

MARIA DOBRZYCKA

528.32:389

Skala geodezyjnych baz wzorcowych względem międzynarodowej jednostki długości

Zarys treści. Krajowa Baza Długościowa w Skrzyszewie stanowi fundamentalny komparator dla potrzeb Polskiej Służby Geodezyjnej. Przedmiotem niniejszej pracy jest przeprowadzony w IGiK pomiar tej bazy metodą Väisälä oraz ocena rzeczywistej dokładności pomiaru. Przedstawiono więc pokrótce zasady metody oraz czynniki ograniczające jej zasięg i dokładność. Ocenę dokładności systemu Väisälä względem międzynarodowej jednostki długości oparto na przeprowadzonych w Pracowni Metrologii IGiK pomiarach 16-metrowej bazy za pomocą trzech metod, w których jednostkę długości reprezentowały wzorce robocze odpowiadające trzem niezależnym jej systemom, a mianowicie: systemowi Väisälä, wzorców kreskowych i interferometru laserowego. Wyniki pozwalają wnioskować, że dokładność systemu Väisälä jest nie mniejsza niż $2 - 3 \cdot 10^{-7}$. W pracy zamieszczono również uwagi o zabudowie baz.

Wstęp

Prace z zakresu metrologii geodezyjnej mają na celu przede wszystkim zapewnienie właściwej skali sieci geodezyjnych. Możliwości, a zarazem wymagania w tej dziedzinie wydatnie wzrosły wraz z rozwojem narzędzi geodezyjnych, zwłaszcza zaś dzięki zastosowaniu technik satelitarnych i radioastronomii. Metody te oferują możliwość skalowania sieci z dokładnością dotychczas nieosiągalną, o zgodności wewnętrznej sięgającej $5 \cdot 10^{-8}$, są przy tym szczególnie obiecujące w zastosowaniu do sieci globalnych, kontynentalnych i regionalnych. Dobroć sieci, polegająca na jednorodności na całym objętym nią obszarze, jest jednak nadal ściśle związana z pomiarami naziemnymi.

Wspomniane tu metody — zarówno satelitarne, jak i klasyczne — chociaż oparte na jednostkach tego samego układu SI, dają wyniki nie w pełni spójne. Skutkiem działania odmiennych grup parametrów, decydujących o dokładności każdej z tych metod, obserwuje się występowanie w wynikach różnic większych niż należałoby oczekiwać i niż wynikałoby to ze zgodności wewnętrznej. Różnice te, o wyraźnie systematycznym charakterze, przypisuje się niedostatecznemu przystawianiu modelu pola grawitacyjnego Ziemi do jego wartości rzeczywistej, niewyznaczalnemu z odpowiednim przybliżeniem rozkładowi własności optycznych atmosfery i błędom wieloetapowego przenoszenia jednostki długości w pomiarach naziemnych.

Zagadnienia związane z jednolitością skali, poziomem jej dokładności, porównywalnością wyników uzyskiwanych różnymi metodami, rozwój tych metod oraz narzędzi do pomiaru odległości stworzyły zapotrzebowanie na mogące im sprostać odpowiednio dokładne komparatory fundamentalne. Według zaleceń MUGG rolę tę mają spełniać 500—1000-metrowe bazy wzorcowe. Według tychże zaleceń bazy takie winny być pomierzone metodą Väisälä dającą niekwestionowaną, najwyższą współcześnie dokładność pomiaru odległości w zakresie od 100 do 1000 metrów.

Prace Instytutu Geodezji i Kartografii w omawianej dziedzinie skoncentrowane były na poniższych zadaniach:

- pomiar metodą Väisälä założonej w latach 1968—69 Krajowej Bazy Długościowej w Skrzeszewie,
- określenie jego rzeczywistej dokładności względem obowiązującej, międzynarodowej jednostki długości,
- przygotowanie — na podstawie doświadczeń uzyskanych podczas pomiarów w Skrzeszewie — założeń pozwalających na właściwe rozwiązanie zabudowy bazy wzorcowej, która ma zastąpić obecną.

Wyznaczony powyższą tematyką kierunek działania — odpowiada aktualnym problemom w dziedzinie skali sieci geodezyjnych i postulatом sformułowanym na Sympozjum IAG w Helsinkach (1978).

Trzy pierwsze rozdziały niniejszej pracy zawierają szczegółową dyskusję metody Väisälä. W pierwszym rozdziale przedstawiono zasady metody oraz czynniki ograniczające jej dokładność, aby w następnym przejść do charakterystyki systemu Väisälä i jego wzorcowania — etapu decydującego o dokładności zewnętrznej metody Väisälä. W rozdziale tym omówiono także dwa inne systemy — system worców kreskowych, który jest jeszcze nadal podstawą Służby Metrologicznej IGiK oraz system reprezentowany przez interferometr laserowy, za pomocą którego planuje się tę Służbę unowocześnić i z którym wiąże się również projekt modyfikacji pomiaru przyszłej bazy wzorcowej.

W rozdziale trzecim przedstawiono wykonane w laboratorium prace nad doświadczalnym porównaniem tych trzech systemów. Wyniki porównania pozwalają wnioskować, że system Väisälä nie jest obarczony błędem systematycznym większym niż 2 do $3 \cdot 10^{-7}$. Pracę niniejszą zamyka — w rozdziale czwartym — omówienie pomiarów bazy w Skrzeszewie, wraz z dyskusją zalet i wad zastosowanej tam zabudowy oraz propozycjami zmian, które przy zakładaniu nowej bazy należałoby uwzględnić.

Na zakończenie wypada podkreślić, że działalność Pracowni Metrologii IGiK jest kontynuacją prac w tej dziedzinie związanych z nazwiskami doc. A. Kwiatkowskiego, inż. M. Kowala-Miedźwieckiego i inż. I. Dejmicza, a także doc. J. Jasnorzewskiego, który podjął w kraju idee

pomiarów metodą Väisälä. Rozwinięcie tej działalności w IGiK przypisać należy organizacyjnym zabiegom doc. W. Krzemińskiego, a powodzenie przedsięwzięć wysiłkowi i dyscyplinie zespołu Pracowni Metrologii, a szczególnie doświadczeniu i zaangażowaniu dr J. Cisaka w pracach polowych, a pani D. Włodkowskiej w laboratoryjnych. Podziękować chciałabym również tym wszystkim, niezaangażowanym bezpośrednio w zadaniach pracowni, bez których życzliwej pomocy przedstawiony tu pomiar bazy w Skrzyszewie byłby niemożliwy, szczególnie zaś dr L. Siporskiemu i mgr inż. M. Żółtowskiemu.

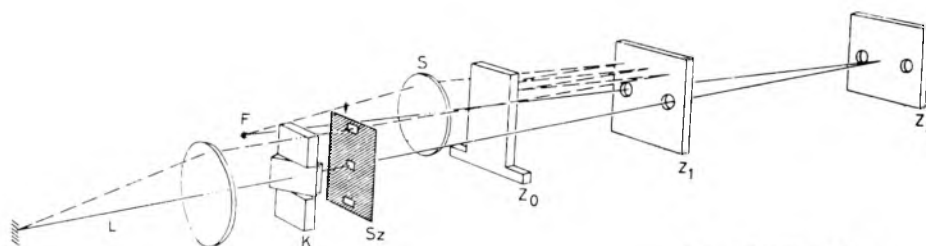
Osobne, gorące podziękowania należą się profesorom T. J. Kukkamäkiemu, E. Hytönenowi, L. Otermie i nieżyjącemu już profesorowi T. Honkasalo, z których doświadczeń i bezinteresownej pomocy — także związanej z komparacjami wzorców — z wdzięcznością korzystano.

I. POMIAR ODLEGŁOŚCI METODĄ VÄISÄLÄ

I. 1. Zasada metody Väisälä

Klasyczną już metodę dokładnego pomiaru odległości, wykorzystującą zjawisko interferencji światła zaproponował w 1923 roku fizyk, astronom i geodeta fiński Yrjö Väisälä. Aparaturą opracowaną przez Väisälę można mierzyć odległości rzędu kilometra z dokładnością ocenianą przez wielu autorów na $1 \cdot 10^{-7}$. Dokładność tej metody polega na wykorzystaniu szczególnej cechy światła białego jaką jest jego niewielka spójność przestrzenna. Interferencja światła białego, pochodzącego nawet ze źródła prawie punktowego zachodzi jedynie przy różnicy dróg optycznych nie większej niż $2 \mu\text{m}$. Spośród wariantów zaproponowanych przez autora (Väisälä 1930) najszerze zastosowanie znalazła metoda mnożenia odległości wyjściowej, schematycznie przedstawiona na rysunkach 1 i 3.

Z punktowego źródła światła białego, umieszczonego w ognisku F kolimatora S biegnie obok zwierciadła Z_0 wiązka światła białego, która napotykając zwierciadło Z_1 , zostaje podzielona na dwie części. Jedna z nich przez otwór w zwierciadle Z_1 biegnie do zwierciadła Z_2 , odbija się i przez



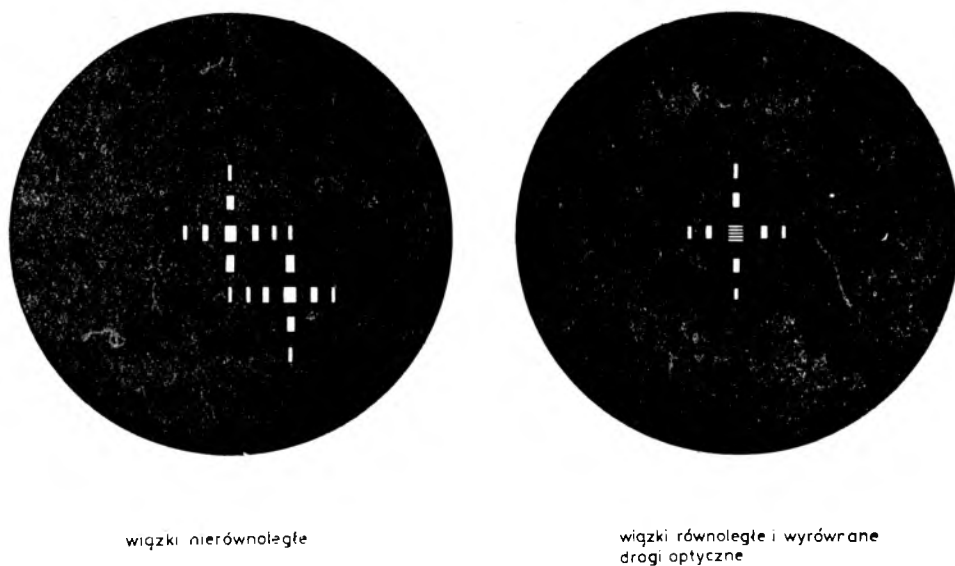
wg Honkasalo 1973

Rys. 1

drugi otwór w zwierciadle Z_1 , a dalej obok zwierciadła Z_0 dochodzi do lunety. Pozostała część wiązki, po wielokrotnym odbiciu pomiędzy zwierciadłami Z_0 i Z_1 skierowana zostaje także do lunety. Przy dobraniu odpowiedniego kąta padania wiązki i odpowiednim ustawieniu względem siebie zwierciadeł odległość Z_0-Z_2 będzie wielokrotnością odległości wyjściowej Z_0-Z_1 . Jeżeli różnica dróg optycznych obu wiązek będzie zawarta w przestrzeni spójności, to obie części wiązki będą zdolne do interferencji.

W metodzie Väisälä zastosowano następujący sposób obserwacji tego zjawiska. Na drodze każdej z dwu wiązek, powstałych z podziału wiązki równoległej na zwierciadle Z_1 , umieszczone są szczeliny. Na szczelinach tych wiązki ulegają ugięciu dając w płaszczyźnie ogniskowej lunety obrazy ugięciowe. Gdy część wiązki odbita wielokrotnie jest równoległa do wiązki odbitej od zwierciadła Z_2 — obrazy obu szczelin powstają w tym samym miejscu płaszczyzny ogniskowej lunety. Przy równych drogach optycznych obu wiązek w obrazie ugięciowym pojawiają się prążki interferencyjne, podobnie jak na rysunku 2, który nie oddaje jednak wszystkich efektów interferencji w prążkach i obrazach dyfrakcyjnych dalszych rzędów.

W warunkach idealnych, przy równoległości wszystkich trzech zwierciadeł, równoległości wiązek i wyrównaniu dróg optycznych, prążek rzędu zerowego znajduje się w środku obrazu ugięciowego, tam gdzie odległości od obu szczelin są jednakowe, a więc różnica dróg optycznych rów-



Rys. 2

na zero. Symetrycznie rozłożone są prążki wyższych rzędów, powstające przy różnicy dróg optycznych $\lambda, 2\lambda, \dots$ ¹⁾

Obserwowany obraz interferencyjny zależy od wielu czynników instrumentalnych:

- wielkość i jasność centralnego obrazu ugięciowego zależy od kształtu szczeliny, mocy źródła światła i parametrów lunety;
- odległość pomiędzy szczelinami i parametry lunety decydują o odległości prążków od siebie;
- szerokość szczelin i stopień przybliżenia źródła światła do postaci punktowej determinują kontrast i liczbę prążków.

1.2. Aparatura

Opracowując ostatnie wersje aparatury Y. Väisälä uwzględnił także wnioski z prac doświadczalnych i jako optymalne parametry aparatury uznał:

- quasipunktowe źródło światła o średnicy około 20 μm uzyskane systemem przesłon i soczewek z włókna niskowoltowej, 10 do 20 watowej żarówki;
- źródło to jest umieszczone w ognisku kolimatora o ogniskowej 3 m i średnicy około 8 cm;
- wymiary zwierciadeł: Z_0 — 100 mm $\times$ 60 mm,
pozostałe — 100 mm $\times$ 100 mm z otworami o średnicy 20 mm;
- ogniskowa lunety obserwacyjnej 1 m;
- 35-krotne powiększenie okularu;
- szczeliny o wymiarach: szerokość — 10 mm, długość — 15 mm, odległość pomiędzy środkami szczelin — 22 mm.

Przy tak dobranych parametrach centralny obraz ugięciowy jest widoczny jako plamka o wymiarach około 3 mm $\times$ 4 mm z 3 do 5 prążkami na jej tle.

Do zestawu aparatury należy także pryzmat nieodchylający (à vision directe), kompensatory i 1-metrowy wzorec kwarcowy. Dwa pierwsze urządzenia służą do ułatwienia obserwacji. Rozszczepienie światła białego przez pryzmat rozszerza zakres spójności do setnych części milimetra i wydawnie pomaga w odszukiwaniu prążków interferencyjnych.

¹⁾ Interferencja wiązek powstałych z fraunhoferowskiego ugięcia światła na dwóch szczelinach, geometria, kontrast i struktura prążków omówiona jest w podręcznikach optyki (np. Meyer-Arendt 1977; Piekara 1976) a w zastosowaniu do różnych wariantów aparatury Väisälä w pracach: Schüler, Rauhut 1966; Kühn, Rauhut 1975, a przede wszystkim Hillebrand 1961.

Kompensatory zbudowane z płytek płasko-równoległych spełniają rolę podwójną:

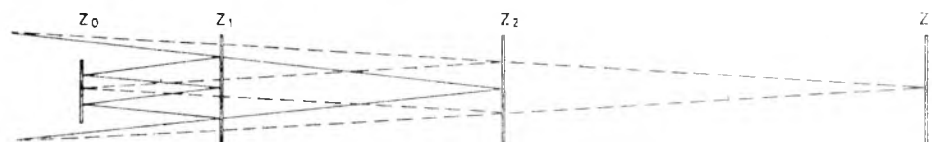
— poprzez zmianę długości dróg optycznych każdej z wiązek pozwalają na poszukiwanie prążków w zakresie 1 mm bez konieczności przesuwania zwierciadeł;

— służą jako urządzenie pomiarowe do wyznaczania szczątkowej różnicy dróg optycznych.

Wzorzec w formie walca o średnicy 20 mm i grubości ścianek około 2 mm, zamknięty powierzchniami sferycznymi sporządzony jest z topionego kwarcu. Wypolerowane zakończenia sferyczne o promieniach 1 m i 5 m wykonane są z kryształu górskiego.

I.3. Powielanie odległości wyjściowej

Odległość wyjściową Z_0-Z_1 wyznacza się za pomocą opisanego powyżej wzorca i zwielokrotniając jak na rysunku 1 otrzymuje się pierwsze rozwinięcie. Każde następne zwielokrotnienie odległości wyjściowej (rys. 3) odbywa się na tej samej zasadzie i z tą samą dokładnością, uwa-



Rys. 3

runkowaną spójnością światła białego. Po usunięciu zwierciadła Z_1 odległość Z_0-Z_2 staje się odległością wyjściową do rozwinięcia Z_0-Z_3 , które z kolei jest podstawą rozwinięć dalszych, aż do odległości odpowiadającej całej długości mierzonej bazy, według następującego schematu:

$$Z_0-Z_2 = m_1 (Z_0-Z_1)$$

$$Z_0-Z_3 = m_2 (Z_0-Z_2)$$

$$Z_0-Z_k = m_{k-1} (Z_0-Z_{k-1})$$

gdzie $m_1, m_2 \dots m_k$ są kolejnymi wielokrotnościami odległości wyjściowych i przy odległości Z_0-Z_1 równej 1 metr spełniają warunek:

$$Z_0-Z_k = m_1 \cdot m_2 \dots m_{k-1}$$

I.4. Dokładność pomiaru metodą Väisälä

Dokładność pomiaru odległości metodą Väisälä oceniana jest na ogół na $1 \cdot 10^{-7}$ (np. Väisälä 1927; Resolution Symposium I. A. G. 1978). Ocenę

tę opiera się po części na wewnętrznej zgodności pomiaru, po części zaś na analizie teoretycznej. Różnice w kolejnych pomiarach dochodzące do $5 \cdot 10^{-7}$ (Nummela — Finlandia, Ebersberg — Monachium w RFN), lub przekraczające tę wielkość (Loenermark — Holandia) interpretowane są jako ruchy punktów bazowych.

Błędy pomiaru odległości metodą Väisälä są spowodowane wieloma czynnikami z różnorodnych źródeł. Jedne z nich są pochodzenia instrumentalnego i są właściwe dla danego zestawu aparatury. Powodują one w pomiarach błędy o charakterze systematycznym. Błędy te są spowodowane ograniczoną dokładnością wyznaczenia parametrów aparatury. Inne z nich, związane z błędami ustawienia aparatury, wpływają na dokładność pomiaru częściowo w sposób przypadkowy, a częściowo systematyczny. Tylko nieliczne ze źródeł błędów wpływają na wynik pomiarów w sposób czysto przypadkowy. Ocena dokładności pomiaru jest więc sprawą dyskusyjną. Stosowanie przy niej praw sformułowanych dla przypadkowego rozkładu błędów nie jest prawidłowe i prowadzi do zbyt optymistycznych wniosków.

Błąd pomiaru odległości $Z_0 - Z_k = L$ (długość bazy) zależy od: błędu pomiaru odległości wyjściowej $Z_0 - Z_1$ proporcjonalnie do L

„	„	„	„	$Z_0 - Z_2$	„	$\frac{L}{m_1}$
„	„	„	„	$Z_0 - Z_3$	„	$\frac{L}{m_1 \cdot m_2}$
„	„	„	„	$Z_0 - Z_k$	„	$\frac{L}{m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_{k-1}}$

Decydujące znaczenie ma błąd pomiaru odległości wyjściowej i pierwszego rozwinięcia. Współczynniki przy rozwinięciach dalszych szybko maleją.

Czynniki ograniczające zasięg i dokładność praktycznego zastosowania metody Väisälä można klasyfikować według różnych kryteriów np. (Hillebrand 1961; Kühne, Rauhut 1975). Zamieszczony tu przegląd ma na celu scharakteryzowanie wielkości wpływu poszczególnych czynników w kolejności:

- 1) błędy instrumentalne,
- 2) ustawienie aparatury,
- 3) zakres spójności światła,
- 4) poprawka refrakcyjna,
- 5) wyznaczenie odległości zwierciadła Z_1 od powierzchni końcowej wzorca,

- 6) wpływ temperatury i ciśnienia na długość wzorca,
- 7) wyznaczenie grubości warstwy refleksyjnej na zwierciadłach Z_0 i Z_1 ,
- 8) odchylenia powierzchni zwierciadeł od płaskości,
- 9) ułożenie wzorca względem osi bazy,
- 10) przeniesienie pomierzonej interferencyjnie odległości $Z_0 - Z_k$ na punkty bazowe.

Pozycje 5 do 9 stanowią grupę związaną z wyznaczeniem odległości wyjściowej — najbardziej newralgicznym procesem pomiarowym, decydującym o dokładności pomiaru całej bazy. Osobny rozdział będzie poświęcony adekwatności systemu Väisälä w stosunku do obowiązującej międzynarodowej jednostki długości.

