

UNTERSUCHUNG DER REFRAKTION BEIM PRÄZISIONSNIVELLEMENT

Kálmán HORVÁTH

Lehrstuhl für Vermessungskunde
Technische Universität Budapest
H-1521 Budapest, Ungarn

Eingegangen: am 4. Mai 1995

Abstract

A most dangerous source of errors of precise levelling consists in the refraction effect of regular character. To reduce the effect of levelling refraction, survey prescriptions of various countries contain different practical measures such as prescription of the minimum rod reading, of the maximum admissible rod distance, and specification of daytimes appropriate for precise levelling. These dispositions reduce the refraction effect without eliminating the error due to refraction.

In precise levelling, regular refraction effect can be applied for refraction correction, if the temperature vs. altitude function is known. Altitude functions known from the literature are rather awkward by omitting the equilibrium condition of atmosphere in the levelling domain of microclimate, and besides, applicability of some functions is considered only from theoretical aspects – e.g. propagation of errors. Thereby, most of the known altitude functions do not agree with the mathematical definition of the meteorological model for microclimate.

In this study, the temperature vs. altitude function is deduced by a computerized method of functional approximation. Validity of the function ranges from 10 cm above ground level to the upper level of the unstable lower air cushion.

To take the levelling refraction into account, it is felt to be convenient to replace the temperature vs. altitude function by the determination of temperature gradient from multiannual temperature data by the method of mathematical statistics. The precision can be improved by determining the refraction coefficient as a function of season, daytime, altitude above ground level, and cloud coverage.

The present value of the refraction coefficient can be measured by the precise levelling of the lapse rate and for that purpose a gradient measuring instrument has been developed.

Keywords: levelling refraction, temperature gradient.

In der technischen und praktischen Geodäsie ist die Untersuchung der Atmosphäre durch die Genauigkeitsbestrebungen in den Vordergrund gerückt. In unserem Jahrhundert, jedoch besonders in den letzten Jahrzehnten haben sich die Instrumente und Meßverfahren der Geodäsie stark entwickelt. Die theoretischen und technischen Voraussetzungen einer höheren Genauigkeit in dieser Hinsicht scheinen gesichert zu sein, aber unsere Kenntnisse

von der Atmosphäre beruhen fast immer nur auf Annahmen, die die wirkliche Lage mehr oder weniger annähern.

Die Lufthülle der Erde besteht aus Luftschichten verschiedener optischer Dichte. Infolge der unterschiedlichen Dicke ändern sich auch die optischen Eigenschaften, so auch der Brechungsindex der Luftschichten. Der das Sehen vermittelnde Visierstrahl wird nach den bekannten Gesetzen der Optik gebrochen. Die Atmosphäre besteht jedoch nicht aus Kugelschalen verschiedener Dichte, sondern die physikalischen Einflußfaktoren des Brechungsindex ändern sich von Punkt zu Punkt [12]. So wird der Lauf des Lichtstrahles der fortlaufenden Änderung des Brechungsindex entsprechend eine Kurve sein; diese wird in der geometrischen Optik und auch in der Geodäsie Refraktionskurve genannt.

Die große Entwicklung der Meteorologie im dritten und vierten Viertel unseres Jahrhunderts ermöglichte, daß man die Refraktion nicht mehr als rein geometrisches Problem betrachte. Die eingehende Analyse der physikalischen Parameter der Atmosphäre eröffnete die Möglichkeit zum genaueren Kennenlernen der Gesetzmäßigkeiten der Refraktion [7, 8, 9, 10].

Die Bestimmungsgenauigkeit des Refraktionskoeffizienten, der den physikalischen Zustand der Atmosphäre kennzeichnet, muß mit der Entwicklung der Instrumententechnik Schritt halten, in Präzisionsnivellement und in der trigonometrischen Höhenmessung ebenso wie in den kosmischen Messungen und auch in den elektronischen Streckenmessungen [2, 3, 33].

Die Lufttemperatur wird grundlegend durch die Temperatur der Erdoberfläche bestimmt [31]. Nach der planetaren Energiewaage von Houghton wird der größte Teil der durch die Sonne ausgestrahlten Wärmeenergie durch die Oberfläche absorbiert und nur annähernd 19% erwärmen direkt die Atmosphäre. Die durch die Erdoberfläche absorbierte Wärmemenge wird durch Wärmestrahlung, Leitung und turbulente Strömung an die der Oberfläche nahe Luftschicht übertragen. Die Luft ist jedoch ein sehr schlechter Wärmeleiter, daher kann die erwärmte Erdoberfläche durch Leitung nur eine sehr dünne Luftschicht von einigen Millimetern erwärmen. Diese Schicht wird von GEIGER Grenzschicht [14], von LETTAU Laminarschicht [29] genannt, mit Rücksicht auf die in dieser Schicht herrschenden laminaren Strömungen. Aus dieser Grenzschicht wird die Wärmemenge durch Vermischung und turbulente Strömung in die höheren Luftschichten übertragen. Die Strömung ist eine sehr wirksame Art der Wärmeübertragung. Von der bodennahen Luftschicht ausgehend kann die Strömung so gewaltige auf- und absteigende Luftströme erzeugen, daß sie bis in die Troposphäre vordringen. Dieser temperaturbedingte vertikale Luft- und Wärmewechsel wird Konvektion genannt [1]. Die Grundbedingungen seiner Herausbildung sind ein labiles atmosphärisches Gleichgewicht und ein

Temperaturgradient wesentlich unter dem adiabatischen Wert ($\gamma < -0,974 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$) [18].

