Sprawozdanie z badań porównawczych urządzeń do pomiarów pyłu zawieszonego PM10 (urządzenia niereferencyjne i bez wykazanej równoważności do urządzeń referencyjnych)

Badania wykonane na podstawie porozumienia zawartego pomiędzy:

Województwem Małopolskim

Głównym Inspektoratem Ochrony Środowiska

Wojewódzkim Inspektoratem Ochrony Środowiska w Krakowie

Akademią Górniczo-Hutniczą im. Stanisława Staszica w Krakowie

oraz

Gminą Rabka – Zdrój,

we współpracy ze **Stowarzyszeniem Krakowski Alarm Smogowy**

w ramach projektu zintegrowanego LIFE „Małopolska w zdrowej atmosferze"

na podstawie danych dostarczonych przez:

Elkomp Jacek Kądziołka
ENVIMET Services sp. z o.o.
Solutions for Technology sp. z o.o.
TETABIT sp. z o.o.
Politechnika Warszawska

Kraków, styczeń 2018

Działanie w ramach realizacji projektu zintegrowanego LIFE „Wdrażanie Programu ochrony powietrza dla województwa małopolskiego – Małopolska w zdrowej atmosferze." LIFE14 IPE PL 021/LIFE IP MALOPOLSKA

Opracowanie

Bartyzel Jakub[1], Frączkowski Tomasz[2], Pindel Andrzej[2], Łyczko Piotr[3], Dąbrowska Ewa[3], Dworakowska Anna[4]

[1]Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie,
[2]Krajowe Laboratorium Referencyjne i Wzorcujące, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska,
[3]Departament Środowiska, Urząd Marszałkowski Województwa Małopolskiego,
[4] Stowarzyszenie Krakowski Alarm Smogowy

Status sprawozdania: Sprawozdanie końcowe

Sprawozdanie zawiera: 33 strony

Niniejsze sprawozdanie można powielać i cytować wyłącznie w całości. Cytowanie wyłącznie z podaniem źródła oraz autorów. Wykorzystanie fragmentów tekstu oraz grafik wyłącznie na podstawie pisemnej zgody Urzędu Marszałkowskiego Województwa Małopolskiego.

Spis treści:

1. Przedmiot prowadzonych badań 4
1.1 Cel i zakres badań 4
1.2 Przygotowanie do przeprowadzenia badań 4
1.3 Lokalizacja badań 4
1.4 Uczestnicy badań 6
1.5 Termin wykonania badań. 6
1.6 Prowadzenie badań 7
1.7 Metody badań 7
1.8 Niepewność pomiaru 7
2. Wyniki badań 8
3. Sposób oceny wyników 12
4. Wnioski 14
4. Bibliografia 15
5. Dodatek A 16

1. Przedmiot prowadzonych badań

1.1 Cel i zakres badań

Na terenie miasta Rabki-Zdrój wykonywane były badania porównawcze stężeń **pyłu zawieszonego PM10** w powietrzu atmosferycznym dla urządzeń działających w oparciu o metodyki niereferencyjne i bez wykazanej równoważności do metodyki referencyjnej. Badania wykonywano z wykorzystaniem procedury „testowania typu" zawartej w normie PN-EN 16450:2017 [2]. Ww. procedura opisuje zasady wykonywania testów bazujące na ocenie charakterystyki pracy dwóch urządzeń niereferencyjnych w odniesieniu do pomiarów referencyjnych, wykonywanych przy użyciu dwóch urządzeń referencyjnych. Celem badań było określenie przydatności **niskokosztowych** urządzeń do prowadzenia pomiarów w ocenie jakości powietrza w zmiennych warunkach meteorologicznych. Wnioski otrzymane na podstawie badań pozwolą ustalić, czy dany typ urządzeń może być przydatny do celów oceny jakości powierza, informacyjnych, czy jedynie edukacyjnych.

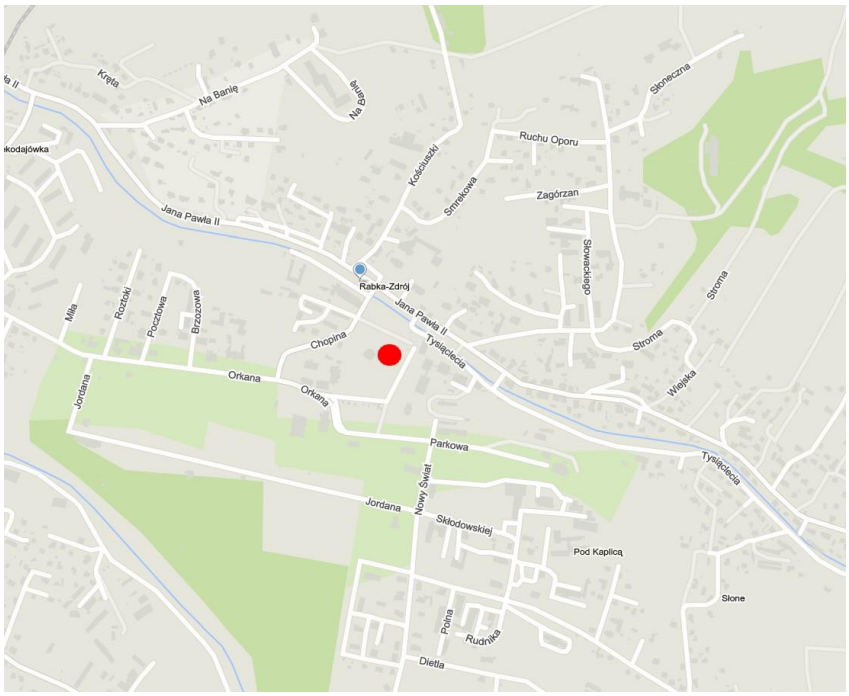
1.2 Przygotowanie do przeprowadzenia badań

Przed przystąpieniem do badań organizatorzy rozesłali zaproszenia oraz ogłosili na stronie internetowej UMWM (powietrze.malopolska.pl) informację skierowaną do producentów, dostawców oraz wszelkich osób czy instytucji wykorzystujących czujniki/mierniki pyłu zawieszonego PM10 nie posiadające certyfikatów równoważności do pomiarów referencyjnych.

1.3 Lokalizacja badań

Punkt pomiarowy zlokalizowany został na terenie ujęcia wody KRAKUS, przy budynku Uzdrowiska Rabka S.A. ul. Orkana 49, 34-700 Rabka Zdrój (długość geograficzna: E 19.966008, szerokość geograficzna: N 49.608647, wysokość 496 m n.p.m.). Lokalizacja punktu pomiarowego została dokonana zgodnie z wymogami zawartymi w *Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 13 września 2012 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu* oraz wytycznymi Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska dot. lokalizowania stacji pomiarowych.

Wybór miejsca badań podyktowany został kryterium braku dostępu do danych z oficjalnej stacji monitoringu powietrza, tak, by uczestnicy nie mieli możliwości wykonywania porównań otrzymywanych rezultatów do danych z innych, oficjalnych, systemów pomiarowych.



Rys.1 Lokalizacja punktu pomiarowego w miejscowości Rabka-Zdrój (maps.google.com)

Fot.1. Pobornik pyłowy zainstalowany w punkcie pomiarowym

Fot.2. Lokalizacja czujników do pomiaru pyłu zawieszonego PM10 w obrębie stacji pomiarowej

1.4 Uczestnicy badań

Ostatecznie do prowadzonych badań zgłosiło się pięć podmiotów:

- Elkomp Jacek Kądziołka
  ul. Jana Pawła II 8, 34-600 Limanowa
  NIP: 73717-57965, REGON 492688179

- ENVIMET Services sp. z o.o.
  Balicka 255, 30-198 Kraków
  NIP: 5851468823, REGON: 222081819

- Solutions for Technology sp. z o.o.
  Wspólna 3A, 45-837 Opole
  NIP: 8821876683, REGON: 891310667

- TETABIT sp. z o.o.
  Pozytywistów 22/14, 20-639 Lublin
  NIP: 9462623131, REGON: 060758061

- Politechnika Warszawska (Artur Badyda, Bogdan Dziadak, Mariusz Rogulski)
  Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska
  Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa
  NIP: 5250005834, REGON: 000001554

1.5 Termin wykonania badań.

Początek badań ustalono na dzień **15 lutego 2017** na godzinę 12:00, natomiast zakończenie badań ustalono na dzień **20 czerwca 2017** na godzinę 24:00. W prowadzonych analizach brano pod uwagę dane z okresu 18 lutego 2017 (godz. 1:00) do 20 czerwca 2017 (godz. 24:00). Z uwagi na okres rozruchowy z analizy odrzucono pierwsze trzy dni prowadzonych badań. Podczas analiz kompletności danych dla poszczególnych dostawców brano pod uwagę okres od momentu

zainstalowania danej pary czujników (dla dostawców, którzy nie dostarczyli urządzeń do dnia 18.02.2017 r.)

1.6 Prowadzenie badań

Przed rozpoczęciem badań każdy z uczestników dostarczył po dwa urządzenia pomiarowe tego samego typu, do wyznaczonego miejsca prowadzenia badań. Pod nadzorem pracowników Krajowego Laboratorium Referencyjnego i Wzorcującego Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska (KLRiW GIOŚ) uczestnicy badań zainstalowali urządzenia pomiarowe i skonfigurowali łączność, tak, by każde z urządzeń mogło przesyłać dane w sposób ciągły. Organizatorzy badań zapewnili uczestnikom zasilanie urządzeń jak również łączność z siecią Internet.

Jako urządzenie referencyjne do pomiaru stężeń pyłu zawieszonego PM10 zastosowano pobornik pyłowy firmy Leckel SEQ47/50. Pobrane filtry były ważone zgodnie z normą [2] w KLRiW GIOŚ.

Do weryfikacji pomiarów stężeń pyłów z rozdzielczością godzinną wykorzystano metodę automatyczną bazującą na rozpraszaniu promieniowania β^-, z wykorzystaniem urządzenia BAM 1020 firmy Met One Instruments, Inc. Pomiary z wykorzystaniem ww. miernika zostały zweryfikowane po zakończeniu badań w oparciu o metodę referencyjną.

1.7 Metody badań

Ze strony organizatorów przeprowadzono badania w oparciu o następujące normy:

PN-EN 12341:2014-07 Powietrze atmosferyczne – Standardowa grawimetryczna metoda pomiarowa do określania stężeń masowych frakcji PM10 lub PM 2,5 pyłu zawieszonego. [1]

PN-EN 16450:2017-05 Powietrze atmosferyczne - Automatyczne systemy pomiarowe do pomiarów stężenia pyłu zawieszonego (PM10; PM2,5). [2]

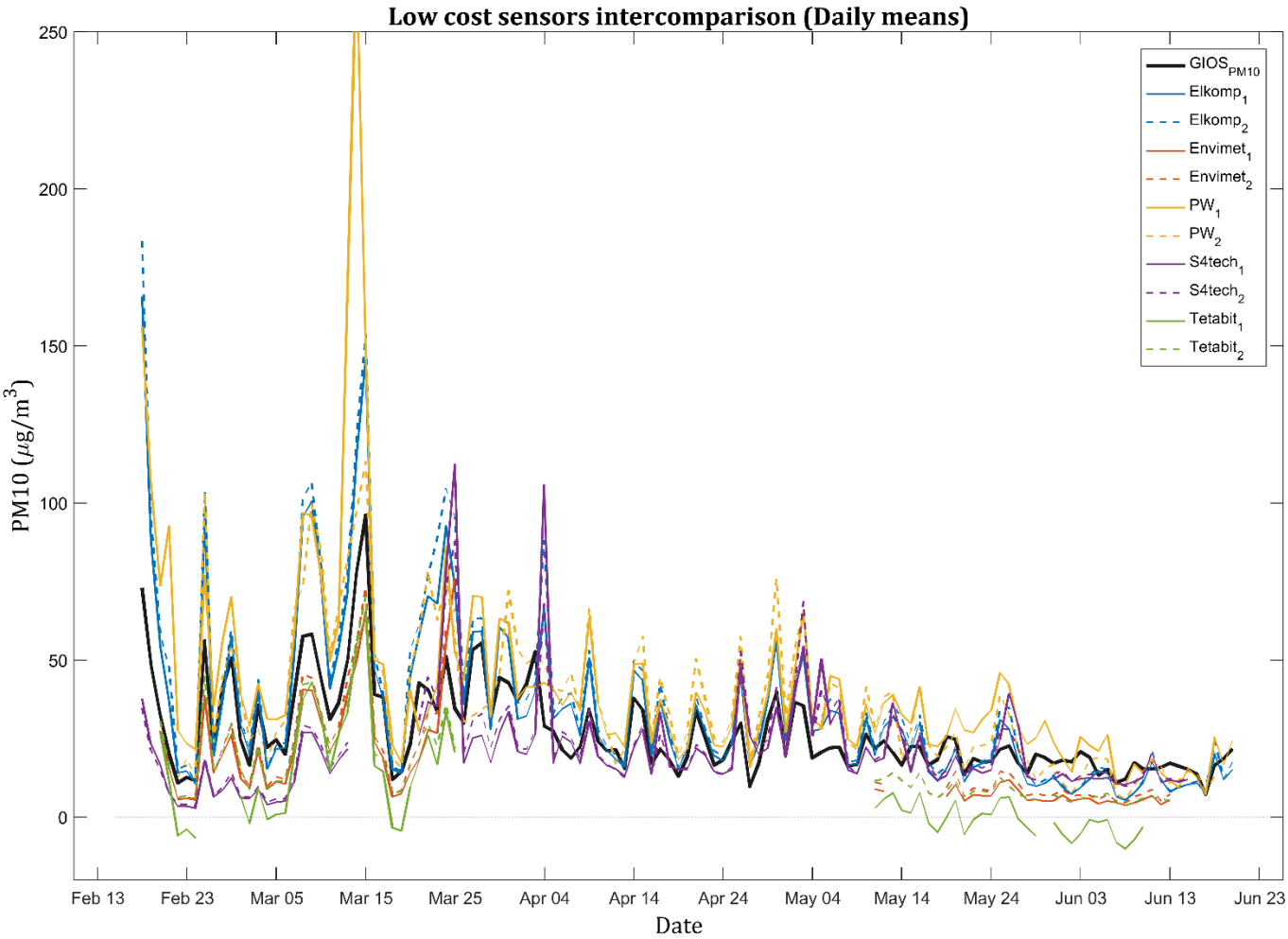
Ze względu na specyfikę prowadzenia badań, przede wszystkim obejmującą tylko jedną porę roku, badania nie miały charakteru wykazania równoważności testowanych czujników do metodyki referencyjnej, a jedynie stwierdzenie przydatności badanych czujników w prowadzeniu pomiarów stężeń pyłów zawieszonych do celów innych niż ocena jakości powietrza w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska (PMŚ).

