



Stowarzyszenie Krakowski Alarm Smogowy

Podsumowanie wyników badań porównawczych urządzeń niskokosztowych do pomiaru stężenia pyłu zawieszonego.

Poniższe opracowanie ma charakter wstępu do szerszych sprawozdań wymienionych w bibliografii. Zachęcamy czytelników do zapoznania się z wyżej wymienionymi opracowaniami w całości. Ze względu na ograniczony charakter tego opracowania autorzy nie byli w stanie zawrzeć wszystkich wyników dostępnych w powyższych sprawozdaniach.

Opracowali: **Damian Zięba, Anna Dworakowska.**

Kraków, wrzesień 2018.

Działanie realizowane w ramach projektu „Wdrażanie Programu ochrony powietrza dla województwa małopolskiego – Małopolska w zdrowej atmosferze” LIFE14 IPE PL 021/LIFE IP MAŁOPOLSKA. Raport przedstawia wyłącznie poglądy autorów, a Komisja Europejska nie ponosi odpowiedzialności za żadne ewentualne wykorzystanie zawartych w nim informacji.

Spis treści

1	Wstęp	3
2	Metodyka badań	4
2.1	Przebieg pomiarów porównawczych	4
2.2	Urządzenia referencyjne zastosowane w czasie pomiarów	5
3	Analiza wyników pomiarów	6
3.1	Kompletność danych	7
3.2	Rozbieżność wyników pomiędzy czujnikami uczestnika	8
3.3	Zgodność badanych urządzeń z metodą referencyjną	12
3.3.1	Stężenie średnie	12
3.3.2	Rozszerzona niepewność względna pomiaru	14
3.4	Współczynniki kalibracyjne	17
3.5	Stabilność wskazań urządzeń w czasie	17
3.6	Wpływ wilgotności na wskazania urządzeń	18
4	Podsumowanie	19
	Bibliografia	22
	Spis rysunków	23
	Spis tabel	24
A	Zalecenia dotyczące lokalizacji czujników niskokosztowych	25
B	Wartości średniodobowe względem metody referencyjnej - I edycja badań	27
C	Wartości średniodobowe względem metody referencyjnej - II edycja badań	33

Rozdział 1

Wstęp

Rosnąca popularność czujników niskokosztowych służących do pomiaru stężenia pyłu zawieszonego przy jednoczesnym braku jakiegokolwiek metody weryfikacji jakości wyniku pomiaru spowodowała zawiązanie w latach 2017 i 2018 porozumienia pomiędzy: władzami Województwa Małopolskiego, Głównym Inspektoratem Ochrony Środowiska, Akademią Górniczo-Hutniczą im. Stanisława Staszica w Krakowie, Gminą Rabka-Zdrój, Gminą Dobczyce oraz Stowarzyszeniem Krakowski Alarm Smogowy. Owocem porozumienia były dwie edycje pomiarów porównawczych czujników niskokosztowych z metodą referencyjną. Pomiary miały na celu weryfikację oraz ocenę wiarygodności dostępnych niskokosztowych urządzeń pomiarowych.

Poniższe opracowanie jest podsumowaniem dwóch sprawozdań powstałych po zakończeniu pomiarów porównawczych. Należy zwrócić uwagę czytelnika, że prezentowane wyniki są inną formą przedstawienia wyników zaprezentowanych w sprawozdaniach z obu edycji pomiarów [1] i [2]. Opracowanie powinno być traktowane jako wstęp oraz skrót wyżej wymienionych raportów.

Wyniki pomiarów zostały przeanalizowane zgodnie z metodyką stosowaną podczas wykazywania równoważności z metodą referencyjną. Sprawozdania wyżej wymienione jednak nie mają charakteru wykazania równoważności względem metody referencyjnej.

Głównymi celami opracowania są:

- ocena wiarygodności czujników niskokosztowych,
- ustalenie ich przydatności do oznaczania jakości powietrza,
- określenie przydatności do celów informacyjnych lub edukacyjnych,
- przedstawienie wskazówek dla potencjalnych nabywców.

Rozdział 2

Metodyka badań

2.1 Przebieg pomiarów porównawczych

Pomiary porównawcze były przeprowadzone w dwóch edycjach. Pierwsza edycja była przeprowadzona w okresie 15.02.2017-20.06.2017 w Rabce-Zdroju, a druga w okresie 1.12.2017-15.03.2018 w Dobczycach. Udział w pomiarach był dobrowolny. Każdy z uczestników dostarczył na miejsce przeprowadzania pomiarów dwa egzemplarze czujników. Czujniki zostały zamontowane przez uczestników pod nadzorem pracownika Krajowego Laboratorium Referencyjnego i Wzorcującego Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska (KLRIW GIOŚ). Obowiązkiem uczestników było wysyłanie co godzinę średniej wartości stężenia pyłu zawieszonego PM10 i PM2.5 (o ile było mierzone) z każdej godziny. Dodatkowo raz na dobę uczestnik przysyłał średnie wartości stężenia dla danej doby bez możliwości korekty. Na terenie badań KLRIW GIOŚ zainstalował niskoobjętościowe poborniki pyłu w celu określenia za pomocą metody referencyjnej¹ stężeń średniodobowych dla pyłu PM10 oraz PM2.5². KLRIW GIOŚ zainstalowało dodatkowo na terenie badań analizator stężenia pyłu BAM-1020³ w celu pomiaru stężenia z rozdzielczością 1h. W bezpośrednim sąsiedztwie miejsc badań nie znajdowały się żadne urządzenia referencyjne lub równoważne urządzeniom referencyjnym, poza urządzeniami KLRIW GIOŚ, z których dane nie były dostępne dla uczestników.

Każdy z uczestników w czasie badania zainstalował na terenie badań po jednym zestawie składającym się z dwóch czujników. Wyjątkiem była firma Airly w drugiej edycji badań, która dostarczyła dwa zestawy po dwa czujniki, w dalszej części opracowania oznaczone literami "A" oraz "B".

W pierwszej edycji pomiarów wzięło udział 5 podmiotów (kolejność alfabetyczna):

- Elkomp Jacek Kędziola,
- Envimet Services sp. z o.o.,
- Politechnika Warszawska (Artur Badyda, Bogdan Dziadak, Mariusz Rogulski),
- Solutions for Technology sp. z o.o.,
- Tetatbit sp. z o.o.

¹Metoda referencyjna polega na pomiarze różnicy masy między filtrem przed i po ekspozycji. Ekspozycją nazywamy wymuszenie przepływu powietrza przez filtr. Wartość stężenia jest określana poprzez podzielenie masy zdeponowanego pyłu na filtrze przez łączną objętość powietrza jaka została przepompowana przez filtr. Pomiar masy wykonuje się w warunkach laboratoryjnych zgodnie z normą PN-EN 12341.

²Pomiar stężenia PM2.5 był prowadzony tylko dla drugiej edycji badań.

³Pomiar stężenia oparty na absorpcji promieniowania beta. Urządzenie posiada wykazaną równoważność do metody referencyjnej.

W drugiej edycji pomiarów wzięło udział 7 podmiotów (kolejność alfabetyczna):

- Airly Sp. z o.o.,
- OMC Envag Sp. z o.o. ,
- Far Data Sp. z o.o. Spółka Komandytowa,
- Politechnika Warszawska (Artur Badyda, Bogdan Dziadak, Mariusz Rogulski),
- Tetatbit sp. z o.o.,
- Zakład Elektroniki Vidiaq,
- Xorbit.

Pełne dane adresowe znajdują się w sprawozdaniach z obu edycji pomiarów [1] i [2].

2.2 Urządzenia referencyjne zastosowane w czasie pomiarów

Wyniki pomiarów z czujników niskokosztowych przekazanych do testów zostały zestawione z wynikami z urządzeń zamontowanych w tym samym miejscu co analizowane czujniki. Wyniki z urządzeń referencyjnych i posiadających wykazaną równoważność do metodyki referencyjnej, nie były dostępne w trakcie kampanii pomiarowej dla firm biorących udział w badaniu. Stężenia średniodobowe PM10 oraz PM2.5 zostały dostarczone przez Krajowe Laboratorium Referencyjne i Wzorcujące Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska (KLRIW GIOŚ) w wyniku pomiaru metodą grawimetryczną, która jest metodą referencyjną pomiaru stężenia pyłów zawieszonych PM10 i PM2.5. Stężenia średniogodzinne dla pyłu PM10 były porównywane względem wyników z urządzenia BAM-1020. Wyniki pomiarów z urządzenia BAM-1020 zostały zweryfikowane po zakończeniu badań w oparciu o metodę referencyjną.

W pierwszej edycji przeprowadzono porównanie ze względu na stężenia frakcji PM10. W drugiej edycji wprowadzono dodatkowo pomiar referencyjny stężenia średniodobowego dla frakcji PM2.5.

Rozdział 3

Analiza wyników pomiarów

Ze względu na różne warunki w jakich były prowadzone obie edycje badań nie ma możliwości porównywania wprost wyników z poszczególnych edycji. Pierwsza edycja badań rozpoczęła się pod koniec okresu zimowego i charakteryzowała się znacznie niższymi średnimi stężeniami w stosunku do drugiej edycji. Wobec tego uczestnicy pierwszej edycji byłiby w uprzywilejowanej sytuacji pomiarowej w stosunku do uczestników drugiej edycji. Druga edycja dzięki bardziej zróżnicowanym warunkom pod względem stężeń oraz dużej ilości dni o średniej dobowej powyżej $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dała możliwość sprawdzenia urządzeń dla warunków typowych pod względem stężeń dla Polski w okresie jesienno-zimowym.

W tej części raportu jak również w sprawozdaniach [1] i [2] pojawiać się będzie często informacja dotycząca kalibracji danych pomiarowych. Dane dostarczone przez uczestników pomiarów zostały porównane z metodą referencyjną wprost, jak również została dokonana kalibracja względem metody referencyjnej przez autorów sprawozdań. Procedura taka jest wykonywana przez laboratoria pracujące w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska (PMŚ), w celu weryfikacji wskazań urządzeń, które są wykorzystywane w monitoringu do określania stężenia pyłu z rozdzielczością 1h. Aby taka procedura była jednak możliwa, w bezpośrednim sąsiedztwie urządzenia podlegającego kalibracji powinna być równolegle używana metoda grawimetryczna. Brak pobornika przy urządzeniu weryfikowanym wyklucza możliwość wykonania poprawnej kalibracji. Należy również zaznaczyć, że stosowanie weryfikacji wyników poprzez kalibrację względem stacji PMŚ, w oparciu o wyniki z urządzenia zamontowanego w jego sąsiedztwie nie daje 100 % pewności, że pozostałe czujniki producenta będą się tak samo zachowywały. Nawet jeśli urządzenia wstępnie były dobrze skalibrowane względem siebie przez producenta, to nie można wykluczyć, że poszczególne urządzenia w wyniku zabrudzenia lub zużycia podzespołów będą utrzymywać swoje parametry względem siebie w czasie. Biorąc pod uwagę powyższe, czytelnik powinien w pierwszej kolejności zwracać uwagę na wyniki dla danych nie kalibrowanych przez autorów sprawozdań, ponieważ w większości wypadków są to wartości dostarczane przez producentów. Natomiast dane przedstawione po kalibracji dają informacje ile można z danego urządzenia uzyskać poprzez zastosowanie kalibracji. Należy zwrócić uwagę czytelnika, iż kalibracja względem metody referencyjnej nie oznacza, że urządzenie po procesie kalibracji będzie wskazywać wartości zgodne z metodą referencyjną. Dla części uczestników wartości generowane przez czujniki wykazywały zupełny brak korelacji wskazań z rzeczywistym stężeniem, co uniemożliwiało poprawną kalibrację.

W sprawozdaniach przeprowadzono analizę kilku parametrów świadczących o jakości czujników. W pierwszej kolejności przeprowadzono analizę kompletności danych (patrz podrozdział 3.1) oraz rozbieżności wyników między czujnikami dostarczonymi przez tego samego dostawcę (każdy z producentów dostarczył po 2 egzemplarze czujników), patrz podrozdział 3.2.

Podrozdział 3.3 został poświęcony zgodności danych pomiarowych dostarczonych przez producentów z danymi referencyjnymi. W pierwszej kolejności porównano średnie z całego okresu

pomiarowego uzyskane z analizowanych czujników z urządzeniem referencyjnym. Niepewność pomiaru poszczególnych czujników przed i po kalibracji została przedstawiona w sekcji 3.3.2. Z punktu widzenia oceny wiarygodności wyników pomiarów prezentowanych przez urządzenia, parametr ten jest najistotniejszy.

W podrozdziale 3.4 przedstawiono współczynniki kalibracyjne jakim należało poddać dane, aby uzyskać najlepsze możliwe dopasowanie do danych referencyjnych dla całego okresu badań. Wyniki pomiaru średniodobowych przed i po kalibracji można porównać wizualnie w załącznikach B i C.

Podrozdział 3.5 analizuje stabilność współczynników kalibracyjnych w czasie trwania drugiej edycji pomiarów. Dla pierwszej edycji nie była możliwa ta procedura ze względu na zbyt krótki czas badań oraz niskie stężenia pyłu.

W podrozdziale 3.6 przedstawiono wyniki badań dotyczących wpływu wilgotności powietrza na pomiar stężenia przez czujniki niskokosztowe.

3.1 Kompletność danych

Tab. 3.1 obrazuje ilość dni w jakich uczestnicy raportowali średniodobowe wartości do bazy danych. Wartości przedstawione w tabeli informują jedynie, czy dane zostały przesłane do bazy danych. Wartości podane poniżej nie świadczą o tym, czy urządzenie dokonywało pomiaru. Jeśli uczestnik nie przesłał danych w wyznaczonym przez regulamin czasie, nie mógł ich przesłać w późniejszym terminie.

Tabela 3.1: Zestawienie ilości dni, w których uczestnik przysyłał średniodobowe wartości stężenia do bazy danych z obu czujników. P - oznacza łączny czas trwania pomiarów (wzięto pod uwagę pierwszy dzień, w którym uczestnik dokonał pierwszego transferu danych). N - Liczba średniodobowych wartości pochodzących z obu urządzeń uczestnika. Opracowano na podstawie sprawozdań [1] i [2].

Dostawca	P _{PM10}	N _{PM10}	P _{PM2.5}	N _{PM2.5}
Pierwsza edycja				
Elkomp	123	123	-	-
Envimet	121	62	-	-
PW	121	112	-	-
S4Tech	122	110	-	-
Tetabit	121	61	-	-
Druga edycja				
Airly _A	99	86	99	86
Airly _B	99	86	99	86
Envag	99	93	99	93
Far Data	94	90	94	90
PW	84	76	-	-
Tetabit	99	68	99	69
Vidiaq	99	76	99	76
Xorbit	99	60	99	60

3.2 Rozbieżność wyników pomiędzy dwoma czujnikami danego uczestnika

W tej części opracowania, na podstawie danych surowych dostarczonych przez producentów, zostały wyznaczone wartości niepewności dla dwóch czujników tego samego producenta (proces ten był przeprowadzony bez kalibracji danych przez autorów względem metody referencyjnej). Parametry niepewności wskazań pomiędzy dwoma czujnikami danego uczestnika dają informację na temat zgodności wyników pomiędzy dwoma urządzeniami danego producenta. Poniższe zestawienie bierze pod uwagę niepewność dla wartości średniodobowej. Wartości chwilowe i średniogodzinne są obarczone większą niepewnością. Zwracamy uwagę czytelnika, że parametr ten nie świadczy o tym, jak urządzenie zachowuje się względem wartości prawdziwej (referencyjnej). Jest to jedynie parametr odzwierciedlający zgodność wyników pomiaru między dwoma takimi samymi czujnikami danej firmy.

Na Rys. 3.1 przedstawiono zestawienie uczestników pierwszej edycji badań pod kątem niepewności pomiaru dla wartości średniodobowych PM10 pomiędzy dwoma urządzeniami tego samego uczestnika dla całego okresu prowadzenia pomiarów. W celu zobrazowania zachowania się urządzeń dla wyższych stężeń dokonano podobnego zestawienia dla zbioru danych z wykluczeniem¹ wartości średniodobowych poniżej wartości $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Wyniki zestawienia dla tego zakresu pomiarowego zostały przedstawione na Rys. 3.2. Analogiczne dane dla drugiej edycji badań pokazują Rys. 3.3 oraz Rys. 3.4. Natomiast Rys. 3.5 oraz Rys. 3.6 przedstawiają dane dla pomiaru PM2.5.

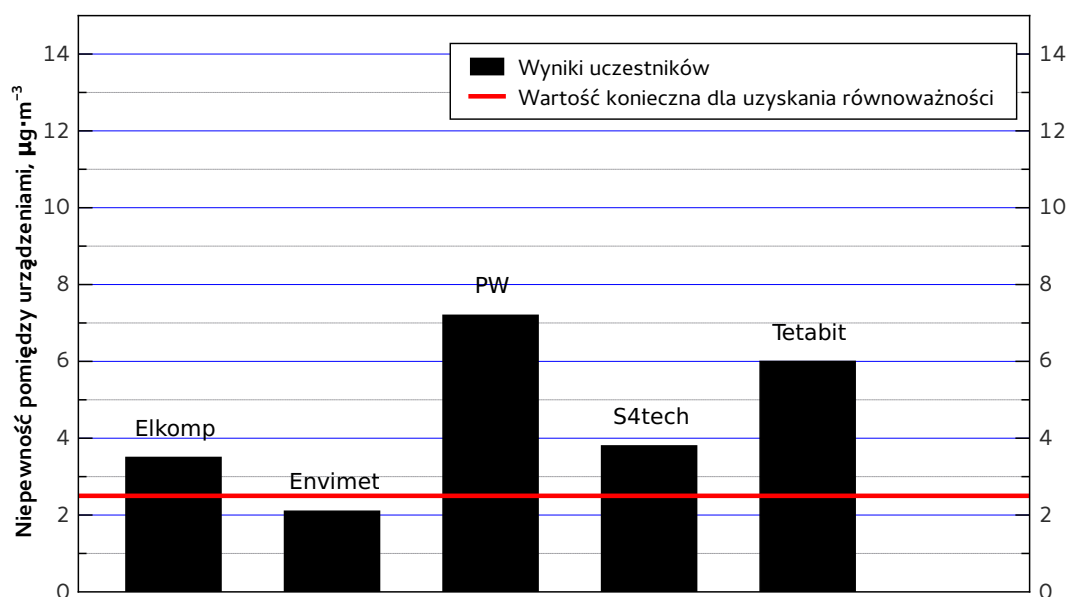
Wartość prezentowanych parametrów świadczy o tym, jak uczestnik skalibrował względem siebie oba urządzenia. Im niższa wartość tym stopień skalibrowania urządzeń ze sobą jest wyższy. Duży wzrost wartości tego parametru dla zakresu wysokich stężeń świadczy o tym, że urządzenia różnią się coraz bardziej między sobą, w miarę jak mierzone wartości stają się większe.

W pierwszej edycji badań najniższą wartość niepewności pomiędzy urządzeniami uzyskała firma Envimet. Wartość niepewności pomiędzy urządzeniami wyniosła $2,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dla podzbioru danych z wartościami średniodobowymi powyżej wartości $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ najniższą wartość uzyskała firma Tetabit ($2,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

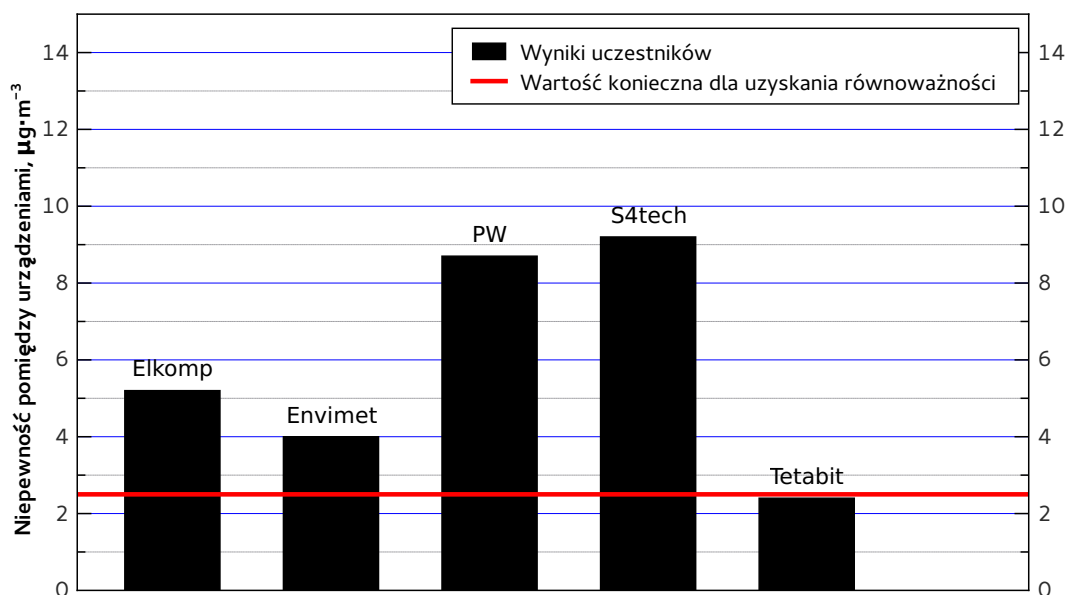
W przypadku drugiej edycji badań najlepszy wynik w przypadku pomiaru stężenia PM10 uzyskała firma Xorbit (wartość $4,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Dla zakresu wysokich stężeń najniższą wartość odnotowała również firma Xorbit ($4,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Analogicznie dla frakcji PM2.5 najlepiej wypadła firma Airly dla zestawu A czujników², gdzie wartość niepewności wyniosła ($2,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Dla zakresu wysokich stężeń również najlepszy rezultat uzyskała firma Airly z zestawem A (wartość $2,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

¹O wykluczeniu danych pomiarowych w tej części nie decydowała wartość referencyjna lecz wartość zmierzona przez uczestnika. Oba urządzenia musiały zanotować wartość większą od $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aby były brane pod uwagę przy wyznaczaniu niepewności dla wysokich stężeń.

