*INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH*
*INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS*

Nr 4/2011, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 173–183
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

*Mariusz Frukacz, Elżbieta Jasińska, Edward Preweda*

# WPŁYW WZORCOWANIA ŁAT NA DOKŁADNOŚĆ NIWELACJI PRECYZYJNEJ

# *EFFECT OF ROD'S CALIBRATION ON ACCURACY OF PRECISE LEVELING*

**Streszczenie**

Konieczność okresowego badania sprzętu geodezyjnego, nakładana na wykonawców m.in. przez instrukcje techniczne, często traktowana jest w wykonawstwie geodezyjnym jako „zło konieczne". Badania prowadzone w Geodezyjnym Laboratorium Metrologicznym AGH pokazują, że okresowe wzorcowanie instrumentów i przymiarów geodezyjnych pozwala nie tylko wykrywać i opisywać błędy systematyczne, ale także generować wnioski dotyczące prawidłowego użytkowania sprzętu, co z kolei prowadzi do zachowania dokładności pomiarów wymaganej przepisami.

W prezentowanym artykule przedstawiono wnioski z laboratoryjnych badań łat do niwelacji precyzyjnej, które uwzględnione przez wykonawców mogą przyczynić się do podniesienia dokładności niwelacji precyzyjnej. Uwagi te są szczególnie istotne dla pomiarów prowadzonych w terenach o dużych deniwelacjach terenów oraz niwelacji wysokich obiektów hydrotechnicznych.

**Słowa kluczowe:** niwelacja precyzyjna, kalibracja, wzorcowanie, inwar, współczynnik liniowej rozszerzalności termicznej

***Summary***

*The need for periodic testing of surveying equipment is often treated by surveyors as a "necessary evil". Research conducted in the Metrological Geodetic Laboratory GLM AGH shows that the periodic calibration of surveying instruments allows to detect and describe the systematic errors, and generate proposals for the proper use of equipment, which leads to maintaining the accuracy required under the legislation.*

*The article presents conclusions from laboratory tests of leveling rods, which can help to improve the accuracy of precise leveling. These considerations are particularly important for measurements carried out in the mountains and in engineering measurements of the highest accuracy.*

***Key words:*** *precise leveling, calibration, invar, coefficient of linear thermal expansion*

## WSTĘP

Zgodnie z instrukcją techniczną G-2 „Wysokościową osnowę geodezyjną stanowi usystematyzowany zbiór punktów, których wysokość w stosunku do przyjętej powierzchni odniesienia została określona przy zastosowaniu techniki geodezyjnej." Do pomiaru osnowy podstawowej I i II klasy zasadniczo stosowana jest technika niwelacji precyzyjnej, czyli niwelacji geometrycznej wykonywanej niwelatorami pierwszej lub drugiej klasy dokładności [Instrukcja techniczna G-2, Warszawa 2001] z wykorzystaniem precyzyjnych łat niwelacyjnych. Wysokość punktów wyznaczana jest w obowiązującej skali, którą nadaje podział naniesiony na taśmę inwarową łat. Dokładne określenie rzeczywistej długości (skali) podziału łat jest jednym z podstawowych zadań stawianych przed metrologią geodezyjną.