1.8 Niepewność pomiaru

Niepewność pomiaru dla pobornika referencyjnego oszacowana została dla wartości granicznych w oparciu o normę: PN-EN 12341:2014-07 [1] (dla k=2 i poziomu ufności 95%). Oszacowana niepewność spełnia wymagania *Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 13 września 2012 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu*.

2. Wyniki badań

Wyniki badań z kampanii pomiarowej, ze wszystkich czujników oraz z pobornika grawimetrycznego (metoda referencyjna) w formie zbiorczej przedstawiono graficznie na rys. 1. Przedstawione wyniki to średniodobowe wartości stężeń pyłu zawieszonego PM10 wyznaczone z wartości godzinnych dla testowanych czujników (średnie dobowe wyznaczone zostały dla wszystkich urządzeń zgodnie z tą samą metodyką, uwzględniającą konieczność występowania danych z minimum 18 godzin doby dla wyznaczenia średniej) oraz dobowe wartości mierzone dla metody referencyjnej. Wyniki pomiarów dostarczane z rozdzielczością godzinową wykorzystane zostały w dalszej części niniejszego opracowania.



Rysunek 1. Dobowe wartości stężeń pyłu zawieszonego PM10 dla okresu trwania kampanii pomiarowej. Kolorem czarnym zaznaczono wartości z metody referencyjnej (GIOŚ), pozostałe linie barwne przedstawiają wartości stężeń PM10 dostarczone przez uczestników badań. Takim samym kolorem zaznaczono pary czujników dostarczonych do badań. Czujnik sygnowany numerem „1" został przedstawiony linią ciągłą natomiast numerem „2" linią przerywaną.

W pierwszej kolejności, zgodnie z normą PN-EN 16450:2017-05 [2], dokonano analizy kompletności danych oraz niepewności pomiędzy urządzeniami, w ramach par dostarczonych przez producentów (patrz tab. 1). Korelacje pomiędzy wartościami mierzonymi przez każde urządzenie z pary przedstawiono na rysunkach 2 – 6 w dodatku A do niniejszego sprawozdania.

Niepewność pomiędzy urządzeniami ($u_{bs,AMS}$) została wyznaczona zgodnie z normą [2] ze wzoru:

$$u_{bs,AMS} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_{i,1} - y_{i,2}\right)^2}{2n}$$

gdzie: $y_{i,1}$oraz $y_{i,2}$ – średniodobowe stężenia równoległych pomiarów z pary urządzeń dla *i*-tej doby, n – liczba dobowych pomiarów.

Tabela 1. Zestawienie wyników wstępnej oceny kompletności danych oraz niepewności w ramach par ocenianych urządzeń pomiarowych.

Dostawca	**Elkomp**	**Envimet**	**PW**	**s4tech**	**Tetabit**
P (dni)	123	121	122	122	121
N	123	62	112	110	61
N (%)	100	50	92	89	50
$u_{bs,AMS}$ (µg·m^{-3})	**3,5**	**2,1**	**7,2**	**3,8**	**6,0**
$w_{bs,AMS}$ (%)	9,9	12,0	20,2	17,4	50,0
N_{30}	53 (43%)	9 (15%)	50 (45%)	15 (14%)	7 (11%)
$u_{bs,AMS,30}$ (µg·m^{-3})	5,2	4,0	8,7	9,2	2,4
$w_{bs,AMS,30}$ (%)	8,7	8,0	16,7	18,5	5,4

gdzie:

P – całkowity czas trwania pomiarów dla każdego uczestnika uwzględniający datę pierwszego transferu danych oraz datę zakończenia pomiarów;

N – liczba średniodobowych wartości pochodzących z obu urządzeń uczestników, odpowiednio w dniach oraz w procentach pokrycia okresu prowadzenia badań;

$u_{bs,AMS}$ – niepewność wskazań pomiędzy dwoma urządzeniami zgodnie z normą [2];

$w_{bs,AMS}$ – względna niepewność wskazań pomiędzy dwoma urządzeniami odniesiona do wartości średniej wskazań, zgodnie z normą [2];

N_{30} – liczba średnich dobowych wartości pochodzących z obu urządzeń wyższych niż 30 µg·m^{-3}, wraz z podaną procentową frakcją z całkowitej liczby danych;

$u_{bs,AMS,30}$ – niepewność wskazań pomiędzy dwoma urządzeniami dla podzbioru danych o wartościach powyżej 30 µg·m^{-3} zgodnie z normą [2];

$w_{bs,AMS,30}$ – względna niepewność wskazań pomiędzy dwoma urządzeniami dla podzbioru danych o wartościach powyżej 30 µg·m^{-3} odniesiona do wartości średniej, zgodnie z normą [2].

Z uwagi na krótki czas trwania pomiarów oraz fakt, że dla większości urządzeń występuje wyłącznie kilka dni ze stężeniami pyłu zawieszonego powyżej 30 µg·m^{-3}, do dalszych analiz brano pod uwagę wyłącznie pełne serie pomiarowe, bez analizowania podzbioru wartości wyższych niż 30 µg·m^{-3}. Zgodnie z normą PN-EN 16450:2017-05 [2] do dalszego wykazywania równoważności kwalifikują się **wyłącznie** urządzenia, dla których wartość $u_{bs,AMS}$ nie może być większa niż **2,5 µg·m^{-3}**. Z testowanych urządzeń wyłącznie jedno, firmy Envimet, spełnia powyższe kryterium. **Biorąc jednak pod uwagę fakt, że celem prowadzonych badań NIE BYŁO wykazywanie równoważności testowanych urządzeń z metodyką referencyjną, przeprowadzono dalsze analizy dla wszystkich urządzeń.**

W odniesieniu do metodyki referencyjnej, na podstawie normy PN-EN 16450:2017-05 [2], przeprowadzono kalkulację rozszerzonej niepewności względnej W_{AMS} dla każdego z testowanych urządzeń (dwa urządzenia od każdego z uczestników badań). Oceny rozszerzonej niepewności względnej dokonano na danych surowych oraz po wyznaczeniu zależności pomiędzy metodą automatyczną a metodą referencyjną (w oparciu o regresję liniową, por. rys. 7 do 11 w dodatku A). Kalkulacje zostały przeprowadzone w oparciu o arkusze wyznaczania zgodności „Orthogonal regression and equivalence test utility" dostarczone przez RIVM (Dutch Institute for Public Health

and the Environment, dep. Centre for Environment Monitoring) [3], oraz opracowania własne. Otrzymane wyniki W_{AMS} przed i po kalibracji oraz współczynniki kalibracji dla każdego z urządzeń przedstawiono w tabeli 2. Zgodnie z normą PN-EN 16450:2017-05 [2] jako urządzenia równoważne z metodyką referencyjną uznaje się takie, dla których W_{AMS} jest mniejsza od 25%. **Z testowanych urządzeń żadne nie spełniło powyższego kryterium** - jeśli wziąć pod uwagę dane surowe pochodzące od dostawców (nieskalibrowane). Natomiast po kalibracji W_{AMS} mniejszą od 25%, wyznaczono dla urządzeń firmy Tetabit. Wg normy kryterium W_{AMS} może zostać zwiększone do 50% dla urządzeń stosowanych do pomiarów okresowych stężenia pyłów zawieszonych. Łagodniejsze kryterium, po kalibracji spełniają urządzenia firm: Elkomp, Envimet oraz Politechniki Warszawskiej. Wykresy zmienności stężeń w czasie trwania kampanii przed i po kalibracji dla każdej z firm przedstawiono na rysunkach 12 do 16 w dodatku A do niniejszego sprawozdania. Na wykresach wyraźnie widać poprawę jakości wskazań po wykonaniu kalibracji dla większości urządzeń.

Tabela 2. Zestawienie parametrów zgodności wyników testowanych urządzeń z wartościami pochodzącymi z metodyki referencyjnej.

Dostawca		**Elkomp**		**Envimet**		**PW**		**s4tech**		**Tetabit**	
No		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
N		123	123	62	62	122	112	110	110	61	67
N_{out}		5 (4%)	7 (6%)	1 (2%)	2 (3%)	5 (4%)	3 (3%)	4 (4%)	5 (5%)	2 (3%)	1 (1%)
$\overline{C}_{RM}$ (µg·m^{-3})		27,1	27,1	27,8	27,8	26,9	25,4	26,7	26,7	26,6	27,2
$\overline{C}_{AMS}$ (µg·m^{-3})		34,0	37,1	16,5	18,5	40,8	35,1	21,4	21,7	7,8	15,9
W_{AMS} (%)		**124,7**	**161,5**	**62,3**	**50,4**	**212,9**	**120,6**	**124,9**	**64,0**	**78,9**	**63,3**
$AMS_i = B \cdot RM_i + A$	$a = \frac{1}{B}$	0,51	0,45	1,08	1,05	0,40	0,57	0,50	0,81	1,02	1,23
	$b = \frac{A}{B}$	-9,73	-10,26	-9,98	-8,42	-10,68	-5,31	-15,97	-8,97	-18,69	-7,64
W_{AMS} po kalibracji (%)		**29,1**	**33,3**	**40,3**	**32,9**	**42,2**	**29,8**	**74,7**	**55,2**	**20,7**	**16,8**

gdzie:

No – numer urządzenia z pary dostarczonej przez daną firmę;

N – liczba średniodobowych wartości stężeń pochodzących z każdego z urządzeń;

N_{out} – liczba średniodobowych wartości stężeń odrzuconych ze zbioru danych testowych z uwagi na duże odstępstwo od wartości referencyjnych;

$\overline{C}_{RM}$- średnia wartość stężenia pyłu zawieszonego PM10 z metodyki referencyjnej w okresie analizowanym dla danego urządzenia testowanego;

$\overline{C}_{AMS}$- średnia wartość stężenia pyłu zawieszonego PM10 z testowanego urządzenia automatycznego;

W_{AMS} – względna niepewność rozszerzona dla metody automatycznej (względem poziomu dopuszczalnego - 50 ug/m^3) zgodnie z normą [2];

$a = \frac{1}{B}$ – współczynnik nachylenia krzywej kalibracji;

$b = \frac{A}{B}$ – przesunięcie krzywej kalibracji;

W_{AMS} po kalibracji – względna niepewność rozszerzona dla metody automatycznej (względem poziomu dopuszczalnego - 50 ug/m^3) po zastosowaniu równania regresji wyznaczonego dla danych surowych (wyznaczeniu zależności pomiędzy metodą automatyczną a metodą referencyjną zgodnie z normą [2];

3. Sposób oceny wyników

Ocena ilościowa wyników pomiarów porównawczych została przeprowadzona na podstawie analizy trzech parametrów ($u_{bs,AMS}$, W_{AMS}, N) w oparciu o normę [2]. W celu ujednolicenia otrzymanych wyników odniesiono otrzymane wartości parametrów do ich wartości docelowych. Dla niepewność wskazań pomiędzy dwoma urządzeniami ($u_{bs,AMS}$) przyjęto, zgodnie z normą [2], wartość docelową równą 2,5 µg·m^{-3}, dla względnej niepewności rozszerzonej dla metody automatycznej (W_{AMS}) przyjęto wartość docelową równą 25% (dla poziomu dopuszczalnego dla PM10 – 50 µg·m^{-3}). Ponieważ każdy z dostawców przekazał do porównania dwa urządzenia, do dalszych kalkulacji brano wyższą wartość W_{AMS} zgodnie z założeniami normy [2]. Otrzymane wyniki odniesiono do wartości docelowych i przedstawiono w procentach. Kompletność danych (N), dla każdego z dostawców, odniesiono do wartości docelowej 100%, przy czym wyznaczono również parametr będący odwrotnością kompletności danych (1/N), w celu porównania wartości z wyznaczonymi powyżej. W celu skomasowania trzech wyznaczonych parametrów dla każdego z urządzeń jako ostateczny parametr liczbowy opisujący jakość dostarczanych danych wyznaczono skumulowaną wartość będącą pierwiastkiem sumy kwadratów wyznaczonych parametrów procentowych podzielonych przez trzy (K). Zaznaczyć należy, że **im mniejsza wartość współczynnika K tym bardziej precyzyjne, dokładne i kompletne są wskazania urządzenia**. Otrzymane wyniki dla wszystkich urządzeń przedstawiono w tabeli 3. Dla urządzenia, którego wszystkie parametry mieszczą się w zakresach wartości docelowych wartość K będzie niższa niż 100%. **Żadne z testowanych urządzeń nie osiągnęło takiego wyniku.** Najniższą wartość współczynnika K odnotowano dla urządzenia firmy Elkomp.

