

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA ŠPORT

Športno treniranje  
Atletika

**DIAGNOSTIKA HITROSTI SPRINTERSKEGA TEKA Z  
LASERSKIM MERILNIKOM LDM-301**

DIPLOMSKO DELO

Mentor:  
prof. dr. Milan Čoh

Somentor:  
asist. Stanislav Štuhec

Recenzent:  
prof. dr. Branko Škof

Avtor dela:  
Peter Planjšek

Ljubljana, 2016

## ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju, prof. dr. Milanu Čohu, prof. šp. vzg., in somentorju, asist. Stanislavu Štuhcu, prof. šp. vzg., za vso njuno neprecenljivo pomoč ter nasvete pri pisanju diplomskega dela.

Iskrena hvala družini, ki je ves čas verjela vame. Še posebej se zahvaljujem staršem, ki so mi omogočili študij in življenje v Ljubljani.

Hvala as. dr. Andreju Pernetu za pomoč pri oblikovanju enačb.

Hvala Simonu Atelšku za pomoč pri lektoriranju.

Hvala tudi prijateljem za vzpodbudo na tej dolgi poti.

**Ključne besede:** atletika, sprint, hitrost, meritve, športna diagnostika, sistem LAVEG.

DIAGNOSTIKA HITROSTI SPRINTERSKEGA TEKA Z LASERSKIM MERILNIKOM  
LDM-301

Peter Planjšek

IZVLEČEK

Razvoj sodobnega športa je vse bolj povezan z novimi tehnološkimi, strokovnimi, znanstveno-raziskovalnimi in organizacijskimi metodami, ki prispevajo k stalnemu izboljševanju treninga. Vrhunskih rezultatov danes ni več mogoče pričakovati zgolj na osnovi izkušenj, intuicije in drugih naključnih dejavnikov. Postopki in odločitve v treningu morajo biti racionalni in kar se da učinkoviti. Za sprejemanje pravih odločitev pri treningu pa trenerji potrebujejo kakovostne informacije. Pri treningu sprinta so za pridobitev relevantnih podatkov o formi sprinterja in učinkovitosti treninga potrebne integrirane biomehanske metode. V Športno diagnostičnem centru Fakultete za šport smo razvili povsem novo metodologijo merjenja dinamike sprinterske hitrosti s pomočjo laserskega merilnika, ki omogoča meritev ključnih časovnih parametrov hitrosti v posameznih fazah sprinterskega teka.

**Key words:** athletics, sprint, velocity, measurement, sports diagnostics, LAVEG system.

## SPRINT SPEED DIAGNOSTICS USING THE LDM-301 LASER DISTANCE METER

Peter Planjšek

### Abstract

The development of modern sport is closely linked to the invention of new technological, expert, scientific, research and organisational methods that contribute to the constant training improvement. Today, a top sport performance can no longer be generated merely through experience, intuition and other random factors. The procedures and decisions related to sports training must be rational and as efficient as possible. However, coaches need high quality information to be able to take effective decisions. In sprint training it is impossible to acquire high quality information about a sprinter's form and the efficiency of the training without complex integrated biomechanical methods. In Sport Diagnostics center of Faculty of sport, we have developed a completely new method for diagnosing the dynamics of sprint speed. The laser distance meter enables key time parameters of speed to be identified in individual sprint phases.

Kazalo:

1. UVOD.....	1
2. SPRINTERSKI TEK .....	2
2.1. Faze sprinterskega teka .....	2
2.2. Struktura tekaškega koraka .....	3
3. MERJENJE HITROSTI SPRINTERSKEGA TEKA.....	6
3.1. Metode merjenja hitrosti sprinterskega teka .....	6
3.2. Primerjava metod merjenja sprinterskega teka .....	13
4. LASERSKO MERJENJE RAZDALJE.....	15
4.1. Tehnologija laserskega merjenja razdalje .....	15
4.2. Laserski merilnik LDM-301 .....	17
4.3. Natančnost in zanesljivost .....	19
4.4. Varnostni vidik uporabe laserskega merilnika .....	21
5. OPIS MERSKEGA POSTOPKA .....	24
5.1. Postavitev opreme.....	24
5.2. Kalibracija startne črte .....	26
5.3. Izvedba meritve .....	29
5.4. Dejavniki, ki vplivajo na izvedbo meritve .....	31
6. METODA OBDELAVE PODATKOV.....	34
6.1. Zajem surovih podatkov .....	34
6.2. Rezanje nepotrebnih podatkov .....	36
6.3. Odstranjevanje nepravilnih podatkov.....	37
6.4. Glajenje podatkov.....	38
6.5. Analiza sprinterske hitrosti.....	42
7. PRIMERLJIVOST LASERSKE MERITVE S TEKMOVALNIM REZULTATOM ..	51
8. ZAKLJUČEK .....	53
9. VIRI IN LITERATURA .....	54

## 1. UVOD

Vrhunski rezultati v športu niso naključni, temveč so rezultat načrtnega, kontroliranega in ciljno usmerjenega trenažnega procesa. Nedvomno sta za vrhunski rezultat potrebna tako športnik kot trener. Za vsakim vrhunskim športnikom stoji ekipa strokovnjakov različnih področij, ki vsaka na svoj način prispeva delček v mozaik športnega uspeha. Eno izmed takšnih področij predstavlja tudi športna diagnostika, ki s svojimi ugotovitvami nudi pomembne informacije športnim trenerjem in znanstvenikom. Testiranja in v širšem pogledu športna diagnostika so sestavni del trenažnega procesa. Trenerji lahko informacije, pridobljene s testiranjem, uporabijo za boljše razumevanje vplivov treninga, načrtovanje in optimizacijo procesa vadbe ter kontrolo trenutne forme športnika. V širšem smislu pa poskušamo s testiranjem in meritvami razumeti šport in športno gibanje ter to znanje uporabiti v znanstvene namene.

Napredek v tehnologiji se kaže na vseh področjih človekovega delovanja, šport pri tem ni nobena izjema. Razvoj sodobnega športa je tesno povezan z novimi tehnološkimi odkritji. Eno takšnih je tudi laserski merilnik razdalje.

V diplomskem delu bomo predstavili metodologijo merjenja sprinterske hitrosti z laserskim merilnikom, ki je na področju športne diagnostike v Sloveniji novost. Opisali bomo standardizirani postopek meritve ter metodologijo obdelave podatkov. V zadnjem delu diplomskega dela bodo na praktičnem primeru prikazani rezultati meritev z laserskim merilnikom.

## 2. SPRINTERSKI TEK

### 2.1. Faze sprinterskega teka

Tek je elementarna oblika gibanja, sestavni del mnogih športnih disciplin ter sestavni del večine atletskih disciplin. Tek na kratke proge oziroma sprint je atletska disciplina, ki predstavlja najhitrejšo obliko človeškega gibanja brez uporabe pripomočkov. V grobem lahko sprinterski tek razdelimo na:

- startno akcijo
- tekalno akcijo.

Startno akcijo predstavlja startni signal (pok pištole) ter nizki start. Izvedbo definirata startna pozicija in startna akcija. Namen starta je zagotovitev čim boljšega izhodišča za nadaljevanje gibanja v smeri naprej proti cilju. Startna pozicija je individualno pogojena, startno akcijo in uspešnost starta pa v največji meri pogojuje reakcijski čas. Na tej točki je treba poudariti, da pri merjenju hitrosti z laserskim merilnikom ne merimo reakcijskega časa, temveč hitrost sprinterja od trenutka vstopa v območje merjenja, ki ga predstavlja startna črta.

Tekalna akcija sestoji iz treh faz:

- faze pospeševanja,
- faze maksimalne hitrosti,
- faze upadanja hitrosti.

Faza pospeševanja se začne, ko sprinter zapusti startne bloke. Po mnenju mnogih trenerjev je to najpomembnejša faza sprinterskega teka. Namen faze pospeševanja je razviti čim večjo hitrost v čim krajšem času. Tukaj gre za sposobnost pospeševanja iz mirovanja do maksimalne hitrosti. Sprinterska hitrost se najbolj povečuje takoj po zapustitvi startnih blokov. Iz biomehanskega vidika je to najbolj raznolika faza. Iz koraka v korak se povečujeta frekvenca in dolžina koraka, s približevanjem maksimalni hitrosti pa se ta dva parametra stabilizirata. Prav tako se stabilizira naklon sprinterja od predklona do vzravnane položaja, skrajšujejo se oporne faze in povečujejo faze leta.

Faza maksimalne hitrosti predstavlja optimalno gibanje sprinterja in je produkt dolžine ter frekvence koraka. Oba parametra sta medsebojno obratno sorazmerno odvisna. Povečanje dolžine koraka ima rezultat v manjši frekvenci koraka, povečanje frekvence pa v krajši dolžini koraka. Dolžina koraka je v največji meri odvisna od velikosti sile, ki jo sprinter razvije na podlago, kar je posledica mišic iztegovalk kolčnega, kolenskega in skočnega sklepa. Od antropometričnih in gibalnih značilnosti sprinterja so za dolžino koraka najpomembnejše telesna višina, gibljivost kolčnega sklepa v sagitalni osi ter maksimalna amplituda med stegni. Običajno imajo višji sprinterji daljši korak ter nižjo frekvenco teka, nižji sprinterji pa krajši korak in višjo frekvenco teka. Frekvenca koraka je odvisna od delovanja centralnega živčnega sistema oziroma prevodnosti centralnega živčnega sistema v stanju maksimalne vzdraženosti.

Fazi maksimalne hitrosti sledi faza upadanja hitrosti, za katero je značilno izrazito podaljševanje dolžine koraka ter zmanjšanje frekvence koraka. To je posledica porušenega delovanja centralnega živčnega sistema ter utrujenosti mišic. Zaradi porušenega optimalnega razmerja dolžine in frekvence koraka se hitrost sprinterja zmanjša, običajno se hitrost manj zmanjša pri boljših sprinterjih, ki tudi dlje ohranjajo optimalno frekvenco in dolžino koraka.

## **2.2. Struktura tekaškega koraka**

V osnovi predstavlja sprinterski tek serijo skokov v horizontalni ravnini, v kateri se postavlja zahteva po razvijanju čim večje sile na podlago in njegovi čim večji kontinuiteti (Čoh, 2002). Tek je torej ciklično gibanje. Pod pojmom ciklično gibanje si lahko predstavljamo serijo poskokov, kjer en cikel predstavlja gibanje posamezne noge v enem tekaškem koraku. Opišemo ga lahko s serijo dogodkov znotraj koraka, ki definirajo posamezno fazo tekaškega koraka. Ti dogodki so:

- trenutek odriva odrivne noge od podlage,
- trenutek prehoda vertikale z zamašno nogo,
- trenutek sprednjega dotika s podlago,
- trenutek prehoda vertikale z oporno nogo.



Znotraj cikla tekaškega koraka lahko torej definiramo različne faze koraka. **Faza zadnjega zamaha** se začne v trenutku, ko odrivna noga zapusti podlago in traja tako dolgo, dokler zamašna noga ne preide vertikale. V tej fazi je koleno močno pokrčeno. Ko zamašna noga preide vertikalo, se začne **faza sprednjega zamaha**. Zamah z zamašno nogo ima na začetku obremenilen učinek, ko pa se koleno zaustavi v najvišji točki, pa pride do razbremenilnega učinka. Masa zamašne noge predstavlja namreč pomemben delež celotne mase sprinterja, kar pomembno pripomore k razvoju propulzivne sile. Sledi začetek aktivnega grabljenja in iztegovanja zamašne noge v kolenskem sklepu. Faza sprednjega zamaha se zaključi v trenutku dotika zamašne noge s tlemi. V trenutku dotika se začne **faza sprednje opore**. Dotik s tlemi mora biti izveden tako, da je razdalja med projekcijo centralnega težišča telesa (CTT) na tleh in točko dotika čim krajša, saj v tej fazi na sprinterja deluje sila reakcije podlage, ki deluje v nasprotni smeri gibanja. Ko oporna noga preide točko vertikale, se začne **faza zadnje opore**, ki se zaključi, ko odrivna noga zapusti podlago. V trenutku zapuščanja podlage je hitrost sprinterja v smeri naprej največja.

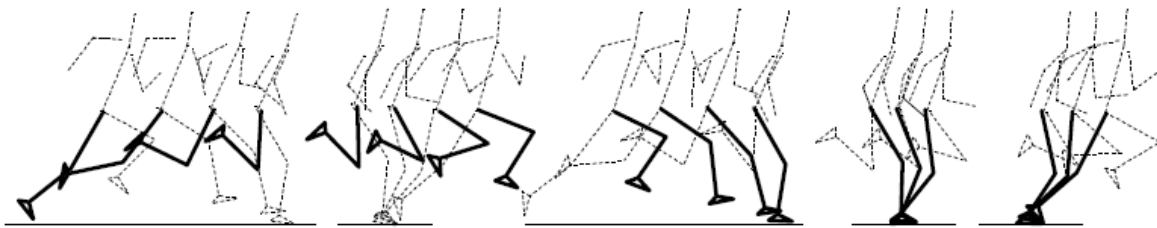
Preglednica 1: Faze sprinterskega koraka.

Naziv faze	Začetek faze	Konec faze
<b>Faza zadnjega zamaha</b>	trenutek zapuščanja podlage	trenutek vertikale zamašne noge
<b>Faza sprednjega zamaha</b>	trenutek vertikale zamašne noge	trenutek sprednjega dotika
<b>Faza sprednje opore</b>	trenutek sprednjega dotika	trenutek vertikale odrivne noge
<b>Faza zadnje opore</b>	trenutek vertikale odrivne noge	trenutek zapuščanja podlage

Iz vidika analize sprinterskega koraka je treba razumeti spreminjanje sprinterjeve hitrosti znotraj enega cikla (koraka). Sprinterjeva hitrost namreč znotraj cikla niha; hitrost je največja v trenutku odriva, **najmanjša pa v trenutku prehoda zamašne noge preko vertikale**. Znotraj cikla sprinterskega koraka lahko torej prepoznamo dva trenutka. Trenutek odriva odrivne noge od podlage je točka, v kateri je

sprinterjeva hitrost največja. Tej fazi sledi faza leta, v kateri hitrost sprinterja pada. Po fazi leta sledi kontakt s tlemi in začne se faza sprednje opore, ki traja tako dolgo, dokler zamašna noga ne preide vertikale. Ko se sprinter dotakne podlage, njegova hitrost pada. To je rezultat negativne sile podlage, ki deluje na sprinterja v fazi sprednje opore. Negativna sila podlage deluje tako dolgo, dokler točka centralnega težišča telesa (CTT) ne preide točke dotika s tlemi. Ko točka CTT preide točko dotika, začne hitrost sprinterja spet naraščati. To je trenutek, ki ga lahko prepoznamo na odčitnem grafu hitrosti.

Ta dva trenutka sta tudi osnova za izračun dolžine posameznega koraka ter frekvence korakov. Namreč, ko v trenutku maksimalne hitrosti odčitamo izmerjeno razdaljo in čas ter ju primerjamo z razdaljo in časom naslednjega odriva, dobimo čas in razdaljo posameznega koraka.



Slika1: Kinogram tekaškega koraka.

### **3. MERJENJE HITROSTI SPINTERSKEGA TEKA**

#### **3.1. Metode merjenja hitrosti sprinterskega teka**

V procesu športnega treninga predstavljajo meritve tisti segment, ki vpliva na odločanje o sredstvih, metodah in ciljih treninga. Informacije, ki jih pridobimo z meritvami, uporabimo za nadaljnje programiranje športne vadbe. Za merjenje hitrosti sprinterskega teka se uporabljajo različne metode, ki se med seboj razlikujejo po natančnosti, količini pridobljenih podatkov, zahtevnosti izvedbe meritve ter tehnološki izvedbi. V tem poglavju bomo poskušali med seboj primerjati najpogostejše metode merjenja hitrosti sprinterskega teka ter jih primerjal s sistemom LDM:

- merjenje s štoparico,
- merjenje s fotocelicami,
- merjenje s sistemom Optojump,
- kinematična analiza,
- sistem merjenja hitrosti Leica.

#### **Merjenje s štoparico**

Metoda merjenja s štoparico je zaradi nizke cene in preprostosti najbolj uporabljena metoda. Merilec začne z merjenjem, ko se merjenec začne gibati, in ustavi uro, ko merjenec s prsmi prečka ciljno črto.

Kakovost rezultatov je močno odvisna od izkušenj merilca. Glede na rezultate raziskav (Eben 2009) je ta metoda najbolj nenatančna. Ročno merjenje hitrosti je podvrženo predvsem reakcijskemu času merilca, ki se kaže pri zakasnitvi proženja štoparice. Ročno izmerjen čas na razdalji 20 jardov je v povprečju za 0,20 sekunde nižji kot elektronsko izmerjen čas (Eben 2009). Povprečen ročno izmerjen čas na razdalji 40 jardov pa je za 0,27 sekunde nižji kot elektronsko izmerjen čas s fotocelicami. Razpršenost rezultatov pri ročnem merjenju je znatno višja kot pri elektronskem merjenju. Standardni odklon pri ročno izmerjenih časih znaša 0,049 sekunde, pri elektronsko izmerjenih časih pa 0,024 sekunde.

Prednosti metode v primerjavi z LDM:

- preprosta uporaba,
- nizka cena,
- na meritev se ni treba pripravljati.