Instrukcja techniczna G-2 oraz wytyczne G-1.11 [Warszawa 2002] precyzują także, że niwelatory i łaty niwelacyjne powinny mieć przeprowadzone odpowiednie badania przydatności do pomiarów udokumentowane świadectwami wzorcowania. Przepisy ustawy z dnia 11 maja 2001 roku Prawo o miarach [Dz.U. Nr 63, poz. 636, obowiązujące z dniem 01.01.2003] określają wzorcowanie jako „czynności ustalające relację między wartościami wielkości mierzonej wskazanymi przez przyrząd pomiarowy, a odpowiednimi wartościami wielkości fizycznych, realizowanymi przez wzorzec jednostki miary". Zgodnie z normą PN-ISO 10012-1 [Wymagania dotyczące zapewnienia jakości wyposażenia pomiarowego] za wzorzec jednostki miary możemy uznać także „układ pomiarowy przeznaczony do zdefiniowania, zrealizowania, zachowania lub odtwarzania jednostki miary". Mimo, iż od 1983 roku definicja metra oparta jest na prędkości rozchodzenia się światła w próżni, to do niedawna w metrologii geodezyjnej (szczególnie w Polsce), do badania sprzętu do niwelacji precyzyjnej stosowano najczęściej klasyczne techniki pomiarowe wykorzystujące kreskowy wzorzec metra. Następujący w ostatnich latach znaczny wzrost dokładności sprzętu pomiarowego, jak również pojawienie się nowych konstrukcji (m.in. niwelatory cyfrowe wraz z łatami kodowymi), wymusza na geodezyjnych laboratoriach metrologicznych opracowanie nowych, dokładniejszych procedur wzorcowania. Potrzeba ta wynika także ze zwiększającej się liczby instrumentów poddawanych kalibracji, ponieważ stosowane dotychczas procedury charakteryzują się małym stopniem automatyzacji, a w rezultacie często okazują się zbyt pracochłonne i mało efektywne ekonomicznie.

Badania prowadzone w Geodezyjnym Laboratorium Metrologicznym AGH od 1998 roku pozwoliły na zbudowanie szeregu stanowisk pomiarowych, które umożliwiają kalibrację sprzętu geodezyjnego z wykorzystaniem interferometru laserowego odtwarzającego w najlepszy sposób obowiązującą jednostkę miary. Dzięki zastosowaniu interferometru laserowego zwiększona została dokładność kalibracji, opracowano procedury pozwalające na wzorcowanie łat kodowych, w stosunku do których klasyczne procedury nie mogą być stosowane. Sterowany za pomocą komputera interferometr umożliwia zwiększenie stopnia automatyzacji badań, dzięki czemu minimalizowane są wpływy błędów osobowych i podnoszona jest efektywność procesu wzorcowania. W celu optymalnego wykorzystania możliwości, jakie niesie ze sobą zastosowanie interferometru laserowego, opracowano technologie badań, skonstruowano odpowiednie stanowiska pomiarowe oraz zaplanowano specjalny sposób monitorowania i uwzględniania w obliczeniach wielkości fizycznych warunków środowiskowych. Urządzenia i procedury do laboratoryjnych badań sprzętu do niwelacji precyzyjnej opisano m.in. w [Beluch i inni, 2008], natomiast w tym tekście przedstawiono wpływ wzorcowania łat na wyniki pomiarów niwelacyjnych. Materiał badawczy, na którym opierano dalsze rozważania, jest efektem prac wykonywanych na zlecenie przemysłu geodezyjnego w Geodezyjnym Laboratorium Metrologicznym.

## LABORATORYJNE BADANIA ŁAT DO NIWELACJI PRECYZYJNEJ

Proces laboratoryjnych badań łat można podzielić na siedem etapów, które wykonywane są w następującej kolejności:

