

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Visokošolski program geodezija,
Smer Geodezija v inženirstvu

Kandidat:

Samo Topolnik

Sodobni komparatorji nivelmanskih lat v Evropi

Diplomska naloga št.: 295

Mentor:

izr. prof. dr. Dušan Kogoj

Ljubljana, 23. 4. 2009

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **SAMO TOPOLNIK** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
»SODOBNI KOMPARATORJI NIVELMANSKIH LAT V EVROPI«.

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 06.04.2009

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 528.38:528.54(043.2)
Avtor: Topolnik Samo
Mentor: izr. prof. dr. Dušan Kogoj
Naslov: Sodobni komparatorji nivelmanskih lat v Evropi
Obseg in oprema: 82 str., 5 pregl., 12 graf., 43 sl., 14 en., 3 pril.
Ključne besede: geometrični nivelman, nivelir, nivelmanska lata, kalibracija, komparator

Izveček:

Komparator je posebna naprava s katero se izvajajo postopki, katerih rezultati definirajo natančnost konstrukcije in delovanja opreme za niveliranje. Ti postopki se imenujejo kompariranje oz. kalibracija, izvajajo pa se zato, ker le tako pregledana oprema, lahko doseže zahtevano natančnost posameznih nalog preciznega geometričnega nivelmana. Testira se precizne nivelmanske late s črtno ali kodno razdelbo ter sisteme za digitalno niveliranje, ki jih sestavljajo digitalni nivelirji in kodne nivelmanske late. Način kompariranja je odvisen od tipa komparatorja.

V diplomski nalogi sem najprej predstavil postopek geometričnega nivelmana in opremo za niveliranje, kjer sem podrobneje opisal digitalne nivelirje in kodne nivelmanske late. Nato sem definiral kompariranje oz. kalibracijo ter razložil nujnost teh postopkov. Pri opisu komparatorjev je posebej predstavljena naprava, ki se nahaja na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Podrobno so razloženi tudi kalibracijski postopek in njegovi rezultati. Na koncu diplomske naloge pa sem opisal še način kontroliranja kakovosti različnih komparatorjev in različnih kalibracijskih postopkov.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 528.38:528.54(043.2)
Author: Topolnik Samo
Supervisor: assoc. prof. dr. Dušan Kogoj
Title: Contemporary comparators for levelling staffs in Europe
Notes: 82 p., 5 tab., 12 graph., 43 fig., 14 eq., 3 ann.
Key words: geometric levelling, level, levelling staff, calibration, comparator

Abstract:

Comparator is special device with which procedures are being done, which results define accuracy of construction and activity of levelling equipment. These procedures are called comparison or calibration and they are being done because, the equipment checked only so, can achieve the required precision for the particular tasks of the precise geometric levelling. Tests can be done for precise levelling staffs with line or code graduation and for digital levelling systems, that consist of digital levels and code levelling staffs.

In dissertation I first introduced procedure of geometric levelling and levelling equipment, where I described digital levels and code levelling staffs more in detail. I defined comparison and calibration then and explained urgency of these procedures. At description of comparators is particularly presented device, that is located on Faculty of Civil Engineering and Geodesy in Ljubljana. Also calibration procedure and its results are explained in detail. At the end of dissertation did I also described method of controlling the quality of different comparators and of different calibration procedures.

ZAHVALA

Posebno se zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Dušanu Kogoju za ves trud in čas, ki ga je vložil za pomoč pri izdelavi te diplomske naloge.

Zahvaljujem se tudi vsem, ki so sodelovali pri mojem izobraževanju oz. so mi bili v kakršnokoli pomoč.

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	1
2 NIVELIR IN NIVELIRANJE	3
2.1 Geometrični nivelman	3
2.2 Nivelir	4
2.3 Digitalni nivelirji.....	6
2.3.1 Razvoj digitalnih nivelirjev.....	10
2.3.2 Komponente sistema za digitalno niveliranje	13
2.3.3 Način delovanja digitalnega nivelirja Wild NA 2000	14
2.4 Nivelmanske late	16
2.4.1 Oblike kodnih razdelb.....	20
2.4.1.1 Leica.....	20
2.4.1.2 Zeiss	21
2.4.1.3 Topcon	22
2.4.1.4 Sokkia	23
2.4.1.5 Slikovna primerjava različnih oblik kodnih razdelb	26
2.5 Različni postopki izrednotenja pri digitalnih nivelirjih.....	26
2.5.1 Leica.....	27
2.5.2 Zeiss	27
2.5.3 Topcon	28
2.5.4 Sokkia	28
3 KONTROLA NATANČNOSTI OPREME ZA NIVELIRANJE	31
3.1 Kompariranje oz. kalibriranje opreme za niveliranje	31
3.2 Pregled preciznih invar kodnih nivelmanskih lat.....	33
3.2.1 Kvalitativni pregled.....	33
3.2.2 Kvantitativni pregled	34
3.3 Priporočila za redno pregledovanje preciznih invar kodnih nivelmanskih lat	35
3.4 Priporočila za uporabo preciznih invar kodnih nivelmanskih lat	36

4 LASERSKO INTERFERENČNI KOMPATORJI	39
4.1 Komparatorji za kalibriranje razdelbe late	40
4.2 Komparatorji za sistemsko kalibracijo	44
4.3 Komparator Fakultete za gradbeništvo in geodezijo iz Ljubljane (UL, FGG)	45
5 POSTOPEK KALIBRACIJE.....	49
5.1 Kalibracija razdelbe late.....	49
5.1.1 Postopek kalibracije razdelbe invar kodne late.....	50
5.2 Sistemska kalibracija	52
5.2.1 Efekti, ki vplivajo na sisteme za digitalno niveliranje.....	56
5.2.1.1 Temperaturni efekt - aklimatizacijski efekt (na primeru raziskav na TU Graz).....	56
5.2.1.2 Temperaturni efekt - samosegrevanje (na primeru raziskav na TU Graz)	57
5.2.1.3 Višinske napake pri meritvah na končnih območjih late (na primeru raziskav na TU Graz)	59
5.2.1.4 Ciklične višinske napake (na primeru raziskav na TU Graz).....	61
5.2.1.5 Nezadostno fokusiranje (na primeru raziskav na Stanfordskem linearnem pospeševalniku - SLAC).....	62
5.2.2 Potek sistemske kalibracije na TU Graz	63
6 REZULTAT KOMPARIANJA OZ. KALIBRACIJE	67
6.1 Merilo razdelbe late.....	67
6.2 Napaka prve črtice razdelbe late.....	69
6.3 Napaka nepravokotnosti pete late.....	71
6.4 Temperaturni razteznostni koeficient razdelbe late.....	72
7 KROŽNE KONTROLE KAKOVOSTI KALIBRACIJE PRECIZNIH INVAR NIVELMANSKIH LAT.....	75
7.1 Primer krožne kontrole kakovosti kalibracije preciznih invar nivelmanskih lat 2003/2004	76
8 ZAKLJUČEK	79

VIRI	81
-------------------	-----------

PRILOGE

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Tehnične značilnosti današnjih digitalnih nivelirjev	13
Preglednica 2: Najpomembnejše poškodbe lat in njihovi vplivi	34
Preglednica 3: Merski intervali pri razdalji 3 m	64
Preglednica 4: Časovni potek krožne kontrole	77
Preglednica 5: Rezultati vrednosti meril pridobljenih s krožno kontrolo kakovosti 2003/2004 (H = horizontalni komparator, V = vertikalni komparator).....	77

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Spray metoda (Nedo - do leta 1990)	18
Grafikon 2: Metoda graviranja (Kern).....	19
Grafikon 3: Interferometrična metoda graviranja (Nedo od leta 1990).....	19
Grafikon 4: Rezultat kalibracije 3 m dolge invar late z Leicino razdelbo.....	51
Grafikon 5: Rezultat kalibracije 3 m dolge invar late s Topconovo razdelbo.....	54
Grafikon 6: Rezultat sistemske kalibracije instrumenta Topcon DL 101C pri razdalji 13 m ..	55
Grafikon 7: Spremembe vizurne linije instrumentov (a) Leica NA 3003, (b) Leica DNA 03, (c) Topcon DL 101C in (d) Trimble/Zeiss DiNi 11 med njihovo aklimatizacijo od 40°C na sobno temperaturo ter s stimulacijo kompenzatorja	57
Grafikon 8: Spremembe vizurne linije aklimatiziranih instrumentov (a) Leica NA 3003, (b) Leica DNA 03, (c) Topcon DL 101C in (d) Trimble/Zeiss DiNi 11 po vklopitvi in s stimulacijo kompenzatorja	58
Grafikon 9: Sistematične višinske napake na zgornjem koncu late instrumentov (a, b) Leica NA 3003, (c, d) Leica DNA 03, (e, f) Topcon DL 101C in (g, h) Trimble/Zeiss DiNi 11 na razdaljah 3 m in 30 m	60
Grafikon 10: Ciklične višinske napake nivelirja Leica NA 3003 okoli razdalje 15 m.....	62
Grafikon 11: Efekt nezadostnega fokusiranja pri nivelirju Trimble DiNi 12 na razdalji 10.98 m.....	63
Grafikon 12: Temperaturni razteznostni koeficient late tipa Leica GPCL3 ($\alpha_L = 0.76 \pm 0.03$ ppm/°C).....	73

KAZALO SLIK

Slika 1: Osnovni princip geometričnega nivelmana.....	3
Slika 2: Različne tehnologije pri avtomatizaciji geometričnega nivelmana.....	5
Slika 3: Geometrični princip digitalnih nivelirjev	7
Slika 4: Preslikava posameznega intervala.....	8
Slika 5: Zeiss DiNi 12 uporablja približno 30 cm velik odsek razdelbe na lati, neodvisno od vizurne razdalje d, ki se lahko spreminja od 1.5 m do 100 m	9
Slika 6: Osnovni princip Bonnškega digitalnega nivelirja	10
Slika 7: Stranski pogled s celotnim potekom žarka.....	11
Slika 8: Dresdenski digitalni nivelir	12
Slika 9: Potek meritve in komponente sistema za digitalno niveliranje.....	14
Slika 10: Optično-mehanska sestava digitalnega nivelirja NA 2000	15
Slika 11: Različne nivelmanske late (od leve proti desni: E razdelba, šahovnična razdelba, delno digitalizirana lata, invar lata z dvojno razdelbo, digitalna lata s kodno razdelbo) .	16
Slika 12: Zgradba preciznih invar nivelmanskih lat	17
Slika 13: Vpetje invar traku precizne late; levo - napetostna vzmet (indirektni prenos sile), sredina - kompresijska vzmet, desno - napetostna vzmet.....	18
Slika 14: Profil razdelbe dobljene z interferometrično metodo graviranja	19
Slika 15: Princip Leicinega kodiranja late.....	20
Slika 16: Potek kodiranja Zeissove late.....	21
Slika 17: Topconovo kodiranje late	22
Slika 18: Novo Topconovo kodiranje.....	23
Slika 19: Interpretacija kodne late proizvajalca Sokkia	24
Slika 20: Sokkiin način kodiranja.....	25
Slika 21: Različne oblike kodnih razdelb	26
Slika 22: Ugotavljanje najboljše povezave merskega in referenčnega signala	27
Slika 23: Skrinja za precizno nivelmansko lato.....	36
Slika 24: Osvetlitev late: a) z osvetlitvjo pod takim kotom bomo dobili napačne odčitke; b) takšna osvetlitev ne povzroči napačnih odčitkov	37
Slika 25: Delovanje interferenčnega razdaljemera	39
Slika 26: CCD slikovno zaporedje zajemanja enega roba črtice kodne nivelmanske late	41

Slika 27: Shematičen prerez vertikalnega komparatorja na Tehnični univerzi v Münchenu (TU München)	42
Slika 28: Zajem elementov razdelbe late na vertikalnem in horizontalnem komparatorju na TU München.....	43
Slika 29: Lasersko interferometrični sistem in CCD kamera vertikalnega komparatorja Geodetskega zavoda Nordrhein-Westfalen (LVerma NRW).....	43
Slika 30: Vertikalni komparator Tehnične univerze v Grazu (TU Graz)	44
Slika 31: Shematična predstavitev sistemske kalibracije na horizontalnem komparatorju geodetskega laboratorija UniBw München	45
Slika 32: Merilni voziček na podstavku komparatorja in vpeta nivelmanska lata	46
Slika 33: Vzdolžni prerez merilnega vozička in povezave z etalom.....	47
Slika 34: Princip kalibracije razdelbe late	50
Slika 35: Princip sistemske kalibracije	53
Slika 36: Meritve na končnih območjih lat	59
Slika 37: Ovrednotenje merilnega predpisa razdelbe late	68
Slika 38: Odmik prve črtice razdelbe	70
Slika 39: Naslon za peto late s posebnim merilom in peta late (levo - FGG ljubljana, desno - TU München).....	70
Slika 40: Napaka nepravokotnosti pete late	71
Slika 41: Mikrometrške merske ure za določitev napake površine pete late (levo - TU München, desno - Visoka šola Neubrandenburg).....	72
Slika 42: Nastavek za lato (žaba)	72
Slika 43: Trimble/Zeiss DiNi 12 (levo) in Leica DNA 03 (desno)	76

KAZALO PRILOG

Priloga A: Poročilo o kalibraciji invar late Leica GPCL3-28662

Priloga B: Poročilo o kalibraciji invar late Leica GPCL3-28655

Priloga C: Poročilo o kalibraciji invar late Leica GPCL3-34899

SEZNAM OKRAJŠAV

CCD	Charge Coupled Device
DIN	Deutsches Institut für Normung
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
FFT	Fast Fourier Transformation
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
LVermA NRW	Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen
ppm	Parts per million
RLS	Rotacijski in linearni senzorji pomika in zasuka
SLAC	Stanford Linear Accelerator Center
TU Dresden	Technische Universität Dresden
TUG	Tehnsche Universität Graz
TUM	Tehnsche Universität München
UL, FGG	Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
UniBN	Universität Bonn
UniBwM	Universität der Bundeswehr München

1 UVOD

Geometrični nivelman je postopek za določanje višin oz. višinskih razlik. Izvaja se s pomočjo opreme za niveliranje, ta pa sestoji iz nivelirja in nivelmanskih lat. Tudi danes, v času satelitskih meritev (GPS - sistem globalnega določanja položaja), se metoda preciznega geometričnega nivelmana še vedno uporablja in posodablja. Uporablja se za vzpostavitev višinskega referenčnega sistema, pri projektiranju, za opazovanje kontrolnih točk na raznih konstrukcijah, itn.

Zahtevana natančnost posameznih nalog preciznega geometričnega nivelmana je zagotovljena le z redno kontrolo natančnosti opreme za niveliranje. Pri tej kontroli je najvažnejši postopek kompariranja oz. kalibracije. Ta se izvede s posebno napravo, ki se imenuje komparator. S komparacijo oz. kalibracijo se ugotavljajo sistematične napake opreme za niveliranje, te pa so končni kazalci konstrukcijske natančnosti.

V začetku 90. let prejšnjega stoletja so se na tržišču pojavili digitalni nivelirji, ki so postopno izpodrinili navadne optične nivelirje zato, ker so manjši, lažji, ker zagotavljajo visoko natančnost in hitro opravljene meritve z avtomatiziranim merskim postopkom ter zaradi zelo dobrih zunanjih operacijskih sistemov. Z uvedbo digitalnih nivelirjev so bile običajne nivelmanske late s črtno razdelbo zamenjane z latami s kodno razdelbo. Pri določitvi višinskega odčitka ni uporabljena le ena črtica kodne razdelbe, ampak več kodnih elementov skupaj. Tako digitalni nivelir in kodna lata skupaj sestavljata merski sistem. Klasični postopek kalibracije razdelbe late, ki se je izvajal za običajne late, se lahko uporablja tudi za kodne late, vendar pa se tu določa le položaje posameznih kodnih elementov, ne pa skupine kodnih elementov kot pri digitalnem odčitavanju. Tako je, kot posledica razvoja digitalnih nivelirjev, kalibracijski postopek doživel nujno posodobitev. Prave rezultate zagotavlja le vključitev digitalnega nivelirja v postopek kalibracije. Ta postopek, t.i. sistemska kalibracija, omogoča določitev kalibracijskih parametrov za merski sistem preciznega digitalnega niveliranja. Sistemska kalibracija je ponekod že zamenjala klasično kalibracijo razdelbe late.

Obstaja kar nekaj virov napak, ki lahko vodijo k sistematično pogrešenim meritvam, zato je potrebno le te raziskati. Najpomembnejše je testiranje merila razdelbe late oz. sistema za digitalno niveliranje, ki mora biti zelo natančno določeno. Soroden faktorju razdelbe je temperaturni razteznostni koeficient razdelbe late. Naslednji vzroki za nenatančno določanje višin so napaka prve črtice razdelbe late, napaka nepravokotnosti pete late, meritve pri kritičnih razdaljah in pri obeh koncih late, neizostreno fokusiranje late, umetna osvetlitev, itd. Z rezultati raziskav teh vplivov pa so bila vzpostavljena tudi pravila za najnatančnejša terenska dela.

Vse večja zahteva po natančnosti je bila vzrok za državna in mednarodna skupinska delovanja kalibracijskih laboratorijev, kjer so sodelujoči izmenjavali zamisli in informacije. Skupinsko delovanje pa je vodilo k skupnim krožnim pregledom, pri katerih so identične nivelmanske late pod enakimi pogoji kalibrirali v različnih laboratorijih. V ta mednarodni krožni sistem komparatorjev pa je bil vključen tudi prenovljeni Zeissov dolžinski komparator Fakultete za gradbeništvo in geodezjo iz Ljubljane.

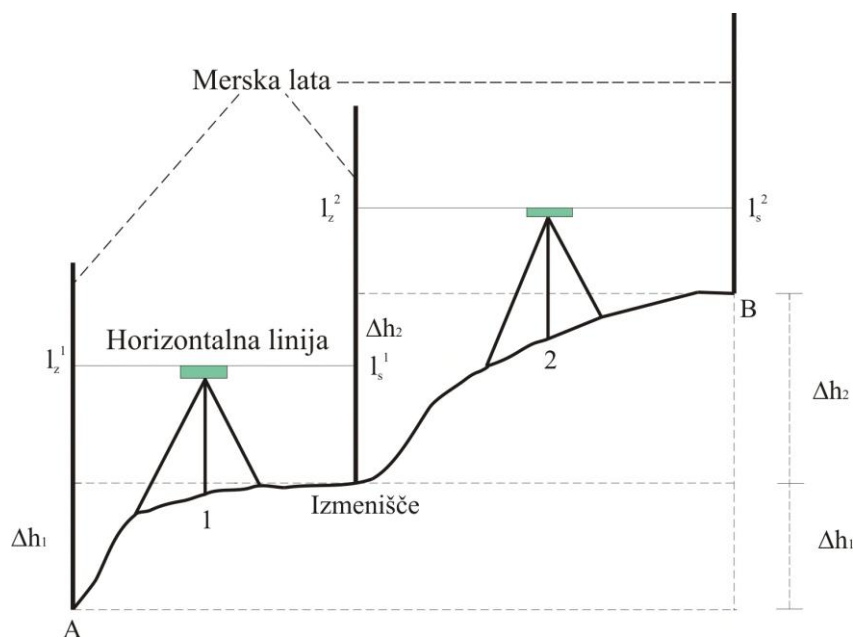
Z diplomsko nalogo sem predstavil omenjene postopke in instrumentarij.

2 NIVELIR IN NIVELIRANJE

2.1 Geometrični nivelman

Geometrični nivelman je najenostavnejša in najnatančnejša metoda določevanja višinskih razlik oz. absolutnih (nadmorskih) višin točk in je tudi eden od najnatančnejših merskih postopkov v geodeziji.

Pri izvajanju geometričnega nivelmana uporabljamo posebno opremo in sicer nivelir, nivelmanske late ter pomožni pribor za niveliranje. Nivelir nam zagotavlja horizontalno vizuro, preko katere se pridobiva odčitke na vertikalno postavljenih nivelmanskih latah, ki se nahajajo na točkah med katerimi se določa višinsko razliko. Višinsko razliko se izračuna iz razlike med odčitkom na lati zadaj (l_z) in odčitkom na lati spredaj (l_s).



Slika 1: Osnovni princip geometričnega nivelmana

$$\Delta h_1 = l_z^1 - l_s^1$$

$$\Delta h_2 = l_z^2 - l_s^2$$

$$\Delta H_A^B = \Delta h_1 + \Delta h_2$$

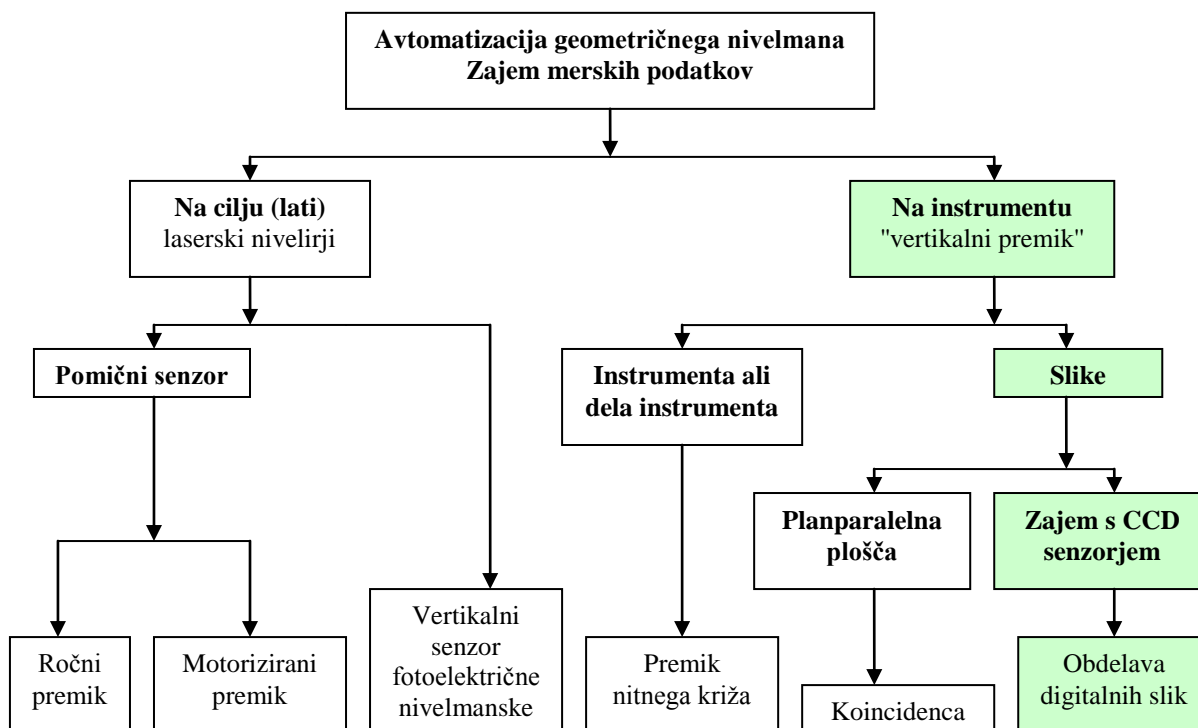
Ker moramo z nivelirjem največkrat stati na večih stojiščih (ker točki med seboj nista vidni, ker je prevelika razdalja ali višinska razlika), postavljamo late na izmenišča (začasne točke) in določamo posamezne višinske razlike ($\Delta h_1, \Delta h_2$). Skupna višinska razlika (ΔH_A^B) pa je seštevek vseh posameznih višinskih razlik.

2.2 Nivelir

Razvoj nivelirjev je potekal v treh pomembnejših fazah. Prvi nivelirji so bili optični nivelirji z nivelacijsko libelo, ki je zagotavljala horizontalnost vizure. Delo s temi nivelirji je bilo zamudno in nezanesljivo. Horizontalnost vizure danes zagotavlja kompenzator. Vloga kompenzatorja je, da pri približno horizontiranem nivelirju v dopustnih mejah avtomatsko spreminja pot horizontalnega žarka tako, da ta pade direktno na nitni križ. Sedaj so v uporabi izključno kompenzacijski nivelirji. Sodobna elektronika je povzročila temeljite spremembe pri izvajanju najrazličnejših geodetskih meritev. Meritve so postale bistveno hitrejše, manj naporne in predvsem zaneslivejše. Elektronski razdaljemerji so pred desetletji predstavljali prvi korak v tej smeri. Naslednji korak so bili elektronski teodoliti in zatem tudi elektronski nivelirji, ki so postopoma zamenjali optične nivelirje. Problem elektronskih nivelirjev je bil kako zajeti merske podatke (odčitek na lati in odčitek na mikrometru) v istem trenutku, na dveh različnih mestih. Avtomatizacija geometričnega nivelmana z elektronskimi nivelirji je potekala na dva načina (Slika 2):

- 1) prenos mesta horizonta instrumenta na nivelmansko lato – laserski nivelirji
- 2) zajem slike nivelmanske late v instrument in iz vrednotenje – digitalni nivelirji

Pri laserskih nivelirjih senzor ali nivelmanska lata, ki je opremljena s svetlobno občutljivimi diodnimi vrsticami zajame rotirajoč laserski žarek. Digitalni nivelirji pa delujejo na osnovi vidnega in infrardečega dela dnevne svetlobe in ne potrebujejo dodatne osvetlitve (razen pri meritvah v temi). Leica je to tehnologijo poimenovala digitalni nivelir, bolj pravilna označitev pa bi bila kompenzacijski nivelir z elektronskim zajemom slike in iz vrednotenjem.



Slika 2: Različne tehnologije pri avtomatizaciji geometričnega nivelmana

Nivelir vsebuje daljnogled, ki je povezan z libelo. Daljnogled je s podnožjem s trinožnim podstavkom povezan tako, da se ga lahko obrača okoli vertikalne osi. Podnožje s trinožnim podstavkom se s srčnim vijakom pritrdi na stativ. S tremi vznožnimi vijaki podnožja se glede na libelo horizontira nivelir. Grobo horizontiranje se izvede s pomočjo dozne libele, ki jo naravnamo z vznožnimi vijaki. Fino horizontiranje pa je odvisno od tipa nivelirja (nivelacijska libela ali kompenzator).

Nivelirji se ločijo tudi po natančnosti, tako da se pri preciznem niveliranju (npr. meritve v osnovnih državnih mrežah, deformacijske meritve, zakoličbe strojev in naprav, astronomske meritve) uporabljajo precizni nivelirji. Njihova natančnost je večja zaradi:

- boljših tehničnih lastnosti (večja občutljivost nivelacijske libele ali kompenzatorja, večja povečava daljnogleda, občutlivejši elektronski senzori)
- dodatnih priprav (planparalelna plošča z mikrometrom, posebna oblika nitnega križa za določitev dela osnovnega intervala na lati)

- dodatne programske opreme pri digitalnih nivelirjih, ki omogoča sprotno kontrolo delovanja instrumenta in sistematičnih pogreškov (napaka zaradi nenatančnosti merilnih priprav)

Natančnost nivelirja je navadno najpomembnejša značilnost po kateri se odločamo pri izbiri instrumenta, poda pa se jo s standardnim odklonom σ_{Ah} za 1 km dvojnega nivelmana.