Tabela 3. Zbiorcze wyniki badań porównawczych z wyznaczonymi parametrami spełnienia wartości docelowych dla parametrów $u_{bs,AMS}$, W_{AMS} oraz N.

Dostawca	Elkomp	Envimet	PW	s4tech	Tetabit
$u_{bs,AMS}$ (µg·m^{-3})	3.5	2.1	7.2	3.8	6
$u_{bs,AMS}$ (%$_{\text{wartości docelowej}}$)	**140**	**84**	**288**	**152**	**240**
$_{max}W_{AMS}$ po kalibracji (%)	33	40	42	75	21
$_{max}W_{AMS}$ po kalibracji (%$_{\text{wartości docelowej}}$)	**133**	**161**	**169**	**299**	**83**
N (%)	100	50	91	89	50
1/N (%)	**100**	**198**	**110**	**112**	**202**
K (%)	**126**	**155**	**203**	**204**	**187**

gdzie:

$u_{bs,AMS}$ – niepewność wskazań pomiędzy dwoma urządzeniami (wyrażona w µg·m^{-3} oraz w procentach wartości docelowej wynoszącej 2,5 µg·m^{-3});

$_{max}W_{AMS}$ po kalibracji – większa z dwóch wartości rozszerzonej niepewność względnej wskazań pomiędzy urządzeniem testowanym po skalibrowaniu a metodyką referencyjną (wyrażona w % wartości docelowej przyjętej dla frakcji PM10 oraz procentach wartości granicznej przyjmowanej przy wykazywaniu równoważności – 25%);

N – procentowe pokrycie danymi okresu pomiarowego przyjętego dla danej pary urządzeń;

K – pierwiastek sumy kwadratów procentowych wartości $u_{bs,AMS}$, $_{max}W_{AMS}$ po kalibracji oraz 1/N podzielonych przez trzy.

Dodatkowo przeprowadzono ocenę jakościową wskazań testowanych urządzeń. W tym celu określono wpływ parametrów meteorologicznych na wartości stężeń wyznaczanych przez każde urządzenie. Do analiz wykorzystano wartości godzinne stężeń pyłu zawieszonego PM10 oraz wartości godzinne pomiarów wilgotności powietrza dostarczone przez KLRiW GIOŚ. W oparciu o wartości godzinne stężeń pyłu zawieszonego pochodzące z testowanych urządzeń wyznaczono różnicę pomiędzy wskazaniami urządzeń a wskazaniami pochodzącymi z metody z wykazaną równoważnością do metodyki referencyjnej. Powyższe różnice skorelowano z wartościami względnej wilgotności powietrza dla

każdej godziny pomiarów. Otrzymane zależności przedstawiono na rysunkach od 17 do 21. Najwyraźniej wpływ wilgotności powietrza na mierzone wartości widać w przypadku urządzeń firm s4tech oraz Envimet. W obu przypadkach urządzenia wykazują rozrzut wartości w stosunku do metody równoważnej w kierunku wartości ujemnych oraz dodatnich bez wyraźnych zależności w przedziale wilgotności niemal do 99%, natomiast dla wilgotności najwyższych, dla których spodziewać się można kondensacji w powietrzu kropel wody (mgły) urządzenia obu firm wyraźnie zawyżają wartości w stosunku do metodyki równoważnej, odpowiednio do 60 oraz 30 $\mu g \cdot m^{-3}$. W przypadku urządzeń firmy Elkomp oraz Politechniki Warszawskiej widać wyłącznie rosnący trend w stosunku do metodyki równoważnej z referencyjną dla zakresu wilgotności względnych powyżej 90%. Może to oznaczać wpływ wilgotności na kondycję całego układu pomiarowego natomiast nie można zaobserwować wpływu kondensującej pary wodnej na układ optyczny urządzeń. Dla pozostałych firm nie wykazano wpływu wilgotności na wskazania urządzeń pomiarowych.

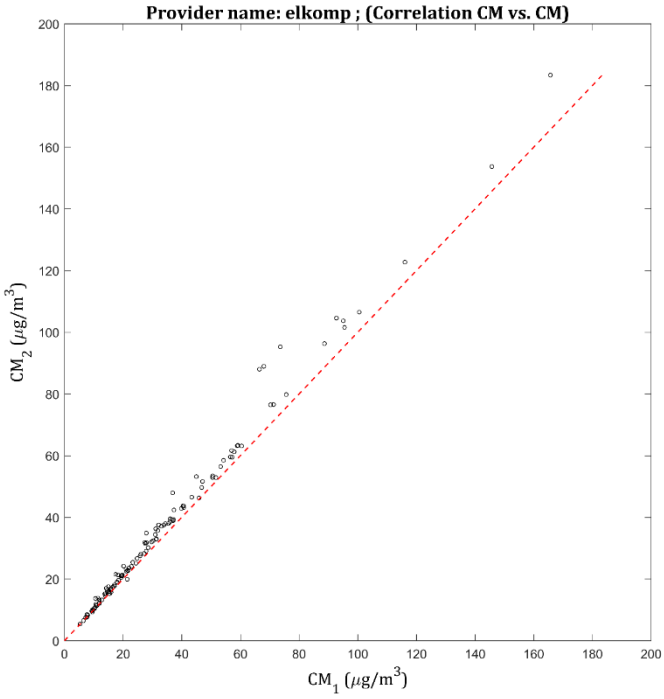
4. Wnioski

1. Podstawowym kryterium oceny przyjętym w niniejszym opracowaniu zgodnie z normą [2] jest zgodność wskazań pomiędzy dwoma testowanymi urządzeniami niereferencyjnymi tego samego typu. Otrzymane rezultaty dla 5 par urządzeń wykazały, iż jedynie w przypadku urządzeń dostarczonych przez firmę Envimet tan warunek został spełniony (jednakże ilość danych brana pod uwagę była w przypadku urządzeń firmy Envimet znacząco mniejsza, niż w przypadku pozostałych testowanych urządzeń). W przypadku pozostałych testowanych urządzeń otrzymane rezultaty zgodności wskazań nie spełniły stawianych kryteriów. **Uzyskane rezultaty wskazują na brak zgodności wskazań pomiędzy parą takich samych urządzeń pomiarowych, co prowadzić może do wniosku, iż nawet stosując urządzenia pomiarowe (czujniki) jednakowego typu otrzymane wartości stężeń pyłu zawieszonego mogą się od siebie znacząco różnić.**
2. Żadne z testowanych urządzeń nie spełniło wymagań zapisanych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 13 września 2012 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu (Dz. U. z 2012 r. poz. 1032) w odniesieniu do wymagań dotyczących jakości pomiarów powietrza – **wymagana rozszerzona niepewność pomiarowa dla pomiarów ciągłych nie może być większa niż 25% wartości docelowej (50 $\mu g \cdot m^{-3}$ dla PM10)**.
3. W przypadku urządzeń wykazujących wyraźną wrażliwość mierzonych stężeń na wysokie wartości wilgotności powietrza istnieje bardzo duże ryzyko zawyżania wskazań podczas niekorzystnych warunków meteorologicznych. **Powyższy problem praktycznie dyskwalifikuje wspomniane urządzenia ze stosowania ich na zewnątrz budynków w chłodnej porze roku.**

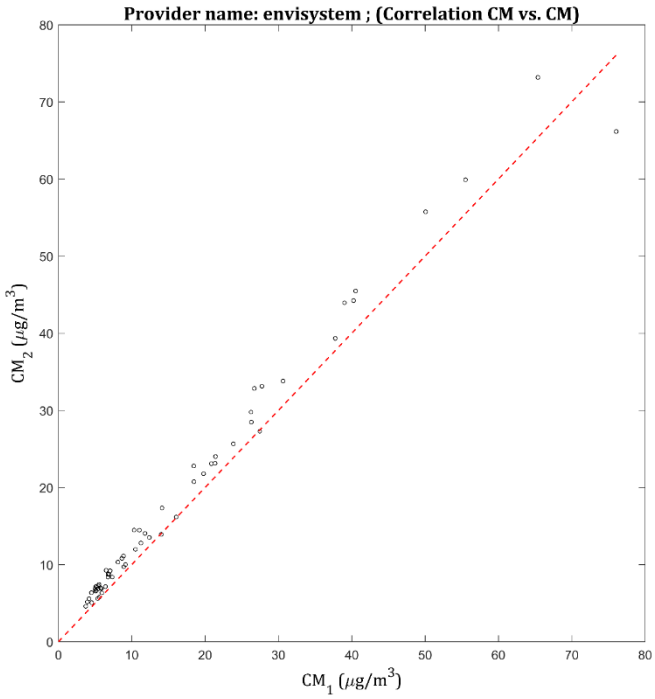
4. Bibliografia

1. PN-EN 12341:2014-07 Powietrze atmosferyczne – Standardowa grawimetryczna metoda pomiarowa do określania stężeń masowych frakcji PM10 lub PM 2,5 pyłu zawieszonego.
2. PN-EN 16450:2017-05 Powietrze atmosferyczne - Automatyczne systemy pomiarowe do pomiarów stężenia pyłu zawieszonego (PM10; PM2,5).
3. Orthogonal regression and equivalence test utility, version 2.9, RIVM (Dutch Institute for Public Health and the Environment, dep. Centre for Environment Monitoring)

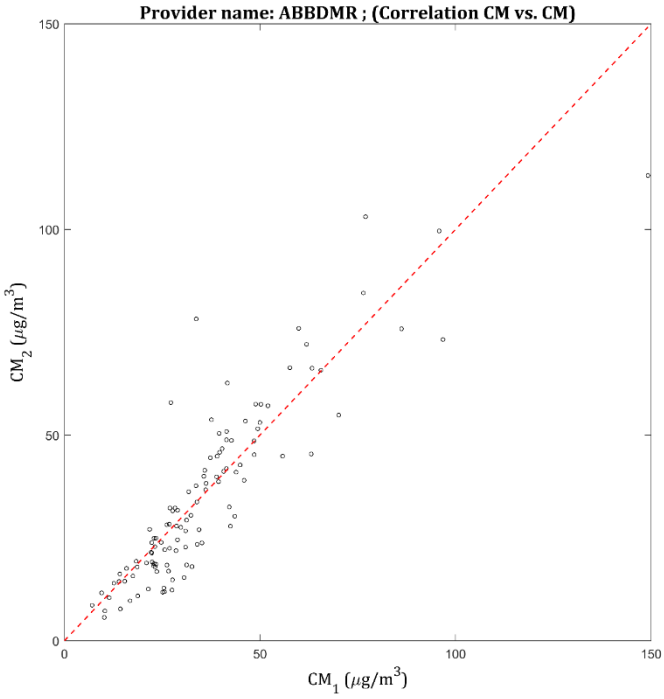
5. Dodatek A



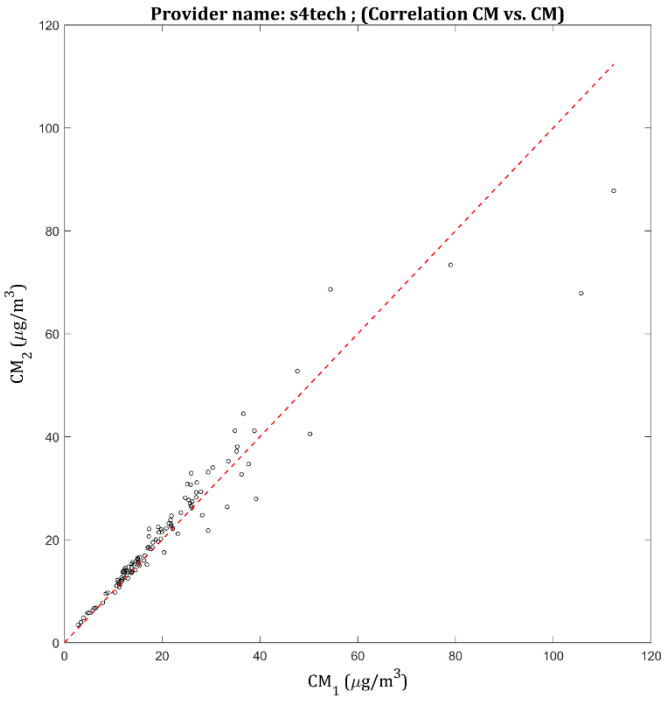
Rysunek 2. Zależność pomiędzy wartościami mierzonymi przez poszczególne urządzenia dostarczone przez firmę Elkomp. Czarnymi okręgami zaznaczono mierzone wartości, linią czerwoną relację tożsamościową ($CM_1 = CM_2$).