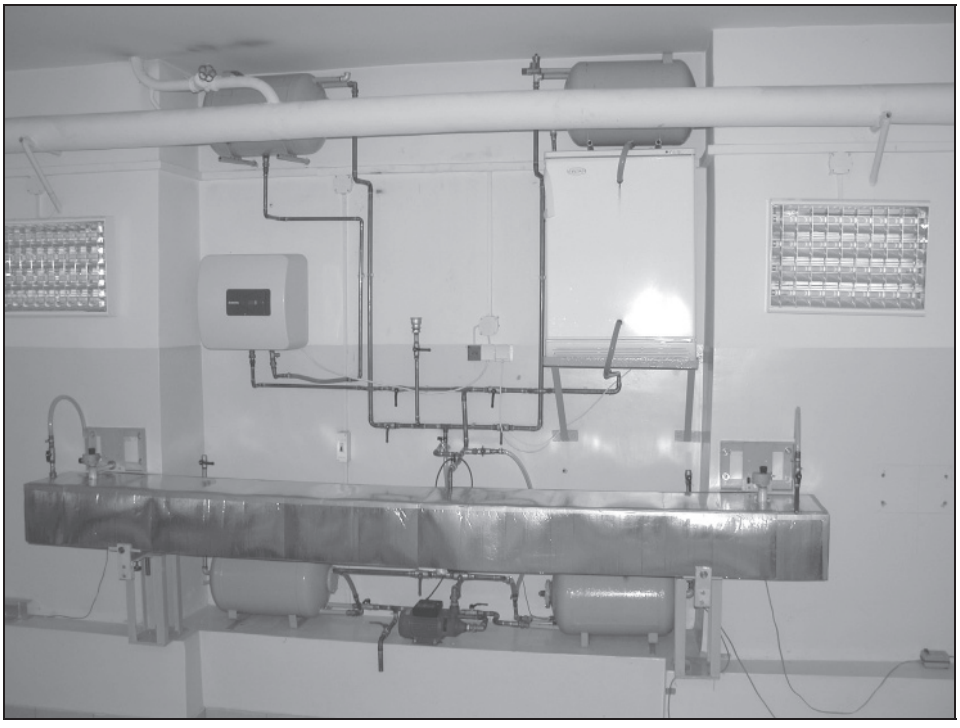
a) ogólna ocena stanu łaty,
b) sprawdzenie i rektyfikacja libeli sferycznej,
c) określenie siły naciągu taśmy inwarowej,
d) badanie deformacji korpusu łaty oraz prostoliniowości wstęgi inwarowej,
e) wyznaczenie współczynnika liniowej rozszerzalności termicznej wstęgi inwarowej,
f) badanie płaszczyznowości i prostopadłości stopki do osi łaty,
g) określenie zera łaty oraz wyznaczenie skali podziału i błędów naniesienia podziału.

Najważniejszymi czynnościami, mającymi bezpośrednie przełożenie na dokładność niwelacji precyzyjnej są wyznaczanie współczynnika liniowej rozszerzalności termicznej (WLRT) wstęgi inwarowej łaty oraz określenie zera i skali podziału łaty. Wyniki tych badań są następnie uwzględniane w wynikach pomiarów niwelacyjnych w formie poprawek termicznej i kalibracyjnej. Dobór procedury badań oraz sposobu obliczania tych poprawek może powodować różnice w wynikach niwelacji sięgające nawet 0,5÷1,0 mm/km, co znacznie prze-

wyższa obliczoną dla tych pomiarów wartość poprawki refrakcyjnej i dziesięciokrotność poprawki ze względu na dobowe zmiany kierunku linii pionu.

## WPŁYW WYZNACZANIA WLRT NA WYNIKI NIWELACJI

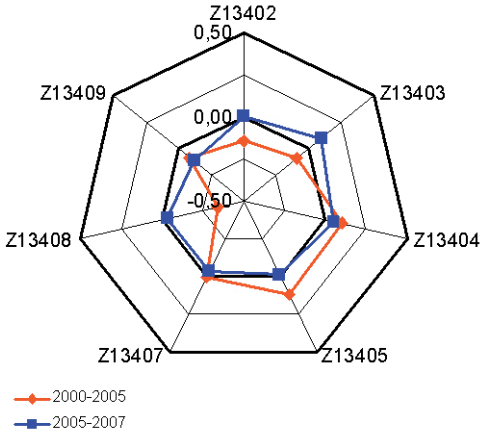
Wyznaczenie WLRT wstęg inwarowych łat, na których naniesiony jest podział, wykonywane jest w GLM AGH w komorze termicznej (rys. 1) w zakresie temperatur od 0°C do 40°C dla dziewięciu niezależnych progów termicznych. Należy podkreślić, że jest to jedyne – obok Uniwersytetu Technicznego w Monachium – laboratorium, pozwalające prowadzić badania w tak szerokim zakresie temperatur, a osiągane niepewności wyznaczania wartości WLRT rzędu 0,01÷0,10 ppm/°C są jedne z najlepszych na świecie.



