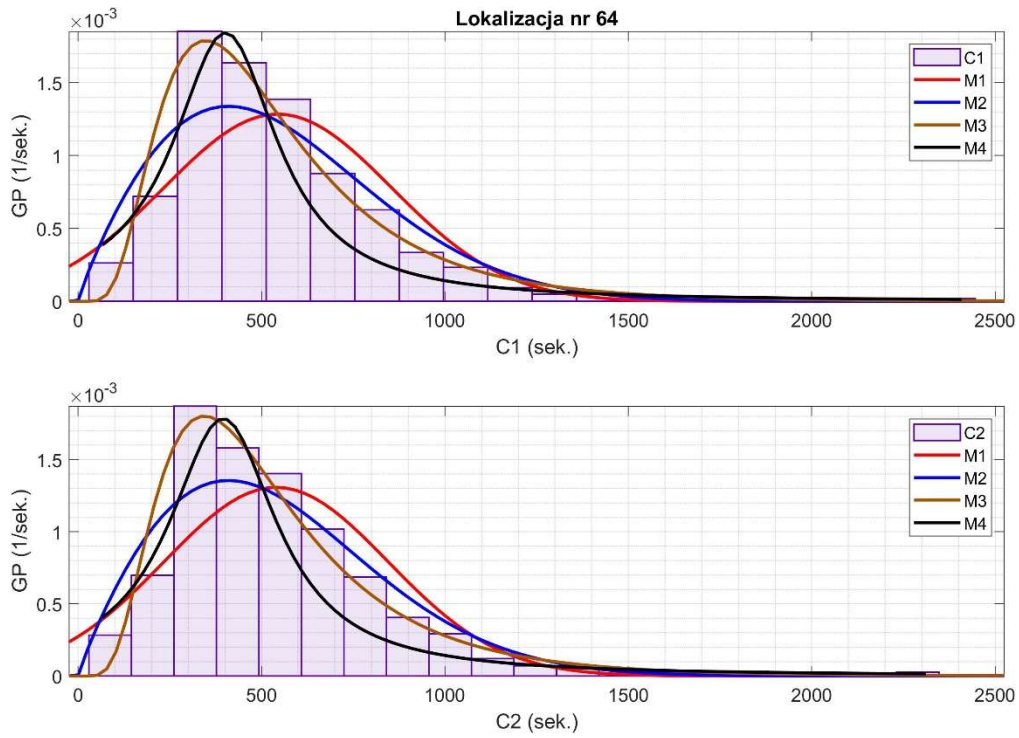
Rys. 56 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 61 wraz z dopasowaniem modeli.



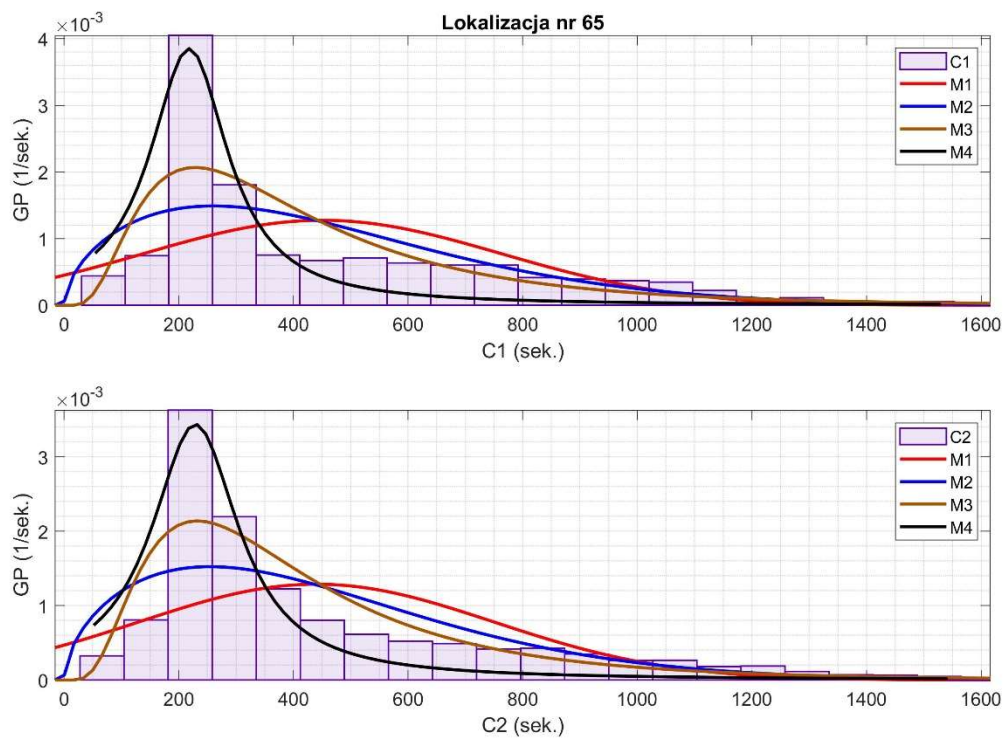
Rys. 57 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 62 wraz z dopasowaniem modeli.



