

# Instrumentenuntersuchung des Digitalnivelliers SDL 30 von Sokkia

Rudolf Staiger

## Zusammenfassung

Das geometrische Nivellement ist das präziseste Höhenmessverfahren des Geodäten. In den vergangenen 150 Jahren wurde dieses Verfahren schrittweise automatisiert. So ist die aktuelle Messtechnik durch eine automatisierte Ablesung der codierten Nivellierlatte mit sog. Digitalnivellieren gekennzeichnet.

Das Digitalnivellier SDL 30 von Sokkia gehört zu den Instrumenten hoher Genauigkeit. Nach einer kurzen Vorstellung des Instruments werden Untersuchungsergebnisse hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und der Eignung dieses Messsystems präsentiert.

kung der Schwerkraft ausgenutzt, unter deren Einfluss sich ein Pendel in Richtung der Schwerkraft einstellt (Kompensatorinstrumente) bzw. die Blasenmitte einer Libelle die höchste Position des Ausschleifungsbogens einnimmt (Libelleninstrumente). Die Nivellierlaten tragen die Maßverkörperungen zur Streckenmessung. Systematische Abweichungen in den Solllängen der Maßverkörperungen wirken sich direkt auf die abgeleiteten Höhenunterschiede aus.

Nach allgemeinen Betrachtungen zur Automatisierung und Genauigkeit des geometrischen Nivellements werden die Ergebnisse einer Instrumentenuntersuchung des Digitalnivelliers SDL 30 von Sokkia vorgestellt.

## 2 Zur Automatisierung des geometrischen Nivellements

## 1 Einleitung

Zur Bestimmung des vertikalen Abstandes der Punkte von einer Bezugsfläche werden Höhenunterschiede gemessen. Das geometrische Nivellement ist – von den in der Geodäsie genutzten Messverfahren – gekennzeichnet durch die höchste Genauigkeit, aber auch durch den größten Arbeitsaufwand.

Beim geometrischen Nivellement wird der Höhenunterschied zwischen zwei Punkten  $A$  und  $B$  ermittelt; mit Hilfe einer horizontalen Ziellinie werden die senkrechten Strecken  $s_A$  und  $s_B$  beobachtet. Die Differenz beider Strecken ergibt den gesuchten Höhenunterschied  $\Delta h_{AB}$ . Zur Generierung der horizontalen Ziellinie wird die Wir-

Das Prinzip des geometrischen Nivellements wird seit mehr als 150 Jahren unverändert angewendet. In dieser Zeit gab es immer wieder Versuche den Messvorgang zu beschleunigen und zu vereinfachen. Dabei kann in zwei Technologien unterschieden werden:

– Aktive Verfahren:

Mit Hilfe eines Lasers (Laserdiode) als Lichtquelle wird eine horizontale Gerade oder Ebene projiziert und evtl. visualisiert. Ein positionsempfindlicher Detektor am Zielpunkt liefert die Höheninformation. Aktive Verfahren findet man heute meist bei mäßigen Genauigkeitsan-