I.4.1. Błędy instrumentalne

Aparatura nie musi być wykonana szczególnie precyzyjnie, bowiem obserwowane w metodzie Väisälä prążki nie mają wartości metrologicznej. Pojawienie się prążków w ugięciowym obrazie szczelin informuje tylko o wyrównaniu dróg optycznych. Luneta obserwacyjna powinna być zogniskowana na nieskończoność, np. za pomocą obserwacji gwiazd, a oświetlacz winien być ustawiony z dokładnością kilku milimetrów w ognisku kolimatora. Y. Väisälä wykazał, że standardowa dokładność soczewek i błędy rysunku szczelin nie mają wyraźnego wpływu na system prążków. Na dokładność pomiaru mają jednak wpływ odchylenia powierzchni zwierciadeł od płaskości (w aparaturze Väisälä charakteryzowane błędem $0,05 \mu\text{m}$), oraz kompensatory jako przyrząd pomiarowy.

I.4.1.a. Odchylenia powierzchni zwierciadeł od płaskości

Wpływ tego błędu można wyrazić wzorem (Hillebrand 1961)

$$m = \pm \frac{0,05 \mu\text{m}}{l_k} \sqrt{\frac{2}{m_k}} \quad (1)$$

Błąd ten, dla danej aparatury o charakterze systematycznym, dla rozwinięcia 0—1—6 wynosi $3 \cdot 10^{-8}$, a dla 0—6—24 już tylko $0,6 \cdot 10^{-8}$. Wpływ niepłaskości zwierciadeł na pomiar odległości $Z_0 - Z_1$ jest większy i będzie omówiony w punkcie 8.

I.4.1.b. Kompensatory

Kompensatory służą do wyznaczania szczątkowej — po ostatecznym ustawieniu zwierciadeł w pozycji pomiarowej — różnicy długości dróg

optycznych obu interferujących wiązek. Przez obrót kompensatorów można zmieniać długość dróg optycznych i z kąta skręcenia obliczyć ich różnicę korzystając z wzoru

$$r = d(1 - \cos \alpha - n + \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}) \quad (2)$$

gdzie przyjęte symbole oznaczają:

- d — grubość płasko-równoległych płytek kompensatora,
- n — współczynnik załamania materiału użytego do sporządzenia płytek,
- α — kąt skręcenia kompensatora.

Z pary odczytów kąta skręcenia kompensatora względem położenia zerowego (prostopadle do wiązki światła) można oczekiwać dokładności $0,1^\circ$. Tablica 1 ilustruje zmiany na $0,1^\circ$ poprawki r w zależności od kąta

Tablica 1

Kąt	r	Bł. wzgl.
10°	0,4 μm	$0,7 \cdot 10^{-7}$
20°	0,7	$1,2 \cdot 10^{-7}$
30°	1,2	$2,0 \cdot 10^{-7}$

skręcenia kompensatora dla stosowanych w Skrzyszewie płytek o grubości 6,86 mm i współczynniku załamania równym 1,5101. Błąd ten jest niezależny od odległości i największy wpływ na dokładność pomiaru bazy ma w obserwacjach pierwszego rozwinięcia. Jak widać z powyższego zestawienia uzyskanie dokładności $5 \cdot 10^{-8}$ jest możliwe przy zwielokrotnieniu odczytów, jeżeli wychylenie kompensatora nie będzie przekraczało 20° . Warunek ten wymaga bardzo starannego ustawienia zwierciadła Z_2 .

Pozostałe wywołane przez kompensatory błędy, związane z dyspersją (Hillebrand 1961; Rauhut 1968), zmianą współczynnika załamania w zależności od temperatury (Tiltel 1935), czy wreszcie z błędem wyznaczenia grubości płytki — praktycznie nie mają wpływu na dokładność wyznaczenia różnicy dróg optycznych obu wiązek. Stosowane w niektórych egzemplarzach aparatury Väisälä płytki achromatyczne (Honkasalo 1969; Kühne, Rauhut 1975) wpływają raczej na jakość obrazu interferencyjnego niż na realne zwiększenie dokładności pomiaru.

1.4.2. Ustawienie aparatury

1.4.2.a. Nierównoległość zwierciadeł

Wpływ nierównoległości zwierciadeł eliminowany jest przez symetryczne względem osi zwierciadeł obserwacje interferencji wiązki wielo-

krotnie odbitej od górnych i dolnych części zwierciadeł Z_0 i Z_1 z wiązką odbitą od zwierciadła Z_2 . W pierwszym wypadku obserwuje się interferencję wiązek przechodzących przez górną i środkową szczelinę, w drugim zaś przez dolną i środkową. Średnia z obu obserwacji jest wolna od wpływu nierównoległości zwierciadeł.

Stopień równoległości względem siebie zwierciadeł ma jednak decydujące znaczenie dla możliwości zaobserwowania zjawiska interferencji w ogóle. Jeżeli obrazy ugięciowe obu szczelin nie pokrywają się dostatecznie, zjawiska interferencji nie da się zaobserwować. Przy typowych parametrach aparatury Väisälä kąt rozbieżności wiązek $d\beta$ pozwalający jeszcze na zaobserwowanie interferencji wynosi $8,2''$ (Hillebrand 1961). Wynikające stąd dopuszczalne błędy równoległości zwierciadeł względem zwierciadła zerowego wynoszą dla poszczególnych rozwinięć odpowiednio

$$\begin{aligned} \text{dla } m = 2 \quad m\beta_1 &= \pm 0,6'' \quad m\beta_2 = \pm 2,9'' \quad (\text{rozwinięcie pierwsze}) \\ \text{dla } m = 6 \quad m\beta_k &= \pm 2,9'' \quad m\beta_{k+1} = \pm 2,9'' \quad (\text{rozwinięcie } k\text{-te}). \end{aligned}$$

I.4.2.b. Ustawienie zwierciadeł względem osi bazy

Przy założeniu, że błąd spowodowany ustawieniem zwierciadeł nie ściśle w osi pomiaru interferencyjnego nie powinien przekraczać $5 \cdot 10^{-8}$, można wyprowadzić uproszczony wzór na dopuszczalne odchylenie h

$$h = \frac{3,2 L}{10^4} \quad (3)$$

co dla poszczególnych odległości pośrednich L wynosi

$$\begin{aligned} 0-6 \text{ m} &\dots\dots 1,9 \text{ mm} \\ 0-24 \text{ m} &\dots\dots 7,6 \text{ mm} \\ 0-96 \text{ m} &\dots\dots 30,4 \text{ mm} \end{aligned}$$

i dla dalszych odpowiednio więcej. Chociaż dla zwierciadeł dalszych tolerancja jest znaczna, ze względu jednak na małą średnicę otworów (20 mm) dla wiązki przechodzącej i wracającej oraz oszczędność czasu przy regulowaniu aparatury dla kolejnych rozwinięć warto zadbać o staranne (± 2 mm) ustawienie zwierciadeł względem osi bazy, a także wysokości kolimatora, oświetlacza i lunety obserwacyjnej.

I.4.3. Zakres spójności światła

Pojawienie się prążków na ugięciowym obrazie szczelin występuje tylko w zakresie długości spójności światła białego. Aby zaobserwować ten efekt, drogi optyczne obu interferujących wiązek muszą być wyrów-

nane z dokładnością do 1—2 μm . Błąd jest niezależny od odległości i znaczący wpływ na dokładność może mieć tylko przy obserwacjach pierwszego rozwinięcia. Jeżeli odległość wyjściowa $l_1 = 1$ m, a jej wielokrotność $l_2 = m \cdot l_1$ to jej błąd można określić zależnością:

$$dl_2 = \pm \frac{1,5 \mu\text{m}}{m} \quad (4)$$

Zastosowanie więc dużego współczynnika zwielokrotnienia w pierwszym rozwinięciu wpływa na zmniejszenie znaczenia błędu interferencji. Przy stosowanym zazwyczaj rozwinięciu 0—1—6 błąd ten wynosi około 0,3 μm . Przez zwiększenie liczby pomiarów wpływ błędu interferencji można obniżyć do poziomu około $5 \cdot 10^{-8}$.

1.4.4. Poprawka refrakcyjna

Z powodu niejednorodności ośrodka wzdłuż drogi obu interferujących wiązek światła odległości optyczne nie są równoznaczne z odległościami geometrycznymi. Zwielokrotnioną drogę optyczną trzeba jeszcze poprawić o poprawkę refrakcyjną.

Na niejednorodność ośrodka wpływają najbardziej następujące czynniki:

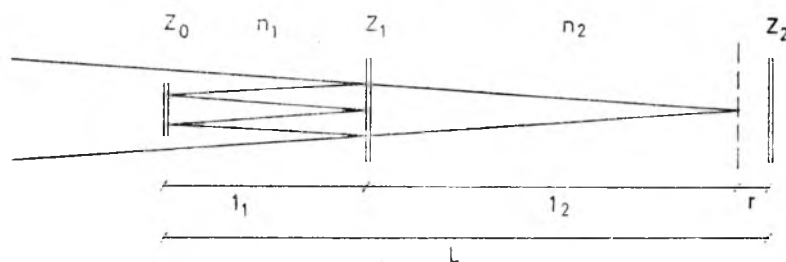
- nieregularna konfiguracja i niejednorodne pokrycie powierzchni gruntu wzdłuż osi bazy;
- warunki turbulencji powietrza zakłócanie przez wszelkie przeszkody, obudowę i osłony;
- wypromieniowywanie ciepłe podestów, słupów i podstaw pod aparaturę;
- bliskość obserwatorów.

Wszystkie te czynniki działają szczególnie intensywnie przy pomiarze pierwszego rozwinięcia. Wpływ refrakcji na mierzoną odległość, ze względu na szybko zmienny charakter i trudność pomiaru określających ją parametrów, uważany jest jako decydujący o dokładności pomiaru i najbardziej niebezpieczny ²⁾.

Niejednorodność ośrodka rozchodzenia się światła jest charakteryzowana przez współczynnik załamania n ³⁾.

²⁾ Zwłaszcza w literaturze dotyczącej pomiaru bazy Ebersberg (Monachium) w RFN (np. Herzog 1963).

³⁾ Parametry określające współczynnik załamania n i zależności pomiędzy współczynnikiem n i długością fali λ omówione są w pracach Tiltena i Edena (1935 i 1966), a w zastosowaniu do metody Väisälä — Hillebrand 1961; Herzog 1963; Honkasalo 1966; Kukkamäki 1969.



Rys. 4

Odległość geometryczna L jest równa:

$$L = m \cdot l_1$$

gdzie m jest współczynnikiem zwielokrotnienia, a l_1 odległością wyjściową.

Odległość tę można również wyrazić wzorem

$$L = l_1 + l_2 + r$$

gdzie r oznacza poprawkę refrakcyjną, o którą należy poprawić wielkość l_2 ze względu na niejednorodność ośrodka wzdłuż drogi L . Równość dróg optycznych pozwalająca na zaobserwowanie zjawiska interferencji zachodzi wówczas gdy

$$m \cdot l_1 \cdot n_1 = l_1 \cdot n_1 + l_2 \cdot n_2$$

gdzie n_1 i n_2 oznaczają odpowiednio współczynniki załamania ośrodka na odcinkach l_1 i l_2 .

Ze wzorów tych, po odpowiednich przekształceniach można otrzymać wyrażenie określające poprawkę refrakcyjną

$$r = \frac{l_1(m-1) \cdot (n_2 - n_1)}{n_2}$$

i upraszczając, ponieważ $n_2 \cong 1$

$$r = l_1(m-1) \cdot \Delta n \quad (5)$$

a więc różnica między odległością geometryczną i optyczną rozwinięcia L jest proporcjonalna do różnicy współczynników załamania ośrodka wzdłuż odległości wyjściowej i odległości mierzonej.

Współczynnik załamania dla warunków normalnych oblicza się według wzoru zaakceptowanego przez Zgromadzenie Generalne MUGG w Berkeley, w 1963 roku

$$(n-1) \cdot 10^6 = 287,604 + 1,6288 \lambda^{-2} + 0,0136 \lambda^{-4}$$

redukując do warunków obserwacji wzorem

$$n_{(t,p,e)} = 1 + \frac{n-1}{1+\alpha t} \cdot \frac{p}{760} \cdot \frac{0,055^{-6}}{1+\alpha t} \cdot e \quad (6)$$

λ — długość fali w mikrometrach,
 t — temperatura w skali Celsjusza,
 p — ciśnienie w torach,
 e — wilgotność w torach,
 $\alpha = 0,003661$.

Różniczkując to wyrażenie i zakładając dla uproszczenia rachunku:

$$t = 10^\circ, \quad p = 760 \text{ Tr}, \quad e = 10 \text{ Tr}, \quad \lambda = 0,556 \text{ } \mu\text{m}$$

otrzymać można zależność

$$dn = -1,0 \cdot 10^{-6} dt + 0,4 \cdot 10^{-6} dp - 0,05 \cdot 10^{-6} de \quad (7)$$

z której wynika, że decydujące znaczenie dla zmiany współczynnika załamania n ma zmiana temperatury; zmiana wilgotności ma wpływ praktycznie znikomy. Zmiany ciśnienia, niewielkie na ogół w czasie serii obserwacyjnej wpływają połową swej wartości (0,4) — wystarczy zatem dla danej serii przyjmować ciśnienie średnie.

Upraszczając wzór na $\frac{dn}{dt}$ do postaci

$$\frac{dn}{dt} = \frac{p}{760} \frac{1,0727}{(1+\alpha t)} \quad (8)$$

przechodząc następnie do wyrażenia

$$\Delta n = \frac{dn}{dt} (t_2 - t_1)$$

otrzymać można wzór na poprawkę refrakcyjną o postaci

$$r = L \frac{m-1}{m} \frac{dn}{dt} (t_2 - t_1)$$

t_2 — średnia temperatura wzdłuż odcinka wyjściowego l_2 ,

t_1 — średnia temperatura wzdłuż odcinka l_1 ,

lub częściej używany wzór równoważny

$$r = L \frac{dn}{dt} (t_L - t_1) \quad (9)$$

gdzie t_L jest średnią temperaturą powietrza wzdłuż całego odcinka L .

Wartości $\frac{dn}{dt}$ można stabilizować w zależności od ciśnienia i temperatury lub obliczać dla każdej serii dla danych warunków meteorologicz-

nych. Biorąc pod uwagę szybkie zmiany temperatury w czasie serii obserwacyjnej, jej nieregularny rozkład wzdłuż osi pomiaru bazy, a zarazem wysokie wymagania pod względem dokładności wyznaczenia różnicy średniej temperatury wzdłuż obu interferujących wiązek — sposób rozmieszczenia termometrów powinien spełniać pewne wymagania:

— tej samej długości dróg światła w poszczególnych rozwinięciach powinna odpowiadać podobna liczba odczytów temperatury tak, aby dokładność średniej temperatury wzdłuż obu odcinków była w przybliżeniu jednakowa;

— odstępy pomiędzy termometrami powinny być tak dobrane, ażeby temperatura pomiędzy dwoma sąsiednimi miała w dostatecznym przybliżeniu rozkład liniowy;

— liczba termometrów powinna być ograniczona tak, aby proces odczytywania temperatury nie przedłużał nadmiernie serii obserwacyjnej.

Do pomiaru temperatury używane są zazwyczaj termometry rtęciowe umieszczone w osłonach (Kukkamäki 1969) chroniących przed promieniowaniem cieplnym.

Obliczenia można wykonywać według wzoru

$$t_{sr} = \frac{1}{L} \sum \left\{ (l_k - l_i - m) \cdot t_i + (l_k - l_i - m)^2 \cdot \frac{t_k - t_i}{2(l_k - l_i)} \right\} \quad (10)$$

L — długość odcinka dla którego jest obliczana średnia temperatura,

t_i i t_k — temperatura na końcach kolejnych odcinków wyznaczonych przez stanowiska termometrów,

l_i i l_k — odpowiadające im odległości od początku bazy,

$m = 0$ — dla wszystkich l_k mniejszych i równych L ,

$m = l_k - L$ — dla ostatniego w danym odcinku stanowiska termometru jeżeli l_k jest większe od L .

Wzór ten jest przydatny przy obliczeniach na kalkulatorze z elementami programowania.

W czasie interferencyjnego pomiaru poszczególnych rozwinięć temperaturę odczytuje na każdym stanowisku dwu obserwatorów, przemierzających obserwowany odcinek w przeciwnych kierunkach.

Przyjmując dla uproszczenia $\frac{dn}{dt} = 1$ wyrażenie charakteryzujące błąd poprawki refrakcyjnej przyjmie postać:

$$dr = \pm L \cdot dt \cdot 10^{-6} \quad (11)$$

Ażeby więc błąd poprawki refrakcyjnej nie zmniejszał dokładności pomiaru poniżej $5 \cdot 10^{-8}$ błąd wyznaczenia różnicy temperatury nie powinien przekraczać $0,05^\circ\text{C}$.

Przy pomiarze dużych odległości, przy odczycie dużej liczby termometrów — przypadkowe błędy odczytu temperatury, oraz błędy podziału termometrów nie mają znacznego wpływu na dokładność wyznaczenia średniej temperatury. O błędzie więc decyduje zmienność temperatury w czasie trwania serii obserwacyjnej i odchylenia od zakładanego, liniowego rozkładu temperatury pomiędzy sąsiednimi stanowiskami termometrów. Ponieważ na dużych odległościach efekt interferencji daje się obserwować tylko w wypadku wyrównanej i stabilnej temperatury, dokładność różnicy średniej temperatury rzędu $0,05^{\circ}\text{C}$ może być osiągnięta przy użyciu termometrów z wartością działki 0,1 do $0,2^{\circ}\text{C}$.

Znaczne trudności z osiągnięciem tej dokładności wystąpić mogą przy pomiarze pierwszych rozwinięć (0—1—6) i (0—6—24). Obserwacje — ze względu na pomiar odcinka wyjściowego $Z_0 - Z_1$ trwają długo, a turbulencję zakłócają pawilony lub osłony, obecność obserwatorów i zagęszczenie stanowisk pod aparaturę. Różnice średniej temperatury wzdłuż odcinka wyjściowego i mierzonego rozwinięcia są znaczne, dochodzące do $0,5^{\circ}\text{C}$. Chociaż specjalne badania rozkładu temperatury na początkowym odcinku bazy w Ebersberg — Monachium (Hillebrand 1961) nie wykazały niepokojących anomalii, to jednak wyniki pomiarów interferencyjnych sygnalizują znaczną niekiedy niezgodność poprawek refrakcyjnych z ich wartością teoretyczną (Herzog 1963; Honkasalo 1973). Zmniejszenie więc wpływu błędu wyznaczania temperatury poniżej poziomu $1 \cdot 10^{-7}$ wymaga stworzenia najlepszych możliwie warunków turbulencji⁴⁾ przez zlikwidowanie stałej obudowy stanowisk. Zakłócający wpływ obecności obserwatorów można zmniejszyć przez zastosowanie zdalnego odczytu temperatury — jak w Skrzyszewie — za pomocą termopar.

Warunki powodujące poprawkę refrakcyjną dla pierwszego rozwinięcia stanowią pewien powtarzający się przy kolejnych pomiarach układ. Pomiary są wykonywane w podobnych na ogół warunkach atmosferycznych, o podobnej porze doby. Wypromieniowywanie ciepłe działa więc w większości wypadków w tym samym kierunku i rodzi niebezpieczeństwo występowania związanych z tym błędów systematycznych.

Mniejsze znaczenie mają błędy wzorcowania termometrów, ich część systematyczna jest eliminowana przez różnicowy charakter wpływu temperatury.

Refrakcja jest czynnikiem nie tylko ograniczającym dokładność me-

⁴⁾ Obserwacje temperatury za pomocą termopar podczas pomiaru pierwszego rozwinięcia na bazie w Skrzyszewie wykazywały chwilowe fluktuacje temperatury przekraczające w niektórych wypadkach $0,2^{\circ}\text{C}$.

tody Väisälä, ale przede wszystkim ograniczającym jej zasięg⁵⁾. Dyspersja światła białego w niejednorodnym ośrodku wzdłuż osi pomiaru osłabia widzialność prążków, a wibracja powietrza utrudnia, lub wręcz uniemożliwia ich odszukiwanie zwłaszcza przy pomiarze dalszych odległości. Efekt interferencji udaje się zaobserwować tylko w specyficznych warunkach atmosferycznych — uciążliwych skądinąd dla ekipy pomiarowej — na ogół nocą, przy pełnym, niskim zachmurzeniu, bezpośrednio po opadach deszczu (Skrzeszew), lub śniegu (Monachium, Herzog 1965).