Slabosti metode v primerjavi z LDM:

- velike napake v rezultatih,
- velika variabilnost rezultatov,
- rezultati so odvisni od izkušenj in znanja merilca,
- kakovost podatkov je nizka, saj pridobimo le podatek o doseženem času na določeni razdalji. Posredno lahko izračunamo povprečno hitrost, vendar ne vemo, kako se je hitrost sprinterja spreminjala v posameznih delih sprinterskega teka.

Zaključimo lahko, da se metoda merjenja sprinterske hitrosti s štoparico zaradi svoje preprosti največ uporablja, namenjena pa je pogosti uporabi ter grobi oceni sprinterjeve pripravljenosti.

### **Merjenje s fotocelicami**

Merjenje hitrosti sprinterskega teka s fotocelicami predstavlja alternativno metodo merjenja, ki ni podvržena človeški napaki. Rezultati pri elektronskem merjenju časa s fotocelicami so počasnejši, vendar so podatki zaradi nižje razpršenosti bolj natančni kot pri ročnem merjenju časa.

Fotocelice delujejo na principu infrardečih žarkov. Celica zabeleži čas, ko se žarek prekine z roko ali z drugim delom telesa. Postavitev senzorjev na različnih razdaljah omogoča variacije v meritvah glede na število senzorjev, s katerimi razpolaga merilec, za sinhronizacijo časov so celice med seboj povezane. Za začetek meritve se lahko uporabi fotocelica oz. primeren sprožilec.



Slika 2: Merjenje sprinterske hitrosti s fotocelicami (<http://www.kwoodhambtg.weebly.com>).

Pomemben dejavnik pri meritvi s fotocelicami predstavlja del telesa, s katerim prekinemo žarek. To lahko privede do napake pri meritvi oziroma interpretaciji rezultatov. V izogib tej napaki naprednejše fotocelice uporabljajo več žarkov na posameznih vratcih. Pogoji za sprožitev signala je prekinitev vseh žarkov na posameznih vratcih.

Najpogosteje se ta metoda uporablja za merjenje časa po conah oz. odsekih tekaške steze. Postavitev sistema fotocelic je relativno lahka, prav tako izvajanje meritev. Prednost predstavlja tudi dejstvo, da so rezultati takoj na voljo trenerju in športniku.

Prednost metode v primerjavi z LDM:

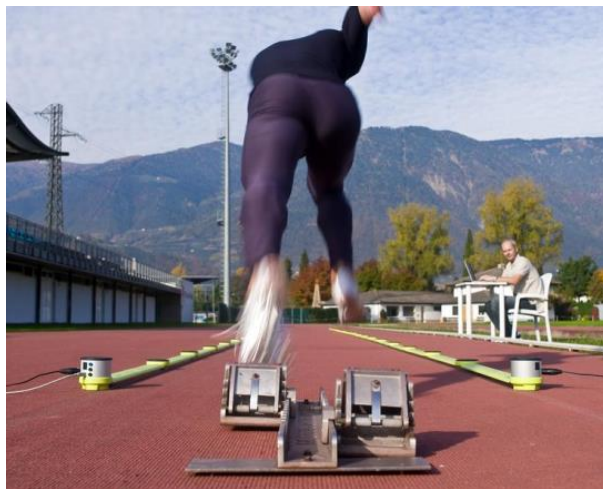
- hitrejša postavitve in izvedba meritve,
- ni treba opraviti kalibracije,
- rezultati so takoj na voljo trenerju in športniku.

Slabosti metode v primerjavi z LDM:

- ne moremo meriti hitrosti sprinterja znotraj cone (med fotocelicami),
- žarek lahko prekinemo s katerim koli delom telesa,
- manjša količina podatkov,
- metoda je podvržena napaki v povezavi s prekinitvijo žarka.

## Merjenje s sistemom Optojump

Sistem Optojump proizvajalca Microgate predstavlja metodo za merjenje kontaktnih časov ter faze leta pri sprintu. Sistem Optojump sestavljajo pari metrskih trakov, s katerimi lahko sestavimo poljubno območje merjenja. Vsak par trakov vsebuje 32 fotocelic, novejša različica sistema pa vse do 96 fotocelic. Z večanjem števila fotocelic se povečuje tudi natančnost sistema. Par trakov je sestavljen iz traka, ki služi kot oddajnik, ter traka, ki služi kot sprejemnik. Sistem je povezan z računalniškim programom, ki omogoča zajem, shranjevanje ter obdelavo podatkov.



Slika 3: Merjenje sprinterske hitrosti s sistemom Optojump (<http://www.Optojump.com>).

Slabost sistema je v tem, da na podlagi rezultatov meritve ne moremo izračunati spreminjanja absolutne hitrosti sprinterja, prav tako ne moremo izračunati časa trajanja sprinta na želeni razdalji. Mnogokrat se sistem Optojump uporablja v kombinaciji s sistemom fotocelic. Praviloma se sistem Optojump uporablja na krajših razdaljah ter v prvi vrsti služi merjenju kontaktnih časov, časov leta ter dolžine koraka. Raziskave kažejo, da merjenje hitrosti s fotocelicami ne da enakega rezultata kot merjenje hitrosti s sistemom Optojump (Dolenec, Čoh, 2009).

S sistemom Optojump merimo naslednje parametre: kontaktni čas, čas leta in dolžino koraka. Posredno lahko iz pridobljenih podatkov izračunamo hitrost, frekvenco ter dolžino koraka.

Prednosti metode v primerjavi z LDM:

- omogoča zajem podatkov o času trajanja faze leta in kontaktne faze, kar sistem LDM ne omogoča;
- omogoča natančen zajem podatkov o dolžini koraka.

Slabosti metode v primerjavi z LDM:

- iz rezultatov meritve ne moremo izračunati absolutne hitrosti sprinterja, temveč samo hitrost sprinterja v sprinterskem koraku;
- ni mogoče pridobiti podatka o hitrosti sprinterja na določeni razdalji, temveč le v posameznem sprinterskem koraku;
- postavitve sistema je zahtevnejša kot pri LDM.

## **Kinematična analiza**

Kinematična analiza je metoda analiziranja gibanja v dvodimenzionalnem (2D) ali tridimenzionalnem (3D) prostoru. Na osnovi videoposnetka z več visokofrekvenčnimi kamerami določamo 2D- ali 3D-lokacije posameznih točk telesa ter na ta način izračunamo njihovo lokacijo v prostoru. Proces imenujemo digitalizacija. Ko pridobimo lokacijo vseh točk, lahko izračunamo vse kinematične spremenljivke sprinta. Na ta način lahko izračunamo hitrost CTT sprinterja, hitrosti vseh telesnih segmentov ter kote med telesnimi segmenti v posamezni fazi teka.

Slabosti te metode sta zapleten postopek postavitve in umerjanja 3D-prostora ter zamudna obdelava podatkov. Časovno gre za najbolj zamudno metodo, saj potrebujemo za zajem podatkov 2 kameri, za obdelavo podatkov pa temu namenjeno programsko opremo. Praviloma s kinematično analizo analiziramo le posamezen segment sprinterskega teka, kot je npr. sprinterski korak oz. startna akcija. Prednosti te metode pa sta velika količina in velika natančnost pridobljenih podatkov.

Merjenje hitrosti s kinematično analizo daje enake rezultate kot merjenje z laserskim merilnikom (Harrison, Randall, Donoghue 2005).

Prednosti metode v primerjavi z LDM:

- omogoča natančen izračun hitrosti CTT sprinterja;
- večja kakovost in količina podatkov (hitrosti segmentov, koti med posameznimi segmenti itd.).

Slabosti metode v primerjavi z LDM:

- dolgotrajna in kompleksna umeritev sistema,
- dolgotrajna in kompleksna obdelava podatkov,
- višji strošek izvedbe meritve,
- meritev se ne more opraviti na celotni razdalji sprinterskega teka.

### **Laserski merilnik hitrosti**

Merjenje hitrosti z laserskim merilnikom LAVEG predstavlja dokaj novo metodo za merjenje hitrosti sprinterskega teka. Merilec umeri sistem, kar poteka relativno hitro. Med meritvijo merilec s pomočjo laserskega merilnika meri razdaljo do sprinterja. Kljub temu da lahko izmerimo razdaljo do sprinterja 1000-krat v sekundi, se v praksi uporablja merjenje s frekvenco 100 Hz.

Na osnovi pridobljenih podatkov ter kinematičnih zakonitosti sprinterskega teka merimo hitrost sprinterja v vsakem trenutku sprinterskega teka. Na osnovi kinematičnih zakonitosti sprinterskega koraka pa lahko izračunamo tudi parametre vsakega posameznega sprinterskega koraka (dolžina in frekvenca koraka).

Prednost metode je v relativno hitri postavitvi ter umeritvi sistema. Hitrost zajema in obdelave podatkov je odvisna od kakovosti programske opreme. Podatki so takoj po meritvi in obdelavi na voljo trenerju in sprinterju.



## Leica

Leica je najnovejši in najbolj natančen sistem merjenja hitrosti sprinterskega teka. Gre za napravo, ki v sebi združuje več merilnih instrumentov. Sistem deluje podobno kot merilnik LDM, vendar pri Leici laserski snop sledi športniku pri njegovem gibanju v vseh treh ravninah. Sledenje omogoča gibljiva glava, ki sledi kalibracijskemu žarku. To je zagotovljeno s prizmo (sprejemnikom), ki je pritrjena na merjenca. Podatki, ki jih dobimo, so enaki kot podatki, pridobljeni z LDM. Na športnem področju je sistem že v uporabi v alpskem in nordijskem smučanju.

Sistem ima dve slabosti: prva je visoka cena, saj gre za napredno in tehnično zelo izpopolnjeno napravo, druga pa je prizma oz. sprejemnik, ki ga je treba pritrditi na merjenca, kar pa pomeni, da meritve ne moremo izvesti v tekmovalnih pogojih.



Slika 4: Leica Nova MS50 (<http://www.leica-geosystems.com>).



Slika 5: Prizma Leica GRZ3 360° (<http://www.leica-geosystems.com>).

Prednosti metode v primerjavi z LDM:

- omogoča meritev hitrosti sprinterja v 3D-prostoru.

Slabosti metode v primerjavi z LDM:

- merjenec mora imeti nase pritrjen sprejemnik (prizmo);
- uporaba prizme onemogoča izvedbo meritve v tekmovalnih pogojih;
- občutljivost na kratkotrajno izgubo laserskega kontakta;
- visoka cena;
- zaradi nedodelane tehnologije sledenja je velika možnost izgube žarka.

### 3.2. Primerjava metod merjenja sprinterskega teka

Hitrost teka se lahko meri na različne načine. Sprinterski tek je v tem pogledu specifičen, saj zahteva visoko natančnost merjenja. Različne metode merjenja se razlikujejo med seboj predvsem v:

- natančnosti podatkov,
- količini podatkov,
- zahtevnosti izvedbe meritve,
- zahtevnosti obdelave podatkov,
- znanju, potrebnem za izvedbo meritve,
- ceni.

Preglednica 2: Pregled različnih metod merjenja sprinterske hitrosti. Natančnost, količina podatkov, zahtevnost meritve in obdelave podatkov ter cena so opredeljeno z ocenami 1–5.

<b>Metoda</b>	<b>Natančnost</b>	<b>Količina podatkov</b>	<b>Zahtevnost meritve</b>	<b>Zahtevnost obdelave podatkov</b>	<b>Cena</b>
Štoparica	★	★	★	★	★
Fotocelice	★★	★★	★★	★	★★
Optojump	★★★	★★★	★★★	★★	★★★
Kinematična analiza	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★
LDM	★★★★★	★★★★★	★★★	★★	★★★★★
Leica	★★★★★	★★★★★	★★	★★★	★★★★★

V grobem lahko metode merjenja sprinterske hitrosti razdelimo v dve skupini. V prvo skupino spadajo tiste, ki jih lahko pri svojem delu vsakodnevno uporabljajo trenerji in so razmeroma preproste za uporabo. Za delo z njimi ni potrebnega posebnega strokovnega znanja. Zaradi cene so dostopne širši množici športnikov in trenerjev.

Natančnost in količina podatkov sta manjši in služita grobemu načrtovanju športne vadbe.

V drugo skupino metod štejemo naprednejše metode, ki so zahtevnejše tako z vidika izvedbe meritve kot tudi z vidika zahtevnosti obdelave podatkov. Poimenujemo jih lahko laboratorijske meritve. Za delo s takšnimi metodami sta za upravljanje potrebne izkušnje in posebno znanje. Po navadi gre za tehnološko napredne sisteme, ki dosegajo visoke cene. V nasprotju s terenskimi metodami dajejo te metode široko paleto informacij, ki jih pri svojem delu uporabljajo trenerji in športniki. Namenjene so tistim športnikom in trenerjem, ki dosegajo vrhunske rezultate in potrebujejo kakovostne informacije o športni formi ter učinkovitosti procesa treninga. Zaradi visoke natančnosti so te informacije pomembne tudi za znanstveno-raziskovalno delo. V to skupini uvrščamo sistem Optojump, laserski merilnik hitrosti LDM, kinematično analizo ter sistem Leica.

Laserski merilnik hitrosti LDM uvrščamo med naprednejše metode, namenjene vrhunskim športnikom. Gre za sistem, kjer z razmeroma malo vloženega truda pridemo do široke palete kakovostnih informacij, ki jih lahko uporabimo v procesu treninga. Sistem LDM je tako natančen kot najbolj natančne metode merjenja (kinematična analiza). Iz vidika uporabe je enostavnejši, hitrost obdelave podatkov pa je mnogo hitrejša.

## 4. LASERSKO MERJENJE RAZDALJE

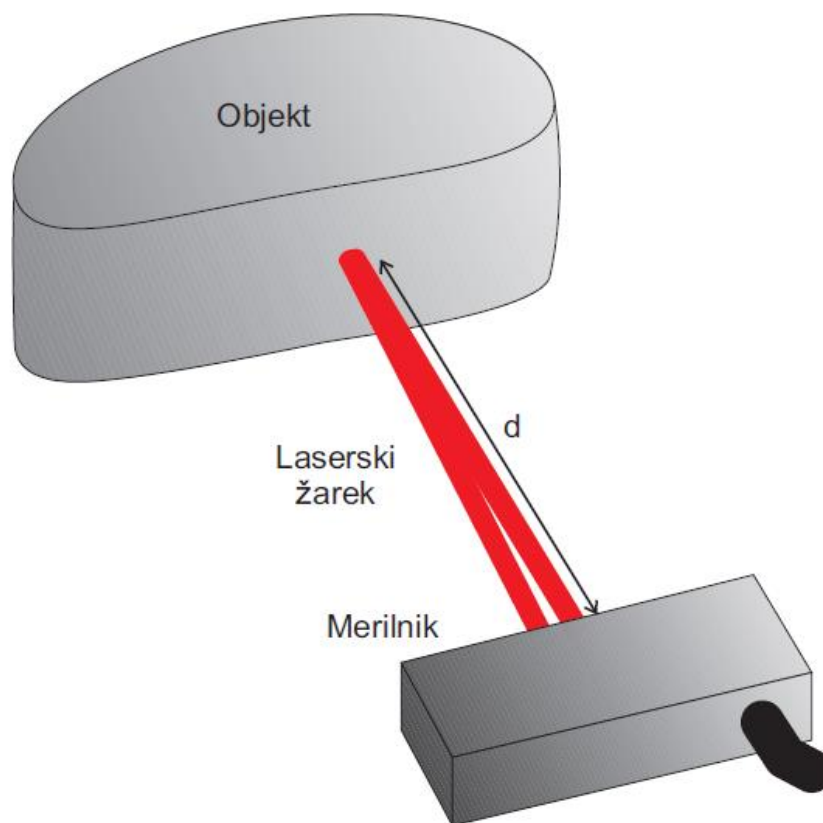
### 4.1. Tehnologija laserskega merjenja razdalje

Svetloba je elektromagnetno valovanje, kjer se električno in magnetno polje širita po prostoru. Svetloba, ki jo lahko zaznavamo s človeškim očesom, ima valovno dolžino med 400 nm (vijolična svetloba) in 700 nm (rdeča svetloba). Svetlobo z valovno dolžino nižjo od 400 nm imenujemo ultravijolična (UV) svetloba, svetlobo z valovno dolžino višjo od 700 nm pa imenujemo infrardeča (IR) svetloba.

Hitrost svetlobe v vakuumu znaša 300.000 km/s. V ostalih medijih je hitrost svetlobe zmanjšana za količnik, ki ga imenujemo lomni količnik. Lomni količnik predstavlja razmerje med hitrostjo širjenja elektromagnetnega valovanja v vakuumu in hitrostjo v snovi. V zraku znaša lomni količnik 1.0003, kar pomeni, da hitrost svetlobe pri merjenju na zemeljski površini ostaja podobna hitrost v vakuumu. Frekvenca svetlobe ostaja na poti skozi različne snovi nespremenjena, spreminjata se pa hitrost in valovna dolžina.

Laser je angleška kratica za *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. V prevodu pomeni ojačenje svetlobe s stimulirano emisijo sevanja. Je naprava, v kateri se kopiči energija, ki se v danem trenutku sprosti v zelo močnem svetlobnem curku. Laserska svetloba se od ostalih svetil loči predvsem po naslednjih lastnostih: usmerjenost, jakost, enobarvnost in koherenca ali ubranost. Laser je vir svetlobe, ki je ozek, ima nizko divergenco žarka ene valovne dolžine in koherentni žarek (Rejc 2008). Enobarvnost pomeni, da ima svetloba zelo oster spekter. Divergenca predstavlja kot, pod katerim se širi laserski snop. Divergenčni kot laserskega žarka je praviloma majhen. Zaradi majhnega divergenčnega kota lahko laserski žarek natančno usmerimo v cilj.