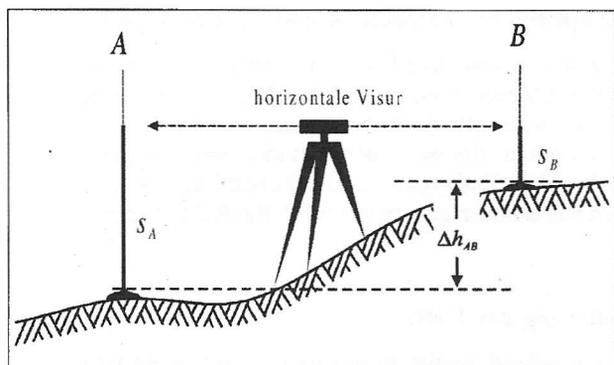


Abb. 1: Prinzip des geometrischen Nivellements

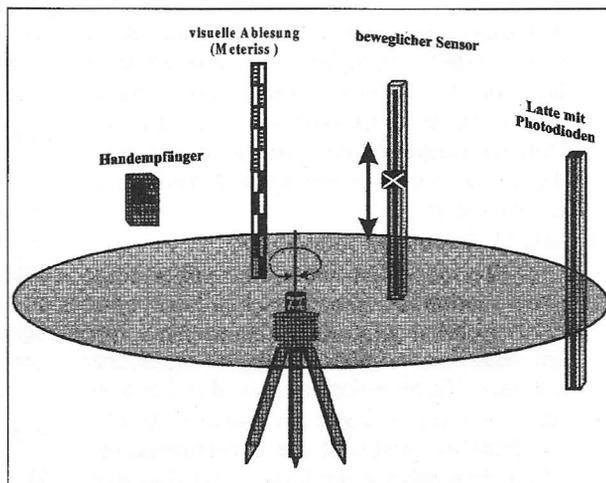


Abb. 2: Die Empfangstechniken bei aktiven Verfahren

forderungen, z.B. im Baubereich. Wird ein Rotationslaser als Bezugsquelle genutzt, lassen sich die Messungen von einer Person ausführen.

– Passive Verfahren:

Als passiv werden alle Nivellierverfahren bezeichnet, die – abgesehen von einer künstlichen Beleuchtung der Nivellierlatte bei Dunkelheit – nur mit dem Tageslicht arbeiten. Sie stehen für die direkte Automatisierung des geometrischen Nivellements.

Bei den aktiven Verfahren gibt es, neben der visuellen Ablesung an einem Maßstab, unterschiedliche Empfangstechniken zur automatisierten Höhenablesung:

– ein positionsempfindlicher Detektor wird, entweder von Hand oder motorisch angetrieben, solange in seiner Höhenposition verschoben, bis der Detektor den das Lasersignal mittig empfängt.

– eine Latte ist durchgängig mit Photodioden bestückt. Die rotierende Laserebene trifft nur wenige Photodioden. Aus dem resultierenden Empfangssignal wird die gesuchte Höhe automatisch abgeleitet.

Letzteres Verfahren kommt – gegenüber den anderen Techniken – ohne bewegliche Bauteile aus. Dadurch wird eine robuste Bauweise möglich. SCHLEMMER (1987) entwickelte nicht nur einen Prototypen der elektronischen Latte, sondern war auch an den weiteren Entwicklungen, die zu einem serienreifen Produkt führten maßgeblich beteiligt.

Die passiven Verfahren wurden in den vergangenen 50 Jahren schrittweise automatisiert bzw. im Ablauf vereinfacht und beschleunigt:

– Stufe 1: *Libellennivelliere (bis 1950):*

alle Arbeitsschritte mussten vom Beobachter manuell ausgeführt werden.

– Stufe 2: *Kompensatornivelliere (1950 bis 1990)*

1950 stellt Zeiss mit dem Ni 2 das erste Kompensatornivellier vor. Bei diesen Instrumenten ist der zeitaufwendige Schritt der *Feinhorizontierung* durch einen Kompensator automatisiert, der die Schiefstellung des Instrumentes optisch-mechanisch kompensiert.

– Stufe 3: *Digitalnivelliere (seit 1990)*

1990 präsentiert Leica das erste Kompensatornivellier mit elektronischer Erfassung und Auswertung einer optisch codierten Latte und nannte es Digitalnivellier. Heute bieten vier Hersteller komplette Messausrüstungen für Präzisions- und Ingenieurnivellements an. Neben der Feinhorizontierung sind beim Digitalnivellier die Arbeitsschritte *Ablesung, Aufschrieb und Berechnung* des Nivellements automatisiert.

– Stufe 4: *vollständige Automation*

Technisch ist heute eine vollständige Automation des geometrischen Nivellements realisierbar. Motorisch angetriebene, mit Sensoren ausgestattete Instrumente (vergleichbar mit mot. Tachymeter) richten das Fernrohr selbsttätig auf die Latte aus und eine Autofokus-Funktion realisiert die Scharfabbildung. Alle Arbeitsschritte der Messung laufen autonom ab, lediglich der Transport und die Auf-

stellung des Instruments bzw. der Latten sind noch manuell auszuführen.

Offensichtlich sind die Instrumentenhersteller der Ansicht, dass sich die Entwicklungskosten für ein derart vollautomatisches Höhenmesssystem nicht lohnen.