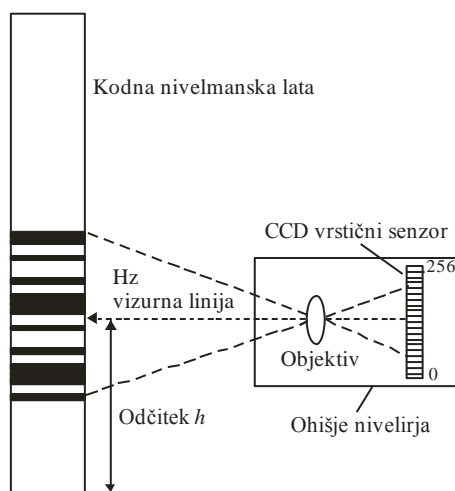
Nivelirje po natančnosti razvrstimo v pet skupin (Deumlich, 2002):

- nivelirji majhne natančnosti $10 \text{ mm/km} < \sigma_{Ah}$
(enostavne zakoličbe gradbenih objektov, enostavne višinske izmere ...)
- nivelirji srednje natančnosti $10 \text{ mm/km} \leq \sigma_{Ah} < 3 \text{ mm/km}$
(višinska zakoličba večjih gradbenih objektov)
- nivelirji visoke natančnosti $3 \text{ mm/km} \leq \sigma_{Ah} < 1 \text{ mm/km}$
(merjenje v mikro višinskih mrežah, zakoličbe ...)
- nivelirji zelo visoke natančnosti $1 \text{ mm/km} \leq \sigma_{Ah} < 0.5 \text{ mm/km}$
(merjenje v preciznih mikro mrežah, natančne zakoličbe ...)
- nivelirji najvišje natančnosti $\sigma_{Ah} < 0.5 \text{ mm/km}$
(merjenje v osnovnih državnih mrežah, deformacijska merjenja, zakoličbe strojev in naprav, astronomske meritve ...)

2.3 Digitalni nivelirji

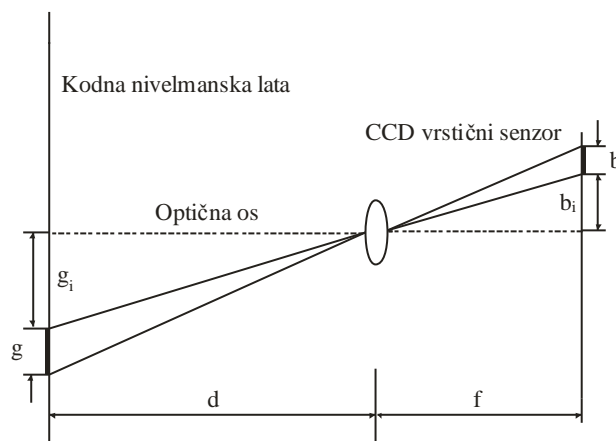
Digitalni nivelirji so kombinacija nivelirja, ki vsebuje kompenzator in senzorja za elektronsko preslikovanje slike (kode late), s katerim je omogočen pretok podatkov. Digitalni nivelirji so sposobni obdelati analogno sliko kodne nivelmanske late in jo spremeniti v digitalni odčitek. CCD tehnologija v nivelirju (CCD je polprevodniški čip, ki s koordinanjem s sto tisoče foto senzorjev, pretvarja slike v električne signale oz. svetlobo v digitalno informacijo) preko optike registrira sliko late, ki obsega določen del kodne razdelbe nad in pod horizontalno ravnino ter v vgrajenem procesorju obdela kodirani odčitek late v digitalno vrednost (Slika 3). Določitev odčitka na lati temelji na postopku iz vrednotenja slike kodne late, ki se od proizvajalca do proizvajalca razlikuje (zaradi zaščite patentnih pravic). Tako ločimo naslednje

principe algoritmov za izračun višinskih odčitkov: postopek korelacije pri proizvajalcu Leica, geometrični postopek pozicionirane meritve 30 cm velikega odseka late pri digitalnih nivelirjih podjetja Trimble (Zeiss) in metoda frekvenčne analize pri digitalnih nivelirjih proizvajalca Topcon (Fourierova analiza). Zaradi avtomatskega odčitavanja in shranjevanja se pri digitalnem niveliranju izognemo napakam, ki nastopijo zaradi napačnega odčitavanja in zapisovanja. Digitalni nivelirji imajo vgrajeno vrsto programov, tako da meritve lahko kontroliramo že na samem terenu.



Slika 3: Geometrični princip digitalnih nivelirjev

V sliki 4 je prikazan način optično-elektronskega zajema kodne razdelbe, kjer je d razdalja med nivelirjem in lato, f je goriščna razdalja, g_i je odmik kodnega elementa late od optične osi, b_i pa je odmik slike tega kodnega elementa od optične osi na vrstičnem senzorju.



Slika 4: Preslikava posameznega intervala

Zvezo med elementi v sliki podaja naslednja enačba (1):

$$d \cdot b_i = f \cdot g_i. \quad (1)$$

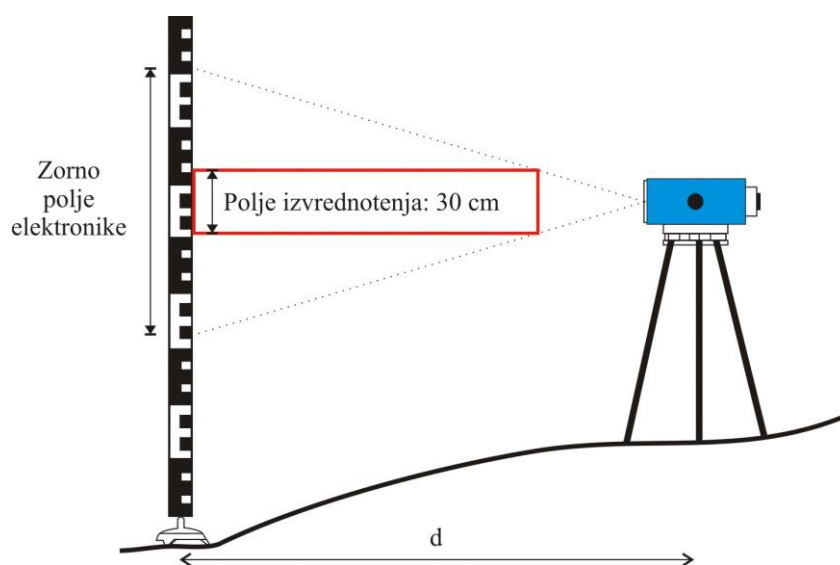
V primerjavi z optičnimi nivelirji se je produktivnost dela z digitalnimi nivelirji povečala za približno 50 %. Računalniška obdelava izmerjenih podatkov s številnimi programi pa je hitra in zanesljiva. Digitalni nivelirji so zgrajeni po principu klasičnih nivelirjev, zato z njimi lahko čitamo tudi optično na navadni nivelmanski lati s črtno razdelbo, vendar pa v tem primeru ne spadajo v razred preciznih nivelirjev.

Slaba stran digitalnih nivelirjev pa je v tem, da v določenih primerih ne zagotavljajo dovolj natančnih meritev (npr. pri neprimerni vizurni razdalji, ko razne ovire zakrivajo potreben odsek na lati, itd.). V teh primerih se še vedno uporabljajo optični nivelirji in late s klasično črtno razdelbo.

Ločimo naslednje razlike med sistemi za digitalno niveliranje in običajnim optičnim niveliranjem:

- Pri digitalnem nivelirju se višinski odčitki, preko elektro-optičnega postopka, določajo avtomatsko, medtem ko pri običajnem niveliranju opazovalec določa odčitke na latah ročno, s pomočjo vizurne linije in optičnih delov instrumenta, kot so nitni križ, okular, mikrometer itd.

- Pri digitalnem niveliranju je CCD tehnologija prevzela velik del opazovalčevih nalog.
- V obdelavo odčitkov late je pri sistemih za digitalno niveliranje vključenih več kodnih elementov (intervalni zajem). Na primer nivelir Zeiss DiNi 12 uporablja 30 cm velik odsek kodirane razdelbe (Slika 5), medtem ko se pri običajnem niveliranju odčitek na lati določa na osnovi opazovanja ene črtice razdelbe (točkovni zajem).
- Pri običajnem niveliranju odčitek temelji na merilu razdelbe late, pri digitalnem niveliranju pa nastopata dve merili: merilo instrumenta in merilo late. Merilo nivelirja naj bi bilo enako merilu late, vendar pa se sčasoma merilo nivelirja lahko spremeni (staranje CCD senzorjev). Pri čitanju razdelbe na lati pa lahko napake nastanejo zaradi poškodovanih kodnih elementov (praske), zaradi neprimerne osvetlitve invar traku (sence), itd.
- Digitalni nivelirji omogočajo avtomatski zapis meritev v pomnilnik in direktni prenos podatkov v računalnik ter obdelavo teh podatkov z ustrežno programsko opremo.

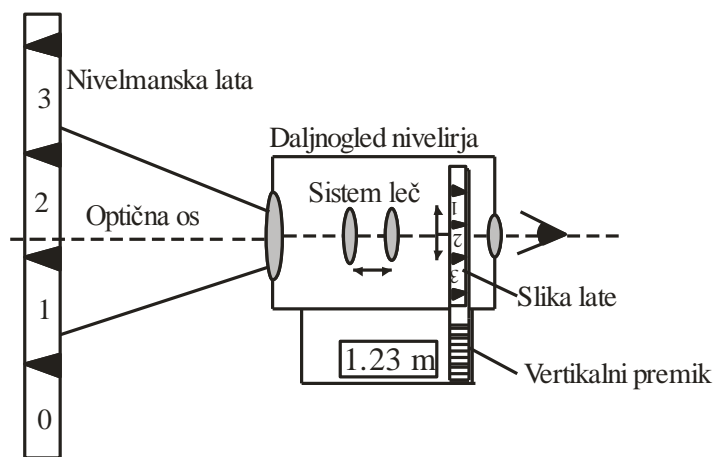


Slika 5: Zeiss DiNi 12 uporablja približno 30 cm velik odsek razdelbe na lati, neodvisno od vizurne razdalje d , ki se lahko spreminja od 1.5 m do 100 m

2.3.1 Razvoj digitalnih nivelirjev

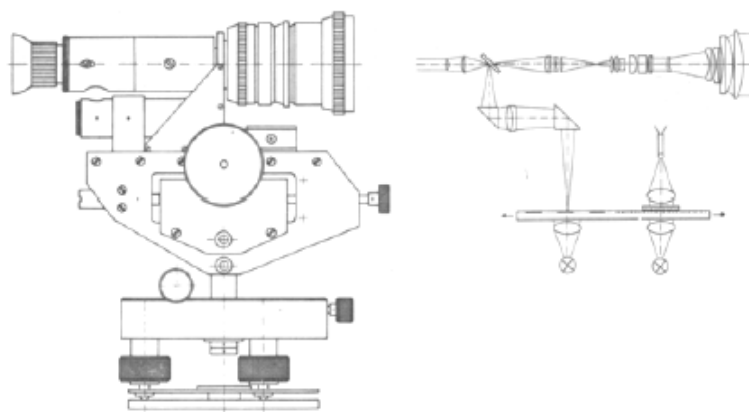
Kot predhodnik današnjih digitalnih nivelirjev se navaja iznajdbo profesorja Hansa Zetscheja, ki jo je razvil na Geodetskem inštitutu Univerze v Bonnu (UniBN) konec 60. let prejšnjega stoletja (Bonnski nivelir, 1966). Težnja razvoja je bila, da bi se višinske vrednosti razdelbe late avtomatsko določale in registrirale, tako da bi se izognili napakam pri odčitavanju in zapisovanju odčitkov.

Kodirana lata se je v nasprotni smeri (obrnjena slika) preslikala v zorno polje daljnogleda (Slika 6). Preko posebne optike leč so se kompenzirale spremembe merila, tako da so na sliki razmaki med črticami vedno ostali enaki, neodvisno od razdalje do late. Ker še ni imel primernih optičnih senzorjev, je moral vertikalno nastavitve nitnega križa opazovalec izvesti še ročno. Izvrednotenje in prikaz sta že bila digitalna, vertikalni premik slike late pa se je zajel s pomočjo odčitalne glave. Do serijske izdelave ta prototip ni nikoli prišel, med drugim tudi zaradi sistema leč, ki je mersko območje skrajšal na 10 do 20 m.



Slika 6: Osnovni princip Bonnskega digitalnega nivelirja

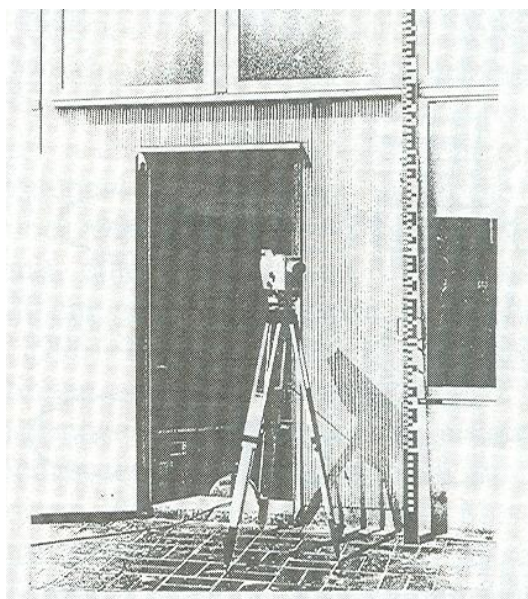
Bonnski nivelir ter celoten princip poteka žarka sta predstavljena na sliki 7.



Slika 7: Stranski pogled s celotnim potekom žarka

Ta instrument je upošteval že vse temeljne mersko tehnične značilnosti elektronskih nivelirjev, ki jih v uporabi najdemo še danes.





Razvoj digitalnih nivelirjev se v naslednjih 15. letih ni nadaljeval. Šele z razvojem CCD tehnologije se je ponudila možnost zajema analogne slike late (merski signal) v zornem polju merskega daljnogleda in transformacije le te v digitalno informacijo. Na Tehnični univerzi v Dresdenu (TU Dresden) so se leta 1982 začela raziskovanja z nadgrajenim optičnim nivelirjem Zeiss Ni 002, ki mu je bil dodan CCD vrstični senzor s 1024 svetlobno občutljivimi elementi (Ingensand, 2005). Leta 1987 je nastal funkcijsko sposoben prototip, ki pa vendarle ni prišel v serijsko proizvodnjo.



Slika 8: Dresdenski digitalni nivelir

Leta 1990 se je z instrumentom NA 2000, švicarskega proizvajalca geodetske opreme Leica (takrat Wild), na tržišču pojavil prvi komercialni serijsko izdelan digitalni nivelir. V njem je bila uspešno uporabljena enodimenzionalna digitalna slikovna obdelava s CCD tehnologijo, ki jo danes lahko najdemo v vsaki domači video kameri. Zaznavanje odčitka z očesom je zamenjalo odčitavanje preko diod CCD vrstičnega senzorja. Razvoj digitalnih nivelirjev se je nadaljeval, tako da danes takšne nivelirje ponujajo različni ponudniki. Trenutno na tržišču obstajajo štiri različni tipi digitalnih nivelirjev (Leica, Sokkia, Topcon in Trimble (prej Zeiss)). Kratek pregled aktualnih digitalnih nivelirjev in njihovih značilnosti podaja naslednja preglednica.

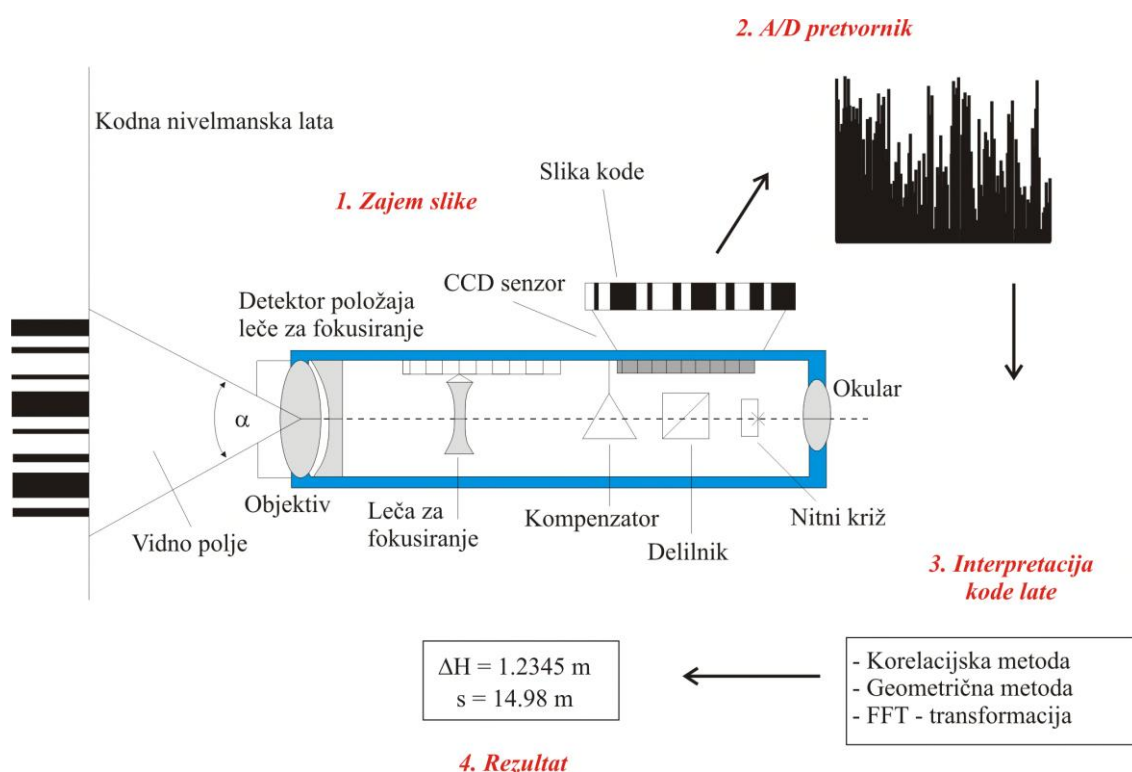
Preglednica 1: Tehnične značilnosti današnjih digitalnih nivelirjev

Tehnični podatki:	Leica DNA 03 	Trimble DiNi 12 	Topcon DL-101C 	Sokkia SDL 30 
Natančnost Elektronska meritve z invar latami z navadnimi latami (iz steklenih vlaken) Klasične optične meritve Natančnost merjenja dolžin	Standardni odklon $\sigma_{\Delta h}$ za km 1 dvojnega nivelmana			
	0.3 mm	0.3 mm	0.4 mm	0.6 mm
	1.0 mm	1.0 mm	1.0 mm	1.0 mm
	2.0 mm	-	1.0 mm	1.0 mm
	1 cm / 20 m	20 mm / 20m	1 cm do 5 cm	10 mm / 10 m
Mersko območje z invar latami z navadnimi latami	1.8 m – 110 m od 0.6 m	1.5 m – 100m od 1.3 m	2 m – 60m 2 m – 100m	1.6 m – 100 m -
Čas meritve	3 s	3 s	3 s	< 3 s
Shranjevanje podatkov Notranji pomnilnik Dodatni pomnilnik	6000 točk PCMCIA kartica	- PCMCIA kartica	8000 točk (256 kb) PCMCIA kartica	2000 točk (64 kb) -
Povečava daljnogleda	24 x	32 x	32 x	32 x
Kompensator Tip Delovno območje Natančnost	nihalo $\pm 10'$ 0.3"	nihalo $\pm 15'$ 0.2"	nihalo $\pm 12'$ 0.3"	nihalo več kot $\pm 15'$ -
Zaslon	LCD, 8 vrst. po 24 znakov	LCD, 4 vrst. po 21 znakov	LCD, 2. vrst. po 8 znakov	LCD 128 x 32 pik
Delovanje baterije	do 24 h	3 dni	10 h	več kot 8,5 h
Masa (z baterijo)	2.8 kg	3,5 kg	2.3 kg	2.4 kg
Pogoji delovanja Delovna temperatura	od -20°C do $+50^{\circ}\text{C}$			

2.3.2 Komponente sistema za digitalno niveliranje

Pojem sistem za digitalno niveliranje predstavljata kodna nivelmanska lata in senzor za avtomatsko zajemanje podatkov (Slika 9). Vir podatkov predstavljajo kodne razdelbe nivelmanskih lat, ki se razlikujejo glede na proizvajalca. Daljnogled je sestavljen iz objektivna, leče za fokusiranje, kompenzatorja, delilnika žarka, nitnega križa in okularja. Kompensator je povezan z dušilcem. Neomejeno premikanje nihala nadzira kontrolni senzor. S tem optičnim sistemom se že lahko izvrši odčitavanje na lati s prostim očesom. Ker pa je del svetlobe v

delilniku žarka usmerjen proti sensorju za elektronsko pretvarjanje slike, se lahko zajem podatkov izvede avtomatsko. Delilnik žarka proti slikovnem sensorju pravokotno preusmeri del spektralnega območja. Potek meritve vodi procesorska enota, ki ne le da meritev pravočasno izvede, ampak predloži tudi popravke (npr. pri različnih temperaturnih vplivih). Algoritmi za izvedenost se razlikujejo glede na proizvajalca. S tem sistemom je omogočena popolna izključitev napak zaradi odčitavanja. Tu ni v izvedenost vzeta le ena kodna črtica na lati, ampak večji odsek iz katerega poleg višinskih razlik dobimo tudi razdaljo (Zeinzinger, 2008).



Slika 9: Potek meritve in komponente sistema za digitalno niveliranje

2.3.3 Način delovanja digitalnega nivelirja Wild NA 2000

Digitalni nivelir NA 2000 razpolaga z enakimi optičnimi in mehanskimi elementi kot navadni nivelir (Slika 10). Delilnik žarka razcepi zgolj infrardeči del vpadne svetlobe in ga usmeri k vrstičnemu senzorju, ki ima v tem spektralnem območju največjo občutljivost. Vrstični senzor spremeni sprejeti kodni vzorec late v analogni signal. Preko A/D pretvornika se pridobi digitalni merski signal. Senzor je sestavljen iz svetlobno občutljivih fotodiod. Položaj leče za

fokusiranje zapiše detektor položaja leče za fokusiranje. Iz tega položaja se da pridobiti približno razdaljo med instrumentom in lato. V vizurnem območju od 1.8 m do 100 m se leča za fokusiranje premakne za 14 mm. Približna razdalja se izračuna iz naslednje enačbe (2) (Zeinzinger, 2008).

$$df = \frac{k}{s} \quad (2)$$

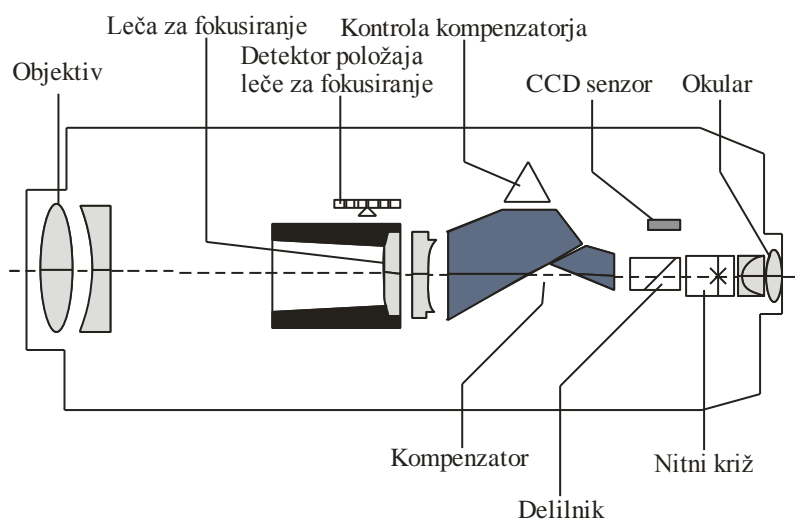
df – fokusirna razdalja

k – optična konstanta

s – položaj leče za fokusiranje

Pridobitev višine in razdalje se lahko razdeli na štiri korake:

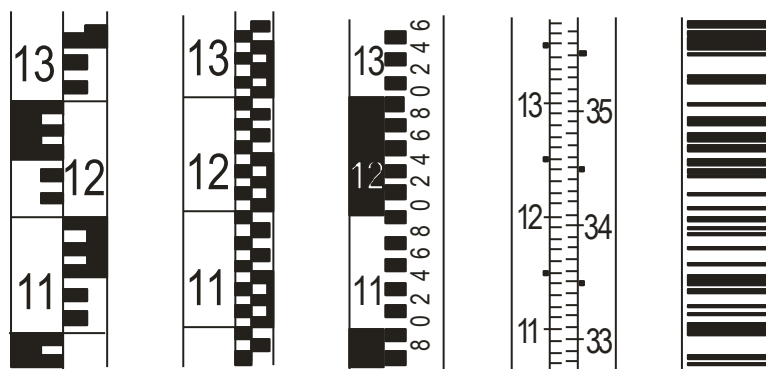
- v prvem koraku je instrument potrebno, kot pri običajnem nivelirju, usmeriti na nivelmansko lato in fokusirati
- po pritisku na mersko tipko se registrira položaj leče za fokusiranje in nadzira kompenzator
- sledi približna določitev višine in razdalje
- v zadnjem koraku se pridobi točno višino in razdaljo s postopkom korelacije



Slika 10: Optično-mehanska sestava digitalnega nivelirja NA 2000

2.4 Nivelmanske late

Nivelmanske late so lahko različnih širin in dolžin. Na sprednji strani late se nahaja razdelba. Pri niveliranju z optičnimi nivelirji se uporabljajo nivelmanske late, ki imajo črtno centimetersko oz. polcentimetersko razdelbo. Oštevilčba si sledi na vsakem decimetru, ničelna točka razdelbe pa je peta late. Kot vidimo v sliki 11 obstajajo različne vrste lat.