1.4.5. Wyznaczanie odległości zwierciadła Z_1 od powierzchni końcowej wzorca

Odległość Z_0-Z_1 stanowiącą odległość wyjściową dla wszystkich kolejnych rozwinięć w pomiarze bazy L mierzy się za pomocą wzorca kwarcowego o zakończeniach sferycznych⁶⁾. Wzorzec ten umieszcza się pomiędzy doprowadzonymi do równoległości zwierciadłami w taki sposób, aby jedno z jego zakończeń — o promieniu krzywizny 1 m — dotykało do zwierciadła zerowego, drugie zaś, o promieniu krzywizny 5 m, pozostawało w pewnej, niewielkiej, rzędu kilku mikrometrów odległości od zwierciadła Z_1 . Ten sposób umieszczenia wzorca ma zapobiegać możliwym, trudnym do określenia naprężeniom w wyniku zmian termicznych, czy działania innych sił, powodujących niekontrolowane zmiany jego długości.

Zjawisko styku molekularnego końca A ze zwierciadłem Z_0 i odległość końca B od zwierciadła Z_1 obserwuje się za pomocą prążków Newtona.

W wypadku A — styku wzorca ze zwierciadłem Z_0 , niezależnie od kierunku pod jakim obserwowany jest poprzez zwierciadło promień odbity od powierzchni wzorca — widoczny będzie układ prążków z ciemnym



Rys. 5

⁵⁾ Najdłuższe pomierzone tą metodą bazy to: Nummela — Finlandia 864 m, Monachium w RFN 864 m, Skrzeszew — Polska 768 m.

⁶⁾ Z wyjątkiem wariantu metody Väisälä zastosowanego przy pomiarze bazy w Poczdamie (Kühne, Rauhut 1975).

krążkiem w środku, którego rozmiary zależą od wielkości powierzchni styku, a więc od promienia krzywizny zakończenia wzorca i od siły dociskającej. W wypadku *B*, gdy koniec wzorca jest odsunięty od powierzchni zwierciadła Z_1 o pewną wielkość d — z różnych kierunków obserwując odbite promienie zauważyć można zmieniający się układ prążków Newtona.

Jedną z metod wyznaczania odległości d (Väisälä 1967) — najbardziej rozpowszechnioną — polega właśnie na uporządkowanych obserwacjach cyklicznie pojawiających się czarnych prążków w centralnej części obrazu interferencyjnego. Prążki te pojawiają się przy zmianie o $\frac{1}{2} \lambda$ odległości między zwierciadłem i wzorcem. Do obserwacji tego zjawiska służy urządzenie w formie połówki metalowego kręgu o promieniu 25 cm z oświetlaczem i przeziernikiem. Przeziernik jest wyposażony w filtr monochromatyczny, który powiększa zakres widzialności i ułatwia obserwację zjawiska interferencji.

Z zależności (Väisälä 1967):

$$D = \frac{N_k}{\sin \beta_k}$$

można obliczyć odległość wzorca od zwierciadła Z_1 . We wzorze tym przyjęto oznaczenia:

D — odległość d wyrażona w liczbie prążków,

N_k — numer porządkowy prążka,

β_k — dopełnienie do 90° kąta padania światła.

Krąg jest opisany w taki sposób, że dla położenia przeziernika odpowiadających pojawieniu się czarnego prążka można odczytać wprost sinusy kątów β . Ponieważ w powyższej zależności występują dwie niewiadome — numer porządkowy prążka i odległość D — wystarczyłoby zaobserwować dwa kolejne pojawienia się prążków i odczytać odpowiadające im sinusy. Jednakże w praktyce, ze względu na błędy obserwacji, prążki obserwuje się w pełnym dostępnym zakresie, a więc od około 90° do około 20° , to znaczy w zakresie sinusów od około 1,0 do około 0,3.

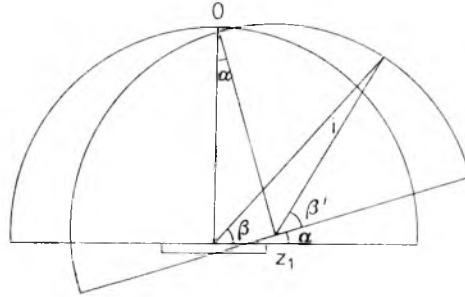
Uśrednioną odległość wyznacza się z wzoru

$$D = \frac{N_{\max} - N_{\min}}{\sin \beta_{\max} - \sin \beta_{\min}} \quad (13)$$

lub graficznie.

Oprócz błędów obserwacyjnych (nacelowanie przeziernikiem na czarny prążek i odczyt sinusów na kręgu) źródłem błędów określenia odległości zwierciadła Z_1 od wzorca jest także sposób ustawiania kręgu. O ile ustawienie wysokości i spoziomowanie kręgu oraz umieszczenie wskaźnika

odpowiadającego $\beta = 90^\circ$ w osi wzorca z dokładnością 0,5 do 1 mm jest — za pomocą obserwacji obrazu interferencyjnego względem wskaźnika na wzorcu — łatwe, o tyle ustawienie końców kręgu w płaszczyźnie zwierciadła nastręcza w oryginalnej aparaturze Väisälä pewne trudności. Wymagania w tym względzie można określić rozpatrując układ:



Rys. 6

Różnica pomiędzy właściwym kątem β , pod którym widzi się prążek, a kątem β' odczytanym według źle ustawionego kręgu wynosi

$$d\beta = \alpha - i$$

kąt i według uproszczonego wzoru przyjmuje wartości

$$i = \alpha \sin \beta$$

podstawiając zamiast β_k wartość $\beta'_k + d\beta$ do wzoru nr 13 i przyjmując zgodnie z omówionym wcześniej zakresem obserwacji prążków $\beta_{max} = 90^\circ$ a $\beta_{min} = 20^\circ$ otrzymać można zależność o postaci

$$\alpha = \frac{dD}{D \cdot 0,95} \quad (14)$$

a więc im większa odległość wzorca od zwierciadła tym mniejsza jest tolerancja w ustawianiu położenia kręgu względem zwierciadła. Założwszy $dB \leq 0,05 \mu\text{m}$, co odpowiada dokładności względnej $5 \cdot 10^{-8}$ otrzymamy następujące wartości na dopuszczalny kąt skreślenia kręgu względem zwierciadła Z_1

1. $D = 20$ prążków więc $d \cong 5 \mu\text{m}$

$$\alpha = 0,5^\circ$$

2. $D = 10$ prążków więc $d \cong 2,5 \mu\text{m}$

$$\alpha = 1^\circ$$

Są to wymagania wysokie, dość trudne do spełnienia przy ustawianiu aparatury. Ponieważ jednak dla danej odległości zwierciadła od wzorca

różnice kolejnych sinusów kątów odpowiadających kolejnym pojawieniom się prążków są wielkością stałą, równą $\frac{1}{D}$ z przebiegu obserwacji można wnioskować czy krąg jest ustawiony prawidłowo.

1.4.6. Wpływ temperatury i ciśnienia na długość wzorca

Wpływ ten jest opisywany wyrażeniem drugiego stopnia o postaci

$$L_{(t,p)} = a(t - 20^{\circ}\text{C}) + b(t - 20^{\circ}\text{C})^2 - c(p - 760 \text{ Tr})$$

t — temperatura w skali Celsjusza, p — ciśnienie powietrza w torach.

Dla wzorców z topionego kwarcu, dla których $a \cong 0,4 \mu\text{m/m} \cdot 1^{\circ}\text{C}$, $b \cong 0,002 \mu\text{m/m} \cdot 1^{\circ}\text{C}$ i $c \cong 0,001 \mu\text{m/Tr}$ ciśnienie pomierzone z dokładnością 10 torów nie powoduje błędów większych niż $1 \cdot 10^{-8}$, a zastosowanie (jak w Skrzyszewie) termopar, które pozwalają na bezpośredni pomiar temperatury wzorca z dokładnością nie gorszą niż $0,05^{\circ}\text{C}$ odpowiednio $2 \cdot 10^{-8}$.⁷⁾

1.4.7. Wyznaczenie grubości warstwy refleksyjnej na powierzchni zwierciadeł Z_0 i Z_1

Dla powiększenia refleksyjności zwierciadła są napyłone metaliczną, zazwyczaj aluminiową warstwą odbijającą. Ze względu na konieczność obserwacji wzorca poprzez zwierciadła Z_0 i Z_1 obydwie są w części środkowej pozbawione warstwy refleksyjnej. Zatem odległość pomierzona za pomocą wzorca musi być poprawiona o sumę grubości tych warstw na powierzchni obu zwierciadeł (rys. 7).

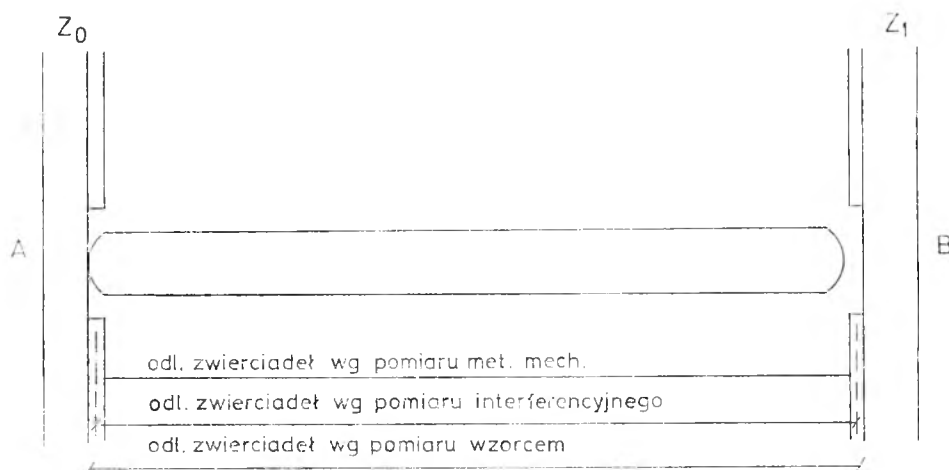
Grubość napyłonej warstwy winna być wyznaczana metodami interferencyjnymi, bowiem ze względu na przesunięcie fazowe, zależne od rodzaju powierzchni refleksyjnej i długości fali odbijanego promieniowania — pomiar mechaniczny daje wyniki inne, z reguły większe (Hillebrand 1961; Honkasalo 1966). Technika napyłania ma niewątpliwie wpływ na grubość i jakość warstwy refleksyjnej. Np. pomierzona w Polskim Komitecie Normalizacji i Miar za pomocą komparatora interferencyjnego firmy Zeiss Jena w promieniowaniu trzech linii widma helu grubość warstwy refleksyjnej na używanych w Skrzyszewie zwierciadłach wynosi odpowiednio

dla Z_0 $0,23 \mu\text{m} \pm 0,03 \mu\text{m}$

dla Z_1 $0,26 \mu\text{m} \pm 0,03 \mu\text{m}$

⁷⁾ Stosowany zazwyczaj przy pomiarach metodą Väisälä pośredni pomiar temperatury wzorca nie gwarantuje dokładności $0,1^{\circ}\text{C}$.

a w literaturze przedmiotu (np. Honkasalo 1969) zarówno grubość warstwy, jak i błąd jej wyznaczenia są na ogół o rząd wielkości mniejsze.



Rys. 7

Wpływ błędu wyznaczenia grubości warstwy refleksyjnej na pomiar odległości za pomocą aparatury używanej w Pracowni Metrologii IGiK należy oszacować na $5 \cdot 10^{-8}$, pamiętając o jego systematycznym charakterze.

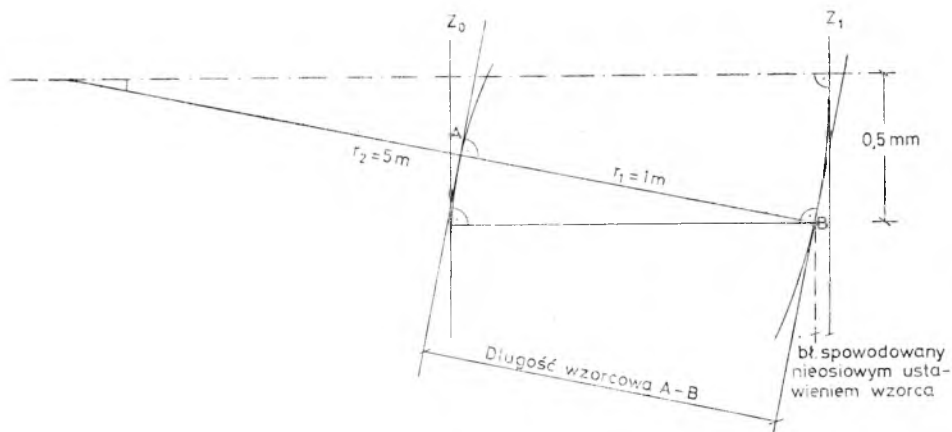
1.4.8. Odchylenie powierzchni zwierciadeł od płaskości

Omawiany już przy błędach instrumentalnych wpływ niepłaskości zwierciadeł (I.4.1.a) przy pomiarze odległości wyjściowej $Z_0 - Z_1$ wymaga potraktowania odrębnego. Błąd ten w tym wypadku, podobnie jak omawiany powyżej błąd wyznaczania grubości warstwy refleksyjnej, wpływa na błąd pomiaru bazy — dla danego zestawu aparatury — w sposób systematyczny. Ponieważ niepłaskość zwierciadeł aparatury Väisälä charakteryzowana jest wielkością $0,05 \mu\text{m}$ to pomiar odlegości $Z_0 - Z_1$ może być obarczony błędem $m = \pm 0,07 \mu\text{m}$ co odpowiada dokładności względnej $7 \cdot 10^{-8}$.

1.4.9. Ułożenie wzorca względem osi bazy

Odległość wzorcowa A—B jest definiowana jako odległość pomiędzy równoległymi, stycznymi do obu sferycznych zakończeń wzorca płaszczyznami i leży na linii łączącej środki krzywizny tych powierzchni.

Punkty A i B nie są na wzorcu oznaczone i błąd w ocenie ich położenia spowodować może błąd w wyznaczaniu odległości zwierciadeł Z_0-Z_1 (rys. 8).



Rys 8

Zakładając — optymistycznie — za Hillebrandem (1961) błąd położenia punktu B około 0,5 mm, odpowiadający skróceniu wzorca o $20''$ — błąd w odległości Z_0-Z_1 można oszacować na podstawie wzoru

$$m = \frac{-0,5 \text{ mm}^2}{2R_2} = -0,025 \text{ } \mu\text{m} \text{ czyli } 2,5 \cdot 10^{-8} \quad (15)$$

Błąd ten może działać tylko jednokierunkowo, powodując zwiększenie odległości Z_0-Z_1 , zatem w kierunku przeciwnym niż błędy ustawienia zwierciadeł względem osi bazy (I.4.1.b).

I.4.10. Przeniesienie odległości Z_0-Z_k na punkty bazowe

Jednym ze słabszych ogniw w procesie interferencyjnego pomiaru baz zastabilizowanych tradycyjnie, tzn. z punktami podziemnymi leżącymi pod osią pomiaru interferencyjnego (np. Ohio, Loenermark) czy równoległe, z boku (np. Mata dos Virtudos, Monachium) jest przeniesienie odległości mierzonej interferencyjnie na punkty bazowe⁸⁾. Przeniesienie to odbywa się drogą pomiarów długościowych i kątowych

⁸⁾ Wyjątek stanowi tu baza w Poczdamie, mierzona zmodyfikowaną metodą Väisälä. Zwierciadło zerowe wraz z wzorcem znajduje się przed początkiem właściwej bazy. Urządzenie odpionujące pozwala na szybkie i dokładne przeniesienie pozycji zwierciadła na punkty podziemne (Kühne, Rauhut 1975).

w mniej lub bardziej skomplikowanych, specjalnie zakładanych siatkach, jest uciążliwe i w praktyce odbywa się dopiero następnego dnia po pomiarze interferencyjnym. Błąd takiego przeniesienia szacowany jest na ogół na około $1 \cdot 10^{-7}$. Dokładność ta jest jednak dyskusyjna, czego wyrazem jest przyjęte na Sympozjum IAG w Helsinkach (19—22 czerwca 1978) zalecenie ulepszenia metod przenoszenia odległości zmierzonej interferencyjnie na punkty bazowe ⁹⁾.

Poniższe zestawie rekapitułuje pokrótce omawiane ograniczenia dokładności metody Väisälä charakteryzując wpływ poszczególnych czynników:

1a) niepłaskość zwierciadeł	$3 \cdot 10^{-8}$ syst.
1b) kompensatory	$5 \cdot 10^{-8}$ przyp.
2b) ustawienie zwierciadeł wzgl. bazy	$5 \cdot 10^{-8}$ syst. jednokier.
3) zakres spójności	$5 \cdot 10^{-8}$ przyp.
4) poprawka refrakcyjna	$1 \cdot 10^{-7}$ przyp. + syst.
5) odległość wzorca od zwierciadła Z_1	$5 \cdot 10^{-8}$ syst.
6) temperatura wzorca i ciśnienie	$2 \cdot 10^{-8}$ przyp.
7) wyznaczenie grubości warstwy refl.	$5 \cdot 10^{-8}$ syst.
8) niepłaskość zwierciadeł w odl. $Z_0 - Z_1$	$7 \cdot 10^{-8}$ syst.
9) ułożenie wzorca wzgl. bazy	$2 \cdot 10^{-8}$ syst. jednokier.
10) przeniesienie odl. zwier. na pkt. bazy	$1 \cdot 10^{-7}$ przyp.

Zestawienie to wykazuje, że przeniesienie jednostki długości na bazy wzorcowe za pomocą aparatury Väisälä może sięgać dokładności względnej rzędu kilku dziesięciomilionowych. W zamieszczonym tu przeglądzie nie uwzględniono jednak wzorcowania jednometrowych przymiarów kwarcowych, elementu zasadniczej wagi dla zewnętrznej dokładności systemu Väisälä względem międzynarodowej, obowiązującej jednostki długości.

II. SYSTEMY PRZENOSZENIA JEDNOSTKI DŁUGOŚCI NA BAZY GEODEZYJNE

Przenoszenie jednostki długości na bazy geodezyjne odbywa się drogą wieloetapowego jej mnożenia, bądź sumowania. Każdy etap obciążony jest właściwymi mu błędami powodującymi stopniowe obniżanie do-

⁹⁾ Sposób stabilizacji punktów bazowych zastosowany i sprawdzony w Skrzyszewie oraz projektowane w rozdziale IV niniejszej pracy rozwiązanie zabudowy początkowego odcinka przyszłej bazy powinno umożliwić optymalne rozwiązanie tego problemu.

kładności. Różne metody stosowane w procesie przenoszenia jednostki długości wnosząc błędy, których część ma charakter systematyczny prowadzą w rezultacie do powstawania odrębnych, trudno porównywalnych systemów. W niniejszym rozdziale będą omówione trzy z nich, te mianowicie które zostały porównane ze sobą na 16-metrowej bazie, utworzonej na części komparatora geodezyjnego w laboratorium Polskiego Komitetu Normalizacji i Miar, udostępnionym Pracowni Metrologii IGiK do prac z zakresu metrologii geodezyjnej. W systemach tych w przenoszeniu jednostki długości pośredniczą:

- 1) kwarcowe wzorce końcowe opisane w poprzednim rozdziale (system Väisälä),
- 2) interferometr laserowy,
- 3) zespół wzorców kreskowych (system wzorców kreskowych).

W tablicy 2 zostały zestawione kolejne etapy przenoszenia jednostki długości właściwe dla danego systemu, począwszy od wspólnego dla wszystkich odtwarzania promieniowania wzorcowego, użytego do zdefiniowania międzynarodowej jednostki długości.

Tablica 2

System Väisälä	Interf. laserowy + aparatura Väisälä	System wzorców kreskowych
1. Kr 86 2. komparator 1-metr. 3. 1-metr. wz. końcowy 4. komparator różn. 5. wzorzec roboczy 6. baza	1. Kr 86 2. Komparator 3. interf. laserowy 4. baza: pomiar metodą Väisälä z użyciem odległości wyjściowej pomierzonej interferometrem	1. Kr 86 2. komparator 1-metr. 3. 1-metr. wz. kresk. 4. komparator 4-metr. 5. 4-metr. wz. roboczy 6. komparator 24 metr. 7. przymiary drutowe 8. baza

II.1. System Väisälä

Do odtwarzania wzorcowej długości fali (etap 1) używa się lamp kryptonowych zawierających izotop kryptonu o masie atomowej 86. Z widma emitowanego w ściśle określonych warunkach promieniowania (np. Proces verbal 1968) wydziela się promieniowanie o wzorcowej długości fali. Dokładność jej odtwarzania przy zachowaniu warunków objętych definicją metra wynosi $4 \cdot 10^{-9}$ (np. Rowley 1973).

Niektóre tylko z państwowych urzędów miar i wysoko postawionych laboratoriów fizycznych na świecie dysponują jednak interferencyjnymi komparatorami pozwalającymi na realizowanie międzynarodowej jednost-

ki długości i przenoszenie jej na przymiary końcowe i kreskowe o długości 1 m. Tylko dwie z tych instytucji — Bureau International des Poids et Mesures (BIMP) w Sèvres i Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) w Brunshwiku — podejmują się sprawdzania kwarcowych wzorców końcowych o zakończeniach sferycznych, używanych w aparaturze Väisälä. Wzorce te wymagają specjalnych stanowisk (Engelhard 1959; Hamon i inni 1965) i stwarzają przy pomiarze znaczne trudności techniczne.