### 3 Zur Genauigkeit des geometrischen Nivellements

Den wichtigsten Beitrag der letzten 50 Jahre zur Genauigkeitssteigerung von Präzisionsnivellements leistete SCHLEMMER (1975) mit der Entwicklung eines Laserinterferenzkomparators zur Prüfung von Präzisionsnivellierlatten. Heute gibt es an vielen Hochschulen und Landesvermessungsämtern entsprechende Prüfeinrichtungen, mit denen die Lage einzelner Teilstriche (bzw. Codeelemente) auf wenige  $\mu\text{m}$  genau bestimmt werden kann. Die qualitativ besten Teilungen für Präzisionsnivellierlatten stellt heute Fa. NEDO (Dornstetten) für alle Anbieter von Präzisionsinstrumenten her. Wiederum unter der technischen Leitung von SCHLEMMER (1985) wurde dort ein Verfahren entwickelt, bei welchem das Kalibrierprinzip auf die Fertigung übertragen wurde: ein Laserstrahl graviert die Teilung direkt in die Lackschicht des Invarbandes, wobei der Brennpunkt interferometrisch positioniert wird, analog zu der Prüfeinrichtung. Untersuchungen zeigen, dass die unregelmäßigen Teilungsfehler kleiner sind als  $\pm 5 \mu\text{m}$ . Mit einer derart hohen Fertigungsgenauigkeit hat die Strichkalibrierung an Bedeutung verloren. Sie dient in der Regel nur noch zur Prüfung der Latten, jedoch nicht mehr zu ihrer Kalibrierung.

### 4 Das Digitalnivellier SDL 30 von Sokkia

1998 stellte Sokkia (nach Leica, Zeiss und Topcon) mit dem SDL 30 ihr erstes Digitalnivellier vor. Es ist ein sog. Ingenieurnivellier (siehe 4.3) und verfügt neben dem Einzelmessmodus auch über die Möglichkeit der fortlaufenden Messung (Tracking) mit eingeschränkter Genauigkeit. Bei Messungen zu Firstpunkten ist die Latte nur umgekehrt aufzuhalten: das SDL30 erkennt – als einziges Instrument auf dem Markt – automatisch die Ausrichtung der Latte.

#### 4.1 Der optisch-mechanische Aufbau des SDL 30

Ein CCD-Sensor mit einer Bildgröße von  $8 \mu\text{m}/\text{Pixel}$  erfasst den Lattenausschnitt (Abb. 3). Die automatische Beleuchtungskontrolle wird durch eine variable Belichtungszeit erreicht, die mit einer Variation der Empfindlichkeit der CCD-Zeile (*gain-control*) kombiniert ist. Zur schnellen Bildauswertung dient ein 32-Bit-RISC-Prozessor.

#### 4.2 Codierung der Latte

Der Mittenabstand zweier benachbarter dunkler Balken beträgt genau 16 mm. Die Entfernung zweier beliebiger

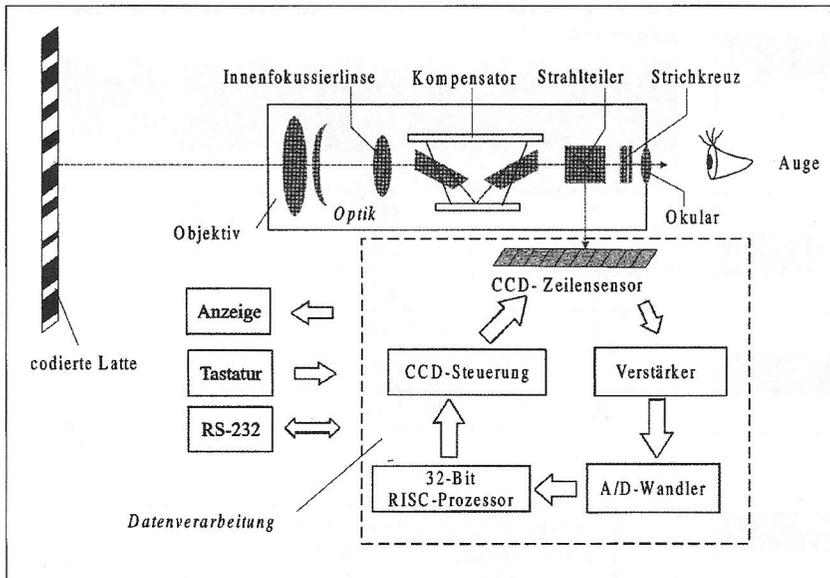


Abb. 3: Komponenten des SDL 30 (Sokkia)