Slika 11: Različne nivelmanske late (od leve proti desni: E razdelba, šahovnična razdelba, delno digitalizirana late, invar late z dvojno razdelbo, digitalna late s kodno razdelbo)

Pri latah z E razdelbo se lahko jasno razloči decimeter, poldecimeter in centimeter. Razdelba je največkrat v rdeči in črni barvi. Šahovnična razdelba se uporablja posebej pri svetlejših razmerah, kjer imajo bela polja veliko večji učinek kot rdeča oz. črna. Prednost delno digitaliziranih lat je v tem, da so dodatne črtice centimetersko označene, kar omogoča hitrejše odčitavanje. Za precizno niveliranje pa se izključno uporabljajo late, ki imajo za nosilec razdelbe uporabljen invar trak. Invar (FeNi36) je posebna kovina, ki je zelo temperaturno neobčutljiva in ima zelo majhen temperaturni razteznostni koeficijent, ki znaša približno $1 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$ ($\sim 1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$). Invar je zlitina iz 36 % niklja in 64 % jekla. Invar late z dvojno črtno razdelbo razpolaga z dvema razdelbama. Če se odčitek pridobi iz dveh razdelb se poveča natančnost in se izogne napakam pri odčitavanju.

Po razvoju sistemov za digitalno niveliranje pa late nimajo več črtno razdelbo, ampak kodno. Kodne late nimajo oštevilčene razdelbe, le ta je sestavljena iz binarne kode, ki jo predstavlja zaporedje svetlih in temnih polj različnih širin in različnih razmakov med njimi.

Kodiranje nivelmanske late in postopek izrednotenja sta pri vseh proizvalcih že iz samih patentno pravnih osnov popolnoma različna. Raziskave so pokazale, da mora vsak proizvajalec za postopek digitalnega niveliranja razviti posebno kodo, ki v območju od 1.5 m do 100 m omogoča jasno preslikavo slike kode, brez zapletenega sistema leč. Prav tako mora biti pri vseh proizvajalcih koda sestavljena tako, da se jo s CCD vrstičnim senzorjem preoblikuje v digitalno informacijo, to preslikovanje pa mora biti neobčutljivo na manjše motnje. Osnovni element razdelbe late je različen glede na proizvajalca oziroma na princip preslikave slike kodne late.

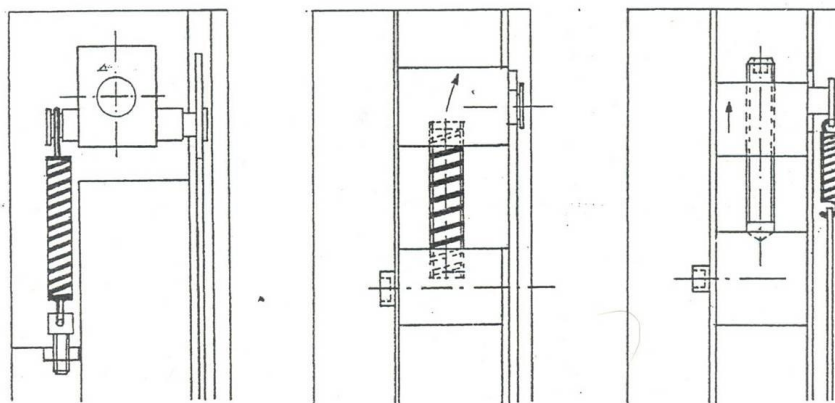
Praviloma sta na voljo dva tipa lat s črtno kodo. Tudi tu so kvalitetnejše late, kjer je koda zapisana na invar traku in z uporabo teh lat dosežemo veliko boljše rezultate niveliranja kot z uporabo lat, na katerih je črna koda nanešena na mediju iz steklenih vlaken.

Zgradba preciznih invar nivelmanskih lat (Slika 12):

- okvir oz. nosilec (novejši so iz aluminija, včasih pa so bili leseni)
- kovinski ploščici na obeh koncih okvirja (zgoraj zaščita, spodaj peta late, ki definira začetek razdelbe na lati – ničla razdelbe)
- po sredini okvirja je žleb
- v žlebu je na spodnji strani togo, na zgornji strani pa preko vzmeti napet (100 N) invar trak (širina je med 20-40 mm, debelina 1 mm); tak način vpetja kompenzira vpliv spremembe dolžine okvirja na invar trak (Slika 13)
- dozna libela, ki omogoča vertikalno postavljanje late



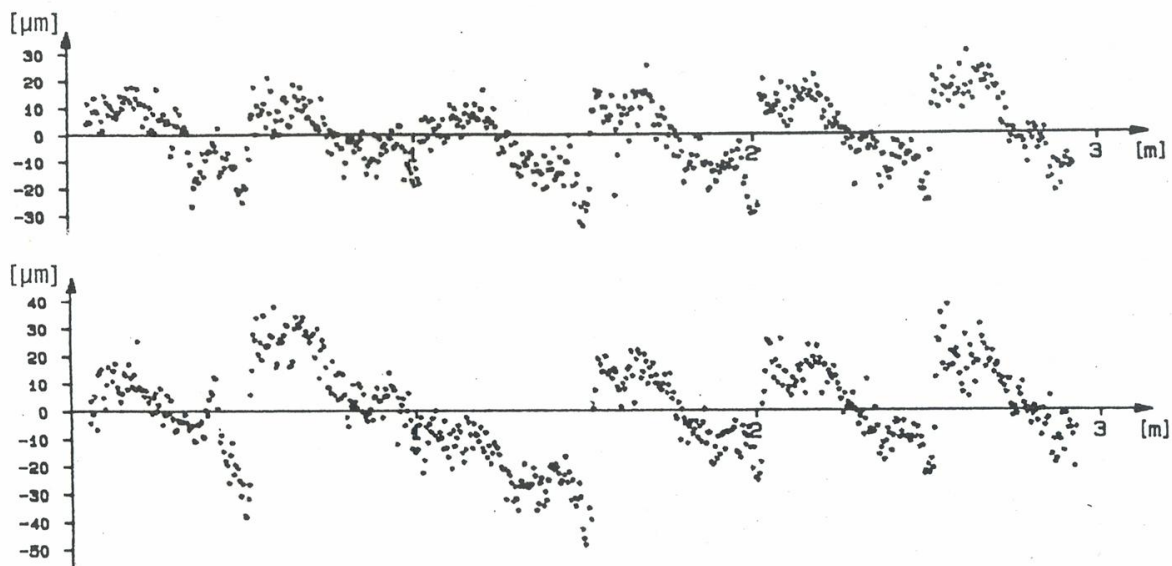
Slika 12: Zgradba preciznih invar nivelmanskih lat



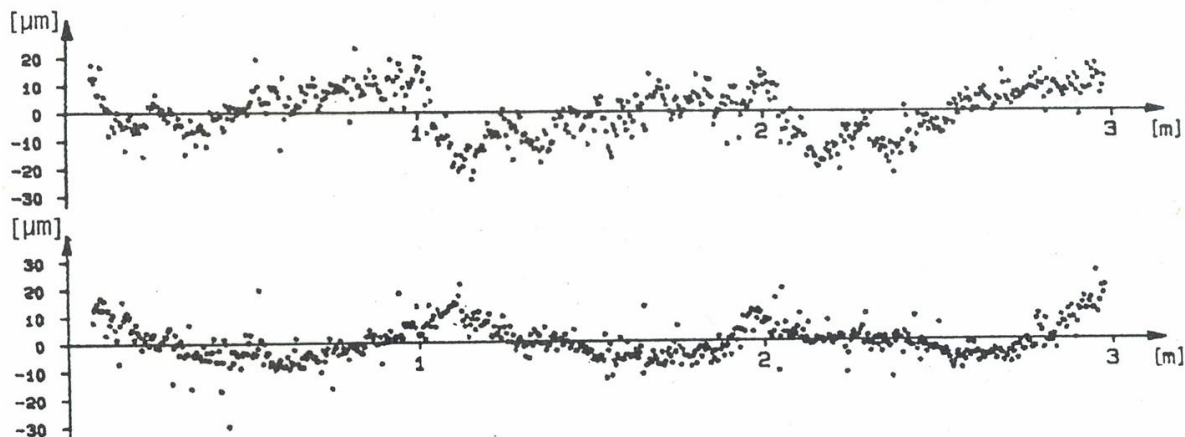
Slika 13: Vpetje invar traku precizne late; levo - napetostna vzmet (indirektni prenos sile),
sredina - kompresijska vzmet, desno - napetostna vzmet

Poznane so tri metode nanašanja razdelbe na invar trak:

- "spray" metoda (barvanje preko šablon)
- graviranje
- graviranje s pomočjo laserja (interferometričen način)



Grafikon 1: Spray metoda (Nedo - do leta 1990)



Grafikon 2: Metoda graviranja (Kern)



Grafikon 3: Interferometrična metoda graviranja (Nedo od leta 1990)








Slika 14: Profil razdelbe dobljene z interferometrično metodo graviranja

Po nanosu razdelbe na invar trak je le ta premazana s prozornim zaščitnim lakom. Raziskave so pokazale, da debel zaščitni lak s katerim je premazana razdelba ovira rezultate. Zaščitni lak povzroči dodaten razpršeni odboj, zaradi katerega robovi črtic niso več tako ostro vidni.

2.4.1 Oblike kodnih razdelb

2.4.1.1 Leica

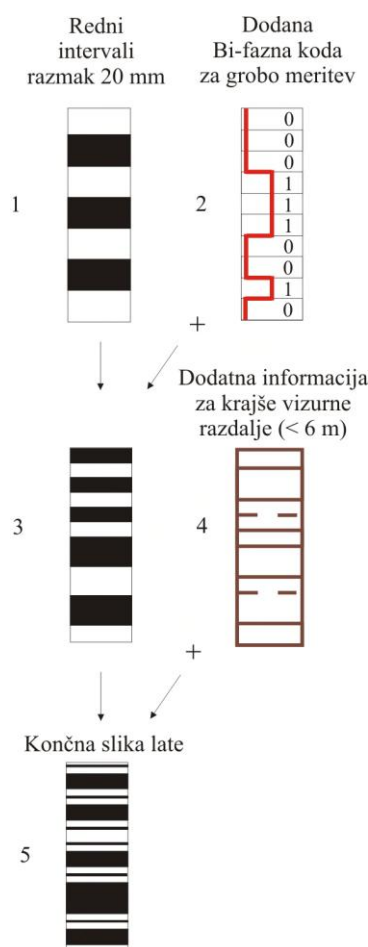
Koda Leicinih lat je sestavljena iz črno-belih (rumenih) elementov (Slika 15). Kodiranje na dolžini late 4050 mm vsebuje največ 2000 kodnih elementov. Iz tega lahko izpeljemo, da je osnovni element razdelbe širok $4050/2000 = 2.025$ mm, vsi kodni elementi pa so izraženi z večkratnikom osnovnega elementa. Kodno zaporedje sestoji iz zaporedja naravnih števil. Največji nastopajoči mnogokratnik je 15, torej je širina te kode 30.75 mm. S to lastnostjo "navidezne slučajnosti" so dosegli, da je sorazmerno kratko kodno zaporedje enkratno in se ne ponavlja. Izvrednotenje kode late poteka s pomočjo korelacijske metode, kot vzorec kode pa je izbrana neperiodična psevdostohastična koda. Ta koda vsebuje posebne lastnosti, ki omogočajo uporabo Leicinega korelacijskega postopka v območju od 1.8 m do 100 m. Pri razdalji 15 m je slika najmanjšega elementa velika približno 1 piksel. Pri razdaljah večjih od 60 m pa manjši elementi niso več zaznavni in se izgubijo. To se upošteva pri vsakokratnem izračunu referenčnega signala.

Širina (mm)	Slika late	Kodno zaporedje
2.025		1
2.025		1
8.100		4
4.050		2
2.025		1

Slika 15: Princip Leicinega kodiranja late

2.4.1.2 Zeiss

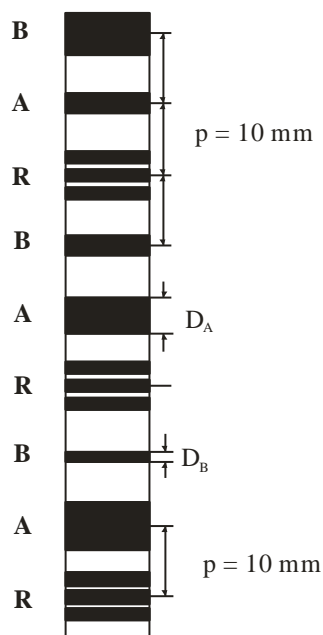
Zeissova koda temelji na osnovnem intervalu velikosti 2 cm (= 1 bit) in je sestavljena tako, da se že iz 30 cm velikega odseka late lahko določi jasen položaj merske slike (Slika 16-1). Največja dolžina late je tako 4 m. Osnovni intervali so podani na podlagi t.i. Bi-fazne kode (Slika 16-2). Bi-fazna koda temelji na tem, da po vsakem bitu nastopi sprememba svetlosti, tako da se lahko vsak bit kode uporabi kot merski interval. Enojni in ničelni biti se razlikujejo tako, da imajo ničelni biti v sredini intervala dodatno svetlo-temno menjavo, ki mora biti prepoznavna tudi na večjih razdaljah. Ta dodatna informacija služi za določevanje intervala in je primerljiva z oštevilčbo običajne nivelmanske late. Vendarle pa te informacije (Slika 16-3) ne zadoščajo za razdalje krajše od 6 m. Za enolično določitev zaporedja je nastalo premalo intervalov. Zato so bile dodane še ožje kodne črtice (1-2 mm), da bi bile tudi bližnje meritve jasno in zanesljivo določene (Slika 16-4).



Slika 16: Potek kodiranja Zeissove late

2.4.1.3 Topcon

Kodiranje Topconovih lat sestoji iz treh osnovnih elementov, iz A , B in R elementa (Slika 17). Kodni elementi so razporejeni ciklično s fiksnim razmakom $p = 10$ mm, v zaporedju $R(0)$, $A(0)$, $B(0)$, $R(1)$, $A(1)$, $B(1)$ itd.

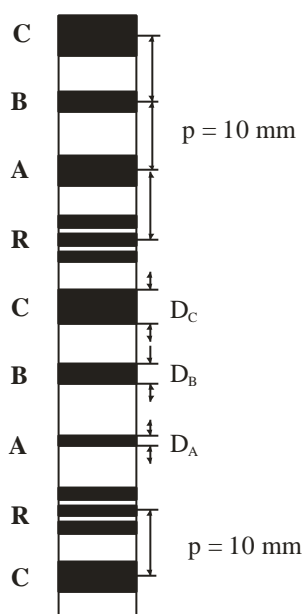


Slika 17: Topconovo kodiranje late

Referenčni vzorec R je v vseh elementih $R(i)$ identičen in sestavljen iz treh 2 mm širokih črnih črtic. Razmak med temi črticami je 1 mm. $R(i)$ je tako skupaj širok 8 mm. Širina črtic D elementov A in B ustreza amplitudam dveh sinusnih funkcij z rahlo različnimi valovnimi dolžinami.

Prečne širine teoretično varirajo med 0 in 10 mm, vendar je najmanjša širina črtice 1 mm. Vzorec ene kode se ponovi po 60 cm (valovna dolžina $A - \lambda_A$) oz. 57 cm (valovna dolžina $B - \lambda_B$). Celotni vzorec pa se prvič ponovi šele po 11.40 m (1140 je za 57 in 60 najmanjši skupni mnogokratnik). Zaradi zagotovitve jasnosti, posebej na začetku late, sta oba signala prestavljena še s faznim premikom $\pi/2$, tako da znotraj 4 m merskega območja vedno obstaja jasna fazna razlika obeh signalov A in B .

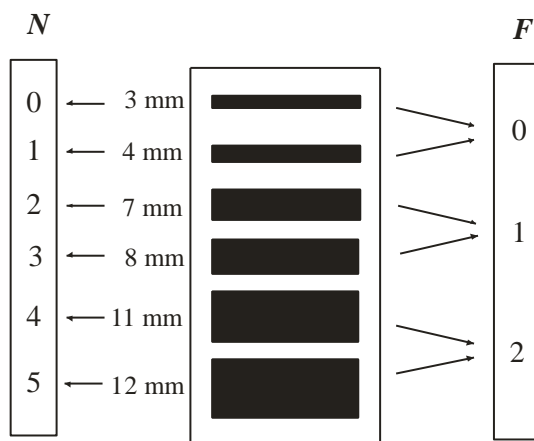
Leta 1999 je Topcon z DL-103 AF predstavil prvi digitalni nivelir z avtomatskim fokusiranjem. Takrat pa je predstavil tudi novo kodiranje lat za vse Topconove instrumente (Slika 18). Osnovni princip in geometrična razmerja sta ostala nespremenjena. Dodana je bila zgolj tretja groba frekvenca C . Tako je sedaj kodno zaporedje $R(0)$, $A(0)$, $B(0)$, $C(0)$, $R(1)$, $A(1)$, $B(1)$, $C(1)$, itd. Nove valovne dolžine se glasijo 280 mm (λ_A), 240 mm (λ_B) in 200 mm (λ_C). Po navedbi proizvajalca se lahko zaradi nove kode uporabljajo tudi 5 m dolge late (Deumlich, Staiger, 2002).



Slika 18: Novo Topconovo kodiranje

2.4.1.4 Sokkia

Proizvajalec Sokkia je kodiranje poimenoval kot Slučajna dvosmerna koda (Random Bidirectional Code - RAB). Podobno kot pri Topconu je uporabljen konstantni osnovni interval p . Razmak med središči dveh sosednjih temnih elementov znaša točno 16 mm. Razdalja dveh poljubnih srednjih položajev je vedno večkratnik osnovnega intervala p . Kodiranje za grobo meritev uporablja le šest različnih širin: 3, 4, 7, 8, 11 in 12 mm (Slika 19). Kodno zaporedje je, podobno kot pri Leici, izbrano tako, da je že kratko zaporedje od 5 do 6 elementov edinstveno in se ne ponovi.

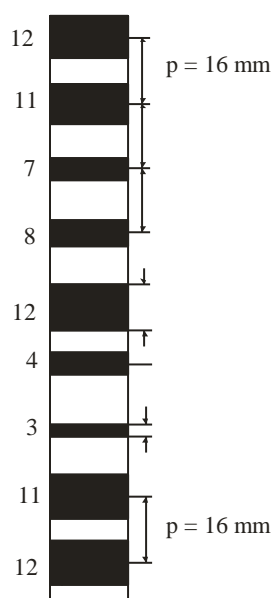


Slika 19: Interpretacija kodne late proizvajalca Sokkia

Posebnost pri Sokkiinem kodiranju je v tem, da sta bili uporabljeni dve različni strategiji izvednotenja:

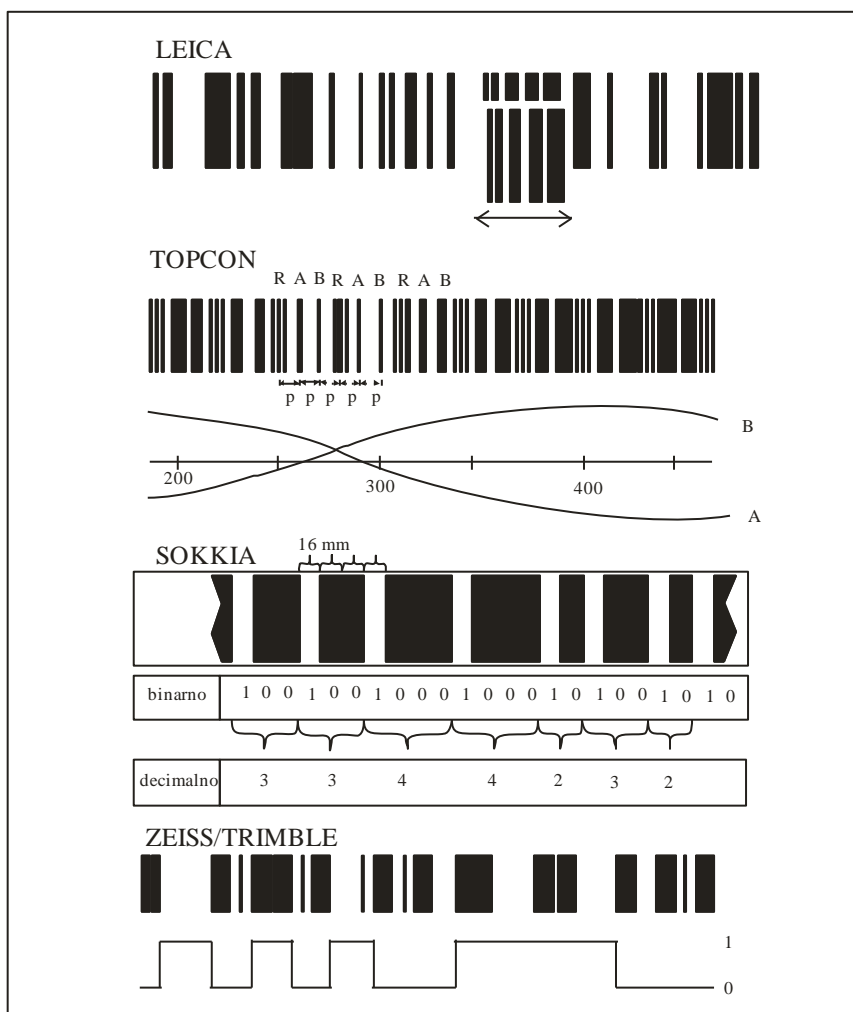
- Za bližnja območja:
Pri krajših razdaljah je na CCD senzor preslikanih manj kodnih elementov. Različne širine elementov (3, 4, 7, 8, 11 ali 12 mm) se, preko programske opreme za obdelavo slike, da jasno identificirati (Slika 19).
- Za oddaljena območja:
Pri večjih razdaljah senzorika ne more več jasno razlikovati širin sosednjih črtic (širine 3 ali 4 mm, 7 ali 8 mm oz. 11 ali 12 mm). Zato v tem primeru programska oprema za izvednotenje na sosednja elementa gleda kot, da sta enakih širin, nakar se število različnih elementov razdeli na tri (Slika 19).

Kodno zaporedje je bilo izbrano tako, da je za oba primera predloženo edinstveno kodno zaporedje, ki omogoča jasno določitev pripadnosti merskega intervala preko 10 m dolgega območja late (Slika 20). Za enolično določitev pripadnosti teoretično zadošča že 4 oz. 6 kodnih elementov. Sicer pa, zaradi avtomatskega zaznavanja orientiranosti late, izpade več kot 50 % uporabnih kombinacij. Torej je 5 oz. 8 kodnih elementov predpostavka za jasno določitev pripadnosti. Potreben odsek late je s ca. 9 cm (bližnja območja) oz. 13 cm izredno majhen. Pri tem pa ne sme biti zakrit noben segment kode (Deumlich, Staiger, 2002).



Slika 20: Sokkiin način kodiranja

2.4.1.5 Slikovna primerjava različnih oblik kodnih razdelb



Slika 21: Različne oblike kodnih razdelb

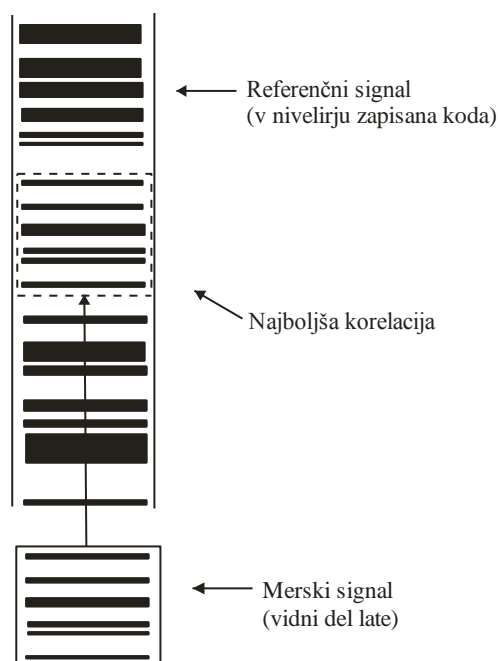
2.5 Različni postopki izvedenja pri digitalnih nivelirjih

Pri današnjih digitalnih nivelirjih imamo tri različne postopke digitalnega izvedenja slik:

- korelacijski postopek (Leica (Wild) NA 2002/3003/DNA 03)
- postopek merskega položaja – geometrični postopek (Trimble/Zeiss DiNi 10/20)
- postopek frekvenčne analize (Topcon DL 101/102)
- postopek merskega položaja (Sokkia)

2.5.1 Leica

Pri vseh Leicinih inštrumentih je iz vrednotenje zasnovano na principu korelacije. Instrument pozna celotno kodno zaporedje, ki je v elektronski obliki shranjeno v njegovem pomnilniku (referenčni signal). Nivelir računsko primerja dobljeni merski signal (vidni del late) z referenčnim signalom. Pri uporabi postopka korelacije v digitalnem nivelirju, gre za določanje obeh neznanih parametrov, višine in merila. Leica imenuje ta postopek optimiranje. Ugotovlja najboljše možno ujemanje oz. sovpadanje merskega in referenčnega signala, tako da sliko vidnega dela late za osnovno enoto razdelbe late premika ob shranjeni sliki celotne razdelbe (Slika 22). Višinsko razliko med inštrumentom in lato predstavlja premik slike late, medtem ko se merilo preslikave spreminja z razdaljo do late.



Slika 22: Ugotavljanje najboljše povezave merskega in referenčnega signala

2.5.2 Zeiss

Iz vrednotenje Zeissovih digitalnih nivelirjev DiNi 10/20 deluje na principu enointervalne meritve in bazira na nizu žarkov. Lata je razdeljena na 2 cm intervale, ki predstavljajo osnovni element kodne meritve na vsaki merski razdalji. V intervalih so tudi nadaljnje svetlo-temne kodne informacije. Ta postopek se odlikuje predvsem z lastnostjo, da preko območja od 1.5 m

do 100 m lahko merimo z minimalnim in konstantnim poljem slike, ki znaša 30 cm. V tem območju pa ne sme biti prekrita nobena informacija. DiNi torej vse posamezne merske vrednosti določi iz 30 cm velikega odseka razdelbe late, ki leži simetrično ob vizurni liniji. Večji kot 30 cm dolg odsek late je sicer informativno vzet, vendar pa ni primeren za pridobivanje merskih vrednosti.