Za pomocą omawianych wyżej komparatorów, realizujących międzynarodową jednostkę długości (etap 2) wzorcowane są niektóre końcowe przymiary kwarcowe do aparatury Väisälä. Dwa dalsze etapy (4 i 5) doprowadzają do utworzenia systemu wzorców Väisälä drogą porównywania pomiędzy sobą wszystkich wzorców systemu i łącznego wyrównania tych obserwacji. Porównywanie długości wzorców, a także wyznaczanie współczynników ich wydłużenia termicznego odbywa się za pośrednictwem komparatora różnicowego, który znajduje się w Tuorli, w obserwatorium astronomicznym Uniwersytetu w Turku. Opis komparatora, zasada działania oraz metoda wyznaczania współczynnika wydłużenia termicznego wzorców znajduje się w pracach Väisälä, Oterma 1964 i Väisälä 1971.

Szósty, ostatni etap przenoszenia jednostki długości na bazy wzorcowe omówiony został szczegółowo w poprzednim rozdziale niniejszej pracy. Dokładność ich pomiaru oszacowana na podstawie analizy ograniczających ją czynników jest w zupełności potwierdzona przez zgodność wyników kolejnych pomiarów baz w Finlandii i RFN (Kukkamäki 1978; Reinhart i inni 1978) zamieszczonych w tablicy 3.

Tablica 3

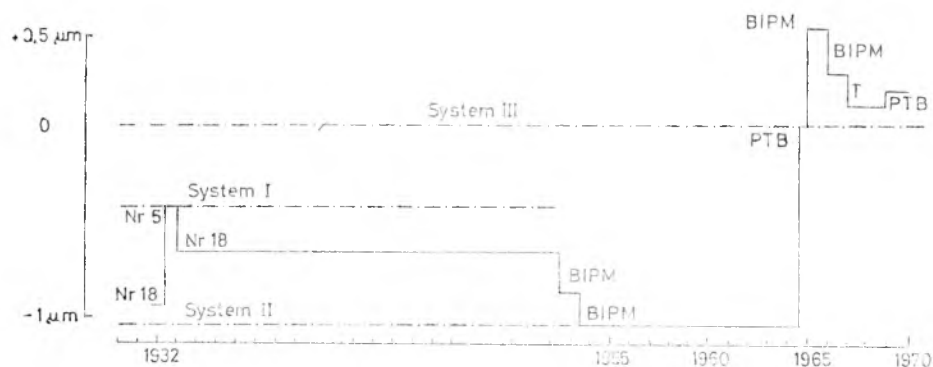
Data	Nummela	Data	Monachium (Ebersberg)
1947,7	864 122,73 mm $\pm$ 0,07 mm	1958	864 065,43 mm $\pm$ 0,07 mm
52,8	22,47 8	60	65,27 9
55,4	22,41 9	61	65,11 5
58,8	22,25 8	63	65,02 7
58,8	22,33 8	69	65,25 12
61,8	22,31 6		
68,8	22,37 7		
75,9	22,33 7		

Wieloletnie badania kilkudziesięciu wzorców do aparatury Väisälä za pośrednictwem komparatora różnicowego (4 i 5 etap przenoszenia jednostki długości) doprowadziły do utworzenia jednorodnego, spójnego we-

wnętrze systemu. Z wyrównania obserwacji, przy założeniu stabilności układu jako całości, wyznaczono poprawki do długości poszczególnych wzorców systemu oraz ich zmiany wiekowe.

Według opinii geodetów fińskich dokładność konserwacji i reprodukcji jednostki długości na tych etapach sięga wyżej niż $1 \cdot 10^{-8}$. Dyskusyjne jednak wydaje się uznanie systemu wzorców Väisälä za niezmienny w czasie (Dobrzycka 1976; Bayer-Helms 1978). Pomimo znanych zalet kwarcu jako materiału stabilnego, a przy tym charakteryzującego się małym współczynnikiem wydłużenia termicznego — trudno wykluczyć możliwość występowania wspólnej składowej starzenia wzorców systemu.

Dyskusję na temat zewnętrznej dokładności systemu Väisälä wywołały jednak przede wszystkim wyniki uzyskiwane przy kolejnych, absolutnych wyznaczeniach parametrów systemu (etapy 2 i 3). Poniżej przedstawione są graficznie kolejne wyniki wzorcowania systemu Väisälä (rys. 9) według danych zaczerpniętych z prac prezentowanych na symposium IAG w Helsinkach (Kukkamäki 1978; Bayer-Helms 1978).



Rys. 9

Po serii porównań wzorca kwarcowego Nr XV z dwoma prototypami o numerach 18 i 5 system Väisälä oparto na platyno-irydowym prototypie fińskim Nr 5 oceniając dokładność odtwarzania za jego pomocą obowiązującej wtedy jednostki długości¹⁰⁾ na $5 \cdot 10^{-7}$. Około 20 lat później, w latach 50-tych, dokonano następnego wzorcowania systemu. Długość wzorców o numerach VIII i XI wyznaczono za pomocą komparatora interferencyjnego w Międzynarodowym Biurze Miar i Wag w Sèvres z użyciem zielonego promieniowania w widmie rtęci. Dokładność tego wyzna-

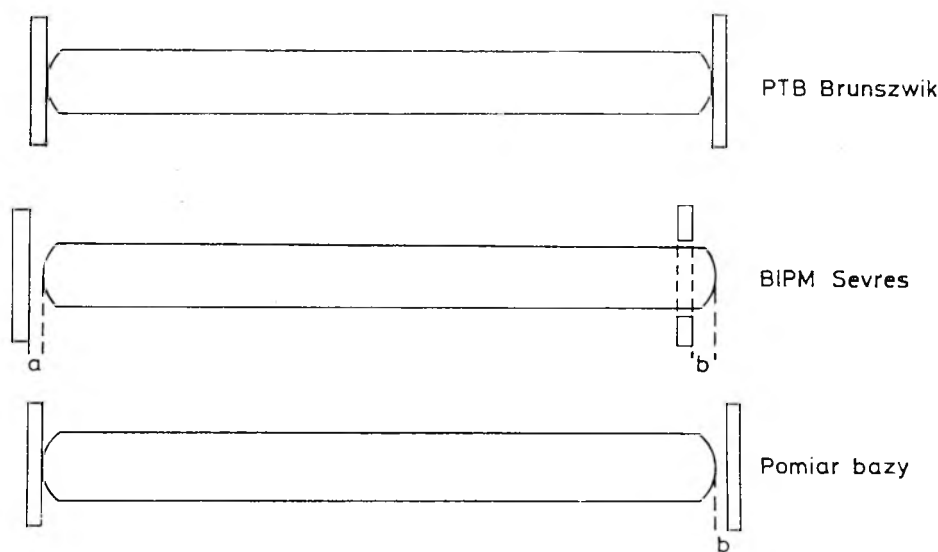
¹⁰⁾ Odległość pomiędzy kreskami wzorca przechowywanego w Sèvres. Z wprowadzeniem nowej definicji metra, obowiązującej od 1960 roku nastąpiła — prawdopodobnie — zmiana systemu długości o około $2 \cdot 10^{-7}$ (np. Baird 1960; Edlen 1966).

czenia oceniono na $1 \cdot 10^{-7}$. Zgodnie z wynikami wyznaczenia, obowiązujący uprzednio system poprawiono o $5 \cdot 10^{-7}$ i przeliczono odpowiednio wyniki wszystkich pomiarów baz metodą Väisälä.

W 1964 roku, z okazji kolejnego pomiaru bazy Ebersberg (Monachium) długość wzorców o numerach 42 i 53 sprawdzono na interferencyjnym komparatorze w PTB w Brunshwiku z użyciem wzorcowego promieniowania w widmie kryptonu 86. Wynik, którego dokładność oceniono na $5 \cdot 10^{-8}$ różnił się od poprzednich o przeszło $1 \cdot 10^{-6}$. Seria dalszych wyznaczeń w BIPM w Sèvres, w Tuorli i Brunshwiku wykazała dalsze rozbieżności dochodzące do $1,5 \cdot 10^{-6}$ (w Sèvres) — przy dokładności poszczególnych wyznaczeń rzędu $2 \cdot 10^{-8}$. Väisälä uznał za najlepszą wartość uzyskaną w Brunshwiku; system ponownie poprawiono, tym razem o $1,03 \cdot 10^{-6}$ i sprowadzono do niego wszystkie bazy wzorcowe pomierzone metodą Väisälä.

Różnice w długości wzorca nr 53 badanego w latach 1964—65 w Sèvres i w Brunshwiku są o rząd większe niż oszacowana na podstawie rozważań teoretycznych i badań eksperymentalnych (Bayer-Helms 1978) zewnętrzna dokładność wyznaczenia. W obu ośrodkach zastosowano różne rozwiązania stanowisk pomiarowych (Engelhard 1959; Hamon i inni 1965), lecz żadne z nich nie jest takie, jak przy pomiarze odległości wyjściowej metodą Väisälä. Rysunek 10 przedstawia schematy tych trzech rozwiązań.

Jako główne źródła błędu wzorcowania przymiarów kwarcowych



Rys. 10

o zakończeniach sferycznych na komparatorze w Brunzwiku Bayer-Helms (1978) uważa:

- błąd w ocenie położenia osi wzorca,
- spłaszczenie powierzchni sferycznych przy mechanicznym kontakcie ze zwierciadłami,
- stopień stabilności materiału.

Istotnie, długość wzorca otrzymana z komparacji w Sèvres (bez mechanicznego kontaktu) jest większa niż w wyznaczeniach z Brunzwiku, lecz o wartość wielokrotnie przewyższającą przewidywany wpływ spłaszczenia powierzchni sferycznych.

Seria absolutnych wyznaczeń długości wzorców systemu Väisälä, przeprowadzona w różnych ośrodkach w latach 1964—69 unaoczniała, że system ten, chociaż wewnętrznie spójny, jest bardzo trudny do określenia względem międzynarodowej jednostki długości. Wyrazem tej sytuacji były dyskusje i zalecenia przyjęte na Sympozjum IAG w Helsinkach (19—22 czerwca 1978 r.) obligujące do ulepszenia metod wzorcowania przymiarów systemu Väisälä oraz do powtarzania tych operacji w odstępach czasu pozwalających na dokładne określenie jego zależności od czasu (Resolution Symposium IAG, 1978).

Poszukuje się także innych rozwiązań pomiaru odcinka wyjściowego, np. drogą zamiany wzorca o zakończeniach sferycznych na wzorec kwarcowy o zakończeniach płaskich z przywartymi — na zasadzie adhezji — zwierciadłami (Kühne, Rauhut 1975; Bayer-Helms 1978), lub pomiaru za pomocą interferometru laserowego (Dobrzycka 1976).

II.2. System realizowany za pośrednictwem interferometru laserowego

System ten zawiera najmniejszą liczbę etapów pomiędzy odtwarzaniem długości fali wzorcowego promieniowania Kr 86 a pomiarem bazy, rokuje więc możliwość osiągnięcia wysokiej zgodności z obowiązującą międzynarodową jednostką długości. Zastosowanie interferometru laserowego do pomiaru odległości wyjściowej, planowane w Pracowni Metrologii IGiK, ma na celu wzmocnienie słabszych ogniw metody Väisälä, a więc:

- wyeliminowanie kwarcowych wzorców końcowych z niewyjaśnionym błędem ich wzorcowania, a także całej grupy związanych z użyciem materialnego wzorca czynników, w istotny sposób wpływających na błąd pomiaru bazy;
- zwiększenie jednorodności warunków atmosferycznych na drodze obu interferujących wiązek poprzez wydłużenie odległości wyjściowej do np. 24 metrów i eliminację tą drogą dwóch pierwszych stopni rozwinięcia väisälowskiego.

Wyznaczenie parametrów promieniowania lasera interferometru względem wzorcowego promieniowania Kr 86 nie wymaga tak skomplikowanych komparatorów jak wzmiankowane uprzednio (II.1) komparatory do wyznaczania długości 1-metrowych wzorców końcowych i kre-skowych. Wzorcowanie takie może odbywać się dwoma metodami, albo czysto elektronicznie przez zdudnianie częstotliwości, albo drogą pośrednią — przez interferencyjny pomiar tej samej odległości w promieniowaniu Kr 86 i w promieniowaniu lasera interferometru ¹¹⁾.

Pomiar bazy z użyciem interferometru laserowego polega na zastosowaniu interferometru do pomiaru odległości wyjściowej (np. 24 m) powielonej następnie za pomocą aparatury Väisälä. Omawiany tu system przenoszenia jednostki długości na bazy wzorcowe nie został jednak jeszcze sprawdzony w praktyce.

Zrealizowanie pomiaru bazy tą drogą wiąże się w Pracowni Metrologii IGiK z możliwością użycia odpowiedniego interferometru. Interferometr taki musi odpowiadać specyficznym wymaganiom, pozwalającym na przeprowadzenie pomiaru w uciążliwych warunkach polowych. Stanowiąc część długiej serii — pomiar odcinka wyjściowego winien być wykonany nie tylko bardzo dokładnie, ale i szybko. Interferometr musi być więc łatwy do ustawiania, szybki w obsłudze, odporny na wilgotność, zmiany temperatury, wstrząsy, turbulencję powietrza i straty promieniowania. Musi być zwarty w budowie, odznaczać się dużym zasięgiem, przy możliwie dużej tolerancji justowania stanowisk, a przy tym musi zapewnić wysoką dokładność pomiaru i niezawodność. Spośród grupy interferometrów budowanych seryjnie najlepiej powyższym warunkom odpowiada interferometr firmy Hewlett-Packard, wyróżniający się zwłaszcza zasięgiem, dokładnością ¹²⁾ i niezawodnością. Taki właśnie interferometr jest już szeroko stosowany w pracach z zakresu metrologii geodezyjnej nie tylko w laboratoriach (np. Gervaise 1978; Paterson 1978), ale i w warunkach polowych (Angus-Lepan 1978). ¹³⁾

Długość fali wiązki pomiarowej jest zależna od refrakcji, a zatem dokładność pomiaru jest uwarunkowana dokładnością parametrów określających warunki atmosferyczne wzdłuż osi pomiaru.

¹¹⁾ Sprawdzanie takie, z dokładnością $4 \cdot 10^{-8}$, może być dokonywane także w Polskim Komitecie Normalizacji i Miar.

¹²⁾ Podawane w ulotkach firmy Hewlett-Packard parametry: zasięg 60 m i dokładność pomiaru $5 \cdot 10^{-7}$ drogą starannej adiustacji i z dokładnym uwzględnieniem warunków termicznych można podwyższyć do 80 m i $1 \cdot 10^{-7}$ odpowiednio (Väätäinen 1978; Takalo 1974).

¹³⁾ Opis budowy i zasady działania tego interferometru znajduje się w pracach Gordona i Dukesa oraz Burgwalda i Krugera (1970).

Odległość L określa się przy pomiarze interferencyjnym liczbą m odłożeń fali promieniowania lasera o długości λ .

$$L = m \cdot \lambda.$$

Jej błąd przedstawia wyrażenie

$$dL = m \cdot d\lambda$$

Wychodząc z wzoru

$$n \cdot \lambda = \lambda_{vac}$$

n — współczynnik załamania ośrodka,

λ — długość fali promieniowania lasera w ośrodku scharakteryzowanym przez współczynnik załamania n ,

λ_{vac} — długość fali promieniowania lasera w próżni
otrzymać można wyrażenie

$$d\lambda = \frac{\lambda \cdot dn}{n}$$

a ponieważ $n \cong 1$

$$d\lambda = \lambda \cdot dn$$

Po dalszych przekształceniach otrzymuje się wyrażenie

$$dL = L \cdot dn$$

lub

$$\frac{dL}{L} = dn$$

Przyjmując, że błąd względny nie powinien przekraczać $1 \cdot 10^{-7}$ można określić wymagania jakie powinno spełniać dn . Wystarczającym przybliżeniem będzie ten sam wzór co i przy omawianiu dokładności pomiaru Väisälä(I.4.4, wzór nr 7). Wynika z niego, że temperaturę należałoby mierzyć z dokładnością 0,05 do 0,07°C, a ciśnienie i wilgotność odpowiednio 0,2 i 2 tory.

Spełnienie tych warunków, zwłaszcza warunku dotyczącego dokładności wyznaczania temperatury powietrza wzdłuż osi pomiaru jest trudne. Przy zastosowaniu jednak odpowiednio gęsto rozmieszczonych termopar (np. co 2 m), osłon przed promieniowaniem cieplnym, zdalnego odczytywania temperatury, odpowiednio dokładnego, normalnego termometru odniesienia i przy właściwym stopniu turbulencji wymagana dokładność powinna być możliwa do osiągnięcia. Wydają się to potwierdzać pomiary przeprowadzone w laboratorium Pracowni Metrologii IGiK i na bazie w Skrzyszewie.

Drugim ważnym, nierozwiązanym jeszcze technicznie zagadnieniem

jest wzorcowanie, za pomocą interferometru, odległości pomiędzy roboczymi powierzchniami zwierciadeł Z_0-Z_1 , to jest odległości wyjściowej do dalszych rozwinięć metodą Väisälä. Dokładność tej operacji dla 24 metrów powinna sięgać kilku mikrometrów. O metodzie muszą tu rozstrzygnąć próby laboratoryjne, co wiąże się z posiadaniem do dyspozycji interferometru.

II.3. System wzorców kreskowych

Jest to system tradycyjny, wymagający dużego nakładu pracy dla utrzymania go w stanie pozwalającym na odtwarzanie jednostki długości dla celów geodezyjnych z dokładnością rzędu $5 \cdot 10^{-7}$. System ten, zastępowany powszechnie przez wprowadzanie komparatorów interferencyjnych, a ostatnio interferometrów laserowych — w Pracowni Metrologii IGiK używany jest nadal do konserwacji jednostki długości i przenoszenia jej na geodezyjne przymiary robocze. Opis zatem systemu wzorców kreskowych będzie zilustrowany materiałem służby metrologicznej realizowanej w IGiK ¹⁴).

Wzorcowanie etalonów systemu (etapy 1, 2 i 3 przenoszenia jednostki długości) odbywa się za pośrednictwem komparatorów interferencyjnych wspomnianych przy opisie systemu Väisälä (II.1). Za pomocą wzorca o wyznaczonej na takim komparatorze długości wyznacza się długość 4-metrowego komparatora, stanowiącego zazwyczaj część komparatora geodezyjnego, a za jego pośrednictwem określa się długość 4-metrowego wzorca roboczego (etapy 4 i 5) ¹⁵). Wzorzec ten służy do wyznaczania długości komparatora geodezyjnego (etap 6), na którym sprawdza się 24-metrowe (rzadziej 50-metrowe) inwarowe przymiary drutowe (etap 7), używane następnie do pomiaru baz geodezyjnych (etap 8). Bazy te nadają skalę sieciom geodezyjnym bezpośrednio lub służąc jako komparatory do przenoszenia jednostki długości na narzędzia do pomiaru odległości.

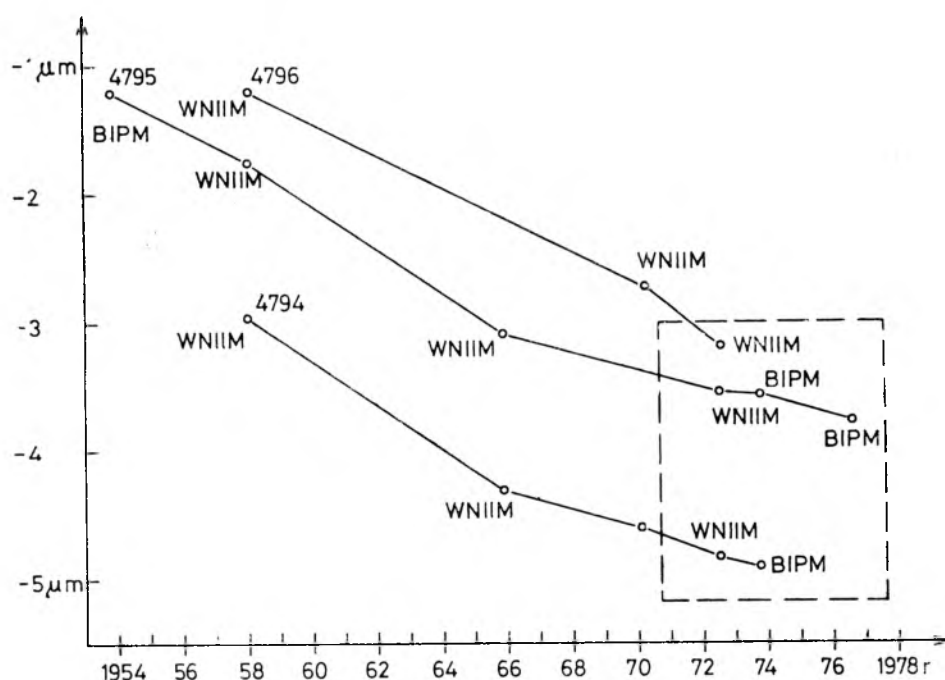
Podstawę służby metrologicznej IGiK stanowią trzy wzorce 1-metrowe, 4-metrowy wzorzec roboczy, 1-metrowy komparator uniwersalny firmy SIP i 50-metrowy komparator geodezyjny. Wzorce sporządzone są z platynitu. Komparator geodezyjny jest wyposażony w 18 dobrej

¹⁴) Program prac nad konserwacją jednostki długości dla Polskiej Służby Geodezyjnej opisany jest w pracy Cisaka i innych (1974). Zwiększenie — obecnie — dokładności uzyskano przez wymianę mikroskopów i zastosowanie termopar do pomiaru temperatury wzorców.