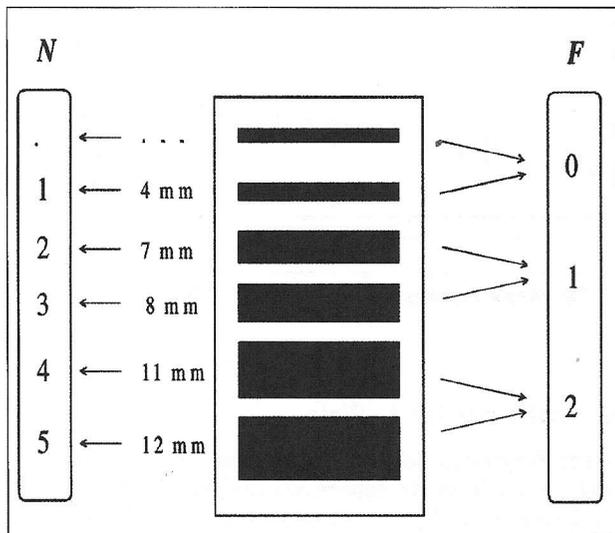


Abb. 4: Interpretation des Lattencodes

Mittellagen ist folglich ein Vielfaches des Grundintervalls. Zur eindeutigen Intervallzuordnung (Grobmessung) sind die schwarzen Balken unterschiedlich breit: 3, 4, 7, 8, 11 oder 12 mm (Abb. 4). Grundsätzlich ist vom Hersteller die Codierung so zu wählen, dass der von der CCD-Zeile erfasste kleine Codeausschnitt eine eindeutige Zuordnung garantiert. Die Besonderheit hier besteht in einer zweifachen Codierung, die je nach Entfernung unterschiedlich interpretiert wird: Auf kurze Entfernungen ( $N = \text{NEAR}$ , bis ca. 8 m) werden wenige Balken kontrastreich und scharf auf den CCD-Sensor abgebildet. Die unterschiedlichen Balkenbreiten lassen sich eindeutig zuordnen und als 6-Bit-Code deuten (Abb. 4). Bei größeren Entfernungen ( $F = \text{FAR}$ ) können benachbarte Strichdicken, also 3 oder 4, 7 oder 8 bzw. 11 oder 12 mm nicht mehr zweifelsfrei unterschieden werden. Deshalb werden in der

Auswertung benachbarte Strichdicken (3 und 4, 7 und 8 oder 11 und 12) als gleichbreit betrachtet. Die Folge der Strichdicken wird nun als 3-Bit-Code interpretiert (Abb. 4).

Die Codefolge ist so gewählt, dass für beide Entfernungsbereiche eine eindeutige Zuordnung bereits nach wenigen Codeelementen gewährleistet ist. Aufgrund der automatischen Erkennung der Orientierung dürfen symmetrische Codefolgen (z.B. 3-5-2-11-2-5-3) nicht vorkommen.

#### 4.3 Technische Daten

Die wichtigsten technischen Daten des Digitalnivelliers sind in Tab. 1 zusammengestellt. Experimentell wurde mit  $2,7^\circ$  (4,7 m/100 m Entfernung) ein wesentlich größeres elektronische Sehfeld bestimmt, als vom Hersteller genannt.

Mit dem SDL 30 können die Messwerte nur in einem externen Speichergerät (z.B. SDR 33) gespeichert und weiterverarbeitet werden (Anm.: Das angekündigte Nachfolgemodell SDL 30M verfügt auch über eine interne Speichermöglichkeit).

### 5 Die Untersuchungen

Das Digitalnivellier SDL 30 wurde in Kombination mit dem Feldrechner SDR33 (Sokkia) für Messungen genutzt bzw. untersucht. Am externen Feldrechner können auch andere Digitalnivelliere (Leica und Zeiss) angeschlossen und unter einer einheitlichen Benutzerführung bedient werden. Nachteilig sind die deutlich längeren Ausführungszeiten im Vergleich zur Messung ohne Speicherung.

#### 5.1 Die unterschiedlichen Messbereiche

Theoretisch ist für den Nahbereich die Abbildung von 5 vollständigen Codeelementen, für den Fernbereich von

Tab. 1: technische Daten des SDL 30 (SOKKIA)

Fernrohr	
Vergrößerung	32-fach
Objektivdurchmesser	45 mm
Sehfeld optisch	2,3 m/100 m
Sehfeld elektronisch	2,3 m/100 m
Messbereich	
elektronisch	1,6–100 m
visuell	ab 1,5 m
Kompensator	
Bauart	Pendel
Dämpfung	Magnetisch
Neigungsbereich	15'
Höhen Genauigkeit <sup>1</sup>	
Elektronisch	1,0 mm
Visuell	1,0 mm
Strecken Genauigkeit	
Elektronisch	0,1–0,2% der Zielweite
Kl. Anzeigeeinheit	
Höhe	0,1 mm/1 mm <sup>2</sup>
Entfernung	1 cm/10 cm <sup>2</sup>