Źródło: opracowanie własne.

**Rysunek 1.** Widok ogólny komory termicznej do wyznaczania WLRT
**Figure 1.** General view of the thermal chamber to determine WLRT

Obserwowane w GLM zakresy wartości współczynników wynoszą: dla łat klasycznych (z podziałem kreskowym) 0,90÷1,60 ppm/°C, a dla łat kodowych 0,40÷1,00 ppm/°C. Tak duża rozpiętość wartości WLRT dowodzi, że zarówno właściwości termiczne jak i technologia produkcji inwaru oraz superinwaru wymuszają konieczność wyznaczania WLRT dla wszystkich łat. W związku z małą stabilnością molekularną inwaru, wskazaną już w nagrodzonych Nagrodą Nobla badaniach francuskiego naukowca Charlesa Éduarda Guillaume'a [Guillaume 1920], objawiającą się stopniowymi zmianami własności termicznych stopu wraz z upływem czasu, badania WLRT powinny być prowadzone okresowo. Zaobserwowane w GLM AGH zmiany wiekowe współczynnika dla niektórych łat wyniosły -0,40 ppm/°C w okresie 5 lat (rys. 2), natomiast wartość średnia tych zmian w ciągu pięciu lat wyniosła -0,11 ppm/°C.



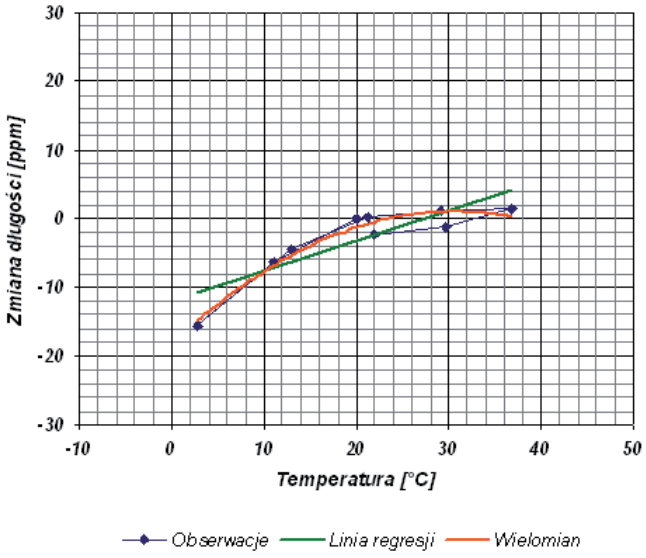

Źródło: opracowanie własne.

**Rysunek 2.** Zmiany wartości WLRT po upływie 5 oraz 2 lat
**Figure 2.** Changes of the value of WLRT after 5 and 2 years

Z kolei przyjęty w geodezji sposób wprowadzania poprawek termicznych zakłada liniowy charakter zmian, co często nie znajduje potwierdzenia podczas wyznaczania WLRT wstęgi inwarowej łat do niwelacji precyzyjnej (rys. 3).

Dla opisania zmian termicznych 10% badanych łat wymagane jest zastosowanie wielomianu drugiego stopnia, co z kolei pociąga za sobą konieczność uwzględnienia nieliniowego charakteru zmian długości w sposobie obliczania poprawki termicznej. Dla łaty z podziałem Topcon o numerze 16408, której charakterystykę termiczną przedstawiono na rys. 3, różnica w wynikach niwelacji odcinka o przewyższeniu 50 m przeprowadzonej w temperaturze 0°C, wynikająca z uwzględnienia nieliniowej postaci poprawki termicznej, wyniesie aż

0,5 mm. Podobnej wartości błędy mogą pojawić się w wynikach niwelacji także wówczas, gdy w procesie wyznaczania WLRT nie zostaną uwzględnione anomalie termiczne inwaru, opisywane przez wspomnianego wcześniej Guillaume'a. Przeprowadzona modernizacja komory termicznej w GLM AGH pozwoliła zminimalizować wpływ anomalii i histerezy temperaturowej na wyznaczany współczynnik rozszerzalności termicznej.