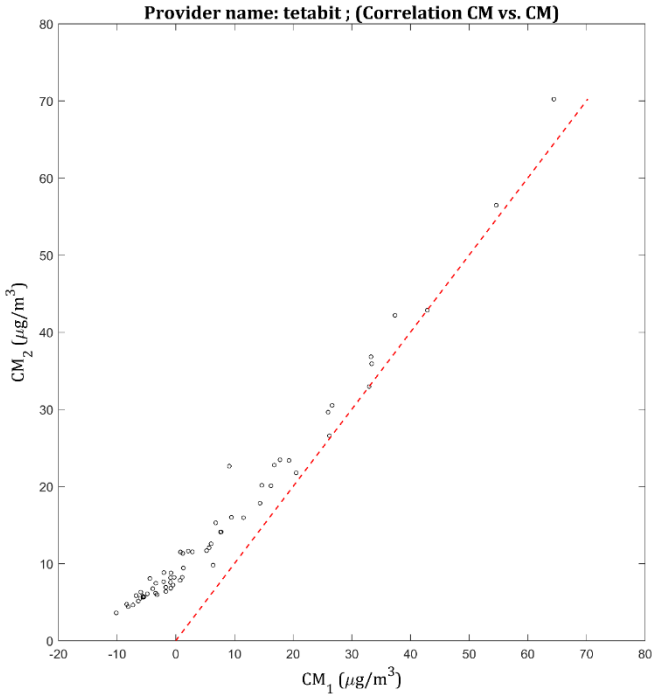
Rysunek 3. Zależność pomiędzy wartościami mierzonymi przez poszczególne urządzenia dostarczone przez firmę Envimet. Czarnymi okręgami zaznaczono mierzone wartości, linią czerwoną relację tożsamościową ($CM_1 = CM_2$).



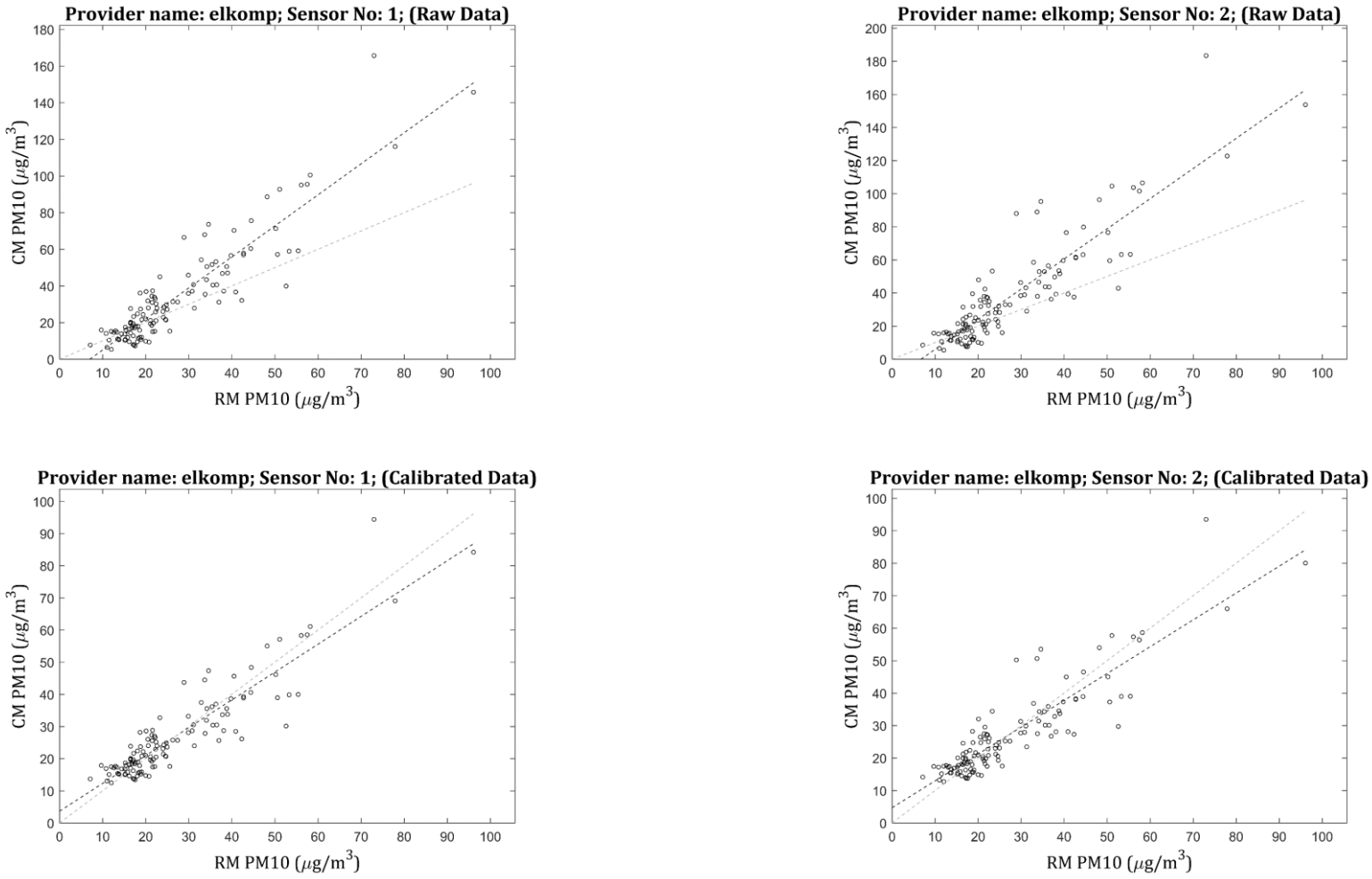
Rysunek 4. Zależność pomiędzy wartościami mierzonymi przez poszczególne urządzenia dostarczone przez Politechnikę Warszawską. Czarnymi okręgami zaznaczono mierzone wartości, linią czerwoną relację tożsamościową ($CM_1 = CM_2$).



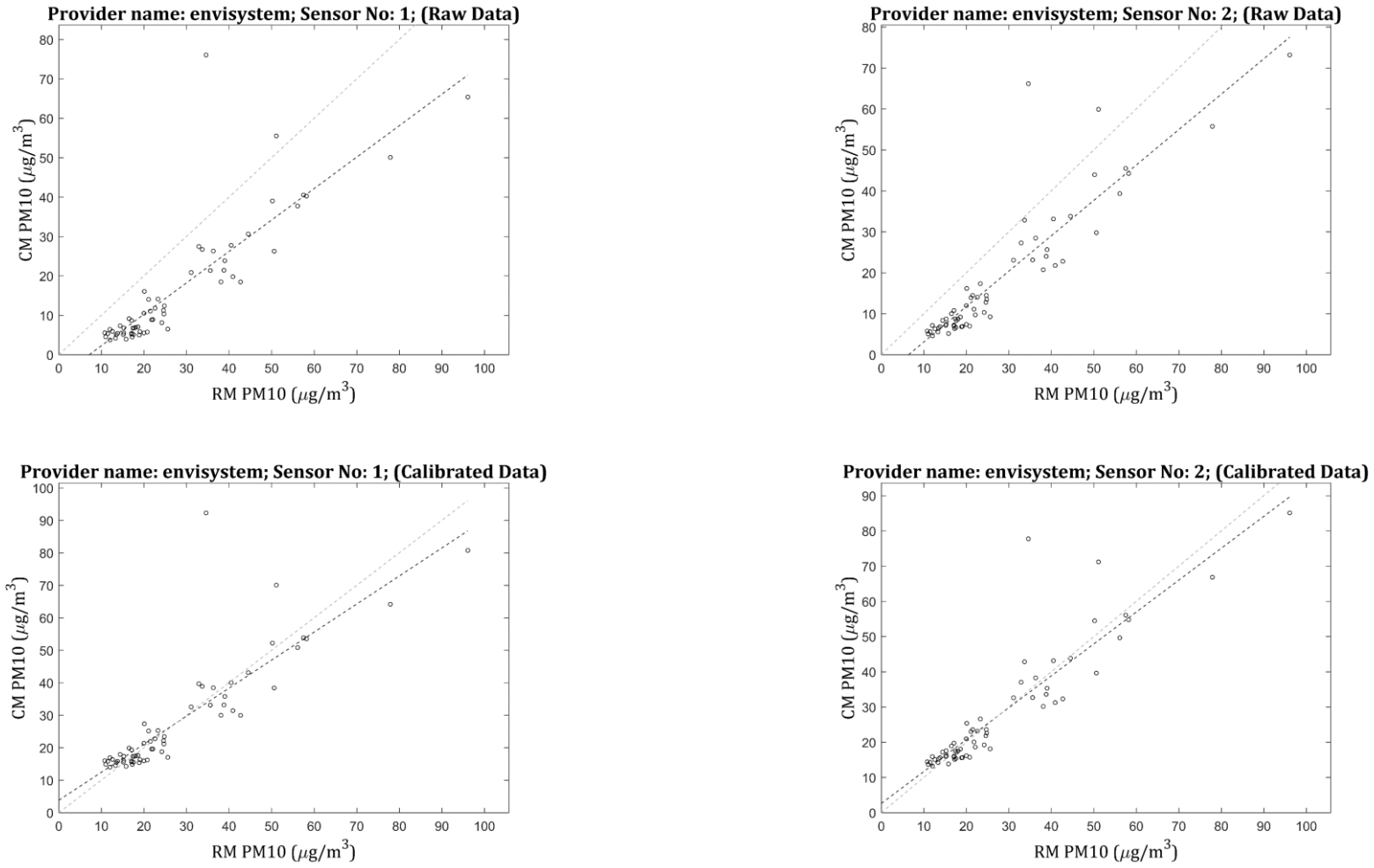
Rysunek 5. Zależność pomiędzy wartościami mierzonymi przez poszczególne urządzenia dostarczone przez firmę s4tech. Czarnymi okręgami zaznaczono mierzone wartości, linią czerwoną relację tożsamościową ($CM_1 = CM_2$).



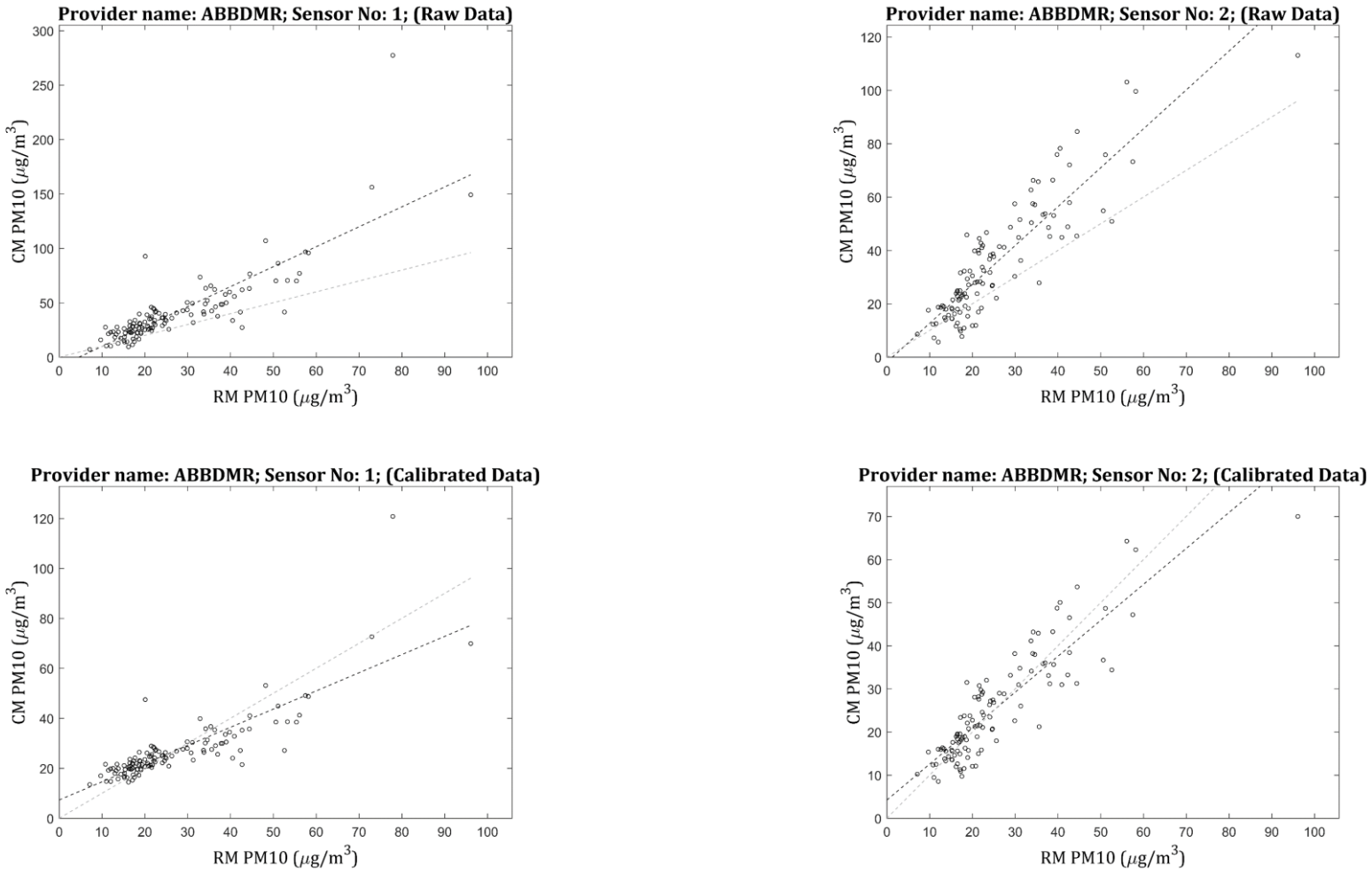
Rysunek 6. Zależność pomiędzy wartościami mierzonymi przez poszczególne urządzenia dostarczone przez firmę Tetabit. Czarnymi okręgami zaznaczono mierzone wartości, linią czerwoną relację tożsamościową ($CM_1 = CM_2$).