Beim Zusammenhang zwischen der zeitlichen Änderung der Herausbildung einer labilen Unterschicht und dem vertikalen Temperaturgradienten in 1 m Höhe über der Oberfläche läßt sich eine ähnliche Tendenz beobachten [4, 13]. Der Höchstwert des Temperaturgradienten ($-88 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$) fällt auf die Zeit der Sommersonnenwende, die labile Schichtdicke ist dann in den Mittagsstunden über 30 m; die Minima bei den Größen sind zur Zeit der Wintersonnenwende mit einem Gradientenwert von $-6 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ und einer Schichtdicke um 4 m zu erwarten. Das Jahresmittel des Gradienten beträgt $\gamma = -29 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$, jenes der Schichtdicke etwa 21 m [6, 15].

Die tägliche Änderung des Temperaturgradienten ist ähnlich dem Jahresverlauf, während jedoch der Gradientenwert und der diesem annähernd proportionale Refraktionskoeffizient bis zum Maximum der Sonnenhöhe von $\alpha = 35^\circ$ fast gleichbleiben, dieses Stagnieren dauert bis zur Nachmittagssonnenhöhe von $\alpha = 35^\circ$, in den Sommermonaten zwischen 10–16 Uhr, also 6 Stunden lang [6].

Die Nivellementsrefraktion wird durch den physikalischen Parameter einer Luftschicht von 3 m Dicke über der Oberfläche bestimmt [32]. Der Refraktionseinfluß ist nach theoretischen Untersuchungen und auch Testmessungen mit dem vertikalen Temperaturgradienten, dem Quadrat der Zielweite und annähernd dem gemessenen Höhenunterschied proportional. Der Höchstwert des Refraktionseinflusses tritt in den Mittagsstunden auf, sein Minimum wird etwa anderthalb Stunden nach Sonnenaufgang und um die gleiche Zeit vor Sonnenuntergang beobachtet. In der Nacht erreicht der Einfluß etwa die Hälfte des Tageshöchstwertes, selbstverständlich mit entgegengesetztem Vorzeichen. Bei einem großen negativen Temperaturgradienten ist bei Tag die Refraktionskurve von oben konkav, in nächtlicher Inversion bei positivem Temperaturgradienten ist sie von oben konvex [20].

Die einfachste Methode zur Eliminierung des systematischen Refraktionseinflusses bzw. zur Verminderung seines Einflusses ist die Bestimmung der für das Nivellement am optimalen geeigneten Perioden der für das Nivellement am optimalen geeigneten Perioden bei Berücksichtigung der Tages- und Jahresänderungen des Refraktionseinflusses und die Ausarbeitung eines Meßverfahrens, das den Refraktionseinfluß womöglich herabsetzt. Darauf beziehen sich die Vorschriften der Vermessungsinstruktionen, in denen der zulässige größte Lattenabstand, die kleinste Lattenablesung und die für Präzisionsnivellement geeigneten Tageszeiten vorgeschrieben werden. Diese in der Nivellementspraxis am häufigsten angewandte Methode darf als eine empirische Methode zur Beseitigung des Refraktionseinflusses betrachtet werden [17].