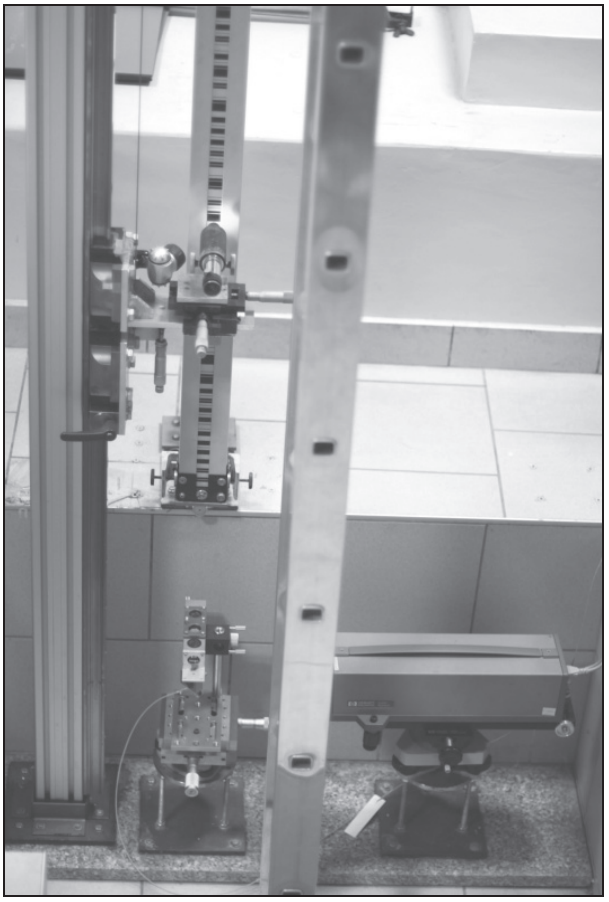

Źródło: opracowanie własne.

**Rysunek 3.** Przykład nieliniowego WLRT (Topcon 16408)
**Figure 3.** Example of nonlinear WLRT (Topcon 16408)

## WPŁYW WZORCOWANIE ŁAT NA WYNIKI POMIARÓW NIWELACYJNYCH

Kalibrację łat w GLM AGH wykonuje się na komparatorze pionowym, w którym wzorcem długości jest interferometr laserowy Hewlett Packard, a podstawę dwuosiowego układu pomiarowego (rys. 4) stanowi kamera CCD. Skala podziału łaty, która odpowiada liczbowo wartości „metra średniego", wyznaczana jest z niepewnością około ±2 ppm, a niepewność standardowa określenia zera podziału łaty jest na poziomie ±10 μm. Poprawki skali dla łat klasycznych mieszczą się w przedziale ±30 ppm, który odpowiada wartości dopuszczalnej dla niwelacji I klasy, a średnia wartość poprawki skali dla tych łat wynosi +7,1 ppm.

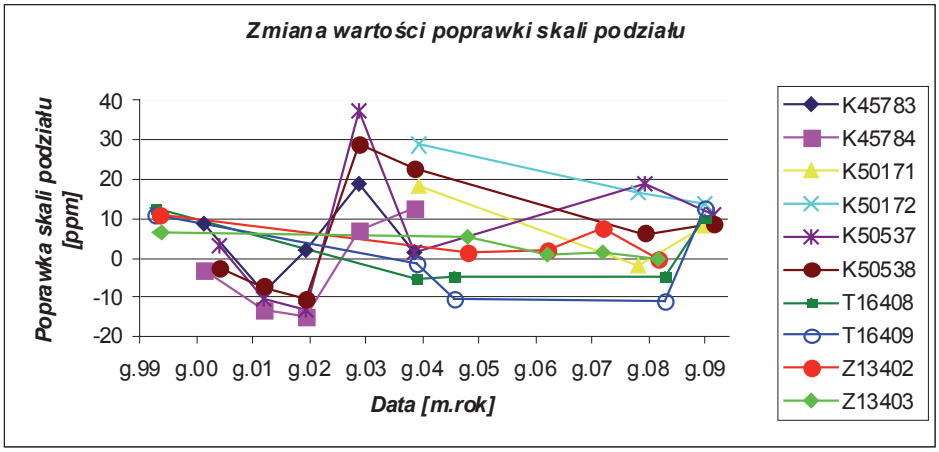
Dla łat z podziałem kodowym ten przedział jest znacznie węższy i można przyjąć, że wynosi ±15 ppm. Podobne wartości uzyskuje się w innych renomowanych laboratoriach metrologicznych na świecie [Woschitz 2004].