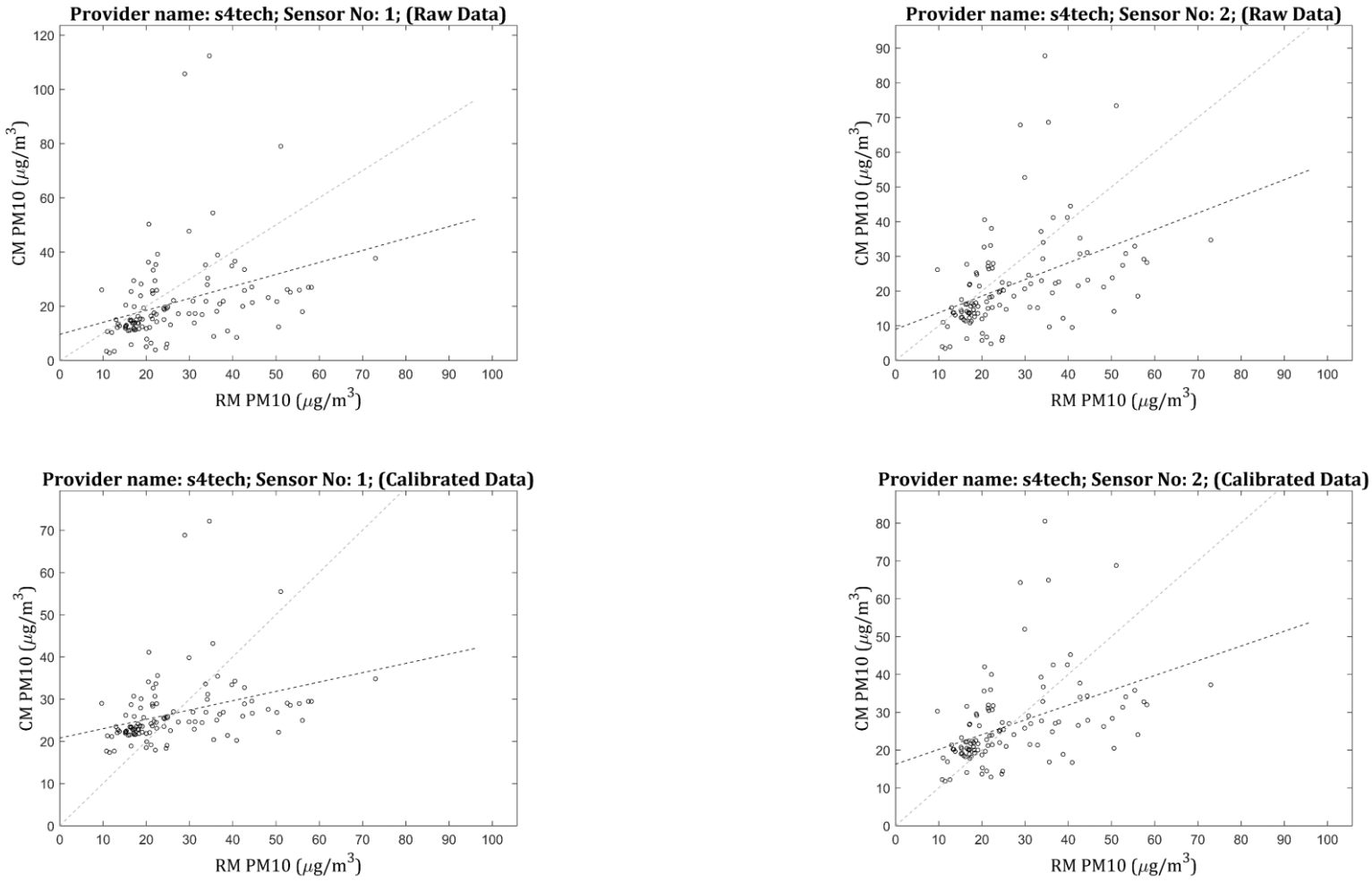
Rysunek 7. Krzywe korelacji pomiędzy wartościami mierzonymi przez testowane urządzenia (CM) dostarczone przez firmę Elkomp a metodyką referencyjną (RM), niezależnie dla obu testowanych czujników (panel lewy czujnik nr 1, panel prawy czujnik nr 2). Na górnych wykresach przedstawiono zależności przed dokonaniem kalibracji urządzeń, na dolnych po wykonaniu kalibracji. Czarnymi okręgami przedstawiono wartości mierzone, czarną linią przerywaną - krzywą regresji liniowej (CM = B · RM + A), szarą linią przerywaną - relację tożsamościową (CM = RM).



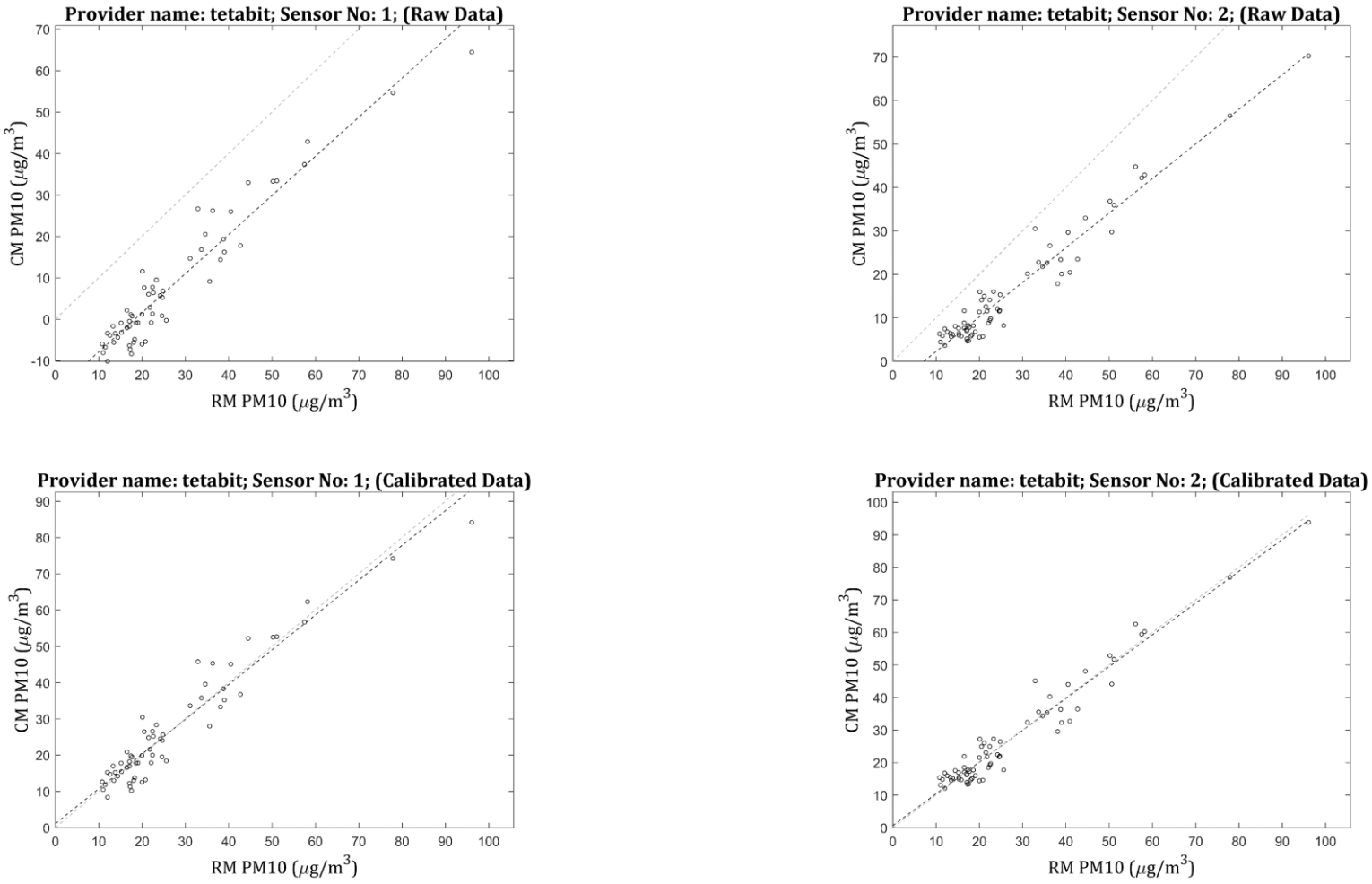
Rysunek 8. Krzywe korelacji pomiędzy wartościami mierzonymi przez testowane urządzenia (CM) dostarczone przez firmę Envimet a metodyką referencyjną (RM), niezależnie dla obu testowanych czujników (panel lewy czujnik nr 1, panel prawy czujnik nr 2). Na górnych wykresach przedstawiono zależności przed dokonaniem kalibracji urządzeń, na dolnych po wykonaniu kalibracji. Czarnymi okręgami przedstawiono wartości mierzone, czarną linią przerywaną - krzywą regresji liniowej (CM = B · RM + A), szarą linią przerywaną - relację tożsamościową (CM = RM).



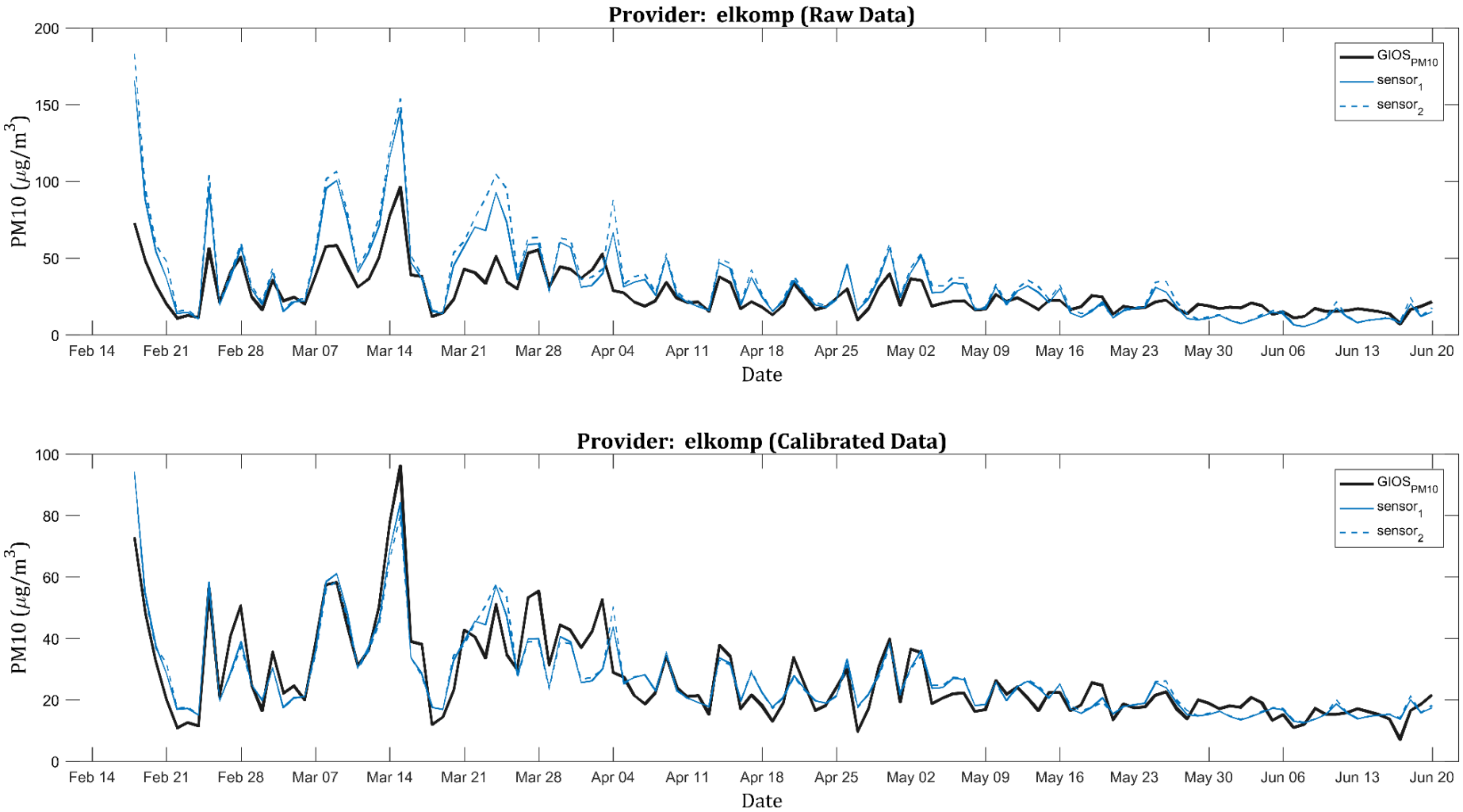
Rysunek 9. Krzywe korelacji pomiędzy wartościami mierzonymi przez testowane urządzenia (CM) dostarczone przez Politechnikę Warszawską a metodyką referencyjną (RM), niezależnie dla obu testowanych czujników (panel lewy czujnik nr 1, panel prawy czujnik nr 2). Na górnych wykresach przedstawiono zależności przed dokonaniem kalibracji urządzeń, na dolnych po wykonaniu kalibracji. Czarnymi okręgami przedstawiono wartości mierzone, czarną linią przerywaną - krzywą regresji liniowej (CM = B · RM + A), szarą linią przerywaną - relację tożsamościową (CM = RM).