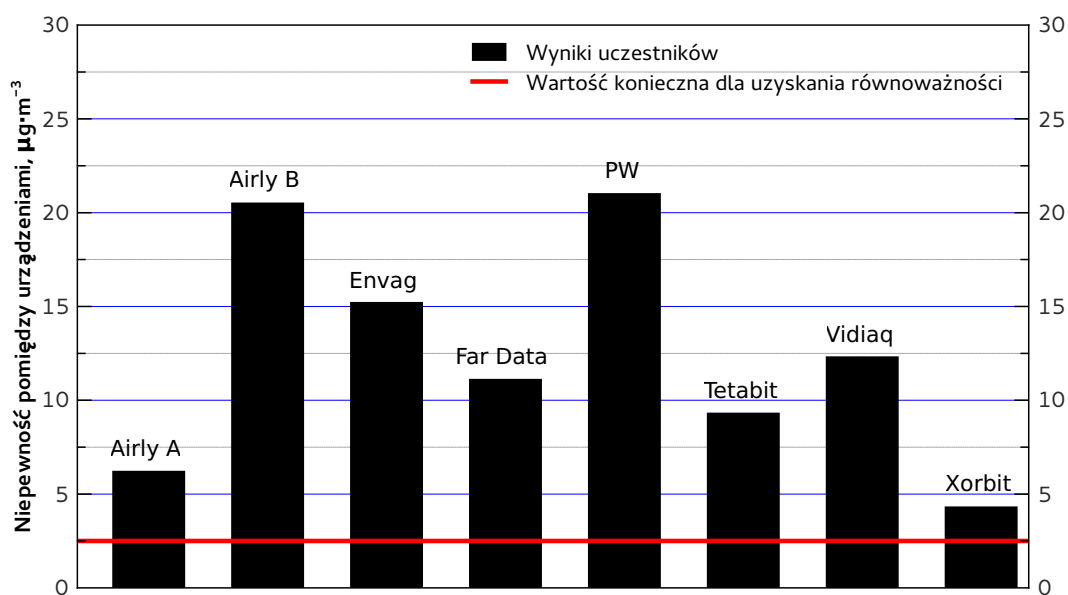
²Zestaw B tej firmy miał wartość tego parametru znacznie gorszą.



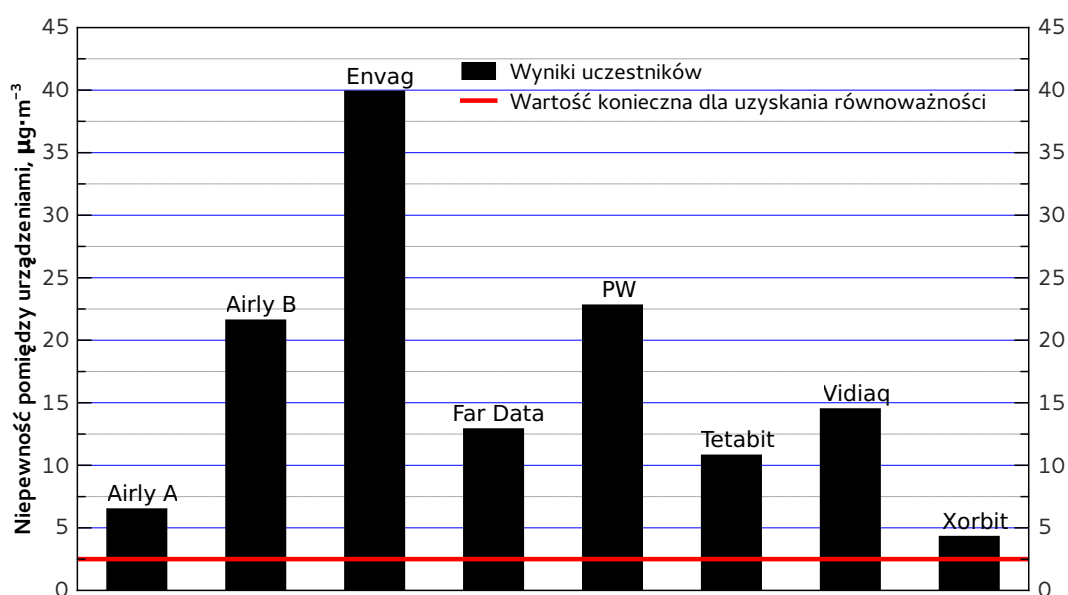
Rysunek 3.1: I Edycja: niepewność wskazań średniodobowych stężenia pyłu **PM10** pomiędzy dwoma urządzeniami danego uczestnika dla całego okresu badań. Czerwoną linią zaznaczono poziom, którego urządzenia starające się o ustanowienie równoważności nie mogą przekroczyć. Opracowano na podstawie sprawozdania [1].



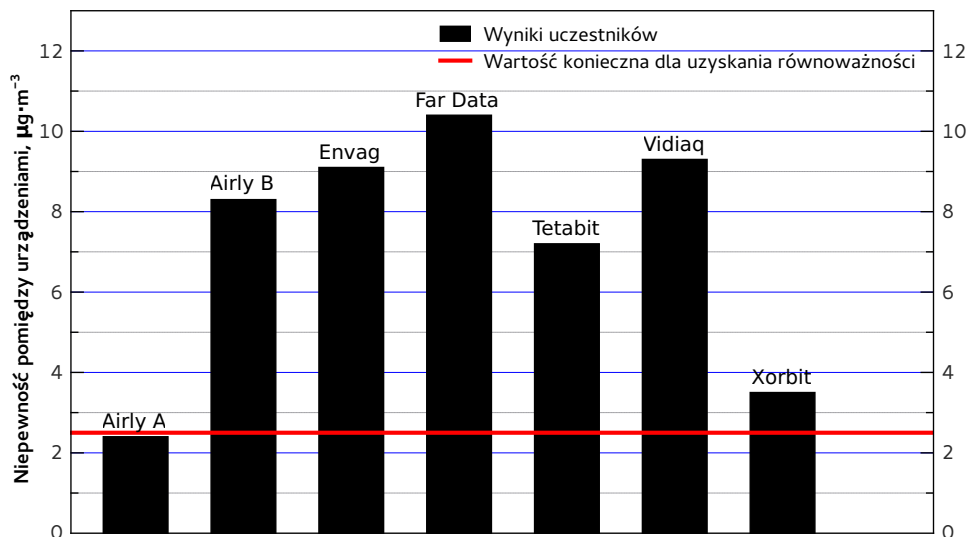
Rysunek 3.2: I Edycja: niepewność wskazań średniodobowych stężenia pyłu **PM10** pomiędzy dwoma urządzeniami danego uczestnika dla całego okresu badań z wyłączeniem wartości średniodobowych mniejszych niż $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Czerwoną linią zaznaczono poziom, którego urządzenia starające się o ustanowienie równoważności nie mogą przekroczyć. Opracowano na podstawie sprawozdania [1].



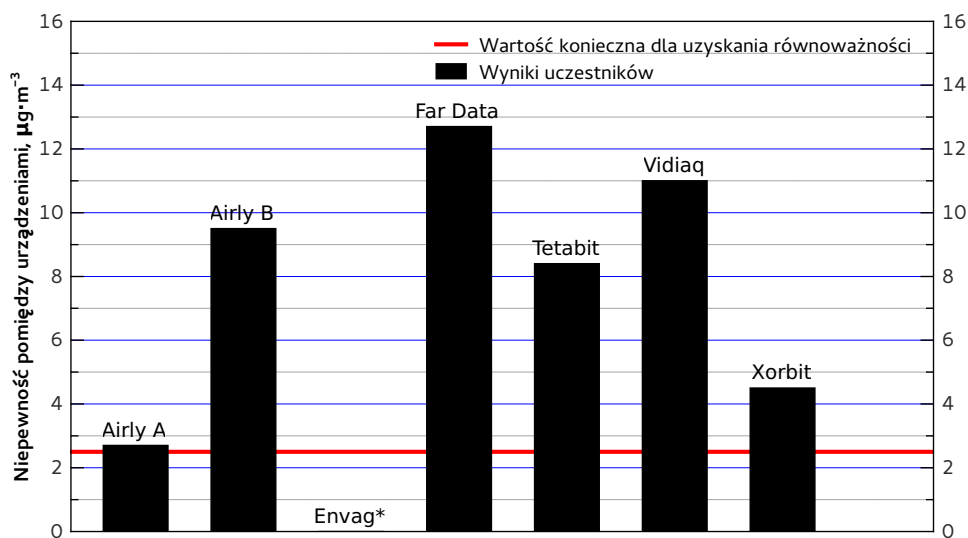
Rysunek 3.3: II Edycja: niepewność wskazań średniodobowych stężenia pyłu **PM10** pomiędzy dwoma urządzeniami danego uczestnika dla całego okresu badań. Czerwoną linią zaznaczono poziom, którego urządzenia starające się o ustanowienie równoważności nie mogą przekroczyć. Opracowano na podstawie sprawozdania [2].



Rysunek 3.4: II Edycja: niepewność wskazań średnich dobowych stężenia pyłu **PM10** pomiędzy dwoma urządzeniami danego uczestnika dla całego okresu badań z wyłączeniem wartości średniodobowych mniejszych niż $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Czerwoną linią zaznaczono poziom, którego urządzenia starające się o ustanowienie równoważności nie mogą przekroczyć. Opracowano na podstawie sprawozdania [2].



Rysunek 3.5: II Edycja: niepewność wskazań średniodobowych stężenia pyłu **PM2.5** pomiędzy dwoma urządzeniami danego uczestnika dla całego okresu badań. Czerwoną linią zaznaczono poziom, którego urządzenia starające się o ustanowienie równoważności nie mogą przekroczyć. Politechnika Warszawska nie została ujęta w zestawieniu ze względu na brak wyników z urządzeń tego uczestnika dla frakcji PM2.5. Opracowano na podstawie sprawozdania [2].



Rysunek 3.6: II Edycja: niepewność wskazań średniodobowych stężenia pyłu **PM2.5** pomiędzy dwoma urządzeniami danego uczestnika dla całego okresu badań z wyłączeniem wartości średniodobowych mniejszych niż $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Czerwoną linią zaznaczono poziom, którego urządzenia starające się o ustanowienie równoważności nie mogą przekroczyć. Politechnika Warszawska nie została ujęta w zestawieniu ze względu na brak wyników z urządzeń tego uczestnika dla frakcji PM2.5. *) Wartość 0 dla Envag wynika z tego, że urządzenia tego uczestnika nie raportowały wartości większych niż $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Opracowano na podstawie sprawozdania [2].

3.3 Zgodność badanych urządzeń z metodą referencyjną

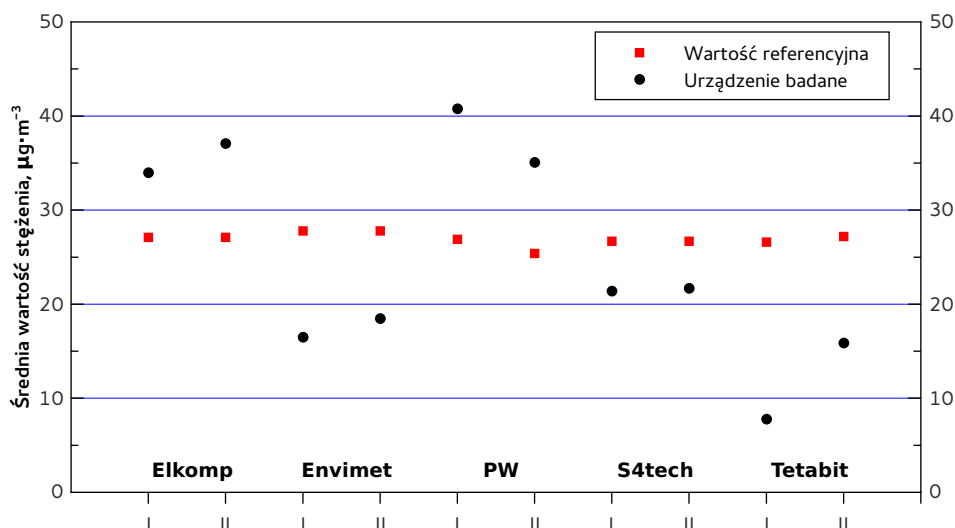
3.3.1 Stężenie średnie

Poniżej zostały zaprezentowane średnie wskazania urządzeń dla badanego okresu. Wyniki średnie dla badanych urządzeń zostały obliczone na podstawie wartości dostarczonych przez producentów. Możemy zaobserwować, że w pierwszej edycji pomiarów różnice między wartością referencyjną a mierzoną przez urządzenie są mniejsze niż podczas drugiej edycji. Jest to najprawdopodobniej związane z tym, że w przypadku urządzeń niepoprawnie skalibrowanych lub słabej jakości różnice są większe dla wyższych stężeń. Wyniki przedstawione w tej części pokazują jedynie uśredniony wynik pomiaru dla całego okresu badań. Nie należy interpretować tego wyniku jako współczynnika kalibracyjnego. Wartość średnia dwukrotnie większa, nie oznacza, że urządzenie w każdych warunkach będzie dwukrotnie zawyżało wynik pomiaru. Parametr ten można interpretować jako formę oceny poprawności działania urządzenia oraz poprawności kalibracji wykonanej przez producenta.

Na Rys. 3.7 zostały porównane wartości średnie rejestrowane podczas pierwszej edycji badań przez poszczególne urządzenia uczestników z wartościami średnimi z urządzenia referencyjnego dla całego okresu pomiarowego³ Na Rys. 3.8 podano wyniki dla drugiej edycji badań dla urządzeń mierzących stężenie PM₁₀. Rys. 3.9 prezentuje analogiczne dane dla frakcji PM_{2.5}.

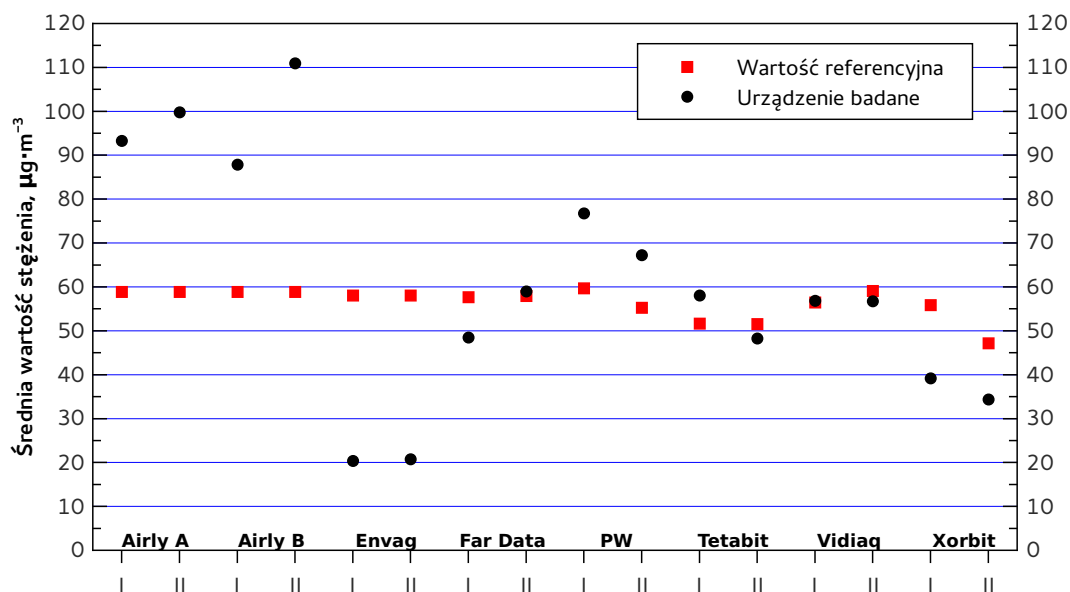
W pierwszej edycji badań najmniejszą różnicę w stosunku do metody referencyjnej wykazała się firma S4Tech. W drugiej edycji, w przypadku stężenia średniego PM₁₀ dla całego okresu, najlepiej wypadła firma Vidiaq. Natomiast dla frakcji PM_{2.5} firma Airly.

Proszę zwrócić uwagę, że pokrycie się wartości średniej nie zawsze przekłada się na niepewność pomiaru. Urządzenia firmy Vidiaq (oba urządzenia, pomiar PM₁₀) oraz Airly zestaw B (urządzenie I, pomiar PM_{2.5}) wyznaczyły wartości średnie bardzo bliskie wartości uzyskanej za pomocą metody referencyjnej, natomiast względna niepewność rozszerzona w ich przypadku była większa od urządzeń firm, które wyznaczyły średnie z mniejszą dokładnością (porównaj podrozdział 3.3.2).

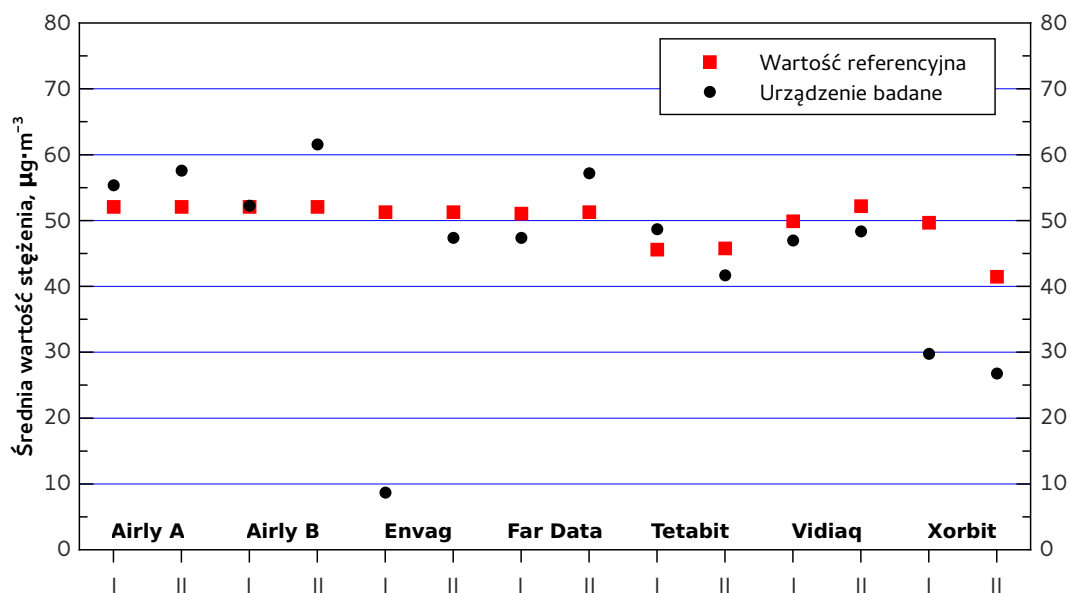


Rysunek 3.7: I Edycja: zestawienie wartości średnich stężeń PM₁₀ dla badanych urządzeń z metodą referencyjną. Wartości średnie zostały obliczone dla każdego urządzenia przed kalibracją i porównane z wartością średnią w okresie, w którym urządzenie raportowało dane. Opracowano na podstawie sprawozdania [1].

³Poprzez okres pomiaru rozumiemy czas, w którym dane urządzenie raportowało dane do bazy danych. Poszczególne urządzenia mogą mieć inne poziomy odniesienia ze względu na brak pokrycia się zbioru dni, w których raportowały dane.



Rysunek 3.8: II Edycja: zestawienie wartości średnich stężeń **PM10** dla badanych urządzeń z metodą referencyjną. Wartości średnie zostały obliczone dla każdego urządzenia przed kalibracją i porównane z wartością średnią w okresie, w którym urządzenie raportowało dane. Opracowano na podstawie sprawozdania [2].