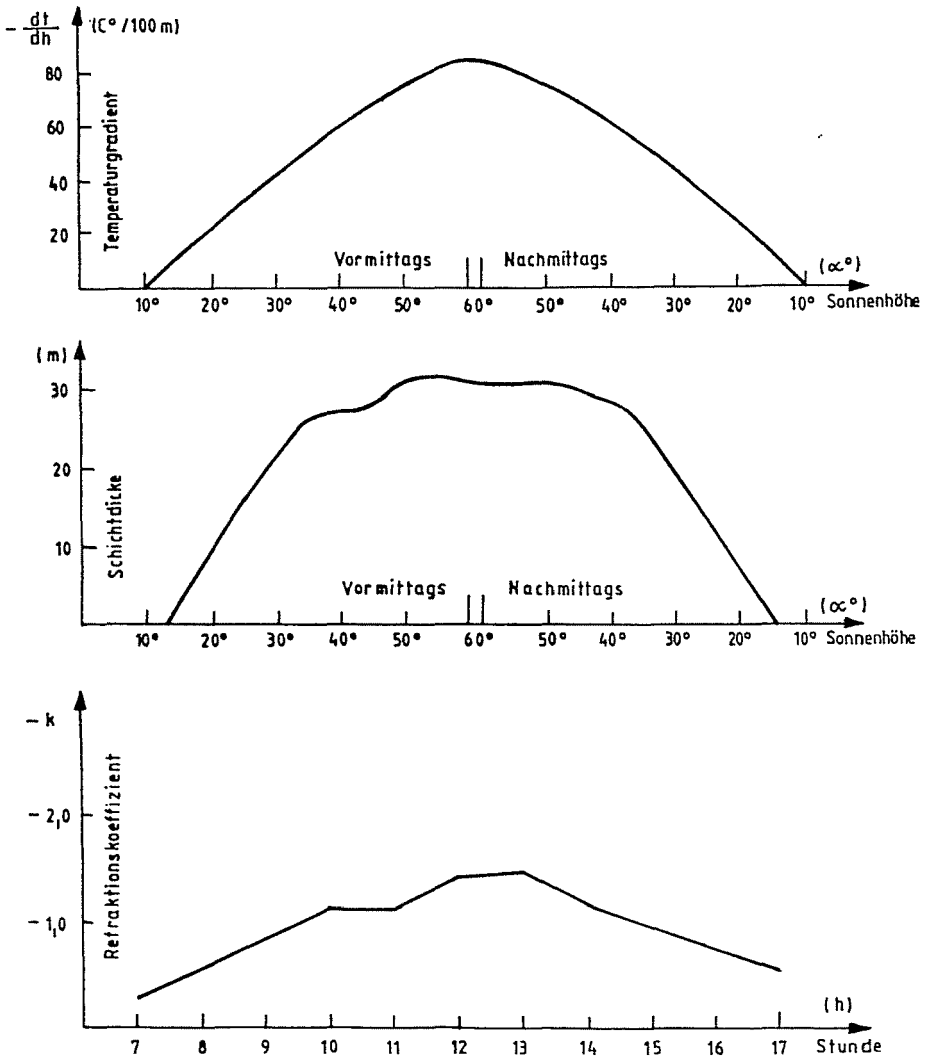


Abb. 1.

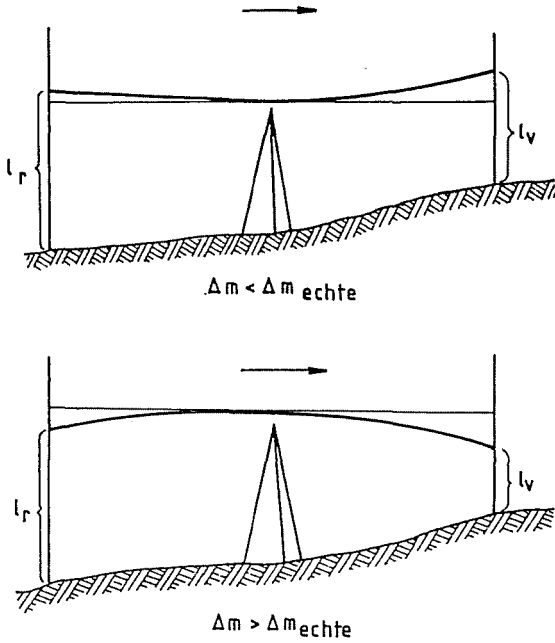


Abb. 2.

Die theoretische Möglichkeit der Verminderung bzw. unter günstigen Bedingungen der Eliminierung des Refraktionseinflusses besteht aus Kenntnis der Höhenfunktion der Lufttemperatur in der Berücksichtigung der Änderung des Temperaturfeldes der Visur entlang und aus der Bestimmung des Refraktionseinflusses in Form von Korrektionsgleichungen.

LALLEMAND	$t = a + b \log (h + c)$	(1)
HUGERSHOF	$t = a + bh^2$	(2)
KOHLMÜLLER	$t = a + bh + ch^2$	(3)
KUKKAMÄKI	$t = a + bh^c$	(4)
REISSMANN	$t = a + bh + ch^2 + dh^3$	(5)
REISSMANN	$t = a + bh + ch^d$	(6)
LÖFFLER	$t = a + bh + c \log (h + d)$	(7)
REISSMANN	$t = a + bh + ch^2 + dh^3 + eh^4$	(8)
REISSMANN	$t = a + bh + ch^2 + dh^3 + eh^4 + fh^5$	(9)
BEHRENDT	$t = a + \frac{b}{\sqrt{h}}$	(10)
	$t = a + b \ln(h + c)$	(11)

Der Bahnbrecher der theoretischen Untersuchungen war LALLEMAND (1), der sich bereits am Ende des vorigen Jahrhunderts mit dem Problem der Nivellementsrefraktion beschäftigte [28]. Von HUGERSHOF (2) wurde für den Zusammenhang ein Polynom zweiten Grades aufgestellt [21]. Diese Funktion wurde von KOHLMÜLLER (3) umgeformt [22] und diese Form von REISSMANN bei seinen Untersuchungen begünstigt. KUKKAMÄKI (4) [23] hat die Ergebnisse der Beobachtungen von BEST [5] in Südengland sowie seine eigenen, in Finnland durchgeführten Testmessungen angewandt [25, 26]. Als Untersuchungsergebnis hat er den Wert der Konstante c für verschiedene geographische Breiten sowie für verschiedene Jahres- und Tageszeiten bestimmt [24]. Unter Anwendung dieser Methode wurden von ihm im finnischen Präzisionsnivellement gute Ergebnisse erzielt [27]. Fast der einzige Nachteil der Theorie von KUKKAMÄKI ist, daß diese auf relativ wenigen Temperaturbeobachtungen beruhen, so kann man auf anderen geographischen Breiten gemeingültig nicht betrachten, das heißt räumliche Extrapolation z.B. für ganze Europa nicht ermöglicht wurde [17].