<sup>1</sup>nach DIN 18723, <sup>2</sup>Tracking

mind. 8 Elementen erforderlich. Im Labor wurde der Übergang vom Nah- in den Fernbereich experimentell bestimmt. Dabei zeigte sich, dass neben der Umschaltung vom 6-Bit-Code (Nahbereich) auf den 3-Bit-Code (Fernbereich) vor allem eine weitere Auswertestrategie implementiert ist: je schlechter die Latte ausgeleuchtet ist, umso mehr Codeelemente werden in die Auswertung einbezogen (Tab. 2).

Der Übergang vom Nah- in den Fernbereich findet – in Abhängigkeit von der Ausleuchtung – in einer Entfernung zwischen 8 und 9 m statt.

Bei verschiedenen Versuchsreihen wurde der erfasste Codeabschnitt teilweise abgedeckt, um optische Hindernisse im Messfeld zu simulieren. Das Messsystem lässt Abdeckungen bis zu 50% zu. Mit zunehmender Abdeckung wurden keine signifikanten Messwertänderungen registriert.

### 5.2 Die Streckenmessgenauigkeit

Die vom SDL 30 abgeleiteten Distanzen wurden mit bekannten Strecken verglichen. Die Ergebnisse sind in Abb. 5 dargestellt. Gerade auf Entfernungen über 50 m ist die Genauigkeit der Strecken eindeutig besser als die Herstellerangabe.

Tab. 2: genutzte Codeelemente in verschiedenen Entfernungen

genutzte Codeelemente	bis Entfernung [m]	Anz. der sichtbaren Codeelemente (7-Bit-Code)
5	5,80	16
6	6,40	17
7	7,70	21
8	9,05	25
9	11,15	31
10	14,35	41
11	ab 14,36	41

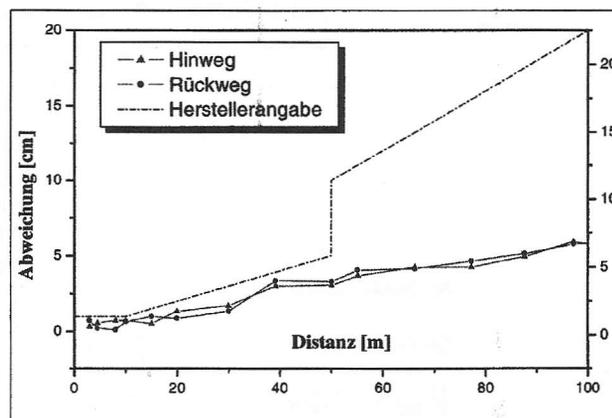


Abb. 5: Streckenmessgenauigkeiten des SDL 30

### 5.3 Die Justierung der Ziellinie

Das interne Programm *Adjust* sieht nach der Bedienungsanleitung nur das Justierverfahren mit *kürzester Zielweite* vor (vgl. DEUMLICH u. STAIGER, 2001, S. 285). Bei der Erprobung stellte sich heraus, dass keinerlei Entfernungskontrollen in der Software implementiert sind, so dass auch die anderen Verfahren *Förstner*, *Näbauer* und *Kukkamäki* angewendet werden können.

Als Besonderheit empfiehlt der Hersteller für die Justierung eine einstellbare Doppelmessung mit folgendem Ablauf: der Höhenunterschied zwischen den beiden Laten wird von einem Standpunkt beobachtet. Dann wird das Stativ um 180° horizontal verdreht, das Instrument wird erneut (grob) horizontalisiert und derselbe Höhenunterschied zum zweiten Mal beobachtet. Die abschließende Mittelbildung soll (vermutlich) den Einfluss der Horizontschräge reduzieren. Mehrere Versuchsreihen zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Verfahren mit bzw. ohne Stativdrehungen.