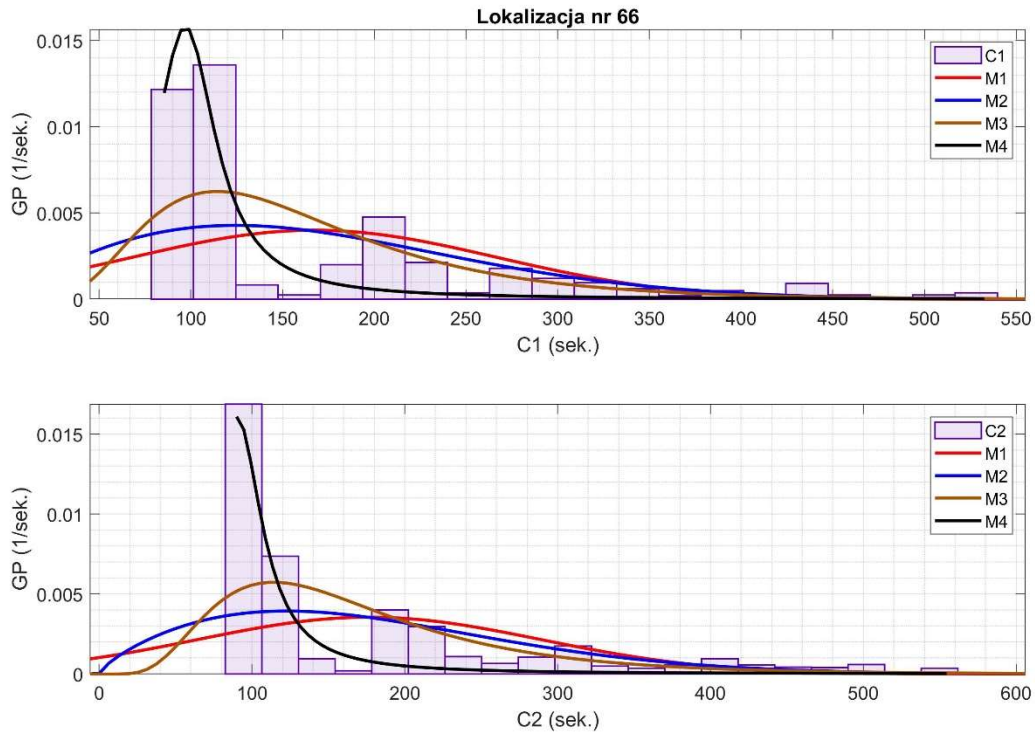
Rys. 58 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 63 wraz z dopasowaniem modeli.



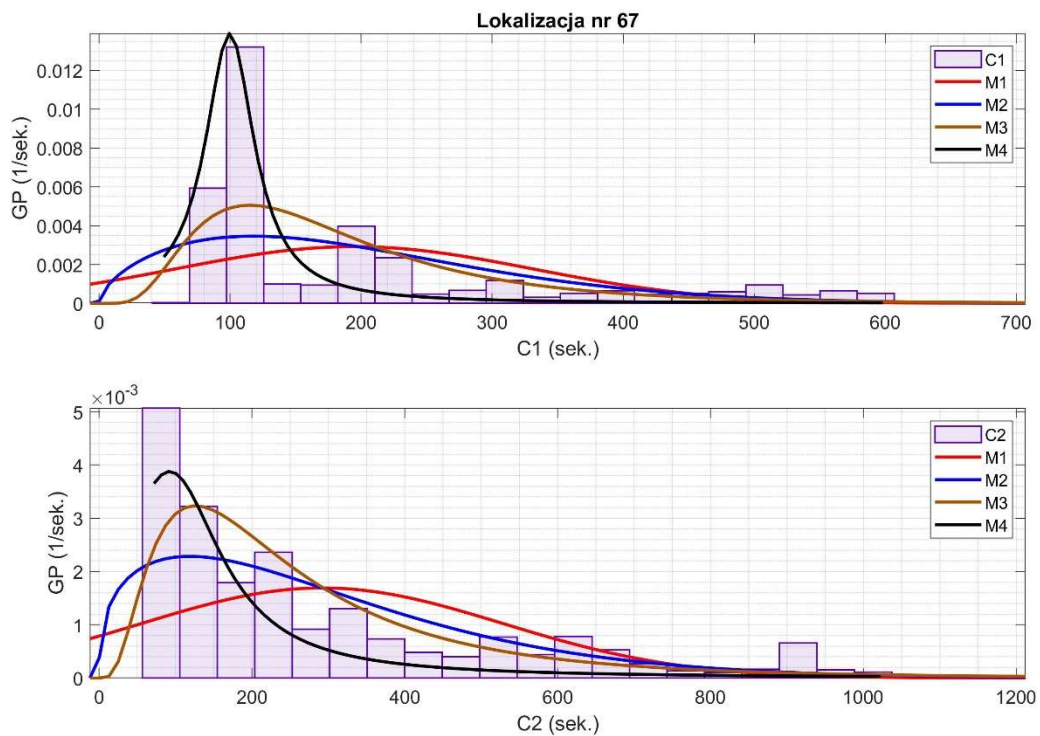
Rys. 59 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 64 wraz z dopasowaniem modeli.