Laserski merilnik razdalje je elektronska naprava, ki meri razdaljo med napravo in ciljem. Prevladujoča metoda za lasersko merjenje razdalje na civilnem področju se imenuje »Time of flight«. Naprava pošilja laserski pulz v ozkem žarku do objekta merjenja, senzor na napravi pa zazna odboj od predmeta. Naprava meri čas, ki ga odbiti žarek potrebuje, da ga zazna senzor. Čas odboja, pomnožen s hitrostjo svetlobe, nam poda natančno razdaljo do objekta.



Slika 6: Princip delovanja merilnikov "Time of flight" (Rejc 2008).

Za pravilno delovanje je najpomembnejše, da je elektronsko vezje dovolj hitro, da pravilno izmeri čas leta svetlobe, saj je njena hitrost 299.792.458 m/s. S tega stališča so merilniki problematični zaradi merilne negotovosti, saj proizvajalci navajajo negotovost  $\pm 5$  mm na razdalji 1 m brez povprečenja, s povprečenjem pa se merilna negotovost nekoliko izboljša (Rejc 2008).

Natančnost meritve in maksimalno daljino določajo svetlobna odbojnost merjenca, oblika ploskve merjenca, kot, pod katerim usmerjamo snop na tarčo, tehnične lastnosti laserja, hitrost elektronike ter optimalni vremenski pogoji. Svetlobna odbojnost je pomemben dejavnik meritve razdalje z laserskim merilnikom. Pri vpadu laserskega žarka na objekt se namreč del energije odbije, drugi del pa se absorbira. Iz vidika merjenja razdalje je pomemben predvsem del energije, ki se odbije od objekta in ga zazna senzor na merilniku. Rdeča ali bela barva dobro odbijata žarek v nasprotju s črno barvo, ki ga absorbira. V ta namen pri merjenju sprinterja uporabljamo svetle drese. Če merjenec uporablja temni dres, si pri meritvi pomagamo s trakom svetle barve, ki si ga merjenec namesti okoli pasu. Ker je oblika merjenca nepravilna, gre v primeru sprinterskega teka za difuzni odboj. Laserski

žarek se namreč bolje odbije od ravne tarče kot pa od kompleksne oblike. Optimalen kot merjenja je 90 stopinj. Na ta dejavnik pri sprinterskem teku ne moremo vplivati. Prav tako pomemben vpliv imajo vremenski pogoji. Dežne kaplje in preveč svetlobe vplivajo na rezultate meritve v obliki večje razpršenosti izmerjenih rezultatov.

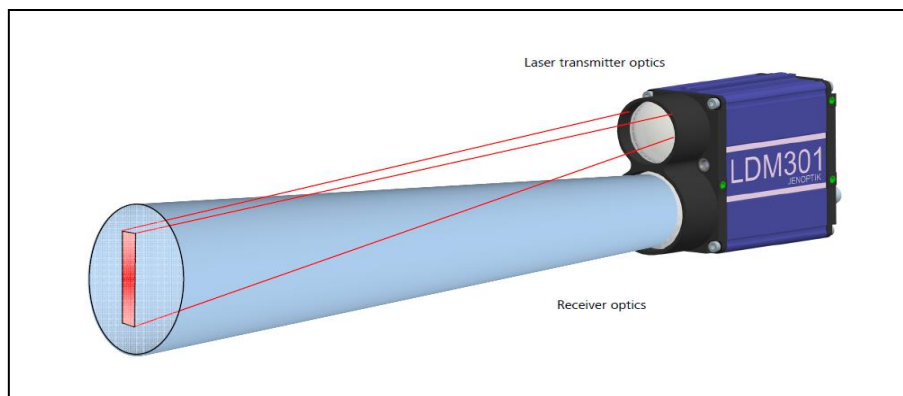
## 4.2. Laserski merilnik LDM-301

Laserski merilnik LDM-301 je bil v osnovi narejen za uporabo v industriji. Šele kasneje pa se je izkazal za uporabnega tudi v športu. Merjenje hitrosti teka z laserskim merilnikom omogoča neinvazivno merjenje hitrosti in razdalj, kar v praksi pomeni, da lahko športnik teče v tekmovalnih pogojih brez senzorjev ter ostalih naprav, ki bi ga ovirali pri samem izvajanju gibanja.



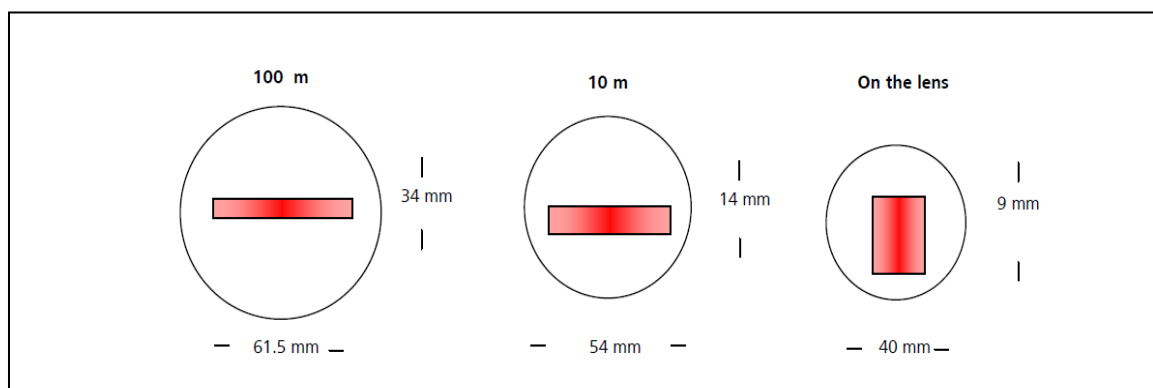
Slika 7: Laserski merilnik razdalje LDM 301.

Klasifikacija laserjev omogoča hitro in grobo ločevanje laserskih naprav z vidika varnosti uporabnikov. Merilni laserski žarek LDM-301 je kategoriziran s kategorijo 1. To pomeni, da je neškodljiv v normalnih pogojih uporabe.



Slika 8: Povprečni kot, pod katerim se širi laserski snop, znaša 1,7 mRad.

Laserska svetloba za merjenje razdalje deluje na valovni dolžini 905 nm in ni vidna s prostim očesom, zato je naprava opremljena tudi s kontrolnim laserjem (t. i. »pilot laser«) za jasno identifikacijo točke merjenja. Kontrolni laser deluje na valovni dolžini 650 nm, kar pomeni, da se nahaja v vidnem območju človeškega vida. Če pri uporabi ne želimo uporabljati kontrolnega laserja, je na napravi nameščen dodaten optični merilec. Optični merilec z rdečo piko nadomešča kontrolni laser in olajšuje umerjanje ter izvedbo meritve. Povezava z osebnim računalnikom je zagotovljena preko serijskega vhoda RS232 ali RS422. Povprečni kot, pod katerim se širi laserski žarek, znaša, 1,7 mRad.



Slika 9: Povprečni kot, pod katerim se širi laserski snop, znaša 1,7 mRad.

V industriji se laserski merilnik LDM-301 uporablja v različne logistično-proizvodne namene:

- za izogibanje trkom med žerjavi,
- za merjenje razdalje med plovili v pristaniščih in kontrolo hitrosti,
- za merjenje zasedenosti skladiščnih kapacitet za razsuti tovor,
- za natančno merjenje položaja kontejnerjev na tovornih ladjah in pristaniščih.

Preglednica 3: Tehnični podatki laserskega merilnika.

Merilno območje za razdaljo	<i>0,5–300 m</i>
Natančnost	<i>+/- 20 mm</i>
Čas merjenja	<i>0,5 ms z možnostjo do 0,1 ms</i>
Merilno območje za hitrost	<i>0 m/s–100 m/s</i>
Merilni laser	<i>905 nm infrardeč, kategorija 1, EN 60825-1:2003-10</i>
Kontrolni laser	<i>650 nm (vidno rdeč), kategorija 2</i>
Merilno območje za hitrost	<i>0–100 m/s</i>
Delovna temperatura	<i>–40 °C do +60 °C</i>
Povezava	<i>preko RS232 ali RS 422</i>
Teža z ohišjem	<i>800 g</i>
Življenjska doba	<i>100.000 h pri 25 °C</i>
Velikost	<i>136 mm × 57 mm × 104 mm</i>

### 4.3. Natančnost in zanesljivost

Po podatkih proizvajalca je merilna negotovost na razdalji do 300 metrov 20 mm. Ugotovitve različnih avtorjev te podatke potrjujejo tudi v praksi.

Harrison, Randall in Donoghue so ugotavljali natančnost in zanesljivost merjenja razdalje z laserskim merilnikom. Raziskave lahko razdelimo v dva dela. Prvi del raziskav se ukvarja z laserskim merjenjem razdalje na statičnem objektu in ugotavljanje natančnosti ter zanesljivosti meritev. Drugi del raziskav je osredotočen na merjenje športnikove hitrosti v gibanju in primerjavo z ostalimi metodami merjenja hitrosti.

Harrison je ugotavljal natančnost delovanja laserskega merilnika na statičnih objektih, postavljenih na različnih razdaljah. Z laserskim merilnikom razdalje je dvanajstkrat izmeril razdaljo različno oddaljenih objektov na razdaljah 10, 30, 50 in 70 metrov. Čas posamezne meritve je znašal 2 sekundi. V preglednici so prikazani rezultati meritev in statistična obdelava podatkov. Iz vseh izmerjenih podatkov je izračunal povprečno vrednost. Standardni odklon je statistični kazalec, s katerim merimo razpršenost podatkov. Iz preglednice vidimo, da se s povečevanjem razdalje merjenja povečuje



tudi standardni odklon oziroma razpršenost podatkov. Absolutna napaka v odstotkih je vseh meritvah znašala pod 0,05 %.

Preglednica 4: Analiza napake podatkov iz laserskega merilnika na razdaljah 10 m, 30 m, 50 m in 70 m.

<i>Razdalja (m)</i>	<i>Povprečna izmerjena vrednost (m)</i>	<i>SD +/-mm</i>	<i>Napaka (mm)</i>	<i>Napaka (%)</i>
10	9,99570	20,43	-4,30	0,0430
30	29,98690	20,62	-13,10	0,0436
50	50,00466	20,72	4,66	0,0093
70	70,00949	21,71	9,39	0,0135

V drugem delu raziskave so avtorji primerjali dve metodi merjenja sprinterske hitrosti. Prva metoda je bila merjenje z laserskim merilnikom, druga pa je bila videoanaliza. Vzorec merjencev je predstavljalo 10 izkušenih tekačev. Vsak merjenec je izvedel 3 teke, vsakega pri različni hitrosti po lastnem občutku (počasi, srednje in hitro). Vsak merjenec je tekel skozi območje, kjer se je izvajala meritev videoanalize z dvema videokamerama s frekvencama 100 Hz in 50 Hz. To območje je bilo na razdalji 23,5 m od startne črte in je bilo dolgo 3 metre. Istočasno se je tekače merilo z laserskim merilnikom razdalje. Laserski merilnik razdalje je bil 2 metra za startno črto na višini 1,37 metra. Videoanaliza se je izvajala s pomočjo reflektivnih markerjev, nameščenih na bokih sprinterjev (*trochanter major*). V raziskavi so primerjali povprečno hitrost v območju merjenja, izračunano s pomočjo videoanalize in z laserskim merilcem razdalje

Avtorji ugotavljajo, da napaka pri merjenju razdalje z laserskim merilnikom na razdaljah, krajših od 70 m, znaša manj kot 0,05 %, zaradi česar laserski merilnik predstavlja natančen in zanesljiv način merjenja razdalje. Primerjava merjenja hitrosti z laserskim merilnikom in videoanalizo je pokazala, da sta z vidika natančnosti laserski merilnik in videoanaliza izpostavljena podobnim napakam pri merjenju. Kot problem avtorji izpostavljajo nezmožnost sinhronizacije podatkov iz laserja in videoanalize. Prav tako avtorji izpostavljajo problem merjenja hitrosti na markerju, nameščenim na boku, in laserjem, usmerjenim v ledveni del hrbta. To naj bi bila tudi glavna razloga za manjše odstopanje podatkov pri merjenju hitrosti.

Preglednica 5: Primerjava izmerjene hitrosti med laserskim merilnikom in kamerama s 50 in 100 Hz.

<i>Hitrost teka</i>	<i>Tek</i>	<i>50-Hz kamera (m/s)</i>	<i>100-Hz kamera (m/s)</i>	<i>Laserski merilnik (m/s)</i>
<i>Počasen tek</i>	<i>1</i>	<i>4,67 +/- 0,80</i>	<i>4,66 +/- 0,79</i>	<b><i>4,68 +/- 0,78</i></b>
	<i>2</i>	<i>4,84 +/- 0,88</i>	<i>4,91 +/- 0,93</i>	<b><i>4,91 +/- 0,89</i></b>
	<i>3</i>	<i>4,93 +/- 0,89</i>	<i>4,97 +/- 0,89</i>	<b><i>5,01 +/- 0,88</i></b>
<i>Srednje hiter tek</i>	<i>1</i>	<i>6,26 +/- 0,50</i>	<i>6,55 +/- 0,66</i>	<b><i>6,34 +/- 0,56</i></b>
	<i>2</i>	<i>6,45 +/- 0,67</i>	<i>6,49 +/- 0,51</i>	<b><i>6,32 +/- 0,50</i></b>
	<i>3</i>	<i>6,47 +/- 0,81</i>	<i>6,34 +/- 0,55</i>	<b><i>6,31 +/- 0,63</i></b>
<i>Hiter tek</i>	<i>1</i>	<i>7,30 +/- 0,58</i>	<i>7,45 +/- 0,62</i>	<b><i>7,29 +/- 0,50</i></b>
	<i>2</i>	<i>7,28 +/- 0,52</i>	<i>7,44 +/- 0,65</i>	<b><i>7,28 +/- 0,65</i></b>
	<i>3</i>	<i>7,23 +/- 0,60</i>	<i>7,53 +/- 0,60</i>	<b><i>7,32 +/- 0,47</i></b>

Avtorji študije zaključujejo, da laserski merilnik razdalje predstavlja natančno in zanesljivo metodo merjenja razdalje. Lasersko merjenje razdalje je tako kot videoanaliza izpostavljeno visokofrekvenčnim šumom. Iz vidika merjenja hitrosti in pospeškov izpostavljajo pomen optimalnega filtriranja in glajenja podatkov, pridobljenih z laserskim merilnikom. Na podatke je treba gledati kot na množico sekvenčnih rezultatov in ne kot na posamezno meritev, izmerjeno z laserskim merilnikom. Kot glavno prednost pred merjenjem hitrosti z videoanalizo navajajo hitrejšo obdelavo podatkov, ki so lahko takoj po meritvi na voljo trenerju in športniku.

#### **4.4. Varnostni vidik uporabe laserskega merilnika**

Klasifikacija laserjev omogoča hitro in grobo ločevanje laserskih naprav z vidika varnosti uporabnikov. IEC (International Electrotechnical Commission) je določil kategorije laserskih virov, ki se razlikujejo glede na valovno dolžino, oddajno moč in predvsem nevarnosti za uporabo. Laserski viri so razdeljeni v sedem kategorij, kjer večja številka pomeni večjo nevarnost za poškodbe uporabnikov. Standard, ki ureja področje laserskih merilnikov, se imenuje IEC 60825-1 (*Varnost laserskih proizvodov – Klasifikacija opreme, zahteve in navodila za uporabo*).

V Sloveniji je to področje zakonsko urejeno z *Uredbo o varovanju delavcev pred tveganji zaradi izpostavljenosti umetnim optičnim sevanjem* izdano v Uradnem listu RS, št. 24/05 z dne 30. 4. 2010.

Preglednica 6: Klasifikacija laserskih izdelkov glede na standard IEC 60825-1.

<b>Laser Class</b>	<b>Class Evaluation</b>
<b>Class 1</b>	Lasers that are safe under reasonably foreseeable conditions of operation, including the use of optional instruments for intrabeam viewing.
<b>Class 1M</b>	Lasers that emit in the wavelength range of 302.5 nm to 4,000 nm which are safe under reasonably foreseeable conditions of operation, but may be hazardous if the user employs optics within the beam. Laser emission level is equal to Class 1.
<b>Class 2</b>	Lasers that emit visible radiation in the wavelength range from 400 nm to 700 nm where eye protection is normally afforded by aversion responses, including the blink reflex.
<b>Class 2M</b>	Lasers that emit visible radiation in the wavelength range from 400 nm to 700 nm, the same as Class 2, where eye protection is normally afforded by aversion responses including the blink reflex. However, viewing of the output may be more hazardous if the user employs optics within the beam.
<b>Class 3R</b>	Lasers that emit in the wavelength range from 302.5 nm to 106 nm where direct intrabeam viewing is potentially hazardous.
<b>Class 3B</b>	Lasers that are normally hazardous where direct intrabeam exposure occurs. Viewing diffuse reflections is normally safe.
<b>Class 4</b>	Lasers that are also capable of producing hazardous diffuse reflections. They may cause skin injuries and could also constitute a fire hazard. Their use requires extreme caution.