Rysunek 3.9: II Edycja: zestawienie wartości średnich stężeń **PM2.5** dla badanych urządzeń z metodą referencyjną. Wartości średnie zostały obliczone dla każdego urządzenia przed kalibracją i porównane z wartością średnią w okresie, w którym urządzenie raportowało dane. Opracowano na podstawie sprawozdania [2].

3.3.2 Rozszerzona niepewność względna pomiaru

W przyrodzie każdy pomiar wielkości fizycznej jest obarczony niepewnością wynikającą z pomiaru. W większości przypadków podanie wartości pomiaru bez określenia jego niepewności jest bezużyteczne. Niepewność pomiaru to podstawowa informacja, o którą powinniśmy pytać sprzedawcę urządzenia pomiarowego. Nie może być ona mylona z rozdzielczością pomiaru, stabilnością pomiaru czy chociażby z średnią różnicą między wartością prawdziwą i mierzoną.

W celu uproszczonego wyjaśnienia pojęcia niepewności oraz niepewności rozszerzonej posłużmy się następującym przykładem⁴. Dokonujemy pewnym urządzeniem 1000 pomiarów pewnej wielkości fizycznej, której wartość znamy. Założmy, że dla każdego pomiaru obliczyliśmy różnicę między wartością prawdziwą, a wynikiem pomiaru. Niepewnością standardową (w skrócie niepewnością) nazwiemy taką wartość wyżej wymienionej różnicy, która nie została przekroczona w przypadku 68 % pomiarów. Niepewnością rozszerzoną (dla $k=2$)⁵ nazywamy taką wartość różnicy, która nie została przekroczona w przypadku 95 % pomiarów. Znacząca część pomiarów różni się dużo mniej od wartości prawdziwej niż wartość niepewności. Nie znając jednak wartości prawdziwej powinniśmy się liczyć z tym, że każdy pomiar jest obarczony właśnie taką niepewnością. Producent podając wartość niepewności rozszerzonej daje nam swego rodzaju gwarancję, że dla przeważającej ilości przypadków wartość zmierzona urządzeniem nie będzie się różnić od wartości prawdziwej o więcej niż wskazana niepewność rozszerzona.

W dalszej części raportu pojawia się pojęcie względnej niepewności rozszerzonej. Jest to parametr, który uzyskujemy poprzez podzielenie niepewności rozszerzonej danego urządzenia przez wartość dopuszczalną. W przypadku pyłu PM10 wartością dopuszczalną jest $50\mu\text{g}/\text{m}^3$, natomiast dla pyłu PM2.5 w sprawozdaniu [2] przyjęto wartość dopuszczalną równą $25\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Dla celów zapewnienia dobrej jakości pomiaru stężenia pyłu zawieszonego przyjęto, że rozszerzona niepewność względna nie powinna przekraczać 25 %⁶. Oznacza to, że urządzenia mające równoważność z metodą referencyjną, w większości przypadków, nie będą się mylić w stosunku do faktycznej wartości stężenia średniodobowego o więcej niż $25\% \cdot 50\mu\text{g}/\text{m}^3 = 12,5\mu\text{g}/\text{m}^3$. Powyższe rozumowanie oznacza, że niepewność rozszerzona pomiaru średniej dobowej dla PM10 dla metody równoważnej z referencyjną nie jest gorsza niż $12,5\mu\text{g}/\text{m}^3$. W przypadku frakcji PM2.5 niepewność rozszerzona nie powinna być większa od $6,25\mu\text{g}/\text{m}^3$ (różnice te biorą się z innych poziomów dopuszczalnych dla poszczególnych frakcji). Analogicznie względna niepewność rozszerzona o wartości 100 % dla frakcji PM10 oznacza niepewność rozszerzoną pomiaru stężenia średniodobowego równą $50\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nie oznacza to, że każdy wynik pomiaru będzie różny od wartości rzeczywistej o $50\mu\text{g}/\text{m}^3$. Wśród zestawu danych pomiarowych mogą znaleźć się dni, gdy urządzenie odnotuje wartość różniącą się od wartości prawdziwej tylko o kilka $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Jednak nie znając wartości prawdziwej nie jesteśmy w stanie powiedzieć dla którego dnia taka sytuacja występuje.

Dalsza część raportu prezentuje porównanie wartości rozszerzonej niepewności względnej dla badanych urządzeń, w odniesieniu do wartości jaką narzuca się na metodę pomiarową zgodną z metodą referencyjną. Większość metod posiadających zgodność z metodą referencyjną może się pochwalić wynikiem dużo lepszym niż wskazany na rysunkach poziom 25 %. W przypadku pomiarów okresowych dopuszcza się zwiększenie wartości rozszerzonej niepewności względnej do poziomu 50% wartości docelowej, co zostało również zaznaczone na wykresach.

Na Rys. 3.10 przedstawiono zestawienie rozszerzonej niepewności względnej dla stężenia

⁴Dla uproszczenia zrezygnowano z podawania zależności matematycznych. Przykład ma na celu wyjaśnienie osobie pierwszy raz spotykającej się z pojęciem niepewności zrozumienie znaczenia tego parametru.

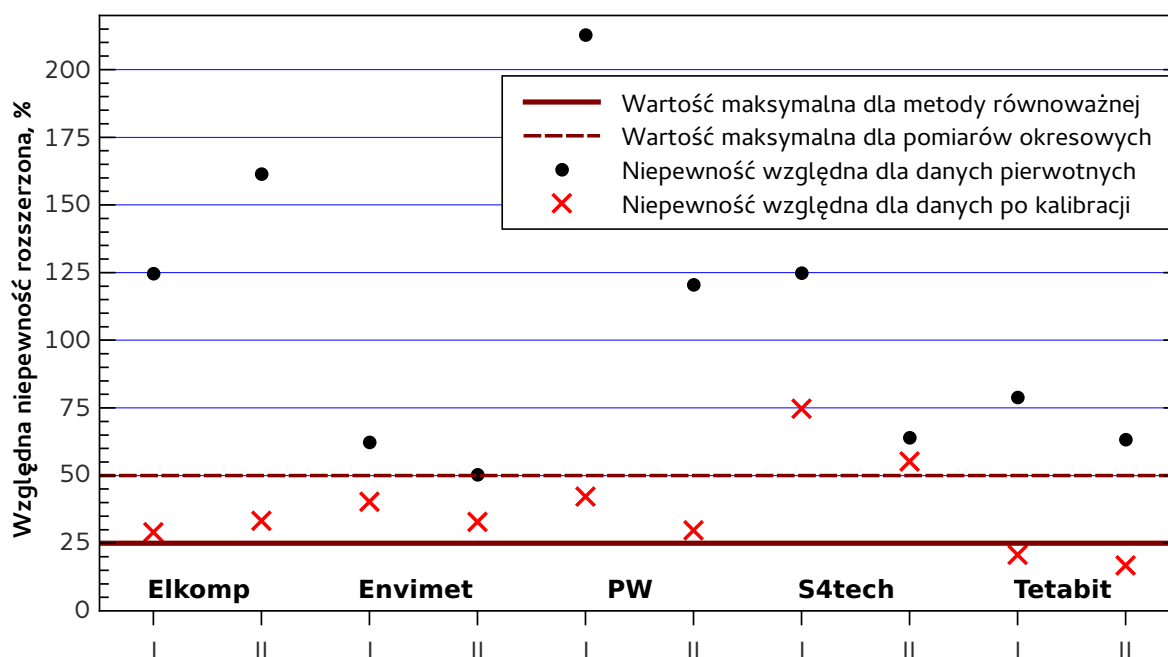
⁵Czynnik k określa stopień rozszerzenia niepewności standardowej. Wartość niepewności rozszerzonej otrzymujemy mnożąc wartość niepewności standardowej przez czynnik k .

⁶Wartość ta jest ustalona w załączniku nr 1 Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 czerwca 2018 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu (Dz.U. 2018 poz. 1119)

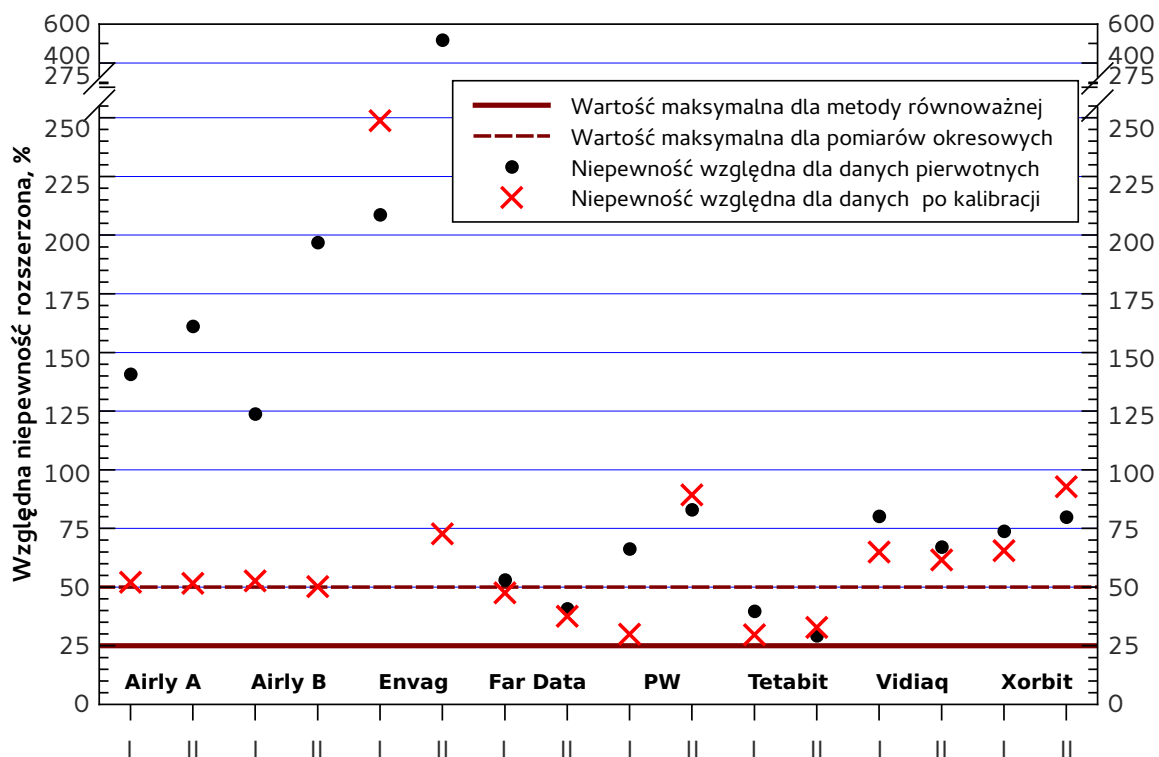
pyłu PM10 dla badanych urządzeń przed i po kalibracji w pierwszej edycji badań. Dla drugiej edycji badań zestawienie dla urządzeń mierzących frakcję PM10 zostało ujęte na Rys. 3.11, natomiast dla frakcji PM2.5 na Rys. 3.12. W zestawieniach ujęto niepewność względną pomiaru przed jak i po kalibracji wykonanej przez autorów sprawozdania. Istotna poprawa tego parametru dla danych skalibrowanych oznacza, że urządzenie było pierwotnie niepoprawnie skalibrowane. Wartość niepewności po kalibracji bierze pod uwagę dodatkowo niepewność związaną z dopasowaniem danych z czujników niskokosztowych do danych referencyjnych. Dla urządzeń, które wykazywały słabą zależność liniową z metodą referencyjną lub w przypadku zmiennych współczynników kalibracji w czasie[2], niepewność po kalibracji była niekiedy wyższa.

W pierwszej edycji badań najniższą wartość względnej niepewności rozszerzonej dla pierwotnych danych uzyskało urządzenie firmy Envimet (50,4 %). W przypadku danych kalibrowanych najlepszy wynik (16,8 %) osiągnęła firma Tetabit.

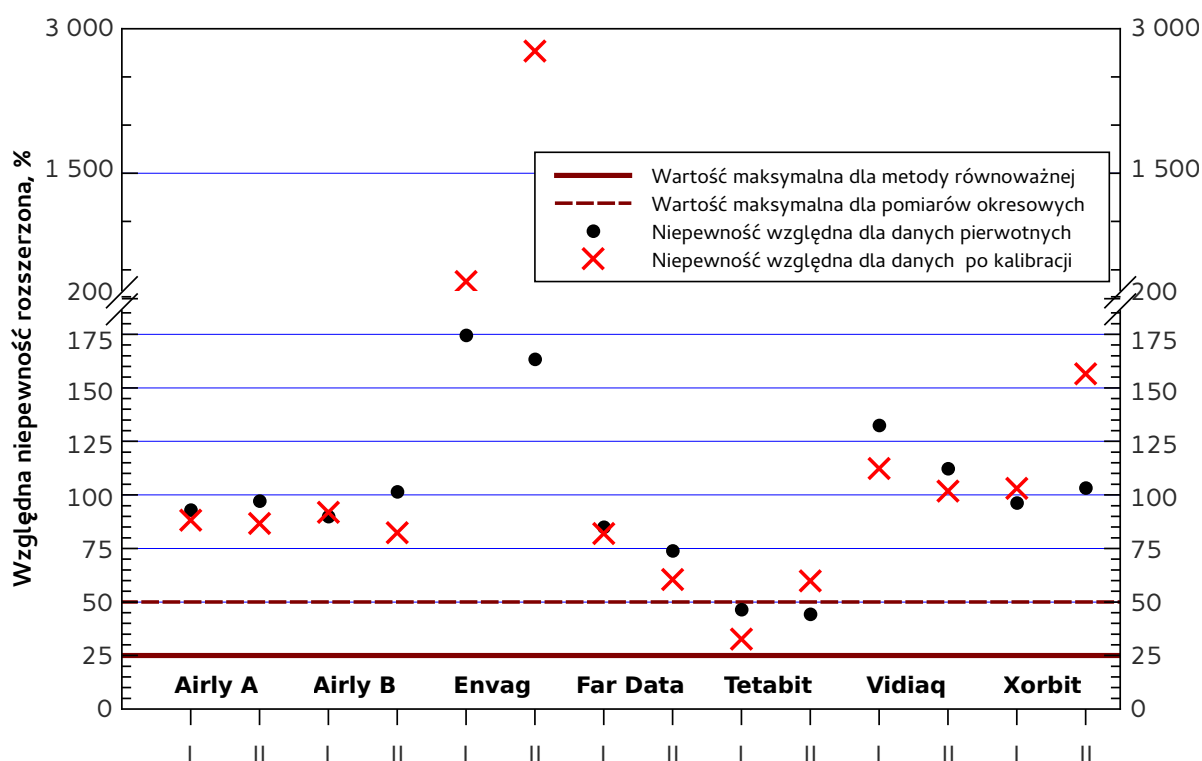
W przypadku drugiej edycji badań najlepszy wynik w przypadku pomiaru stężenia PM10 dla danych pierwotnych uzyskała firma Tetabit (wartość 29,3 %). Dla danych kalibrowanych najlepszą wartość uzyskała również firma Tetabit (wartość 29,7 %). Dla frakcji PM2.5 najniższą względną niepewność rozszerzoną dla danych pierwotnych miało urządzenie firmy Tetabit (44,4%). Dla danych kalibrowanych najlepszy wynik uzyskała również firma Tetabit, gdzie wartość względnej niepewności rozszerzonej wyniosła 32,6 %.



Rysunek 3.10: I Edycja: rozszerzona niepewność względna pomiaru stężenia średnio dobowego **PM10** dla poszczególnych urządzeń przed i po kalibracji. Opracowano na podstawie sprawozdania [1].



Rysunek 3.11: II Edycja: rozszerzona niepewność względna pomiaru stężenia średnio dobowego **PM10** dla poszczególnych urządzeń przed i po kalibracji. Ze względu na duże różnice między uczestnikami prowadzono przecięcie osi oraz różne skale dla tak podzielonego wykresu. Opracowano na podstawie sprawozdania [2].



Rysunek 3.12: II Edycja: rozszerzona niepewność względna pomiaru stężenia średnio dobowego **PM2.5** dla poszczególnych urządzeń przed i po kalibracji. Ze względu na duże różnice między uczestnikami prowadzono przecięcie osi oraz różne skale dla tak podzielonego wykresu. Opracowano na podstawie sprawozdania [2].

3.4 Współczynniki kalibracyjne

Dla każdego z urządzeń niskokosztowych autorzy sprawozdań [1] oraz [2] przeprowadzili kalibrację przy użyciu arkusza wyznaczania zgodności "Orthogonal regression and equivalence test utility, version 2.9", dostarczonego przez RVIM (Dutch Institute for Public Health and the Environment, dep. Centre for Environment Monitoring) oraz opracowania własne. Stężenie po kalibracji uzyskujemy z następującej zależności⁷:

$$C_{kal} = a \cdot C_{pierwotne} - b$$

gdzie: C_{kal} – stężenie po kalibracji, $C_{pierwotne}$ – stężenie przed kalibracją, a – współczynnik nachylenia krzywej kalibracji, b – współczynnik przesunięcia krzywej kalibracji.

Współczynniki kalibracji dla pierwszej i drugiej edycji badań są podane odpowiednio w tabeli 3.2. Wartość współczynnika nachylenia (a) bliska jedności, przy jednoczesnej wartości parametru (b) bliskiej 0, implikuje, że pierwotna kalibracja uczestnika była poprawna. Część urządzeń pomimo kalibracji wykazywało nadal wysoką wartość niepewności (porównaj sekcja 3.3.2). Jest to związane ze słabą korelacją wyników z danego urządzenia z wynikami otrzymanymi za pomocą metody referencyjnej.

Tabela 3.2: Współczynniki kalibracji dla I i II edycji badań. Opracowano na podstawie sprawozdań [1] i [2].

Pierwsza edycja badań				Druga edycja badań					
				Dostawca	Urządzenie	PM10		PM2.5	
						a	b	a	b
Airly _A	I	0,650	1,78	0,933	-0,39				
	II	0,589	-0,09	0,879	-1,46				
Airly _B	I	0,700	2,62	0,998	0,1				
	II	0,520	-1,12	0,819	-1,68				
Envag	I	1,225	-33,07	3,704	-5,44				
	II	0,309	-51,68	11,14	45,26				
Far Data	I	1,124	-3,23	1,000	-3,53				
	II	0,891	-5,46	0,797	-5,68				
PW	I	0,731	-3,62	-	-				
	II	1,347	35,34	-	-				
Tetabit	I	0,905	0,87	1,074	6,70				
	II	1,193	6,01	1,363	10,98				
Vidiaq	I	0,785	-11,81	0,890	-8,10				
	II	0,905	-7,71	0,951	-6,10				
Xorbit	I	1,449	0,89	1,714	1,45				
	II	1,483	3,85	1,756	5,52				
Dostawca	Urządzenie	PM10							
		a	b						
Elkomp	I	0,51	-9,73						
	II	0,45	-10,26						
Envimet	I	1,08	-9,48						
	II	1,05	-8,42						
PW	I	0,40	-10,68						
	II	0,57	-5,31						
S4Tech	I	0,50	-15,97						
	II	0,81	-8,97						
Tetabit	I	1,02	-18,69						
	II	1,23	-7,64						

3.5 Stabilność wskazań urządzeń w czasie

Zestaw danych uzyskanych podczas drugiej edycji badań pozwolił na ocenę stabilności pracy czujników. Autorzy sprawozdania przeprowadzili analizę stabilności współczynników kalibracyjnych w czasie trwania badań. Podzielono cały zestaw wyników na okresy tygodniowe.

⁷Oznaczenie współczynników (a) i (b) zastosowano dla uproszczenia zapisu. Użyty arkusz [3] stosuje inne oznaczenia. Dokładne zależności między współczynnikami przyjętymi w opracowaniu i arkuszu są dostępne w sprawozdaniach [1] i [2].

Dla każdego podzbioru pomiarów przeprowadzono kalibrację urządzeń pomiarowych względem metody referencyjnej w oparciu o dane średniogodzinne. Dla każdego z tygodni wyznaczono współczynnik korelacji Pearsona (R^2), współczynniki nachylenia krzywej kalibracji (a) oraz wartości przesunięcia krzywej kalibracji (b). W oparciu o tak powstałe dane przeanalizowano otrzymane współczynniki pod kątem ich stabilności w czasie trwania całych badań. Dokładne wartości dla poszczególnych urządzeń wraz z wykresami znajdują się w opracowaniu [2].

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń zanotowano (w ramach niepewności pomiarowej) tylko w przypadku dwóch urządzeń istotny dryf współczynnika przesunięcia krzywej kalibracyjnej (b). Urządzeniami wykazującymi istotny dryf były: urządzenie nr 2 Politechniki Warszawskiej oraz urządzenie nr 1 firmy Far Data. Dryf tego parametru mógł być związany z rosnącym zabrudzeniem komory pomiarowej. Nie zanotowano w czasie trwania badań istotnego w ramach niepewności pomiarowej dryfu współczynnika nachylenia prostej (a) dla badanych urządzeń.