Von Reissmann wurden außer den Gleichungen (1), (2), (3), (4) auch die Funktionen (5), (6), (7), (8), (9) angewandt. Funktion (7) ist logarithmisch, ihre Anwendung wurde von Löffler empfohlen. Reissmann prüfte die Funktionen aus der Sicht der Fehlerfortpflanzung und fand den Typ (3) als den günstigsten. Er untersuchte jedoch nicht, welche Funktion durch die Ergebnisse der zur Bestimmung des vertikalen Temperaturgradienten durchgeführten Temperaturmessungen nach der Funktionsapproximationsmethode am besten entsprechen wird. Daher beziehen sich seine Folgerungen nicht auf das den Nivellementsreich der Atmosphäre – das sog. Mikroklima der bodennahen Luftschicht – kennzeichnende Temperaturmodell; sie waren vielmehr geeignet, zu ermitteln, welcher Fehler durch den mittleren Fehler $\pm 0,02$ °C der Temperaturmessung unter Berücksichtigung der Fehlerfortpflanzung in den Auf Grund der neun verschiedenen Funktionentypen eingeführten Verbesserungsgleichungen verursacht wird.

Der Typ der Temperaturhöhenfunktion wurde aus dem Gleichgewicht der bodennahen Luftschicht – also von dem Mikroklima des Nivellierungsgebiets – bestimmt. Die labilen Unterschichten können nur den Gleichungen (1), (4) und (10) entsprechen. Die Polynome zweiten, dritten, vierten usw. Grades entsprechen lieber der Inversion. Diese wurden in den nächtlichen Stunden und täglich in der Nähe der Isotherme, daher im ganzen Tag auf den eisbedeckten Oberflächen angewandt. So kann man sagen, daß die Refraktionsprüfungen von Reissmann in Hinsicht der meteorologischen Wissenschaft nicht genügend begründet waren.

Wir können diese Theorie nivellitischen Refraktionseinflusses und der Refraktionsverbesserung für das Präzisionsnivellement in der Dissertation von REISSMANN treffen [34].

Refraktionskoeffizienten				
Juni	Höhenintervall	Mittel der sämtlichen Tage	Mittel der heiteren Tage	Mittel der bewölkten Tage
5 ^h	Isotherme			
7 ^h	10 – 50	–3,42	–4,75	–1,76
	50 – 100	–0,65	–1,87	–0,54
	100 – 200	–0,28	–0,88	–0,16
10 ^h	10 – 50	–5,36	–8,75	–4,53
	50 – 100	–1,90	–2,48	–1,02
	100 – 200	–1,14	–1,36	–0,54
11 ^h	10 – 50	–8,24	–10,92	–4,61
	50 – 100	–1,99	–3,00	–1,40
	100 – 200	–1,13	–1,51	–0,74
12 ^h	10 – 50	–7,80	–11,47	–3,68
	50 – 100	–2,56	–3,17	–1,41
	100 – 200	–1,41	–1,94	–0,93
13 ^h	10 – 50	–8,04	–10,65	–4,10
	50 – 100	–2,44	–2,94	–1,29
	100 – 200	–1,46	–2,01	–1,09
14 ^h	10 – 50	–7,07	–9,76	–3,72
	50 – 100	–2,00	–2,74	–1,17
	100 – 200	–1,19	–1,62	–1,01
19 ^h	Isotherme			

Bei unseren Untersuchungen wurde die Höhenfunktion der Lufttemperatur aus den Ergebnissen von auf eine lange Meßperiode bezogenen, in regelmäßigen Tageszeiten durchgeführten Präzisionstemperaturmessungen abgeleitet. Die Temperaturbeobachtungsdaten wurden im mikroklimatologischen Observatorium Erdöhát des Lehrstuhls für Meteorologie an der Naturwissenschaftlichen Fakultät von 'Eötvös Loránd' Universität Budapest für die Bestimmung der Temperaturänderung der bodennahen Luftschicht gemessen. Die Temperatur wurde achtmal im Tage in Höhe von

10, 50, 100 und 200 cm über der Oberfläche – in erster Linie für die Landwirtschaft – gemessen [11]. Zu den Untersuchungen haben wir die Beobachtungsdaten der Monate Juni und September von 5 Jahren angewandt. Die Höhenfunktion der Lufttemperatur wurde nach der Funktionsapproximationsmethode bestimmt. Sämtliche aus der Literatur bekannte Funktionstypen wurden geprüft, für die Temperaturmessungen in vier verschiedenen Höhen genügen.

Die Untersuchungen führten zur folgenden Funktion für die höhenabhängige Temperaturänderung

$$t = a + b \ln(h + c) . \quad (11)$$

Der Gültigkeitsbereich der Funktion erstreckt sich von 10 cm über der Oberfläche bis zu dem oberen Niveau der labilen Unterschicht [16].

Aufgrund der bestimmten Höhenfunktion der Lufttemperatur kann die Refraktionskorrektionsgleichung der gemessenen Höhenunterschiede eingeführt werden.

In erster Annäherung soll es angenommen werden, daß die Grenzfläche der isothermischen Luftschichten mit der Oberfläche parallel ist, denn im Fall des ungestörten Mikroklimas steht dies dem wirklichen Zustand sehr nahe. Unter Geländengleiche der Nivellementsline wird deren Ausgleichs-gleiche verstanden, das heißt die Oberfläche wird mit einer Fläche von durchschnittlichem Neigungswinkel ersetzt.