Iz vidika uporabe laserskega merilnika LDM-301 je pomembno izpostaviti dve stvari. Merilni laser, s katerim merimo razdaljo do merjenca, deluje na valovni dolžini 905 nm in je kategoriziran s kategorijo 1. Laserski sistemi kategorije 1 so opredeljeni kot varni za oči. Daljša izpostavljenost sevanju ni škodljiva za zdravje. Kontrolni laser deluje na valovni dolžini 650 nm in je kategoriziran s kategorijo 2. Laserski sistemi

kategorije 2 predstavljajo laserske sisteme v vidnem spektru človeškega vida in niso nevarni zdravju ob krajši izpostavljenosti, manjši od 0,25 sekunde.



Slika 10: Merilna optika, nameščena na laserskem merilniku razdalje.

Kontrolni laser se lahko uporablja za usmerjanje merilnega laserja v merjenca. Uporaba kontrolnega laserja ni obvezna. Na Fakulteti za šport v ta namen ne uporabljamo kontrolnega laserja, temveč uporabljamo namensko optično napravo, s katero uspešno nadomeščamo funkcijo kontrolnega laserja. Optična naprava je nameščena na vrhu laserskega merilnika in vsebuje leče za povečavo ter marker z rdečo piko.

## 5. OPIS MERSKEGA POSTOPKA

### 5.1. Postavitev opreme

Oprema za izvedbo meritve sestoji iz:

- laserskega merilnika LDM-301,
- stojala z možnostjo nastavljanja višine laserskega merilnika,
- pravokotne letvice za kalibracijo startne črte,
- prenosnega računalnika za zajem podatkov,
- prenosne baterije za terensko merjenje.



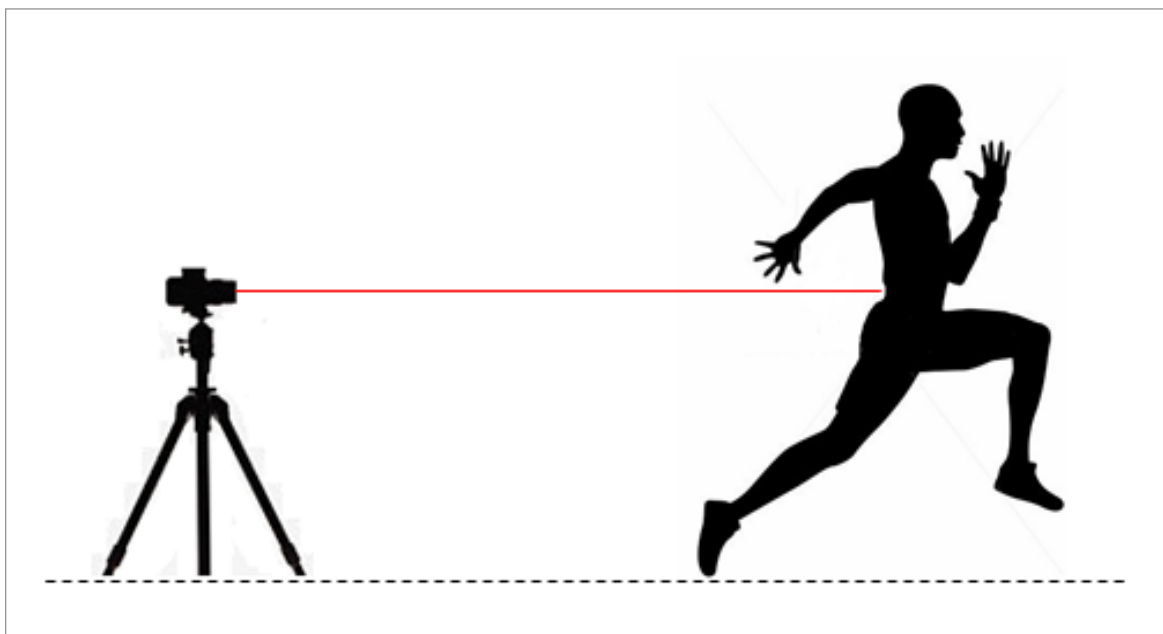
Slika 11: Oprema za lasersko merjenje hitrosti.

Ključni postopki za pravilno izvedbo meritve so:

- nepremična postavitve stojala,
- nastavitve višine laserskega merilnika,
- umerjanje prostora (kalibracija startne črte).

Stojalo postavimo na primerno razdaljo pred startno črto. Pri postavitvi moramo paziti, da je stojalo dovolj oddaljeno od sprinterja, da mu omogoča nemoteno izvedbo startne akcije. Praviloma se stojalo postavi nekje 5 do 10 metrov pred startno črto, odvisno od pogojev, ki jih imamo na voljo. Stojalo mora biti postavljeno na sredini tekaške steze. Posebej je treba biti pozoren, da je stojalo čim bolj stabilno, saj vsak premik povzroči napako v meritvi. Območje okrog stojala in laserskega merilnika zavarujemo s plastičnim trakom.

Višina postavitve laserskega merilnika je odvisna od višine merjenca oz. merjencev. Višji kot so merjenci, višje moramo nastaviti višino laserskega merilnika. Laserski snop moramo usmeriti v ledveni predel hrbtenice merjenca. Razlog za to je bližina CTT (centralno težišče telesa). Harrison, Jensen in Donoghue (2004) so v svoji raziskavi uporabili višino laserskega merilnika 1,37 metra.

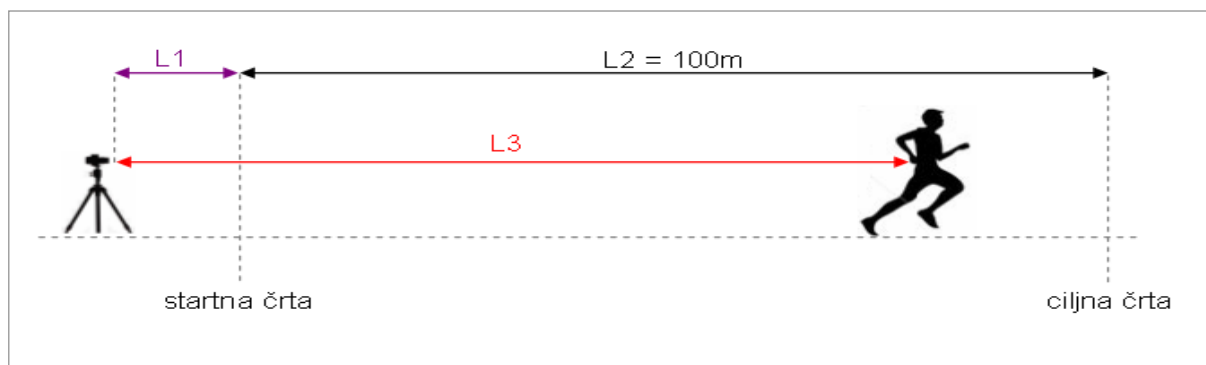


Slika 12: Laserski snop mora biti usmerjen v ledveni del hrbtenice.

Laserski merilnik postavimo na sredino tekaške steze.

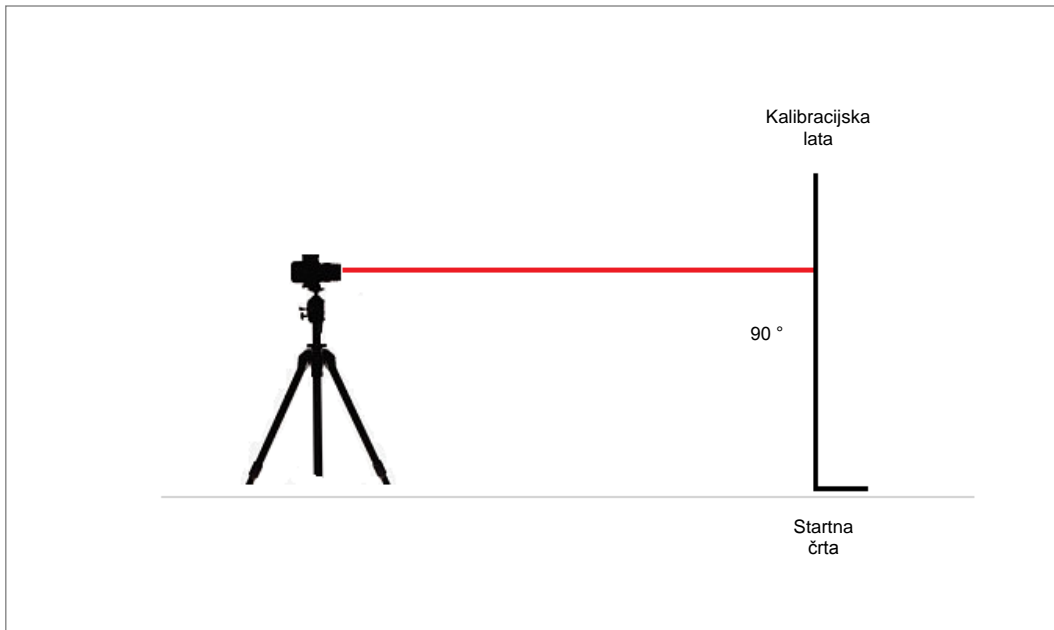
## 5.2. Kalibracija startne črte

Pred meritvijo je treba sistem kalibrirati. Kalibracija je potrebna zaradi določitve cone merjenja. Laser namreč izmeri razdaljo do objekta 100-krat v sekundi. Iz samih podatkov tako ne bi bilo mogoče natančno določiti časa začetka sprinta zaradi gibanja sprinterja v startnih blokih. Z določitvijo cone merjenja določimo območje, v katerem bomo merili parametre sprinterskega teka. Kalibracija se izvede tako, da na startno linijo postavimo pravokotno letvico in z laserjem izmerimo razdaljo do letvice (L1). To meritev imenujemo tudi kalibracijska meritev. Ta razdalja predstavlja osnovo za meritev. Ko sprinter preide izmerjeno kalibracijsko razdaljo, vstopi v cono meritve (L2). Meritev traja tako dolgo, dokler je sprinter v coni meritve (L2). Ko merjenec preide ciljno črto z ledvenim delom hrbta, zapusti cono merjenja.

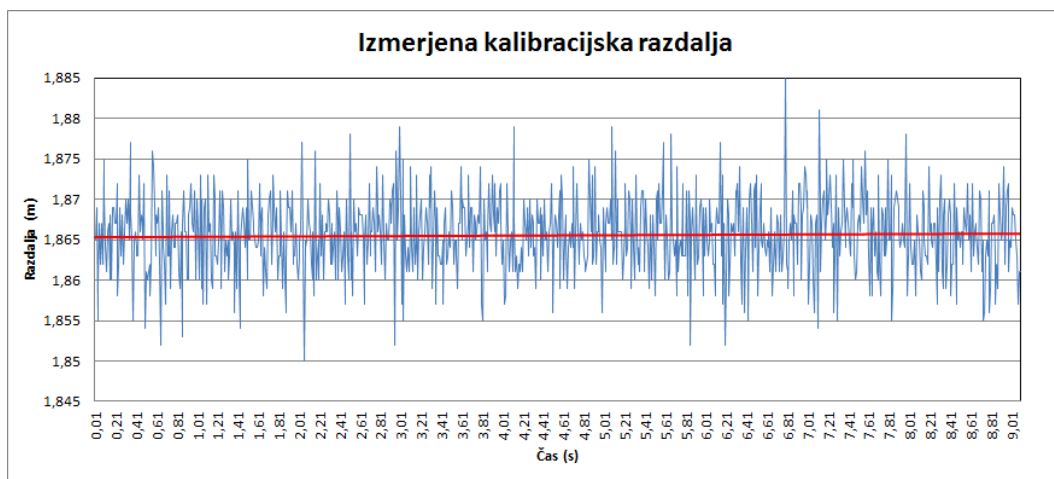


Slika 13: Shematski prikaz meritve sprinta na 100 m. L1 – kalibracijska razdalja, L2 – cona merjenja razdalje, L3 – razdalja meritve laserja. Dejansko razdaljo sprinterja do laserja izračunamo kot razliko med razdaljo L3 in L1.

Kalibracijo startne črte izvedemo tako, da na startno črto postavimo pravokotno kalibracijsko letvico. Kalibracijska letvica je pravokotna letvica z vgrajeno vodno tehtnico. S kontrolnim laserjem snop usmerimo v kalibracijsko lato pod kotom 90 stopinj in z merilnim laserjem izvedemo približno 3-sekundno meritev razdalje. Med kontrolno meritvijo moramo zagotoviti čim manj premikanja kalibracijske late. Prav tako moramo biti pozorni na pravilen položaj vodne tehtnice. Merilnik poda ustrezno število podatkov, ki so odvisni od časa meritve in frekvence merjenja. Iz izmerjenih podatkov izračunamo aritmetično sredino, ki jo uporabimo kot razdaljo do letvice (L1).



Slika 14: Postavitev opreme za postopek kalibracije startne črte.



Slika 15: Kalibracijska meritev merjenja razdalje do kalibracijske late. Referenčna razdalja je aritmetična sredina (rdeči graf) pridobljenih podatkov (moder graf).

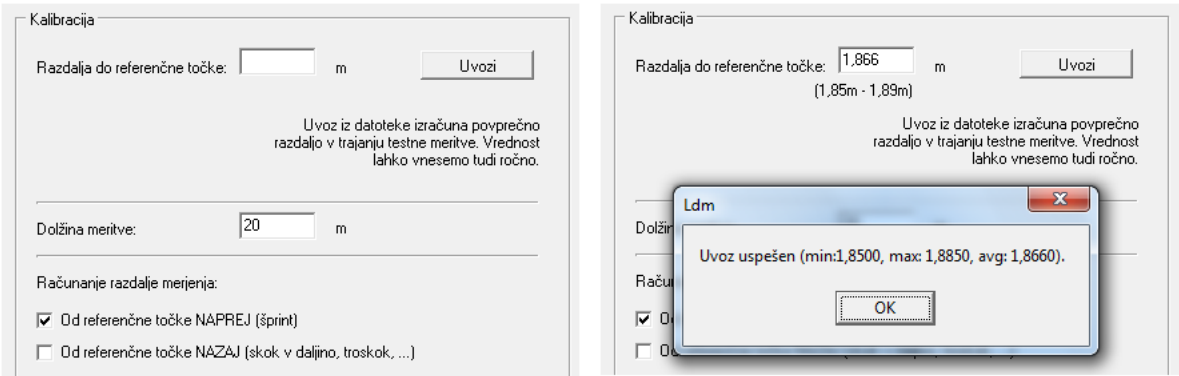
Ciljne črte ni treba kalibrirati, saj razdaljo do ciljne črte izračunamo kot seštevek razdalje L1 in L2. Po izvedbi kalibracije startne črte merilnika ne smemo več premikati. V ta namen stojalo merilnika pritrdimo na tla, da zagotovimo čim boljšo stabilnost sistema. Območje okrog merilnika označimo s trakom, da preprečimo premike laserskega merilnika. Če merilnik in stojalo nehote premaknemo, je treba postopek kalibracije startne črte ponoviti.



$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Enačba 1: Enačba za izračun kalibracijske razdalje (aritmetične sredine). N predstavlja število odčitkov, ki jih naredimo z laserskim merilnikom razdalje.

Iz podatkov, pridobljenih s kalibracijsko meritvijo, izračunamo aritmetično sredino. Ta podatek predstavlja razdaljo merilne naprave do startne črte. Aritmetično sredino izračunamo zaradi razpršenosti podatkov pri meritvi. V programu za obdelavo podatkov je kalibracijska razdalja del nastavitve posamezne meritve. Kalibracijsko meritev uvozimo v program za nastavitve meritve. Program izračuna največjo, najmanjšo in povprečno izmerjeno razdaljo. Povprečna izmerjena razdalja predstavlja referenčno točko za razdaljo do startne črte (L1). V primeru, ko uporabimo enako kalibracijsko meritev za več meritev tekov, lahko uvoženo nastavitve prenesemo na več izbranih meritev.



Slika 16: Uvoz kalibracijske meritve v program. Po izbiri datoteke CSV program avtomatsko izračuna razdaljo do referenčne točke, ki predstavlja razdaljo laserskega merilnika do startne črte.

### 5.3. Izvedba meritve

Zraven merilca, ki upravlja laserski merilnik razdalje, je za izvedbo meritve potreben še operater osebnega računalnika. Operater na računalniku sproži začetek zajema podatkov iz laserskega merilnika in ustavi zajem podatkov, ko je meritev zaključena. Delo merilca in operaterja računalnika mora biti usklajeno. Operater sproži beleženje podatkov približno nekaj sekund pred začetkom meritve in ga ustavi nekaj sekund po tem, ko merjenec preide ciljno črto. Podatke, pridobljene pred in po meritvi v fazi obdelave podatkov, izločimo.



Slika 17: Postavitev laserskega merilnika ter organizacija meritve z laserskim merilnikom.