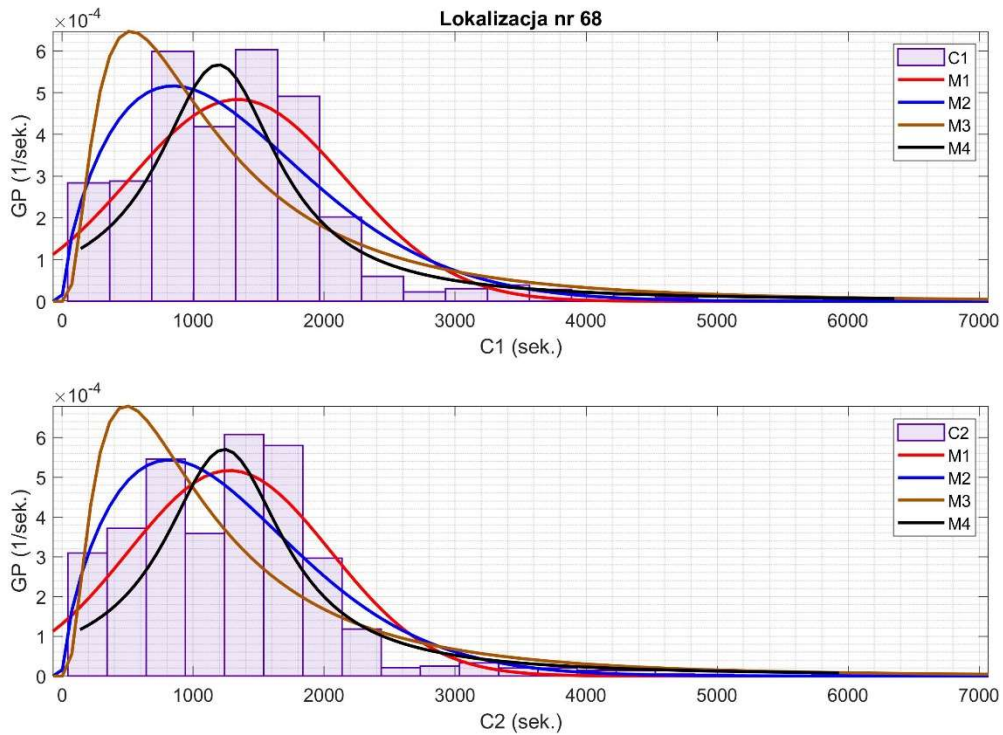
Rys. 60 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 65 wraz z dopasowaniem modeli.