### 5.4 Der Einfluss der Umgebungstemperatur

Sind zu Beginn einer Messung die Umgebungstemperatur und die Instrumententemperatur stark unterschiedlich, zeigen sich – wie bei anderen Digitalnivellieren –

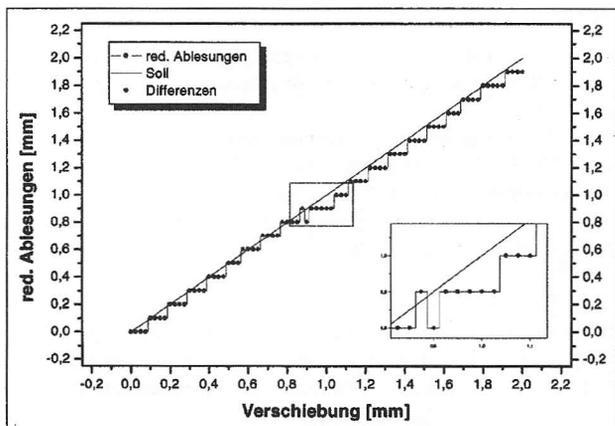


Abb. 6: Änderung der Ziellinie in Abhängigkeit der Temperatur

während der Akklimatisationsphase signifikante Änderungen der Ziellinie (vgl. SCHAUERTE, 1992). Zur Untersuchung wurde der Prüfling auf 5 °C abgekühlt und anschließend einer Umgebungstemperatur von 21 °C ausgesetzt (Erwärmung), bzw. auf 21 °C erwärmt, um dann auf die Umgebungstemperatur von 5 °C abzukühlen. In beiden Varianten wurde jeweils über einen Zeitraum von ca. 2 Stunden auf eine feststehende Latte fortlaufend beobachtet (Abb. 6).

Bei großen Temperaturdifferenzen zwischen Geräte- und Umgebungstemperatur ist eine Anpassung an die Außentemperatur vor der Messung dringend geboten. Akklimatisationszeiten von 25 bis 30 Minuten sind für die Messpraxis ausreichend.

## 5.5 Untersuchungen zur Höhenmessung

Für Qualitätsaussagen hinsichtlich der Höhenmessung wurden umfangreiche Untersuchungen ausgeführt.

### 5.5.1 Das Auflösungsvermögen

Die kleinste Anzeigeeinheit beträgt beim SDL 0,1 mm. Zur Ermittlung des Auflösungsvermögens wurde die Kunststofflatte um jeweils 0,025 mm verschoben. Die Verschiebung wurde mit einem hochpräzisen Glasmaßstab (Fa. Heidenhain) praktisch fehlerfrei bestimmt. Aus verschiedenen Entfernungen wurden die Höhenänderungen beobachtet (Abb. 7).

Der treppenförmige Verlauf der Höhenänderungen zeigt, dass die Auflösung des Digitalnivelliers besser ist als die kleinste Anzeigeeinheit (0,1 mm). Die Ergebnisse sind auf kurze Entfernungen bzw. bei besserer Ausleuchtung der Latte noch regelmäßiger als in dieser Abbildung.

Tab. 3: Standardabweichung für 1 km Doppelnivellement

Berechnung	Formel	$\sigma$ [mm]
aus Differenzen der Hin- und Rückmessung	1	0,24
aus Schleifenwidersprüchen	2	0,31
aus einer freien Höhenausgleichung	–	0,26

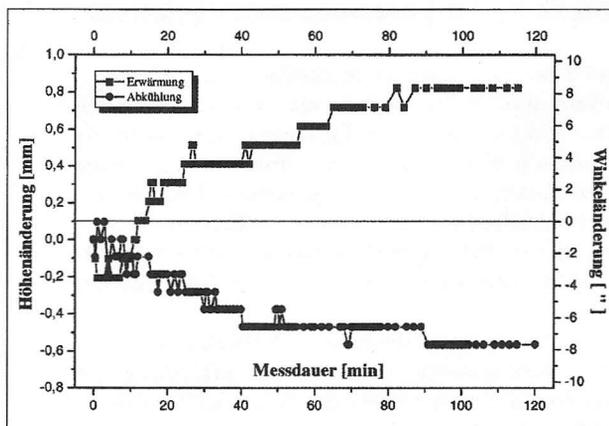


Abb. 7: Auflösungsvermögen (Zielweite ca. 19 m, ohne Beleuchtung)

### 5.5.2 Die Höhenmessgenauigkeit

Zur Bestimmung der Höhenmessgenauigkeit wurde ein Nivellementsnetz bestehend aus 12 Festpunkten (17 Nivellementsstrecken, 4,7 km Gesamtlänge) in Hin- und Rückweg beobachtet. Auf eine Stationierung wurde verzichtet. Es stand nur eine Latte zur Verfügung, weshalb einfache Höhenunterschiede im Repeat-Modus beobachtet wurden. Die Standpunkte für Latte und Instrument (gleiche Zielweiten) wurden durch Abschreiten festgelegt.