2.5.3 Topcon

Pri digitalnih nivelirjih proizvajalca Topcon je pri analizi signala s pomočjo hitre Fourierjeve transformacije (Fast Fourier Transformation - FFT) merski signal razdeljen v skupno tri frekvenčne komponente, ki se nanašajo na poznano osnovno širino $p = 10$ mm. Z večanjem razdalje do late se večajo tudi nastopajoče frekvence. Vizurna razdalja se izračuna na osnovi goriščne razdalje, poznane osnovne širine 10 mm in širine slike elementa p na CCD senzorju. Poleg frekvenc Fourierjeva analiza podaja tudi fazne položaje Φ_A in Φ_B . Iz tega sledi prvo grobo odčitavanje. Za precizno odčitavanje pa so bile, glede na razdaljo, postavljene različne tehnike. Pri večjih razdaljah je določen fazni položaj Φ_m m -tega piksla, ki predstavlja horizontalno vizurno linijo. Tako je lahko znotraj intervala p interpoliran položaj slikovnih točk. Pri krajših razdaljah je na vrstično kamero preslikanih manj kodnih elementov, zato frekvenčna analiza postane negotova. Vendar so posamezni kodni elementi preslikani ostro in kontrastno. Z metodami zaznavanja robov so posamično določene širine kodnih elementov. Iz širin signalov A in B je mogoče direktno izračunati fazna položaja Φ_A in Φ_B . Iz njiju se dokončno določi grobi odčitek. Precizni odčitek prav tako izhaja iz zaznavanja posameznih robov, kjer je položaj m -tega piksla interpoliran v pripadajočem intervalu p (Deumlich, Staiger, 2002).

2.5.4 Sokkia

Sokkia SDL 30 sicer ne spada ravno k preciznim nivelirjem, vendar ga je potrebno na tem mestu navesti kot predstavnika najnovejše tehnologije digitalnih nivelirjev. Kot tudi pri Trimble/Zeissovem postopku razdalja pri določanju odčitka ne igra nobene vloge. Izvrednoteje poteka podobno kot pri Zeissovem in Topconovem postopku. Merilo preslikave in razdalja izhajata iz poznanega osnovnega razmaka p in njegove velikosti v sliki p' . Gostota

črtic služi grobem kodiranju. V okviru precizne meritve velja, da piksel, ki predstavlja elektronski črtni križ, natančno dodeli pripadnost intervala (Deumlich, Staiger, 2002). Izčrpne raziskave na Inštitutu za geodezijo in fotogrametrijo Švicarske tehnične šole iz Züricha (ETH Zürich) so pokazale, da ta metoda pri minimalnem odseku late (9 cm) in pri razdalji 50 m še neoporečno izpelje odčitek ali pa prikaže poročilo o napaki.

3 KONTROLA NATANČNOSTI OPREME ZA NIVELIRANJE

Kontrolo kvalitete opreme niveliranja obsegajo testiranja, pregledi in kompariranje oz. kalibracija.

3.1 Kompariranje oz. kalibriranje opreme za niveliranje

S kompariranjem se ugotavlja oz. primerja enakost, podobnost ali različnost med dvema ali več lastnostmi, značilnostmi (nominalna vrednost – izmerjena vrednost komparatorja). Komparacija opreme za niveliranje je postopek določitve najpomembnejših elementov, ki nam definirajo natančnost konstrukcije nivelmanske late ali sistema za digitalno niveliranje. Zagotavlja nam, da bodo meritve s to opremo dosegale zahtevano natančnost preciznega nivelmana. S kompariranjem ugotavljamo ali oprema za niveliranje zagotavlja nominalno vrednost in kako v času orhanja dimenzije oz. funkcionalnost, določi pa se tudi popravke, ki so osnova za korekcijo meritev. Izvede se jo s posebnimi avtomatsko delujočimi komparatorji. Testiranje preciznih nivelmanskih lat, zlasti njihovega merila razdelbe, je bila že od nekdanj naloge, ki se jo je posebej skrbno izvajalo. Predvsem naloge inženirske geodezije pri gradnji objektov ter natančne raziskave na področju premikov tal in objektov, bodo še dolgo zahtevale uporabo preciznega geometričnega nivelmana, kljub uveljavitvi sodobnih metod avtomatskega merjenja (GNSS – Globalni navigacijski satelitski sistemi). Le komparirana oprema za niveliranje pa izpolnjuje visoke zahteve po natančnosti preciznega nivelmana.

Dolgo časa je bil prioriteten cilj kompariranja le določitev sistematičnih pogreškov, ki so uporabnike opozarjali na nepravilnosti razdelbe late. Najprej je bila črtna razdelba analognih nivelmanskih lat primerjana s pravim metrom, to pa se je izvajalo z optičnimi metodami na komparatorjih, ki so imeli posebna dolžinska merila ali etalone. V začetku 70. let pa je profesor Harald Schlemmer z revolucionarnim razvojem lasersko interferenčnega komparatorja dovršil kalibracijski postopek za precizne nivelmanske late, ki je prvič ponudil možnost avtomatskega določanja popravkov posameznih črtic razdelbe late z merilno

negotovostjo 7 μm (mikrometer = 1/1 000 000 metra). Te popravke pa se je upoštevalo pri določitvi dokončnih rezultatov meritev.

Kalibracija je postopek, s katerim se pod določenimi pogoji ugotavlja povezave med vrednostmi, ki jih kaže merilni instrument ali merilni sistem (nivelmanska lata, sistem za digitalno niveliranje) in pripadajočimi vrednostmi, realiziranimi z dolžinskimi normalami (komparator). Preverja se torej točnost opreme za niveliranje.

Čez čas je nemški proizvajalec Nedo (skupaj s prof. H. Schlemmerjem) izboljšal izdelavo preciznih razdelb, kjer se je postopek testiranja prenesel že na sam postopek izdelave (glej poglavje 2.4). Nedo je danes edini proizvajalec preciznih nivelmanskih lat na svetu. Z uvedbo digitalnih nivelirjev so nastali tudi novi postopki testiranja, ki so upoštevali novosti sistemov za digitalno niveliranje. Pri teh zapletenih sistemih, ki so sestavljeni iz številnih senzorjev in ustrezno programske opreme, je uporabniku pravi način delovanja vedno bolj nedostopen. To nepoznavanje in zapletenost teh sistemov pa prispevata k nesigurnosti v rezultate meritev, čeprav je ta digitalna oprema zelo natančno izdelana.

Čeprav so se razvile različne kalibracijske metode in naprave, se še vedno pojavljajo nezaželjene sistematične napake (njihov vpliv se spreminja s kalibracijsko dolžino), ki lahko pokvarijo kalibracijske rezultate. Načelno obstajata dva kalibracijska postopka in sicer kalibracija razdelbe late in sistemska kalibracija. Kot že samo ime pove se postopek kalibracije razdelbe late uporablja za testiranje razdelbe late, sistemska kalibracija pa se uporablja za testiranje sistemov za digitalno niveliranje (digitalnih nivelirjev in kodnih lat). Tukaj pa se postavlja osnovno vprašanje, kateri od dveh postopkov kalibracije ima prednost.

Običajno se komparira le precizne invar nivelmanske late. Danes se s kompariranjem lahko ugotavlja merilo razdelbe late oz. sistema za digitalno niveliranje, popravek prve črtice razdelbe, temperaturni razteznostni koeficient, natezno napetost invar traku in natančnost pete late glede na uravnano in pravokotno na stojiščno os nivelmanske late. Na osnovi teh parametrov se s pomočjo določenih popravkov korigira merske vrednosti. Z večjim številom meritev pa se lahko tudi oceni natančnost.

Končni rezultat kompariranja oz. kalibriranja opreme za niveliranje je Poročilo o kalibraciji, ki vsebuje vse pomembne podatke o meritvah ter končne rezultate v številčni in tudi grafični obliki (s potekom regresijske premice). Iz grafa je mogoče ugotoviti prisotnost slučajnih ali grobih pogreškov razdelbe late oz. sistema za digitalno niveliranje.

Aktualne raziskave krožnih kontrol kakovosti kalibracijskih postopkov in naprav so pokazale, da se lahko danes odstopanja posameznih črtic oz. kodnih elementov od njihovih pravih položajev določa z nekaj μm natančnostjo. Negotovost izpeljanega povprečnega metra late pa znaša ca. 1-2 ppm (ppm - oznaka za milioninko nečesa). Obe meri točnosti popolnoma zadoščata za precizno določanje višin (Staiger, Witte, 2005).

3.2 Pregled preciznih invar kodnih nivelmanskih lat

Omejil sem se le na late s kodno razdelbo, ker se danes običajne late s črtno razdelbo uporabljajo le še poredkoma, poleg tega pa se tu navedene trditve lahko brez težav prenesejo tudi na običajne late.

3.2.1 Kvalitativni pregled

Znano je, da se pri uporabi instrumentov in lat pojavijo znaki obrabe, npr. poškodbe posameznih kodnih črtic ali pa umazanija na razdelbi. Poškodovani kodni elementi kot tudi slabo očiščene razdelbe vodijo k sistematičnim napakam pri določitvi višinskih vrednosti. Zato se lato pred vsako uporabo natančno pregleda, da se izloči take vrste virov napak. V nobenem primeru pa se ne sme popravljati poškodovanih in obrabljenih kodnih elementov, ker se njihova točnost pokaže le s sistemsko kalibracijo in le take vrste "začasnih poprav" vodijo k pravih določitvam višinskih vrednosti. V primeru, da je tak kalibracijski postopek predrag ali pa ni na razpolago, je potrebno zamenjati invar trak na kateremu je nanešena razdelba. To nalogo lahko izvajajo servisne službe proizvajalcev opreme ali kalibracijski inštituti. Ne le kodna razdelba, ampak tudi okvir late je lahko vzrok napak, kot je npr. umazanija v žlebu, zaradi katerega lahko pride do zvijanja invar traku. Trak zato nima več takšne napetosti kot jo je določil proizvajalec in to vodi k napačnim rezultatom meritev

(napačno merilo razdelbe late). Za odpravo teh vrst vplivov napak zadošča že čiščenje late na servisnih oddelkih, po katerem pa mora biti napetost traku ponovno točno nastavljena (Staiger, Witte, 2005).

Preglednica 2: Najpomembnejše poškodbe lat in njihovi vplivi

Poškodbe	Vplivi na lato	Vplivi na kalibracijske rezultate
Vdrtine na okvirju late	Trak late ne poteka več prosto in naravnost	Večje spremembe merila late po poškodbah Regresijska premica ni več linearna
Sprijetost traku in okvirja late	Trak late ne poteka več prosto, vzmetni mehanizem odpove	Razteznostni koeficient ni več linearen Napačni popravki posameznih črtic
Nezadostno napet invar trak late	Naguban trak late	Merilo razdelbe late tudi na kratka časovna obdobja ni konstantno Lokalno popačenje popravka črtice
Barvne razpoke na elementih razdelbe, praske	Robovi črtic so pretrgani	Nemogoča ali nezanesljiva navedba popravkov posameznih črtic Vplivi na merilo razdelbe late
Zabrisanost na razdelbi	Robovi črtic niso jasno vidni	Nemogoča ali nezanesljiva navedba popravkov posameznih črtic Vplivi na merilo razdelbe late
Razpadajoča ali poškodovana površina nastavka	Površina nastavka ni več ravna oz. pravokotna na os razdelbe	Nezanesljiva navedba napake ničelne točke

3.2.2 Kvantitativni pregled

Po standardu Nemškega inštituta za standardizacijo DIN 18717 velja:

- peta late in razdelba na invar traku morata biti pod pravim kotom ($\pm 5'$)
- kovinska ploščica pete late mora biti ravna (± 0.02 mm)
- napaka prve črtice razdelbe late ne sme biti večja kot 0.05 mm
- dopustno odstopanje za vsak poljuben odčitek na lati je $\Delta l = \pm (0.02 \text{ mm} + 2l \cdot 10^{-5})$, kjer je Δl dopustno odstopanje v milimetrih, l pa je dolžina nivelmanske late v milimetrih
- temperaturni razteznostni koeficient α_L precizne invar late mora biti manjši kot $1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$

Ti predpisi se morajo v kalibracijskih laboratorijih pregledovati v rednih časovnih razmakih ali pred vsako večjo izmero.

Stanje dozne libele se mora med meritvami redno kontrolirati, ker neuravnana dozna libela pomeni, da lata ni pravokotna na vizuro, to pa vodi k sistematičnim odstopanjem.

Testiranje merila razdelbe late je tu najbolj pomembno, ker odstopanja merila razdelbe late vodijo k sistematično pogrešenim rezultatom, predvsem ko se obravnavajo večje višinske razlike.

3.3 Priporočila za redno pregledovanje preciznih invar kodnih nivelmanskih lat

Precizne invar kodne nivelmanske late predstavljajo kvalitetne produkte za določanje višinskih vrednosti. Kalibracija zaradi povečanja natančnosti danes skoraj ni potrebna oz. smiselna. Kljub temu pa je zaradi kvalitativne kontrole potrebno celotno mersko opremo in še posebej nivelmanske late redno pregledovati in kalibrirati.

Priporočljivo je, da imajo od proizvajalca dobavljene late kalibracijski certifikat, s čimer imamo dokumentirano stanje v času dobave (morebitne nepravilnosti poznamo že pred prvo praktično uporabo). Tu je navedba razteznostnega koeficienta invar traku nujna le, ko so za meritve predvideni temperaturni popravki. Pri novih latak kalibracija ni potrebna. Nivelmanske late, ki se nahajajo v uporabi pa je potrebno redno pregledovati. Najmanj enkrat letno bi se v kalibracijskih laboratorijih morale pregledati late in določiti merilo razdelbe late, ker se konstanto napetosti traku ne more zagotoviti za daljše časovno obdobje. Druge morebitne vplive (uravnava dozne libele, nagnjenost late,...) pa mora uporabnik na terenu kontrolirati sam. Če so komparirane v pooblaščenih laboratorijih, dobijo tudi te late kalibracijski certifikat, s čimer pa se jim poveča cena in možnost za delo.

3.4 Priporočila za uporabo preciznih invar kodnih nivelmanskih lat

Precizne invar nivelmanske late so občutljivo mersko orodje, ki zahtevajo skrbno ravnanje. Očitno to ni samoumevno, drugače inštitucije za kalibracijo ne bi soglasno poročale o nivelmanskih latah, ki imajo ukrivljen okvir ali umazano in popraskano razdelbo.

Načeloma se nivelmanske late pospravlja v posebne skrinje (Slika 23), ki so namenjene vzdrževanju in transportu. Skrinje se pri transportu vedno skrbno postavlja na vrh opreme. Pomembno je tudi redno in skrbno čiščenje razdelbe late.



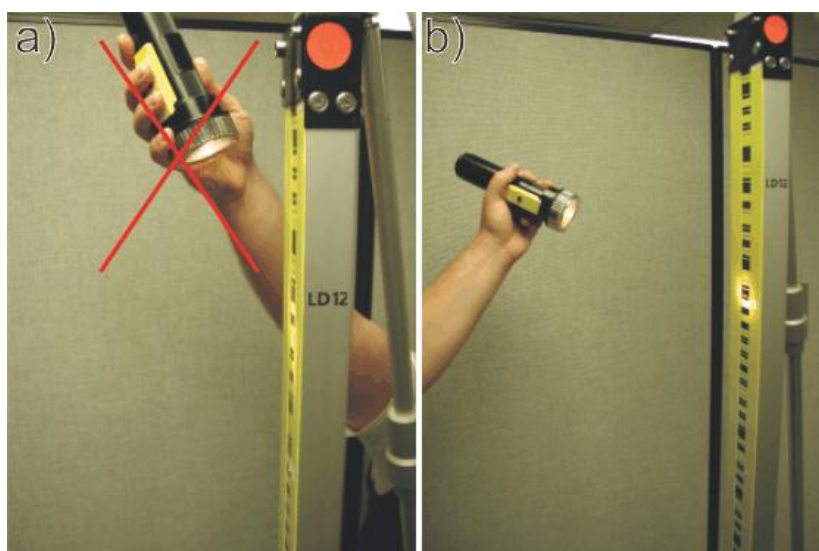
Slika 23: Skrinja za precizno nivelmansko lato

Kalibracijski rezultati so dragoceni in pomembni, ker vodijo h konkretnim priporočilom za vsakodnevno mersko prakso:

- Izbira vizurne razdalje (ciklične višinske napake, glej poglavje 5.2.1.4).
- Razdelba late se zaradi prask in umazanije redno pregleduje. Vplivi umazanije ali prask lahko vodijo k večjim odstopanjem posameznega višinskega odčitka, tako da lata ni več primerna za precizne meritve.
- Vizira se vedno na sredino razdelbe.
- Vedno se natančno fokusira (glej poglavje 5.2.1.5).
- Potrebno se je izogibati oviram, ki so na vizurni liniji. Algoritem za iz vrednotenje zazna prekritje dela razdelbe in ta območja izloči iz nadaljnje obdelave. V najslabšem primeru lahko nastanejo (podobno kot pri umazanih latah) večja odstopanja in zato se je oviram, pri preciznih meritvah, potrebno izogibati.
- Izogibati se je potrebno meritvam na končnih območjih late (glej poglavje 5.2.1.3).
- Osvetlitev (Slika 24): Pri meritvah po temi ali v jamah (rudnikih) je potrebna umetna osvetlitev. Odkrita so bila sistematična višinska odstopanja zaradi enostranske poševne

(pod ostrim kotom) osvetlitve late s halogensko svetilko. To lahko razloži efekt senčenja kodnega elementa. Med proizvodnim procesom je celotna razdelba najprej prekrita s črnim slojem in potem z rumenim slojem. Zgornji rumeni sloj se odstrani z laserjem, zato da postane črna barva vidna. Zaradi tega procesa imajo kodni elementi določeno nekaj mikrometersko debelino (Slika 14). Rešitev za ta problem bi lahko predstavljala samoosvetljuječa lata.

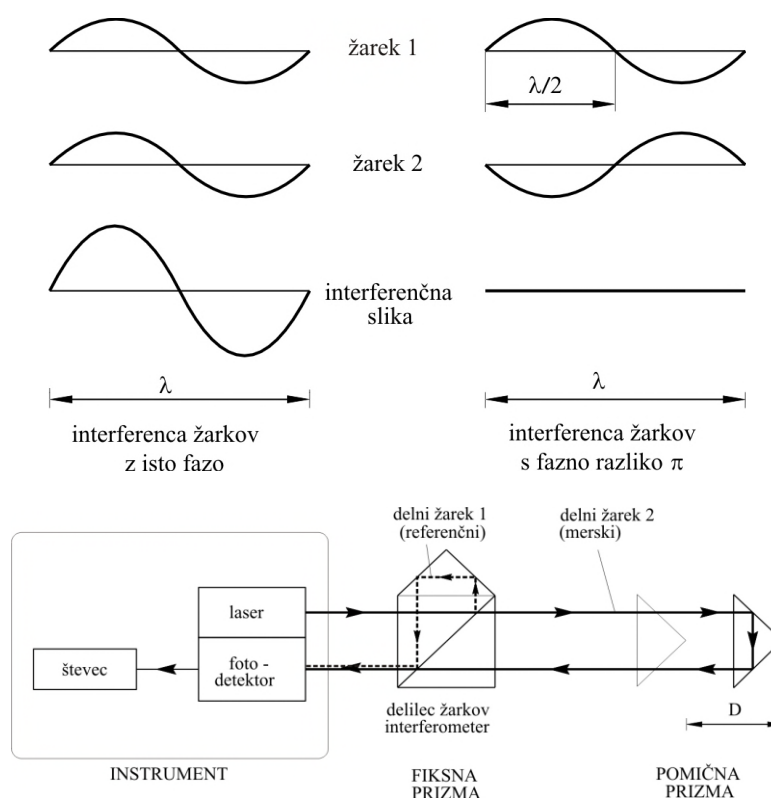
- Sistemska programska oprema mora upoštevati najnovejše ugotovitve. Naprimer pri verziji programa V. 3.40 (Trimble) je dodatno omogočen nadzor maksimalne višine vizure in simetrije uporabljenega odseka late. Trimble priporoča nadgradnjo programske opreme za razgibane terene in za meritve največje natančnosti (meritve v industriji).



Slika 24: Osvetlitev late: a) z osvetlitvijo pod takim kotom bomo dobili napačne odčitke;
b) takšna osvetlitev ne povzroči napačnih odčitkov

4 LASERSKO INTERFERENČNI KOMPATORJI

Najnatančnejši način kompariranja preciznih invar nivelmanskih lat je z lasersko interferenčnim komparatorjem, ki vsebuje interferenčni razdaljemer (ponavadi so dvofrekvenčni) in sistem za avtomatsko zajemanje posameznih elementov (črtic) razdelbe late. Interferenčni razdaljemer deluje na principu interference svetlobnega valovanja. Interferenca je pojav, ki nastane z združevanjem dveh ali več valovanj enake frekvence. Laserski žarek se v posebni prizmi razdeli na dva dela, na merski in referenčni del. Po odboju merskega žarka se oba zopet združita, nakar pride do interference (Slika 25).



Slika 25: Delovanje interferenčnega razdaljemera

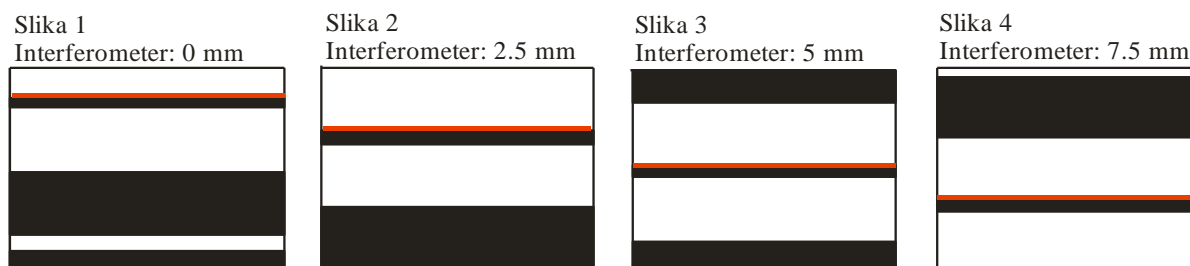
Ločljivost merjenja dolžin, ki jih tu dobimo je $\lambda/4$ laserskega žarka. Uporabljeni laserji so običajno v rdečem delu vidnega spektra. Laserski žarek razdaljemera in os invar traku nivelmanske late morata ležati v ravnini. Dosegljiva natančnost se giblje okoli $1 \mu\text{m}$, kar je izredna natančnost in je več kot zadovoljiva za kompariranje nivelmanskih lat (Vodopivec, 1997).

Danes poznamo komparatorje, ki se delijo glede na lego postavitve late, ta je lahko horizontalna ali vertikalna. Torej obstajajo horizontalni in vertikalni komparatorji. Pri horizontalnih komparatorjih mora biti razporeditev podstavka ali merskih sani, na katere je položena nivelmanska lata takšna, da se minimalizira sicer neizbežno upogibanje late. Komparatorji pa se delijo tudi glede na način kalibriranja nivelmanskih lat. Nekateri omogočajo kalibracijo razdelbe nivelmanske late, drugi sistemsko kalibracijo, obstajajo pa tudi komparatorji, ki dovoljujejo oba načina kalibriranja. Komparatorji morajo omogočati kalibracijo precizne nivelmanske late preko njene celotne dolžine (maksimalno 3 m). Običajno se komparatorji nahajajo v klimatiziranih sobah, kjer se lahko natančno uravnava temperaturo in vlažnost zraka. Meteorološki senzori služijo za določitev parametrov za popravo merskih vrednosti laserskega interferometra. Ti parametri so temperatura zraka, zračni tlak in vlažnost zraka. Pri kalibracijskih meritvah je potrebna homogena osvetlitev late, ki jo zagotavljajo posebne svetilke (ponavadi halogenske).

4.1 Komparatorji za kalibriranje razdelbe late

Komparatorji za kalibriranje razdelbe late (horizontalni ali vertikalni) imajo premične sanke (ali nosilec), ki preko posebnega mehanizma premikajo nivelmansko lato ali napravo za zajemanje črtic razdelbe late. Če se premika nivelmanska lata, je fiksna naprava za zajemanje črtic in obratno. Zajem črtic se je v preteklosti izvajal s fotoelektričnim mikroskopom. Zaradi zastarelosti teh mikroskopov in zaradi razvoja CCD tehnologije pa so te mikroskope zamenjale visoko ločljive CCD kamere. Prvi sistem s CCD kamero je prišel v uporabo leta 1995 na Inštitutu za geodezijo in fotogrametrijo na ETH Zürich.

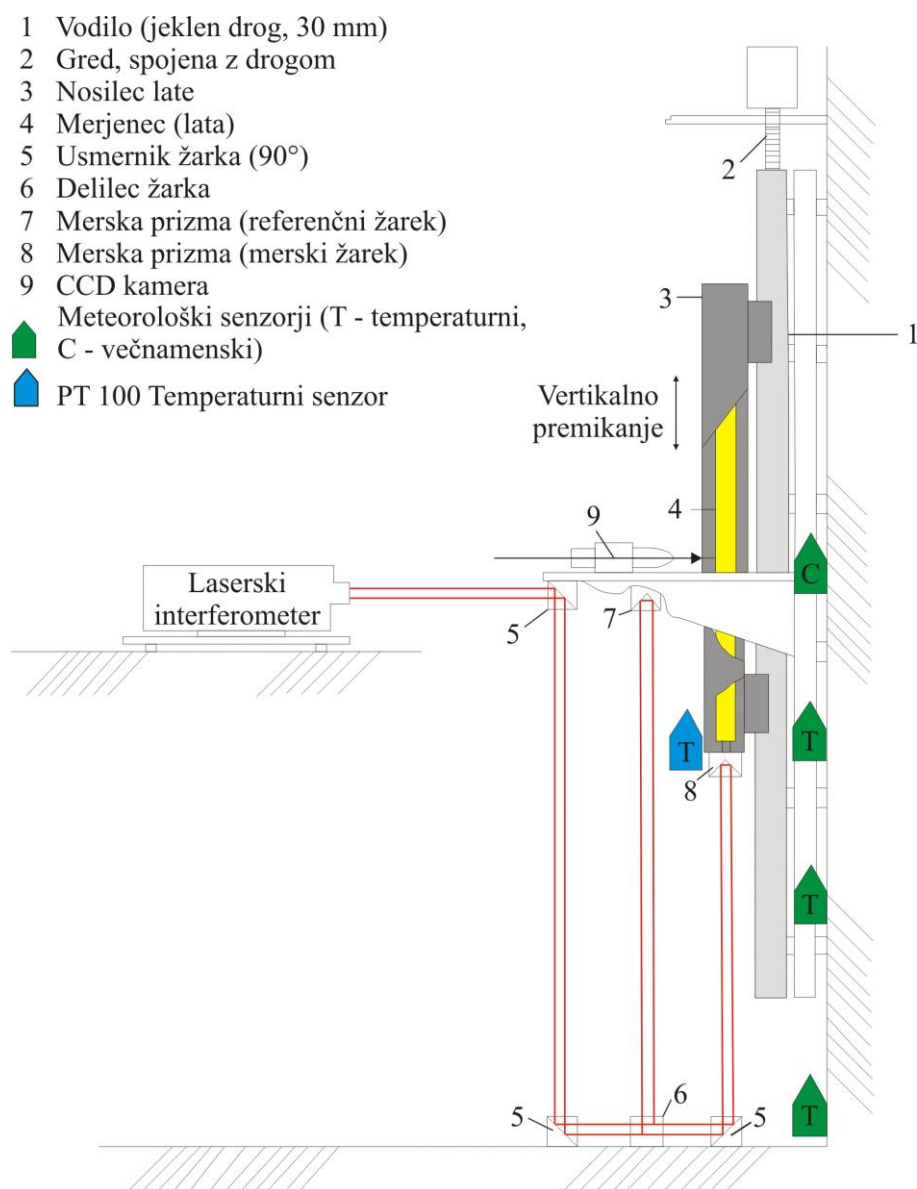
Pogonski mehanizem je povezan z regulacijsko elektroniko, sani pa lahko premika za določeno število korakov ali pa s kontinuirano hitrostjo. Pri nekaterih (starejših) komparatorjih pa premikanje še vedno poteka ročno. Elektronika zazna trenutek zajema slike late in sproži signal k interferometričnem razdaljemeru, da ta istočasno določi položaj na merskih sanah (nosilcu) potujoče nivelmanske late ali naprave za zajem slike late. Izmerjeni podatki se za nadaljnje analize v programski opremi osebnega računalnika kontinuirano shranjujejo.