¹⁵) W niektórych laboratoriach używa się wzorców roboczych o długości 3 m.

klasy mikroskopów spiralnych firmy Zeiss Jena, osadzonych na słupach posadowionych na wspólnej stopie fundamentowej w podziemiach PKNiM, w 60-metrowej długości korytarzu o szerokości około 2 m i wysokości 3 m. Brak klimatyzacji i sąsiedztwo pomieszczeń różnego przeznaczenia nie sprzyja stabilnemu i równomiernemu rozkładowi temperatury, co ze względu na znaczny współczynnik wydłużenia termicznego platynitu stanowi główną trudność w utrzymaniu wysokiej dokładności w etapach przenoszenia jednostki długości pośredniczących we wzorcowaniu komparatora geodezyjnego.

Wzorcowanie 1-metrowych etalonów znajdujących się w dyspozycji Pracowni Metrologii IGiK przeprowadzane jest w BIPM w Sèvres

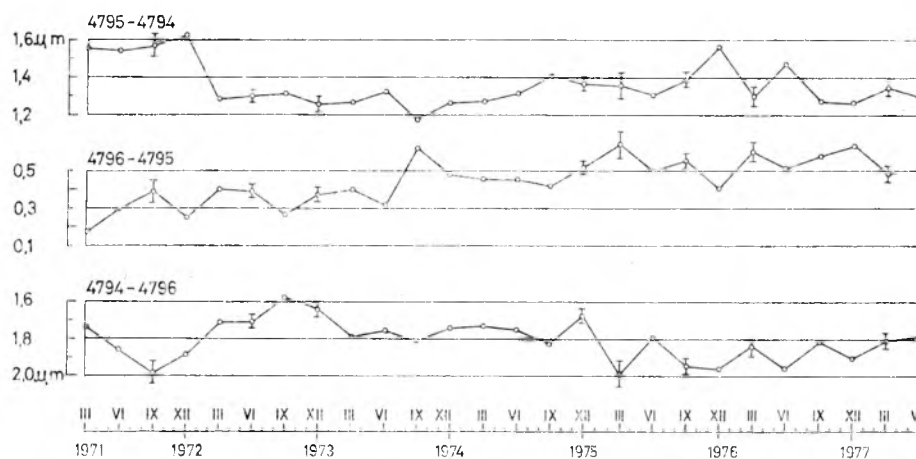


Rys. 11

i w WNIIM w Leningradzie. Według świadectwa dokładność takiego wyznaczenia w Sèvres wynosi $2 \cdot 10^{-8}$. Na rysunku 11 uwidocznione są wyniki kolejnego wzorcowania systemu.

Jak widać wzorce nadal skracają swą długość. Co kwartał wszystkie trzy wzorce porównywane są między sobą na wizualnym komparatorze

firmy SIP. Wyniki tych porównań przedstawione są na wykresie (rys. 12).



Rys. 12

Z wykresu tego, jeżeli wziąć pod uwagę różnice długości wzorców, a zarazem nieznaczne na ogół błędy ich wyznaczania — widać, że dokładność podawana w świadectwie odnosi się do chwilowej długości wzorca. W rzeczywistości wzorce ciągle i nieregularnie zmieniają długość i odtwarzają za ich pomocą jednostkę długości należy się liczyć z błędami na poziomie 2 do $3 \cdot 10^{-7}$. Jest to zresztą zjawisko typowe dla wzorów sporządzonych z tego rodzaju stopu niklu i żelaza (Barinov 1941; Kajak 1961).

Za pomocą wzorców 1-metrowych wyznaczana jest długość 4-metrowego wzorca roboczego (4 i 5 etap przenoszenia jednostki długości). O dokładności uzyskiwanej na tych etapach decydują:

- zadowalająca dokładność wyznaczania temperatury wzorców,
- odpowiednia jakość mikroskopów,
- należyta adiustacja komparatora.

Temperatura wzorców

Przy znacznym, bo wynoszącym $6,5 \mu\text{m/m} \cdot 1^\circ\text{C}$ współczynniku wydłużenia termicznego platynitu odtwarzanie jednostki długości za pomocą wzorców wymaga dużej dokładności określania ich temperatury, a także dokładnej znajomości samego współczynnika. Dla uzyskania dokładności odtwarzania na poziomie $2 \cdot 10^{-7}$ należałoby znać temperaturę z błędem nie większym niż $0,03^\circ\text{C}$. W warunkach laboratorium Pracowni Metrologii IGiK jest to dokładność nieosiągalna. Stosując zestawy termopar, oraz

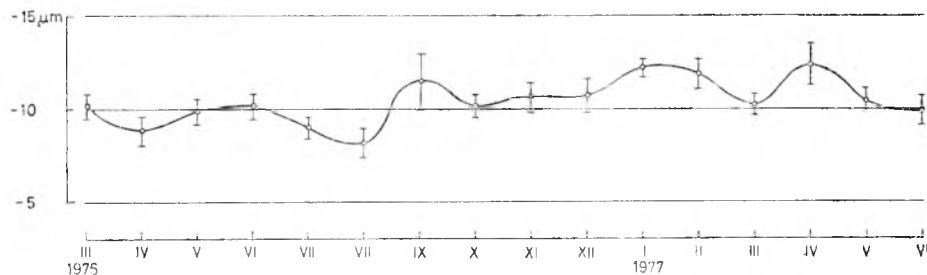
termometry normalne z podziałką do $0,02^{\circ}\text{C}$ sprawdzone w laboratorium termometrii PKNiM, można uzyskać dokładność wyznaczenia temperatury wzorców w granicach $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$.

Mikroskopy

Spiralne mikroskopy firmy Zeiss Jena, w które jest wyposażony komparator geodezyjny, odznaczają się bardzo wysoką jakością. Badanie ich za pomocą wzorca o podziałce co $0,1\text{ mm}$ nie wykazało błędów większych niż $0,2\text{ }\mu\text{m}$ w zakresie pomiarowym mikroskopu. Wieloletni materiał obserwacyjny wskazuje, że pośrednictwo tych mikroskopów w procesie komparacji nie obniża jego dokładności więcej niż 1 do $2 \cdot 10^{-7}$.

Adiustacja komparatora

Punkty przecięcia się osi mikroskopów z ich płaszczyznami przedmiotowymi powinny leżeć w linii prostej i tworzyć oś komparatora. Odchylenia tych punktów od osi, powodujące błędy ustawiania 1-metrowych wzorców w osi 4-metrowego komparatora przy jego wzorcowaniu, wpływają na wyznaczaną długość 4-metrowego wzorca roboczego w sposób systematyczny i jednokierunkowy. Wyznaczana długość wzorca jest zawsze dłuższa od rzeczywistej, przy czym odchylenia od osi rzędu $0,4\text{ mm}$ spowodować mogą błąd wzorca roboczego wynoszący $2 \cdot 10^{-7}$. Adiustacja komparatora musi więc spełniać wysokie wymagania nie łatwe do zrealizowania, między innymi ze względu na zakres (głębokość) ostrości mikroskopów.



Rys. 13

Wykres (rys. 13) przedstawia wyniki wyznaczania długości 4-metrowego wzorca roboczego w Pracowni Metrologii IGIK. Z przebiegu wykresu można wnioskować, że — przy zachowaniu odpowiednich warunków pomiaru — w laboratorium Pracowni Metrologii IGIK wzorzec ten powinien realizować odpowiednią odległość z dokładnością około $5 \cdot 10^{-7}$.

Długość komparatora do sprawdzania geodezyjnych przymiarów roboczych, realizowana przez odpowiednie odległości jego mikroskopów (np.

24 m) wyznaczana jest za pośrednictwem 4-metrowego, omówionego wyżej wzorca (etap 6). Dokładność wewnętrzna takiego wyznaczenia — z zachowaniem wszystkich prawideł pomiaru przez wprawnych obserwatorów — jest bardzo wysoka, sięgająca 2 do 3 μm na 24 metry. O dokładności uzyskiwanej na tym etapie przenoszenia jednostki długości, a przy tym również o stabilności samego komparatora świadczyć może poniższe zestawienie, na które składa się seria kolejnych wyznaczeń długości 16-metrowego odcinka komparatora geodezyjnego, wykonana w okresie dwóch tygodni (tabl. 4). Można zatem sądzić, że etap ten nie wnosi istotnego obniżenia dokładności w procesie przenoszenia i odtwarzania jednostki długości.

Tablica 4

Data	Dł. komparatora
9.3.1978	16 m — 543 μm
10.3	— 535
17.3	— 537
20.3	— 536
21.3	— 539

Znaczne obniżenie dokładności następuje natomiast w pozostałych etapach, w tych w których uczestniczą inwarowe przymiary drutowe. Dokładność wyznaczania długości przymiaru drutowego ograniczona jest z jednej strony sumowaniem się błędów poszczególnych etapów przenoszenia jednostki długości, z drugiej zaś, i to w głównej mierze właściwościami samego przymiaru, w tym większym stopniu im gorszy jest stan drutu. Pomimo dobrej zgodności wewnętrznej w toku sprawdzania przymiaru, na który składa się wiele obserwacji, poprawka do jego długości uzyskana z komparacji laboratoryjnej z reguły różni się — nieraz znacznie — od tej, która winna być dla tego przymiaru stosowana w pomiarach polowych (Dobrzycka 1978).

Prócz błędów o charakterze przypadkowym poprawki uzyskane w procesie komparacji laboratoryjnej zawierają także część systematyczną, wspólną dla całej grupy przymiarów jak np. przy komparacjach w MIGAiK i w CUJiM (Dobrzycka 1978), w Pradze i w Moskwie (Weise 1966) czy w Paryżu i Helsinkach (Honkasalo 1968). W efekcie dokładność pomiaru inwarowymi przymiarami drutowymi skomparowanymi laboratoryjnie odbiega znacznie od $1 \cdot 10^{-6}$, czego przykładem mogą być wyniki 3-krotnego pomiaru bazy w Skrzyszewie i wielokrotnego — w ciągu przeszło 40 lat — w Poczdamie (Weise 1966; Dobrzycka 1976).

O możliwości poprawy dokładności wyników pomiarów baz za pomocą inwarowych przymiarów drutowych drogą zwiększenia liczby biorących udział w pomiarze drutów (nawet do 18) oraz komparowania ich w dwóch laboratoriach (PTB i BIPM) wydają się świadczyć wyniki zreferowane w pracy Reinharta i innych (Helsinki 1978). Drugi sposób powiększenia dokładności, polegający na polowej komparacji przymiarów drutowych na bazie pomierzonej interferencyjnie nie należy do omawianego tu systemu wzorców kreskowych.

III. PORÓWNANIE SYSTEMÓW

W ubiegłym stuleciu pomiary baz w sieciach podstawowych wykonywano za pomocą aparatów bazowych różnej konstrukcji, opartych na 3—4-metrowych sztywnych przymiarach metalowych końcowych lub kreskowych. Pomiary te były niezwykle uciążliwe, przewlekłe i wymagały dużej ekipy pomiarowej. Dokładność ich oceniano na $2 \cdot 10^{-6}$. Z uwagi na rozszerzanie pomiarów na wciąż nowe obszary, a także na koszty związane z pomiarem baz — do rzadkości należały próby bezpośredniej weryfikacji ich skali. Niejednorodność skali stwierdzana przy próbach łączenia sieci triangulacyjnych była bodźcem do zawiązania Konwencji Metrycznej 1875 roku i zdefiniowania międzynarodowej jednostki długości.

Istotnym postępem w dziedzinie pomiaru baz było zastosowanie aparatury Jäderina, która pozwalała na znaczne usprawnienie procesu pomiarowego, a uzyskiwane zgodności wewnętrzne dały podstawę do wysokiej oceny dokładności tej metody pomiaru. Ale i w tym wypadku łączenie różnych sieci wskazywało na defekty ich skali.

Przykładem zakrojonej na dużą skalę operacji z udziałem ośmiu państw były w latach 30-tych bieżącego stulecia prace Komisji Bałtyckiej. Z tego właśnie czasu datuje się koncepcja baz wzorcowych pozwalająca na ujednolicenie skali sieci geodezyjnych. Na ten okres przypadły też doświadczenia Väisäli, próby budowy komparatorów interferencyjnych, a następnie próby bezpośredniego, interferencyjnego pomiaru bazy wzorcowej. Prace w tej dziedzinie prowadzono głównie w Finlandii i w roku 1947 dokonano metodą Väisälä pierwszego pomiaru 864-metrowej bazy w Nummela. Po dalszych udanych eksperymentach na bazie w Nummela — MUGG w 1954 roku zaleciła zakładanie krajowych baz wzorcowych i mierzenie ich, w miarę możliwości, metodą Väisälä. Dotychczas bazy takie pomierzono w 10 krajach (Kukkamäki 1978; Dobrzycka 1978).

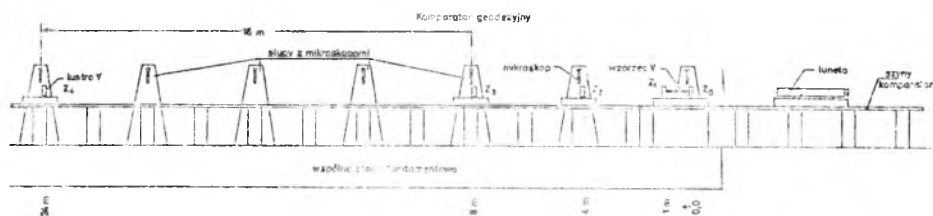
Powtarzalność wyników uzyskiwanych w kolejnych pomiarach bazy w Nummela zdawały się świadczyć o niezwykle wysokiej — rzędu $1 \cdot 10^{-7}$

— dokładności pomiaru. Kolejne wzorcowanie systemu, zwłaszcza zaś seria z lat 1964 — 70, uzmysłowiło jednak, że wskaźnik ten określa spójność wewnętrzną systemu. Dokładność zewnętrzna, względem obowiązującej międzynarodowej jednostki długości pozostała kwestią otwartą.

Podjęta w Pracowni Metrologii IGiK próba weryfikacji systemu Väisälä związana była z pracami nad interferencyjnym pomiarem Krajowej Bazy Długościowej w Skrzyszewie, a mianowicie z dążeniem do określenia jego rzeczywistej dokładności. System ten porównano z systemem wzorców kreskowych i — pośrednio — z interferometrem laserowym, wychodząc z założenia, że porównanie takie może przybliżyć ocenę dokładności przenoszenia jednostki długości metodą Väisälä do jej wartości rzeczywistej.

W zamierzeniach miało to być porównanie jednoczesne, polegające na pomiarzeniu tego samego 16-metrowego odcinka komparatora geodezyjnego trzema metodami: metodą Väisälä, wzorcem 4-metrowym i interferometrem laserowym w ramach jednej, powtórzonej wielokrotnie w ciągu kilku dni serii. Okoliczności¹⁶⁾ pozwoliły tylko na porównanie systemów parami: systemu Väisälä z systemem wzorców kreskowych, a następnie, po kilku miesiącach — systemu wzorców kreskowych z interferometrem laserowym, co oczywiście umniejsza wagę wyników.

Bazę, na której porównywano systemy, stanowił 16-metrowy odcinek komparatora geodezyjnego pomiędzy osiami odpowiednich mikroskopów. Przy pomiarze metodą Väisälä, przy którym użyto potrójnego rozwinięcia: 0—1—4; 0—4—8; 0—8—24, odcinek ten wyznaczała różnica odległości (0—24)—(0—8). Taki sposób wyznaczania długości bazy pozwalał na pomiar wzorcem 4-metrowym bez zdejmowania podstaw pod zwierciadła. Podstawy te spoczywały na przenośnych, drewnianych konstrukcjach ułożonych na torowisku komparatora, izolowanych dla amortyzacji wstrząsów za pomocą podkładek gumowych. Pod aparaturą do pomiaru



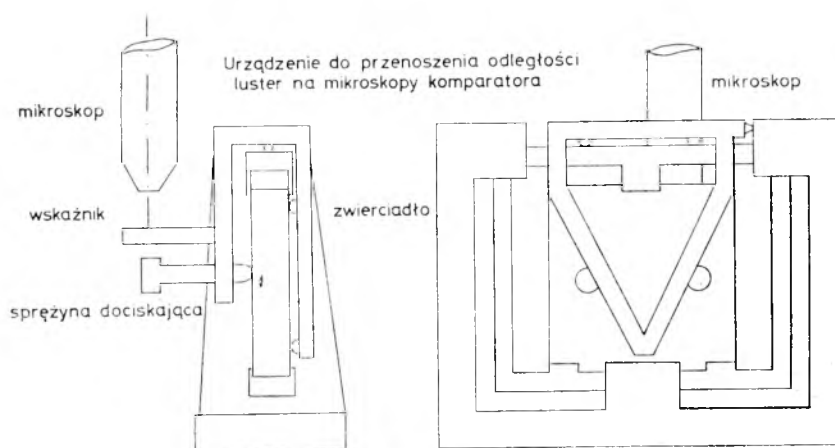
Rys. 14

¹⁶⁾ W czasie gdy możliwy był dostęp do interferometru laserowego wzorce do aparatury Väisälä znajdowały się w Finlandii.

odcinka wyjściowego Z_0-Z_1 zbudowano murowany słup. Schemat komparatora i rozstawienia aparatury uwidoczniony jest na rysunku 14.

Interferencyjnie pomierzoną odległość Z_4-Z_3 przenoszono na bazę zrealizowaną przez osie mikroskopów za pomocą urządzenia przedstawionego na rysunku 15.

Błąd przenoszenia odległości za pomocą tego urządzenia nie przekracza $2\text{ }\mu\text{m}$.



Rys. 15

Do pomiaru temperatury wzdłuż osi pomiaru i temperatury kwarcowego wzorca końcowego służył zestaw, na który składało się 9 termopar miedziowo-konstantanowych o oporności po $60\text{ }\Omega$ każda, galwanometr zwierciadlany GL2 o czułości około $3 \cdot 10^{-8}\text{ A/dz}$ i termometr normalny o wartości działki $0,02^\circ\text{C}$, sprawdzony w PKNiM dokładnością $0,04^\circ\text{C}$. Czułość zestawu wynosi $0,020^\circ\text{C/dz}$. Temperatura wzorca 4-metrowego była mierzona podobnym zestawem, o czułości — ze względu na znaczny współczynnik rozszerzalności termicznej platynitu — wyższej, mianowicie $0,008^\circ\text{C/dz}$.

Wykonano 11 serii pomiarów według następującego schematu:

- wyznaczenie długości bazy za pomocą wzorca 4-metrowego,
- pomiar metodą Väisälä,
- ponowny pomiar za pomocą wzorca.

W dniach 20.2, 22.3, 10.4 i 13.4 1978 roku dokonano wyznaczeń długości 4-metrowego wzorca roboczego za pomocą wzorców 1-metrowych. Poniżej zamieszczone jest zestawienie zawierające wyniki porównania tych dwóch systemów (tabl. 5).