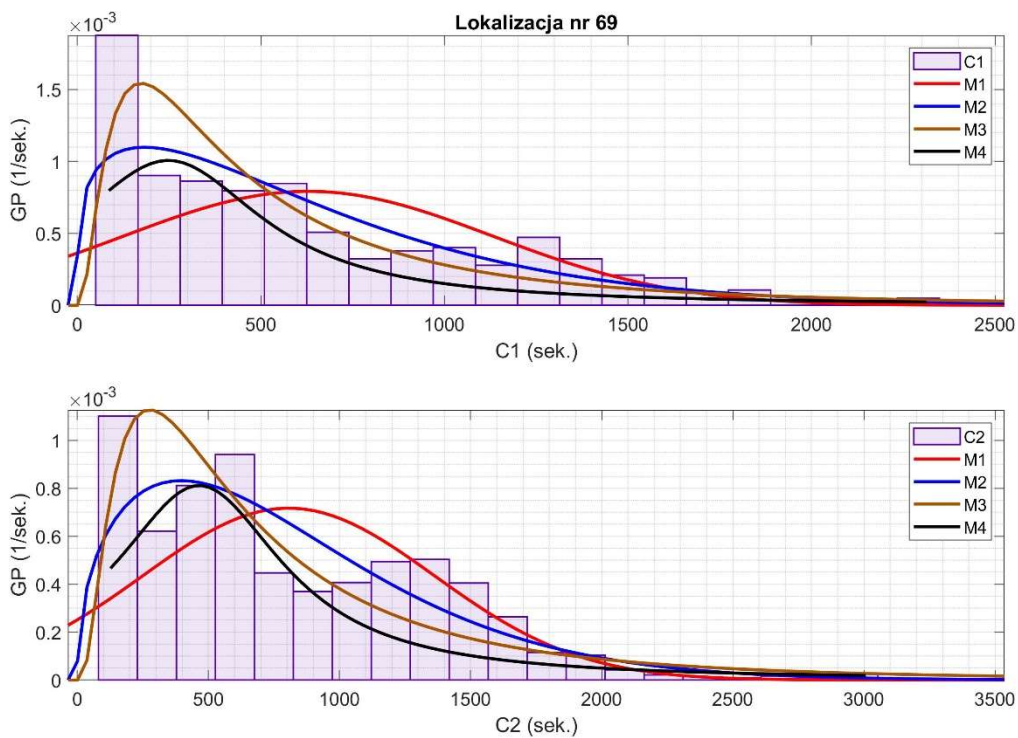
Rys. 61 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 66 wraz z dopasowaniem modeli.



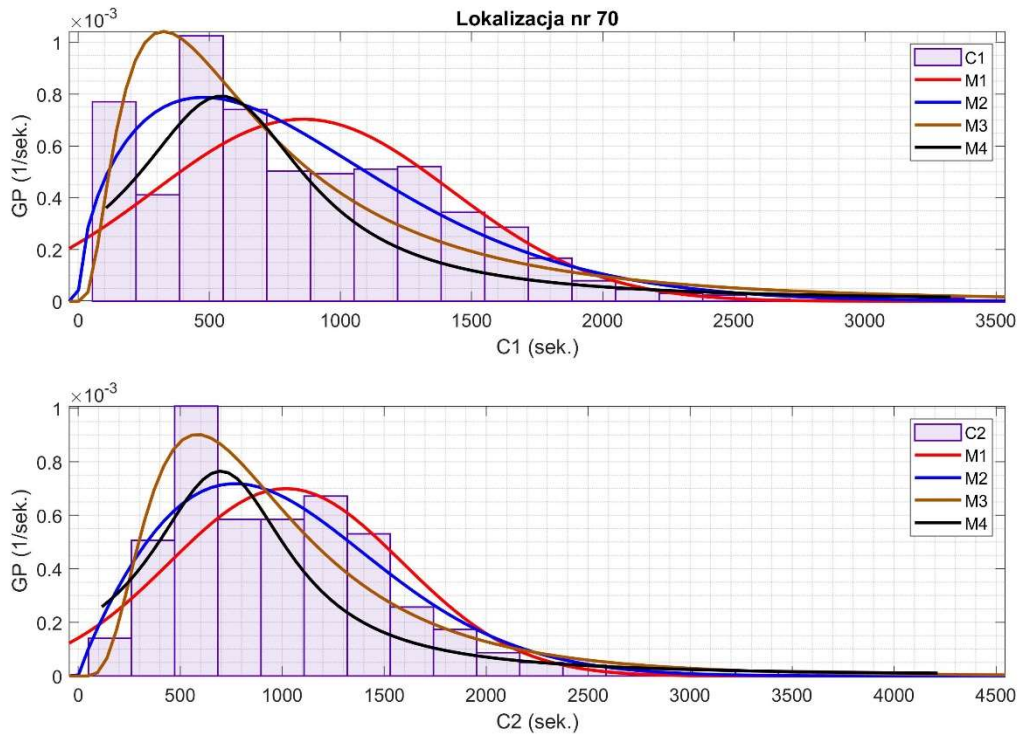
Rys. 62 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 67 wraz z dopasowaniem modeli.