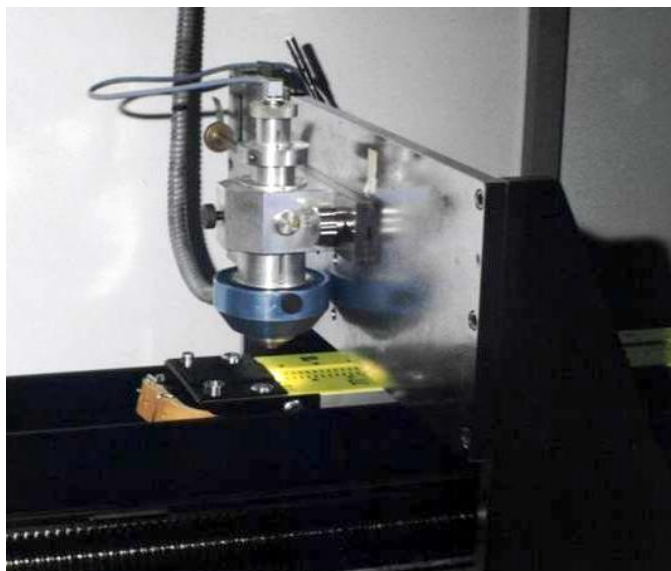
Slika 26: CCD slikovno zaporedje zajemanja enega roba črtice kodne nivelmanske late

Če so elementi razdelbe zajeti z zelo visoko ločljivostjo (8 μm pri horizontalnem komparatorju na ETH Zürich) lahko motnje, kot so prašni delci, najmanjše praske ali umazanija, motijo kalibracijo in od časa do časa lahko močno poslabšajo rezultate zaznavanja robov elementov razdelbe. Zato je priporočljivo, da je ločljivost ustrezno visoka, tako da so meritve odporne na takšne motnje.

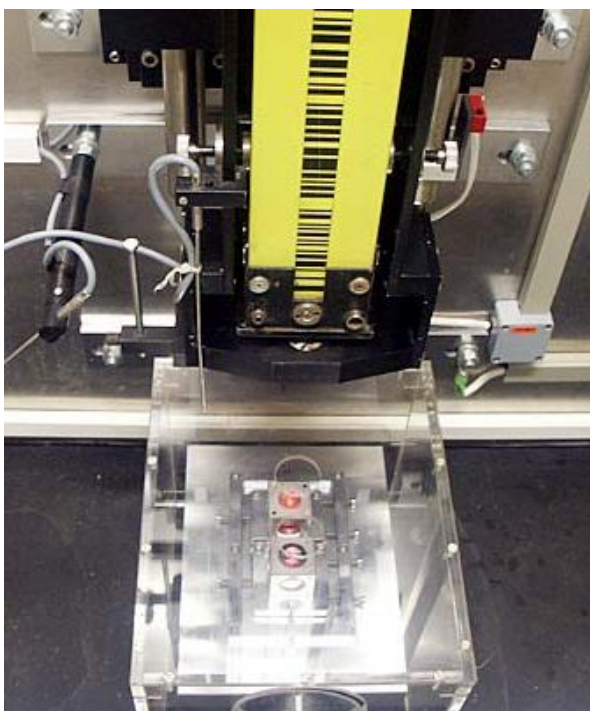
S temi komparatorji se lahko kalibrira precizne invar nivelmanske late z običajno črtno in kodno razdelbo.



Slika 27: Shematičen prerez vertikalnega komparatorja na Tehnični univerzi
v Münchenu (TU München)



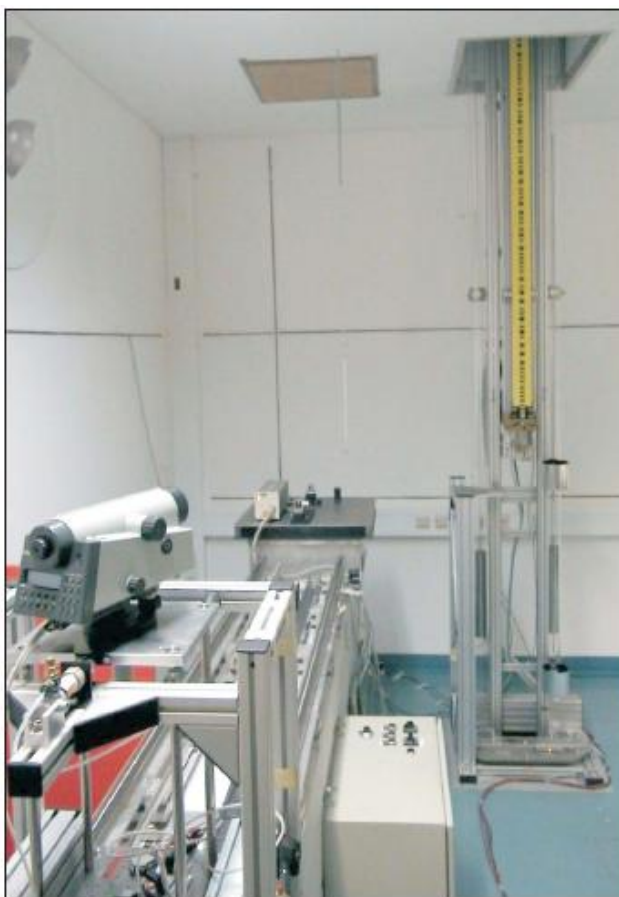
Slika 28: Zajem elementov razdelbe late na vertikalnem in horizontalnem komparatorju na TU München



Slika 29: Lasersko interferometrični sistem in CCD kamera vertikalnega komparatorja Geodetskega zavoda Nordrhein-Westfalen (LVerMA NRW)

4.2 Komparatorji za sistemsko kalibracijo

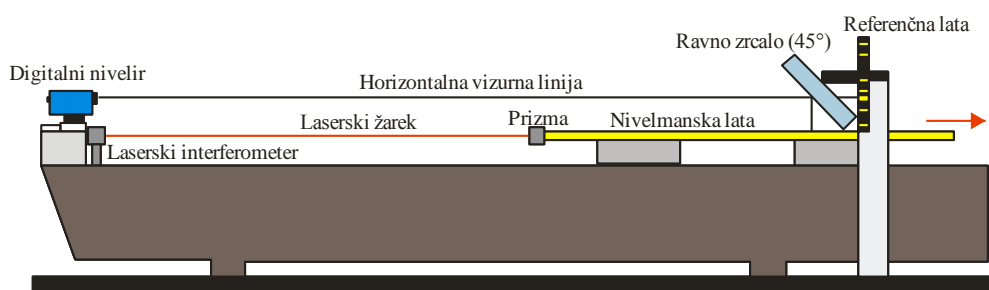
Komparatorji za izvajanje sistemske kalibracije so v osnovi enaki kot komparatorji za kalibriranje razdelbe nivelmanske late, glavna razlika pa je v tem, da je napravo za zajemanje kodnih črtic razdelbe late zamenjal digitalni nivelir, s katerim se določa odčitke na preciznih kodnih nivelmanskih latah. Digitalni nivelir je tu fiksni, lata pa se na nosilcu ali saneh premika. Ti komparatorji lahko omogočajo spreminjanje razdalje med digitalnim nivelirjem in nivelmansko lato, tako da se ugotavljanje obnašanja sistemov za digitalno niveliranje izvaja na različnih vizurnih razdaljah.



Slika 30: Vertikalni komparator Tehnične univerze v Grazu (TU Graz)

Tudi ti komparatorji so lahko vertikalni in horizontalni, le da se pri horizontalnem komparatorju z digitalnim nivelirjem ne more direktno čitati na nivelmanski lati. Na sliki 31 prikazan komparator geodetskega laboratorija Univerzitet oboroženih sil v Münchenu

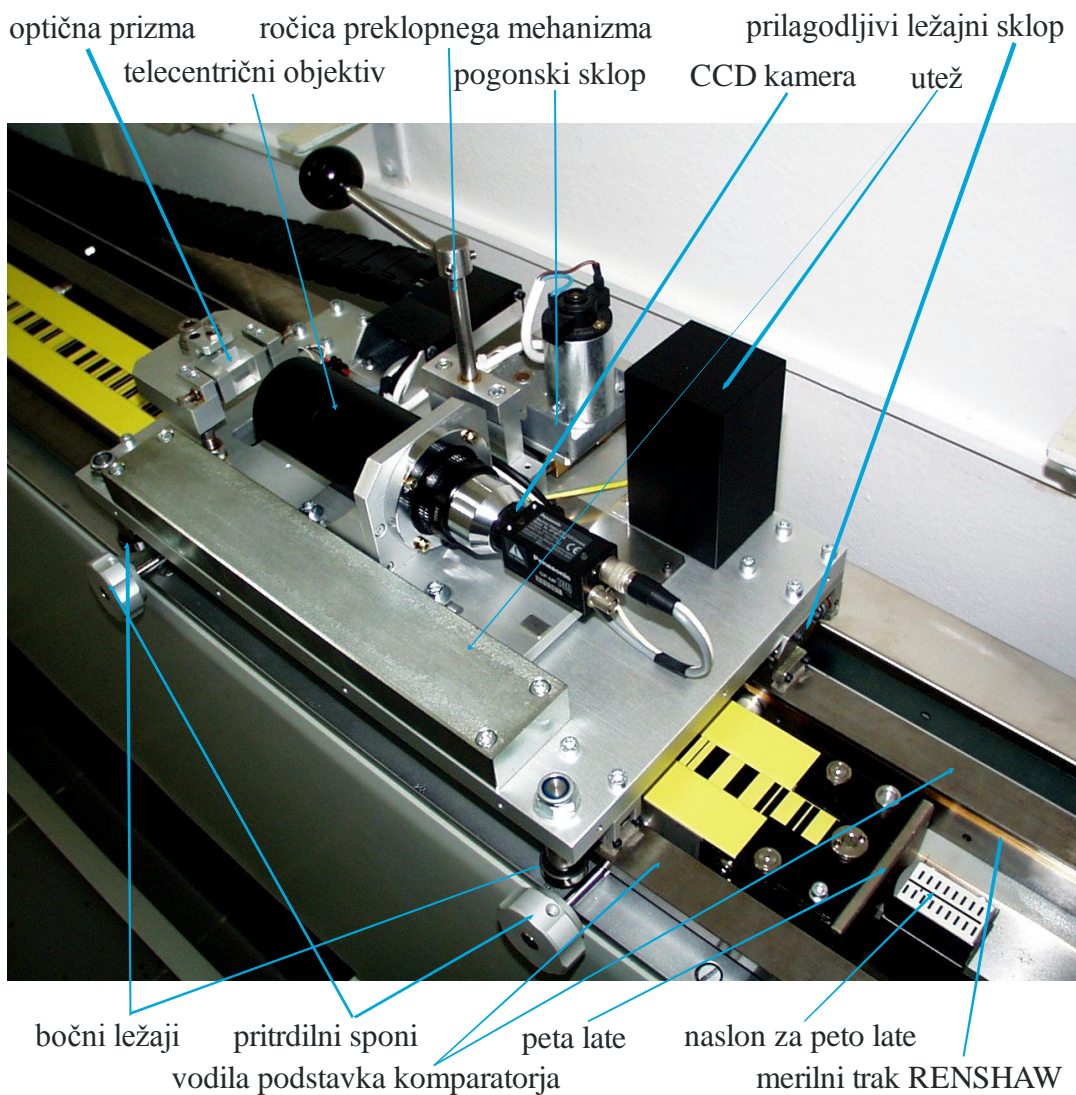
(UniBwM), ima zato na merskem mostu komparatorja, pod kotom 45° glede na nivelmansko lato, pritrjeno ravno zrcalo (Zerodur, 50 cm x 10 cm x 5 cm). Pot horizontalnega žarka se spremeni za 90° , tako da se ga usmeri proti nivelmanski lati. Pri tem komparatorju je lahko v meritve vključena tudi referenčna lata. Ta pomaga, da se lahko pridobi sistematična merska odstopanja zaradi nestabilnosti merske opreme in temperaturno pogojenih sprememb lomnega količnika v območju vizurnega žarka digitalnega nivelirja. Ta lata je postavljena ob komparatorju in je zajeta skoraj istočasno kot odčitek na merjencu. Nivelir se zato preko vrtljive mize rahlo zasuka. Čas kalibracije se zato bistveno podaljša, vendar rezultati kalibracije upravičujejo to časovno podaljšanje meritev.



Slika 31: Shematična predstavitev sistemske kalibracije na horizontalnem komparatorju geodetskega laboratorija UniBw München

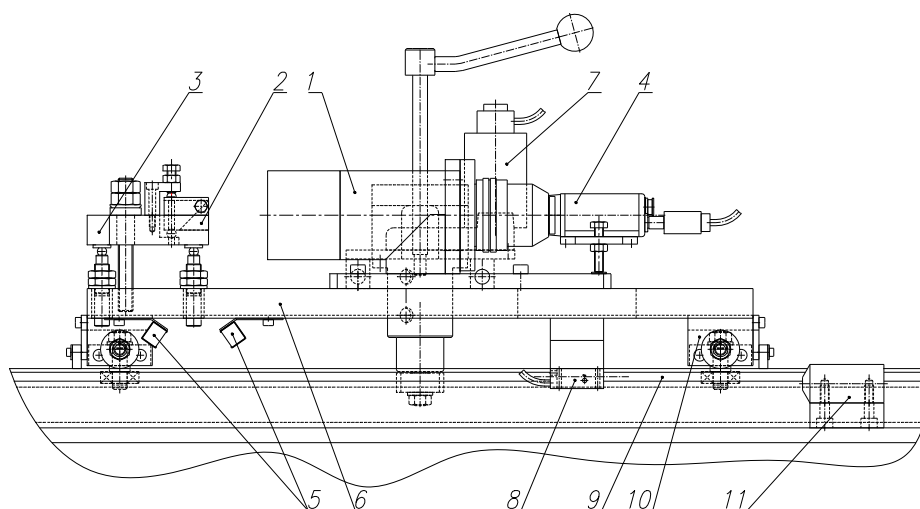
4.3 Komparator Fakultete za gradbeništvo in geodezijo iz Ljubljane (UL, FGG)

Pojav kodirane razdelbe je zahteval predelavo analognega Carl Zeissovega dolžinskega komparatorja, ki je bil namenjen merjenju končnih mer maksimalne dolžine treh metrov (razdelb klasičnih invar nivelmanskih lat ter tudi merskih trakov). Komparator je od takrat poznan pod oznako MSGLO01. Predelava je potekala v sodelovanju s podjetjem RLS Merilna tehnika, d. o. o.. Zeissov dolžinski komparator je dobil novo obliko, predvsem pa vsebino, še vedno pa je namenjen merjenju dolžin v območju treh metrov. Prenovljenemu komparatorju je osnova zelo natančno mehansko obdelan in precizno horizontiran podstavek, ki je bil originalno nosilec optičnih in mehanskih delov za optični način merjenja. Na podstavku je vgrajen novi dolžinski etalon (optični enkoder) ter nameščen na novo izdelani merilni voziček.



Slika 32: Merilni voziček na podstavku komparatorja in vpeta nivelmanska lata

Osnova merilnega vozička je aluminijasta plošča s krogličnimi ležaji, preko katerih se voziček kotali po podstavku. Slika 32 prikazuje razpored elementov na nosilni plošči vozička. Optični del merilnega sistema obsega standardno črno-belo CCD kamero, telecentrični objektiv in optično prizmo, ki omogoča, da je optična os telecentričnega objektiva vzporedna z osjo gibanja vozička in s tem nižjo konstrukcijo merilnega vozička. Poleg optičnega dela sta na zgornji strani plošče nameščena pogonski sklop in veriga za kable. Na spodnji strani je pravit še nosilec čitalne glave ter dvodelno svetilo iz več svetlečih diod, ki enakomerno osvetljuje merjenec. Novi dolžinski etalon (optični enkoder proizvajalca Renishaw) je sestavljen iz samolepilnega merilnega traku, ki je prilepljen neposredno na podstavek merilne naprave in čitalne glave, s katero se lahko merjenje premikov vozička izmeri z ločljivostjo 1 μm .



- | | | |
|------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| 1. Telecentrični objektiv | 5. Dvodavno svetilo | 9. Samolepilni merilni trak |
| 2. Optična prizma | 6. Nosilna plošča | 10. Nosilec ležaja |
| 3. Vpenjalni elementi prizme | 7. Pogonski sklop | 11. Naslon za peto late |
| 4. CCD kamera | 8. Čitalna glava | |

Slika 33: Vzdolžni prerez merilnega vozička in povezave z etalonom

Za namestitev nivelmanskih lat je podstavek opremljen z nosilnimi konzolami, distančniki bočne lege, pritrdilnimi sponami in naslonom za kovinsko peto late. Na ta naslon je pritrjen krajši del invar merilnega traku z znano razdaljo med naslonsko površino in črtno razdelbo na traku. Taka zasnova naslona omogoča ponovljivo merjenje razdalj od istega izhodišča. Zaključki nivelmanskih lat (kovinske pete lat) se namreč razlikujejo med seboj in največkrat zaradi svoje oblike niso primerni za neposredno odčitavanje s CCD kamero.

V osebnem računalniku je nameščena potrebna strojna in programska oprema, z njim pa se krmili napravo, kontrolira in ovrednoti meritve.

Natančnost in hitrost kompariranja vseh vrst nivelmanskih lat s posodobljenim komparatorjem je primerljiva z interferenčnimi komparatorji. Z njim se lahko določa merilo razdelbe late in napako prve črtice razdelbe preciznih invar nivelmanskih lat s črtno ali kodirano razdelbo kateregakoli proizvajalca. S kalibracijo komparatorja se je izvedla kontrola natančnosti, s katero je bilo ugotovljeno, da je popravek metra komparatorja + 2 ppm.

Meritev poteka tako, da se med potovanjem nad merjencem (razdelbo nivelmanske late) merilni voziček vsakih 9 mm (kar je nekaj manj, kot je višina vidnega polja kamere) ustavi, umiri in kamera posname delni posnetek. Lego kamere ob posnetku določi trenutni položaj čitalne glave glede na merilni trak - etalon. Med dvema delnima posnetkoma potuje voziček s hitrostjo približno 1 cm/s. Programska oprema obdela delne posnetke, iz njihovega zaporedja ob znanih legah sestavi celotni posnetek merjenca, omogoča shranjevanje celotnega posnetka, njegovo prikazovanje in kasnejšo analizo. Celotno snemanje razdelbe trimetrске nivelmanske late traja približno 10 minut (Vodopivec, Kogoj, 2002).

5 POSTOPEK KALIBRACIJE

Le s postopkom kalibracije se lahko ugotovi nekatere sistematične napake opreme za niveliranje, kot so napake razdelbe late oz. sistema za digitalno niveliranje. Kalibracija mora potekati po vzdolžni osi razdelbe. Če to ne drži in kalibracija poteka pri robu razdelbe, lahko nastanejo sistematična odstopanja merila razdelbe late do ± 2 ppm. Kalibracijski proces naj bi obsegal več meritev (najmanj dve) v dveh smereh, naprej in nazaj, med katerimi se lato odstrani ter ponovno vstavi v komparator. Kalibracija vodi do povečanja natančnosti, kalibracijske rezultate se v obliki popravkov upošteva pri kasnejših meritvah, ali pa do kvalitativne kontrole, pri kateri se na podlagi kalibracijskih rezultatov odloča ali merska oprema ustreza kvalitativnim zahtevam določenih nalog preciznega nivelmana.

Cilj kalibracije mora biti ugotovitev merila razdelbe late oz. sistema za digitalno niveliranje m_0 in definiranje popravka prve črtice razdelbe a :

$$l_i = l'_i \cdot \left[1 + m_0 + \alpha_L \cdot (T - T_0) \right] + a$$

l'_i – merska vrednost na osnovi nominalnih položajev elementov razdelbe

l_i – popravljena vrednost

Za popravljanje merskih vrednosti moramo poznati še temperaturni razteznostni koeficient late α_L , temperaturo invar traku late T v času meritev in referenčno temperaturo T_0 (praviloma 20°C).

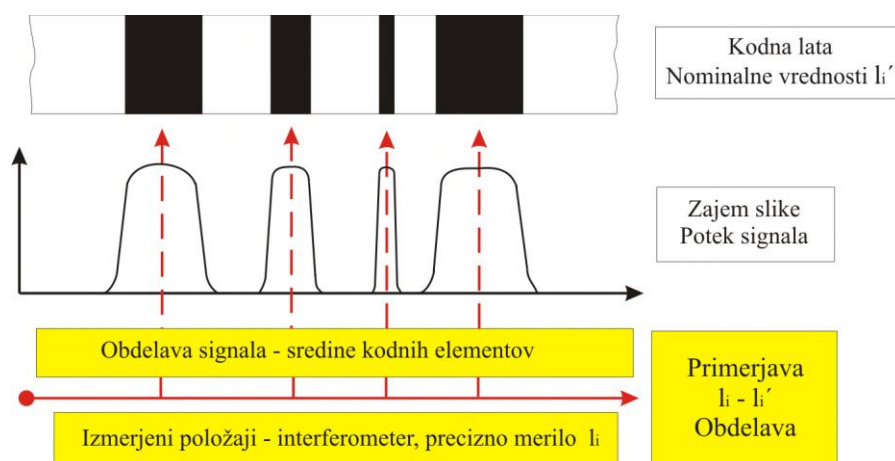
5.1 Kalibracija razdelbe late

Že samo ime pove, da se ta postopek nanaša le na komponente razdelbe late. S to kalibracijo se lahko določa merilo razdelbe late (m_0) in napako prve črtice razdelbe (a) običajnih in kodnih preciznih nivelmanskih lat. Kalibracija razdelbe late pride v poštev takrat, ko se raziskuje odstopanja posameznih elementov razdelbe (črtice ali kode) od njihovih pravih položajev. Poznani morajo biti pravi položaji elementov razdelbe, te pa predpiše proizvajalec

instrumenta. Specifične lastnosti nivelirjev (npr. napaka vizurne razdalje), morebitna temperaturna odvisnost nivelirja itn., se pri tej kalibraciji ne registrirajo, vendar se te vplive lahko minimalizira preko skrbno izvedenih terenskih meritev.

5.1.1 Postopek kalibracije razdelbe invar kodne late

Črno rumene kodne elemente proizvajalec late na invar trak prenese znotraj predpisane tolerance, le ta pa je napet v aluminijastem ogrodju. Pri kalibraciji razdelbe late (Slika 34) so nominalne vrednosti posameznih kodnih elementov l_i' primerjane z izmerjenimi vrednostmi l_i (precizno merilo ali laserski interferometer), kakor se je to izvajalo tudi za običajne precizne nivelmanske late s črtno razdelbo.



Slika 34: Princip kalibracije razdelbe late

Popravke od nominalnih vrednosti se izračuna po sledeči enačbi (3):

$$l_i' + v_i = a + m_0 \cdot l_i \quad (3)$$

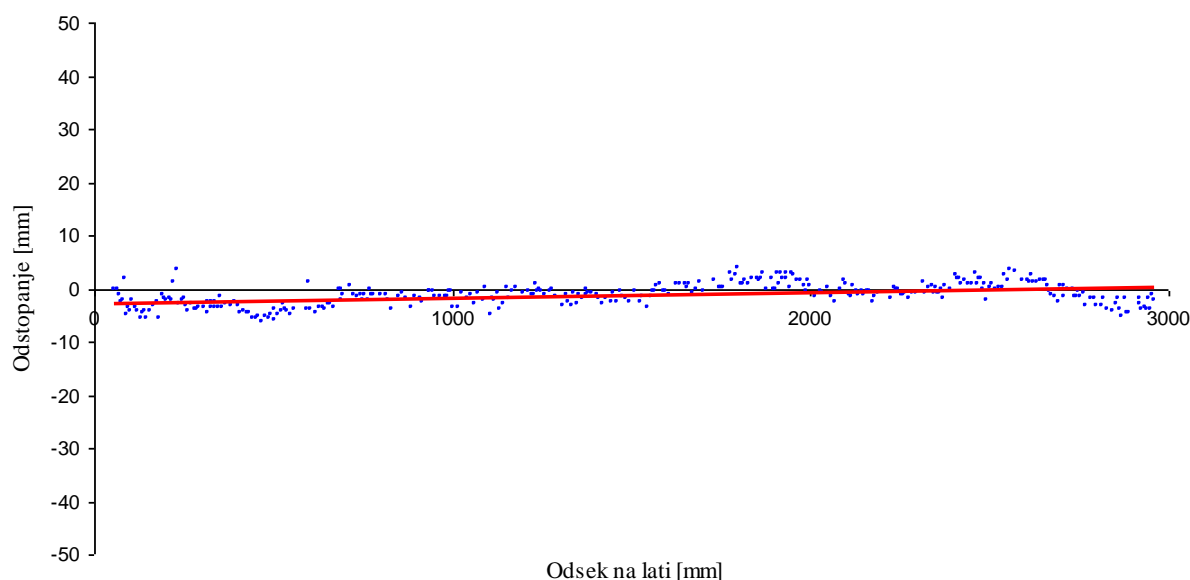
$$i = 1, \dots, n,$$

kjer l_i' pomeni nominalno srednjo vrednost obeh robov i -tega kodnega elementa, l_i je ustrezno določena vrednost komparatorja, v_i pa so popravki od nominalnih vrednosti ("črtni popravki"), preko katerih se izkaže točnost razdelbe late.

Pod določenimi pogoji, takrat ko se v okolici komparatorja lahko spreminja temperatura v območju od ca. - 10°C do + 50°C, je možna tudi določitev razteznostnega koeficienta late α_L .