Zanotowano dla urządzenia nr 2 firmy Airly (zestaw B) oraz urządzenia nr 2 firmy Envag istotne statystycznie pogorszenie się parametru poprawności dopasowania (współczynnik korelacji Pearsona - R^2). Dla obu urządzeń wartość współczynnika korelacji malała w czasie. Może to wskazywać na zwiększenie szumu aparaturowego urządzenia.

3.6 Wpływ wilgotności na wskazania urządzeń

Duża część urządzeń do pomiaru stężenia pyłu zawyża wynik pomiaru poprzez interpretację małych kropli wody znajdujących się w powietrzu jako cząstek pyłu. Dzieje się tak ponieważ metoda pomiaru stężenia jest oparta na zasadzie rozpraszania światła lasera na cząsteczkach pyłu. Detektor znajdujący się w urządzeniu nie jest w stanie dokonać rozróżnienia czy światło, które dostało się do niego jest wynikiem rozproszenia na cząsteczce pyłu czy też na kropli wody. Dodatkowo kondensacja pary wodnej na cząsteczkach pyłu może prowadzić do zmiany rozmiaru cząsteczki pyłu. Dlatego wskazane jest kondycjonowanie powietrza⁸ przed analizą stężenia pyłu. W przypadku, gdy kondycjonowanie jest mało wydajne lub nie zostało zastosowane w ogóle, możemy zaobserwować korelację między stężeniem pyłu, a wilgotnością powietrza dla wysokich wartości wilgotności. W sytuacji gdy mamy wysoką wilgotność powietrza łatwo dochodzi do kondensacji pary wodnej (skroplenia pary wodnej).

Dla obu edycji pomiarów porównawczych dokonano analizy pod względem korelacji z wilgotnością. Obliczeń wykonano dla dwóch przedziałów wilgotności: 0-90% oraz 90-100%.

W sprawozdaniu [1] możemy odnaleźć szczegółowe obliczenia wraz z parametrami dopasowania dla urządzeń testowanych w czasie pierwszej edycji pomiarów. Urządzenia firmy Solutions for Technology oraz Envimet wykazywały znaczący wpływ wilgotności na wskazywane przez urządzenia stężenia pyłu. Szczególnie było to widoczne dla wartości wilgotności bliskich 100%. W sprawozdaniu odnotowano rosnący trend wraz z wilgotnością dla urządzeń Politechniki Warszawskiej oraz firmy Elkomp. Nie wykazano wpływu wilgotności powietrza na pracę urządzeń firmy Tetabit.

W czasie drugiej edycji pomiarów także wykonano analizy wpływu wilgotności na wyniki pomiarów. W przypadku urządzeń testowanych w tej edycji, nie znaleziono wyraźnego wpływu wilgotności na stężenie pyłu rejestrowane przez testowane urządzenia. Dokładniejsze dane na temat korelacji wyników znajdują się w sprawozdaniu [2].

⁸Kondycjonowanie powietrza - proces przygotowania powietrza, tak aby miało określone parametry fizykochemiczne. W przypadku pomiaru stężenia chodzi o podgrzanie go do takiej temperatury aby przeprowadzić skroploną parę wodną do postaci gazowej bez wpływania na stężenie analizowanej substancji – w tym przypadku pyłu.

Rozdział 4

Podsumowanie

1. Czujniki niskokosztowe badane w obu edycjach wykazują bardzo duże zróżnicowanie pod kątem niepewności pomiaru.
2. W większości przebadanych czujników zanotowano istotne rozbieżności w wynikach pomiarów dla dwóch czujników danego producenta. W przypadku pierwszej edycji tylko firma Envimet spełniała kryterium narzucone przy wykazywaniu równoważności z metodą referencyjną (należy jednak zwrócić uwagę, że podczas pierwszej edycji pomiarów średnie stężenia dobowe były na niskim poziomie). W przypadku drugiej edycji zgodność taką uzyskał tylko jeden zestaw czujników firmy Airly dla frakcji PM_{2.5}. Przy wyborze czujnika do pomiaru stężenia pyłu zawieszonego zaleca się dopytać producenta o zgodność wyniku pomiaru między urządzeniami producenta. Wartość taka powinna się znaleźć w specyfikacji handlowej i być podstawą do reklamacji. Wartość tego parametru można łatwo sprawdzić umieszczając dwa czujniki producenta w bezpośrednim sąsiedztwie. Brak zgodności między urządzeniami producenta (np. dla wartości średniej dobowej) powinien być uzgodniony w momencie zakupu jako podstawa do reklamacji.
3. Biorąc pod uwagę niepewność pomiaru dla badanych czujników (na podstawie danych dostarczonych przez uczestników bez dodatkowej kalibracji), żadne z nich nie spełniało kryterium narzuconego dla metody zgodnej z referencyjną. Dla danych skalibrowanych przez autorów sprawozdań kryterium rozszerzonej niepewności względnej dla metody zgodnej z referencyjną spełniły dwa czujniki firmy Tetabit z pierwszej edycji (w trakcie pierwszej edycji były znacząco niższe stężenia w stosunku do drugiej edycji). Część uczestników spełniała kryterium niepewności dla badań okresowych¹, które jest równe 50% wartości docelowej. W tym przypadku kryterium dla danych surowych spełniał pod względem frakcji PM₁₀ jeden czujnik firmy Far Data oraz dwa czujniki firmy Tetabit. Dla frakcji PM_{2.5} kryterium to było spełnione jedynie przez dwa czujniki firmy Tetabit.

Skalibrowanie danych surowych pozwoliło spełnić kryterium 50% wartości docelowej w przypadku frakcji PM₁₀ dla: dwóch czujników Elkomp z pierwszej edycji pomiarów, dwóch

¹"Oceny jakości powietrza w strefach, w których poziom substancji przekracza górny próg oszacowania, dokonuje się na podstawie pomiarów ciągłych..." (par. 9 ust.1. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 czerwca 2018 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu (Dz.U. 2018 poz. 1119)). Tak więc w celu oceny jakości powietrza w wielu miejscach w Polsce powinien być stosowany pomiar ciągły, a nie pomiar okresowy.

czujników firmy Envimet z pierwszej edycji pomiarów, dwóch czujników Politechniki Warszawskiej z pierwszej edycji, dwóch czujników firmy Tetabit z pierwszej edycji (spełniały również ostrzejsze kryterium), dwóch czujników firmy Far Data z drugiej edycji, jednego czujnika Politechniki Warszawskiej z drugiej edycji oraz dwóch czujników firmy Tetabit z drugiej edycji.

Dla frakcji PM_{2.5} łagodniejsze kryterium spełniał tylko jeden czujnik firmy Tetabit.

Biorąc pod uwagę ten parametr jest wskazane dopytać producenta o niepewność pomiaru średniej dobowej. Brak takiej informacji w specyfikacji produktu powinien być niepokojący, ponieważ sugeruje, że producent nie zna tego parametru. W trakcie procedury zakupu powinien zostać również ustalony sposób weryfikacji tego parametru z rzeczywistością pozwalający na reklamację urządzenia. Najprostszym sposobem na weryfikację danych z zakupionego urządzenia jest umieszczenie urządzenia w bezpośrednim sąsiedztwie urządzenia referencyjnego². Procedura reklamacji powinna jednak zostać omówiona z producentem już w fazie zakupu.

4. Większość badanych czujników wykazywała błędne wartości współczynników kalibracyjnych. Kalibracja przeprowadzona przez autorów sprawozdań w przypadku większości czujników poprawiała zgodność z metodą referencyjną.

W momencie planowania zakupu wskazane jest dopytać się producenta o procedurę kalibracyjną, jakiej są poddawane sprzedawany czujnik oraz starać się o jakąkolwiek dokumentację potwierdzającą proces kalibracji. Jak wskazano w sprawozdaniu [2] urządzenia do pomiaru pyłu powinny być kalibrowane w warunkach zapewniających szeroki zakres stężeń (Przynajmniej w zakresie stężeń 0 – 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

5. Kalibracja urządzeń pomiarowych nie daje gwarancji utrzymania współczynników kalibracyjnych w czasie. W szczególności współczynnik (b) kalibracji może podlegać dryfowi ze względu na zabrudzenie komory detekcji. Poszczególne egzemplarze mogą charakteryzować się różnym tempem tego procesu, co za tym idzie nie można stosować tych samych współczynników dryfu dla wszystkich egzemplarzy.

W sprawozdaniu nie zanotowano dryfu współczynnika (a) kalibracji. Trzeba jednak mieć na uwadze, że wydajność lasera może spadać w czasie powodując zmianę tego parametru w przypadku dłuższego okresu niż kilka miesięcy.

Biorąc pod uwagę powyższe wskazane jest kalibrowanie każdego czujnika oddzielenie względem urządzenia referencyjnego przynajmniej raz w roku³. Oczywiście częstsze przeprowadzanie kalibracji, wpłynie korzystnie na jakość pomiarów. W momencie uzgadniania zakupu wskazane jest omówienie z producentem możliwości dokonania takiej kalibracji, po roku użytkowania w cenie zakupu. Należy jednak zwrócić uwagę, że taka kalibracja powinna być wykonana dla szerokiego zakresu stężeń.

6. W pierwszej edycji pomiarów zanotowano wpływ wilgotności powietrza na wynik pomiaru. Skondensowana para wodna może powodować zawyżenie wyniku pomiaru. Wskazane jest przy wyborze urządzenia pomiarowego upewnić się, czy producent przewidział w konstrukcji urządzenia element kondycjonujący próbkę powietrza przed pomiarem, w celu podgrzania jej powyżej punktu rosy. Funkcjonalność ta jest szczególnie ważna w okresie jesienno-zimowo-wiosennym.

²Urządzenia takie są zamontowane w stacjach pomiarowych Wojewódzkich Inspektoratów Ochrony Środowiska. Dostęp do danych jest otwarty.

³Według normy PN-EN 16450 okres między kalibracjami nie powinien być dłuższy niż 3 miesiące.

7. Żaden z badanych czujników nie spełniło wszystkich kryteriów, które dawałyby możliwość wykorzystania danych generowanych przez ten czujnik do celów oceny jakości powietrza w rozumieniu prawa krajowego i Unii Europejskiej. Wyniki otrzymane za ich pomocą nie pozwalają użyć ich w ramach oficjalnych procedur ogłaszania poziomów informowania lub poziomów alarmowych pyłu PM₁₀. Biorąc pod uwagę powyższe, pomimo obecności czujników niskokosztowych w bezpośrednim sąsiedztwie miejsca zamieszkania, należy zwracać uwagę na wyniki prezentowane przez oficjalne stacje PMŚ oraz komunikaty Wojewódzkiego Centrum Zarządzania Kryzysowego dotyczące jakości powietrza.
8. Część czujników pomimo istotnych niepewności można wykorzystywać do celów edukacyjnych lub informacyjnych. Należy być jednak świadomym, że różnica wskazania wartości średniodobowej zmierzonej i prawdziwej (dla najlepszych z badanych czujników niskokosztowych) może sięgać w przypadku stężenia PM₁₀ – 25 μg/m³. Dla wartości średniodziennej różnice te mogą być znacznie większe.
9. W czasie trwania badań (ze względu na ograniczony czas trwania do kilku miesięcy) nie udało się ocenić okresu po jakim czujniki należałoby wymienić na nowe.
10. W celu reprezentatywnego określenia stężenia pyłu zawieszonego wskazane jest odpowiednie zamontowanie czujnika. Szczegółowe omówienie tego tematu zostało zawarte w dodatku A.

Bibliografia

- [1] Bartyzel Jakub, Frączkowski Tomasz, Pindel Andrzej, Łyczko Piotr, Dąbrowska Ewa, Dworakowska Anna, *Sprawozdanie z badań porównawczych urządzeń do pomiarów pyłu zawieszonego PM10 (urządzenia niereferencyjne i bez wykazanej równoważności do urządzeń referencyjnych)*, Kraków styczeń 2018
- [2] Bartyzel Jakub, Frączkowski Tomasz, Pindel Andrzej, Łyczko Piotr, Musielok Małgorzata, Zięba Damian, Dworakowska Anna, *Sprawozdanie z drugiej serii badań porównawczych urządzeń do pomiarów pyłu zawieszonego PM10 (urządzenia niereferencyjne i bez wykazanej równoważności do urządzeń referencyjnych)*, Kraków sierpień 2018
- [3] *Orthogonal regression and equivalence test utility, version 2.9, RIVM (Dutch Institute for Public Health and the Environment, dep. Centre for Environment Monitoring)*

Spis rysunków

3.1	Niepewność wskazań między urządzeniami producenta PM10 - I edycja.	9
3.2	Niepewność wskazań między urządzeniami producenta PM10 dla stężeń większych niż $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - I edycja.	9
3.3	Niepewność wskazań między urządzeniami producenta PM10 - II edycja.	10
3.4	Niepewność wskazań między urządzeniami producenta PM10 dla stężeń większych niż $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - II edycja.	10
3.5	Niepewność wskazań między urządzeniami producenta PM2.5 - II edycja.	11
3.6	Niepewność wskazań między urządzeniami producenta PM2.5 dla stężeń większych niż $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - II edycja.	11
3.7	Zestawienie średnich wartości z urządzeń z wartością średnią dla metody referencyjnej PM10 - I edycja.	12
3.8	Zestawienie średnich wartości z urządzeń z wartością średnią dla metody referencyjnej PM10 - II edycja.	13
3.9	Zestawienie średnich wartości z urządzeń z wartością średnią dla metody referencyjnej PM2.5 - II edycja.	13
3.10	Rozszerzona niepewność względna pomiaru PM10 - I edycja.	15
3.11	Rozszerzona niepewność względna pomiaru PM10 - II edycja.	16
3.12	Rozszerzona niepewność względna pomiaru PM2.5 - II edycja.	16
B.1	Elkomp - wartości średniodobowe PM10 względem metody referencyjnej - I edycja. . .	28
B.2	Envimet - wartości średniodobowe PM10 względem metody referencyjnej - I edycja. . .	29
B.3	Politechnika Warszawska wartości średniodobowe PM10 względem metody referencyjnej - I edycja.	30
B.4	S4Tech - wartości średniodobowe PM10 względem metody referencyjnej - I edycja. . .	31
B.5	Tetabit - wartości średniodobowe PM10 względem metody referencyjnej - I edycja. . .	32
C.1	Airly A - wartości średniodobowe PM10 względem metody referencyjnej - II edycja. . .	34
C.2	Airly B - wartości średniodobowe PM10 względem metody referencyjnej - II edycja. . .	35
C.3	Envag - wartości średniodobowe PM10 względem metody referencyjnej - II edycja. . .	36
C.4	Far Data - wartości średniodobowe PM10 względem metody referencyjnej - II edycja. .	37
C.5	Politechnika Warszawska - wartości średniodobowe PM10 względem metody referencyjnej - II edycja.	38
C.6	Tetabit - wartości średniodobowe PM10 względem metody referencyjnej - II edycja. . .	39
C.7	Vidiaq - wartości średniodobowe PM10 względem metody referencyjnej - II edycja. . .	40
C.8	Xorbit - wartości średniodobowe PM10 względem metody referencyjnej - II edycja. . .	41
C.9	Airly A - wartości średniodobowe PM2.5 względem metody referencyjnej - II edycja. .	42
C.10	Airly B - wartości średniodobowe PM2.5 względem metody referencyjnej - II edycja. .	43
C.11	Envag - wartości średniodobowe PM2.5 względem metody referencyjnej - II edycja. . .	44
C.12	Far Data - wartości średniodobowe PM2.5 względem metody referencyjnej - II edycja. .	45
C.13	Tetabit - wartości średniodobowe PM2.5 względem metody referencyjnej - II edycja. .	46
C.14	Vidiaq - wartości średniodobowe PM2.5 względem metody referencyjnej - II edycja. . .	47
C.15	Xorbit - wartości średniodobowe PM2.5 względem metody referencyjnej - II edycja. . .	48

Spis tabel

3.1	Pokrycie danych	7
3.2	Współczynniki kalibracji	17

Dodatek A

Zalecenia dotyczące lokalizacji czujników niskokosztowych

Dodatek przedstawia wskazania, które powinny zostać wzięte pod uwagę przy lokalizacji czujników. W zależności od umiejscowienia urządzenia możemy uzyskać odmienny obraz jakości powietrza dla danej miejscowości. Szczegółowe wymagania dotyczące metod i zakresu dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu jak również informacje na temat lokalizacji punktów pomiarowych są zawarte w załączniku nr 3 rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 8 czerwca 2018 r. w sprawie dokonania oceny poziomów substancji w powietrzu (Poz. 1119). Rozporządzenie jest transpozycją Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystsze powietrze dla Europy (Dz. Urz. UE L 152 z 11.06.2008, str.1) oraz Dyrektywy Komisji (UE) 2015/1480 z dnia 28 sierpnia 2015 r. zmieniającej niektóre załączniki do dyrektyw Parlamentu Europejskiego i Rady 2004/107/WE i 2008/50/WE ustanawiające przepisy dotyczące metod referencyjnych, zatwierdzania danych i lokalizacji punktów pomiarowych do oceny jakości powietrza.

W ramach raportu przedstawiamy jedynie kilka uwag dotyczących wyboru miejsca w skali makro oraz zalecenia związane z umiejscowieniem urządzenia pomiarowego w skali mikro. Stacja pomiarowa może mieć na celu określenie jakości powietrza dla różnych obszarów jak również brać pod uwagę inne źródła emisji. Wybierając miejsce instalacji należy się zastanowić nad tym jakie informacje chcemy uzyskać z pomiaru. Kryteria lokalizacji przyjęte dla stacji mierzącej tło miejskie będą inne od kryteriów narzuconych dla stacji dokonującej pomiaru oddziaływania komunikacyjnego lub przemysłowego. Szczegółowe informacje na ten temat znajdziemy w rozporządzeniu. Najistotniejsze jest aby lokalizacja punktu pomiarowego brała pod uwagę reprezentatywność pomiaru dla ogółu ludności na danym obszarze. Należy również rozróżnić emisję od imisji. Zbyt bliskie ustawienie czujnika w stosunku do źródła zanieczyszczenia da nam informację o emisji zanieczyszczenia. Jeśli jest taka możliwość, to należałoby przeprowadzić analizę przestrzenną rozkładu stężenia i wytypować miejsca najbardziej oddającego wartość średnią dla obszaru jaki chcielibyśmy poddać ocenie.

Biorąc pod uwagę sam montaż czujnika należałoby zwrócić uwagę na bezpośrednie otoczenie czujnika. Rozporządzenie przedstawia szczegółowe wytyczne dotyczące umiejscowienia stacji pomiarowej. Można je uogólnić do czujników niskokosztowych (dokonujących pomiaru stężenia pyłu zawieszonego PM10 i PM2.5) w następujący sposób:

1. Przepływu powietrza wokół czujnika nie ograniczają (w promieniu co najmniej 270° lub 180° w przypadku pomiarów zlokalizowanych przy linii zabudowy) żadne przeszkody.
2. Czujnik na ogół powinien być położony w odległości kilku metrów od budynków, balkonów, drzew i innych przeszkód.

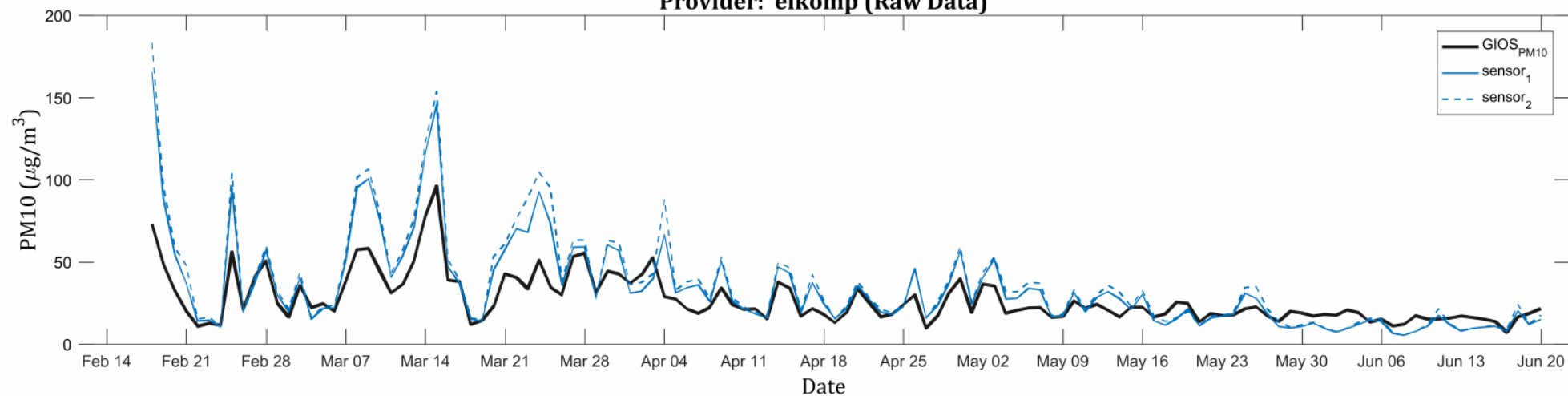
3. W przypadku pomiaru jakości powietrza na linii zabudowy czujnik powinien być zamontowany co najmniej 0,5 m od najbliższego budynku.
4. Zasadą ogólną jest, że czujnik znajduje się od 1,5 m (strefa oddychania) do 4 m powyżej poziomu gruntu. W niektórych wypadkach dopuszczalne jest umieszczenie czujnika wyżej niż 4m, zwłaszcza gdy pomiar ma być reprezentatywny dla większego obszaru.
5. Aby uniknąć bezpośredniego zasysania substancji przed ich dostatecznym zmieszaniem z powietrzem, nie umieszcza się czujników w bezpośrednim sąsiedztwie źródeł emisji zanieczyszczenia.
6. W odniesieniu do pomiaru oddziaływania transportu czujniki niskokosztowe powinny być oddalone o co najmniej 25 m od granicy głównych skrzyżowań (na których krzyżują się drogi o największym natężeniu ruchu i które przerywają przepływ ruchu drogowego oraz powodują emisję inne niż pozostała część drogi). Jednocześnie punkt ten nie powinien być oddalony więcej niż 10 m od krawężnika. Lokalizacja zbyt blisko skrzyżowania mogłaby dać obraz niereprezentatywny dla danej drogi, zatrzymywanie i ruszanie z miejsca podwyższa emisję ale nie odpowiada wartości typowej dla całej drogi.