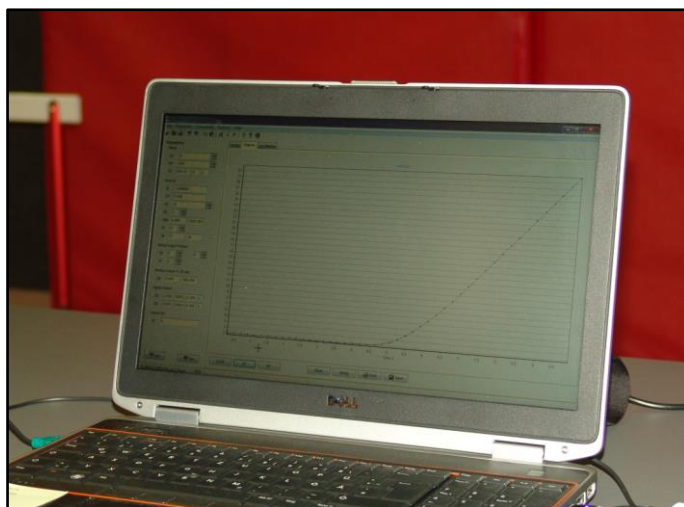
Pred meritvijo opozorimo sodelujoče osebe pri meritvi, da ne prehajajo tekaške steze, dokler merjenec ne preide ciljne črte. Takšno dejanje namreč prekine laserski snop in podatki, izmerjeni v času trajanja prekinitve, se izgubijo.

Merjenec lahko začne s tekom samostojno ali na startno povelje. Merilec ves čas meritve spremlja merjenca s kontrolnim laserjem skozi optični okular na laserskem merilniku. Laserski snop mora biti ves čas usmerjen v ledveni del hrbta. Še posebej pozoren mora biti merilec v fazi starta, saj je takrat gibanje sprinterja najbolj eksplozivno. V kasnejših fazah merilec prilagaja položaj laserja skladno z gibanjem

sprinterja levo-desno po tekaški stezi. Ko merjenec preide ciljno črto, operater na računalniku ustavi beleženje podatkov.

Zaradi različnih dejavnikov lahko pride pri meritvi do napake. Najpogostejša napaka je prekinitev laserskega snopa z roko. Ta napaka je najbolj pogosta v fazi startne akcije, saj je takrat gibanje sprinterja najbolj eksplozivno. Druga najpogostejša napaka je izguba laserskega »kontakta« s sprinterjem zaradi gibanja sprinterja levo-desno v smeri proti cilju. V fazi obdelave podatkov se takšne napake izkažejo kot nenadna sprememba hitrosti zaradi hitre spremembe izmerjene razdalje. Če prekinitev laserskega snopa ni predolga, lahko z ustreznimi postopki (opisanimi v poglavju *metoda obdelava podatkov*) pridobljene podatke prilagodimo. Če je izguba podatkov prevelika, označimo meritev kot neregularno in postopek meritve ponovimo.

Po končani meritvi se na računalniku izriše grafični prikaz izmerjene razdalje, prav tako pa je mogoče pregledati izmerjene razdalje. Če je med meritvijo prišlo do napak, se odstopanja jasno prikažejo na grafičnem prikazu razdalje v odvisnosti od časa. Na ta način lahko operater na računalniku takoj po meritvi ugotovi, ali je bila meritev uspešna ali ne. Operater na računalniku shrani datoteko s pridobljenimi podatki. Datoteka je v tekstovni obliki in vsebuje podatke o času in izmerjeni razdalji z milimetrsko natančnostjo. Količina podatkov je odvisna od časa trajanja meritve in frekvence merjenja. Pri frekvenci merjenja 100 Hz za vsako sekundo meritve pridobimo 100 podatkov o izmerjeni razdalji. Shranjene podatke lahko obdelamo takoj ali kasneje v laboratoriju.



Slika 18: Prikaz grafa izmerjene razdalje v odvisnosti od časa.

Na tem mestu je treba posebej omeniti vpliv položaja nizkega starta na natančnost meritve. Zaradi visokega položaja bokov v položaju »pozor« merilec ne more meriti razdalje do ledvenega dela hrbtenice. Zaradi tega pri nizkem startu merimo sprinterja v zadnjico, šele ko se sprinter med startno akcijo dvigne iz startnih blokov, usmerimo laserski snop v ledveni predel hrbtenice. Zaradi različnih tehnik starta torej prihaja pri meritvi do manjše napake. Posledica tega dogodka je popačen podatek o razdalji in posledično o hitrosti sprinterja. Na grafu hitrosti je prikazan kot nenaden dvig hitrosti sprinterja.

#### **5.4. Dejavniki, ki vplivajo na izvedbo meritve**

Glede na metodologijo laserskega merjenja razdalje lahko ločimo dejavnike meritev v dve kategoriji. Prvo kategorijo predstavljajo dejavniki, na katere nimamo vpliva, v drugo kategorijo pa lahko uvrstimo dejavnike, na katere lahko vplivamo oziroma jih lahko kontroliramo.

Dejavniki meritev, na katere nimamo vpliva:

- vremenski pogoji,
- gibanje sprinterja levo-desno,
- prekinitve laserskega snopa z roko.

Iz vidika delovanja laserja vremenski pogoji predstavljajo okolje, v katerem izvajamo meritve. V izmerjenih podatkih se kaže velik vpliv vremenskih pogojev. Dež in megla predstavljata šum v meritvi, prav tako prevelika sončna svetloba. V tem primeru govorimo o večji razpršenosti podatkov, ki se kaže v večji standardni deviaciji izmerjene razdalje. Merilec prav tako nima vpliva na gibanje sprinterja levo-desno znotraj tekaške steze in prekinitve laserskega snopa z roko. Ta problema sta posebej izrazita pri manj kakovostnih merjencih, kažeta pa se v izgubi laserskega kontakta z merjencem. Delno lahko problem gibanja levo-desno olajšamo s povečanjem razdalje do startne črte in tako zmanjšamo amplitudo premikanja laserskega merilnika na stativu.

Dejavniki meritev, na katere lahko vplivamo:

- kakovost stojala,
- barva majice,
- ohlapnost majice,
- kakovost kalibracije,
- kakovost merilca,
- ustrezna organizacija meritve,
- programska oprema.

Za izvedbo meritve potrebujemo ustrezno stojalo. Zaželeno je čim večje in masivno stojalo s tremi nogami. Pomembno je, da ima stojalo čim večjo površino in s tem večjo stabilnost. Da preprečimo premikanje stojala, uporabimo lepilni trak, s katerim prilepimo stojalo na tla, območje okrog merilnika pa zavarujemo s trakom. Stojalo mora imeti vrtljivo glavo za vpetje merilne naprave. Vrtljiva glava z ročajem za usmerjanje točke laserskega žarka mora biti gibljiva v vseh treh oseh in imeti možnost nastavitve trdote gibljivosti v vseh treh oseh.

Laserski merilnik razdalje deluje po metodi odboja laserskega snopa od merjenca. Pri vpadu svetlobnega snopa na merjenca se del snopa odbije, del pa absorbira. Za natančnost meritve je pomemben del snopa, ki se odbije. Iz tega vidika je pomembno, da uporabljamo visoko reflektivne materiale, ki absorbirajo čim manj energije. V ta namen je priporočljiva uporaba svetlih dresov, odsvetuje se pa uporaba črnih oziroma temnejših dresov. Prav tako je pomembna ohlapnost dresa oziroma majice. Plapolanje majice je nezaželeno, saj popači podatke, zato je priporočljiva uporaba tesnih in oprijetih dresov. Če merjenec uporablja temni dres ali ohlapno majico, uporabimo svetel trak, ki ga pritrdimo merjencu okoli pasu.

Med kalibracijo moramo dosledno spoštovati metodologijo kalibriranja startne črte. Merilna ekipa mora delovati usklajeno, medsebojno kontrolirati postopke kalibracije in opozarjati na morebitne nepravilnosti v postavitvi sistema.

Kakovost merilca se kaže v pravilnem predvidevanju gibanja merjenca in pravočasnem odzivanju na spremembe gibanja. Prav tako lahko glede na kakovost merjenca merilec ustrezno predvidi morebitne težave pri meritvi. Pomembno vlogo imajo izkušnje merilca, ki se kažejo v manj neuspešnih meritvah.

Merilna ekipa vodi, usmerja in izvaja meritev. Obvezna člana merilne ekipe sta merilec, ki upravlja z laserjem, ter operater na računalniku. Odvisno od organizacije meritve lahko merilno ekipo sestavljata še pomočnik za umerjanje startne črte in starter. Pred meritvijo merilna ekipa poskrbi za postavitve, priklop ter umerjanje laserskega merilnika s startno črto. Ustrezno pritrdi laserski merilnik na tla ter s trakom zavaruje območje okrog laserskega merilnika. Pred meritvijo je treba merjence seznaniti s postopkom meritve, ostale prisotne pri meritvi pa opozoriti, da ne prehajajo območja merjenja.

## 6. METODA OBDELAVE PODATKOV

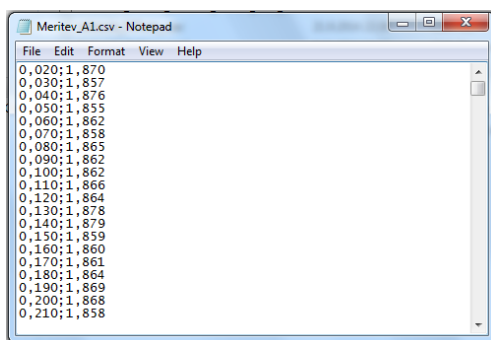
Zajem in obdelavo podatkov lahko razdelimo na več korakov:

- zajem surovih podatkov,
- rezanje nepotrebnih podatkov pred in po meritvi,
- izračun hitrosti sprinterja,
- izločanje neustreznih podatkov,
- glajenje oz. filtriranje podatkov,
- analiza teka (faze, maksimalna hitrost, grafi, vmesni časi, cone).

V sodelovanju z Inštitutom za šport in Športno diagnostičnim centrom na Fakulteti za šport smo razvili programsko opremo, ki olajša in pospeši vse faze obdelave in kontrole podatkov. Vse faze obdelave podatkov bomo natančno razložili in opisali v naslednjih poglavjih.

### 6.1. Zajem surovih podatkov

Merilec preko osebnega računalnika sproži začetek in konec odčitavanja podatkov z laserskega merilnika hitrosti. Laserski merilnik preko serijska vhoda RS232 na osebem računalniku kreira tekstovno datoteko s podatki o meritvi. Merilnik vsako stotinko ali tisočinko sekunde (odvisno od nastavitve frekvence merjenja) izmeri razdaljo do sprinterja in jo zapiše v tekstovno datoteko. V praksi se za meritve vedno uporablja nastavev odčitavanja podatkov na 100 Hz. Pridobljena datoteka vsebuje podatke o času in izmerjeno razdaljo v milimetrih. Izmerjene neobdelane podatke imenujemo tudi surovi podatki (angleško raw data).



Slika 19: Oblika izhodne datoteke s surovimi podatki.

Na osnovi pridobljenih podatkov lahko izračunamo hitrosti sprinterja. Hitrost gibanja sprinterja izračunamo tako, da pretečeno razdaljo delimo s časom, potrebnim za pot. Ker pa so podatki izmerjeni z laserskim merilnikom hitrosti s frekvenco 100 Hz, lahko za vsako stotinko posebej izračunamo hitrost sprinterja.

$$v = \frac{s}{t}$$

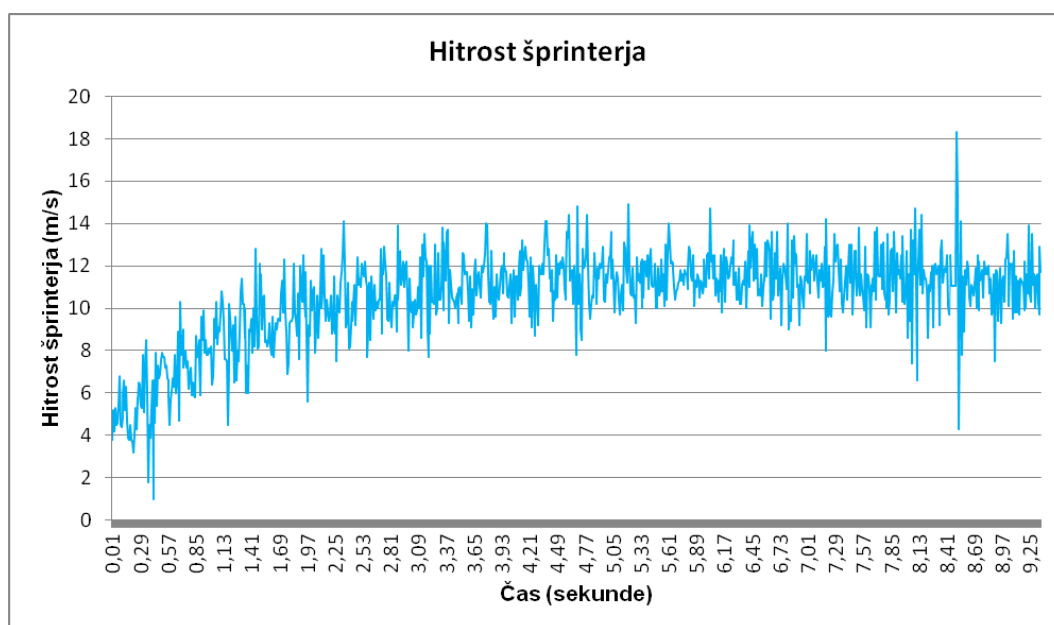
$v$  – hitrost  
 $s$  – pot  
 $t$  – čas

Enačba 2: Enačba za izračun hitrosti.

Na ta način izračunamo hitrost sprinterja v vsakem trenutku teka. To naredimo tako, da izračunamo opravljeno pot v posameznem časovnem intervalu. Pot predstavlja sprememba izmerjene razdalje z laserskim merilnikom hitrosti, čas pa predstavlja čas med posameznima odčitkoma (frekvenca meritve).

$$v_i = \frac{s}{t} = \frac{s_{i+1} - s_i}{t_{i+1} - t_i}$$

Enačba 3: Izračun hitrosti iz pridobljenih podatkov (s – pot, t – čas).



Slika 20: Hitrost sprinterja v odvisnosti od časa (surovi podatki).

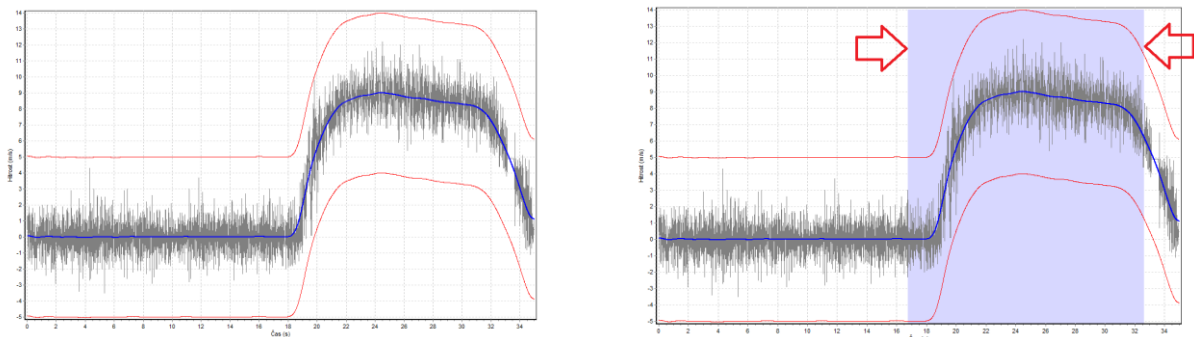


Tako pripravljene podatke so osnova za nadaljnjo obdelavo. Ker z odčitavanjem podatkov začnemo, preden začne sprinter z gibanjem, lahko del nepotrebnih podatkov izločimo iz nadaljnje obdelave.

## 6.2. Rezanje nepotrebnih podatkov

Kot smo omenili že v poglavju izvedbe meritve, operater na računalniku začne z odčitavanjem podatkov, preden sprinter začne z gibanjem in nadaljuje z odčitavanjem še nekaj sekund po prečkanju ciljne črte. Zaradi tega datoteka s podatki vsebuje tudi podatke, ki z vidika rezultatov niso bistveni. Takšne podatke moramo v fazi obdelave podatkov najprej ustrezno prepoznati in jih tudi odstraniti.

Najlažje se začetek gibanja merjenca prepozna na grafu hitrosti merjenca v odvisnosti od časa. Tukaj lahko preprosto ocenimo, kdaj je sprinter začel z gibanjem in kako dolgo je sprinterski tek trajal.



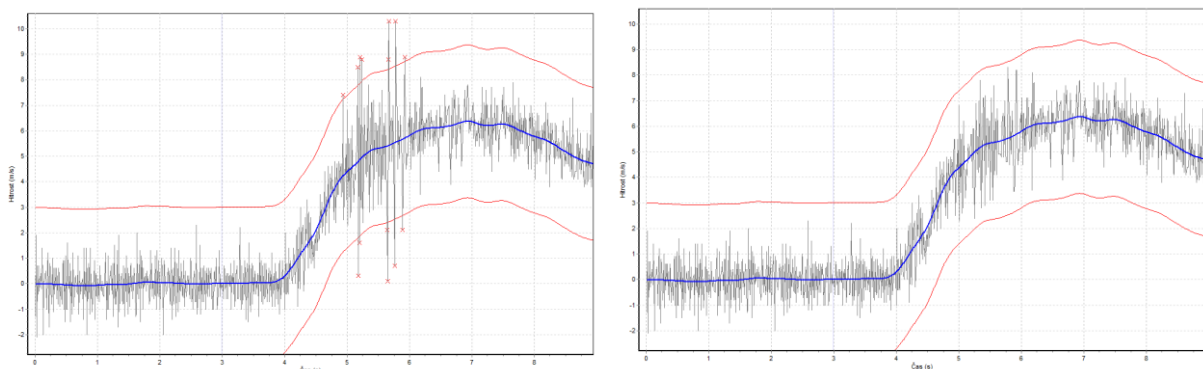
Slika 21: Prikaz hitrosti sprinterja v odvisnosti od časa. Sivi graf predstavlja surove podatke, modri graf predstavlja glajene podatke, rdeča grafa predstavljata zgornje in spodnje tolerančno območje za oceno neustreznih podatkov. Vijoličasto območje predstavlja izbrane podatke, ki bodo vključeni v nadaljnjo obdelavo.