Źródło: opracowanie własne.

**Rysunek 4.** Widok komparatora pionowego (fragment)
**Figure 4.** View of vertical comparator (part)

Eksploatacja łat w terenie, wstrząsy w czasie transportu i użytkowania, a także wspomniana wcześniej niestałość molekularna inwaru powodują, że wartość skali podziału zmienia się w czasie. Na rysunku 5 zilustrowano zmiany poprawki skali podziału dziesięciu łat, które w okresie grudzień 1999 – grudzień 2009 były kalibrowane w GLM AGH. Zmiany te osiągają wartość ±20 ppm, co w przypadku braku ich stwierdzenia w procesie kalibracji obarczyłoby niwelowany odcinek o przewyższeniu 50 m błędem około 1 mm.

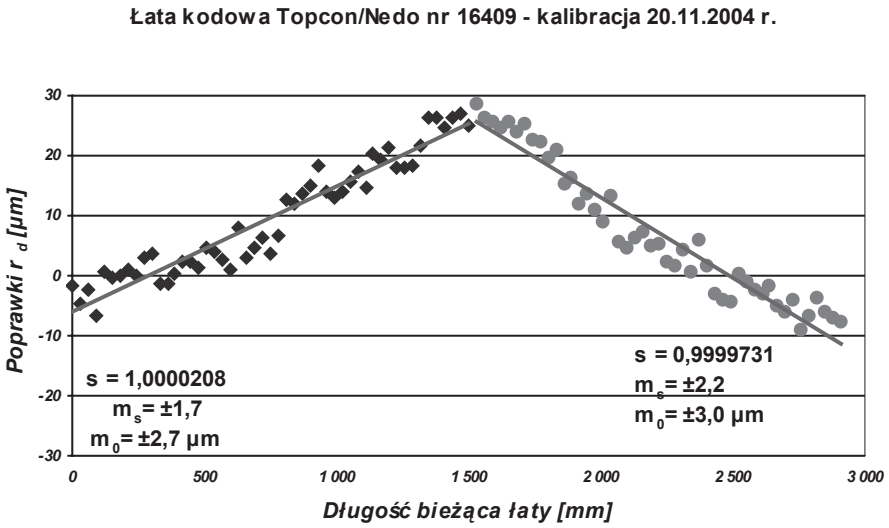



Źródło: opracowanie własne.

**Rysunek 5.** Zmiany skali podziału wybranych łat
**Figure 5.** Changes of scale of selected rods

Metr średni i skala podziału łaty zakładają liniowy charakter zmian długości całego podziału. Dla większości łat takie założenie jest słuszne, jednakże podziały wielu łat nie mają charakteru liniowego. Powodem mogą być deformacje korpusów łat, szczególnie tych współcześnie produkowanych z aluminium, wynikające z nieprawidłowej ich eksploatacji. Najczęstszym powodem jest stosowanie podpór mocowanych w połowie długości łaty, co skutkuje zgięciem profilu aluminiowego, a co za tym idzie – odkształcenie taśmy inwarowej. W przypadku tak zdeformowanych łat mamy do czynienia ze skokową zmianą skali w miejscu zgięcia profilu (rys. 6).