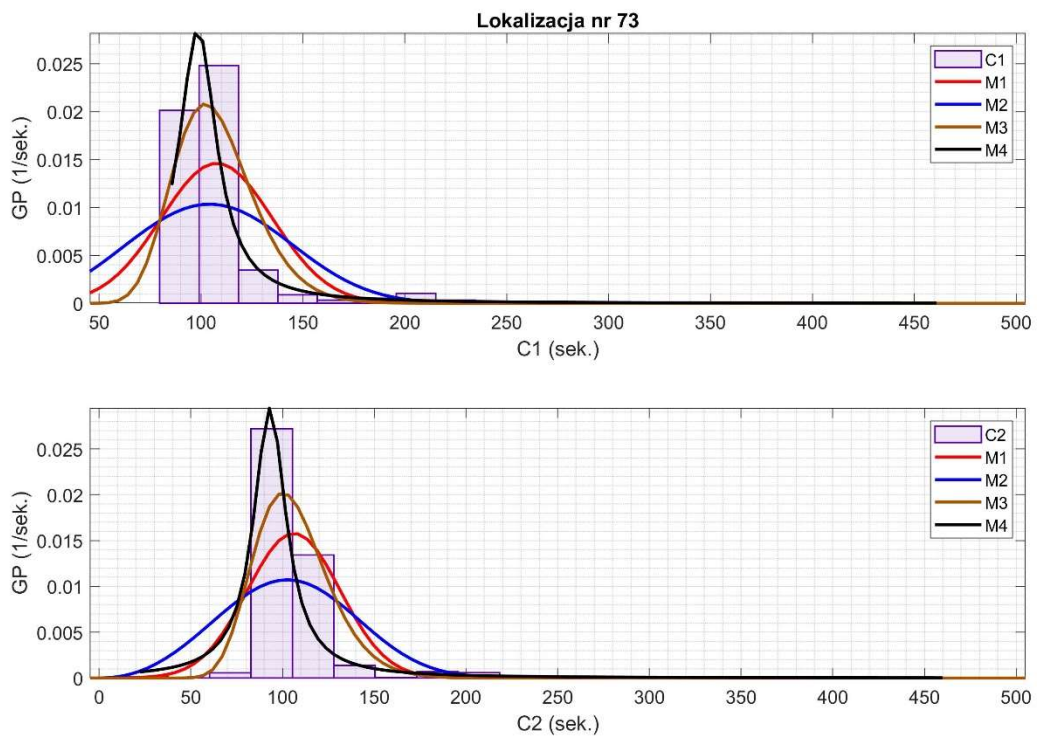
Rys. 63 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 68 wraz z dopasowaniem modeli.



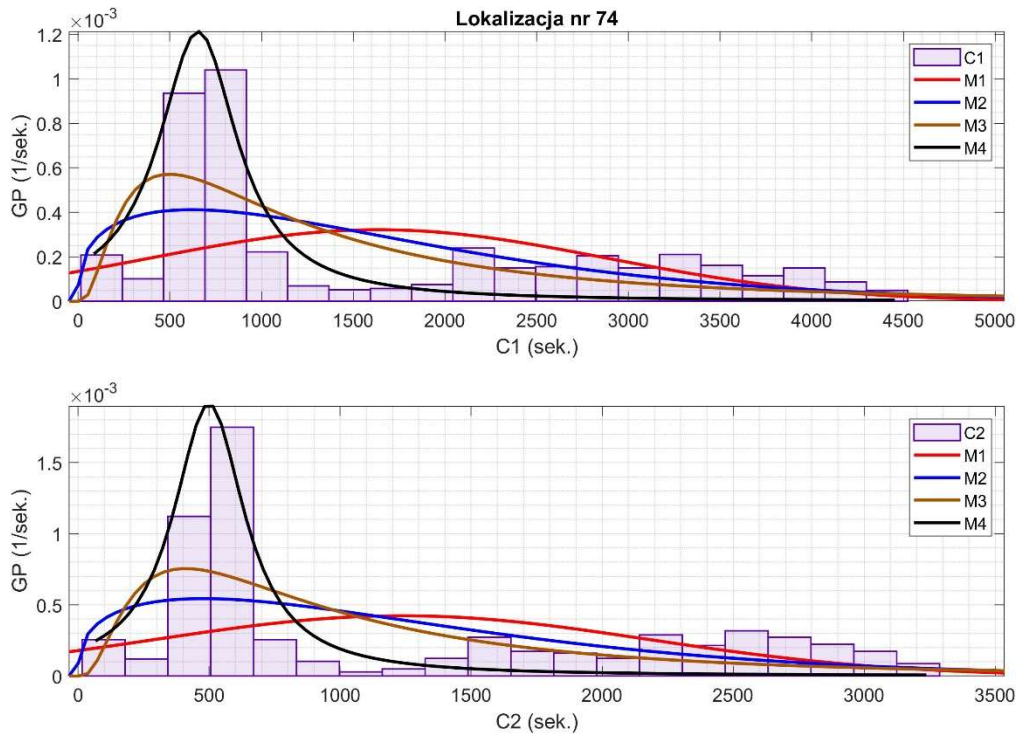
Rys.64 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 69 wraz z dopasowaniem modeli.