Danes se kalibracijo razdelbe late izvaja na zelo visokem nivoju, samo črtno zajemanje se lahko izvede z merilno negotovostjo, ki znaša ca. 1-2 μm , merilna negotovost za določitev merila razdelbe late pa je okoli 1 ppm.

Kot primer je tu prikazan rezultat kalibracije kodne invar late z Leicino razdelbo. Grafikon 4 prikazuje razlike med nominalnimi položaji kodnih elementov in njihovimi izmerjenimi položaji, ki odstopajo od linearnega merila razdelbe late m_0 .



Grafikon 4: Rezultat kalibracije 3 m dolge invar late z Leicino razdelbo

Kot je razvidno iz grafikona 4 so odstopanja najbolj izrazita na spodnjem in zgornjem koncu late. Iz odstopanj, ki so manjša od 10 μm , je potrjena visoka natančnost te precizne invar nivelmanske late.

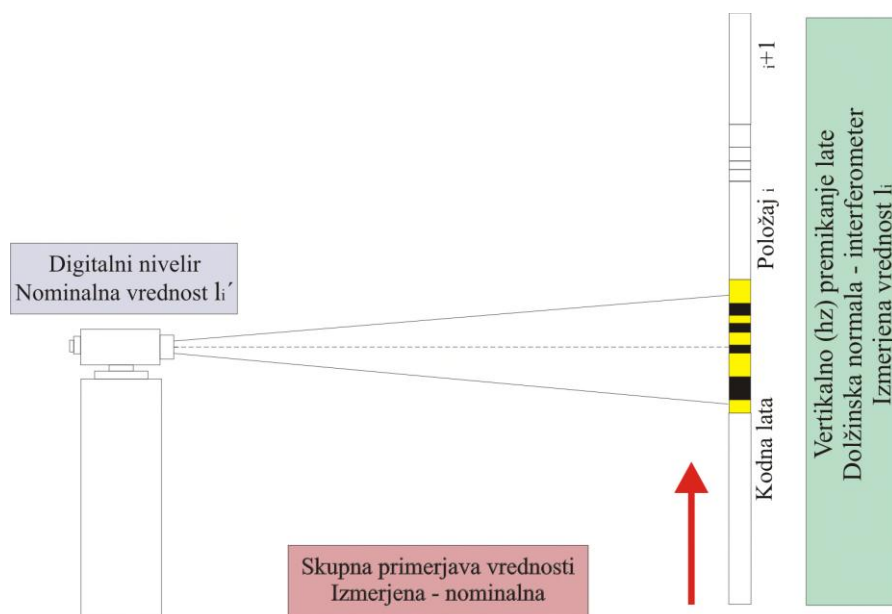
Ker digitalni nivelir ni vključen v postopek kalibracije in ker je pri meritvah z digitalnimi nivelirji v merski postopek vzetih več kodnih elementov, se popravki položajev posameznih kodnih elementov ne morejo neposredno uporabiti za popravo višinskih vrednosti. Zato ta

kalibracijski postopek ne more izpolniti zahtevo po ugotovitvi merila sistemov za digitalno niveliranje, ponuja pa možnost testiranja položajev posameznih kodnih elementov in s tem tudi natančnosti izdelave preciznih invar lat. Zaradi tega, s tem kalibracijskim postopkom ugotovljeno merilo razdelbe late, pri meritvah z digitalnimi nivelirji nima bistvenega pomena. Ta kalibracija pa ima prednost pred sistemsko kalibracijo pri določitvi temperaturnega razteznostnega koeficienta α_L preciznih invar nivelmanskih lat. Teoretično je kalibracija razdelbe kodne late enakovredna sistemski kalibraciji le takrat, ko je znana funkcijska zveza med kalibracijskimi količinami (položaji kodnih elementov) in iskanimi merskimi količinami (višinski odčitek digitalnega nivelirja). Zato bi morali proizvajalci detajlno objaviti svoje algoritme izvedenja. Ker proizvajalci vedno bolj skrivajo temeljne funkcije in principe izvedenja, bo v prihodnosti kalibracijo razdelbe late v glavnem zamenjala sistemska kalibracija.

5.2 Sistemska kalibracija

Zaradi avtomatskega določanja odčitkov na digitalni nivelir in kodno nivelmansko lato ne moremo gledati ločeno. Včasih konstrukcija nivelirjev ni bila zapletena. Uporabniki so o njih vedeli več, bolje so razumeli njihovo delovanje in v večini primerov se je lahko hitro zasledilo funkcionalne napake ter tudi popravilo majhne pogoške. Z razvojem digitalnih nivelirjev pa se je spremenil tudi postopek izdelave. Danes proizvajalci kalibrirajo opremo za digitalno niveliranje in v programsko opremo instrumenta shranjujejo specifične parametre, ki so namenjeni popravilu merskih vrednosti, vse to pa zaradi komercialnih razlogov ostane skrivnost. Uporabnik na terenu pritisne na gumb in dobi lepe odčitke brez kakeršne možnosti njihove kontrole. Tako uporabnik ne ve ničesar o nepopolnosti nivelirja in z njim povezanih notranjih popravkov, zato je nujno, da je digitalni nivelir del kalibracijskega postopka. Sistemska kalibracija tako poleg precizne invar nivelmanske late v postopek vključuje tudi digitalni nivelir, z njo pa se raziskujejo napake celotnega sistema za digitalno niveliranje. Odkrije se lahko tudi napake ali slabosti digitalnih nivelirjev, npr. popačenje objektiva, napake vrstičnega senzorja, samosegrevanje instrumenta, napačno delovanje algoritma za izvedenja (pri poškodovanih latic ali pri meritvah na končnih območjih late).

Tu so neposredno primerjane razlike med izmerjenimi višinskimi vrednostmi digitalnega nivelirja (nominalne vrednosti) in vrednostmi, ki jih določi komparator. Izmerjene vrednosti komparatorja naj bi bile nekaj deset potenc natančnejše kot odčitki na nivelirju (Slika 35). Sistemsko kalibracijo se izvaja pri različnih vizurnih razdaljah, zato da se ugotovi obnašanje sistema pri različnih dolžinah.



Slika 35: Princip sistemske kalibracije

Po že prej omenjeni enačbi (3) je l_i' odčitek na nivelirju (nominalna vrednost), l_i je vrednost, ki jo izmeri komparator, v_i pa so odstopanja od nominalnih vrednosti. Tu se ne določa merilo razdelbe late m_0 , ampak merilo sistema ms_0 (kompozitno merilo), ker se tukaj upošteva tudi razdelbo v nivelirju in sistematične vplive nivelirja. Raziskuje se lahko tudi napako ničelne točke late a . Bistveni merski pogoji za natančno določitev merila sistema ms_0 so:

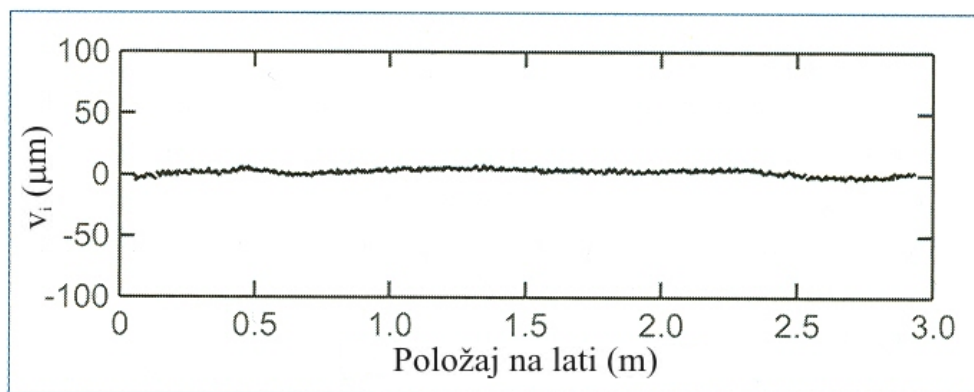
- določitev tipskega in od kode odvisnega merskega intervala
- vizurna razdalja do merjenca naj bo < 5 m
- večkratno merjenje z nivelirjem
- za senzoriko optimalen spekter osvetljevanja

Merski interval je odvisen od izvedbe meritev in tipa late, znaša pa nekaj sekund. Zahteva po stabilnosti merske opreme je pri sistemske kalibraciji zaradi daljšega časa meritev (tudi do

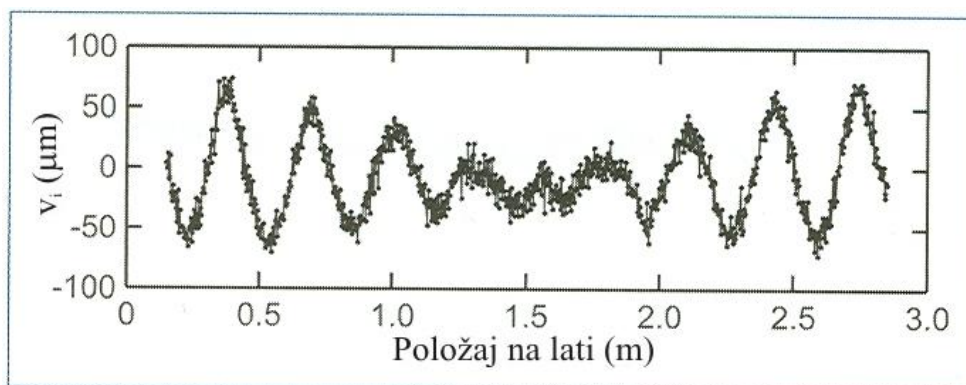
nekaj ur) bistveno večja kot pri kalibraciji razdelbe late. Kalibracijska oprema mora ohraniti svoj položaj tudi ko se temperatura spremeni. Ves čas kalibracijske meritve v obeh smereh mora biti lata, pri določenem višinskem odčitku, na pravem položaju. To pa zahteva natančno krmiljenje merskih sani oz. nosilca z visoko kratko in dolgočasovno stabilnostjo.

Zaradi pomankljivosti digitalnih nivelirjev so se dolgo pojavljali dvomi o natančnosti systemske kalibracije, šele raziskave in analize zadnjih let so pokazale, da se s systemsko kalibracijo lahko ugotovi merilo sistema ms_0 z zadostno merilno negotovostjo in določi popravke, ki se jih pri meritvah lahko uporabi.

Spodaj je grafično prikazan rezultat systemske kalibracije nivelirja Topcon DL 101C in njemu pripadajoče precizne invar kodne late (Grafikon 6). Kalibracijo so izvedli z vertikalnim komparatorjem na TU Graz. Raziskava je pokazala na zelo različno ravnanje nivelirjevega načina izvednotenja za bližnja in oddaljena območja. V bližnjih območjih, kjer je za izračun višinskih vrednosti uporabljen algoritem zaznavanja robov, merski sistem podaja odlične rezultate. Od razdalje ca. 9 m pa je uporabljen način izvednotenja za oddaljena območja (Fourierova analiza), zato tu nastopijo do 0.3 mm velike systemske višinske napake.



Grafikon 5: Rezultat kalibracije 3 m dolge invar late s Topconovo razdelbo



Grafikon 6: Rezultat sistemske kalibracije instrumenta Topcon DL 101C pri razdalji 13 m

Višinske vrednosti so glede na razpršenost okoli linearnega merila sistema ms_0 pod vplivom sinusne oblike, amplituda pa se spreminja glede na višinsko vrednost. Vplivanje se z večanjem razdalje manjša in pri razdalji ca. 30 m ni več spoznavno. Vzrok za ta učinek še ni poznan, vseeno pa se iz rezultatov testiranja domneva, da je odstopanja povzročil algoritem izvrednotenja (Fourierova analiza). Vsekakor ta niso nastala zaradi same late, ker je bila pri sistemski kalibraciji uporabljena lata, katere razdelba je že bila pregledana s postopkom kalibracije razdelbe late (Grafikon 5). Pri tem testiranju so maksimalna odstopanja znašala do 6 μm in sicer na zgornjem in spodnjem koncu late. Pri razdalji 13 m je potrebno odstopanja, ki znašajo 0.15 mm in več upoštevati pri meritvah največje natančnosti.

Pri sistemski kalibraciji izmerjena višinska vrednost ni le pod vplivom merila razdelbe late, ampak nanjo vpliva tudi merilo nivelirja, ki je odvisno od posameznih komponent nivelirja in algoritma za izvrednotenje. To merilo instrumenta bi moralo biti v najboljšem primeru enako kot merilo razdelbe late, kar pa se zaradi sistematičnih napak nivelirja največkrat ne zgodi. S sistemsko kalibracijo se tako določa merilo sistema za celotni merski odsek kodne late in to bi moralo biti primerljivo z merilom razdelbe late. Da se to doseže se mora izbrati primeren merski interval, ki pa se ga lahko določi le če so poznani specifični efekti nivelirja. Če ti efekti, ki lahko vplivajo na rezultat sistemske kalibracije, niso poznani, se primerljivosti s kalibracijo razdelbe late ne more izvesti. Zato je bistveno poznavanje posebnih efektov sistemov za digitalno niveliranje in njihovo upoštevanje v kalibracijskem postopku, ker je to predpostavka za doseganje rezultatov visoke natančnosti, predvsem takrat ko se določa merilo sistema.

Tu prikazani efekti se lahko zgodijo tudi na terenu, zato so pomembni tudi za praktično uporabo.

5.2.1 Efekti, ki vplivajo na sisteme za digitalno niveliranje

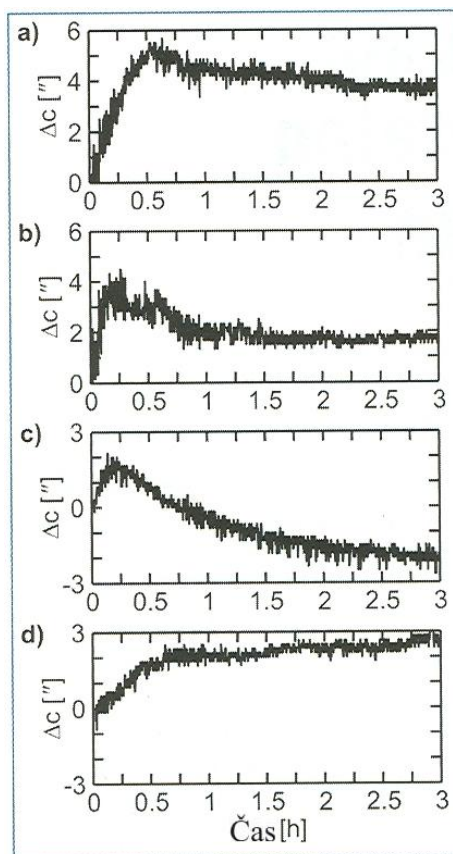
5.2.1.1 Temperaturni efekt - aklimatizacijski efekt (na primeru raziskav na TU Graz)

Če se digitalni nivelir uporablja v okolici s spreminjajočo temperaturo, se lahko, zaradi temperaturnega raztezanja materialov nivelirja, vizurna linija spremeni za znesek Δc . Ta je bil raziskan za različne tipe digitalnih nivelirjev. Temperaturne spremembe spremenijo merske zmoglosti CCD senzorja. Spremeni se položaj, dimenzije, geometrija senzorja in čas izvedenja. Vse to pa vodi k spremembi nagiba vizurne osi. Ta temperaturni efekt je pri digitalnih nivelirjih občutno večji kot pri klasičnih optičnih nivelirjih.

Za simuliranje premikanja nivelirja na terenu (nošenje instrumenta) so izvedli testiranje s stimulacijo kompenzatorja. Po treh višinskih odčitkih je sledila stimulacija kompenzatorja s pomočjo posebnega pripomočka. Nato je sledila faza mirovanja, vsakokrat po 10 sekund, za simuliranje časa, med katerim instrument ne deluje (postopek viziranja pri terenskih meritvah ali pozicioniranje late pri kalibraciji). Testirali so instrumente Leica NA 3003, Leica DNA 03, Topcon DL 101C in Trimble/Zeiss DiNi 11. Meritve so potekale avtomatsko, na približno 12 m oddaljeni, fiksno stoječi nivelmanski lati. Pred začetkom meritev se je vklopljen nivelir pet ur nahajal v klimatizirani sobi pri 40°C. Grafikoni od 7 a do 7 d prikazujejo obnašanje preciznih digitalnih nivelirjev med aklimatizacijo na temperaturo prostora (ca. 25°C, pri DNA 03 20°C). V tem času je bila temperatura v laboratoriju stabilna in se ni spreminjala za več kot $\pm 0.2^\circ\text{C}$.

Pri vseh instrumentih so se pojavile močne spremembe vizurne linije (do 6") v začetni fazi, med prvimi 10 minutami, pa do 40 minute. Vizurna linija se nato spreminja počasneje in je šele po več kot treh urah popolnoma stabilna. Poskusi brez stimulacije kompenzatorja (to tu ni prikazano) dajo podobne rezultate.

Iz raziskav je postalo jasno, da je pri terenskih meritvah z različnimi vizurnimi razdaljami potrebno upoštevati aklimatizacijski čas najmanj $2 \text{ min}/^{\circ}\text{C}$. Pri kalibraciji pa je za maksimalno stabilnost vizurne linije predlagan 8 urni aklimatizacijski čas (Woschitz, 2002).

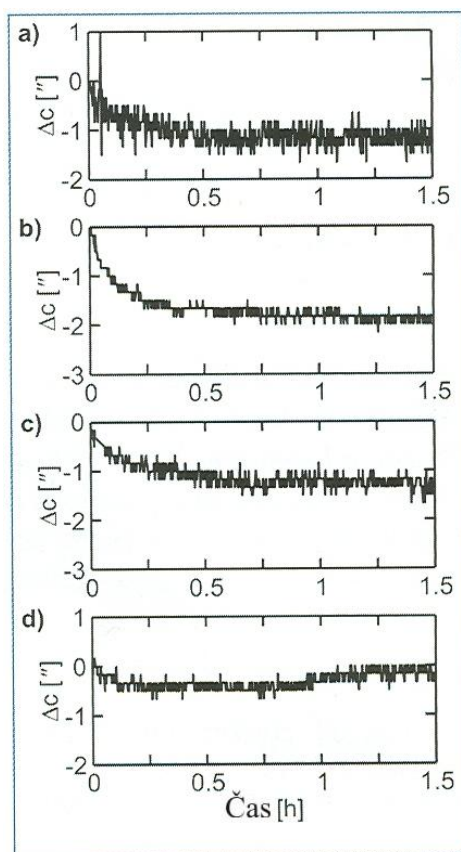


Grafikon 7: Spremembe vizurne linije instrumentov (a) Leica NA 3003, (b) Leica DNA 03, (c) Topcon DL 101C in (d) Trimble/Zeiss DiNi 11 med njihovo aklimatizacijo od 40°C na sobno temperaturo ter s stimulacijo kompenzatorja

5.2.1.2 Temperaturni efekt - samosegrevanje (na primeru raziskav na TU Graz)

Po zagonu nivelirja se vizurna linija spremeni tudi pri zadostno aklimatiziranem instrumentu kot posledica njegovega samosegrevanja. Za določitev razsežnosti tega efekta so izvedli testne meritve z več dni aklimatiziranimi instrumenti. Instrumente so vklopili šele neposredno pred testiranjem. Spremembe vizurne linije, ki so se zgodile zatem, so predstavljene v grafikonih od 8 a do 8 d. Meritve so potekale tako kot je opisano v poglavju 5.2.1.1, zopet s stimulacijo kompenzatorja.

Znotraj približno 15 minut so nastopile spremembe vizurne linije od 0.4" do 2.0". Za tem se vizurna linija različnih instrumentov ni več spreminjala oz. le še linearno. Za pridobitev vtisa o samosegrevanju, je bila s temperaturnimi senzorji izmerjena in zapisana temperatura instrumenta Leica DNA 03. V prvih 15 minutah je temperatura instrumenta narasla za 2°C, potem pa le še za 0.5°C. Pri poskusih brez stimulacije kompenzatorja so nastopili efekti podobnih razsežnosti in podobnega poteka sprememb. Le Topconov instrument (Grafikon 8 c) je kazal večje razlike in linearno fazo dosegel šele po 90 minutah. Če je aklimatiziran instrument vklopljen več ur pred začetkom meritev, se pri Topconovem instrumentu ta vpliv razpolovi. Pri ostalih instrumentih pa tedaj ne nastopijo več nobene spremembe vizurne linije.



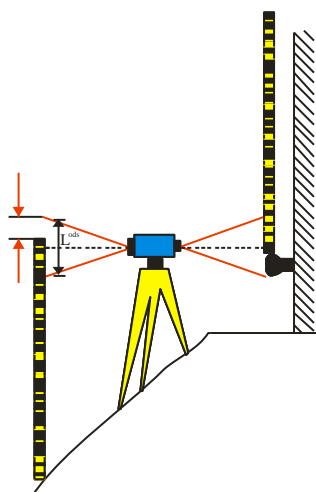
Grafikon 8: Spremembe vizurne linije aklimatiziranih instrumentov (a) Leica NA 3003, (b) Leica DNA 03, (c) Topcon DL 101C in (d) Trimble/Zeiss DiNi 11 po vkloplitvi in s stimulacijo kompenzatorja

Za kalibracijo to pomeni, da mora biti instrument vklopljen že med fazo aklimatizacije, ali pa, da je pred samo kalibracijo izvedenih toliko meritev, dokler se instrument ne nahaja v

linearnem območju "segrevalne krivulje". Za minimiranje preostalih vplivov, pa je v vsakem primeru potrebno postaviti krajšo kalibracijsko razdaljo (Woschitz, 2002).

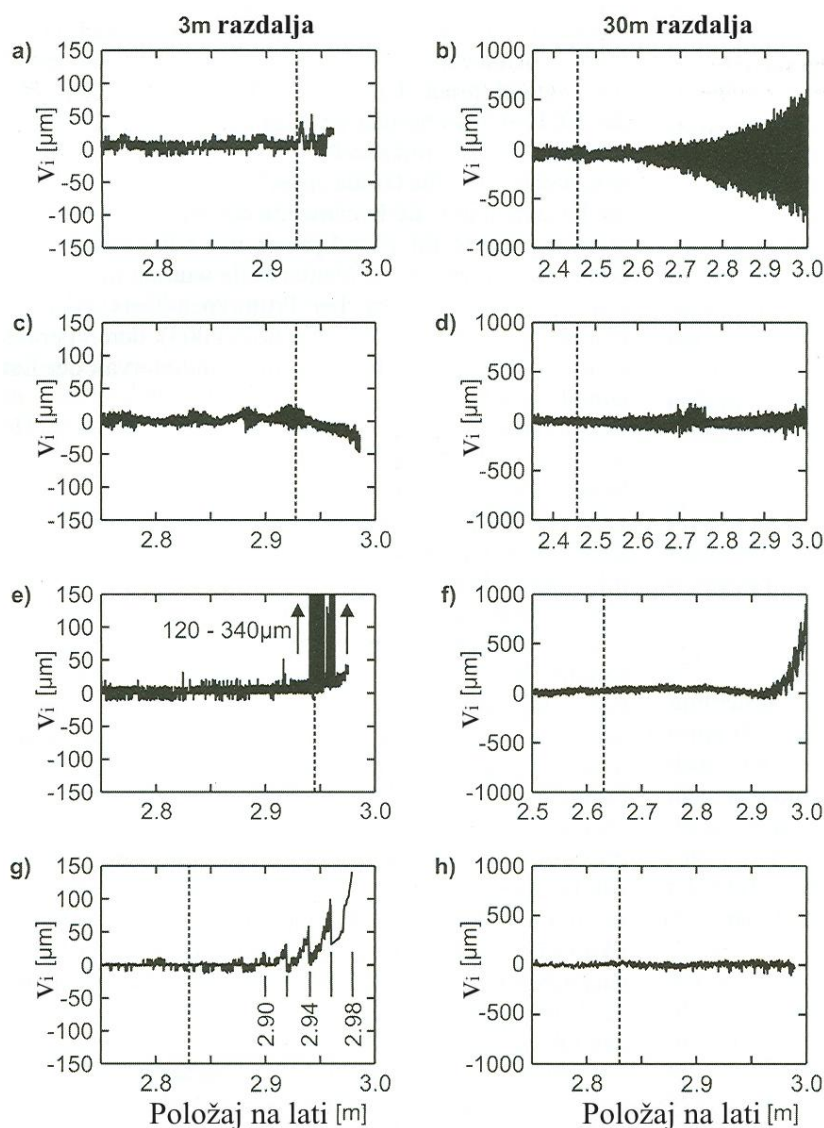
5.2.1.3 Višinske napake pri meritvah na končnih območjih late (na primeru raziskav na TU Graz)

Ker digitalni nivelirji za izračun višinskih vrednosti zajemajo širši odsek na lati, omogočajo meritve kljub temu, da optična os daljnogleda ne pade na razdelbo late. To se največkrat zgodi pri meritvah na strmem terenu ter pri zaključevanju nivelmana na višinsko podani točki oz. reperju (Slika 36). Velikost uporabljenega odseka late (L^{ods}) je pri Leicinih in Topconovih instrumentih odvisna od razdalje ($L^{ods} = 2 \cdot d \cdot \tan\alpha$, z razdaljo d in izstopnim kotom α , ki je za Leicine instrumente enak 2° , pri Topconovih instrumentih je $\alpha = 1^\circ 20'$), pri instrumentih Trimble/Zeiss pa je konstantna ($L^{ods} = 30$ cm oz. 100 cm pri instrumentih serije T). Tako je pri meritvah v bližini končnega dela late na CCD senzor preslikana ne le koda late, ampak tudi vzorec, ki se nahaja pod oz. nad lato. Ta moteči vzorec mora programska oprema zaznati in odstraniti. V vsakem primeru je preostala slika kode nesimetrična in tu lahko nastanejo večje višinske napake. Proizvajalci zato ne priporočajo izvedbo preciznih meritev na končnih območjih late. Pri 3 m dolgi invar lati to območje leži pod $0.04 \text{ m} + L^{ods}/2$ in nad $2.98 \text{ m} - L^{ods}/2$.



Slika 36: Meritve na končnih območjih lat

Grafikoni 9 (a-h) prikazujejo višinska odstopanja v_i štirih različnih digitalnih nivelirjev na zgornjem koncu 3 m dolge invar late, pri razdaljah 3 m in 30 m, kjer območje na koncu late, ki se ga je potrebno izogibati, leži desno od vertikalne črte.