Dodatek B

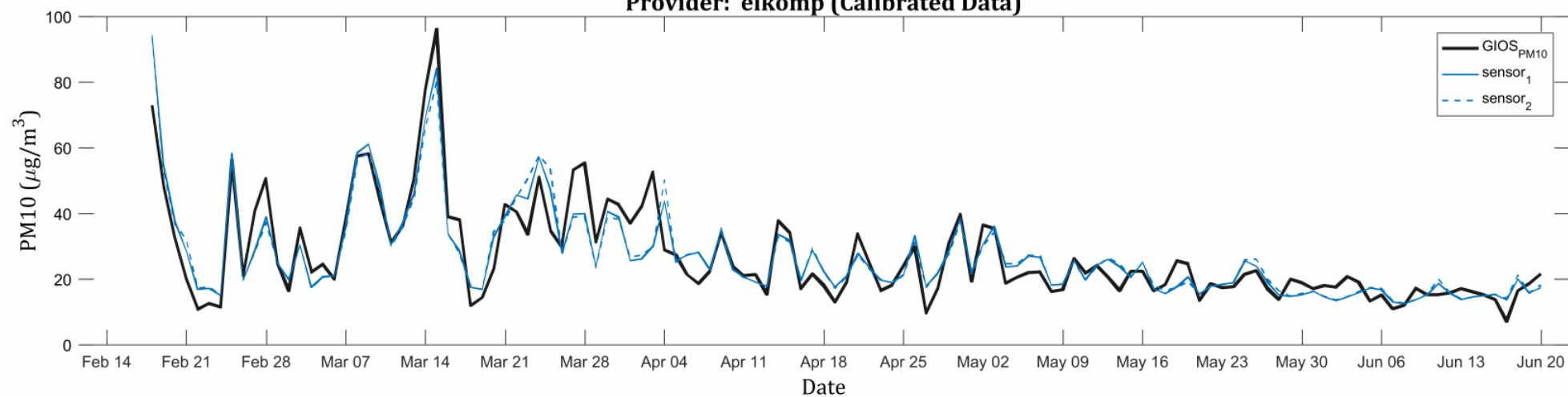
Wartości średniodobowe względem metody referencyjnej - I edycja badań

Załącznik przedstawia rysunki porównujące wartości średniodobowe z wartościami wyznaczonymi metodą referencyjną przed i po dokonaniu kalibracji przez autorów sprawozdania. Rysunki zostały zaczerpnięte bezpośrednio z sprawozdania [1].

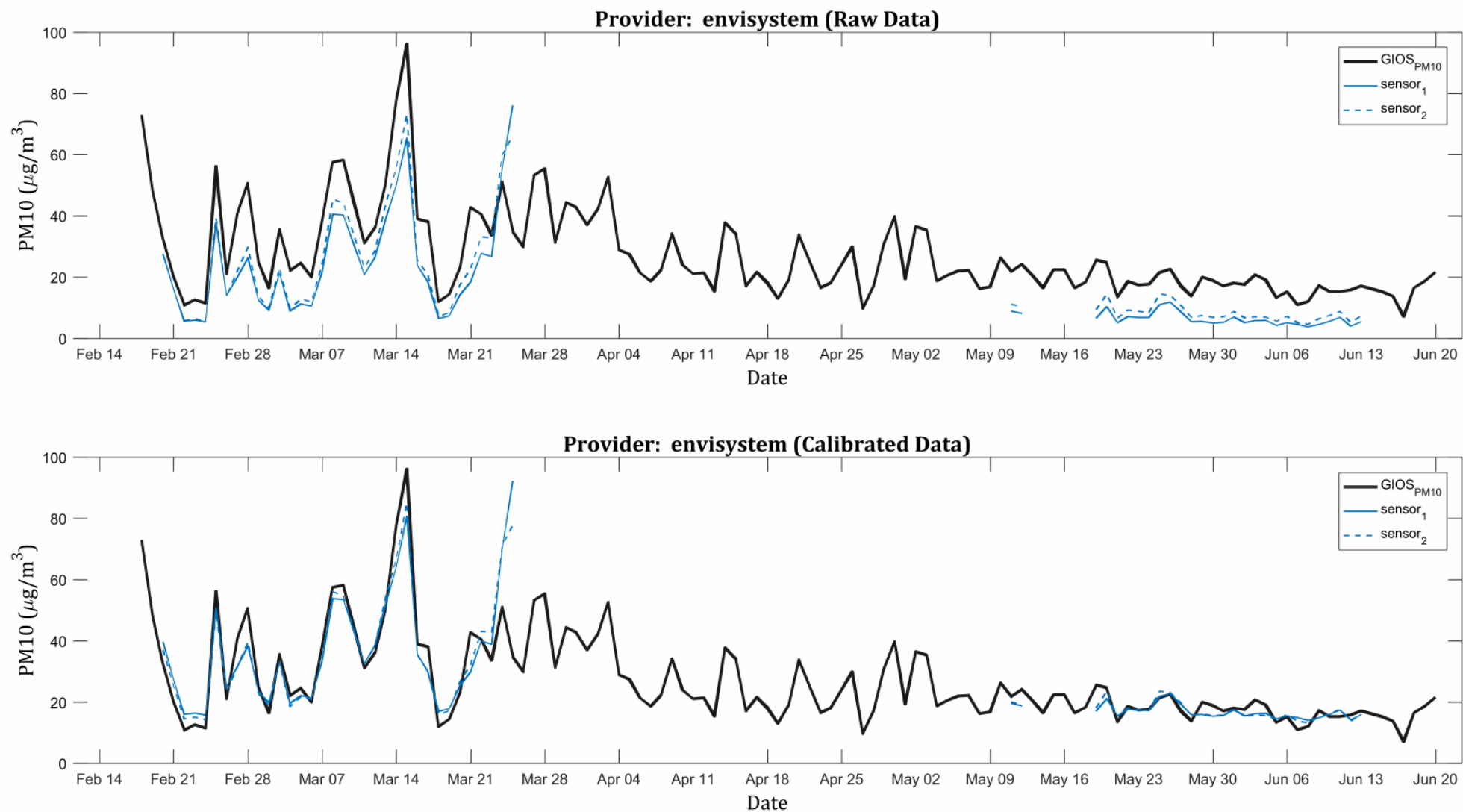
Provider: elkomp (Raw Data)



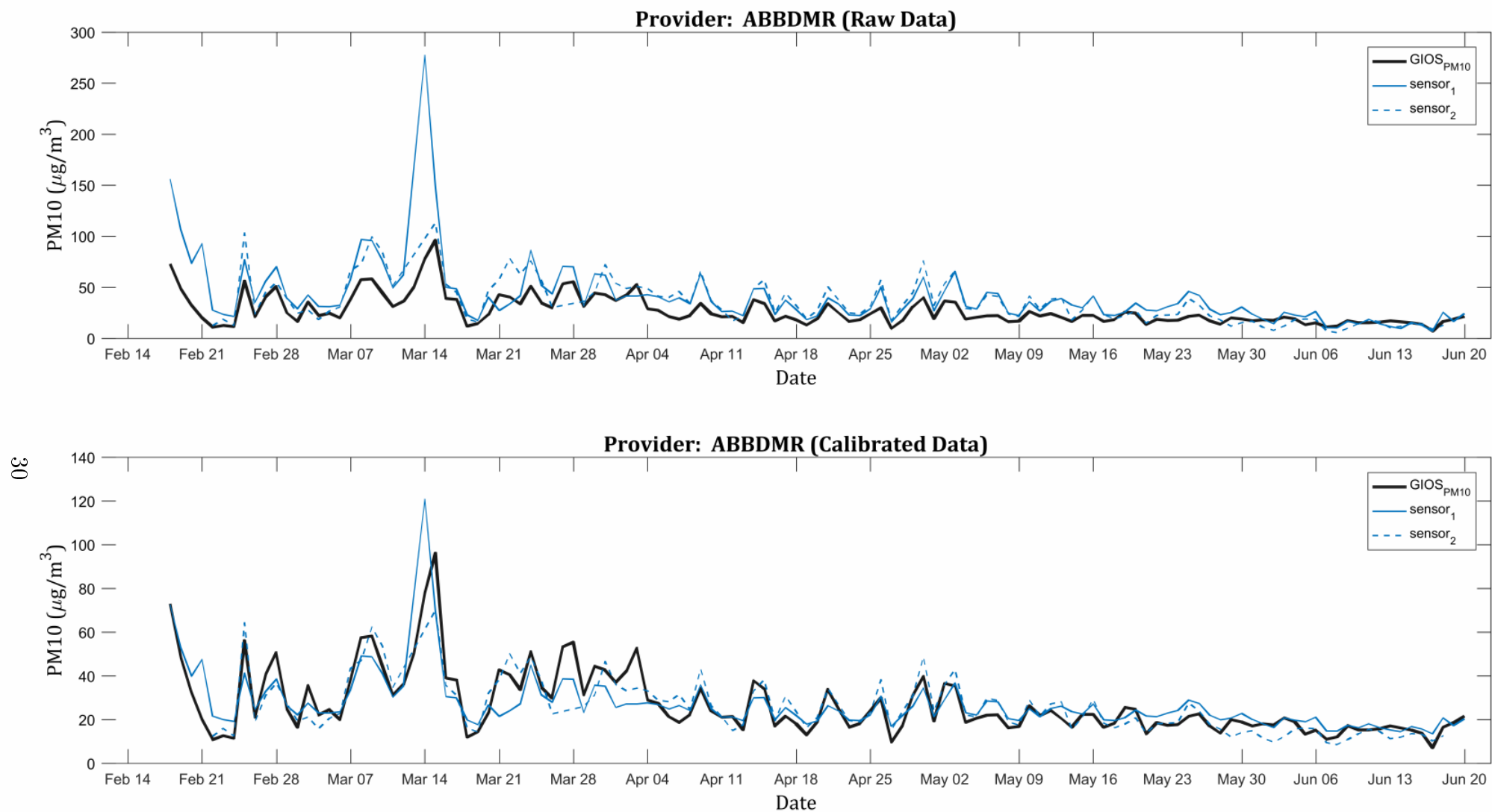
Provider: elkomp (Calibrated Data)



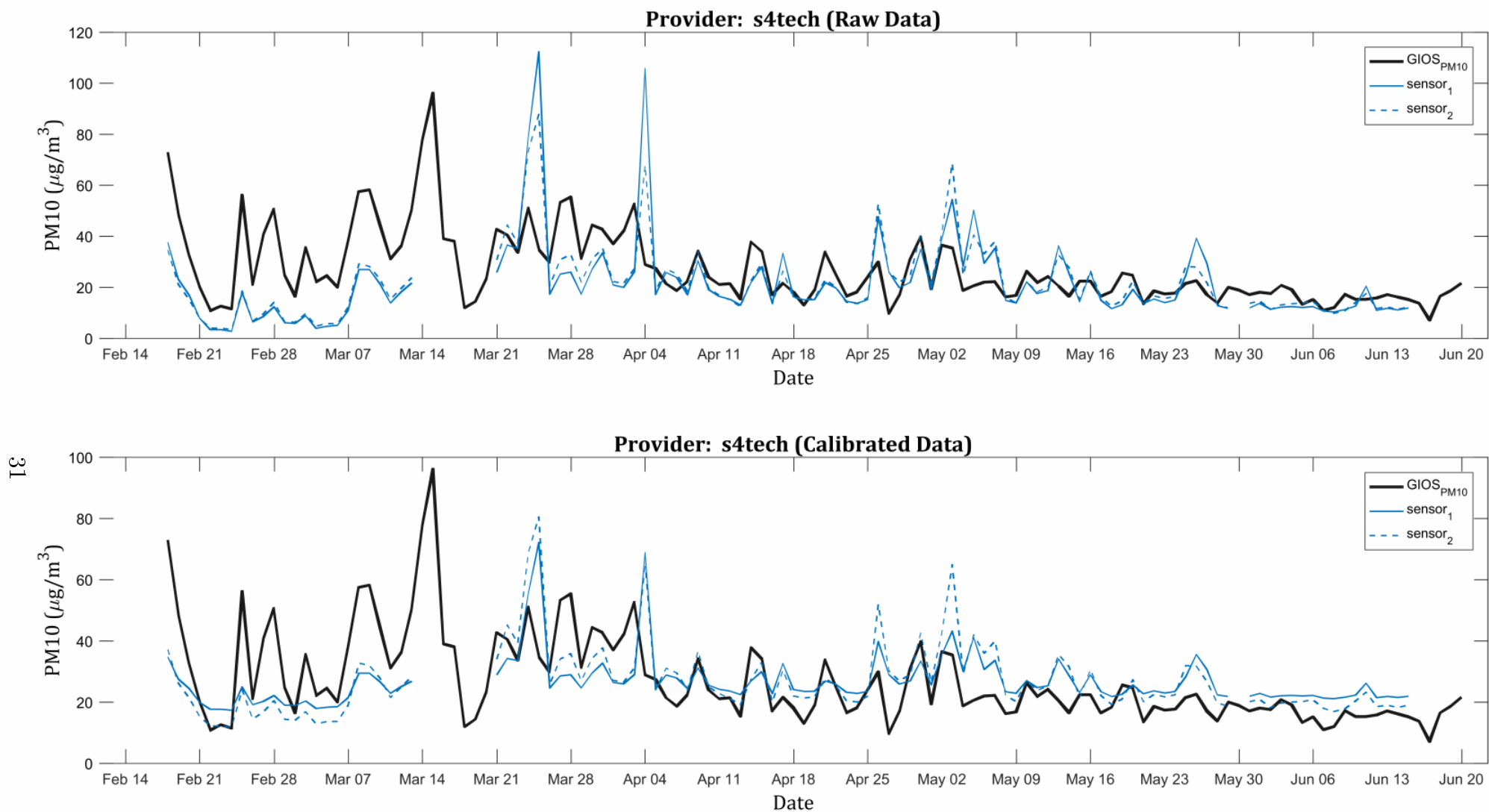
Rysunek B.1: Zestawienie wyników pomiarów stężenia średniodobowego pyłu PM10 dla czujników firmy Elkomp - niebieskie linie z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ - czarna linia. Pierwszy wykres przedstawia dane dostarczone przez uczestnika. Wykres dolny przedstawia dane po rekaliibracji wykonanej przez autorów sprawozdania [1].



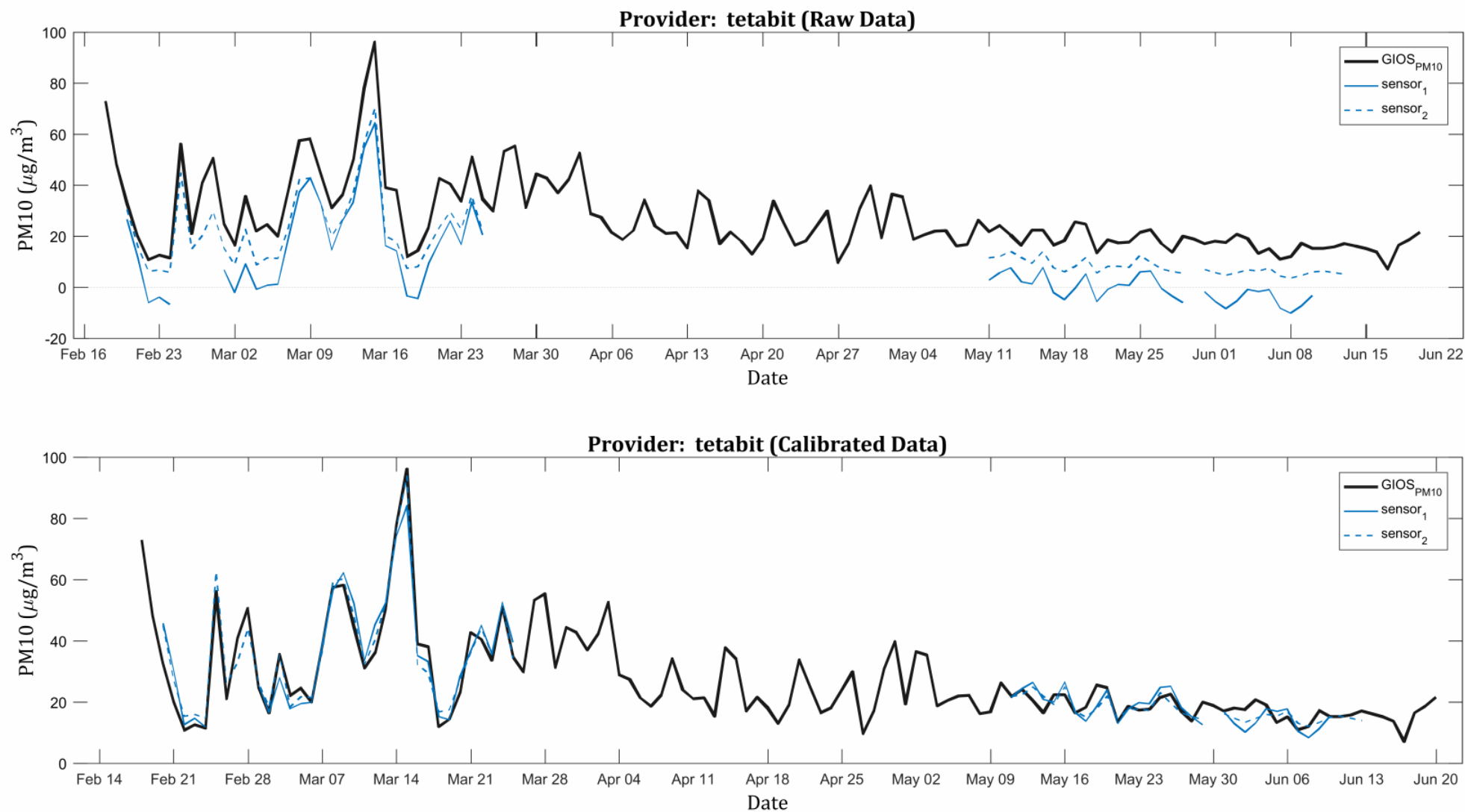
Rysunek B.2: Zestawienie wyników pomiarów stężenia średniodobowego pyłu PM10 dla czujników firmy Envimet - niebieskie linie z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ - czarna linia. Pierwszy wykres przedstawia dane dostarczone przez uczestnika. Wykres dolny przedstawia dane po rekaliibracji wykonanej przez autorów sprawozdania [1].



Rysunek B.3: Zestawienie wyników pomiarów stężenia średniodobowego pyłu PM10 dla czujników Politechniki Warszawskiej - niebieskie linie z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ - czarna linia. Pierwszy wykres przedstawia dane dostarczone przez uczestnika. Wykres dolny przedstawia dane po rekaliibracji wykonanej przez autorów sprawozdania [1].



Rysunek B.4: Zestawienie wyników pomiarów stężenia średniodobowego pyłu PM10 dla firmy Solution for Technology - niebieskie linie z wartościami dostarczonymi przez KLiW GIOŚ - czarna linia. Pierwszy wykres przedstawia dane dostarczone przez uczestnika. Wykres dolny przedstawia dane po rekaliibracji wykonanej przez autorów sprawozdania [1].