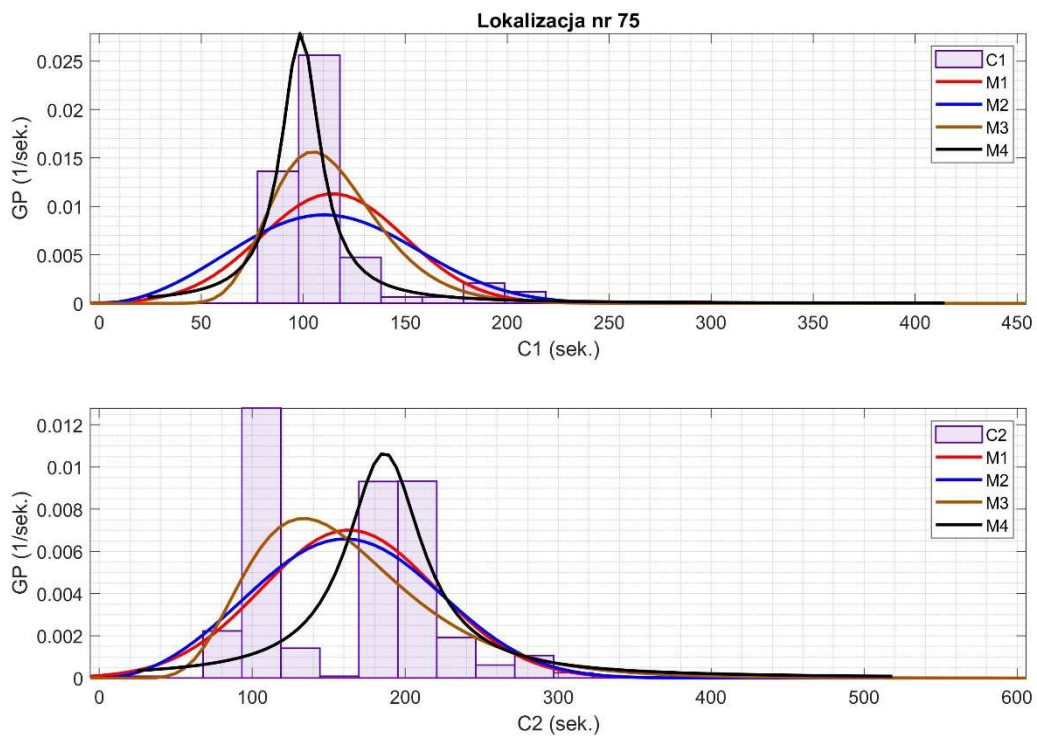
Rys. 65 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 70 wraz z dopasowaniem modeli.



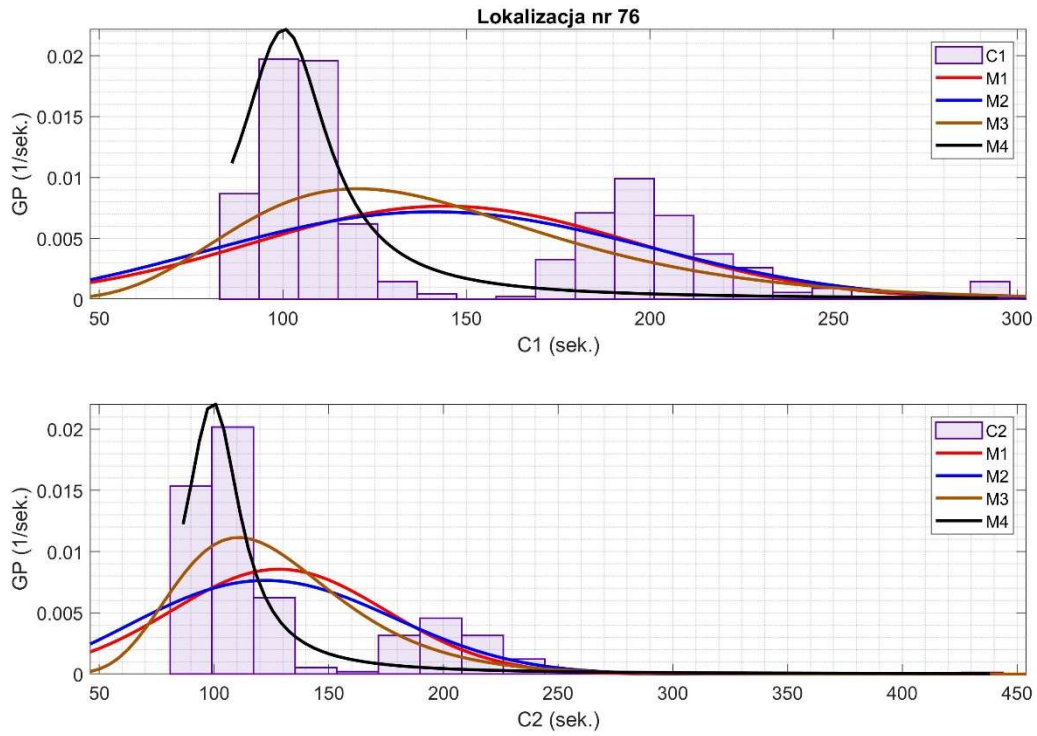
Rys. 66 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 73 wraz z dopasowaniem modeli.