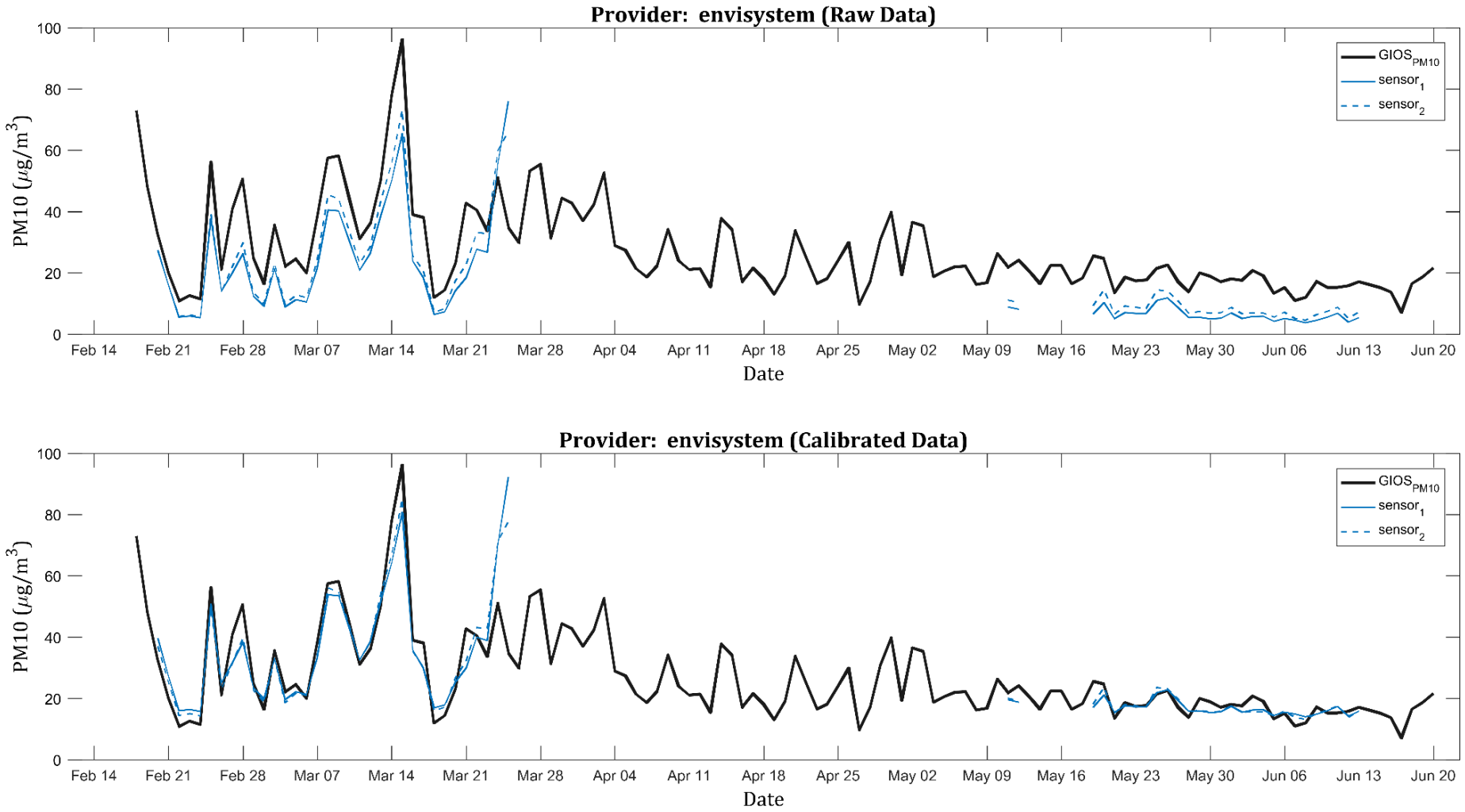
Rysunek 10. Krzywe korelacji pomiędzy wartościami mierzonymi przez testowane urządzenia (CM) dostarczone przez firmę s4tech a metodyką referencyjną (RM), niezależnie dla obu testowanych czujników (panel lewy czujnik nr 1, panel prawy czujnik nr 2). Na górnych wykresach przedstawiono zależności przed dokonaniem kalibracji urządzeń, na dolnych po wykonaniu kalibracji. Czarnymi okręgami przedstawiono wartości mierzone, czarną linią przerywaną - krzywą regresji liniowej (CM = B · RM + A), szarą linią przerywaną - relację tożsamościową (CM = RM).



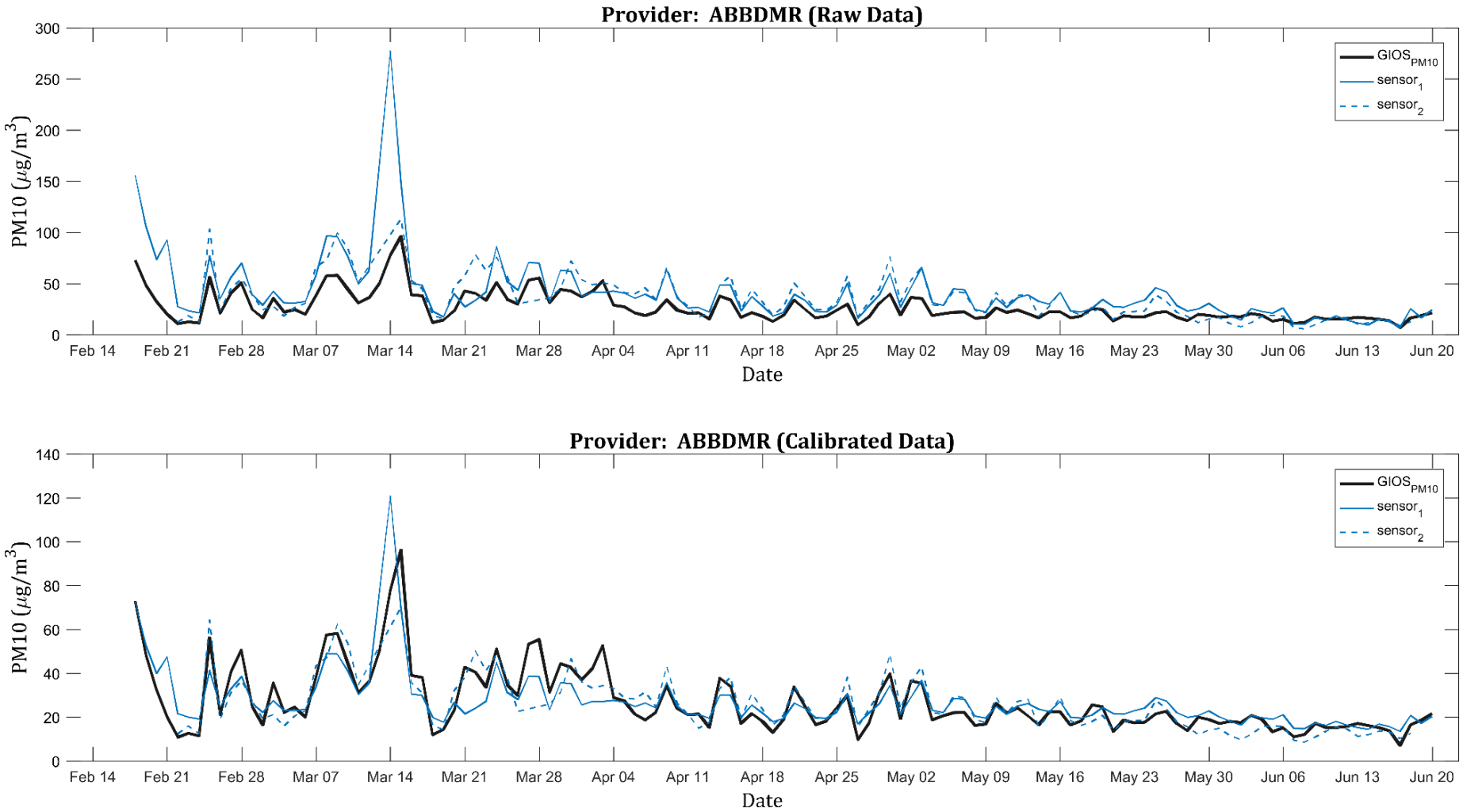
Rysunek 11. Krzywe korelacji pomiędzy wartościami mierzonymi przez testowane urządzenia (CM) dostarczone przez firmę Elkomp a metodyką referencyjną (RM), niezależnie dla obu testowanych czujników (panel lewy czujnik nr 1, panel prawy czujnik nr 2). Na górnych wykresach przedstawiono zależności przed dokonaniem kalibracji urządzeń, na dolnych po wykonaniu kalibracji. Czarnymi okręgami przedstawiono wartości mierzone, czarną linią przerywaną - krzywą regresji liniowej (CM = B · RM + A), szarą linią przerywaną - relację tożsamościową (CM = RM).



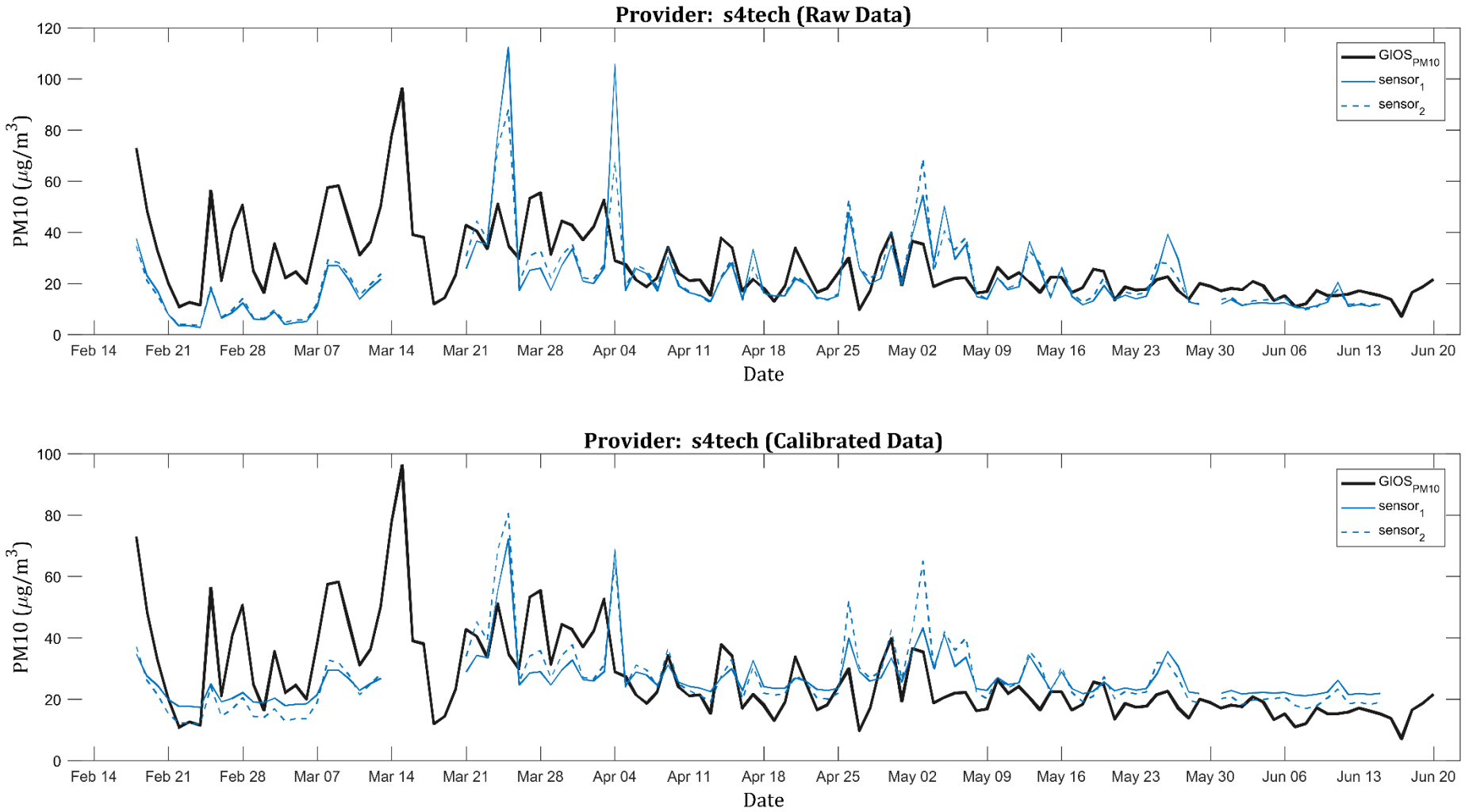
Rysunek 12. Przebiegi wartości stężeń pyłu zawieszonego PM10 pochodzące z dwóch urządzeń firmy Elkomp – niebieskie linie, w porównaniu z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ – czarna linia. Na górnym panelu przedstawiono wartości przed kalibracją, na dolnym po kalibracji.