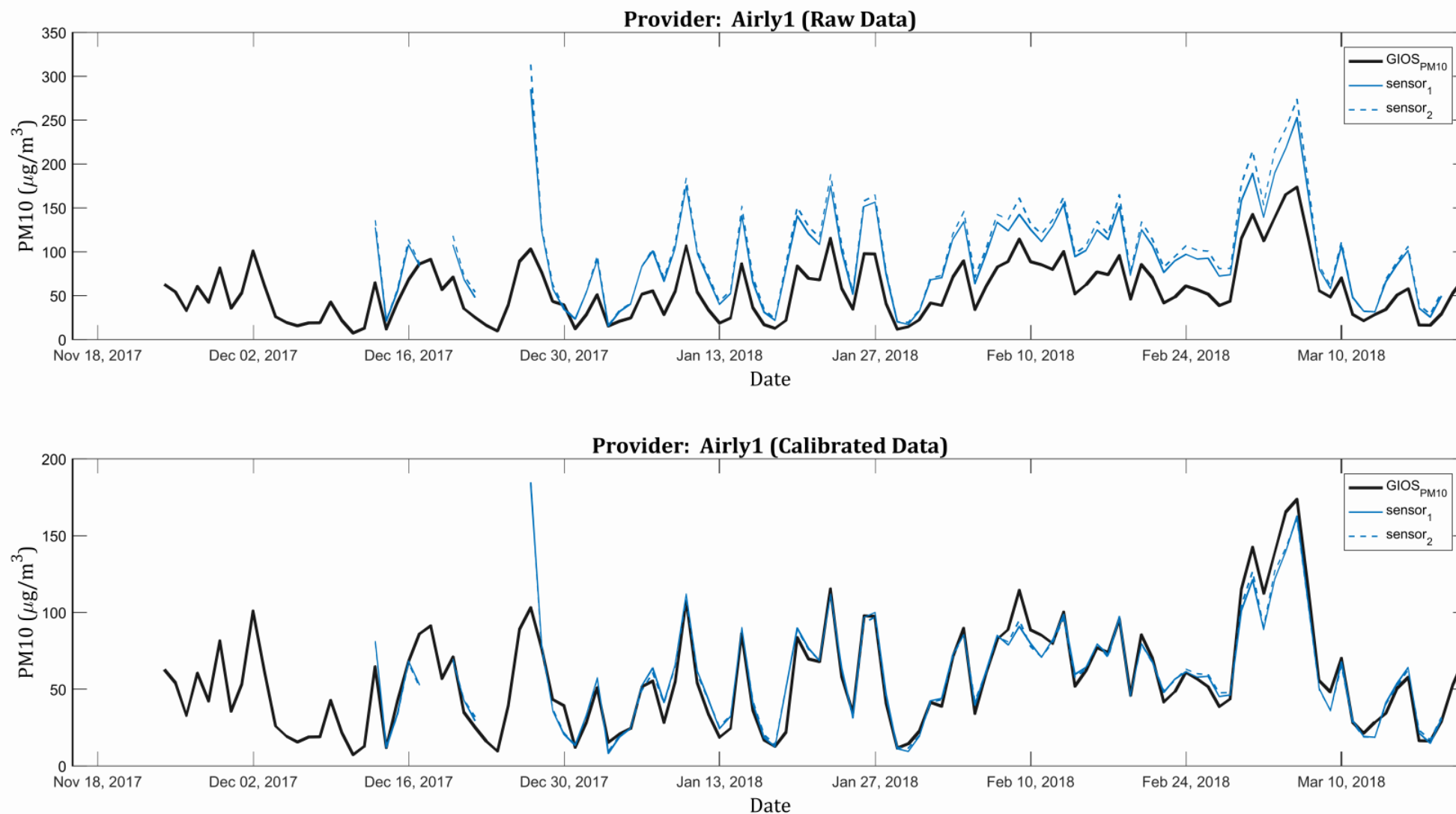


Rysunek B.5: Zestawienie wyników pomiarów stężenia średniodobowego pyłu PM10 dla firmy Tetabit niebieskie linie z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ - czarna linia. Pierwszy wykres przedstawia dane dostarczone przez uczestnika. Wykres dolny przedstawia dane po rekaliibracji wykonanej przez autorów sprawozdania [1].

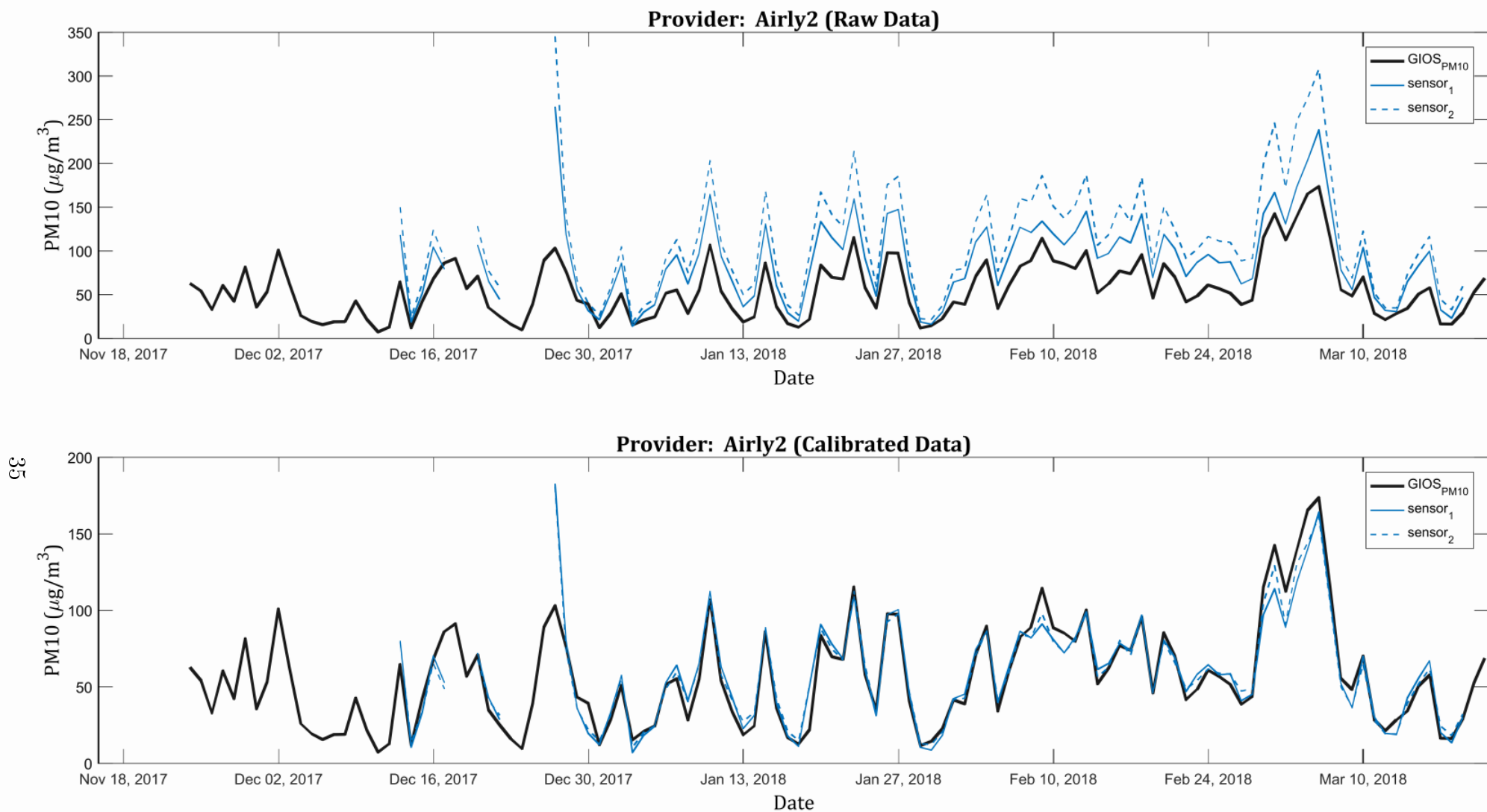
Dodatek C

Wartości średniodobowe względem metody referencyjnej - II edycja badań

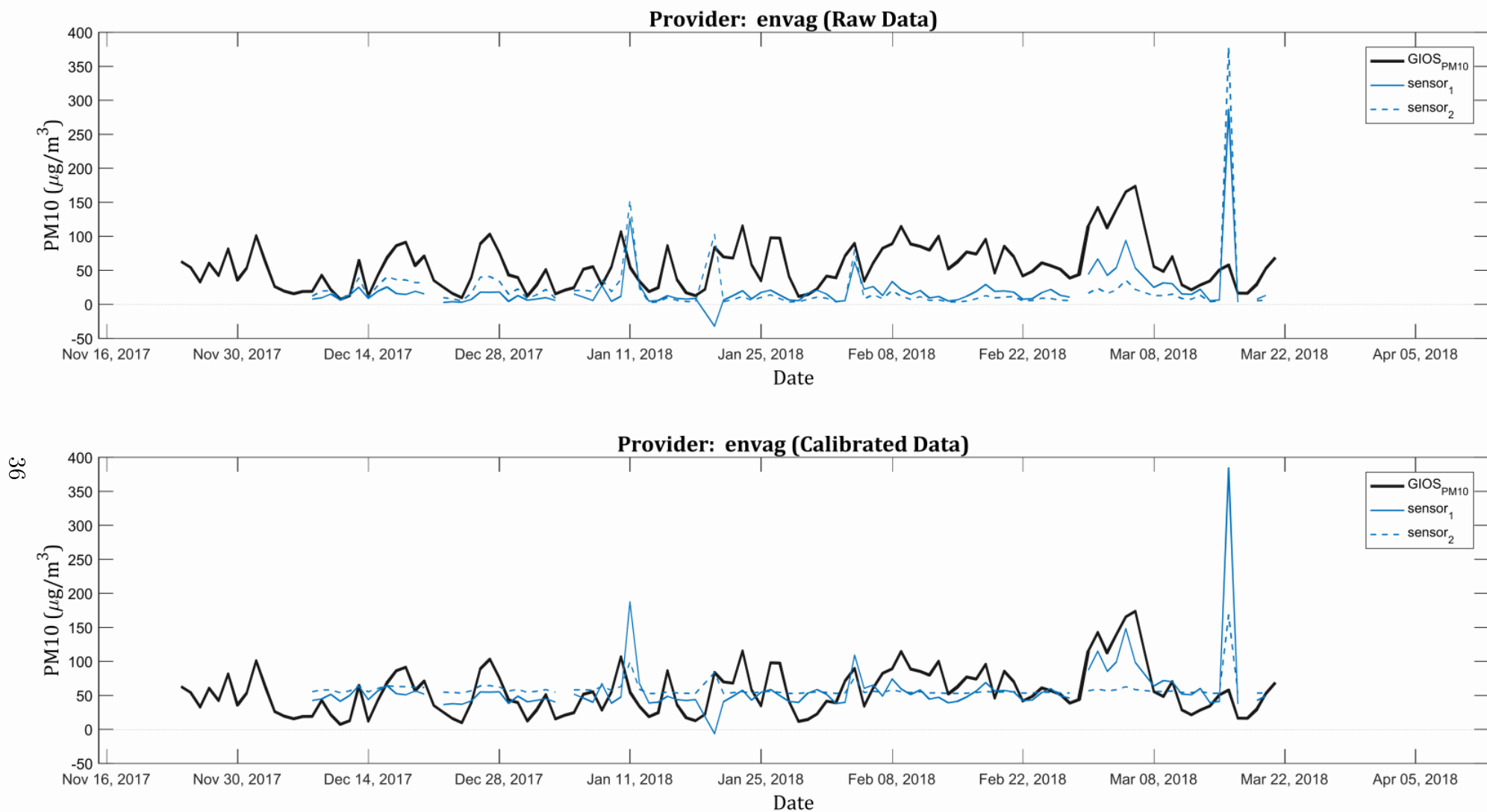
Załącznik przedstawia rysunki porównujące wartości średniodobowe z wartościami wyznaczonymi metodą referencyjną przed i po dokonaniu kalibracji przez autorów sprawozdania. Rysunki zostały zaczerpnięte bezpośrednio z sprawozdania [2]. Dane dla części uczestników zaprezentowane poniżej zostały poddane pewnym korektom. Wprowadzone poprawki zostały przedstawione w podrozdziale 2.1 sprawozdania [2].



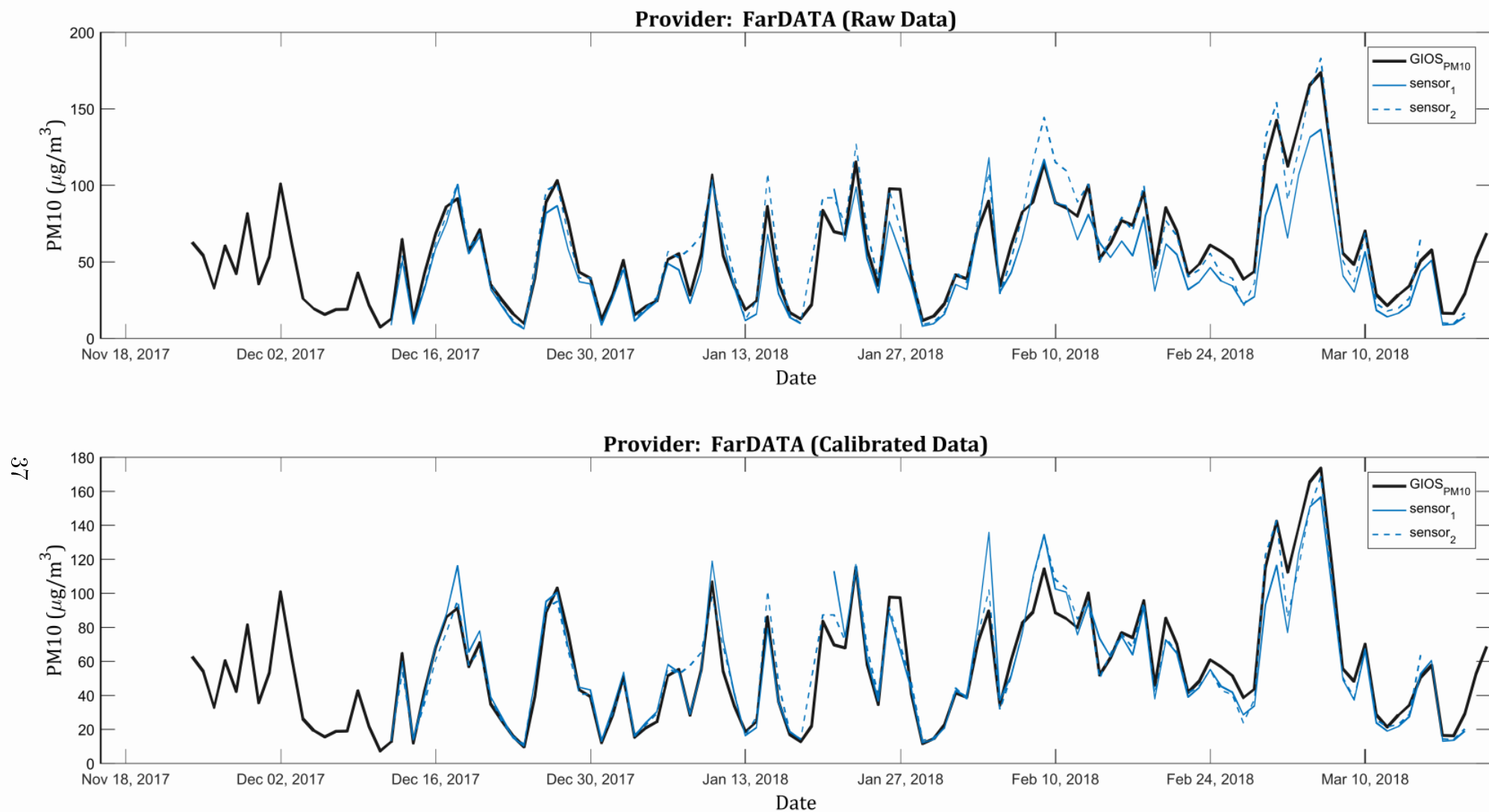
Rysunek C.1: Zestawienie wyników pomiarów stężenia średniodobowego pyłu PM10 dla czujników firmy Airly, zestaw A - niebieskie linie z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ - czarna linia. Pierwszy wykres przedstawia dane dostarczone przez uczestnika. Wykres dolny przedstawia dane po rekaliibracji wykonanej przez autorów sprawozdania [2].



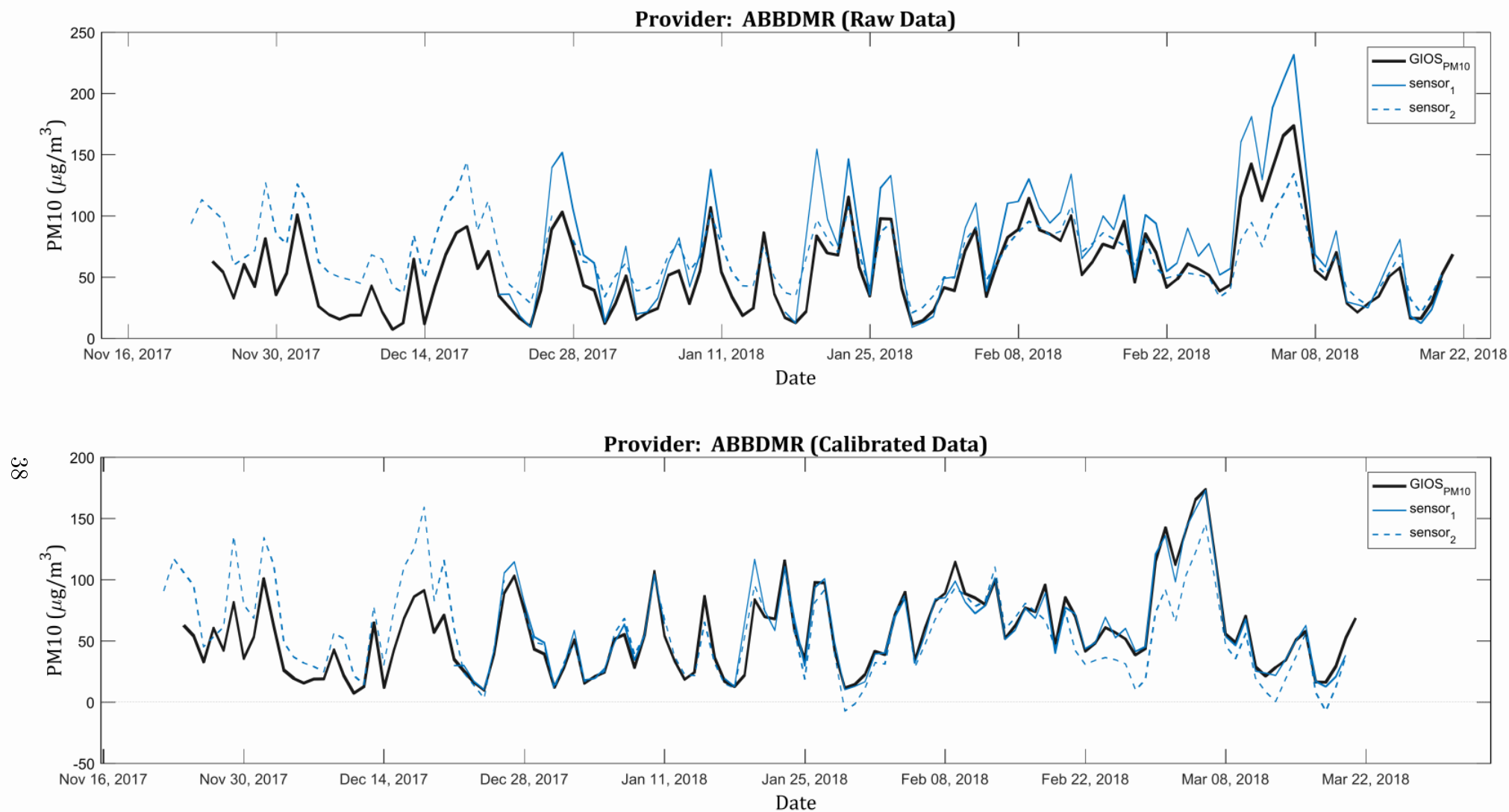
Rysunek C.2: Zestawienie wyników pomiarów stężenia średniodobowego pyłu PM10 dla czujników firmy Airly, zestaw B - niebieskie linie z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ - czarna linia. Pierwszy wykres przedstawia dane dostarczone przez uczestnika. Wykres dolny przedstawia dane po rekaliibracji wykonanej przez autorów sprawozdania [2].