Na grafičnem prikazu enostavno označimo čas trajanja meritve in s funkcijo brisanja podatkov odstranimo vse podatke, ki so izven izbranega območja. V tej fazi je treba paziti, da ne odstranimo preveč podatkov. Če se nam to zgodi, ponovimo postopek uvoza datoteke iz laserskega merilnika. Vsi podatki, ki se nahajajo znotraj izbranega

časovnega intervala, ostanejo nespremenjeni in so pripravljene za naslednjo fazo obdelave podatkov.

### 6.3. Odstranjevanje nepravilnih podatkov

Zaradi že opisanih razlogov prihaja pri posameznih meritvah do napak. Najpogostejši razlogi so prekinitev signala z roko, nepričakovana prekinitev signala in izguba laserskega kontakta z merjencem. Takšne napake se kažejo v nenadnih spremembah v izmerjeni razdalji in posledično v nenadnih spremembah hitrosti sprinterja. Najlažje se napake v meritvi prepoznajo na grafu hitrosti sprinterja v odvisnosti od časa. Napake so vidne kot hitre naključne spremembe na grafu hitrosti. Te nastanejo zaradi hitre spremembe izmerjene razdalje, zato je rezultat takšne napake skokovita sprememba hitrosti sprinterja.



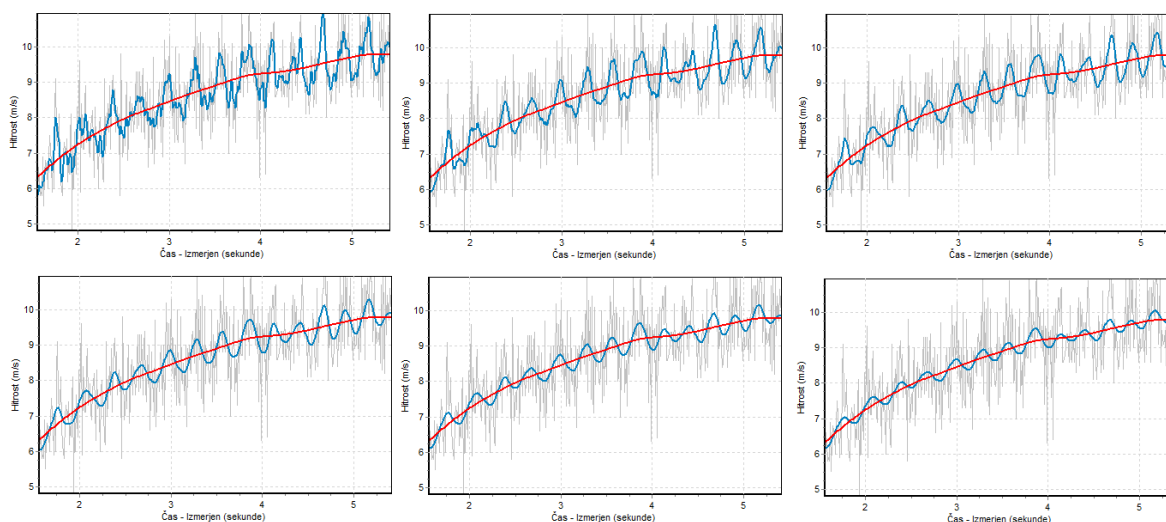
Slika 22: Prikaz napake v meritvi na grafu hitrosti v odvisnosti od časa. Na levem grafu so z rdečimi križci označeni vsi odčitki, ki se ne nahajajo izven izbranega tolerančnega območja. Po uporabi funkcije za odstranjevanje in nadomeščanje napačnih odčitkov so na desnem grafu prikazani popravljene podatki.

Ker želimo imeti pri obdelavi podatkov realne vrednosti, lahko takšne napake prepoznamo in jih izločimo. To naredimo tako, da določimo tolerančno območje za hitrost sprinterja, pri katerem lahko podatke še označimo kot sprejemljive. Vse podatke, ki temu kriteriju ne ustrezajo (podatke z napako), nadomestimo z metodo linearne aproksimacije.

## 6.4. Glajenje podatkov

Rezultat meritev je po navadi množica točk, ki podaja odvisnost med dvema fizikalnima veličinama, recimo  $x$  in  $y$ . Zelo pogosto želimo izmerjeno množico točk nadomestiti (približati) z množico diskretnih točk, ki pomenijo gladko krivuljo (Emri, Cvelbar 2006). Vsi avtorji, ki raziskujejo področje laserskega merjenja razdalje oziroma hitrosti, poudarjajo pomen in izbiro optimalnega načina glajenja (Dickwach, Harrison, Rejc).

Glajenje je torej ključen postopek v obdelavi podatkov, ki vodi v lažje razumevanje podatkov in boljšo interpretacijo podatkov. Glajeni podatki morajo torej čim bolj nazorno opisati dinamiko merjenega pojava.



Slika 23: Primeri različnih stopenj glajenja v posameznem izseku (a – neglajeno, b – širina: 1, št. glajenj: 1, c: 2/1, d: 2/2, e: 3/2, f: 3/3). Rdeča črta predstavlja absolutno hitrost sprinterja (širina: 15, št. glajenj: 10). Modra črta predstavlja prvo glajenje, siva črta predstavlja surove podatke.

Hitrost predstavlja spremembo razdalje v določenem času. Na grafičnem prikazu hitrosti sprinterja vidimo, da hitrost niha zelo hitro. Nihanje hitrosti je posledica šuma, prisotnega pri meritvi, ki izhaja iz samega delovanja laserskega merilnika. Matematično metodo, s katero odstranjujemo šum, imenujemo glajenje. Pri glajenju signala dosežemo spremembo signala do te mere, da se razlike med sosednjimi

točkami zmanjšajo na takšno raven, da lahko prepoznamo vzorec meritve. To pa vodi k lažjemu razumevanju in interpretaciji rezultatov.

Za glajenje podatkov se uporabljajo različni algoritmi. Vsi imajo svoje zakonitosti in pogoje, pod katerimi delujejo. Zaradi enostavnosti in zveznosti podatkov na x-osi (čas) gladimo podatek hitrosti z metodo povprečenja (proces drsečih sredin, ang. moving average).

$$V^1(t) = \frac{v^0_{(t-n)} + \dots + v^0_{(t-1)} + v^0_{(t)} + v^0_{(t+1)} + \dots + v^0_{(t+n)}}{(2n + 1)}$$

$$V^2(t) = \frac{v^1_{(t-n)} + \dots + v^1_{(t-1)} + v^1_{(t)} + v^1_{(t+1)} + \dots + v^1_{(t+n)}}{(2n + 1)}$$

⋮

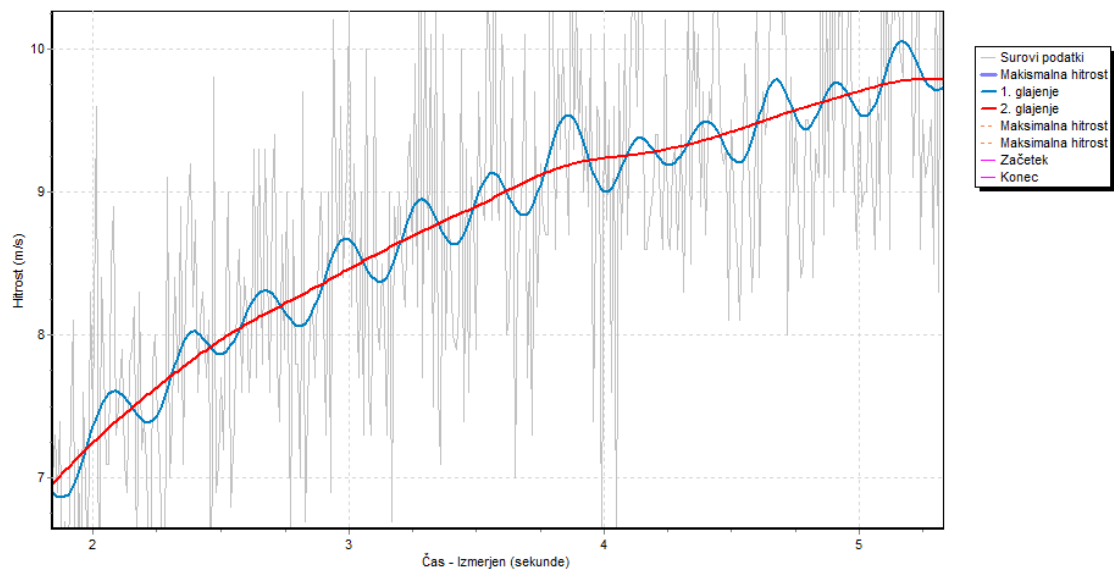
$$V^m(t) = \frac{v^{m-1}_{(t-n)} + \dots + v^{m-1}_{(t-1)} + v^{m-1}_{(t)} + v^{m-1}_{(t+1)} + \dots + v^{m-1}_{(t+n)}}{(2n + 1)}$$

Enačba 4: Enačba za glajenje z metodo povprečenja ( $n$  – širina glajenja,  $m$  – frekvenca glajenja,  $v^0$  – hitrost, izračunana iz surovih podatkov,  $v^1$  – hitrost, izračunana na podlagi prvega glajenja,  $v^2$  – hitrost, izračunana po drugem glajenju,  $v^m$  – hitrost, izračunana po poljubnem glajenju).

S to metodo zamenjamo vsako točko signala s povprečno vrednostjo sosednjih točk  $n$  pred in po izbrani točki na x-osi.  $N$  v tem primeru predstavlja širino glajenja. Pri tej vrsti glajenja moramo paziti, da glajeni niz podatkov ni predolg, saj lahko na ta način izgledimo bistvene podatke. V primeru sprinterskega koraka širina glajenja nikoli ne sme preseči širine enega cikla oz. časa trajanja enega koraka. Dodatno lahko podatke gladimo tako, da večkrat ponovimo glajenje z enako širino.

V primeru sprinterskega teka želimo na grafu hitrosti prepoznati vzorec enega koraka. Iz kinematike sprinterskega koraka vemo, da je hitrost sprinterja v

horizontalni smeri največja v trenutku odziva odzivne noge od podlage, najmanjša pa v trenutku vertikale odzivne noge. Da bi prepoznali ta dva trenutka znotraj sprinterskega koraka, moramo podatke temu primerno gladiti oz. filtrirati. V ta namen uporabljamo dva filtra različne jakosti. Prvi filter uporabljamo za prepoznavo cikla sprinterskega koraka, drugi filter pa za izračun absolutne hitrosti sprinterja. Ker gre pri grafu korakov za manj obdelan signal, uporabimo filter z manjšo širino, ko pa računamo absolutno hitrost sprinterja, pa uporabimo filter s čim večjo širino.



Slika 24: Rdeči graf prikazuje absolutno hitrost sprinterja, moder graf prikazuje nihanje hitrosti znotraj cikla sprinterskega koraka.

Rezultat prvega filtriranja prikazuje moder graf. Gre za filtriranje z nižjo jakostjo. Iz prvega filtriranja (moder graf) je možno prepoznati nihanje hitrosti znotraj cikla tekaškega koraka. Rezultat drugega filtra (rdeč graf) je absolutna hitrost sprinterja, na kateri lahko računamo maksimalno hitrost.

Drugo filtriranje (rdeč graf) uporabljamo za izračun:

- absolutne hitrosti sprinterja v danem trenutku,
- maksimalne hitrosti sprinterja,
- faze sprinterske hitrosti (faza pospeševanja, maksimalne hitrosti, pojemek).

Prvo filtriranje (moder graf) uporabljamo za izračun:

- dolžine koraka,
- frekvenco korakov,
- prepoznavo cikla sprinterskega koraka.

## Napaka pri glajenju

Glajenje podatkov je postopek, kjer podatke prilagajamo v tej meri, da lahko iz njih prepoznamo vzorec in dobimo neke zaključke. Iz matematičnega vidika je glajenje aproksimacija zbranih podatkov s krivuljo, ki vsebuje bistvene vzorce iz podatkov, istočasno pa želimo s tem čim bolj izločiti šum.

Že iz same definicije glajenja lahko ugotovimo, da v procesu glajenja podatke spreminjamo. Pri glajenju moramo torej paziti, da podatkov ne spremenimo do te mere, da jih popačimo. Za oceno uspešnosti glajenja je torej prav tako pomembna ocena napake, s katero smo vplivali na podatke.

V primeru laserskega merjenja razdalje je ta ocena precej preprosta. Ker laserski žarek izmeri razdaljo do sprinterja stokrat v sekundi, imamo za vsako stotinko podatek, koliko ta razdalja znaša. Ker pa gladimo podatek o hitrosti in ne o razdalji, lahko iz glajenih podatkov o hitrosti izračunamo pot, ki jo je sprinter pretekel. Če izpeljemo osnovno enačbo za izračun hitrosti, dobimo, da je opravljena pot enaka produktu hitrosti in časa.

$$v = \frac{s}{t} \quad \Rightarrow \quad s = v \times t$$

Enačba 5: Izračun hitrosti in izpeljava za izračuna opravljene poti ( $v$  – hitrost,  $s$  – pot,  $t$  – čas).

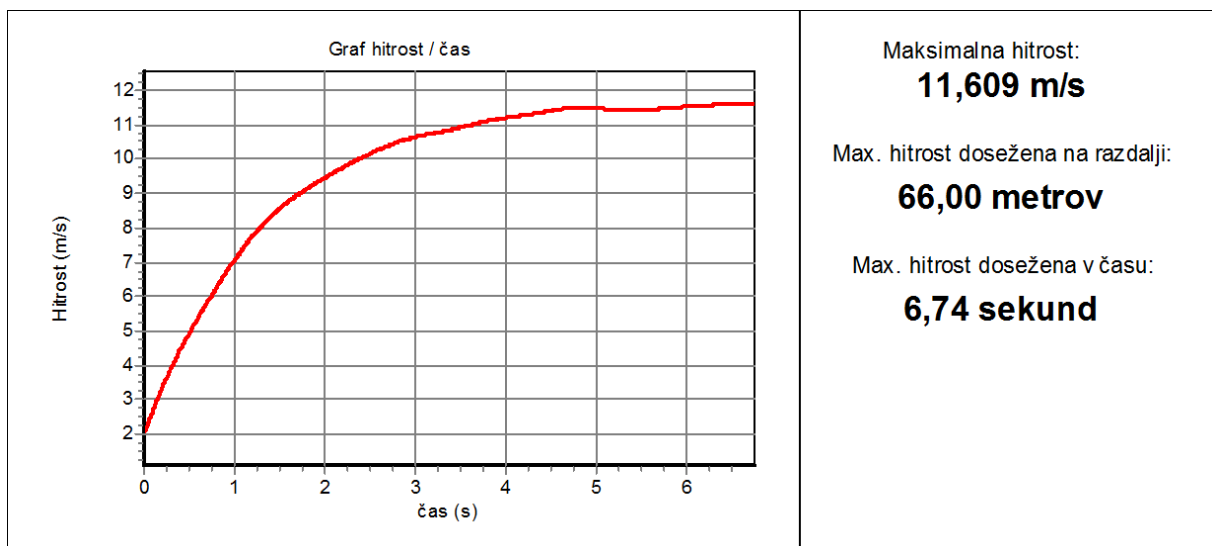
Za vsak glajeni podatek o hitrosti torej lahko izračunamo, kakšno pot je sprinter opravil v času. Ker podatke merimo sekvenčno za vsako stotinko meritve, lahko torej izračunamo opravljeno pot na vsej dolžini meritvi. Rezultat celotne meritve nato primerjamo z razdaljo, na kateri merimo sprinterja. Glede na izkušnje se pri glajenju s

povprečenjem ta napaka giblje med 0,05 % in 0,1 %. Absolutno je torej ta napaka pri 100 metrih razdalje med 5 cm in 10 cm. Programska oprema omogoča, da za vsako meritev posebej ugotovimo in izmerimo napako, do katere pride pri glajenju.