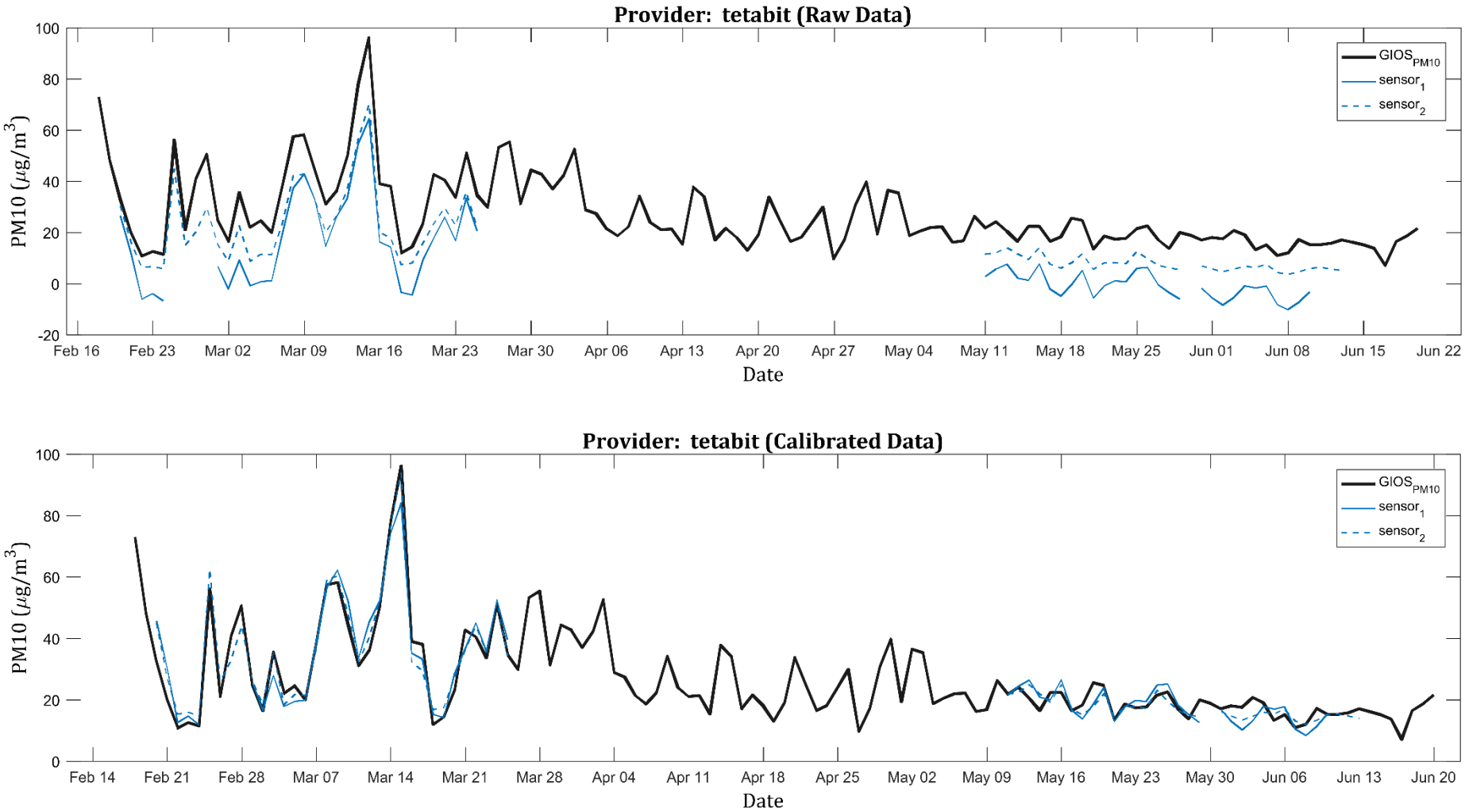
Rysunek 13. Przebiegi wartości stężeń pyłu zawieszonego PM10 pochodzące z dwóch urządzeń firmy Envimet – niebieskie linie, w porównaniu z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ – czarna linia. Na górnym panelu przedstawiono wartości przed kalibracją, na dolnym po kalibracji.



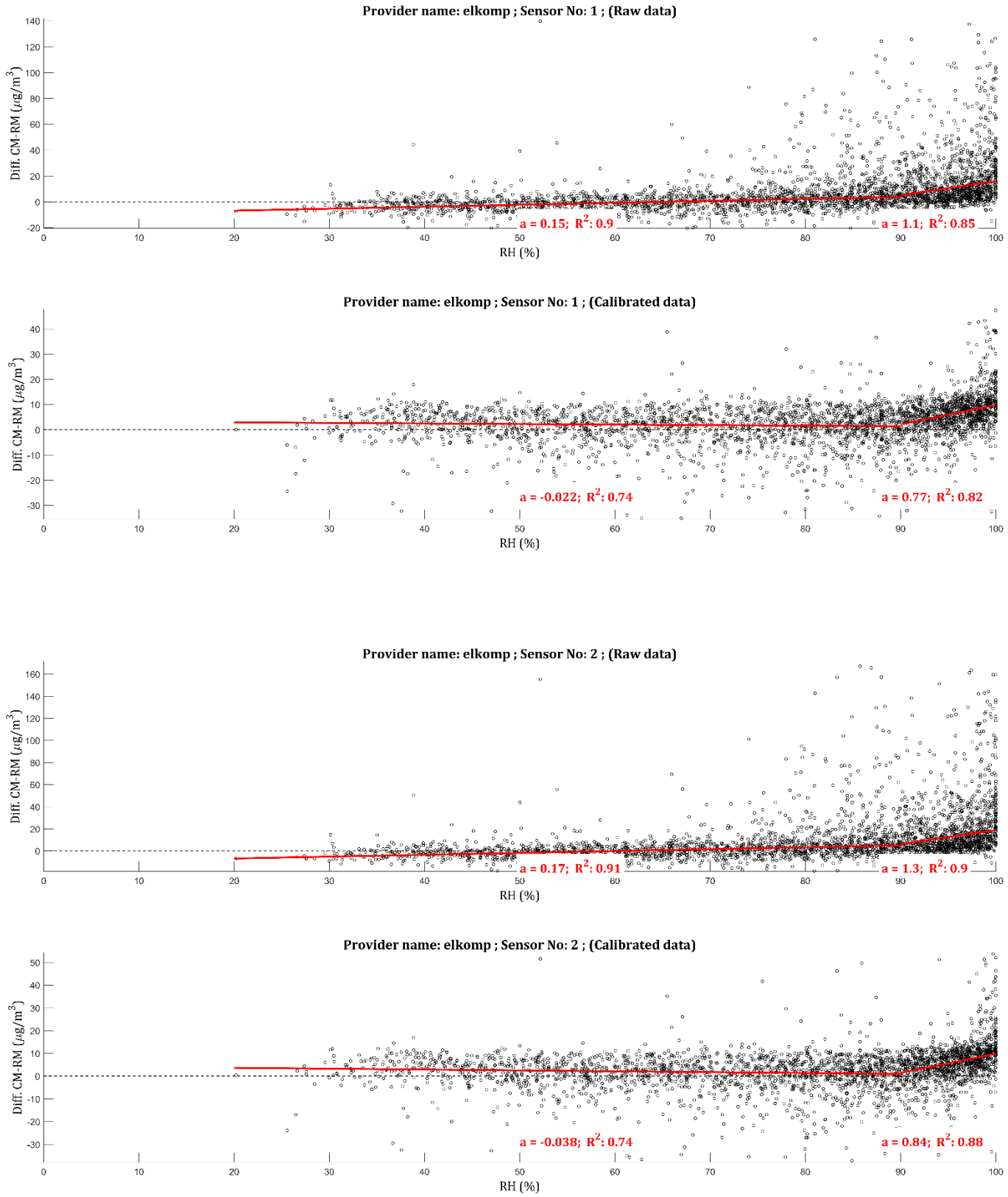
Rysunek 14. Przebiegi wartości stężeń pyłu zawieszonego PM10 pochodzące z dwóch urządzeń Politechniki Warszawskiej – niebieskie linie, w porównaniu z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ – czarna linia. Na górnym panelu przedstawiono wartości przed kalibracją, na dolnym po kalibracji.



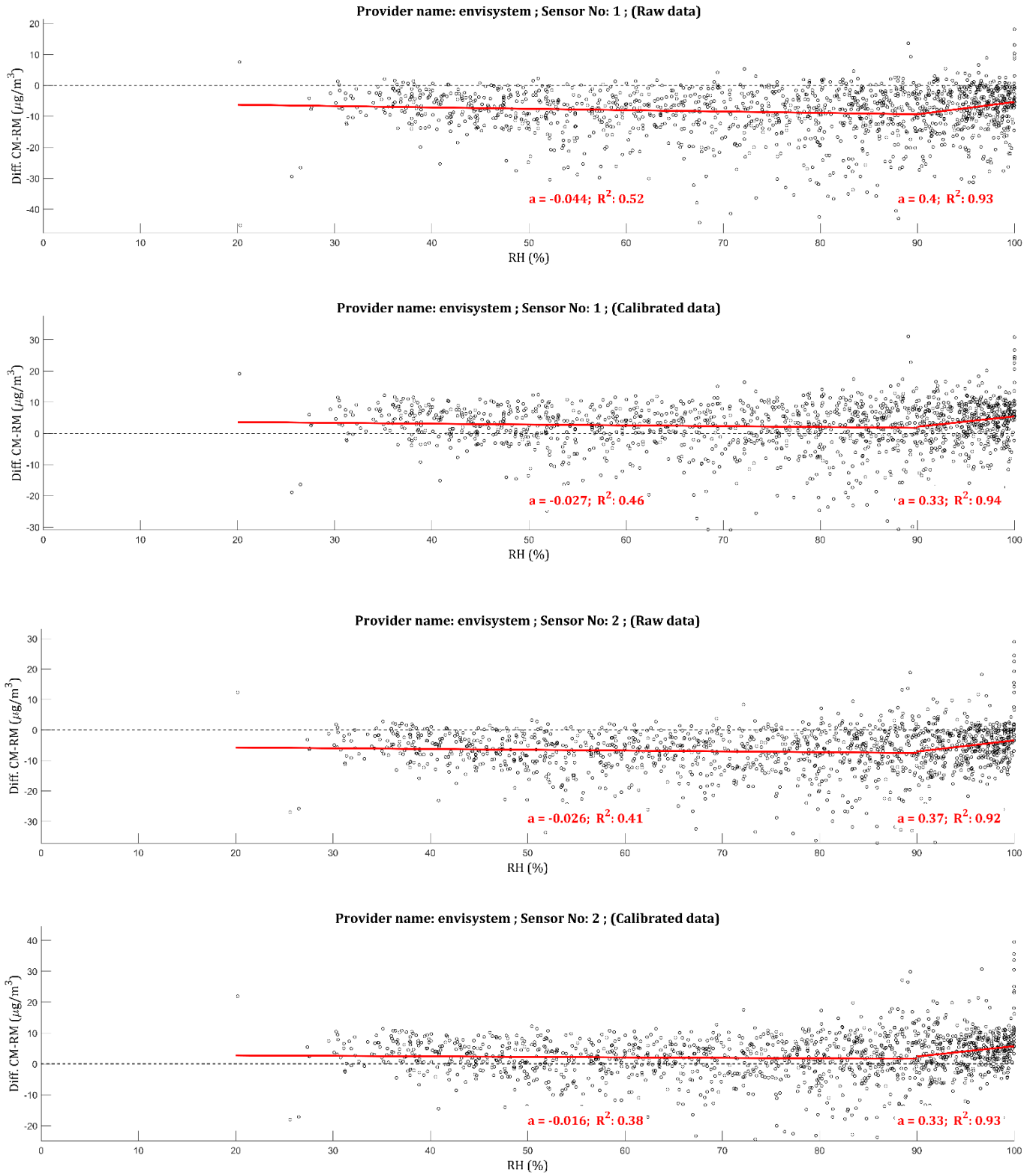
Rysunek 15. Przebiegi wartości stężeń pyłu zawieszonego PM10 pochodzące z dwóch urządzeń firmy s4tech – niebieskie linie, w porównaniu z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ – czarna linia. Na górnym panelu przedstawiono wartości przed kalibracją, na dolnym po kalibracji.