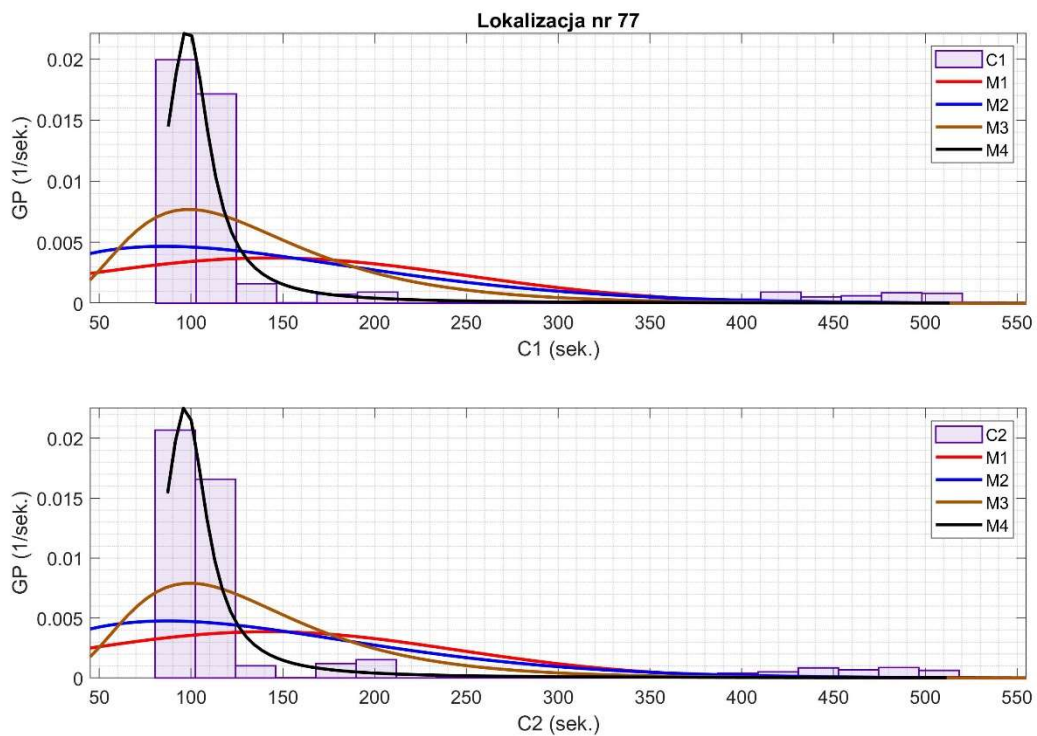
Rys. 67 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 74 wraz z dopasowaniem modeli.