Laut des Snelliusschen Satzes: wenn der Lichtstrahl durch Luftschichten verschiedener Temperatur – optischer Dichte – durchdringt, wird das Produkt des Brechungskoeffizienten und des Sinus des mit der Einfallsenkrechten eingeschlossenen Winkels ein konstanter Wert.

$$n \cdot \sin \beta = \text{Konstante} , \quad (12)$$

da

$$\beta = 90^\circ - \alpha \quad \text{ist} ,$$

wird

$$n \cdot \cos \alpha = \text{Konstante}; \quad (13)$$

die Gleichung partial derivierend:

$$-n \cdot \sin \alpha \, d\alpha + \cos \alpha \, dn = 0 . \quad (14)$$

Aus diesem wird

$$d\alpha = \frac{1}{n} \operatorname{ctg} \alpha \, dn . \quad (15)$$

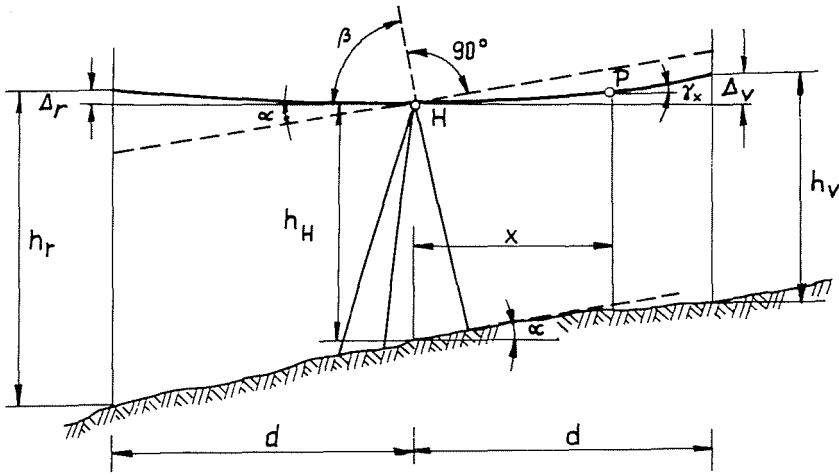


Abb. 3.

In einem in der Entfernung x liegenden Punkt P der Visur soll der mit der Horizontalen eingeschlossene Winkel mit γ_x bezeichnet werden. In Betracht desse, daß die Vorzeichen der Winkel γ_x und α entgegengesetzt sind, kann es aufgeschrieben werden

$$\gamma_x = - \int_H^P d\alpha . \quad (16)$$

Die Integralgrenzen werden zwischen den Punkten H und P aufgenommen (wo mit H die Projektion der Horizontalachse h in der Ebene der Abbildung bezeichnet wird).

Der Brechungskoeffizient soll im Punkt H mit n_H , im Punkt P mit n_x bezeichnet werden;

$$\gamma_x = - \int_{n_H}^{n_x} \frac{1}{n} \operatorname{ctg} \alpha \, dn , \quad (17)$$

$$\gamma_x = - \operatorname{ctg} \alpha \ln \frac{n_x}{n_H} , \quad (18)$$

nach der Mac-Laurinschen Reihenentwicklung wird:

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \dots , \quad (19)$$

also

$$\ln \frac{n_x}{n_H} = \ln \left(1 + \frac{n_x - n_H}{n_H} \right) = \ln \left(1 + \frac{n_x - n_H}{n_H} \right) \quad (20)$$

unter Berücksichtigung des ersten Gliedes der Reihenentwicklung:

$$\gamma_x = \frac{\text{ctg } \alpha}{n_H} (n_x - n_H) . \quad (21)$$

Durch Integrieren der Gleichung (21) kann in der Senkrechten der Nivelierlatte der Abstand zwischen der Refraktionskurve und der horizontalen Tangente des Punktes H bestimmt werden:

$$\Delta_{(\text{rückwärts, vorwärts})} = \int_0^d \gamma_x \, dx , \quad (22)$$

wo d den Lattenentfernung bedeutet.

Den Wert von γ_x aus der Gleichung (21) eingesetzt:

$$\Delta_{(\text{rückwärts, vorwärts})} = -\frac{\text{ctg } \alpha}{n_H} \int_0^d (n_x - n_H) \, dx . \quad (23)$$

Zur Lösung des Integrals ist es notwendig, die Änderung des Brechungskoeffizienten entlang der Refraktionskurve (n_x) in der Funktion von x ausdrücken.

Für den in Funktion der Temperatur und des Luftdruckes ausgedrückten Wert des Brechungskoeffizienten ist eine zeitgemäße Bestimmung in der Arbeit von Edlen zu finden:

$$(n - 1)_{t,p} = (n - 1)_s \frac{0,00138823 p}{1 + 0,003671 t} . \quad (24)$$

Durch Differenzieren der Gleichung (24) kann es festgestellt werden, welcher Fehler im Wert des Brechungskoeffizienten (n) durch die differentiale Änderung der Temperatur (t) hervorgerufen wird.

Nach entsprechender Einsetzung und Zusammenziehung kann wie folgt aufgeschrieben werden:

$$\Delta_{(\text{rückwärts-vorwärts})} = \pm \text{ctg}^2 \alpha \cdot K \int_{h_H}^{h_v, h_r} \Delta t \, dh , \quad (25)$$

wo K die in der Gleichung von dn vorkommende physikalische Konstante bedeutet.