Grafikon 9: Sistematične višinske napake na zgornjem koncu late instrumentov

(a, b) Leica NA 3003, (c, d) Leica DNA 03, (e, f) Topcon DL 101C in

(g, h) Trimble/Zeiss DiNi 11 na razdaljah 3 m in 30 m

Pri krajši razdalji (3 m) ne more noben instrument v celoti izmeriti 3 metrsko lato. Vzrok za to je, da je pri končnih območjih late za dekodiranje kode razpoložljivih premalo kodnih elementov. Leicini instrumenti so v bližini končnega dela late proizvedli višinske napake, ki

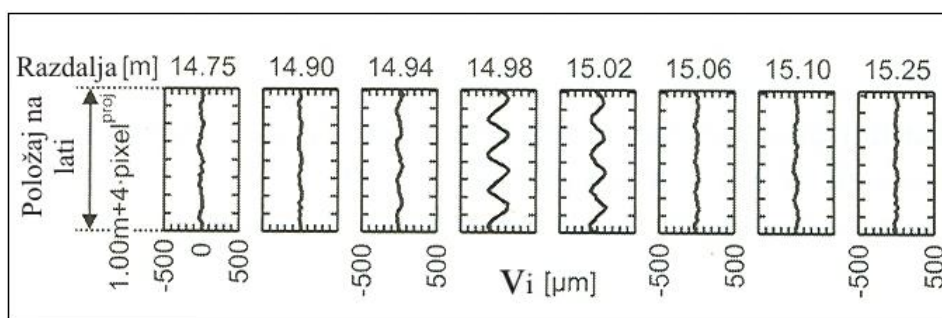
so manjše od 0.05 mm. Napake Topconovega instrumenta so znašale do 0.34 mm in so po velikosti podobne napakam, ki nastopijo v prehodnem območju med krajšimi in daljšimi razdaljami, kjer se spremeni način izvrednotenja. Pri Trimble/Zeissovem instrumentu so nastale napake do 0.15 mm, katerih vzrok naj bi ležal v optiki nivelirja. Odstopanja, ki so nastopila z 20 mm periodo kode, so nastala zaradi napačne ocenitve preslikovalnega merila.

Pri razdalji 30 m so pri nivelirju NA 3003 nastopile višinske napake z amplitudo do 0.6 mm (na spodnjem koncu late 1.5 mm) in s periodo, ki znaša približno 4.05 mm. Pri nivelirju DNA 03 so te napake znašale le nekaj več kot 0.2 mm. Pri nivelirju DL 101C je bilo, poleg odstopanj do 0.8 mm, zaznati tudi efekt podoben zobovom žage z 10 mm periodo Topconove kode. Višinske vrednosti instrumenta DiNi 11 na koncih late niso pod vplivom napak, tu uporabljeno 30 cm območje pri večjih razdaljah v glavnem ni pod vplivom optičnega popačenja. Raziskava je bila z vsemi instrumenti izvedena tudi za spodnje končno območje late, kjer so odstopanja približno enakih dimenzij kot na zgornjih koncih lat. Pri kalibraciji se ne sme izvajati meritev na obeh končnih območjih lat, tako da tu nastala sistematična odstopanja ne vplivajo na določitev merila. Končnim območjem late pa se je potrebno izogibati tudi pri najnatančnejših terenskih meritvah. Če instrument pri izračunavanju višinskih vrednosti ne zazna pravilne razporeditve kodnega vzorca, lahko nastopijo tudi grobe napake. Za večino uporabniških področij in za današnje precizne digitalne nivelirje lahko velja, da pri dolžinah pod 30 m končno območje late znaša ca. 30 cm (Woschitz, 2002).

5.2.1.4 Ciklične višinske napake (na primeru raziskav na TU Graz)

Pri določenih vizurnih razdaljah sistemi za digitalno niveliranje kažejo večja odstopanja, zaradi neugodnega geometrijskega razmerja preslikave (velikost piksla glede na kodni element). Te napake nastopijo ko se velikost enega ali večih na CCD senzor preslikanih kodnih elementov točno ujema z velikostjo enega ali večih pikslov. O ciklični višinski napaki se je poročalo že kmalu po uvedbi digitalnih nivelirjev. Pri nivelirju Wild NA 2000 je bila pri razdalji 15 m ugotovljena višinska napaka z amplitudo 0.35 mm in periodo 2.025 mm. Pri prototipskih testih so bile za vse precizne digitalne nivelirje ugotovljene ciklične višinske napake, katerih perioda p ustreza velikosti piksla ali pa je odvisna od osnovnega intervala razdelbe late.

V grafikonu 10 je prikazan razvoj ciklične napake za nivelir Leica NA 3003 pri razdalji okoli 15 m. Maksimalne višinske napake imajo amplitudo 0.15 mm in periodo od 2.025 m, nastopile pa so pri razdalji 14.98 m, kjer mnogokratnik piksla točno ustreza 2.025 mm velikemu osnovnemu kodnemu elementu. Pri rahlo spremenjeni razdalji pa so se višinski efekti komajda pojavili. Ugotovjeno je bilo, da je nepopolnost slikovnih senzorjev glavni vzrok za ta efekt (Woschitz, 2002).



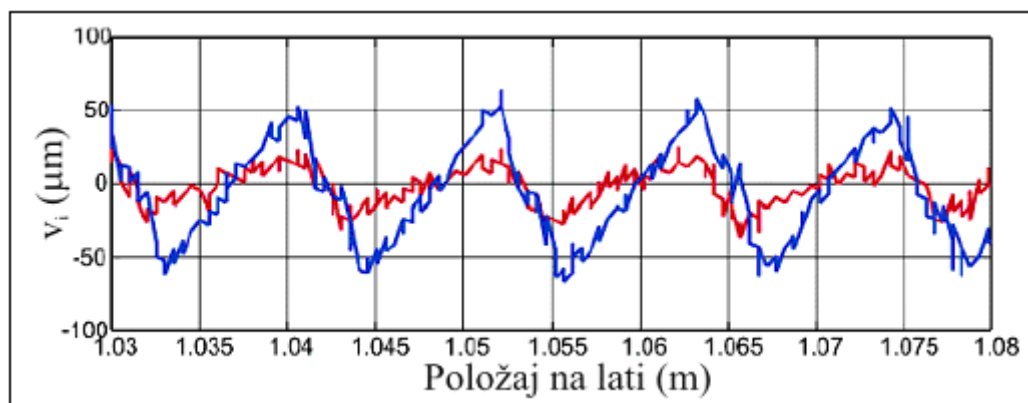
Grafikon 10: Ciklične višinske napake nivelirja Leica NA 3003 okoli razdalje 15 m

Pri sistemski kalibraciji je potrebno upoštevati vpliv cikličnih napak, tako da se meritve ne izvajajo na razdaljah za katere je znano, da se pojavlja ta efekt. Pri preciznem niveliranju se je tem območjem (± 50 cm) tudi potrebno izogibati. Pri Leicinih digitalnih nivelirjih so kritične razdalje 7.50 m, 15.00 m, 22.50 m, 30.00 m itn. Pri Topconovih instrumentih se je potrebno izogniti prehodnemu območju iz vrednotenja za bližnje in oddaljene meritve, ki je med 8-10 m. Trimbleovi instrumenti (DiNi) imajo veliko neugodnih območij, vendar pa tu nastala odstopanja niso večja od ± 0.05 mm.

5.2.1.5 Nezadostno fokusiranje (na primeru raziskav na Stanfordskem linearnem pospeševalniku - SLAC)

Pri delu z digitalnimi nivelirji je potrebno paziti na natančno fokusiranje, zato ker se pri nezadostnem fokusiranju lahko pojavijo napake pri preslikavi slike merske late na CCD vrstični senzor. Če se pri razdaljah, pri katerih nastopijo ciklične višinske napake, izvaja meritve še z nezadostno fokusirano vizuro, se vpliv teh napak lahko občutno poveča.

V grafikonu 11 so prikazani rezultati testiranja instrumenta Trimble DiNi 12 pri razdalji 10.98 m. Ta razdalja pri tem nivelirju povzroči nastanek ciklične višinske napake. Rdeča linija prikazuje primer dobrega fokusiranja, modra pa primer rahlo nefokusirane meritve.



Grafikon 11: Efekt nezadostnega fokusiranja pri nivelirju Trimble DiNi 12 na razdalji 10.98 m

5.2.2 Potek sistemske kalibracije na TU Graz

Na TU Graz z vertikalnim komparatorjem izvajajo sistemske kalibracije pod reproduktibilnimi laboratorijskimi pogoji (temperatura, vlaga, osvetlitev), z merilno negotovostjo $\pm 3 \mu\text{m}$. Meritve se lahko izvajajo na dolžinah, ki so običajne za precizni nivelman in sicer med 1.5 m in 30 m.

Po najmanj 8 urni aklimatizaciji, se sistemska kalibracija izvaja pri kratki (3 m) in dolgi (10-30 m) razdalji. Pri kratki razdalji imajo vplivi na vizurno linijo (npr. refrakcija, vplivi segrevanja) manjši učinek na rezultat in natančnost višinske meritve je boljša kot pri daljših razdaljah, ker je posamezen kodni element preslikan na več pikslov. Poleg tega je vpliv končnih območij late relativno majhen. Pri 3 m razdalji kalibracijo izvajajo z dvema invar latama. Kot rezultat se pridobi natančnost sistema, ki je vidna iz vrednosti merila.

Pri daljših razdaljah sistemske kalibracije, iz ekonomskih razlogov, izvajajo le z eno lato. V bistvu služi za testiranje merskega sistema, ker marsikateri sistem pri daljših razdaljah uporablja drugačen algoritem iz vrednotenja kot pri krajših. Koda late je slabše iz vrednotena,

zaradi česar je rešitev sistema praviloma slabša. Variacije vizurne linije pa povzročijo večje višinske napake.

Končna območja late in števila merskih točk, ki so potrebne, da se lahko določi merilo z natančnostjo 0.3 ppm, so razvidna iz preglednice 3. Iz teh vrednosti se pridobi merski interval $Is1$, ki pa ga je vendarle potrebno rahlo prirediti. To je interval, ki določa kdaj se bo izvedla meritev digitalnega nivelirja.

Preglednica 3: Merski intervali pri razdalji 3 m

Tip digitalnega nivelirja	Uporabl. območje late (m)	Št. merskih točk	Merski interval (mm)		
			Is1	Is2	Is3
Leica NA 3000/3003	0,094-2,921	138	20,503	20,363	20,633
Leica DNA 03	0,099-2,928	138	20,573	20,493	20,643
Topcon DL 101/101C	0,083-2,939	135	21,273	21,233	21,313
Trimble DiNi 10/11/12	0,175-2,849	155	17,313	17,263	17,363

Vsaka kalibracija sestoji iz meritev v dveh smereh, naprej in nazaj, zato da se lahko izključi vplive zaradi mogočih variacij vizurne linije. Merski interval je za obe meritvi enako velik. Merski položaji meritve nazaj so, v primerjavi s tistimi iz meritve naprej, premaknjeni za $Is/2$, položaj nivelirja pa pri obeh meritvah ostane nespremenjen. Če je nujno potrebna stimulacija kompenzatorja (kar se iz dosedanjih meritev ni izkazalo), se jo izvede s posebno pripravo.

Po meritvi v obeh smereh lato vzamejo in zopet vstavijo v komparator, da se izvede ponovitevna meritev z merskim intervalom $Is2$ (Preglednica 3). Če se iz obeh kalibracij določeni vrednosti merila ne ujemata, se je pojavila ali poškodba late (npr. sprijet invar trak, poškodovan vzmetni sistem) ali pa neprimeren merski interval. Za ugotovitev te napake se, z intervalom $Is3$, izvaja še tretja kalibracija. V primeru neprimerne merskega intervala se ujemata najmanj dve vrednosti merila, v primeru poškodovane late pa so vse tri različne.

Obdelava kalibracijskih meritev se izvede najprej ločeno za vsako od obeh smeri meritev, nato pa tudi skupno, ko te niso prizadete z nobenim vplivom napak (npr. variacije vizurne linije). Sistematične napake nastale zaradi poškodovanih kodnih elementov, je seveda potrebno eliminirati, s čimer pa se zaradi zmanjšanja števila merskih točk poslabša natančnost

ugotovljenega merila. To pa praktično ne igra nobene vloge, ker je lato s poškodovanimi kodnimi elementi, pri preciznih meritvah tako ali tako potrebno izločiti (Woschitz, 2002).

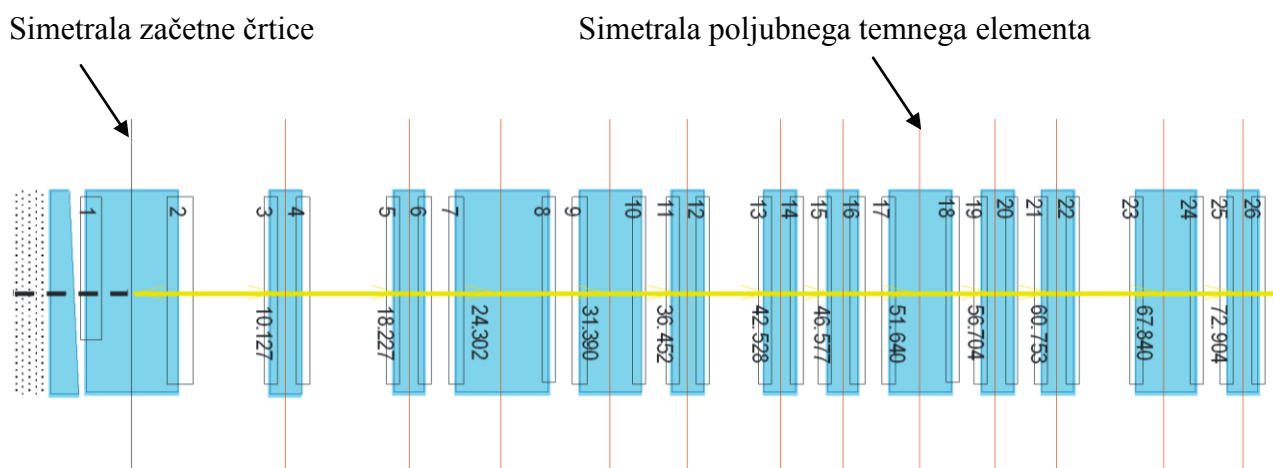
Sistemske kalibracije novejših instrumentov na TU Graz so pokazale, da se merilo sistema za digitalno niveliranje lahko določi bolje kot z 1 ppm, merilna negotovost tako določenega merila, ki je pogojena z negotovostjo komparatorja in številom obravnavanih točk, pa znaša približno ± 1 ppm.

6 REZULTAT KOMPARIANJA OZ. KALIBRACIJE

6.1 Merilo razdelbe late

Merilo razdelbe late je kazalec sistematičnega odstopanja celotne razdelbe late. To je najpomembnejša kontrola, s katero se ugotavlja razliko med izmerjenimi položaji črtic razdelbe na lati in njihovimi nominalnimi vrednostmi. Odstopanja položajev elementov razdelbe late lahko nastopijo zaradi napačnega nanosa razdelbe na invar trak, lokalnih deformacij invar traku, udarcev na katere je invar trak zelo občutljiv, staranja invar traku, posledic temperaturnega raztezanja, sprememb v sili natezanja traku ali pa zaradi neprimerne vzdrževanja in uporabe late.

Po kalibraciji invar kodne late (v obeh smereh) so določeni položaji robov vseh elementov razdelbe. Lega posamezne kodne črtice je na osnovi merilnega predpisa določena z oddaljenostjo simetrale temnega elementa, ki definira to črtico, od simetrale začetne črtice razdelbe (Slika 37). Popravki posameznih položajev robov kodnih elementov se pridobijo iz primerjave med izmerjenimi in nominalnimi položaji robov. Pri kodnih latak se popravkov posameznih kodnih elementov običajno ne podaja, ker digitalni nivelirji pri določanju višinskih vrednosti uporabljajo več kodnih elementov. Merilo kodne late je kazalec povprečne vrednosti popravkov posameznih kodnih elementov preko celotne razdelbe late. Predstavlja torej konstanto popravkov, ki pride v poštev ko je pri določevanju višinskih odčitkov uporabljena celotna razdelba late. Če pa digitalni nivelir uporablja le določen odsek late, pa je potrebno ta popravek vsaj zmanjšati.



Slika 37: Ovrednotenje merilnega predpisa razdelbe late

Zato ker so raziskave pokazale, da so ti pogreški majhni, pri invar latah s klasično črtno razdelbo ni potrebno kontrolirati vsake črtice, ampak le črtice na vsakem decimetru. Če med decimetrskima črticama ni večje razlike, potem tudi na vmesnih črticah ni pričakovati večjih razlik. Če pa se ugotovijo večje razlike med decimetrskima črticama, pa je potrebno detajlno kontrolirati tudi vmesne črtice. Popravki posameznih črtic se tabelarično zapišejo.

Predno se izmerjene vrednosti primerja z nominalnimi, jih je potrebno reducirati (popravek komparatorja, temperaturni popravek). Ker se merilo razdelbe late sešteva s temperaturnim razteznostnim koeficientom, se za merske vrednosti, na osnovi razlike med dejansko in referenčno temperaturo (običajno je 20°C), izračuna temperaturni popravek. Merilo razdelbe late se preko regresijske premice izpelje iz odstopanj izmerjenih elementov razdelbe od njihovih nominalnih položajev. V najboljšem primeru so odstopanja posameznih črtic le malenkostno razpršena okoli regresijske premice. Regresijska premica je izravnalna premica, ki se najbolj prilega danim vrednostim. Če je merilo negativno pomeni, da je lata prekratka (dejansko uporabljena dolžina traku je krajša kot jo zahteva nanešeno kodno zaporedje), če je pozitivno pa je predolga.

Popravke od nominalnih vrednosti se izračuna po enačbi (4):

$$k_{m0} = 1 + m_0$$

$$l_i = l'_i \cdot k_{m0}$$

$$v_i = l'_i - l_i \quad (4)$$

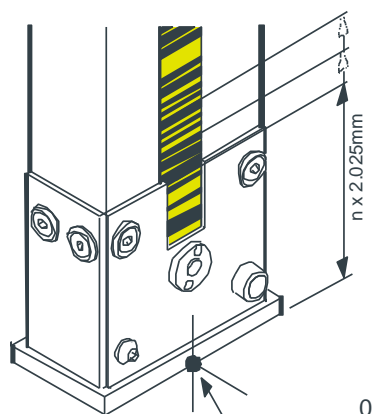
k_{m0} – multiplikacijska konstanta razdelbe late pri referenčni temperaturi 20°C

m_0 – merilo razdelbe late

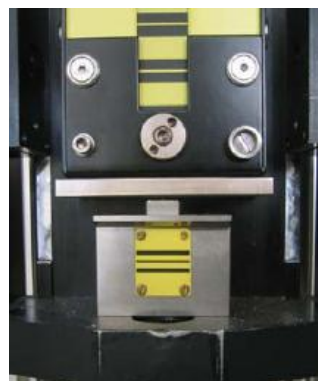
Pri določanju merila razdelbe late imajo prednost vertikalni komparatorji, ker pri njih merski rezultati niso pod vplivom upogibanja invar traku in ker se late tudi v praksi prav tako postavljajo vertikalno. Prednost vertikalnih komparatorjev pa so dokazale tudi raziskave na različnih laboratorijih.

6.2 Napaka prve črtice razdelbe late

Napaka prve črtice razdelbe late nastopi zaradi sistema vpetja invar traku pri peti late, posledica tega pa je, da se razdelba začne 5-10 cm od pete late in ne z ničlo. Prva črtica razdelbe mora biti odmaknjena od pete late (ničla razdelbe late) za točno določeno nominalno vrednost. Ta napaka nam pove koliko je napačna razdalja med peto late in prvo črtico razdelbe late. Običajno je to manjša vrednost, do nekaj desetink mm. To razdaljo se ne določa hkrati z merilom razdelbe late, ampak se jo največkrat ugotovi s pomočjo posebnega, na naslon za lato pritrjenega merila z referenčnimi črticami, ki ima točno definiran in konstanten razmak do površine naslona za lato. Položaj referenčnih črtic je določen z visoko natančnostjo. Na osnovi primerjave se izračuna srednja vrednost oddaljenosti prve črtice razdelbe od izhodišča. Popravek prve črtice late se določi glede na odmik izhodišča merila od pete late in primerjavo izračunanega položaja prve črtice s pravo vrednostjo.



Slika 38: Odmik prve črtice razdelbe

Slika 39: Naslon za peto late s posebnim merilom in peta late (levo - FGG Ljubljana,
desno - TU München)

Napaka prve črtice razdelbe late se izračuna po naslednji enačbi (5):

$$l_i = l'_i + a$$

$$a = l_i - l'_i \quad (5)$$

a – napaka prve črtice razdelbe late (adicijska konstanta)

Poda se lahko dve napaki prve črtice preciznih invar lat. Prvotno se je ugotavljal razmak med robom referenčne črtice invar traku in peto late, ta pa se je nato primerjal s pravo vrednostjo. Odčitek na invar lati (optični ali avtomatski) pa se vedno nanaša na sredino elementa

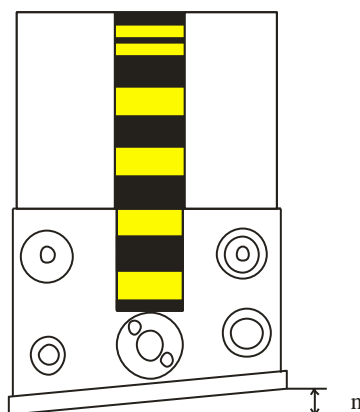
razdelbe. Če je referenčna črtica preozka ali preširoka, to neposredno vpliva na napako prve črtice. Zato je potrebno določiti napako širine referenčne črtice in jo pri popravku upoštevati.

Določitev napake prve črtice razdelbe late je odvisna od meritev položajev referenčnih črtic na lati. Če je referenčna črtica poškodovana, se napako ničelne točke po standardu DIN 18717 ne da določiti. Po tem standardu napaka ničelne točke ne sme biti večja kot 50 μm .

Ta pogrešek ni potrebno upoštevati če pri niveliranju uporabljamo le eno lato in če imamo reperje brez luknjic, ker se v teh primerih sam po sebi eliminira. To velja tudi če uporabljamo dve lati in imamo sodo število stojišč nivelirja. V ostalih primerih preciznega niveliranja pa je to napako potrebno upoštevati.

6.3 Napaka nepravokotnosti pete late

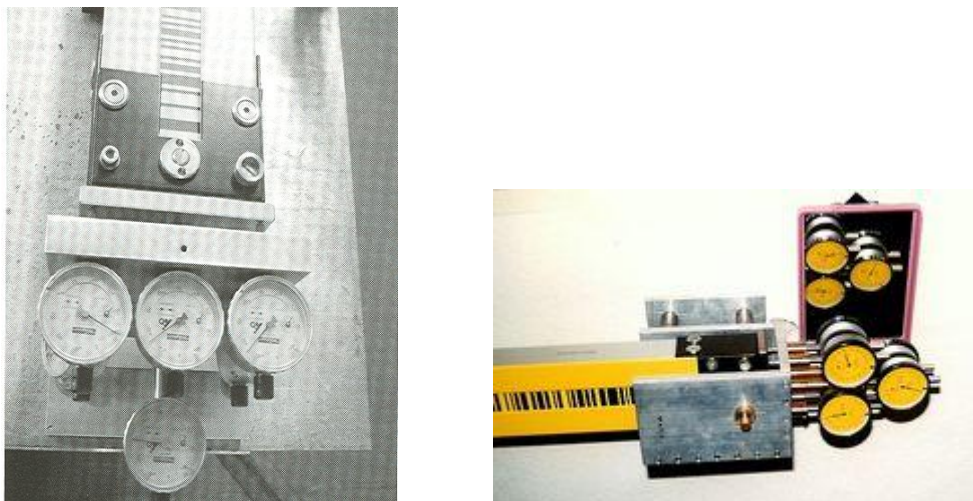
Peta late mora biti pravokotna na os razdelbe late. V nasprotnem primeru oddaljenost začetnega elementa razdelbe do različnih mest na peti late ni enaka. To napako (Δn) lahko ugotovimo s kompariranjem ali pa s postavitvijo late na točko (reper) na levem in desnem robu pete in primerjavo odčitkov obeh postavitvev.



Slika 40: Napaka nepravokotnosti pete late

Če so odstopanja med dvema poljubnima točkama na površini pete glede na ravno referenčno površino večja kot 0.15 mm, predpostavljamo napačno uravnanost ali nepravokotnost. Po

standardu DIN 18717 dovoljeno mejno območje nagnjenosti znaša 5', kar ustreza 50 μm odstopanju po celotnem področju pete late. Za odpravo te napake je potrebno lato servisirati, vpliv tega pogoška pa se pri meritvah lahko zmanjša, če se uporablja poseben nastavek (Slika 42), na katerega se lato vedno postavlja centrično.



Slika 41: Mikrometrške merske ure za določitev napake površine pete late
(levo - TU München, desno - Visoka šola Neubrandenburg)



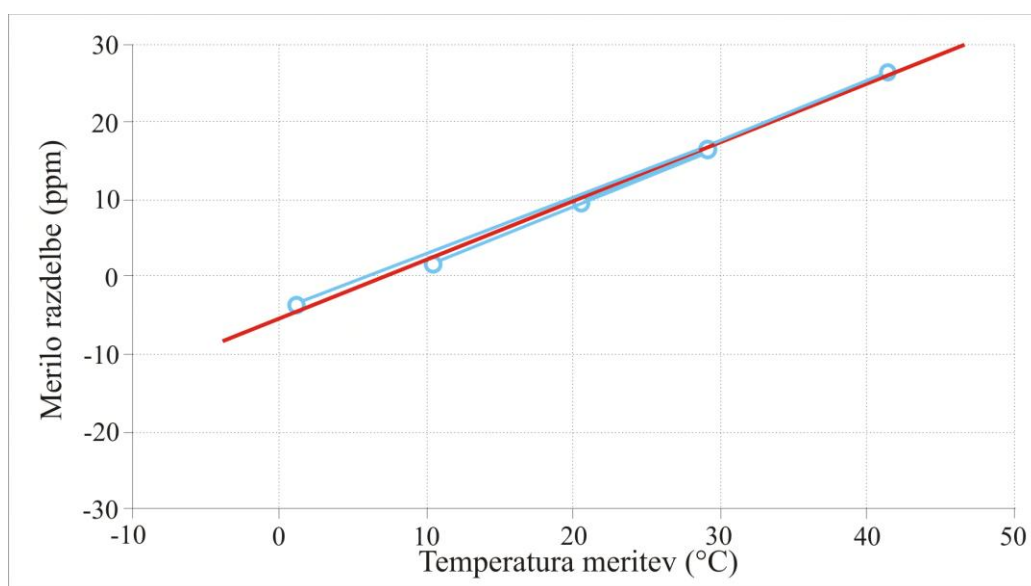
Slika 42: Nastavek za lato (žaba)

6.4 Temperaturni razteznostni koeficient razdelbe late

Pri najnatančnejših meritvah je potrebno upoštevati tudi temperaturni razteznostni koeficient, ki pa nima velikega vpliva. S spremembo temperature se spremeni dolžina invar traku

(raztezanje, krčenje), s tem pa se indirektno spremeni dolžina vzmeti, na kateri je pritrjen invar trak. Posledično se spremeni sila natezanja, kar povzroči dodatno spremembo dolžine invar traku.