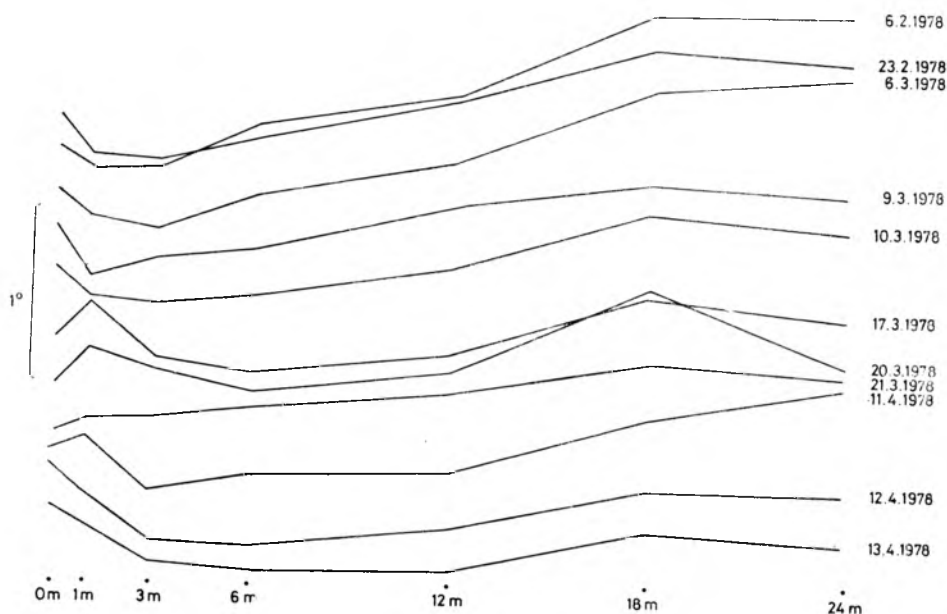
Tablica 5

Data	Odl. osi mikr. w syst. wz. kresk.	Odl. osi mikr. w syst. Väisälä	Różnica
6.2.1978	16 m — 190 μm	16 m — 197 μm	+7 μm
23.2	— 215	— 216	+1
6.3	— 567	— 585	+18
9.3	— 543	— 550	+7
10.3	— 535	— 553	+9
17.3	— 537	— 546	+18
20.3	— 536	— 544	+8
21.3	— 539	— 547	+8
11.4	— 245	— 267	+22
12.4	— 249	— 269	+20
13.4	— 243	— 258	+15

W średniej różnica systemów wynosi:

$$\text{Wzorce kr. — syst. Väisälä} = +12 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$$

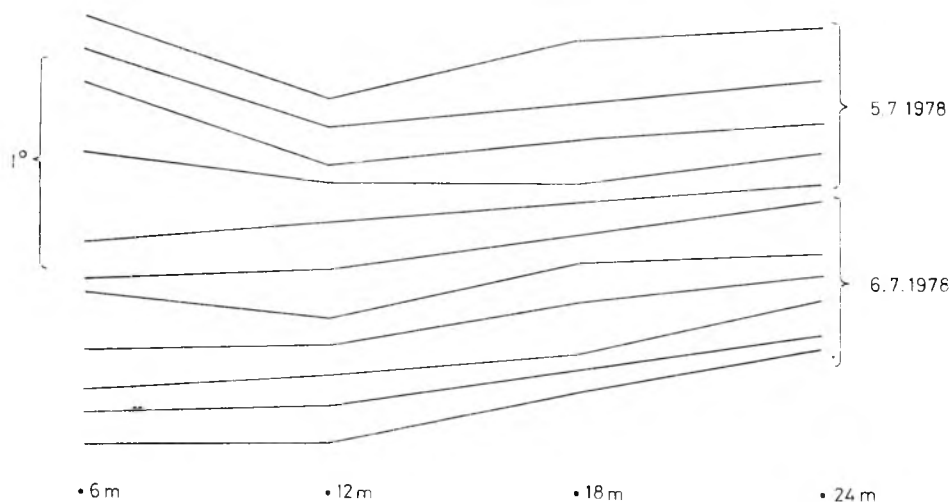
Na znaczny rozrzut wyników miał wpływ przede wszystkim niekorzystny rozkład temperatury w laboratorium i niedostateczna stabilność słupa pod stanowiska aparatury do pomiaru odległości wyjściowej $Z_0 - Z_1$. Brak klimatyzacji w pomieszczeniu laboratorium, sąsiedztwo różnych, niejednocześnie ogrzewanych pomieszczeń (piwnice, warsztaty, labora-



Rys. 16

toria) wpływały na niestabilny i nierównomierny rozkład temperatury pomimo stosowania wentylatorów i wyłączenia — lokalnie — ogrzewania. Przebieg temperatury wzdłuż osi pomiaru dla poszczególnych serii obserwacji podany jest na rysunku 16.

Niespokojne obrazy interferencyjne były powodem przechodzenia do odległości 24 m aż trzema rozwinięciami, co musiało również mieć swój udział w obniżeniu dokładności pomiaru. Słup pod stanowisko z aparaturą do pomiaru odległości wyjściowej spoczywał bezpośrednio na podłodze laboratorium i przenosił jej drgania na aparaturę, co wymagało szczególnych ostrożności podczas pomiaru.



Rys. 17

W związku z podanymi wyżej okolicznościami wyniki porównania systemu Väisälä z systemem wzorców kreskowych w laboratorium Pracowni Metrologii IGiK obarczone są znacznym rozrzutem. Można jednak skonstatować, że systemy te różnią się w sposób systematyczny, chociaż różnica ta mieści się — w zasadzie — w granicach przewidywanych błędów obu tych metod, dyskutowanych w rozdziale II.

W lipcu 1978 roku udało się przeprowadzić porównanie systemu wzorców kreskowych z interferometrem laserowym firmy Hewlett - Packard, model 5526 A dzięki uprzejmości Zakładu Badań Centrum Badawczo-Konstrukcyjnego Obrabiarek w Pruszkowie. Tym razem uzyskano znakomitą powtarzalność wyników, częściowo zapewne dzięki poprawie rozkładu temperatury w laboratorium, przedstawionego na rysunku 17.

Do pomiaru temperatury służył ten sam co i poprzednio zestaw termopar. Ciśnienie obserwowano za pomocą atestowanego altimetru Paulina, a wilgotność według wskazań aparatury należącej do wyposażenia

interferometru. Dla uwzględniania poprawki refrakcyjnej nie korzystano więc z automatyki interferometru, lecz z wartości stabulowanych, odpowiadających pomierzonym parametrom — wprowadzanych następnie do komputera. Na przesuwającym po torowisku reflektorze pomiarowym umieszczony był wskaźnik obserwowany kolejno przez mikroskop realizujący 16-metrową mierzoną bazę. Przed i po serii porównań, w dniach 30.6 i 7.7 wyznaczono długość 4-metrowego wzorca roboczego za pomocą wzorców 1-metrowych. Wyniki porównania systemu wzorców kreskowych z interferometrem laserowym umieszczone są w tablicy 6.

Tablica 6

Data	Odl. osi mikr. w syst. wz. kreks.	Odl. osi mikr. interf. laserowy	Różnica
5.7.1978	16 m — 200 μm	16 m — 208 μm	śr. +8 μm
		— 208	
		— 207	
		— 208	
6.7.1978	16 m — 203 μm	— 208	śr. +8 μm
		— 210	
		— 210	
		— 210	
		— 210	
		— 210	
		— 209	
		— 210	
		— 211	
		— 212	
	16 m — 202 μm	— 211	

W średniej różnica systemów wynosi

$$\text{wzorce kr. — int. laserowy} = +8 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$$

Otrzymane tu wyniki, łącznie z przeprowadzonym wcześniej porównaniem systemu wzorców kreskowych z systemem Väisälä — mimo dzielącego obie serie czasu — skłaniają do następującej interpretacji:

— przenoszenie jednostki długości za pomocą wzorców kreskowych w Pracowni Metrologii IGiK obarczone jest błędem systematycznym rzędu $5 \cdot 10^{-7}$. Jedną z przyczyn, na którą wskazuje znak różnicy systemów — jest zapewne błąd adiustacji komparatora geodezyjnego, przede wszystkim na 4-metrowym odcinku służącym do wyznaczania długości 4-metrowego wzorca roboczego.

— o dokładności zewnętrznej systemu Väisälä uzyskane wyniki nie przesądzają, można z nich jednak wnioskować, że system ten powinien

być o 2 do $3 \cdot 10^{-7}$ poprawiony w kierunku wyznaczeń z lat 1965—69 dokonanych w BIPM, Tuorli i PTB (rozdz. II, rys. 9).

Reasumując powyższe, oraz wywody przedstawione w rozdziałach poprzednich można stwierdzić, że dokładność pomiaru baz metodą Väisälä rzędu kilku 10-milionowych jest jego dokładnością rzeczywistą.

IV. POMIARY KRAJOWEJ BAZY DŁUGOŚCIOWEJ W SKRZESZEWIE

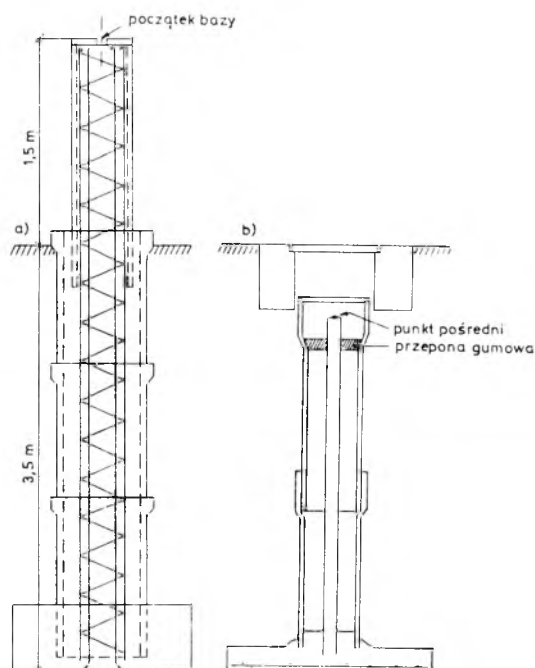
Realizując zalecenia MUGG i ustalenia Służb Geodezyjnych państw bloku socjalistycznego ustanowiono w latach 1968—69 Krajową Bazę Długościową. Baza ta, służąca jako fundamentalny komparator geodezyjny została w 1969, 1970 i 1974 roku pomierzona drutami Jäderina, a w 1977 roku metodą Väisälä. Ponieważ w początku lat 80-tych baza ma ulec likwidacji pomiar metodą Väisälä miał służyć dwóm celom:

- wyznaczeniu długości bazy w Skrzeszewie z możliwie wysoką dokładnością dla prac bieżących związanych z atestowaniem narzędzi do pomiaru odległości,
- uzyskaniu doświadczenia pozwalającego na optymalny wybór i zabudowę przyszłej bazy wzorcowej spełniającej najlepiej wymagania atestacji i umożliwiającej wyzyskanie walorów metody Väisälä.

IV.1. Zabudowa bazy

Krajowa Baza Długościowa w Skrzeszewie położona około 40 km na północ od Warszawy usytuowana jest w terenie odkrytym na nieczynnym torowisku linii Legionowo-Nasielsk. Składają się na nią cztery położone w jednej linii odcinki o łącznej długości 768 m. Trzy punkty pośrednie (rys. 20) odległe od początku bazy o 96, 288 i 576 m, zastabilizowane jak na rysunku 18b są położone około 30 cm poniżej powierzchni gruntu.

Punkty te są wyznaczane przez przecięcie się podziałek ułożonych prostopadle do osi bazy z przechodzącą przez nią płaszczyzną pionową. Ten sposób realizacji punktów miał na celu umożliwienie odpionowywania ich w osi bazy, bez względu na ewentualne ruchy poprzeczne, pozwalając przy tym na ich sprawdzanie — stwarzał jednak trudności przy pomiarze metodą Väisälä (IV.3.3). Obudowane lekkimi pawilonami końcowe punkty bazy, wyniesione do wysokości około 1,7 m zrealizowane są za pomocą tulejek osadzonych w płytach o promieniu 22 cm, umieszczonych na zbrojonych, betonowych słupach (rys. 18a). Oś bazy przebiega



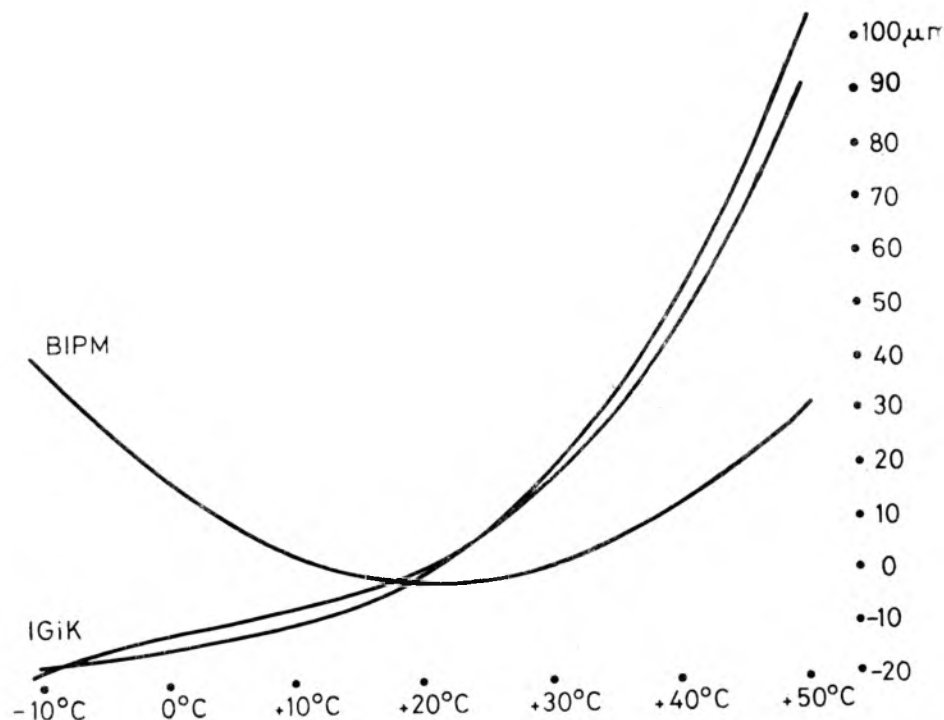
Rys. 18

więc 1,5 do 2,0 m nad powierzchnią gruntu. Tulejki pozwalają na automatyczne centrowanie sprawdzanych na bazie narzędzi.

IV.2. Pomiary inwarowymi przymiarami drutowymi

Baza w Skrzyszewie została trzykrotnie pomierzona drutami Jäderina. Pomiary przeprowadzało Państwowe Przedsiębiorstwo Geodezyjne. Za każdym razem używano 6 przymiarów drutowych firmy Secretan, sprawdzanych przed i po pomiarze w Centralnym Urzędzie Jakości i Miar (obecnie PKNiM) w latach 1969—70, a w 1974 roku w Pracowni Metrologii IGiK. Współczynniki wydłużenia termicznego tych drutów zostały wyznaczone na wybudowanym w Pracowni Metrologii dylatometrze (Cisak i inni 1973). Uzyskane wyniki różnią się od współczynnika tych przymiarów według wyznaczenia w BIPM w 1954 roku. Najlepiej różnicę tę charakteryzuje wykres (rys. 19) przedstawiający wydłużenie przymiarów w zależności od temperatury. Dla przejrzystości rysunku do sporządzenia wykresu posłużyły średnie ze współczynników dla dwóch grup przymiarów (po trzy).

Z trzech pomiarów drutami inwarowymi uzyskano następujące wyniki (tabl. 7).



Rys. 19

Tablica 7

Data	Miejsce komp.	„0—96”	„0—288”	„0—576”	„0—768”
1969	PKNiM	97989,9 mm	288002,1 mm	575910,1 mm	767893,8 mm
1970	PKNiM	9,1	1,0	09,3	2,4
1974	IGiK	9,1	0,6	8,8	1,7

Wyniki te, omówione szerzej w pracy autorki zamieszczonej w Biuletynie Informacyjnym IGiK (1978), wskazują jako przyczynę ich różnice sumowanie się błędów w procesie przenoszenia jednostki długości na przymiary robocze. Komparacja laboratoryjna, zwłaszcza — jak w tym wypadku — drutów w złym stanie nie oddaje poprawnych długości, właściwych tym przymiarom w czasie pomiarów polowych. Mimo to, na podstawie wyników kolejnych pomiarów można określić stabilność zabudowy bazy dzięki stosunkowo dużej liczbie punktów pośrednich.

We wszystkich trzech pomiarach występuje wyraźna proporcjonalność, znamienne dla błędów skali. Wyniki poszczególnych pomiarów sprowa-

Tablica 8

Data	„0—96”	„0—288”	„0—576”	„0—768”
1969	+0,34 mm	+0,31 mm	—0,37 mm	—0,28 mm
1970	—0,23	—0,10	+0,18	+0,14
1974	—0,13	—0,20	+0,19	+0,14

dzono więc do wspólnej, hipotetycznej skali i otrzymano następującą tablicę odchylek charakteryzujących stabilność punktów bazy (tabl. 8).

Poza pomiarem z 1969 roku, przeprowadzonym bezpośrednio po założeniu bazy — otrzymane odchyłki nie przekraczają błędów pomiaru i potwierdzają, że zastosowany w Skrzyszewie sposób stabilizacji nie wnosi elementów niepożądanych, a dzięki możliwości automatycznego centrowania powinien zapewnić optymalną dokładność atestacji a także przeniesienia na punkty bazowe odległości zwierciadeł mierzonej interferencyjnie.

IV.3. Pomiar metodą Väisälä

Przygotowania do pomiaru bazy w Skrzyszewie metodą Väisälä rozpoczęto od renowacji i uzupełnienia aparatury, oraz prób laboratoryjnych. Jesienią 1975 roku członek zespołu Pracowni Metrologii IGiK Jan Cisak odbył 3-miesięczny staż w Fińskim Instytucie Geodezyjnym biorąc udział w interferencyjnym pomiarze bazy w Nummela, równolegle zaś przygotowano projekt zabudowy kierując się następującymi założeniami:

- pomiar powinien przebiegać w tych samych warstwach atmosfery i wzdłuż tej samej osi co atestacje dalmierzy,
- stanowiska pod aparaturę Väisälä winny być instalowane tylko na okres pomiaru tak, aby nie stwarzały zakłóceń przy sprawdzaniu różnych rodzajów dalmierzy.

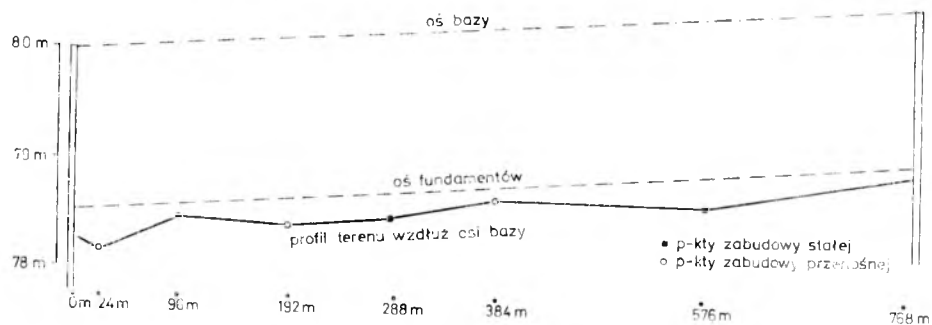
Założenia te, oraz oryginalny sposób rozwiązania stabilizacji punktów bazy wymagały zbudowania nietypowych stanowisk pod aparaturę dla pomiaru interferencyjnego, których rozwiązanie okazało się jednak nie w pełni dogodne w zastosowaniu do metody Väisälä.

IV.3.1. Zabudowa dla pomiaru metodą Väisälä

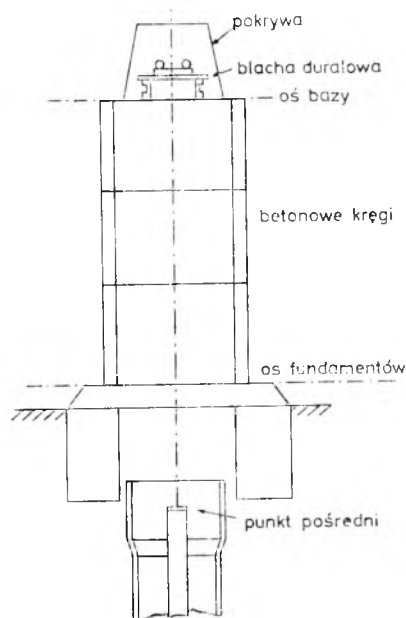
Pomiarzenie całkowitej długości bazy w Skrzyszewie wymagało zastosowania rozwinięcia 0-6-24-96-192-384-768. Tylko jeden więc z istniejących punktów pośrednich bazy (96 m) mógł być w ten pomiar włączony.

ny. Pozostałe należało dostabilizować. Przy wszystkich punktach pośrednich pobudowano odpowiedniej wysokości fundamenty pod zabudowę przenośną. Profil bazy przedstawiony jest na rysunku 20.

Schemat zabudowy punktów pośrednich uwidoczniiony jest na rysunku 21. Elementy tej zabudowy stanowiły kręgi betonowe o wysokości 0,50, średnicy 0,80 i grubości ścian 0,12 m, ułożone po trzy jeden na drugim. Dla ochrony przed opadami atmosferycznymi kręgi przykryte są blachą. Stanowiska pod aparaturę wykonano z 7-milimetrowej blachy duraluminiowej przykręcone do stalowych szyn spoczywających na krę-



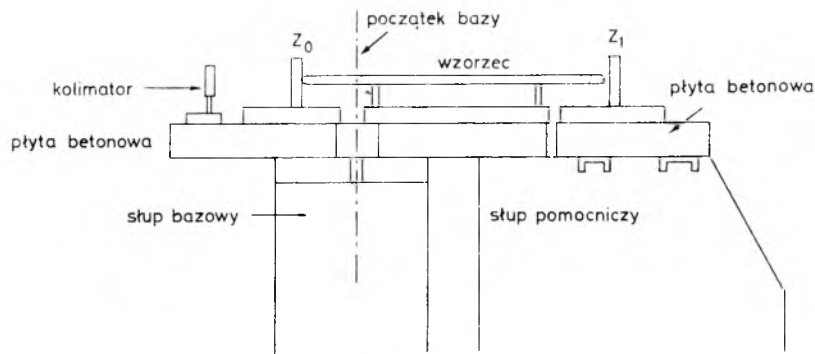
Rys. 20



Rys. 21

gach. Nad centrem znajdowały się otwory pozwalające na odpionowywanie punktów.