In Kenntnis der Funktion $t = f(h)$ kann der Wert Δt berechnet werden, in Kenntnis dessen die von der Refraktion $\Delta_{\text{rückwärts}}$ und $\Delta_{\text{vorwärts}}$ verursachte Visurablenkung als Refraktionskorrektur der Lattenablesungen berücksichtigt werden kann.

Die allgemeine Form der Höhenfunktion der Temperatur ist:

$$t = a + b \ln(h + c) ; \tag{26}$$

in einem beliebigen Punkte der Visur:

$$t_x = a + b \ln(h_x + c) ; \tag{27}$$

in der Höhe des Instrumentshorizonts:

$$t_H = a + b \ln(h_H + c) ; \tag{28}$$

die Temperaturdifferenz zwischen den Punkten x und H ist:

$$\Delta t = t_x - t_H = b \{ \ln(h_x + c) - \ln(h_H + c) \} . \tag{29}$$

Die Refraktionskorrektur der in der Rückwärtsvisierung durchgeführten Lattenablesung:

$$\Delta r = \text{ctg}^2 \alpha K \int_{h_H}^{h_r} b \{ \ln(h_x + c) - \ln(h_H + c) \} dh . \tag{30}$$

Nach der Durchführung der Integration und Einsetzung der Integrationsgrenzen bekommt man:

$$\begin{aligned} \Delta r = & \text{ctg}^2 \alpha K b \{ \ln(h_r + c)^{h_r+c} - \ln(h_H + c)^{h_r} - \\ & -(h_r + c) - \ln(h_H + c)^c + (h_H + c) \} . \end{aligned} \tag{31}$$

Gleichenweise ist die Refraktionskorrektur der in der Vorwärtsvisierung durchgeführten Lattenablesung:

$$\begin{aligned} \Delta v = & \text{ctg}^2 \alpha K b \{ \ln(h_v + c)^{h_v+c} - \ln(h_H + c)^{h_v} - \\ & -(h_v + c) - \ln(h_H + c)^c + (h_H + c) \} . \end{aligned} \tag{32}$$

Die Refraktionskorrektur der mit Nivellement bestimmten Höhendifferenz:

$$\Delta h = \Delta r - \Delta v = \text{ctg}^2 \alpha K b \{ \ln(h_r + c)^{h_r + c} - \ln(h_v + c)^{h_v + c} - \ln(h_H + c)^{h_r - h_v} - (h_r - h_v) \} . \quad (33)$$

Die Gleichung der auf Grund der Temperatur-Höhenfunktion abgeleiteten Refraktionskorrektur ist allgemein geltend, aber zur Auflösung der Gleichung müssen die Werte der Konstanten b und c bekannt sein.

Die praktische Anwendung der Refraktionsverbesserungsgleichung hat zwei Nachteile. Einerseits erfordert sie eine mit dem Nivellement gleichzeitige Temperaturbeobachtung für Bestimmung der a, b, c Parameter, andererseits ist die Verbesserungsgleichung verhältnismäßig schwerfällig zu handhaben. Die gleichzeitige Temperaturbeobachtung ist erforderlich, weil die bestimmte Höhenfunktion der Lufttemperatur nur die Gesetzmäßigkeit der Änderung, d.h. den Funktionstyp zur Lösung bringt, um die Parameter der Funktion zu kennen, muß die Lufttemperatur – oder unmittelbar die Temperaturdifferenz – in verschiedenen bestimmten Höhen gemessen werden.

Durch Zeit- und Arbeitsaufwand der simultanen Temperaturmessung wird die praktische Wirksamkeit der Messungen vermindert. Dieser Nachteil läßt sich zum Teil abhelfen, wenn statt in verschiedenen Höhen gemessener Temperaturen statistische Mittel angewandt werden [30]. Die statistischen Mittel entsprechen dem Momentanwert des Temperaturgradienten zwar nicht, nähert das Verhältnis der aus den ermittelten Gradientenmitteln zu den Refraktionskoeffizienten das Verhältnis der Momentanwerte gut an. So kann meteorologisch wohl begründet auf den Refraktionseinfluß der Visur entlang geschlossen werden.

Eine entscheidende Änderung in der Bestimmung des Refraktionseinflusses kann nur von der Entwicklung der Gradientenmeßgeräte erwartet werden, die es ermöglichen, sowohl im Labor, als auch unter Feldebedingungen den Temperaturgradienten mit der erforderlichen Genauigkeit schnell zu bestimmen [19]. In unserem Institut, am Lehrstuhl für allgemeine Geodäsie der TU Budapest wurde ein Gradientenmeßgerät entwickelt, das für die direkte genaue Ermittlung und laufende Aufzeichnung des vertikalen Temperaturgradienten zwischen der Erdoberfläche und 4 m Höhe über der Oberfläche geeignet ist. Die Meßenheit des Geräts besteht aus drei Degussa-Platinthermometern, die gegen direkte Sonnenbestrahlung abgeschirmt sind. Die Nominalgenauigkeit der für ein bestimmtes Höhenintervall meßbaren Temperaturdifferenz beträgt $\pm 0,01$ °C, die von dem Zentralinstitut für Luftphysik des Ungarischen Meteorologischen Dienstes geeichte wirkliche Genauigkeit ist $\pm 0,05$ °C. Diese Genauigkeit entspricht der Genauigkeitsanforderung des Präzisionsnivellements. Die Messung mit dem

Gradientenmeßgerät ist ziemlich rasch, die Anzeigeeinheit des Gradientenwertes kann entweder unmittelbar neben dem Gerät, oder in einer Entfernung bis 50 m angeordnet werden, diese Ausführung gestattet nicht nur Momentanmessungen, sondern auch eine fortlaufende Aufzeichnung.