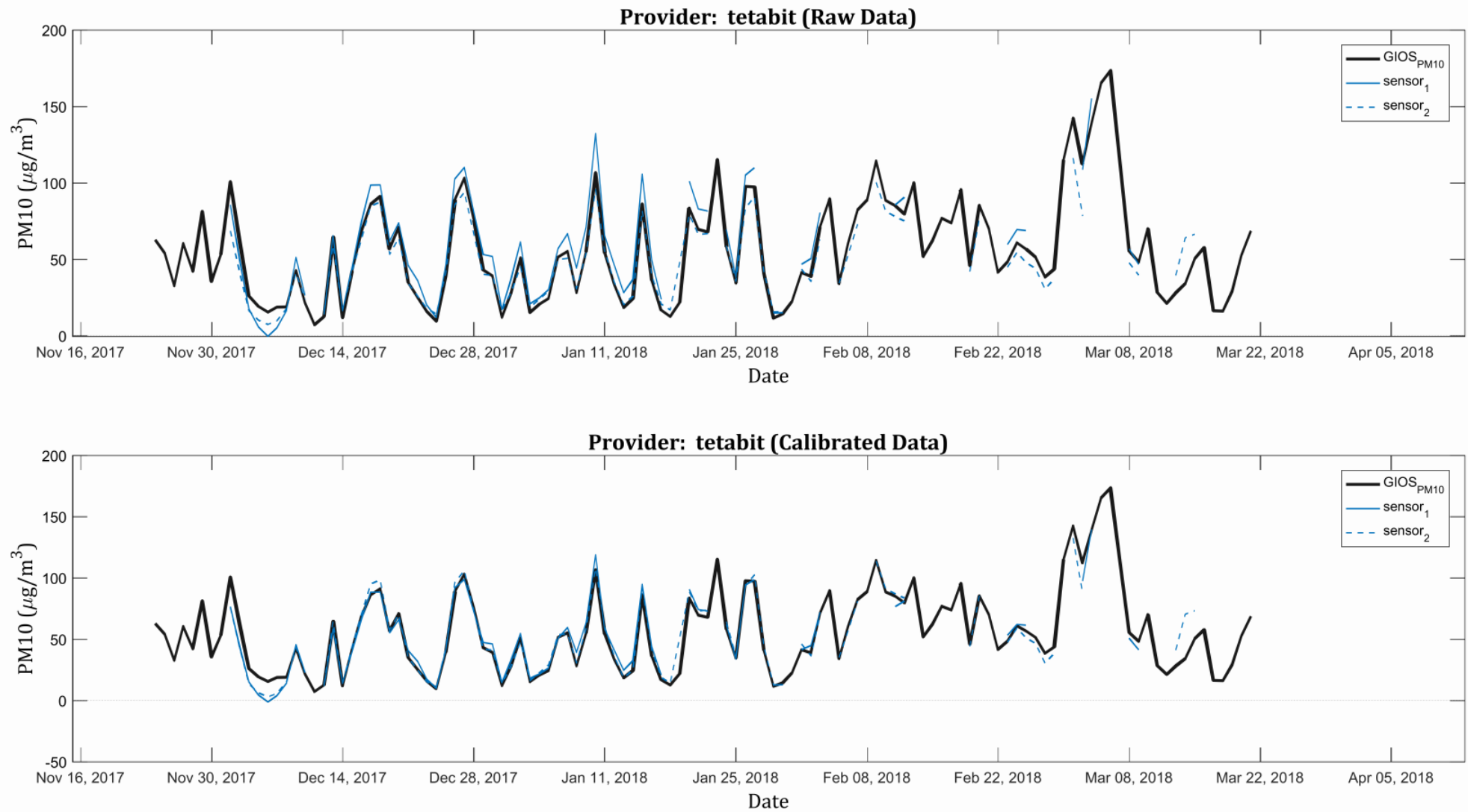
Rysunek C.3: Zestawienie wyników pomiarów stężenia średniodobowego pyłu PM10 dla czujników Envag - niebieskie linie z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ - czarna linia. Pierwszy wykres przedstawia dane dostarczone przez uczestnika. Wykres dolny przedstawia dane po rekaliibracji wykonanej przez autorów sprawozdania [2].



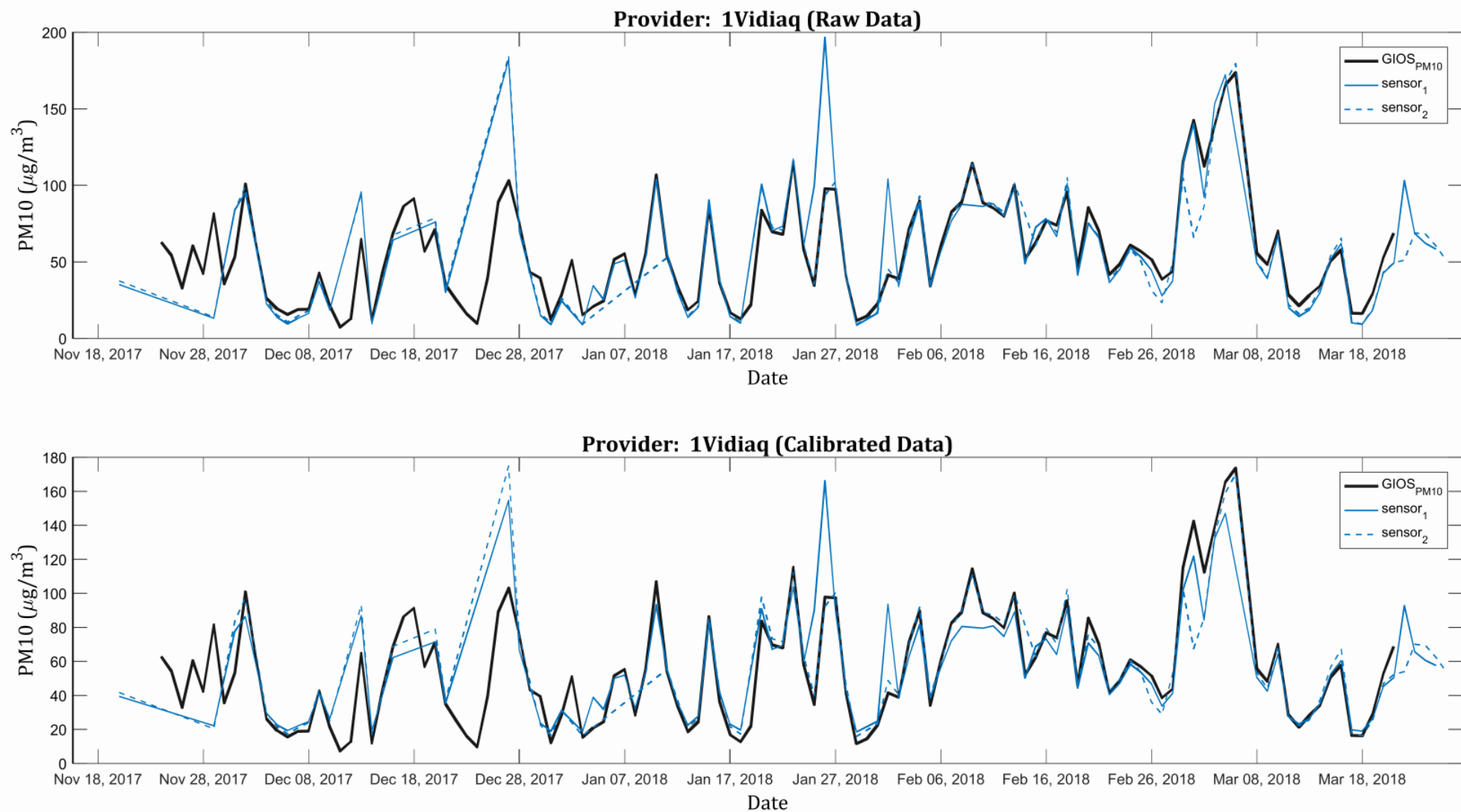
Rysunek C.4: Zestawienie wyników pomiarów stężenia średniodobowego pyłu PM10 dla firmy Far Data - niebieskie linie z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ - czarna linia. Pierwszy wykres przedstawia dane dostarczone przez uczestnika. Wykres dolny przedstawia dane po rekaliibracji wykonanej przez autorów sprawozdania [2].



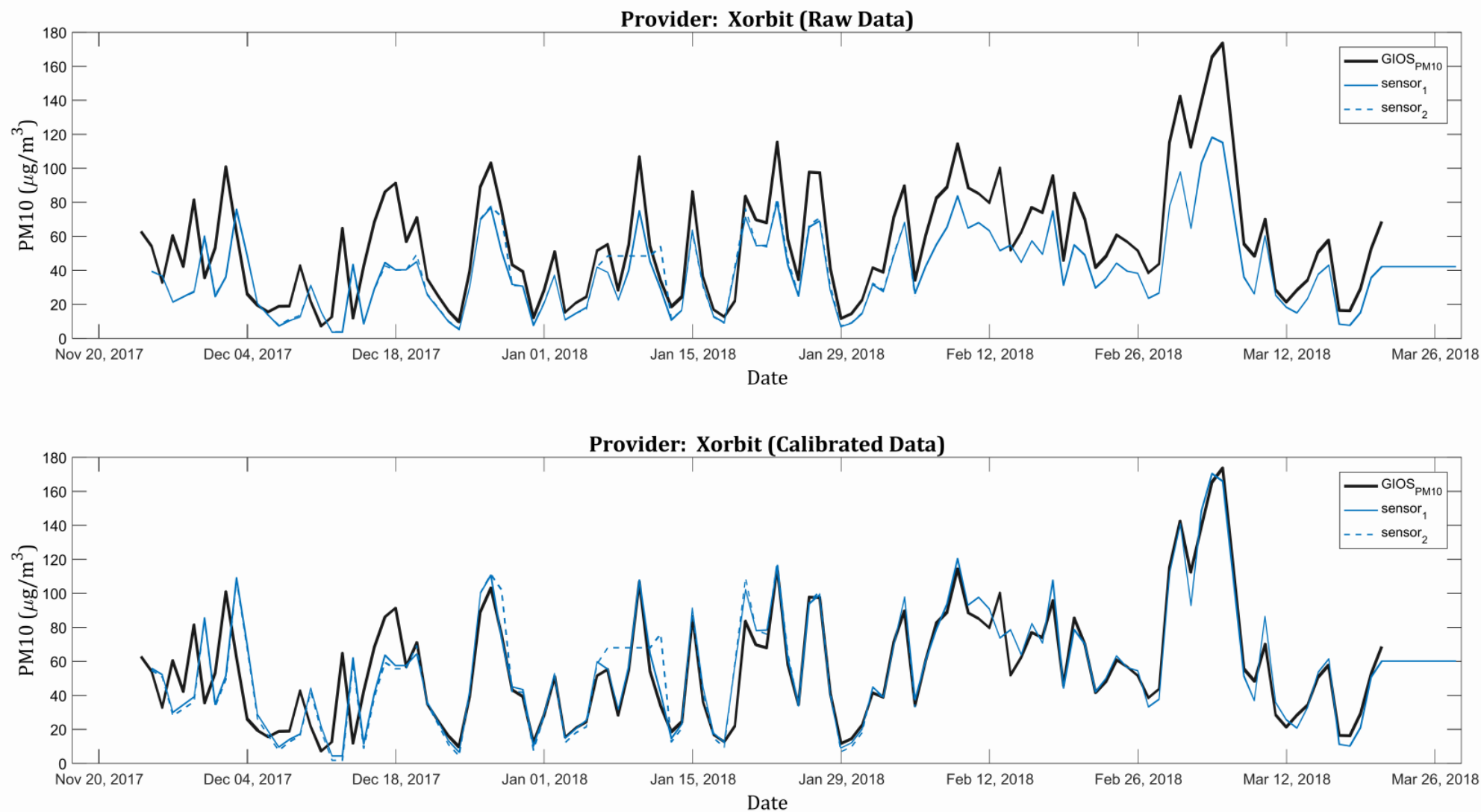
Rysunek C.5: Zestawienie wyników pomiarów stężenia średniodobowego pyłu PM10 dla Politechniki Warszawskiej niebieskie linie z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ - czarna linia. Pierwszy wykres przedstawia dane dostarczone przez uczestnika. Wykres dolny przedstawia dane po rekaliibracji wykonanej przez autorów sprawozdania [2].



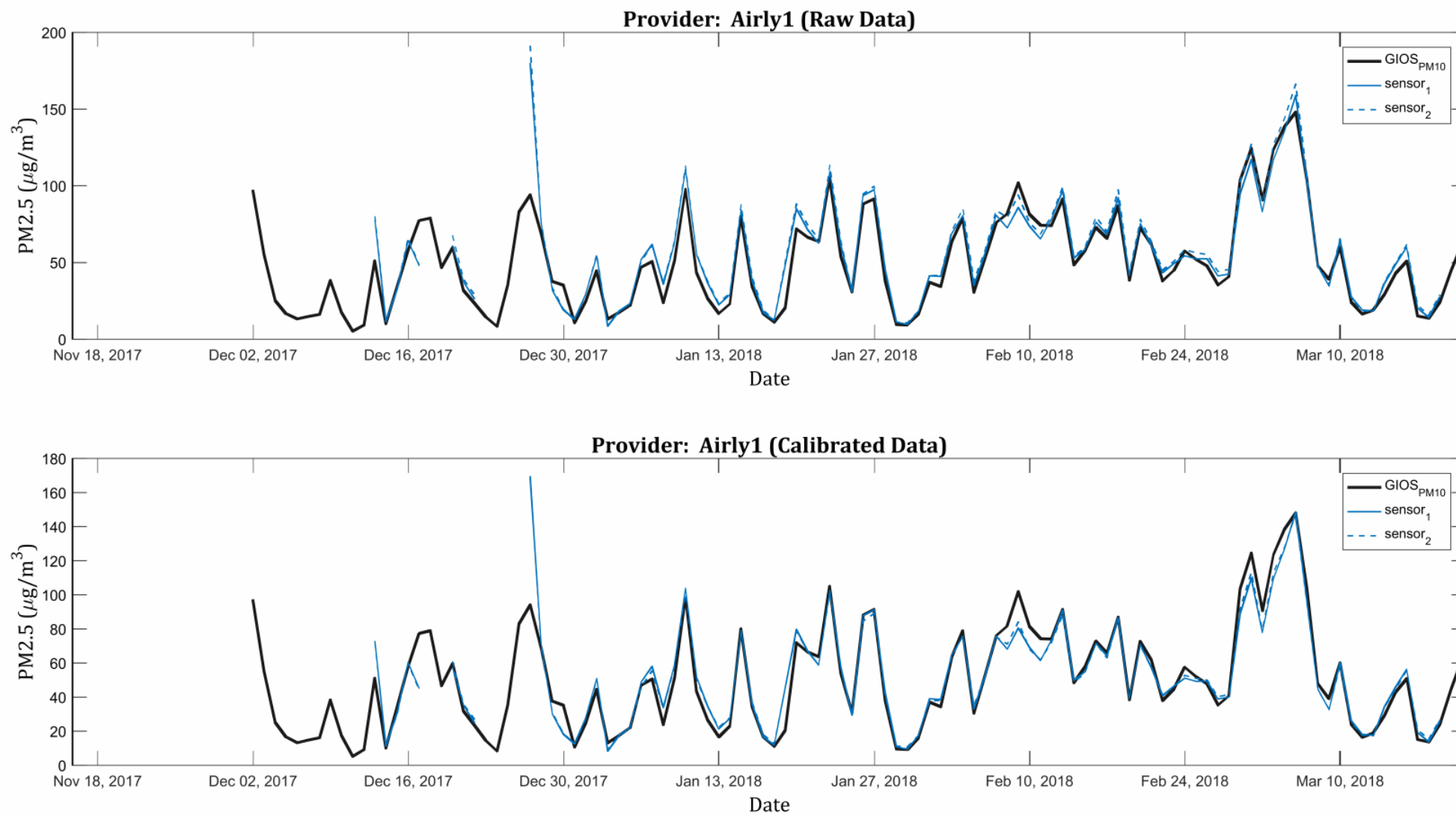
Rysunek C.6: Zestawienie wyników pomiarów stężenia średniodobowego pyłu PM10 dla firmy Tetabit niebieskie linie z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ - czarna linia. Pierwszy wykres przedstawia dane dostarczone przez uczestnika. Wykres dolny przedstawia dane po rekaliibracji wykonanej przez autorów sprawozdania [2].



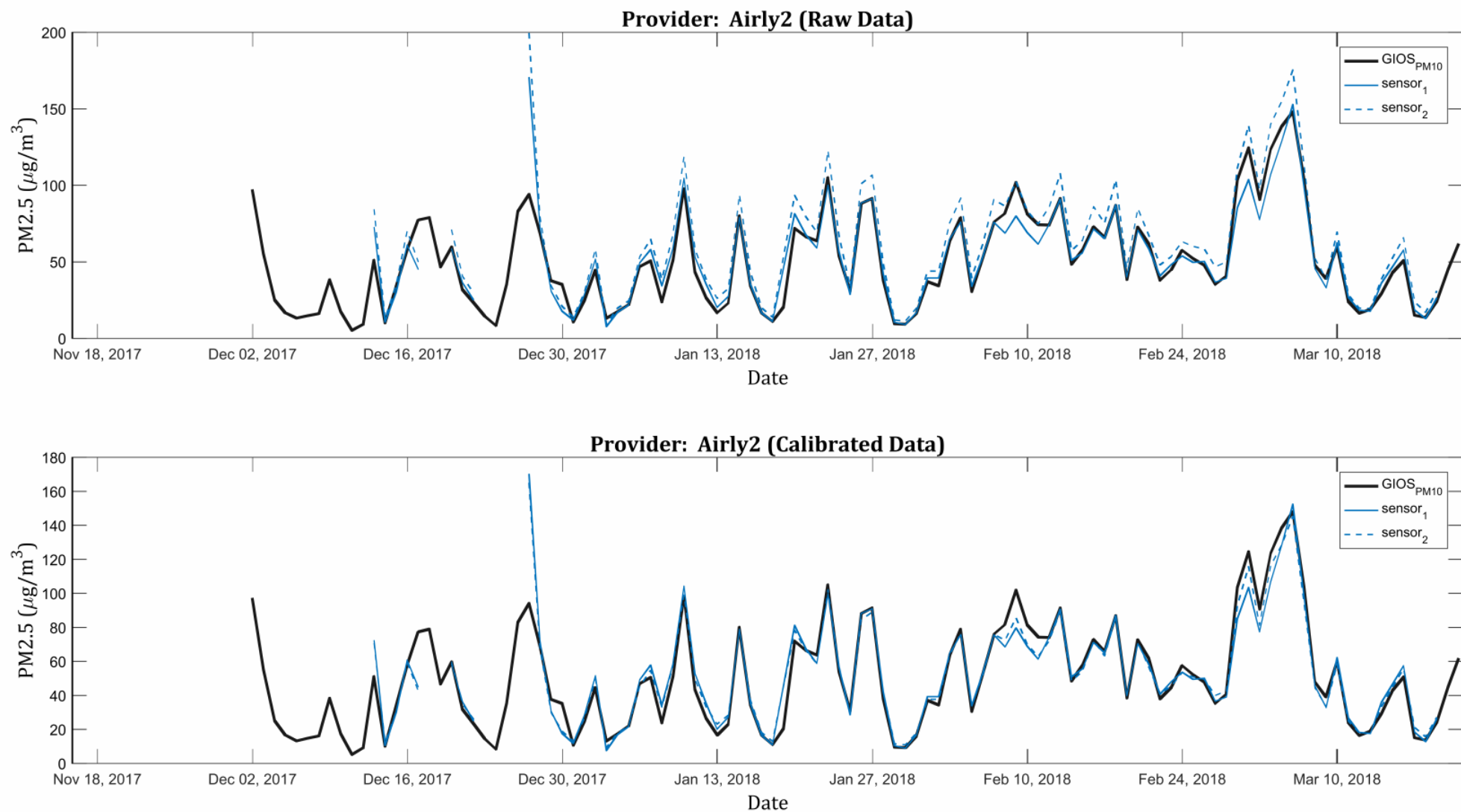
Rysunek C.7: Zestawienie wyników pomiarów stężenia średniodobowego pyłu PM10 dla firmy Vidiaq niebieskie linie z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ - czarna linia. Pierwszy wykres przedstawia dane dostarczone przez uczestnika. Wykres dolny przedstawia dane po rekaliibracji wykonanej przez autorów sprawozdania [2].