## 6.5. Analiza sprinterske hitrosti

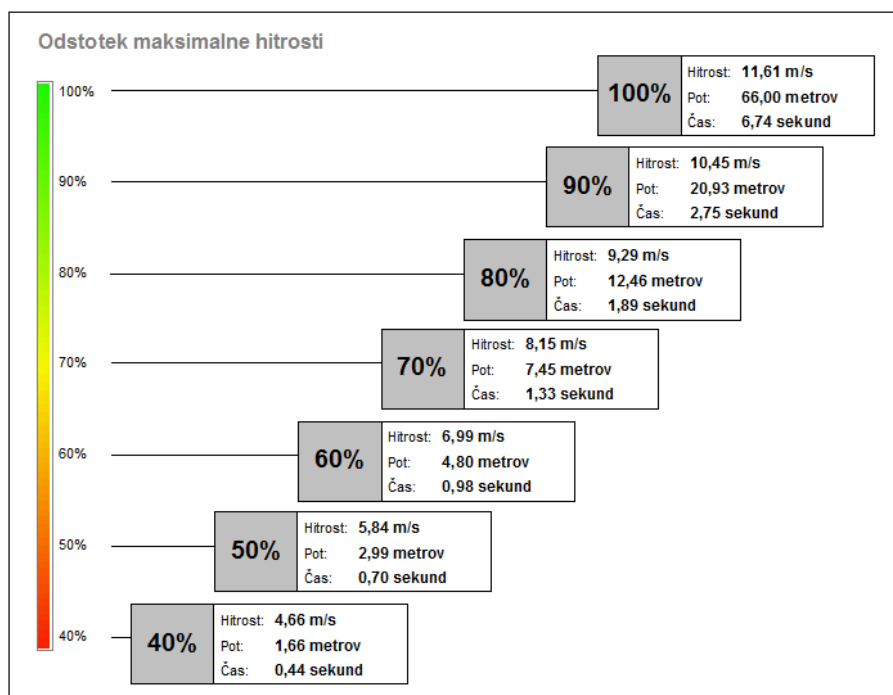
### Maksimalna hitrost

Po obdelavi podatkov imamo na voljo hitrost sprinterja za vsako stotinko meritve (pri merjenju s frekvenco 100 Hz). Izračunamo jo iz spremembe razdalje v časovni enoti. Vsak trenutek meritve vsebuje podatek o času in izmerjeni razdalji, iz teh dveh podatkov pa izračunamo hitrost sprinterja. Ko izračunamo trenutek maksimalne hitrosti, lahko odčitamo tudi razdaljo, na kateri je bila maksimalna hitrost dosežena, in čas, v katerem je bila dosežena maksimalna hitrost. Na primeru merjenja vidimo, da je sprinter dosegel maksimalno hitrost 11,609 m/s. Maksimalno hitrost je dosegel na razdalji 66,00 metra in je bila dosežena v 6,74 sekunde.



Slika 25: Izračun in prikaz parametrov maksimalne hitrosti.

Dinamika razvoja maksimalne hitrosti nam omogoča, da analiziramo, kako je merjenec razvijal maksimalno hitrost. Dinamika razvoja maksimalne hitrosti je izražena v odstotkih maksimalne hitrosti od poti in časa. Iz podatkov izračunamo, na kateri razdalji in v kakšnem času je sprinter razvil hitrost, ki ustreza 40, 50, 60, 70, 80 in 90 odstotkom maksimalne hitrosti v teku.



Slika 26: Izračun in prikaz parametrov maksimalne hitrosti.

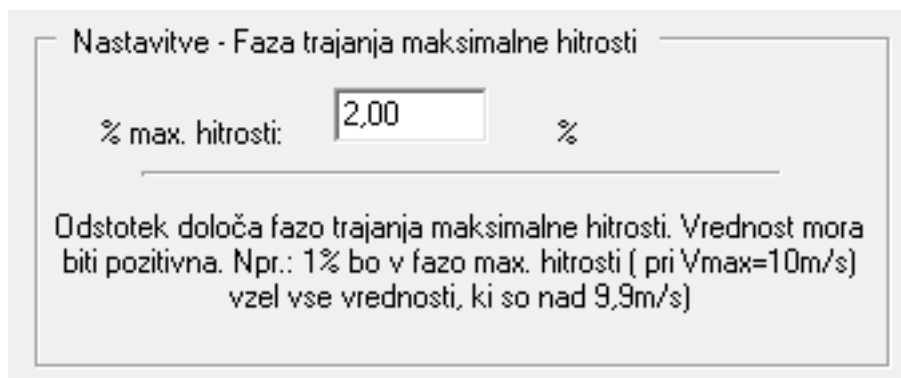
## Faze sprinterskega teka

Sprinterski tek delimo v tri faze. Prva je faza pospeševanja. V tej fazi sprinter stopnjuje hitrost do maksimalne hitrosti. Dolžina korakov se podaljšuje, prav tako se povečuje frekvenca korakov. Faza pospeševanja traja, dokler sprinter ne preide v območje maksimalne hitrosti. V fazi maksimalne hitrosti se parametri sprinterskega teka (dolžina koraka in frekvenca koraka) stabilizirajo. Vendar zaradi energijskih procesov v telesu sprinterji niso sposobni ohranjati maksimalne hitrosti dlje časa. Zaradi tega pride do pojava padanja hitrosti. To fazo imenujemo faza zaviranja.

V želji, da bi lahko natančno definirali vse faze sprinterskega teka, smo se soočili s problemom trajanja faze maksimalne hitrosti. Ta problem smo rešili tako, da smo uvedli novo spremenljivko, s katero lahko opišemo to fazo. Območje maksimalne hitrosti smo definirali z odstotkom maksimalne hitrosti. Če na primer sprinter doseže maksimalno hitrost 10 m/s in definiramo območje maksimalne hitrosti z 2 odstotkoma, to pomeni, da je območje maksimalne hitrosti med 9,8 m/s in 10 m/s. Ta parameter smo uvedli zaradi velikih razlik v kakovosti sprinterjev. Bolj kot je sprinter kakovosten, nižji je ta odstotek. Pri vrhunskih sprinterjih v ta namen uporabljamo



vrednost 2 odstotka, pri manj kakovostnih sprinterjih uporabljamo vrednost med 3 in 4 odstotki, pri otrocih uporabljamo vrednost 4 do 5 odstotkov.



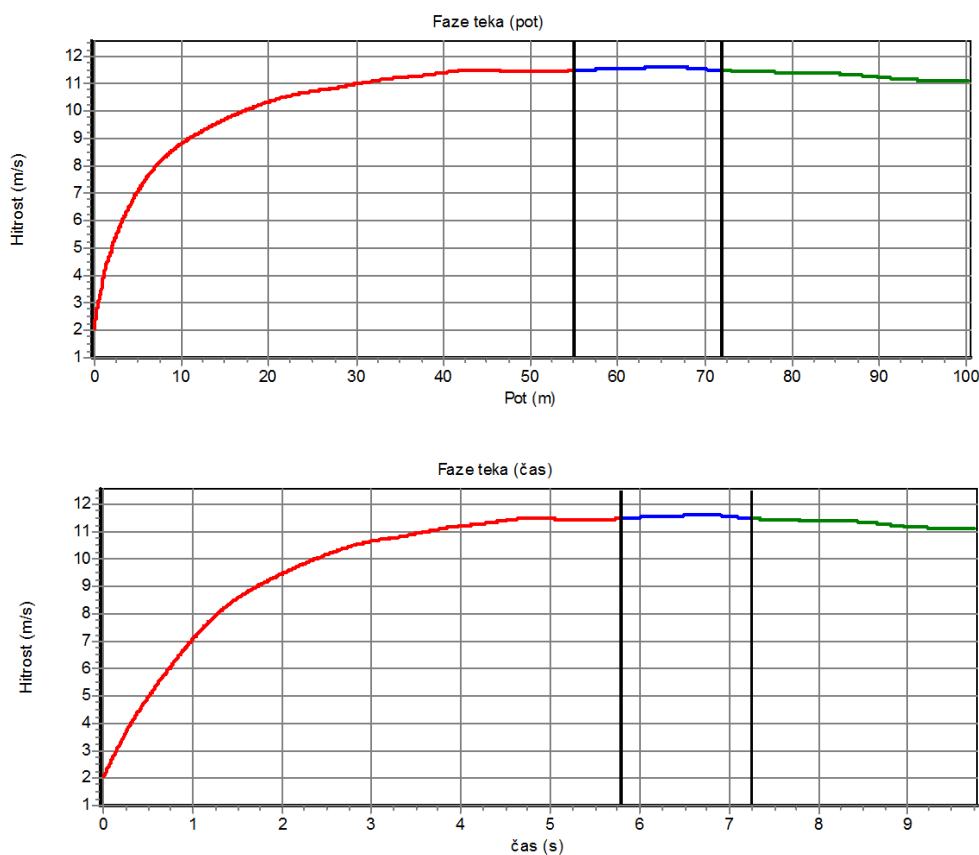
Slika 27: Določitev faze trajanja maksimalne hitrosti v nastavitvah programske opreme.

S tem, ko smo določili fazo trajanja maksimalne hitrosti, lahko izračunamo tudi obe preostali fazi, torej fazo pospeševanja in fazo zaviranja. Na podlagi podatkov za vsako od treh faz sprinterskega teka izračunamo čas in razdaljo trajanja posamezne faze teka. V preglednici je predstavljen primer analize posameznih faz sprinterskega teka. Za vsako fazo so prikazani časi trajanja (v sekundah in v odstotkih) in razdalja trajanja (v metrih in v odstotkih).

	Faza pospeševanja	Faza maksimalne hitrosti	Faza zaviranja
Čas trajanja:	5,80s 59,55%	1,46s 14,99%	2,48s 25,46%
od - do:	0,00s - 5,80s	5,80s - 7,26s	7,26s - 9,74s
Razdalja trajanja:	55,13m 55,08%	16,90m 16,88%	28,06m 28,04%
od - do:	0,00m - 55,13m	55,13m - 72,03m	72,03m - 100,09m

Slika 28: Prikaz parametrov posamezne faze sprinterskega teka.

Na grafičnem prikazu je prikazana krivulja hitrosti teka v odvisnosti od časa in v odvisnosti od pretečene razdalje.



Slika 29: Grafični prikaz hitrost sprinterske hitrosti v posameznih fazah teka. Rdeča krivulja predstavlja hitrost sprinterja v fazi pospeševanja, modra v fazi maksimalne hitrosti, zelena pa v fazi zaviranja. Na prvem grafu je predstavljena hitrost v odvisnosti od časa, na drugem grafu pa hitrost v odvisnosti od poti.

## Pojemek hitrosti

Sposobnost vzdrževanja maksimalne hitrosti teka je eden ključnih parametrov uspešnosti v sprintu. Za oceno tega parametra smo razvili model, na podlagi katerega se ugotavlja upad sprinterske hitrosti od trenutka maksimalne hitrosti do cilja. Upad hitrosti je izražen v odstotkih maksimalne hitrosti, in sicer za 1, 2, 3, 4 in 5 odstotkov. Za vsak odstotkovni prag izračunamo, na kolikšni razdalji in v kakšnem času se je zgodil. Razdalja je izražena v absolutni razdalji od startne črte kot tudi v razdalji od trenutka maksimalne hitrosti. Enako velja za absolutni čas, ki ga

izračunamo od trenutka začetka meritve (vstop sprinterja v cono merjenja) kot tudi od trenutka, v katerem je bila dosežena maksimalna hitrost.

#### Pojemek hitrosti

	maks. hitrost	- 1.00%	- 2.00%	-3.00%	-4.00%	-5.00%
hitrost:	11,61 m/s	11,49 m/s	11,38 m/s	11,26 m/s	11,15 m/s	11,03 m/s
razdalja:	66,00 m (- m)	72,13 m (6,14 m)	85,09 m (19,10 m)	89,60 m (23,60 m)	94,93 m (28,93 m)	- m (- m)
čas:	6,74 s (- s)	7,27 s (0,53 s)	8,40 s (1,66 s)	8,80 s (2,06 s)	9,28 s (2,54 s)	- s (- s)

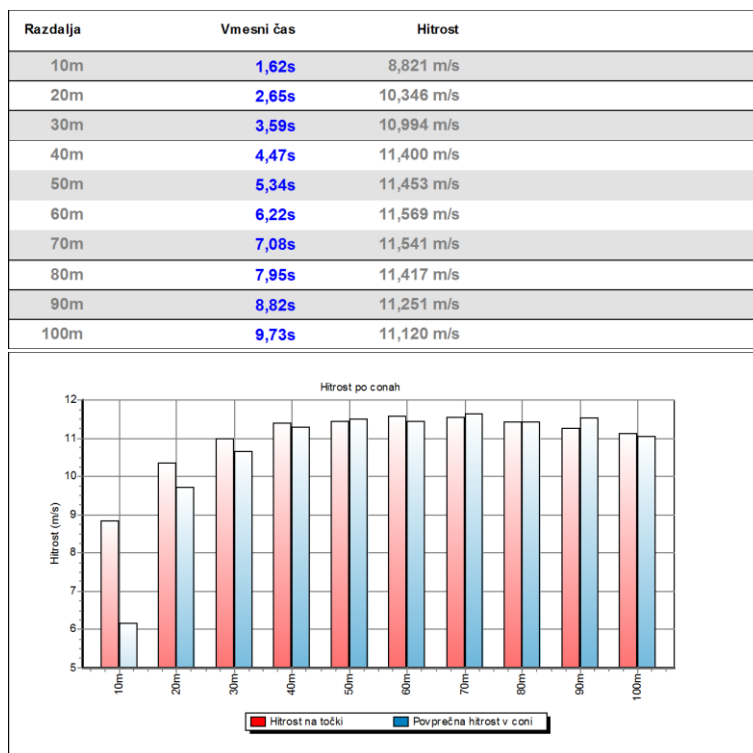
Slika 30: Prikaz parametrov posamezne faze sprinterskega teka.

Iz preglednice je v prvi koloni razviden trenutek maksimalne hitrosti, ki jo je sprinter dosegel na razdalji 66 metrov po 6,74 sekunde teka. Maksimalna hitrost je znašala 11,61 m/s. V naslednjih kolonah je za vsak odstotkovni prag izračunana hitrost, v vrsticah 3 in 4 pa sta prikazana pripadajoča razdalja in čas, kjer se je pripadajoč padec hitrosti zgodil. V naslednjih 6,14 metra je po 0,53 sekunde hitrost merjenca padla za 1 odstotek, in sicer na 11,49 m/s.

#### Vmesni časi in hitrosti po conah

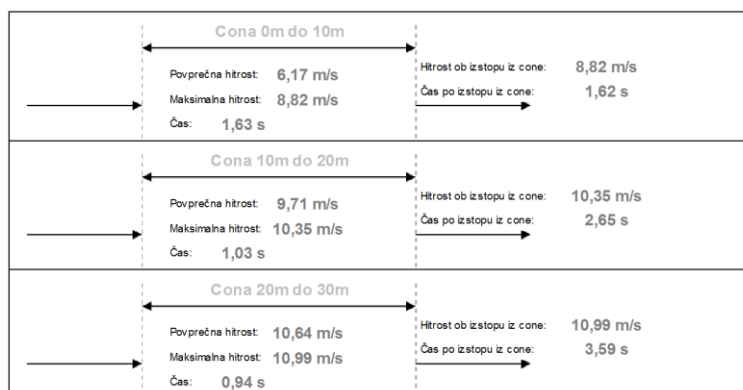
Zaradi kontinuiranega merjenja hitrosti in razdalje med sprinterskim tekom nam ta način merjenja omogoča, da izračunamo hitrost in vmesni čas na kateremkoli odseku teka. Programska oprema nam omogoča, da lahko definiramo poljubne cone, znotraj katerih želimo spremljati parametre sprinterskega teka.

Najpogostejši način spremljanja časov in hitrosti je v 10-metrskih intervalih. Za vsak interval izračunamo, kakšna sta bila vmesni čas in hitrost na izmerjeni razdalji. Podatki so prikazani v tabeli in tudi grafično.



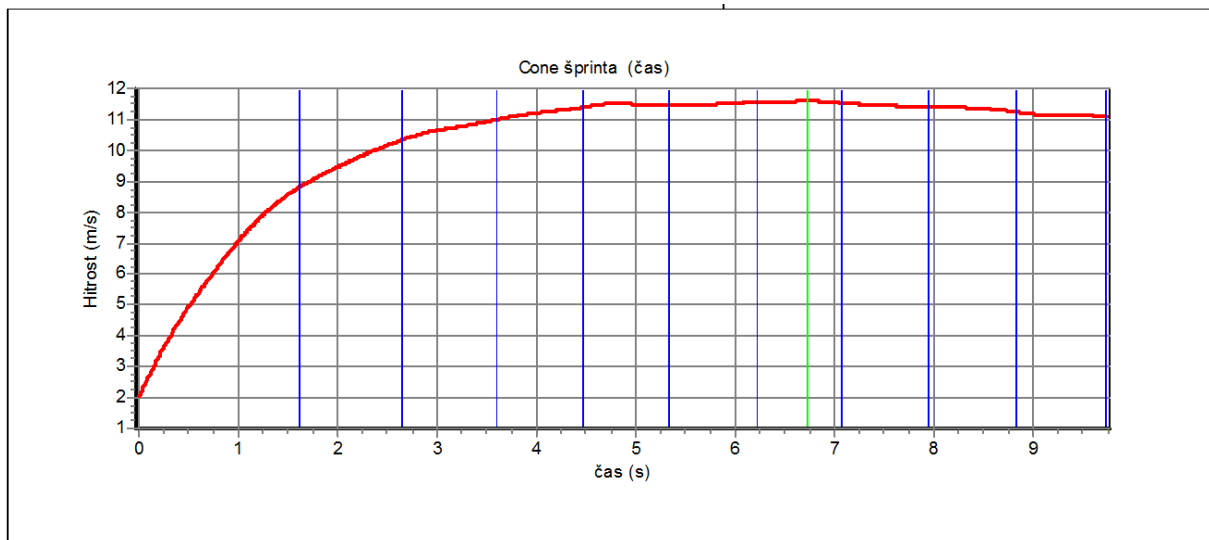
Slika 31: Prikaz vmesnih časov in hitrosti po odsekih.

Za vsako izbrano območje merjenja izračunamo povprečno hitrost v izbranem območju, maksimalno hitrost v izbranem območju ter hitrost ob izstopu iz izbranega območja merjenja.



Slika 32: Prikaz vmesnih časov in hitrosti po odsekih.