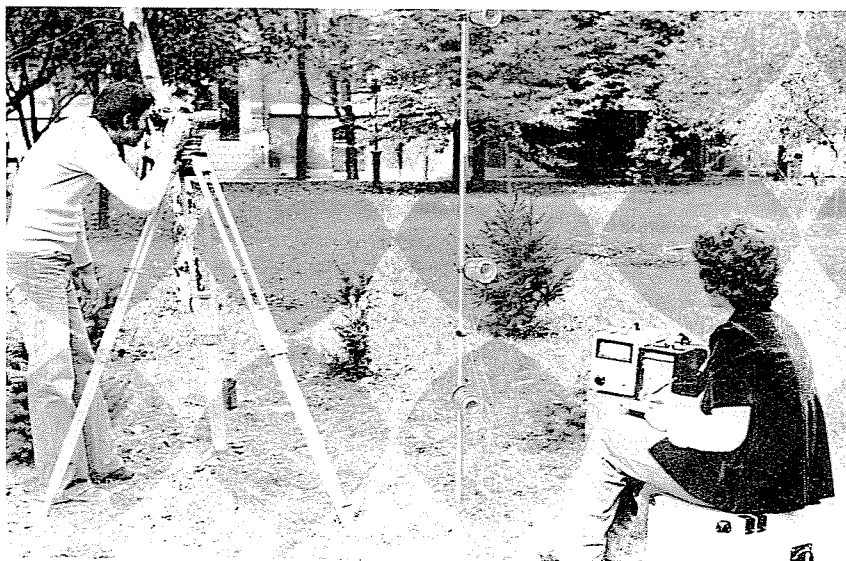


Abb. 4.

Mit dem Gradientenmeßgerät wurden mehrere Testmessungen im Feld des vermessungstechnischen Praktikums der TU Budapest in Balatonkenese durchgeführt.

Durch die aus den Gradientenmeßdaten berechnete Refraktionsverbesserung wurde in etwa 79 % aller Fälle der gemessene Höhenunterschied verbessert. Das Ergebnis beweist, daß sich Änderung des Gradienten der Visur entlang mit Hilfe eines einzigen Gradientenmeßgerätes bei dem Beobachtungsgerüst die nicht genau bestimmen läßt. Günstigere Ergebnisse sind von dem Einsatz dreier Gradientenmeßgeräte zu erwarten, die neben dem Instrument und den beiden Latten angeordnet werden.

Wir können neuere Möglichkeiten und Ergebnisse aus Forschungsarbeiten am Geodätischen Institut der Universität Bonn lesen [35]. Von den Mitarbeitern dieses Projekts werden Verfleichungsmessungen mit Szintillometer-SLS 20 durchgeführt, um für die meteorologischen Rahmenbedingungen eine sichere Modellbildung zu gewährleisten [37]. Mit Hilfe dieses Meßsystems werden weitere Informationen über den Zustand der Atmo-

sphäre sowohl aus den Szintillationen als auch den Refraktionsverhältnissen gewonnen. Aber für die genauere Bestimmung des atmosphärischen Modells sind neben Szintillometermessungen auch Windgeschwindigkeits- und Globalstrahlungsmessungen notwendig [36]. Zusätzliche Informationen über den Atmosphärenzustand sind aus Temperatur-, Luftdruck, und Feuchtigkeit-Beobachtungsdaten einzuholen. Dadurch lassen sich funktionale Beziehungen zwischen den unterschiedlichen Meßdaten herstellen, die für ein Modell vom vertikalen Temperaturgradienten herangezogen werden. Im Laufe dieser Modellbildung wird sich zeigen, ob der Zustand der Atmosphäre für geodätische Messungen genau genug beschrieben werden kann.