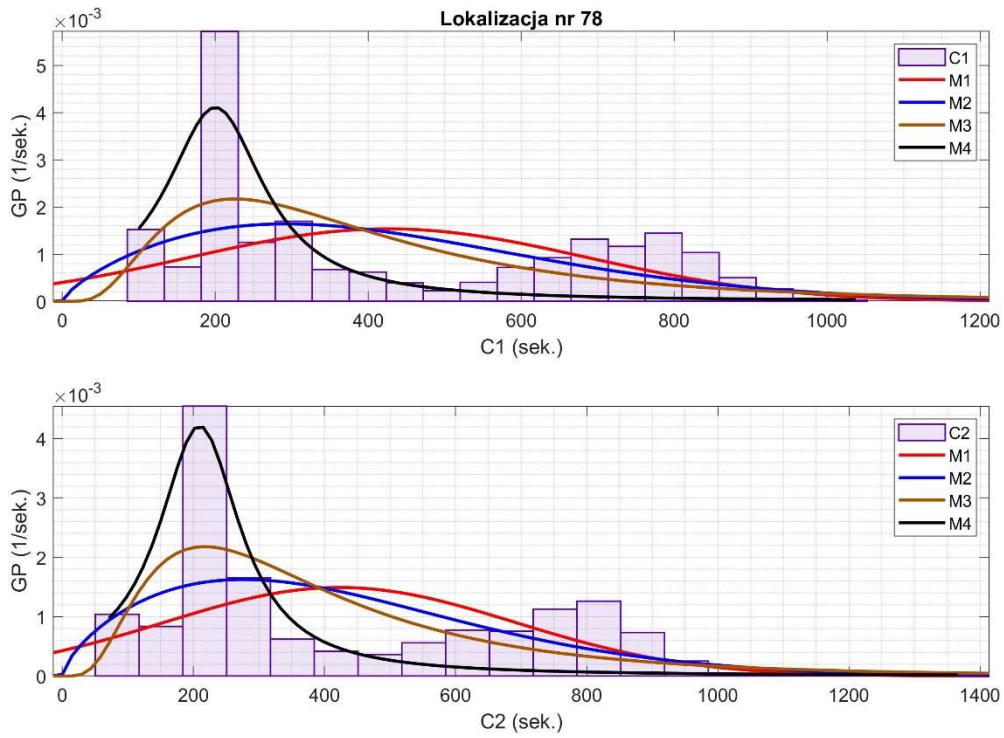
Rys. 68 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 75 wraz z dopasowaniem modeli.



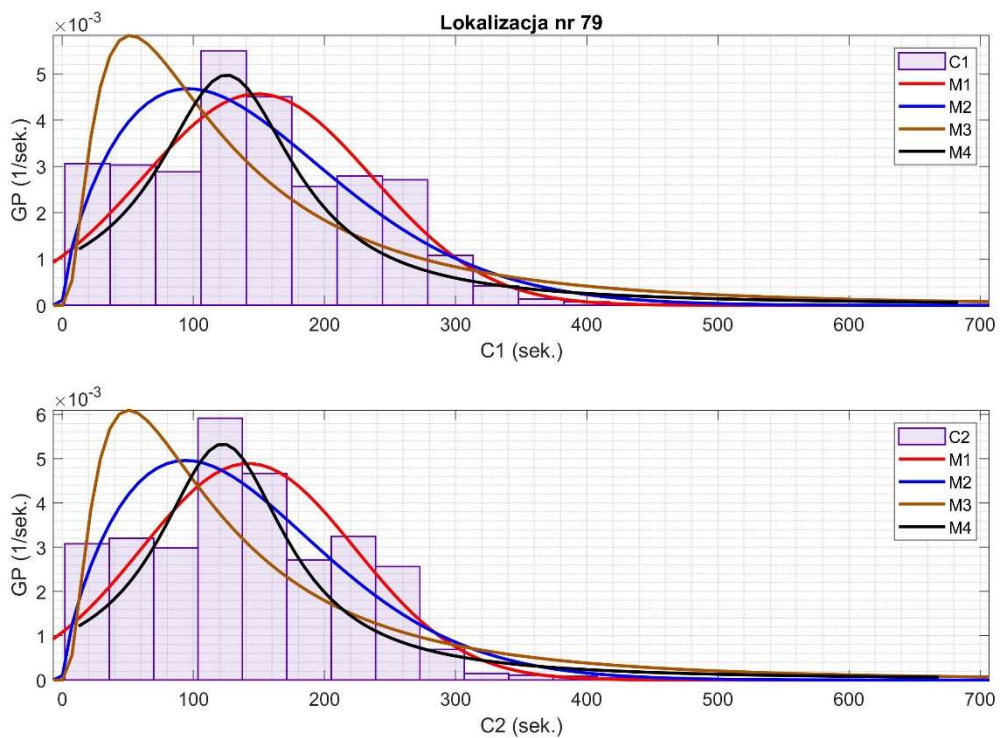
Rys. 69 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 76 wraz z dopasowaniem modeli.



Rys. 70 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 77 wraz z dopasowaniem modeli.



Rys. 71 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 78 wraz z dopasowaniem modeli.



Rys. 72 Histogramy obliczone dla czasów pracy C1 (u góry) i C2 (na dole) zarejestrowanych w lokalizacji nr 79 wraz z dopasowaniem modeli.