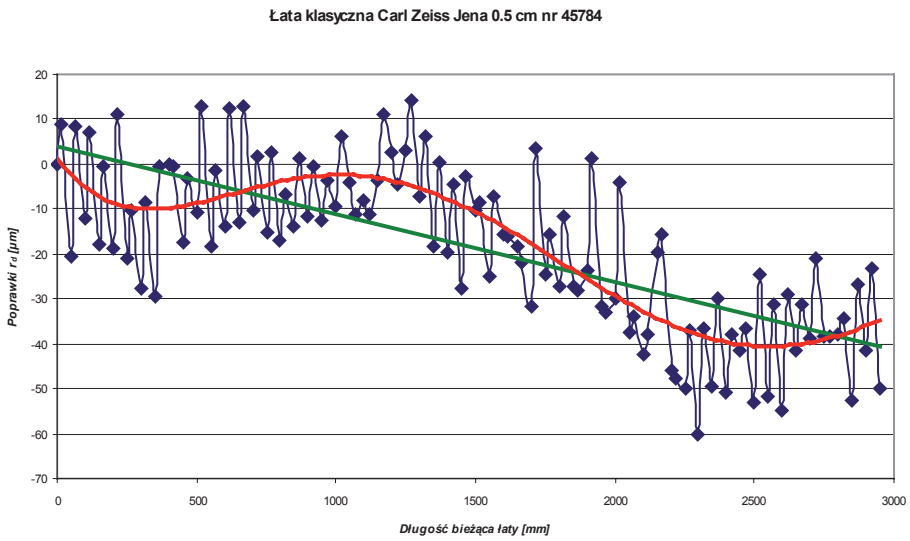
Traktując oba fragmenty podziału oddzielnie i przeprowadzając dla nich osobne aproksymacje otrzymujemy dwie skale podziału, różniące się nie tylko wartością, ale także charakterem zmian: przed deformacją podział jest wydłużony względem nominalnego, natomiast po uszkodzeniu występuje skurczenie podziału. Różnica między skalami obu części podziału wynosi nawet 50 ppm. Taka deformacja podziałów obu łat może powodować pojawienie się, szczególnie w trakcie pomiarów w terenie o stałym nachyleniu, błędów systematycznych wyznaczanego przewyższenia. Zakładając przewyższenie około 1 m na stanowisku i pomiar przy krótkich celowych, odczyty z obu łat będą wykonywane na fragmentach łat o różnej charakterystyce podziału, co może spowodować zmianę przewyższenia rzędu 20–30 μm na stanowisko. Dla odcinka niwelacyjnego o 20 takich stanowiskach popełniony błąd wyniesie już 0,4–0,6 mm.




Źródło: opracowanie własne.

**Rysunek 6.** Wyniki kalibracji zdeformowanej łaty niwelacyjnej
**Figure 6.** The results of calibration of deformed leveling rod

Z kolei dla wielu łat z podziałem klasycznym (kreskowym) stwierdzono w czasie wzorcowania nieliniowe zmiany długości podziału wynikające z technologii jego nanoszenia metodą sitodruku. Taka technologia tworzenia podziału podatna była na wiele czynników zmieniających nominalny układ kresek: poczynając od niższej dokładności wykonania, zużyciu szablonu podziału na błędach cyklicznych kończąc [Maurer, 2000]. Aproksymując podział takiej łaty prostą (rys. 7) eliminuje się istotną część informacji zdobytych podczas procesu wzorcowania. Dlatego możliwe jest zamienienie algorytmów obliczania poprawki kalibracyjnej dla łat klasycznych proponowanymi rozwiązaniami, wykorzystującymi zamiast skali podziału jego aproksymację wielomianem lub wykorzystanie uzyskiwanych w czasie wzorcowania poprawek do poszczególnych kresek podziału [Frukacz 2005]. Wprowadzenie tych rozwiązań skutkuje zmianą wyników niwelacji o 0,5–1,0 mm/km. Przeprowadzone analizy pozwalają twierdzić, że różnice wynikające z tytułu generalizowania błędów podziału jedynie parametrem skali łaty znacznie przekraczają uzyskane w wyniku wyrównań niepewności niwelacji [Gajderowicz 2004].