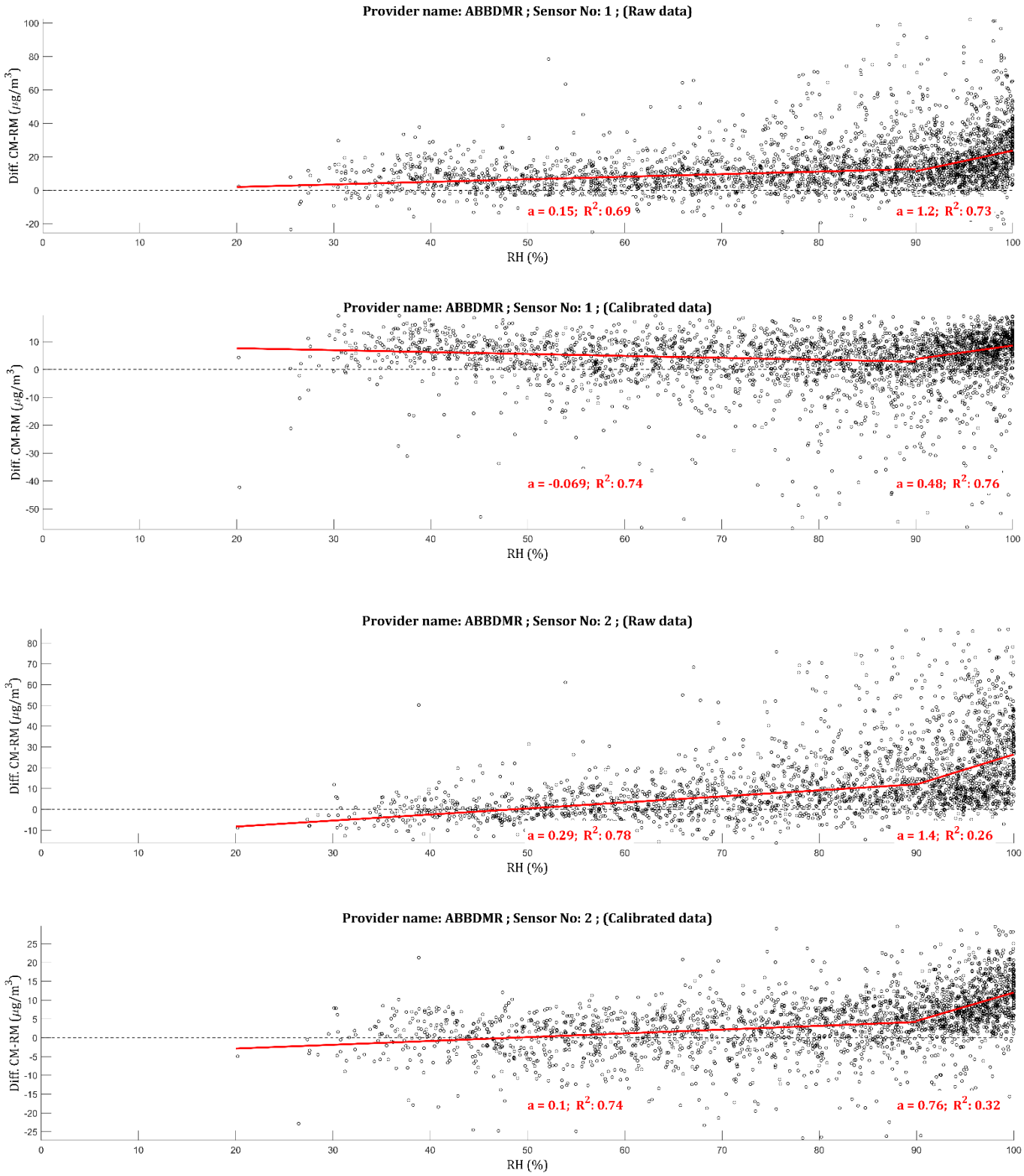
Rysunek 16. Przebiegi wartości stężeń pyłu zawieszonego PM10 pochodzące z dwóch urządzeń firmy Tetabit – niebieskie linie, w porównaniu z wartościami dostarczonymi przez KLRiW GIOŚ – czarna linia. Na górnym panelu przedstawiono wartości przed kalibracją, na dolnym po kalibracji.



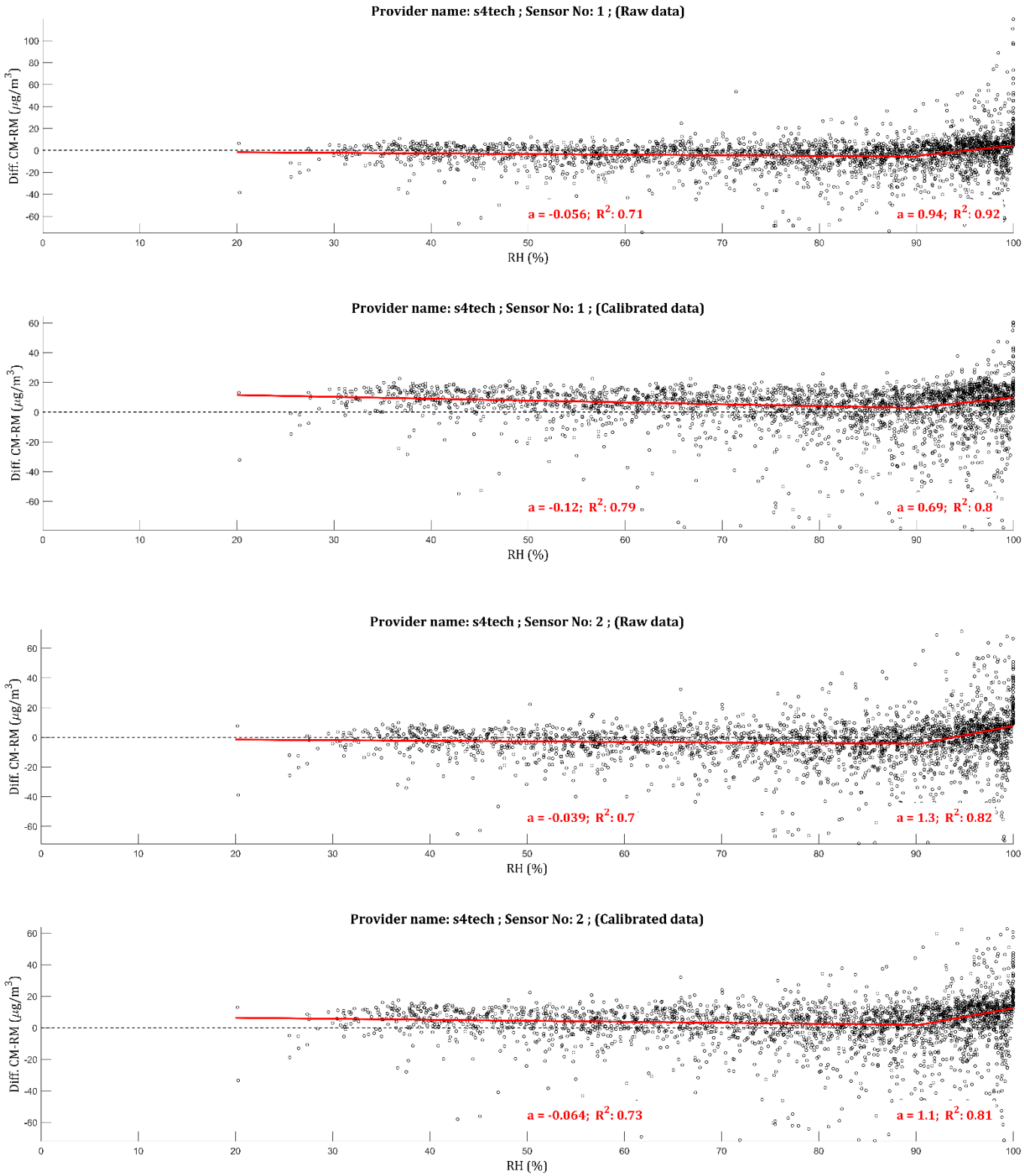
Rysunek 17. Zależność pomiędzy różnicą wskazań ocenianego czujnika i metodyką o wykazanej równoważności oraz wilgotnością względną powietrza dla czujników firmy Elkomp. Dwa górne panele przedstawiają zależności dla czujnika nr 1, dwa dolne dla czujnika nr 2. Panele nr 1 i 3 przedstawiają zależności dla danych surowych, panele nr 2 i 4 dla danych po kalibracji. Czarnymi okręgami zaznaczono wartości, czerwone linie przedstawiają trendy wykreślone metodą regresji liniowej dla zakresów wilgotności odpowiednio 20 – 90% oraz 90 – 100%. Na wykresach zaznaczono współczynniki nachylenia linii trendu (a) oraz parametry dopasowania (R^2).



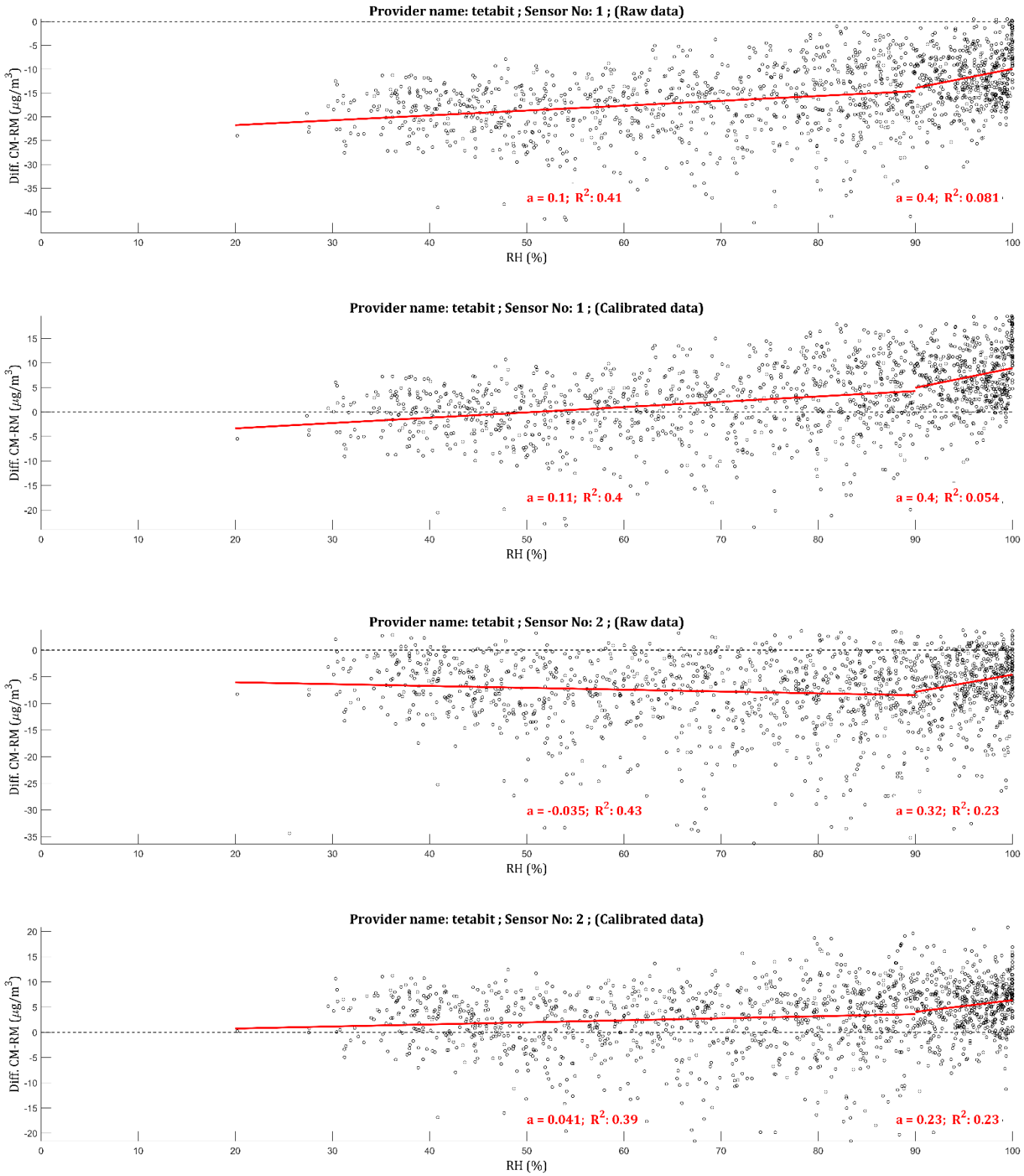
Rysunek 18. Zależność pomiędzy różnicą wskazań ocenianego czujnika i metodyką o wykazanej równoważności oraz wilgotnością względną powietrza dla czujników firmy Envimet. Dwa górne panele przedstawiają zależności dla czujnika nr 1, dwa dolne dla czujnika nr 2. Panele nr 1 i 3 przedstawiają zależności dla danych surowych, panele nr 2 i 4 dla danych po kalibracji. Czarnymi okręgami zaznaczono wartości, czerwone linie przedstawiają trendy wykreślone metodą regresji liniowej dla zakresów wilgotności odpowiednio 20 – 90% oraz 90 – 100%. Na wykresach zaznaczono współczynniki nachylenia linii trendu (a) oraz parametry dopasowania (R^2).



Rysunek 19. Zależność pomiędzy różnicą wskazań ocenianego czujnika i metodyką o wykazanej równoważności oraz wilgotnością względną powietrza dla czujników Politechniki Warszawskiej. Dwa górne panele przedstawiają zależności dla czujnika nr 1, dwa dolne dla czujnika nr 2. Panele nr 1 i 3 przedstawiają zależności dla danych surowych, panele nr 2 i 4 dla danych po kalibracji. Czarnymi okręgami zaznaczono wartości, czerwone linie przedstawiają trendy wykreślone metodą regresji liniowej dla zakresów wilgotności odpowiednio 20 – 90% oraz 90 – 100%. Na wykresach zaznaczono współczynniki nachylenia linii trendu (a) oraz parametry dopasowania (R^2).



Rysunek 20. Zależność pomiędzy różnicą wskazań ocenianego czujnika i metodyką o wykazanej równoważności oraz wilgotnością względną powietrza dla czujników firmy s4tech. Dwa górne panele przedstawiają zależności dla czujnika nr 1, dwa dolne dla czujnika nr 2. Panele nr 1 i 3 przedstawiają zależności dla danych surowych, panele nr 2 i 4 dla danych po kalibracji. Czarnymi okręgami zaznaczono wartości, czerwone linie przedstawiają trendy wykreślone metodą regresji liniowej dla zakresów wilgotności odpowiednio 20 – 90% oraz 90 – 100%. Na wykresach zaznaczono współczynniki nachylenia linii trendu (a) oraz parametry dopasowania (R^2).



Rysunek 21. Zależność pomiędzy różnicą wskazań ocenianego czujnika i metodyką o wykazanej równoważności oraz wilgotnością względną powietrza dla czujników firmy Tetabit. Dwa górne panele przedstawiają zależności dla czujnika nr 1, dwa dolne dla czujnika nr 2. Panele nr 1 i 3 przedstawiają zależności dla danych surowych, panele nr 2 i 4 dla danych po kalibracji. Czarnymi okręgami zaznaczono wartości, czerwone linie przedstawiają trendy wykreślone metodą regresji liniowej dla zakresów wilgotności odpowiednio 20 – 90% oraz 90 – 100%. Na wykresach zaznaczono współczynniki nachylenia linii trendu (a) oraz parametry dopasowania (R^2).