Literatur

1. ALBRECHT, F.: Die thermische Konvektion in der freien Atmosphäre und ihre Bedeutung für den Wärmeumsatz zwischen Erdoberfläche und Luft. Reichsamt für Wetterdienst. Berlin, 1942.
2. ANGUS-LEPPAN, P. V.: A Study of Refraction in the Lower Atmosphere. *Empire Survey Review*, Vol. 120, 121, 122, 1961.
3. ANGUS-LEPPAN, P. V.: The Effects of the Atmosphere on Surveying Observations. *Australian Surveyor*, Vol. 3, 1964.
4. ANGUS-LEPPAN, P. V.: Diurnal and Seasonal Variations in the Coefficient of Refraction. *The Canadian Surveyor*, Vol. 6, 1967.
5. BEST, A. C.: Transfer of Heat and Momentum in the Lowest Layers of the Atmosphere. *Geoph. Mem.*, Nr. 65, London, 1935.
6. BROCKS, K.: Über täglichen und jährlichen Gang der Höhenabhängigkeit der Temperatur in den unteren 300 Metern der Atmosphäre und ihren Zusammenhang mit der Konvektion. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, Vol. 5, 1948.
7. BROCKS, K.: Über vertikale Luftdichtenzunahme in Bodennahe. *Meteorologische Rundschau*, Vol. 2, 1949.
8. BROCKS, K.: Die Höhenabhängigkeit der Lufttemperatur in der nächtlichen Inversion. *Meteorologische Rundschau*, Vol. 2, 1949.
9. BROCKS, K.: Eine Methode des vertikalen Dichte- und Temperaturgefälles in den bodenfernen Atmosphärenschichten. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 1, 1940.
10. BROCKS, K.: Meteorologische Hilfsmittel für die geodätische Höhenmessung. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, Vol. 3, 1950.
11. DOBOSI, Z.: Untersuchungen über die Repräsentativität einer Mikroklima-Station. *Annales Univ. Scient.*, Budapest, 1959.
12. EDLEN, B. The Refractive Index of Air. Lund, 1965.
13. FLOWER, W.D.: An Investigation into the Variation of the Lapse Rate of Temperature in the Atmosphere near the Ground at Ismailia, Egypt. *Geoph. Mem.*, Nr. 71, London, 1937.
14. GEIGER, R.: Das Klima der bodennahen Luftschicht. Braunschweig, 1942.
15. HORVÁTH, K.: Investigation of Refraction in the Low Atmosphere. *Periodica Polytechnica, Civil Eng.* Vol. 14, No. 1, pp. 31-41. Budapest, 1970.
16. HORVÁTH, K.: Bestimmung der bodennahen Refraktion aus meteorologischen Beobachtungen. *XIII. Internationaler Kongreß der Vermessungsingenieure (FIG)*, Wiesbaden, 1971, pp. 1-36.

17. HORVÁTH, K.: Die nivellitische Refraktion. (In ungarischer Sprache) *Geod. és Kart.* Vol. 1, pp. 32–38, 1974.
18. HORVÁTH, K.: The Effect of Atmospheric Anomalies on Geodetic Measurements. *Periodica Polytechnica, Civil Eng.* Vo. 19, No. 1–2, pp. 105–114, Budapest, 1975.
19. HORVÁTH, K.: Neuere Untersuchungen in Refraktionsforschungen in Ungarn. *Geodätische und Geophysikalische Veröffentlichungen*, pp. 125–140, Potsdam, 1978.
20. HORVÁTH, K.: Untersuchungen des Refraktionseinflusses in der trigonometrischen Höhenmessung. *Surveying Science in Finland*, Vol. XII, 1991, pp. 30–42, Helsinki, 1991.
21. HUGERSHOFF, R.: Der Zustand der Atmosphäre als Fehlerquelle im Nivellement. Dissertation. München, 1912.
22. KOHLMÜLLER, F.: Zur Refraktion im Nivellement. Dissertation. München, 1912.
23. KUKKAMÄKI, T. J.: Über die nivellitische Refraktion. Helsinki, 1938.
24. KUKKAMÄKI, T. J.: Formeln und Tabellen zur Berechnung der nivellitischen Refraktion. Helsinki, 1939.
25. KUKKAMÄKI, T. J.: Über zwei dem Präzisionsnivellement sich anschließende Fragen. Finnisches Geodätisches Institut, 1918–1938, Helsinki, 1939.
26. KUKKAMÄKI, T. J.: Enitwirkung der bodennahen Refraktion auf das Präzisionsnivellement. Helsinki, 1939.
27. KUKKAMÄKI, T. J.: Die nivellitische Refraktion in dem finnischen Landesnivellement. *Schweizerische Zeitschrift für Vermessungswesen*, Vol. 3, 1950.
28. LALLEMAND, CH.: Nivellement de haute précision. *Encyclopédie des Travaux Publics*. Paris, 1912.
29. LETTAU, H.: Über die Zeit- und Höhenabhängigkeit des Austauschkoefizienten in Tagesgang innerhalb der Bodenschicht. *Gerl. Beitr. z. Geoph.*, 1944.
30. LÖSER, H. G.: Eine neue Tabelle der Normalrefraktion und die Berechnung der Refraktion nach Sondenaufstiegen der Wetterämter. München, 1964.
31. LUNDEGARD, H.: Klima und Boden in ihrer Wirkung auf das Pflanzenleben. Jena, 1925.
32. MEGGERS, W. F. – PETERS, C. A.: Measurement on the Index of Refraction of Air for Wave Lengths from 2218 A to 9000 A. Washington, 1918.
33. PELLINEN, L. P.: Perspektivi primenenia geodesicheskogo nivelirovania v gornikh rayonakh. *Geodesia i Kartografia*, Vol. 6, 1956.
34. REISSMANN, G.: Untersuchungen zur Ausschaltung des Einflusses der Vertikalrefraktion beim Präzisionsnivellement. Berlin, 1954.
35. SCHAUERTE, W. – WITTE, B.: Aspekte zur experimentellen Bestimmung des Brechungsindex der Atmosphäre. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, Vol. 9, 1994.
36. SPARLA, P.: Experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung des Brechungsindex der Atmosphäre mit Hilfe von elektronischen Sensoren. *Veröff. d. Geod. Inst. d. RWTH*, Aachen, Nr. 50, 1993.
37. THIERMANN, V.: Optische Messung turbulenter Flüsse und Vorhersage der optischen Turbulenz aus einfachen Grenzschichtparametern. Dissertation, Universität Hamburg, Fachbereich Geowissenschaften, 1992.