Przy początkowym punkcie bazy, wewnątrz pawilonu dobudowano słup, który — wraz ze słupem zerowym — służył do podtrzymywania stanowiska pod aparaturę do pomiaru odległości wyjściowej $Z_0 - Z_1$. W początkowej fazie pomiarów stanowisko to przygotowano również z blachy duraluminiowej spoczywającej na stalowych szynach, jednakże ze względu na efekty rozszerzalności płyty i szyn rozwiązanie to zastąpiono następnie przez dwie płyty betonowe jak na rysunku 22.



Rys. 22

IV.3.2. Aparatura

Do pomiaru bazy w Skrzyszewie użyto oryginalnej, zakupionej w latach 50-tych w Finlandii aparatury Väisälä, uzupełnionej w 1975 roku o drugi wzorzec kwarcowy i zwierciadło z zestawu holograficznego PZO. Urządzenia te charakteryzowały się następującymi danymi technicznymi:

Wzorce kwarcowe sprawdzone w Tuorli w 1975 roku o równaniach

$$L_{55} = -51,71 \mu\text{m} + 0,462 \mu\text{m} (t - 20^\circ\text{C}) + 0,00140 \mu\text{m} (t - 20^\circ\text{C})^2 - 0,00099 \mu\text{m} (p - 760 \text{ Tr})$$

$$L_{57} = -25,87 \mu\text{m} + 0,424 \mu\text{m} (t - 20^\circ\text{C}) + 0,00168 \mu\text{m} (t - 20^\circ\text{C})^2 - 0,00099 \mu\text{m} (p - 760 \text{ Tr})$$

p — ciśnienie w torach

Zwierciadła o grubości

Z_2 — 19,952 mm Z_3 — 19,886 mm Z_4 — 19,615 mm.

Z_5 — 19,842 mm Z_6 — 20,040 mm Z_7 — 14,280 mm.

Grubość warstwy refleksyjnej na zwierciadłach Z_0 i Z_1

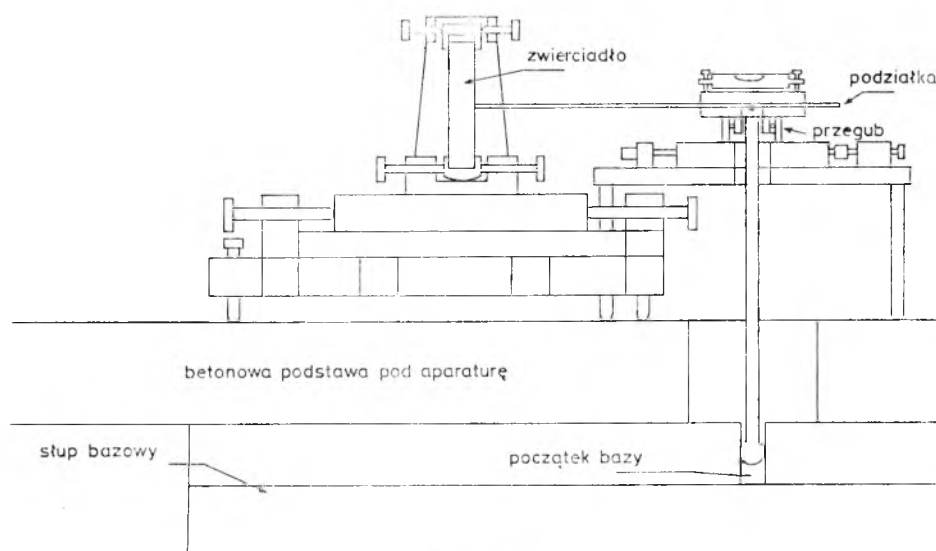
$$d_0 = 0,026 \text{ } \mu\text{m} \quad d_1 = 0,023 \text{ } \mu\text{m}$$

Kompensatory o grubości płytek: $d = 6,860$ mm.

Współczynnik załamania płytek: $n = 1,5101$.

W oświetlaczu zastosowano 6V/15W żarówkę punktową firmy OSRAM.

Do odpionowywania punktów pośrednich używano pionownika optycznego z kompletu bazowego firmy Secretan; do przenoszenia interferencyjnie zmierzonej odległości Z_0 — Z_7 na końcowe punkty bazy — urządzenie przedstawione na rysunku 23.



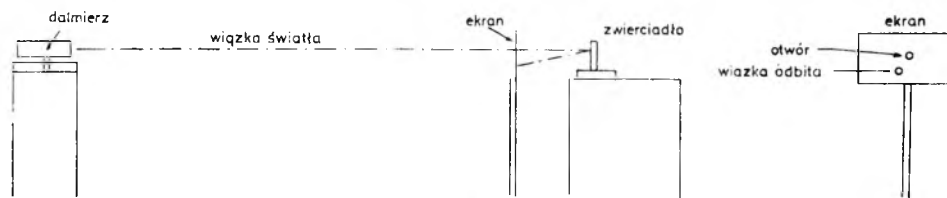
Rys. 23

Temperaturę mierzono na stanowiskach: 0, 1, 4, 9, 15, 21, 36, 60, 84, 120, 168, 216, 264, 312, 360, 408, 456, 504, 552, 600, 648, 696 i 744 m. Do pomiaru temperatury na stanowiskach 0, 1 i 4, oraz temperatury wzorca używano zestawu termopar składającego się z galwanometru GL2 o czułości $3 \cdot 10^{-8}$ A, atestowanego termometru normalnego o wartości działki $0,02^\circ\text{C}$ oraz pięciu termopar miedziowo-konstantanowych o czułości $0,013^\circ\text{C/dz}$. Na pozostałych stanowiskach temperaturę mierzono za pomocą atestowanych termometrów meteorologicznych firmy Halley o war-

tości działki $0,2^{\circ}\text{C}$ umieszczonych w osłonach przeciw promieniowaniu cieplnemu (np. Kühne, Rauhut 1975).

IV.3.3. Pomiar bazy

Do 15 września 1976 roku Państwowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno-Kartograficzne dokonało stabilizacji dodatkowych punktów pośrednich (słupki betonowe z krzyżem wyrytym na płycie z brązu, osadzone około 20 cm poniżej powierzchni gruntu), przygotowało fundamenty pod zabudowę przenośną i zbudowało pawilon pod aparaturę obserwacyjną. W pierwszych dniach października gotowe były stanowiska pod zwierciadła. Następnie pomierzono odległości do nowych punktów pośrednich za pomocą dalmierza Aga 6 BL, którego użyto również do ustawiania zwierciadeł wzdłuż osi bazy i do niej prostopadle¹⁷⁾. Czynność tę znakomicie przyspieszyło zastosowanie ekranu z otworem, który umieszczano na osi wiązki światła emitowanego przez dalmierz jak na rysunku 24.



Rys. 24

Następnie przystąpiono do ostatecznego ustawiania zwierciadeł tak, aby uzyskać efekt interferencji. W ciągu kilku kolejnych wieczorów odnaleziono odpowiednie położenia zwierciadeł na odległościach 6, 24, 96, 192 i 384 m. Niestety, w ciągu następnych nocy nastąpiło wydatne pogorszenie warunków meteorologicznych, wystąpiły zamglenia powodujące zanik widoczności i osiadanie rosy, albo rozpogodzenia z silną wibracją powietrza i przymrozkami powodującymi szronienie zwierciadeł. Ponawiane kolejne próby uzyskania efektu interferencji na odległościach 192 i 384 m nie przyniosły rezultatu. W tej sytuacji zdecydowano przeprowadzenie pełnego pomiaru na odległości krótszej, dostępnej jeszcze w gorszych warunkach meteorologicznych. W dniu 9 listopada pomierzono odległość 96 m, a po dalszym pogorszeniu pogody — aż do wystąpie-

¹⁷⁾ Lepiej jeszcze do tego celu służył w dalszej fazie pomiarów teodolit Wild T2 z przystawką laserową.

nia opadów ciągłych — pomiary przerwano, aparaturę zdjęto i częściowo zdemontowano stanowiska.

W sezonie wiosennym 1977 roku, począwszy od 7 kwietnia ponowiono próbę pomiaru, ale jak i uprzednio warunki meteorologiczne nie pozwoliły na pomiar całej bazy, osiągnięto jednak 384 m. 13 maja aparaturę zdjęto i zdemontowano stanowiska.

Jesienią (21. 9. 1977) przystąpiono po raz trzeci do odbudowy stanowisk i rozstawiania aparatury. Tym razem dwukrotnie, w dniach 14 i 23 listopada, uzyskano efekt interferencji na odległości 768 m odpowiadającej całej długości bazy w Skrzyszewie. Obserwacje i obliczenia dla serii z 23. 11. 1977 roku podane są w tablicach 11 i 12 na str. 57 i 58.

Tablica 9 zawiera zestawienie wyników uzyskanych z pomiarów interferencyjnych dla odległości 96 i 768 m.

Tablica 9

Data	„0—96”	„0—768”
9.11.1976	96 m — 10,2 mm	
27.04.1977	— 10,2	
5.05	— 9,7	
12.05	— 9,6	
2.11	— 9,8	
4.11	— 9,7	
14.11		768 m — 109,3 mm
18.11	— 9,4	
23.11		— 109,1

średnio 96 m — 9,8 mm $\pm$ 0,2 mm,
768 m — 109,2 mm $\pm$ 0,3 mm.

Wyniki, ich duży jak na pomiar metodą Väisälä rozrzut, a także ocena dokładności (porównaj np. tabl. 3) wymagają bliższych wyjaśnień.

Krajowa Baza Długościowa w Skrzyszewie nie została zabudowana w pełni zadowalająco dla potrzeb pomiaru interferencyjnego:

— duże trudności stwarzało powiązanie w sposób dostatecznie stabilny a zarazem przenośny słupa realizującego początek bazy ze zwierciadłem zerowym, podstawą pod wzorzec, zwierciadłem pierwszym i aparaturą do pomiaru odległości obu tych zwierciadeł,

— tylko jeden z punktów pośrednich bazy mógł być włączony do rozwinięcia odległości wyjściowej na całą bazę,

— podziałka definiująca ten właśnie punkt (IV.1), znajdująca się około 1,8 m poniżej osi bazy nie stwarzała dogodnych warunków do odpowiednio dokładnego przeniesienia odległości pomierzonej interferencyj-

nie. Pozostawało tylko użycie pionownika optycznego z wszystkimi jego mankamentami.

Tak więc, pomimo nieznacznych prawdopodobnie ruchów punktów bazy — nie więcej niż 0,1 do 0,2 mm w ciągu 4 lat (tablica 8) — okoliczności wyżej wymienione musiały mieć wpływ na obniżenie dokładności pomiaru odległości 0—96 m. Rozrzuty w odległościach do pozostałych punktów pośrednich — prawdopodobnie o charakterze sezonowym — były nawet większe (1 mm), ale punkty te miały być w założeniu tylko punktami pomocniczymi i zostały zastabilizowane prowizorycznie.

Inaczej przedstawia się sprawa oceny dokładności pomiaru całej długości bazy w Skrzyszewie. Nie występują w tym wypadku problemy związane z użyciem pionownika optycznego, ponieważ punkty końcowe bazy znajdowały się nie dalej niż 30 cm od zwierciadeł. Przeniesienie odległości zmierzonej interferencyjnie na punkty bazowe odbywało się za pomocą prostego urządzenia (rys. 23) z dokładnością w średniej z kilku odczytów 0,1 mm.

Niewysoka jak na pomiar metodą Väisälä dokładność pomiaru bazy oceniona na 0,3 mm podyktowana została innymi jeszcze okolicznościami:

- ruchy zwierciadeł, zapewne pochodzenia termicznego, prawdopodobnie wspólne z ruchami płyt metalowych ze spoczywającymi na nich podstawami zwierciadeł uniemożliwiały przeprowadzanie pełnych serii obserwacyjnych w kierunku „tam” i „z powrotem”. Nie można było bowiem — jak się to czyni przy typowej dla pomiaru metodą Väisälä zabudowie punktów pośrednich stabilnymi słupami betonowymi — używać pewnych urządzeń pomocniczych pozwalających na sprawdzanie i ewentualną korektę położenia zwierciadeł w trakcie trwania serii obserwacyjnej. Obserwacje w Skrzyszewie wykonywano więc tylko w połówkach serii w kierunku od końca do początku bazy;

- cała 768-metrowa baza pomierzona została w takiej połowie serii raz tylko, 23. 11. 1977 roku. Wszystkie poza tym wymagane warunki zostały spełnione. Temperatura, szczególnie przy pomiarze odległości najdłuższych była stabilna i równomierna, rozrzuty przy pomiarze pierwszego rozwinięcia były niewielkie, zatem wynik pomiaru powinien być prawidłowy;

- pierwszy pomiar natomiast, z 14. 11 był niekompletny. Zjawisko interferencji zaobserwowano tylko na rozwinięciu 0-384-768. Z uwagi na małą dokładność odpionowywania zdecydowano do obliczeń przyjąć nie odległość punktów 0—384, lecz odległość zwierciadeł Z_0 — Z_6 . Odległość ta w październiku i listopadzie 1977 roku kształtowała się jak podano w tablicy 10.

Założono, że przyjmując do obliczeń najbliższą dacie obserwacji na rozwinięciu 0-384-768 wartość z 18. 11. 1977, równą — 14,81 mm nie

popelniono błędu większego niż 0,1 do 0,15 mm, co w całej długości bazy nie powinno spowodować błędu większego niż 0,2 do 0,3 mm. Obliczona tą drogą długość bazy z obserwacji w dniu 14. 11. 1977 roku różni się od wartości uzyskanej z pomiaru w dniu 23. 11. 1977 roku o 0,2 mm, co wydaje się potwierdzać prawidłowość przyjętego założenia, rzutować jednak musi na ocenę dokładności pomiaru bazy.

Tablica 10

Data	$Z_0 - Z_6$
14.10.1977	384 m — 14,55 mm
18.11.1977	384 m — 14,81 mm
23.11.1977	384 m — 14,98 mm

Tak więc przyjmując wartość średnią z pomiarów w dniach 14 i 23. 11. 1977 roku jako długość Krajowej Bazy Długościowej w Skrzyszewie otrzymano

$$76789,8 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$$

Ostrożnie oszacowany tu błąd pomiaru odpowiada dokładności względnej $4 \cdot 10^{-7}$. Dokładność ta w świetle wywodów podanych w rozdziałach poprzednich winna charakteryzować rzeczywistą dokładność bazy w Skrzyszewie względem obowiązującej, międzynarodowej jednostki długości.

IV.4. Projektowane rozwiązanie zabudowy bazy wzorcowej

Jak już wspomniano uprzednio jednym z celów interferencyjnego pomiaru bazy w Skrzyszewie było zdobycie doświadczeń, które pozwoliłyby na zastosowanie optymalnego, nowoczesnego rozwiązania przyszłej bazy wzorcowej. W związku bowiem z planowaną odbudową linii kolejowej obecna baza ma ulec likwidacji.

Sposób zabudowy bazy powinien uwzględniać zarówno potrzeby atestacji klasycznych i nowoczesnych narzędzi jak również wymagania pomiaru interferencyjnego, którego zastosowanie w warunkach polowych nie jest bynajmniej zadaniem trywialnym. Rozwiązanie zabudowy bazy przyjęte w Skrzyszewie stwarzało pewne niedogodności techniczne utrudniające pomiary interferencyjne i powodujące omawiane już obniżenie ich dokładności.

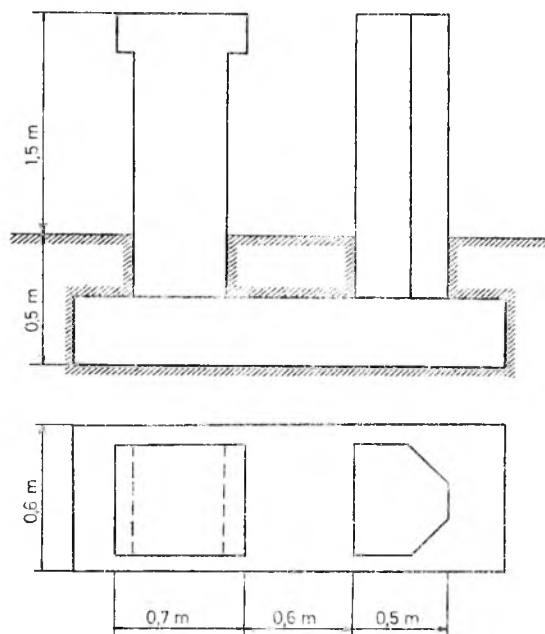
Niedogodności te stwarzał sposób stabilizacji punktów pośrednich

i przenośna zabudowa stanowisk pod aparaturę Väisälä¹⁸⁾. Mankamenty zastosowanej w Skrzyszewie zabudowy to przede wszystkim:

- niestabilność stanowisk pod aparaturę na punktach pośrednich bazy powodowana zmianami temperatury;
- konieczność stosowania pionownika optycznego.

Do walorów zaś bazy w Skrzyszewie zaliczyć należy:

- stabilną i nowoczesną zabudowę końcowych punktów bazy, pozwalającą na automatyczne centrowanie narzędzi i szybkie oraz dokładne przenoszenie odległości mierzonej interferencyjnie na punkty bazowe;
- odkryty teren i wysokość osi bazy ponad powierzchnią gruntu, z pewnością korzystnie wpływające na wielkość gradientów i rozkład temperatury wzdłuż osi pomiaru.

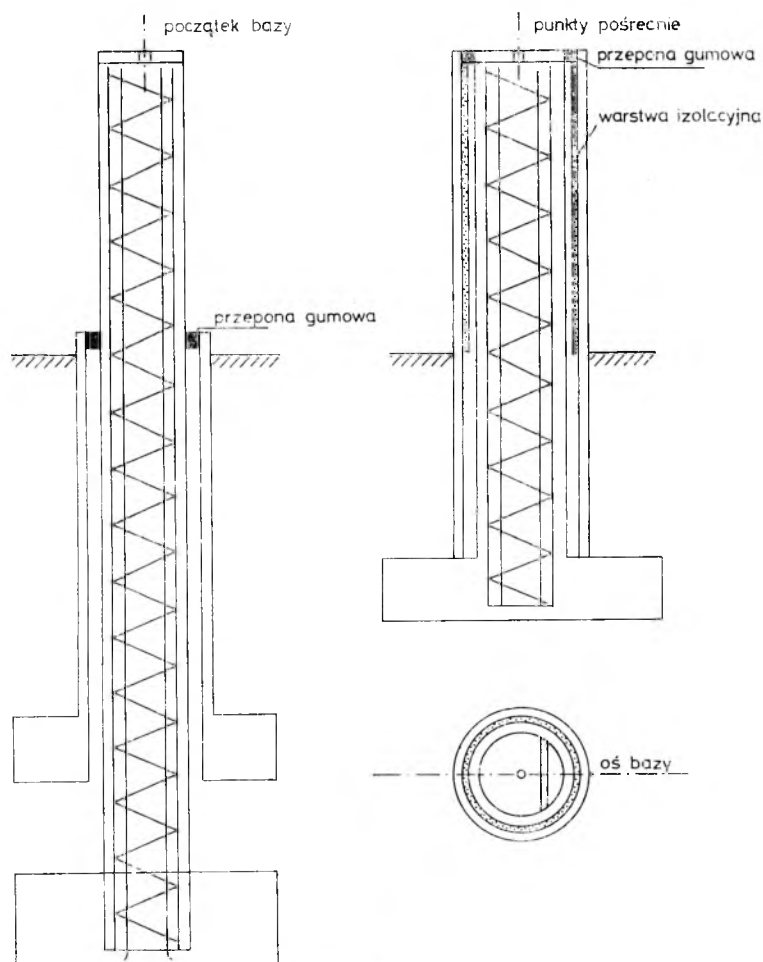


Rys. 25

Na podstawie doświadczeń uzyskanych podczas prac pomiarowych w Skrzyszewie zaprojektowano w Pracowni Metrologii IGiK następujące rozwiązanie, które należałoby przy zakładaniu przyszłej bazy uwzględnić.

¹⁸⁾ Ze względu na uciążliwość montażu niedostatecznie dopasowanych betonowych kręgów zabudowa w zamierzeniu przenośna demontowana była tylko częściowo.