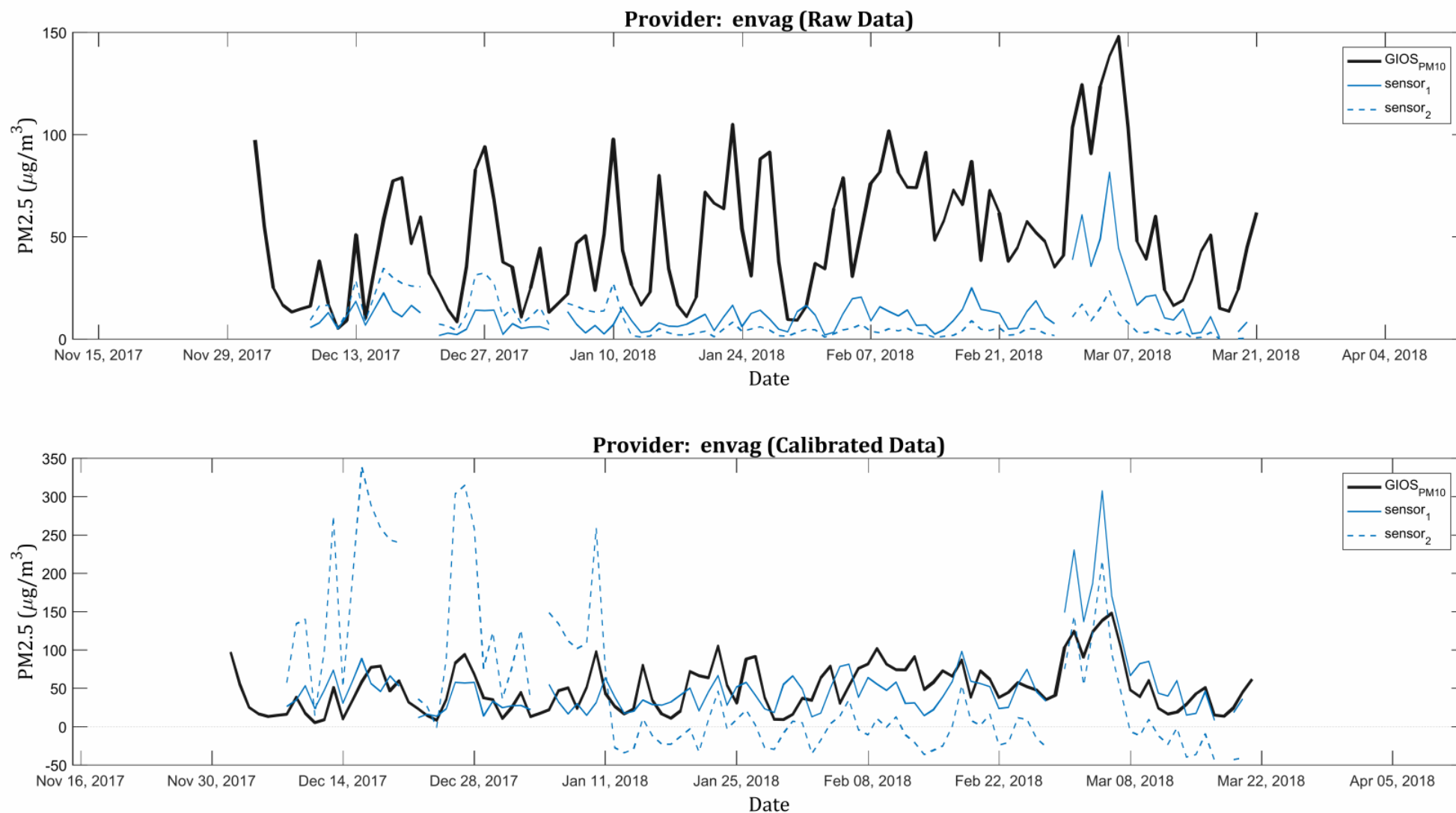
Rysunek C.8: Zestawienie wyników pomiarów stężenia średniodobowego pyłu PM10 dla firmy Xorbit niebieskie linie z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ - czarna linia. Pierwszy wykres przedstawia dane dostarczone przez uczestnika. Wykres dolny przedstawia dane po rekaliibracji wykonanej przez autorów sprawozdania [2].



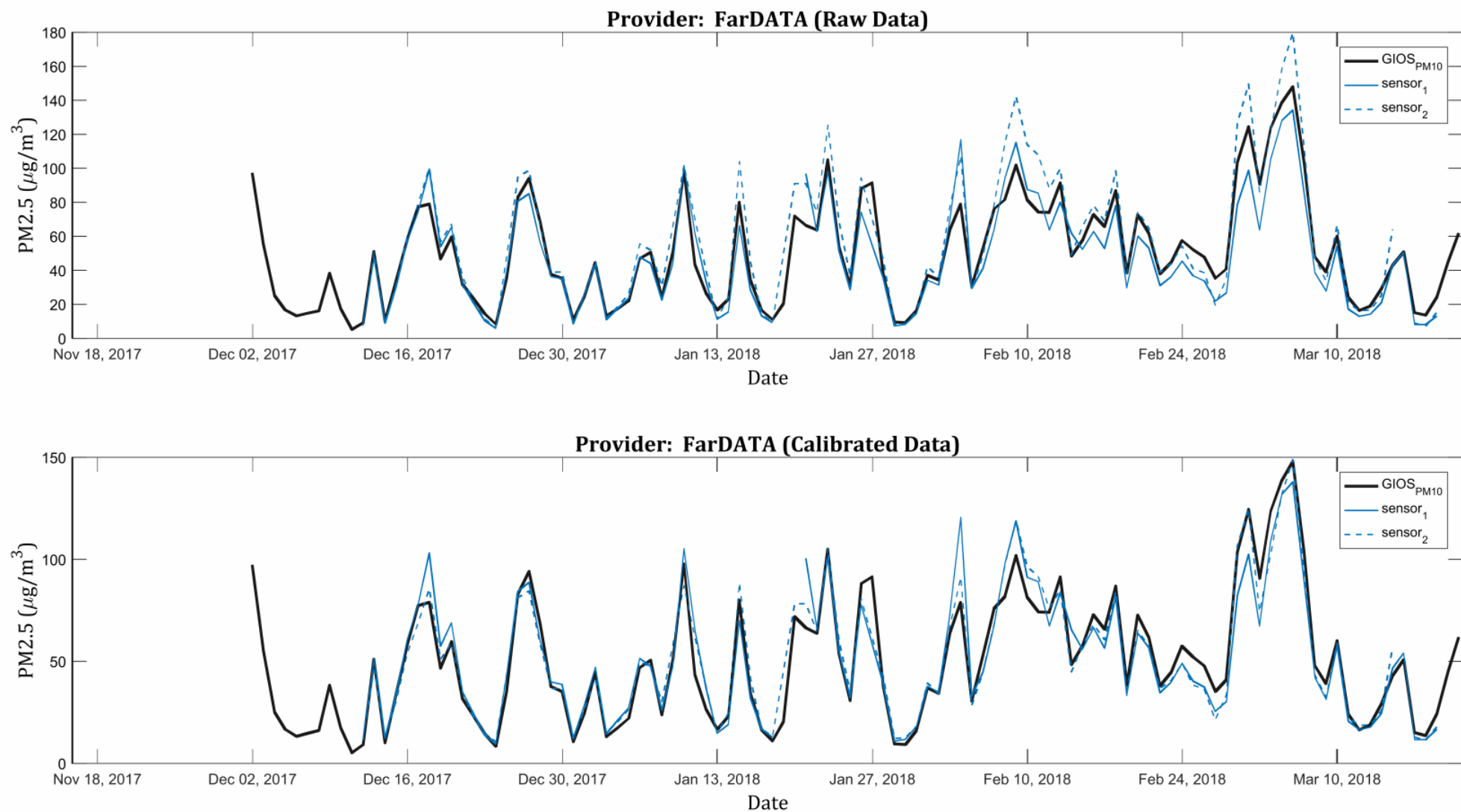
Rysunek C.9: Zestawienie wyników pomiarów stężenia średniodobowego pyłu PM2.5 dla czujników firmy Airly, zestaw A - niebieskie linie z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ - czarna linia. Pierwszy wykres przedstawia dane dostarczone przez uczestnika. Wykres dolny przedstawia dane po rekaliibracji wykonanej przez autorów sprawozdania [2].



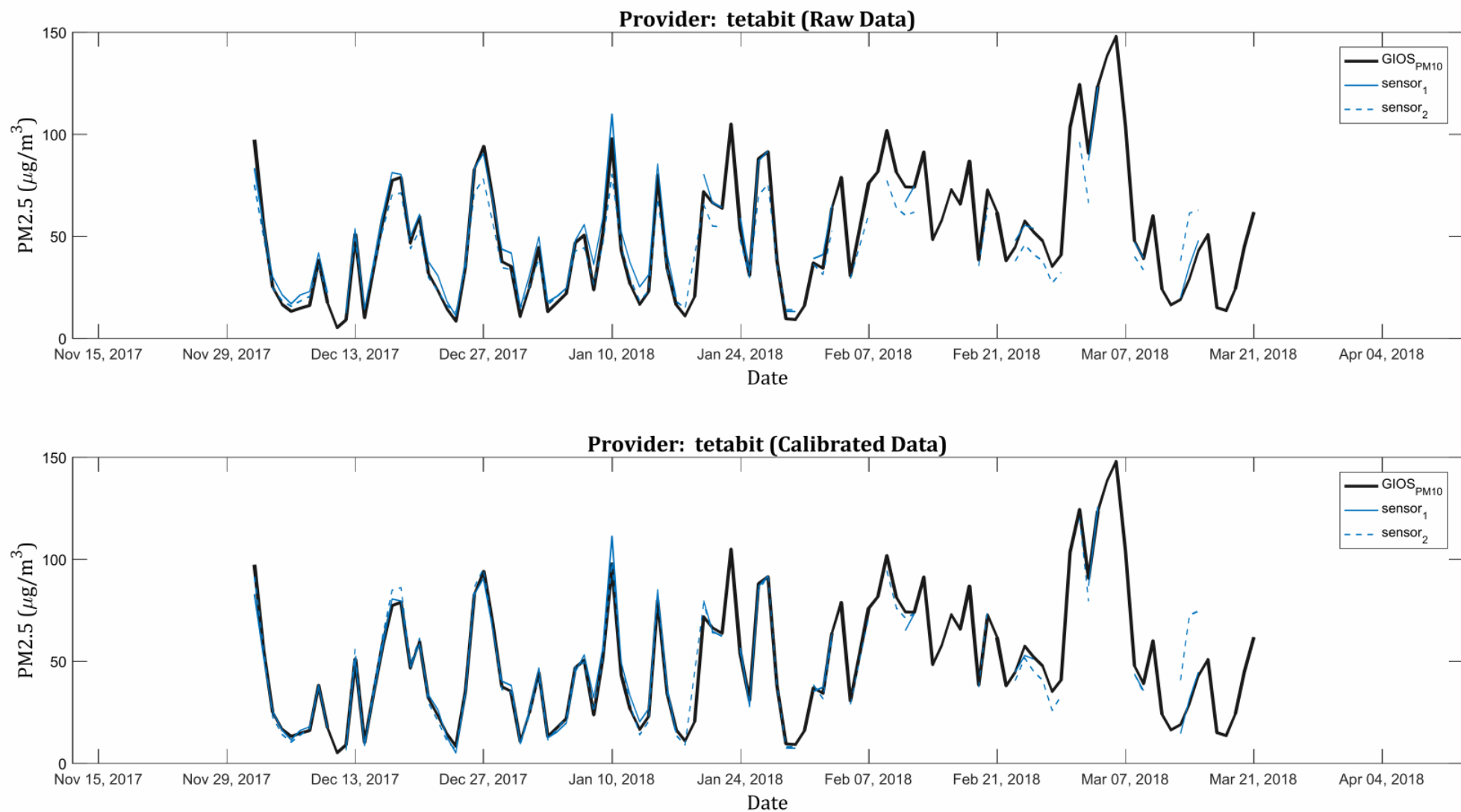
Rysunek C.10: Zestawienie wyników pomiarów stężenia średniodobowego pyłu PM2.5 dla czujników firmy Airly, zestaw B - niebieskie linie z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ - czarna linia. Pierwszy wykres przedstawia dane dostarczone przez uczestnika. Wykres dolny przedstawia dane po rekaliibracji wykonanej przez autorów sprawozdania [2].



Rysunek C.11: Zestawienie wyników pomiarów stężenia średniodobowego pyłu PM2.5 dla czujników Envag - niebieskie linie z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ - czarna linia. Pierwszy wykres przedstawia dane dostarczone przez uczestnika. Wykres dolny przedstawia dane po rekaliibracji wykonanej przez autorów sprawozdania [2].

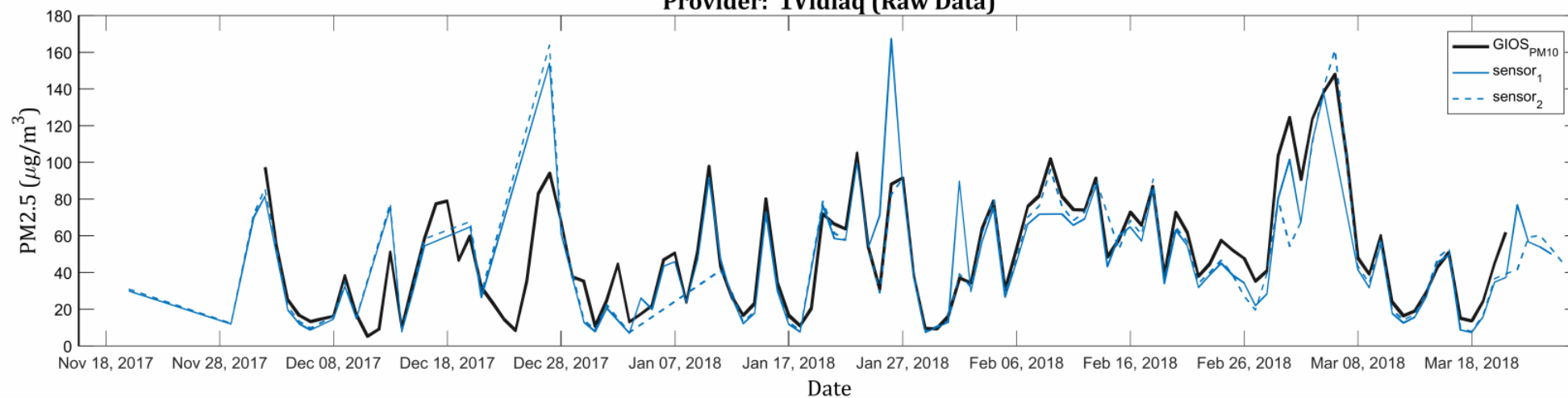


Rysunek C.12: Zestawienie wyników pomiarów stężenia średniodobowego pyłu PM2.5 dla firmy Far Data - niebieskie linie z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ - czarna linia. Pierwszy wykres przedstawia dane dostarczone przez uczestnika. Wykres dolny przedstawia dane po rekaliibracji wykonanej przez autorów sprawozdania [2].

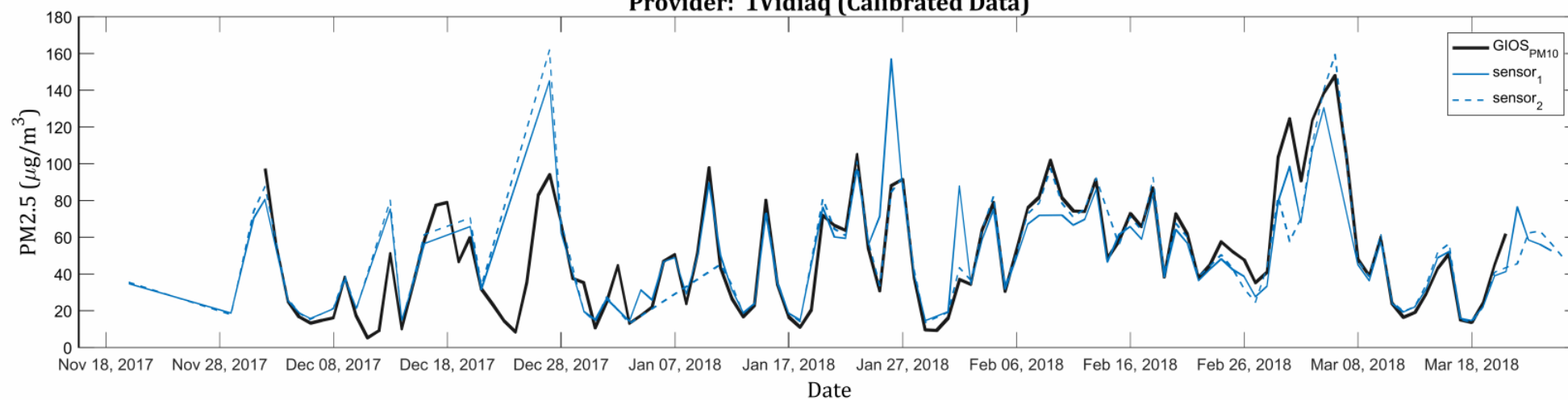


Rysunek C.13: Zestawienie wyników pomiarów stężenia średniodobowego pyłu PM2.5 dla firmy Tetabit niebieskie linie z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ - czarna linia. Pierwszy wykres przedstawia dane dostarczone przez uczestnika. Wykres dolny przedstawia dane po rekaliibracji wykonanej przez autorów sprawozdania [2].

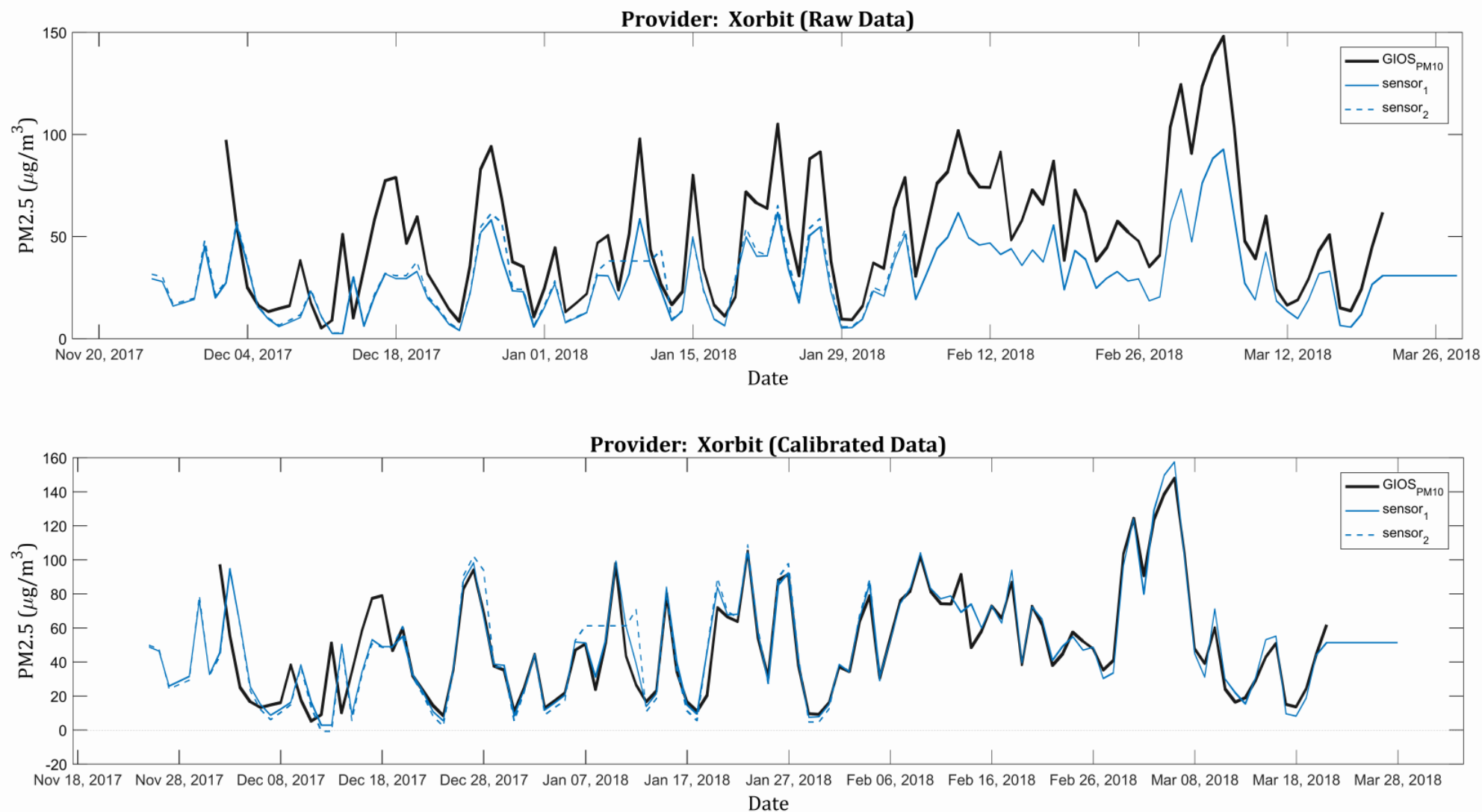
Provider: 1Vidiaq (Raw Data)



Provider: 1Vidiaq (Calibrated Data)



Rysunek C.14: Zestawienie wyników pomiarów stężenia średniodobowego pyłu PM_{2.5} dla firmy Vidiaq niebieskie linie z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ - czarna linia. Pierwszy wykres przedstawia dane dostarczone przez uczestnika. Wykres dolny przedstawia dane po rekaliibracji wykonanej przez autorów sprawozdania [2].



Rysunek C.15: Zestawienie wyników pomiarów stężenia średniodobowego pyłu PM2.5 dla firmy Xorbit niebieskie linie z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ - czarna linia. Pierwszy wykres przedstawia dane dostarczone przez uczestnika. Wykres dolny przedstawia dane po rekaliibracji wykonanej przez autorów sprawozdania [2].