Die 17 Nivellementsstrecken waren zwischen 70 m und 670 m lang. Die betragsgrößten Differenzen aus Hin- und Rückmessung betragen 0,7 mm ( $s = 670$  m) und 0,5 mm ( $s = 265$  m). Alle anderen Differenzen sind kleiner als 0,5 mm. Als Kenngröße wurde die Standardabweichung für 1 km Doppelnivellement auf verschiedene Arten berechnet:

#### Standardabweichung aus Höhendifferenzen der Hin- und Rückmessung

Hin- und Rückweg werden als unabhängige Doppelbeobachtungen mit dem Gewicht  $p = 1/L$  betrachtet.

$$\sigma_0 = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \left[ \frac{dd}{L} \right]} \quad (1)$$

$d$  = Differenz  $h_{\text{Hin}} - h_{\text{Rück}}$  [mm]

$L$  = Länge des einfachen Nivellierwegs [km]

$n$  = Anzahl der doppelt nivellierten Höhenunterschiede

#### Standardabweichung aus Schleifenwidersprüchen

Hier wird der quadratische Durchschnitt für mehrere Schleifen berechnet.

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \left[ \frac{ww}{L} \right]} \quad (2)$$

$w$  = Schleifenwiderspruch [mm]

$L$  = Länge der einfachen Schleife

$n$  = Anzahl der Schleifen

Die Berechnung der Höhenausgleichung erfolgte mit einer streckenunabhängigen Gewichtung.

## 6 Beurteilung der Untersuchungsergebnisse

Die Ergebnisse zur Höhengenaugigkeit (5.5.2) sind mit ca. 0,3 mm/km signifikant besser als die angegebenen 1 mm/km. Jedoch sind diese Ergebnisse insgesamt als zu optimistisch einzustufen: Es wurde nur mit einer steckbaren Kunststoffplatte in der genähert gleichen Anordnung beobachtet. Damit bleiben systematische Abweichungen der Nivellierlatte praktisch unberücksichtigt. Die tatsächliche Genauigkeit wird auf 0,8 mm/km geschätzt.

Das SDL30 ist ein ausgezeichnetes Digitalnivellier, das sämtliche Leistungsangaben einhält. In Verbindung mit Präzisionsnivellierlatten könnte das Potenzial des Instruments voll ausgeschöpft werden.

## 7 Literatur

- DEUMLICH, F.; STAIGER, R: Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. 9. Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2001
- SCHAUERTE, W.: Vergleichende Untersuchung der Digitalnivelliere WILD NA 2000 und NA 3000. Vermessung und Raumordnung VR 54/2 + 3, 1992
- SCHLEMMER, H.: Laserinterferenzkomparator zur Prüfung von Präzisionsnivellierlatten. DGK, Reihe C, Nr. 210, München, 1975
- SCHLEMMER, H.: Advanced Technology for a new Precise Levelling Rod. Proceedings 3rd Int. Symposium on the American Vertical Datum, Rockville, Maryland, USA, 1985
- SCHLEMMER, H.: Zur digitalen Ablesung von Nivellierlatten. DGK, Reihe C, Nr. 326, München, 1987

Anschrift des Verfassers:

RUDOLF STAIGER,  
Fachbereich Vermessungswesen, Universität Essen  
Henri-Dunant-Straße 65, D-45131 Essen  
rudolf.staiger@uni-essen.de

## Das Sokkia Digitalnivellier SDL30 Nie wieder Daten aufschreiben

Digitalnivellieren heißt 50 % schneller messen. Ablesen, Interpretieren, Berechnen und Speichern erfolgen automatisch. Die Messergebnisse können bequem im Büro weiterverarbeitet werden.

Das Sokkia Digitalnivellier SDL30 zeigt seine Stärken vor allem bei ungünstigen Witterungsbedingungen, wie z. B. bei ungleichmäßiger Beleuchtung und starkem Regen, absolut zuverlässig und präzise.



Kontakt zu Sokkia:  
Telefon (0 22 36) 39 27 60,  
Fax (0 22 36) 38 04 02  
oder per E-Mail: info.de@sokkia.net

**SOKKIA**