Za določitev tega koeficienta se mora komparator nahajati v klimatizirani sobi, kjer se lahko regulira temperaturo. Late se po aklimatizaciji, ki traja najmanj 3 ure, pri različnih temperaturah kalibrira v obeh smereh. Naprimer na TU München se kalibracije izvedejo v naslednjem zaporedju: 30°C → 0°C → 20°C → 40°C → 10°C. Veliki temperaturni preskoki med meritvami zagotavljajo, da se lahko odkrije napake vzmetnega mehanizma za invar trak ali pa preveliko trenje med invar trakom in okvirjem late. Kot rezultat teh meritev dobimo odvisnost merila razdelbe late od različnih temperatur, prikaže pa se jo z regresijsko premico.



Grafikon 12: Temperaturni razteznostni koeficient late tipa Leica GPCL3

$$(\alpha_L = 0.76 \pm 0.03 \text{ ppm/}^\circ\text{C})$$

Po standardu DIN 18717 velja, da mora biti ta koeficient za precizne late manjši kot 1 ppm/°C. Poznavanje temperaturnega razteznostnega koeficienta pri pridobivanju merskih vrednosti nima dokončnega pomena, to pa velja tudi za samo kalibracijo, kjer se rezultati nanašajo na referenčno temperaturo. Reduciranje merskih vrednosti na referenčno temperaturo, ponavadi je ta 20°C, se s pomočjo znanih koeficientov opravi enostavno in hitro. Izkušnje iz raziskav zadnjih let so pokazale, da se z $\alpha_L = 0.75 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$, raztezanje invar traku,

da dovolj natančno prikazati. Dodatna določitev zato po mnenju strokovnjakov ni potrebna, ker je pri nakupu invar late naloga proizvajalca, da se drži specifičnih lastnosti in toleranc. Vseeno pa je smiselno tudi testiranje temperaturnega razteznostnega koeficienta, ker vnos teoretične vrednosti popravka lahko ne ustreza individualnim lastnostim posameznih lat.

Popravek zaradi temperaturnega raztezanja Δl_i se izračuna po naslednji enačbi (6):

$$\Delta l_i = l'_i \cdot \alpha_L \cdot (T - T_0) \quad (6)$$
$$l_i = l'_i + \Delta l_i$$

l'_i – položaj elementa razdelbe (mm)

l_i – popravljena vrednost

Pri preciznem niveliranju je najbolje, da se ekstremnim temperaturam izogibamo in tako ta pogrešek zmanjšamo na minimum.

7 KROŽNE KONTROLE KAKOVOSTI KALIBRACIJE PRECIZNIH

INVAR NIVELMANSKIH LAT

To so primerjave kalibracijskih rezultatov pridobljenih v različnih laboratorijih, z enakimi merjenci, pod enakimi pogoji meritev in z identičnim načinom obdelave merskih podatkov. Krožne kontrole služijo za objektivno potrditev mersko-tehničnih zmogljivosti komparatorjev, imajo osrednji pomen pri nadzoru njihove kvalitete ter bistveno prispevajo k izboljšavi kalibracijske opreme in zanesljivosti kalibracijskih meritev. Izvajajo se zato, da se pridobi numerične podatke o primernosti in zanesljivosti različnih kalibracijskih postopkov ter različne opreme za kompariranje. Naslednji pomemben razlog za izvedbo teh raziskav pa so digitalni nivelirji in testiranje učinkovitosti systemske kalibracije.

Kalibracijski rezultati različnih laboratorijev se med seboj lahko primerjajo le če obstajajo kriteriji, ki omogočajo kvalitativno oceno izračunanih merskih podatkov. Zato morajo biti predpisani kontrolni standardi, npr. zajem meteoroloških parametrov, temperaturna stabilnost, zajem robov črtic preko elktrooptične senzorike (fotoelektrični merski mikroskop ali CCD kamera), ki veljajo za vse kalibracijske laboratorije, tako da so usklajene vse kontrolne meritve.

Vseeno pa lahko pri testnih meritvah obstajajo razlike, zato ni nujno, da so rezultati različnih kalibracijskih postopkov med seboj primerljivi. Pri kalibracijskih rezultatih systemskega pregleda se združujejo vplivi, ki se nanašajo na obstoječo strukturo razdelbe kodirane late in se seštevajo z merskimi lastnostmi uporabljenega nivelirja, medtem ko so pri kalibraciji razdelbe late v ospredju izključno poročila o kvaliteti razdelbe nivelmanske late.

7.1 Primer krožne kontrole kakovosti kalibracije preciznih invar nivelmanskih lat

2003/2004

Za kalibracijski postopek so izbrali digitalna nivelirja Trimble/Zeiss DiNi 12 (Slika 43) in Leica DNA 03 (Slika 43) ter štiri precizne invar nivelmanske late (Nedo), dve s Trimble/Zeissovo kodo (LD 13) in dve z Leicino kodo (GPCL 3).



Slika 43: Trimble/Zeiss DiNi 12 (levo) in Leica DNA 03 (desno)

Zaradi zagotovitve primerljivosti podatkov med različnimi kalibracijskimi laboratoriji se je vse vrednosti, vseh kalibracijskih meritev, priredilo na referenčno temperaturo 20°C. Pri tej krožni kontroli sta bila podrobneje raziskana temperaturni razteznostni koeficient (na TU München) in merilo razdelbe late oz. sistema. Ugotovili pa so lahko tudi časovne vplive in vplive zaradi transporta, ki učinkujejo na spremembe merila.

Časovni potek kalibracijskih meritev je podan v preglednici 4. Iz nje vidimo, da se je krožna kontrola začela leta 2003 na Univerziteti v Bonnu, kjer so se nahajale tudi zaključne meritve, zato da so lahko odkrili spremembe zaradi staranja opreme za niveliranje. Kalibracijske meritve vseh drugih laboratorijev pa so izvajali v času med tema dvema meritvama. Iz preglednice je razvidno tudi, da se je vsaka leta na vsakem laboratoriju kalibrirala večkrat. Pred vsako izvedbo testnih meritev so morali kalibracijski inštituti laboratorij prilagoditi na predvidene meteorološke pogoje.

Preglednica 4: Časovni potek krožne kontrole

Laboratorij	Časovno obdobje meritev
Uni Bonn (UniBN)	02.07. - 06.07.2003
TU Graz (TUG)	13.07. - 16.07.2003
UniBw München (UniBwM)	16.07. - 18.07.2003
	24.07. - 29.07.2003
TU München (TUM)	18.07. - 23.07.2003
ETH Zürich (ETH)	23.07. - 24.07.2003
UniBN	07.08. - 08.08.2003
UniBN	03.08. - 04.08.2004
TUM	09.08. - 17.08.2004
UniBN	08.09. - 16.09.2004

Preglednica 5: Rezultati vrednosti meril pridobljenih s krožno kontrolo kakovosti 2003/2004

(H = horizontalni komparator, V = vertikalni komparator)

Krožna kontrola 2003/2004 - predstavitev rezultatov						
Inštitut		Merjenec	Trimble LD13 (DiNi 12)		Leica GPCL3 (DNA 03)	
			SN 15017 m ₀ (ppm)	SN 14821 m ₀ (ppm)	SN 9113 m ₀ (ppm)	SN 121002 m ₀ (ppm)
UniBN	Kalib. raz. late - H	1. meritev	5,5	-8,1	6,4	1,4
		2. meritev	6,1	-7,7	5,9	1,5
TUG	Sistem. kalib. - V	1. meritev	3,6	-11,1	5,7	1,1
		2. meritev	3,3	-10,7	5,5	-0,1
UniBwM	Sistem. kalib. - H	1. meritev	8,0	-6,5	9,0	6,2
		2. meritev	7,2	-7,7	7,4	3,4
	Kalib. raz. late - H	1. meritev	6,0	-5,8	5,5	1,7
		2. meritev	5,9	-5,7	6,1	1,6
TUM	Kalib. raz. late - V		4,0	-14,3	4,3	1,2
ETH	Kalib. raz. late - H		3,8	-8,4	6,4	0,7
UniBN	Kalib. raz. late - H	1. meritev	5,5	-7,3	6,6	1,2
		2. meritev	5,9	-7,4	6,1	1,7
UniBN	Kalib. raz. late - H	1. meritev	6,6	-7,0	5,7	1,4
		2. meritev	6,8	-6,9	5,8	1,6
TUM	Kalib. raz. late - V	1. meritev	3,4	-11,3	1,2	-2,1
		2. meritev	3,0	-11,6	0,8	-1,7
UniBN	Kalib. raz. late - H	1. meritev	6,1	-6,8	6,3	2,4
		2. meritev	5,9	-6,5	6,5	2,9

Pri vseh meritvah se lahko pojavijo različne sistematične napake, npr. napake pri zajemu meteoroloških parametrov, mehanske motnje pri upravljanju komparatorja, konstrukcijske napake komparatorja, spremenljiva hitrost potovanja late med postopkom snemanja, pomankljivosti fotoelektričnega mikroskopa ali CCD kamere, mehanske pomankljivosti

nivelmanske late, napake zaradi nanosa razdelbe na invar trak, itd. Iz preglednice 5 je razvidno, da ni večjih razlik med posameznimi vrednostmi meril, zato se lahko v tej krožni kontroli pridobljene rezultate označi za odlične.

Nadaljne obdelave teh rezultatov so pokazale, da se s komparatorji teh laboratorijev, lahko ugotavlja merilo in testira natančnost razdelbe kodnih nivelmanskih lat z merilno negotovostjo, ki je boljša kot 2 ppm (kar ustreza vrednosti 0.2 mm pri višinski razliki 100 m) (Schauerte, Heister, 2002).

8 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi sem podrobno in jasno predstavil kontroliranje natančnosti opreme za niveliranje. Najprej sem opisal samo opremo za niveliranje in postopek geometričnega nivelmana, kjer je predstavljen način uporabljanja te opreme. Opremo za niveliranje danes predstavljajo digitalni nivelirji in kodne nivelmanske late. Pri meritvah kjer je zahtevana največja natančnost se uporabljajo precizni nivelirji in nivelmanske late, katerih je razdelba nanešena na invar trak. Zaradi zagotovitve, da se bo ta natančnost dosegla, pa je potrebno kontrolirati natančnost opreme za niveliranje. To kontrolo obsegajo testiranja, pregledi in kompariranje oz. kalibracija instrumentarija, ki je predviden za najnatančnejše višinske meritve. Najvažnejši je postopek kompariranja oz. kalibracije, ki se izvaja v posebnih kalibracijskih laboratorijih. Rezultat tega postopka so najpomembnejši elementi, ki nam definirajo natančnost opreme za niveliranje. Pri opisu komparatorjev sem podrobneje predstavil napravo, ki se nahaja na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Predstavljeni so tudi elementi, ki podajajo natančnost opreme za niveliranje, med katerimi je najpomembnejše merilo razdelbe nivelmanske late oz. merilo sistema za digitalno niveliranje. Za nadzor kvalitete kalibracijskih postopkov in zmogljivosti komparatorjev različnih kalibracijskih laboratorijev se izvajajo krožne kontrole kakovosti kalibracij, ki se z enakim instrumentarijem, izvršijo pod enakimi pogoji. Tabelarično so prikazani rezultati teh meritev, iz njih pa je razvidno dobro ujemanje rezultatov med obema postopkoma kalibracije (kalibracija razdelbe late in sistemska kalibracija), na komparatorjih različnih inštitutov. Ti rezultati so dokaz, da je tudi sistemska kalibracija sposobna podati dovolj natančne rezultate za definiranje natančnosti opreme za digitalno niveliranje.

Oprema za kompariranje ter kalibracijski postopek, se vseskozi izpolnjujeta in razvijata. Ti postopki so s sodobnimi komparatorji postali avtomatizirani, kar pomeni, da so veliko enostavnejši in hitrejši, da so natančnejši, zaneslivejši, itd. Pojav digitalnih nivelirjev je zahteval posodobitev klasičnega kalibracijskega postopka, ki se sedaj imenuje sistemska kalibracija. Razvoj pa se tu ne bo ustavil, ampak bo potekal naprej. Mogoče so predelave komparatorjev, tako da bodo le ti istočasno omogočali izvajanje sistemske kalibracije in kalibracije razdelbe late, možno je povečanje dejavnosti komparatorjev, predvsem za

testiranje sistemov za digitalno niveliranje. Veliko pozornosti se bo posvečalo izboljšavi merilne negotovosti komparatorjev. Krožne kontrole kakovosti pa bodo zajemale vedno več inštitutov, kar bo le še izboljšalo rezultate in zanesljivost te panoge geodezije.

Kalibriranje opreme za niveliranje je pomembna dejavnost v geodeziji, kajti le kalibrirana oprema zagotavlja predpisano natančnost, ki jo zahtevajo najnatančnejši postopki niveliranja. Posebnost kalibriranja sistemov za digitalno niveliranje pa je, da se s temi postopki lahko raziskuje različne vplive, ki imajo negativen učinek pri terenskih meritvah. Z rezultati teh testiranj, se je tem morebitnim vplivom mogoče izogniti ali pa jih vsaj zmanjšati. Tako danes kalibracija ne zagotavlja le povečanja natančnosti, ampak omogoča tudi izboljšavo samega postopka niveliranja.

VIRI

Binnenbruck, B. Anwendungen der Digitalen Bildverarbeitung in der geodätischen Messtechnik.

<http://gib.geod.uni-bonn.de/downloads/publikationen/Anwendungen%20der%20Digitalen%20Bildverarbeitung%20in%20der%20geodaetischen%20Messtechnik.pdf> (25. 9. 2008).

Čadež Štrubelj, B. 2000. Kompariranje kodiranih lat na Zeissovem komparatorju. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, Inženirska geodezija.

Deumlich, F., Staiger, R. 2002. Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. Heidelberg, Wichmann: str. 255-274.

Gassner, G. L., Ruland, R. E. 2006. The SLAC Comparator for the Calibration of Digital Leveling Equipment.

<http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/pubpage?slac-pub-12181> (19. 1. 2008).

Gassner, G., Ruland, R., Dix, B. 2004. Investigations of Digital Levels at the SLAC Vertical Comparator.

<http://www.slac.stanford.edu/econf/C04100411/papers/053.PDF> (20. 1. 2008).

Gründig, L. 2004. Vermessungskunde und Photogrammetrie für Bauingenieure.

http://www.igg.tu-berlin.de/fileadmin/Daten_FGA/Bauing/VL_Skript.pdf (25. 9. 2008).

Heister, H. 2002. Zur Kalibrierung von digitalen Nivellier-Systemen. Allgemeine Vermessungs-nachrichten 2002, 11-12: 380-385.

Hennes, M., Ingensand, H. 2000. Komponentenkalibrierung versus Systemkalibrierung.

<http://www.gik.uni-karlsruhe.de/fileadmin/mitarbeiter/hennes/files/publikationen/stamp.PDF> (3. 10. 2008).

Kogoj, D. 2005. Meritve povečane natančnosti. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 7-14.

Messen Forschen Prüfen. Kalibrierung von Präzisionsnivellierlatten nach DIN 18717.

http://www.hs-nb.de/index.php?id=mfp_nivellierlatten (21. 1. 2008).

Schlemmer, H., Staiger, R., Witte, B., Schwarz, W., Foppe, K., Wasmeier, P., Wunderlich, T., Schauerte, W., Heister, H., Ingensand, H., Woschitz, H., Brunner, F.K. 2005. Allgemeine Vermessungs-nachrichten 2005, 06: str. 198-244.

Sirk, D. 2008. Niveliranje in nivelir (merjenje višinskih razlik).
http://lrt2.fe.uni-lj.si/lrtme/meri_pret/dejan_sirk_seminar.pdf (7. 2. 2009).

SLAC National Accelerator Laboratory. Vertical Comparator for the Calibration of Leveling Equipment.
http://www-group.slac.stanford.edu/met/align/Rod_Calibration/Rod_Calibration.html
(20. 1. 2008).

Takalo, M., Rouhiainen, P. 2004. On System Calibration of Digital Level.
http://www.iv2004.ethz.ch/programm/Poster/P_12_IV2004.pdf (19. 1. 2008).

Vodopivec, F. 1997. Geodezija II - višinomerstvo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 19-81.

Vodopivec, F. 2003. Geodezija II. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Vodopivec, F., Kogoj, D. 2002. Prvi komparator za kompariranje kodiranih nivelmanskih lat v Sloveniji. Geodetski vestnik 46, 1&2: 11-21.

Wasmeier, P., Foppe, K. 2006. A New CCD-based Technique for the Calibration of Leveling Rods.
http://www.fig.net/pub/fig2006/papers/ps05_02/ps05_02_03_wassmeier_foppe_0375.pdf
(19. 1. 2008).

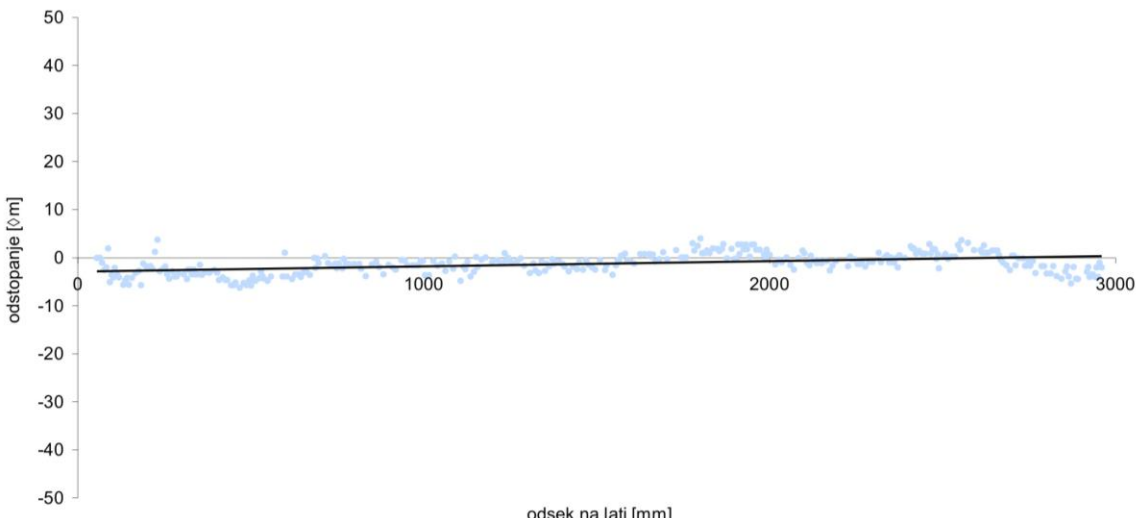

Woschitz, H., Brunner, F. K., Heister, H. 2002. Scale Determination of Digital Levelling Systems Using a Vertical Comparator.
http://www.fig.net/pub/fig_2002/Ts5-12/TS5_12_woschitz_etal.pdf (19. 1. 2008).

Zeinzinger, B. 2008. Höhenbestimmung einer 3D Trajektorie im Indoor/Outdoor Bereich.
http://info.tuwien.ac.at/ingeo/Downloads/Bachelorarbeiten/Zeinzinger_Bachelorarbeit.pdf
(10. 11. 2008).

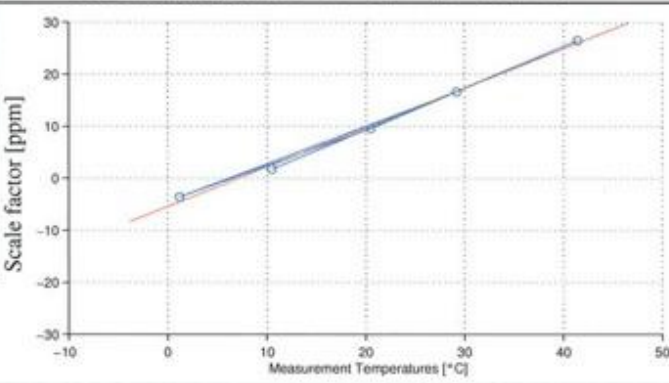
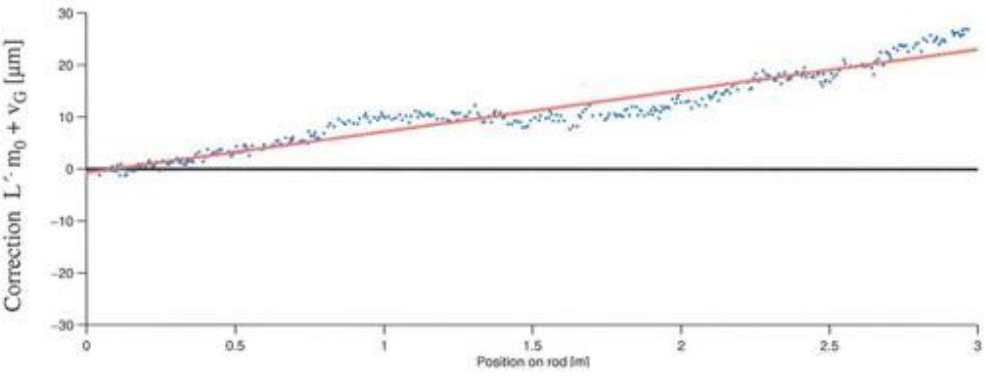

PRILOGA A: POROČILO O KALIBRACIJI INVAR LATE LEICA GPCL3-28662

POROČILO O KALIBRACIJI			
Merilo: komparator MSG1001, FGG KG		certifikat št. A359/00	
ločljivost	0.001 mm	SŽ Kalibracijski laboratorij Ravne	
nazivna točnost	0.003 mm	09.04.2002	
Kalibracija številka: 157-2/2008			
Invar lata (tip, št.):	LEICA GPCL3 28662	Datum kalibracije:	24.07.2008
Št. merjenih črt razdelbe:	339	Naročilo:	GURS
DOLOČITEV MERILA RAZDELBE		horizontalni položaj late	
<i>Popravek razdelbe late</i>	$m_0 = -4,00 \pm 0,10 \text{ ppm}$	$T_0 = 20 \text{ °C}$	
<i>Popravek pete late</i>	$l_0 = -0,024 \pm 0,007 \text{ mm}$		
Popravek odčitka na lati			
$L = l_0 + L' \left[1 + (m_0 + \alpha (T - T_0)) \cdot 10^{-6} \right]$		L' odčitek na lati [m] α linearni razteznostni koeficient razdelbe [ppm/°C] T temperatura late [°C]	
Operator	Ljubljana, 01.08.2008		
Pregledal	Predstojnik Katedre za geodezijo		
UNIVERZA V LJUBLJANI FGG - Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Oddelek za geodezijo, Katedra za geodezijo Jamova 2, 1000 LJUBLJANA, tel: (01) 4768 500 fax: (01) 4250 704, E-mail: dkogoj@fgg.uni-lj.si			

PRILOGA B: POROČILO O KALIBRACIJI INVAR LATE LEICA GPCL3-28655

<h1>POROČILO O KALIBRACIJI</h1>	
Merilo: komparator MSG1001, FGG KG	
ločljivost	0.001 mm
nazivna točnost	0.003 mm
certifikat št. A359/00 SŽ Kalibracijski laboratorij Ravne 09.04.2002	
Kalibracija številka:	156-2/2008
Invar lata (tip, št.):	LEICA GPCL3 28655
Št. merjenih črt razdelbe:	339
Datum kalibracije:	24.07.2008
Naročilo:	GURS
DOLOČITEV MERILA RAZDELBE horizontalni položaj late	
	
Popravek razdelbe late	$m_0 = 1,07 \pm 0,12 \text{ ppm}$
Popravek pете late	$l_0 = -0,005 \pm 0,005 \text{ mm}$
Popravek odčitka na lati	
$L = l_0 + L' \left[1 + (m_0 + \alpha (T - T_0)) \cdot 10^{-6} \right]$	L' odčitek na lati [m] α linearni razteznostni koeficient razdelbe [ppm/°C] T temperatura late [°C]
Operater	Ljubljana, 01.08.2008
Pregledal	Predstojnik Katedre za geodezijo
 UNIVERZA V LJUBLJANI FGG - Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Oddelek za geodezijo, Katedra za geodezijo Jamova 2, 1000 LJUBLJANA, tel: (01) 4768 500 fax: (01) 4250 704, E-mail: dkogoj@fgg.uni-lj.si	

PRILOGA C: POROČILO O KALIBRACIJI INVAR LATE LEICA GPCL3-34899

<h1 style="margin: 0;">Calibration Report</h1>	
<p>Invar rod (type, No.): GPCL3 34899</p> <p>No. of graduations measured: 5 - 345</p> <p>Contract: 08-221-508415</p> <p>Date : 16.01.08</p>	<p style="text-align: center;">Determination of the coefficient of expansion</p> <p style="text-align: center;">Horizontal calibration position</p> <p style="text-align: center;">Measurement cycle: 30 → 0 → 20 → 40 → 10 [°C]</p> <div style="text-align: center;">  </div>
<p>Coefficient of expansion: $\alpha_T = 0.76 \pm 0.03 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$</p>	
<p>Determination of the scale factor</p>	<p>Vertical calibration position, middle 16 mm of scale</p>
<div style="display: flex; justify-content: space-around;">  </div>	
<p>Scale factor: $m_0 = 7.92 \pm 1.15 \text{ ppm}$ at $T_0 = 21.3 \text{ }^\circ\text{C}$</p>	
<p>Length adjustment from the vertical calibration (position of use)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 60%;"> <p>$L = l^0 + L'[1 + (m_0 + \alpha_T(T - T_0)) \cdot 10^{-6}] + v_G$</p> <p>$l^0 = l_K^0 + v_K$</p> <p>$L'$ [m] = observed rod length v_G [m] = graduation correction</p> <p>T [°C] = temperature</p> <p>l^0 [m] = index correction (l_K^0 [m] = index correction of reference bar, v_K [m] = reference bar correction)</p> </div> <div style="width: 35%;"> <p>$l^0 = -0.005 \pm 0.006 \text{ mm}$</p> <p>$v_G = -0.001 \text{ mm}$</p> <p>$l_K^0 = -0.000 \pm 0.006 \text{ mm}$</p> <p>$v_K = -0.005 \text{ mm}$</p> </div> </div>	
<p>Technical specialist: <i>[Signature]</i></p>	<p>Munich, 23.01.2008</p>
<p>Laboratory director: <i>[Signature]</i></p>	<p>Institute director: <i>[Signature]</i></p>
 <p style="margin: 0;">Geodätisches Prüflabor am Lehrstuhl für Geodäsie der TU München Arcisstraße 21, 80290 München, Tel.: 089/289-22850, Fax: 089/289-23967</p>	