Źródło: opracowanie własne.

**Rysunek 7.** Wyniki kalibracji łaty niwelacyjnej z błędami cyklicznymi podziału
**Figure 7.** The results of calibration of leveling rod with cyclic errors of division

## PODSUMOWANIE

W powszechnej dyskusji o dokładności nowych generacji niwelatorów cyfrowych często zapomina się, że to łaty niwelacyjne nadają skalę osnowom wysokościowym i od jakości ich wykonania, a także sposobu ich użytkowania w terenie, będzie zależała dokładność niwelacji precyzyjnej. W procesie zapewniania wysokiej dokładności sieci niwelacyjnych kluczowe okazuje się laboratoryjne badanie błędów systematycznych łat. Prowadzone w GLM AGH badania pozwoliły na zoptymalizowanie procedur wyznaczania WLRT i skali podziału łaty, a także wnioskowania na temat ich eksploatacji. Jednak bez świadomości wagi tego problemu ze strony użytkowników łat, te informacje nie są wystarczająco wykorzystywane na etapie pomiarów oraz podczas opracowania wyników niwelacji. Zastosowanie przez wykonawców geodezyjnych proponowanych sposobów uwzględniania poprawki kalibracyjnej może zmniejszyć wpływ błędów podziału na ostateczne wyniki niwelacji. Poprawę dokładności można zauważyć szczególnie w przypadkach niwelacji wymagającej wyjątkowo wysokiej dokładności, pomiarów przemieszczeń wysokich obiektów hydrotechnicznych, a także podczas modernizacji osnów wysokościowych na obszarach gmin wiejskich położonych w terenach górskich.

## BIBLIOGRAFIA

Beluch J., Frukacz M., Mróz J., Pokrzywa A., Szczutko T. *Badania laboratoryjne niwelatorów i precyzyjnych łat niwelacyjnych*. Kraków. 2008.

Frukacz M. *Wpływ sposobu wyznaczenia poprawki kalibracyjnej na określane przewyższenie. Wydawnictwa AGH*, Geodezja, t. 11, z. 1/1, s. 115-125. 2005.

Gajderowicz I. *Ocena dokładności krajowej sieci niwelacji precyzyjnej pomierzonej w latach 1997 – 2003.* XI Sesja Naukowo-Techniczna „Aktualne naukowe i techniczne problemy prac geodezyjnych", Olsztyn 16-17.09.2004. 2004.

Guillaume Ch.-E. *Invar and elinvar*. Nobel Lecture, 11.12.1920. 2004.

Instrukcja techniczna G-2: *Szczegółowa pozioma i wysokościowa osnowa geodezyjna i przeliczenia współrzędnych między układami*. (2001) GUGiK, Warszawa.

Maurer W. *Kalibrierung von Präzisions-Nivellierlatten*. Ingenieurvermessung, München. 2000.

Woschitz H. *System Calibration of Digital Levels: Calibration Facility, Procedures and Results*. (Dissertation Technische Universität Graz) Shaker Verlag, Aachen. 2003.

Wytyczne techniczne G-1.11: *Podstawowa osnowa wysokościowa: projektowanie, pomiar i opracowanie wyników.* GUGiK, Warszawa. 2002.

*Artykuł powstał w ramach badań statutowych Katedry Geomatyki WGGiIŚ AGH*

Dr inż. Mariusz Frukacz
Dr inż. Elżbieta Jasińska
Dr hab. inż. Edward Preweda, prof. AGH
Akademia Górniczo – Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska
Katedra Geomatyki
30-059 Kraków, al. A. Mickiewicza 30, paw. C-4, pokój 406
e-mail: frukacz@agh.edu.pl
jasinska@agh.edu.pl
preweda@agh.edu.pl

Recenzent: *Dr hab. inż. Waldemar Krupiński, prof. UR*