1. Stosując jedno z typowych vaisalowskich rozwinięć, np.:
 0-1-6-24-96-192-384-768,
 0-1-6-24-96-288-576,
 0-1-6-24-72-216-432-864,
 punkt początkowy bazy ustanowić na 24 metrze. W ten sposób długość bazy roboczej wynosiłaby 744, 552 lub 840 m odpowiednio.

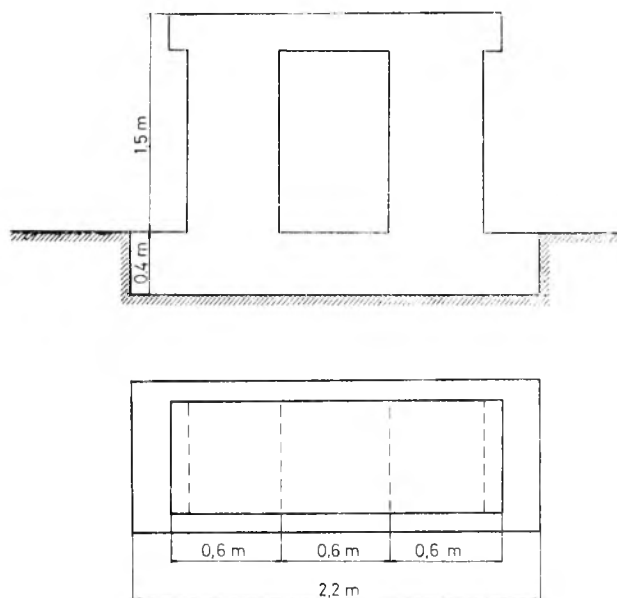


Rys. 26

2. Słupy pod zwierciadła i aparaturę do pomiaru odległości wyjściowej winny być zastabilizowane jak na rysunku 25. Dookoła słupów, na niezależnym fundamencie powinien być zbudowany odpowiedniej wysokości podest oraz daszek ochronny przed opadami atmosferycznymi, a całość — jak np. w Nummela — ogrodzona siatką.

3. Punkty bazowe powinny być zbudowane podobnie jak punkty końcowe w Skrzeszewie, ze spełnieniem jednak warunku koncepcji pierwotnej (rys. 26), polegającego na umieszczeniu właściwego słupa bazowego w obudowie (np. w rurze) chroniącej go przed wpływem przemieszczeń wyższych warstw gruntu. Słupy nieobudowane pawilonami winny mieć obudowę ochronną wyniesioną aż do powierzchni słupa (jak w wariantcie 26), a w wolnej przestrzeni pomiędzy słupem i jego obudową powinna się znaleźć warstwa izolacyjna (np. styropian) zapobiegająca ewentualnym odkształceniom słupa wskutek jednostronnego nagrzewania.

4. Punktów o pełnej, głębokiej stabilizacji powinno być nie mniej niż trzy (początek, środek i koniec bazy). Pozostałe mogą być zastabilizowane w sposób prostszy, tak jednak, aby zapewnić stabilność krótkookresową, rozumianą tu przez okres pomiaru bazy, czyli około 2 miesiące (rys. 26).



Rys. 27

5. Właściwe punkty bazowe oraz odpowiednie punkty pośrednie winny być realizowane tak jak na bazie w Skrzeszewie, przez tulejki do automatycznego centrowania, umieszczone w płycie spoczywającej na słupie. Płyta taka powinna mieć średnicę nie mniejszą niż 45—50 cm. W płytach, oprócz tulejki, w odległości nie większej niż 10 cm od centru, tak jednak by nie przeszkadzało to w ustawianiu narzędzi pomiarowych powinien być — prostopadle do osi bazy — osadzony walec, należący do

Tablica 11

Odcz. komp.		Popr. i temp.		Odcz. term.	Odcz. na kregu	Data
G	153,2	132,17	0	-10	+0,13	23/24.11.1977 r.
D	153,2	132,17	1	-9	+0,12	M.D., J.C., J.D.
			4	+22	-0,29	Początek
D	206,4	128,09	T _{odn} popr.	+1,10, +1,09 +0,16	T ₉ + 6,0	Koniec
G	205,9	123,10				Nr wzorca
	śr.	128,88			11,5 3,14	750,2 55 0,273
G	205,9	123,10	T. wz.	+1,26	+4 0 -12 +13 -13 +16	Wsp. refr. ΔT
D	205,9	123,10				1,055 -0,26
D	153,4	130,12	T ₉	+0,6	+0,6	Dł. wzorca
G	153,3	131,14	T ₄	-4	-4	popr.
	śr.	126,86	T ₁	+13	+13	gr. w. refl.
			T ₀	+11	+11	ΔT
					10,8 2,95	-59,87 +3,04 -0,49 -57,32 -59,76
G	151,8	146,99	0	0	+11	popr. komp.
D	151,7	148,08	1	+1	+10	popr. ΔT
			4	-13	0	+126,49 -1,65
D	207,6	140,53	T _{odn} popr.	+0,92, +0,77 +0,11	T ₉ +0,5 +17 +15 +10 +8 +7	6. (0-1)
G	208,1	145,90				-343,93 -358,56
	śr.	145,38	T. wz.	+0,95	+7	Odl. 0-6
						-219,08 -217,42
G	207,8	142,66	T ₉ T ₄ T ₁ T ₀	+0,5 +0,67 +0,85 +0,84	śr. biały	śr.
D	207,4	138,41				-218,25 μm
D	152,3	141,59				Odpionowanie „0”
G	152,3	141,59				-271,3 mm
	śr.	141,06				Odpionowanie „768”
						-178,0 mm
					1,7 0,46	

Tablica 12

Obliczenie długości bazy z obserwacji w dniu 23.11.1977 roku

	0—24	0—96	0—192	0—384	0—768
Temperatura T_1	+1,17°C	+1,78°C	+3,13°C	+3,05°C	+2,96°C
T_2	+1,03	+1,91	+3,12	+2,99	+2,96
Różnica temperatury	-0,14	+0,13	-0,01	-0,06	0,00
Ciśnienie	750,2				
Współczynnik refr.	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
Popr. kompens.	-19,93	-124,59	+7,80	-171,76	+197,52
Popr. refr.	-3,53	+13,10	-2,02	-24,19	0,00
4 • (0—6)	-873,00				
4 • (0—24)		-3886			
2 • (0—96)			-7394		
2 • (0—192)				-14776	
2 • (0—384)					-29944
Odległości zwierc.	-896,46 μm	-3697 μm	-7388 μm	-14972 μm	-29747 μm
Grubość zwierciadła					+14280
Odpionowanie					-93300
Redukcja na poziom					-319
Popr. do dł. bazy					-109,09 mm

aparatury Väisälä, pozwalający na sprawdzanie pozycji zwierciadeł i służący do przenoszenia odległości mierzonej interferencyjnie na punkty bazowe (rys. 26).

6. Trzy metry przed wymienionymi już w pktcie 2 słupami pod aparaturę realizującą odległość wyjściową zbudować należy stanowisko pod lunetę, oświetlacz i teodolit laserowy, służący do autokolimacyjnego ustawiania zwierciadeł (rys. 27).

7. Rozstrzygnięcie sposobu zabudowy odcinka 0—24 pod zespół urządzeń interferometru laserowego nastąpić może dopiero po przeprowadzeniu prób laboratoryjnych z interferometrem i aparaturą Väisälä.

Ostateczne decyzje co do rodzaju stabilizacji muszą być jednak uwarunkowane właściwościami podłoża bazy i poprzedzone ekspertyzą geologiczną.

Recenzował: doc. Jerzy Jasnorzewski

BIBLIOGRAFIA

- [1] Angus-Lepan P.V.: *Currently on study leave at Geodetic Institute University of Karlsruhe*. Referat powielony z Sympozjum IAG, Helsinki 1978.
- [2] Baird K.M.: *Mesure des quatre metres étalons en fonction de la radiation 0,606 du Kr 86*. Proces Verbaux des Seances, 2 serie, t. 28, 49 Session 1960.
- [3] Barinov V.A.: *Sovremennoe sostojanie etalonov dliny*. Leningrad 1941.
- [4] Bayer-Helms F.: *Calibration of Väisälä standards*. Referat powielony z Sympozjum IAG, Helsinki 1978.
- [5] Burgwald G.M., Kruger W.P.: *An Instant-on laser for length Measurement*. H-P Journal, August 1970.
- [6] Cisak J., Dobrzycka M., Mazur A.: *Dylatometr do wyznaczania współczynników wydłużenia termicznego geodezyjnych przymiarów drutowych*. Informator IGIK, 1973/6.
- [7] Dobrzycka M.: *Przygotowania do interferencyjnego pomiaru Krajowej Bazy Długościowej w Skrzyszewie*. Informator IGIK, 1976/2.
- [8] Dobrzycka M.: *Systemy przenoszenia jednostki długości na bazy wzorcowe*. Biuletyn IGIK, Przegląd Geodezyjny, Warszawa 1978/9.
- [9] Dukes J.N., Gordon G.B.: *A two hundred-foot yardstick with graduation every microinch*. H-P Journal, August 1970.
- [10] Edlén B.: *The refractive index of air*. Metrologia vol. 2, 2, 1966.
- [11] Engelhard E.: *Interferometrische Kalibrierung von Endmassstäben aus Quartz*. Zeit. f. Instrumentenkunde, v. 67, 3, 1959.
- [12] Gervaise J.: *Invar wire measurement a necesery evil*. Referat powielony z Sympozjum IAG, Helsinki 1978.
- [13] Girard G.: *Sur la mesure des étalons geodesiques au Bureau International des Poids et Mesures*. Referat powielony z Sympozjum IAG, Helsinki 1978.
- [14] Hamon J., Carré P., Czerwonka R.: *Proces Verbaux des Seances*, 2 serie, t. 33, 1965.
- [15] Herzog H.: *Kritische Betrachtungen zu den Interferenzmessungen 1960 und 1961 mit dem Väisälä Interferenzkomparator auf der Münchener Normalstrecke*. D.G.K. Reihe C, 66, München, 1963.
- [16] Hillebrand H.: *Kritische Betrachtungen zur Messung von Normalstrecken mit dem Väisälä-Interferenzkomparator*. D.G.K. Reihe C, 44, München, 1961.
- [17] Honkasalo T.: *Die Standardbasis Potsdam*. Interferenzmessungen. Arb. a. d. Geod. Inst. Potsdam, 13, I, 1966.
- [18] Honkasalo T.: *International Standard Base Lines*. Publ. of the Finn. Geod. Inst. 65, 1969.
- [19] Honkasalo T.: *La mesure de la base-étalon de Mata das Virtudes*. Inst. Geogr. Cadastr., Cad. Téc., 33, Lisboa 1973.
- [20] Kajak L.K.: *Etalony dliny i rezultaty ich sličenij*. Trudy Institutov Komiteta VNIIM, vyp. 47, 1961.
- [21] Kukkamäki T.J.: *Ohio Standard Baseline*. Ann. Ac. Sci. Fenn., A III, 102, Helsinki 1969.
- [22] Kukkamäki T.J.: *Väisälä interference comparator*. Veröf. Finn. Geod. Inst., 87, Helsinki 1978.
- [23] Kühne K., Rauhut J.: *Ein Interferometer für geodätischen Basis-Messungen nach dem Väisälä-Prinzip*. Veröf. d. Zentr. f. Phys. d. Erde., 26, Potsdam 1975.
- [24] Meyer-Arendt J.R.: *Wstęp do optyki*, Warszawa 1977.

- [25] Peterson I.: *Base for calibration of steel tapes and EDM-Instruments*. Referat powielony z Sympozjum IAG, Helsinki 1978.
- [26] Piekara A.: *Nowe oblicze optyki*. Warszawa 1976.
- [27] Proces verbal de la deuxieme seance 7. 10. 1960., Proces Verbaux des Seances, 49, Session 1960.
- [28] Rauhut J.: *Über die Leistungsfähigkeit des Potsdamer 24-Interferenzkomparators*. Arb. a. d. Geod. Inst. Potsdam, 19, 198.
- [29] Reinhart E., Sigl R., Tremel H.: *High precision length measurements by the German Geodetic Research Institute*. Referat powielony z Sympozjum IAG, Helsinki 1978.
- [30] Resolutions IAG Symposjum, Helsinki 1978 (pow.)
- [31] Rowley W.R.C.: *Rapport du Comité Consultatif pour la Definition du Mètre au Comité International des Poids et Mesures*. Proces Verbaux des Seances, 2 serie, 41, 62 Session, 1973.
- [32] Schüler R., Rauhut J.: *Der neue 24-m-Interferenzkomparator des Geodätischen Institute in Potsdam*. Veröf. Geod. Inst. Potsdam, 28, 1966.
- [33] Takalo M.: *The laser rod comparator*. Reports of the Finnish Geod. Inst., 74:5, Helsinki 1974.
- [34] Tiltel L.W.: *Standard conditions for precise prism refractometry*. Journal of the National Bureau of Standards, v. 14, 1935.
- [35] Väättäinen S.: *Determination of the periodical phase error in the Mekometer*. Referat powielony z Sympozjum IAG, Helsinki 1978.
- [36] Väisälä Y.: *Anwendung der Lichtinterferenz bei Basismessungen*. Veröf. Finn. Geod. Inst., 14, Helsinki 1930.
- [37] Väisälä Y.: *Expériences sur la base d'essai interférentielle a Turku-Tuorla*. Ann. Ac. Sci. Fenn., A VI, 248, Helsinki 1967.
- [38] Väisälä Y.: *Recherches portant sur des mètres a bouts*. Ann. Ac. Sci. Fenn., A VI, 368, Helsinki 1971.
- [39] Väisälä Y., Oterma L.: *Comparaison des mètres en quartz fondu*. Astr. Opt. Inst. Univ. Turku., Inf. 29, Turku 1964.
- [40] Weise H.: *Die Standardbasis Potsdam*. Invardrahtmessungen. Arb. a. d. Geod. Inst. Potsdam, 13, II, 1966.

МАРИЯ ДОБЖИЦКА

МАСШТАБ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ БАЗИСОВ — ЭТАЛОНОВ ОТНОСИТЕЛЬНО МЕЖДУНАРОДНОЙ ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ

Резюме

Работы из области консервации и репродукции единицы длины имеют особенно большое значение для геодезических измерений расстояний, ибо их уровень решает об однородности и адекватности масштаба геодезических сетей относительно обязывающей, международной единицы длины. Данная статья посвящена работам, проводимым в Институте геодезии и картографии, по достижению в этой области уровня, соответствующего современным требованиям и возможностям.

Роль фундаментального компаратора для нужд Польской геодезической службы выполняет 768-метровый Штатный базис длины, находящийся в Скшешеве, около 40 км на север от Варшавы, измеренный в 1977 году методом Вьясяля. Предметом представленной здесь работы является измерение базиса — эталона методом Вьясяля в следующих его аспектах:

- внутренней точности,
- точности относительно международной единицы длины,
- условий, какие должна выполнять застройка базиса.

В первом разделе изложен принцип метода Вьясяля и рассмотрены факторы, ограничивающие его предел и точность, подытоживая и заключая, что в метрологических условиях, в каких такое измерение возможно — его внутренняя точность должна достигать нескольких десятимиллионных. Однако решающим фактором действительной точности рассматриваемого метода является степень адекватности систем концевых эталонов к аппаратуре Вьясяля относительно международной единицы длины.

Во втором разделе изложен многоэтапный процесс передачи единицы длины, который — при применении разных приборов и методов — ведет к образованию отдельных и трудно оравниваемых систем. Из невыясненных до конца причин в результате очередного эталонирования системы Вьясяля выступают серьезные расхожимости, отличающиеся от величин, характеризующих её внутреннюю сплоченность.

В данной работе высказывается требование замены материального кварцевого эталона, как исходной величины в методе Вьясяля, рабочим эталоном, реализованным с помощью лазерного интерферометра соответствующего класса.

Имея в виду правильную оценку точности измерения Штатного базиса длины в Скшешеве относительно международной единицы длины — произведено в Институте геодезии и картографии сравнение системы передачи единицы длины методом Вьясяля с двумя независимыми системами, связанными только исходной величиной — эталонной длиной волны в спектре Кг 86 (Раздел 3). На 16-метровом базисе в лаборатории Отдела метрологии ИГиК систему Вьясяля сравнено с системой штриховых эталонов, характеризующейся материалами метрологической службы ИГиК, а также — посредственно — с лазерным интерферометром и получено следующие результаты:

штриховые эталоны — система Вьясяля = $+12 \text{ } \mu\text{m}/16 \text{ m} \pm 2 \text{ } \mu\text{m}$

штриховые эталоны — лазер. интерферометр = $+8 \text{ } \mu\text{m}/16 \text{ m} \pm 0,5 \text{ } \mu\text{m}$

Результаты эти разрешают сделать вывод, что точность обязывающего в настоящее время уровня выходного расстояния системы Вьясяля не хуже, чем $2-3 \cdot 10^{-7}$, а система штриховых эталонов, используемых в Отделе метрологии ИГиК, имеет систематическую ошибку порядка $5 \cdot 10^{-7}$.

Таким образом, длина Штатного базиса длины в Скшешеве, полученная в результате рассмотренных в разделе 4 измерений, составляет:

$767890,8 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$,

а осмотрительно оцененная здесь ошибка должна характеризовать её действительную точность относительно обязывающей международной единицы длины.

В заключительной части работы рассмотрены достоинства и недостатки примененной в Скшешеве застройки и представлены предложения изменений, которые при закладке нового базиса следовало бы учесть. К достоинствам застройки в Скшешеве следует зачислить:

- способ стабилизации конечных пунктов базиса, разрешающий автомати-

ческую центровку проверяемых приборов, а также быстрый и точный перенос интерференционно измеренного расстояния,

— открытую местность и высоту оси базиса над поверхностью земли, положительно воздействующих на распределение оптического свойства среды, обуславливающего влияние рефракции на измеряемое расстояние.

Трудность зато представлял примененный в Сквишове способ застройки посредственных пунктов и необходимость постройки переносных станций.

Перевод: Róża Tołstikowa

MARIA DOBRZYCKA

SCALE OF GEODETIC BASELINES REFERRED TO THE INTERNATIONAL LENGTH UNIT

Summary

Works on maintenance and reproduction of the length unit are of great importance for geodetic distance measurements; their standard determines the uniformity and conformity of scale of geodetic nets with the legal international unit of the length. The efforts of the Institute of Geodesy and Cartography (IGiK) on reaching the adequate level corresponding with present day requirements and capabilities are discussed below.

The 768 meter National Baseline was established in Skrzyszew, about 40 km to the North of Warsaw, to serve as a fundamental comparator of Polish Geodetic Service. It was measured by Väisälä method in 1977. The following aspects of standard baseline measurements are discussed:

the internal accuracy;

the accuracy referred to the international length unit;

conditions which should be met when constructing the baseline.

The principle of Väisälä method and factors limiting its accuracy and range are discussed in chapter I. It is concluded that — in meteorological conditions when such a measurement is possible — its internal accuracy can reach several tenth millionth parts. However, the real accuracy of method in question depends on conformity of the system of Väisälä end gauges with the international unit of the length.

Chapter II discusses the multistage process of transmission of the length unit which leads to different length systems when using various tools and methods. These systems are difficult to compare. Unaccountably the discrepancies of the results of successive calibration of Väisälä system deviate considerably from values which are characteristic for its internal coherence. The paper goes on to propose the laser interferometer of adequate class to replace the end gauges as the initial distance in Väisälä multiplying method.

In order to estimate the proper accuracy of the baseline in Skrzyszew, referred to the legal length unit, the comparison of three independent length systems was

carried out (Chapter III). All of them have only one common step of transmission of the length unit, namely the reproduction of Kr 8 spectrum standard wavelength. On the 16 meter base in the laboratory of IGiK the Väisälä system was compared with the system of the platinite normals which is characterized by data of the metrological service of IGiK, and — indirectly — with that of the laser interferometer. Following results were obtained

platinite normale — Väisälä system = $(+12 \pm 2) \mu\text{m}/16 \text{ m}$

platinite standards — laser interferometer = $(+8 \pm 0,5) \mu\text{m}/16 \text{ m}$

These results allow to draw the conclusion that the accuracy of the initial distance of the Väisälä system is not worse than $2-3 \cdot 10^{-7}$, but the system of platinite normals used in IGiK contains the systematic error of the order of $5 \cdot 10^{-7}$. The length of the National Baseline in Skrzyszew resulting from measurements discussed in chapter IV equals

$$767\,890,8 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$$

Carefully estimated error seems to characterize the real accuracy referred to the international unit of the length.

In the last section of the paper the advantages and disadvantages of the baseline construction in Skrzyszew are discussed. Some of the proposals presented here should be considered when establishing a new baseline. The main advantages of the Skrzyszew base are:

- the construction of the end points which allows to center the examined distance meters automatically, and to transfer the distances measured by interference methods quickly and accurately;

- open area and the elevation of the base axis over the ground, which influence profitably the refraction effect due to the optical characteristics of the environment.

On the other hand, the construction of the turning points and the necessity to use temporary, removable stations caused some troubles in the field work.

Translation: Jacek Domański