Grafični prikaz gibanja hitrosti sprinterja v odvisnosti od časa prikazuje krivuljo spreminjanja hitrosti z vrisanim trenutkom maksimalne hitrosti (zelena črta). Na grafu so prikazana izbrana območja merjenja hitrosti. Vsaka vrisana modra črta predstavlja 10-metrski interval merjenja.



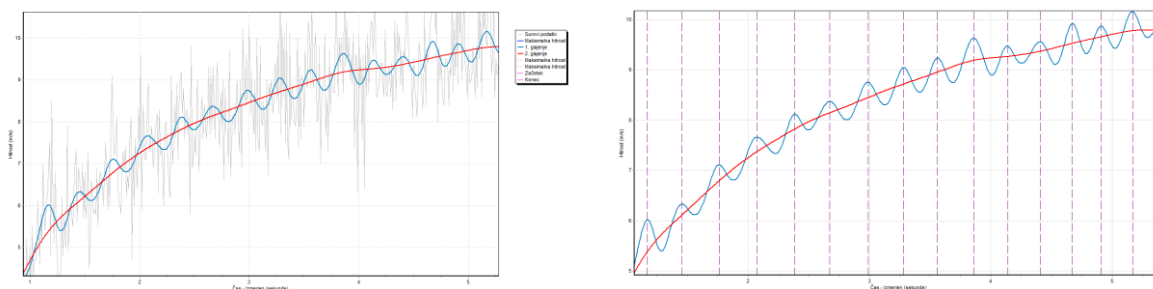
Slika 33: Prikaz sprinterske hitrosti z vrisanimi območji merjenja.

### Dolžina in frekvenca korakov

Nekateri avtorji (Harrison 2005) navajajo, da iz podatkov, pridobljenih z laserskim merilnikom, ni mogoče prepoznati sprememb hitrosti sprinterja znotraj cikla sprinterskega koraka. Delno ta trditev drži, vendar lahko z izbiro primerne načina filtriranja izračunamo in prepoznamo tudi spremembe hitrosti znotraj sprinterskega koraka. Razloge za takšen zaključek lahko torej iščemo v neprimerni izbiri načina filtriranja podatkov. Delno je to trditev ovrgel že Dickwach (Dickwach 1994), ki je raziskoval primernost uporabe laserskega merilnika v tehničnih disciplinah (skok v daljino, troskok in skok ob palici).

Filtriranje podatkov s povprečenjem nam omogoča, da filter popolnoma prilagodimo meritvi na način, ki nam omogoča prepoznavo vzorca sprinterskega koraka. Hitrost centralnega težišča telesa (CTT) sprinterja znotraj cikla sprinterskega koraka niha. Hitrost CTT sprinterja je največja v trenutku odriva, v fazi leta hitrost CTT pada, ko pa zamašna noga preide točko vertikale, pa spet začne naraščati. Odrivna noga namreč ustvarja silo na podlago, ki povečuje hitrost sprinterja v horizontalni smeri proti cilju vse do ponovnega odriva. Tako se zaključi cikel enojnega tekaškega koraka. Pri sprinterskem teku v maksimalni hitrosti gre torej za serijo horizontalnih poskokov, ki morda na prvi pogled izgledajo kot enakomerno gibanje.

Točka maksimalne hitrosti znotraj cikla sprinterskega koraka je tisti trenutek, ki ga lahko prepoznamo tudi na krivulji hitrosti, izmerjeni z laserskim merilnikom. Maksimalna hitrost posameznega koraka je dosežena v trenutku, ko odzivna noga zapusti podlago.



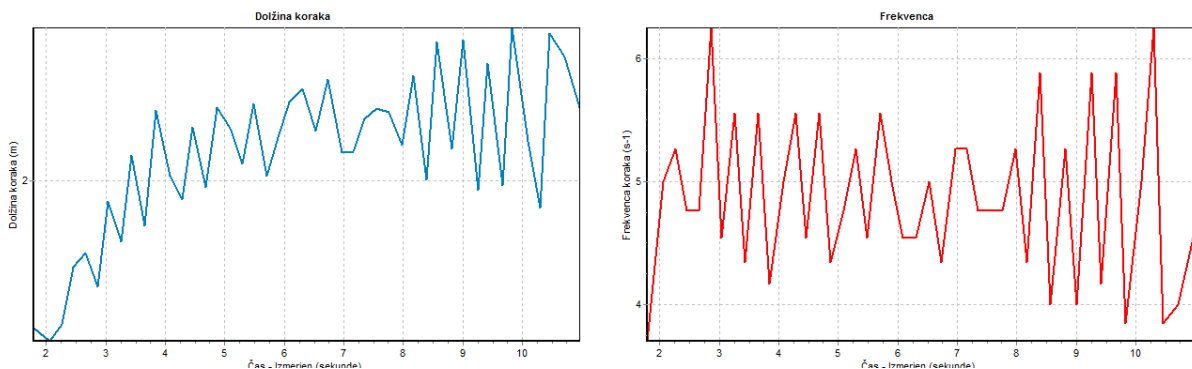
Slika 34: Levi graf (modra krivulja) prikazuje nihanje sprinterske hitrosti znotraj posameznega cikla sprinterskega koraka. Na desnem grafu je prikazana maksimalna hitrost (vijoličasta črta) znotraj cikla sprinterskega koraka.

Ker hitrost sprinterja merimo kontinuirano, lahko za vsak vrh krivulje (točka maksimalne hitrosti sprinterskega koraka) odčitamo razdaljo in čas. Iz teh podatkov izračunamo dolžino posameznega koraka, čas trajanja posameznega koraka ter hitrost v posameznem koraku. Tabela prikazuje izmerjene čase, dolžine korakov in frekvenco ter hitrost v posameznem koraku. V prvem stolpcu je prikazana zaporedna številka posameznega koraka. Izvzet je prvi korak iz startnega bloka, saj se sprinter takrat še ne nahaja v območju merjenja. V drugem sklopu sta prikazana dejanski in referenčni čas, sledi razdalja. V zadnjem sklopu so za vsak korak izračunani čas trajanja koraka, dolžina koraka ter frekvenca in hitrost.

Št. koraka	Čas		Čas - referenčen		Razdalja		Razdalja (ref)		Čas trajanja koraka	Dolžina koraka	Frekvenca	Hitrost
	Čas od (s)	Čas do (s)	Čas od (s)	Čas do (s)	od (m)	do (m)	od (m)	do (m)				
1	1,79 s	2,06 s	0,15 s	0,42 s	7,954 m	9,036 m	0,454 m	1,536 m	0,27 s	1,082 m	3,70	4,60 m/s
2	2,06 s	2,26 s	0,42 s	0,62 s	9,036 m	10,037 m	1,536 m	2,537 m	0,20 s	1,001 m	5,00	5,49 m/s
3	2,26 s	2,45 s	0,62 s	0,81 s	10,037 m	11,145 m	2,537 m	3,645 m	0,19 s	1,108 m	5,26	6,34 m/s
4	2,45 s	2,66 s	0,81 s	1,02 s	11,145 m	12,607 m	3,645 m	5,107 m	0,21 s	1,462 m	4,76	7,17 m/s
5	2,66 s	2,87 s	1,02 s	1,23 s	12,607 m	14,159 m	5,107 m	6,659 m	0,21 s	1,552 m	4,76	7,90 m/s
6	2,87 s	3,03 s	1,23 s	1,39 s	14,159 m	15,496 m	6,659 m	7,996 m	0,16 s	1,337 m	6,25	8,35 m/s
7	3,03 s	3,25 s	1,39 s	1,61 s	15,496 m	17,368 m	7,996 m	9,868 m	0,22 s	1,872 m	4,55	8,82 m/s
8	3,25 s	3,43 s	1,61 s	1,79 s	17,368 m	18,987 m	9,868 m	11,487 m	0,18 s	1,619 m	5,56	9,14 m/s
9	3,43 s	3,66 s	1,79 s	2,02 s	18,987 m	21,141 m	11,487 m	13,641 m	0,23 s	2,154 m	4,35	9,50 m/s
10	3,66 s	3,84 s	2,02 s	2,20 s	21,141 m	22,959 m	13,641 m	15,359 m	0,18 s	1,718 m	5,56	9,78 m/s
11	3,84 s	4,08 s	2,20 s	2,44 s	22,959 m	25,292 m	15,359 m	17,792 m	0,24 s	2,433 m	4,17	10,10 m/s
12	4,08 s	4,28 s	2,44 s	2,64 s	25,292 m	27,322 m	17,792 m	19,822 m	0,20 s	2,030 m	5,00	10,34 m/s
13	4,28 s	4,46 s	2,64 s	2,82 s	27,322 m	29,205 m	19,822 m	21,705 m	0,18 s	1,883 m	5,56	10,54 m/s
14	4,46 s	4,68 s	2,82 s	3,04 s	29,205 m	31,538 m	21,705 m	24,038 m	0,22 s	2,333 m	4,55	10,70 m/s
15	4,68 s	4,86 s	3,04 s	3,22 s	31,538 m	33,497 m	24,038 m	25,997 m	0,18 s	1,959 m	5,56	10,76 m/s
16	4,86 s	5,09 s	3,22 s	3,45 s	33,497 m	35,950 m	25,997 m	28,450 m	0,23 s	2,453 m	4,35	10,89 m/s
17	5,09 s	5,30 s	3,45 s	3,66 s	35,950 m	38,273 m	28,450 m	30,773 m	0,21 s	2,323 m	4,76	11,05 m/s
18	5,30 s	5,49 s	3,66 s	3,85 s	38,273 m	40,374 m	30,773 m	32,874 m	0,19 s	2,101 m	5,26	11,15 m/s
19	5,49 s	5,71 s	3,85 s	4,07 s	40,374 m	42,849 m	32,874 m	35,349 m	0,22 s	2,475 m	4,55	11,25 m/s
20	5,71 s	5,89 s	4,07 s	4,25 s	42,849 m	44,876 m	35,349 m	37,376 m	0,18 s	2,022 m	5,56	11,30 m/s
45												219,47

Slika 35: Analiza parametrov posameznega sprinterskega koraka.

Zaradi visokofrekvenčnega šuma, ki izhaja iz narave merjenja z laserskim merilnikom, vsi avtorji svetujejo previdnost pri interpretaciji rezultatov. Izračunani podatki namreč temeljijo na glajenju izmerjenih (surovih) vrednosti. Za prepoznavo ciklov sprinterskega koraka se uporablja filter nižje jakosti. Kot smo opisali v poglavju o natančnosti laserskega merilnika, enkratna meritev razdalje ne daje realne vrednosti o izmerjeni razdalji, temveč šele z glajenjem podatkov pridemo do natančne vrednosti izmerjene razdalje. Z nižanjem jakosti filtra torej prehajamo na območje posameznih meritev in s tem izničujemo postopek glajenja.

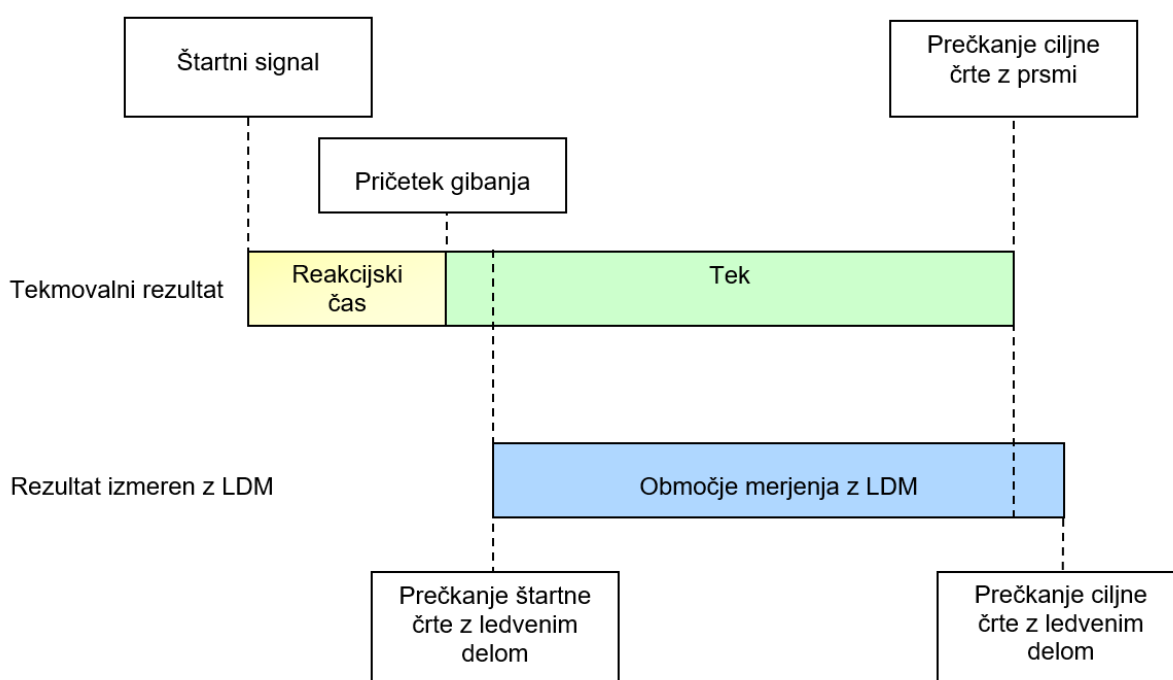


Slika 36: Grafični prikaz izračuna dolžine in frekvence korakov. Levi graf prikazuje povečevanje dolžine koraka med 100-metrskim tekom, desni graf prikazuje nihanje frekvence koraka med sprinterskim tekom.

Zaključimo lahko, da je z laserskim merilnikom mogoče prepoznati cikel sprinterskega koraka in izračunati število narejenih korakov. Z ustrezno izbiro glajenja podatkov je možno prepoznati cikle posameznih korakov na podlagi točke odziva od podlage. Vendar zaradi omejitvenih dejavnikov merjenja ni mogoče natančno izračunati dolžine in časa posameznega koraka, zato moramo biti previdni pri interpretaciji rezultatov frekvence in dolžine korakov. Za natančen izračun dolžine in frekvence koraka bi bilo treba izboljšati postopek obdelave podatkov, prav tako pa lahko z razvojem tehnologije laserskega merjenja v prihodnosti pričakujemo še večjo natančnost merjenja.

## 7. PRIMERLJIVOST LASERSKE MERITVE S TEKMOVALNIM REZULTATOM

Zaradi posebnosti merjenja hitrosti z laserskim merilnikom dobljeni podatki niso neposredno primerljivi z rezultati, pridobljenimi z ostalimi metodami merjenja. Številni avtorji (Harrison, Jensen, Donoghue, Turk-Noack) so ugotavljali razlike med posameznimi metodami merjenja sprinterske hitrosti ter jih primerjali z lasersko tehniko.



Slika 37: Shematski prikaz razlike med tekmovalnim rezultatom in rezultatom, pridobljenim z LDM.

Če pa primerjamo tekmovalni rezultat v teku na 100 m in rezultat, izmerjen z laserskim merilnikom, pa ugotovimo, da je rezultat, izmerjen z LDM, boljši (rezultat v sekundah je nižji), ker z LDM ne merimo reakcijskega časa. Tekmovalni rezultat v sprinterskem teku je namreč sestavljen iz reakcijskega časa in časa, dokler sprinter ne priteče v cilj. Startni trenutek predstavlja pok startne pištole. Končni trenutek predstavlja prehod sprinterja s prsmi skozi cilj. Tekmovalni rezultat je torej sestavljen iz reakcijskega časa in časa teka. Z LDM pa merimo tek sprinterja znotraj kalibrirane cone merjenja. Ker merimo sprinterja od zadaj v ledveni predel hrbtenice, pomeni, da



se meritev začne, ko sprinter z ledvenim delom prečka startno črto. Konec sprinta predstavlja trenutek, ko sprinter z ledvenim delom prečka ciljno črto.

Iz navedenega lahko zaključimo, da sprinterski rezultat, izmerjen z laserskim merilnikom, daje boljše rezultate kot rezultat, izmerjen z elektronsko meritvijo. V praksi zato znaša razlika med LDM in elektronskim merjenjem približno 30 stotink sekunde. Pri najboljših sprinterjih znaša reakcijski čas od 170 do 200 milisekund. Čas, potreben, da sprinter vstopi v območje merjenja, pa znaša od 100 do 200 milisekund.

Preglednica 7: Prikaz razlike med elektronskim merjenjem hitrosti in merjenjem hitrosti z laserskim merilnikom.

	Elektronsko merjenje	Merjenje z laserskim merilnikom
Pok startne pištole	Začetek merjenja	
Reakcijski čas		
Začetek gibanja		
Prehod startne črte z ledvenim delom hrbta		Začetek merjenja
Prehod ciljne črte s prsmi	Konec merjenja	
Prehod ciljne črte z ledvenim delom hrbta		Konec merjenja

## 8. ZAKLJUČEK

Lasersko merjenje hitrosti predstavlja zanesljivo in natančno metodo merjenja sprinterske hitrosti. V primerjavi s preostalimi metodami merjenja ima metoda ogromno prednosti, predvsem z vidika količine in kakovosti podatkov ter časa obdelave podatkov. Je edina metoda merjenja, ki omogoča kontinuirano merjenje hitrosti na daljših razdaljah. Obdelani podatki so takoj po obdelavi na voljo športnikom in trenerjem za sprejemanje odločitev v zvezi s treningom.

Na področju športne diagnostike je lasersko merjenje hitrosti velik korak naprej k poenostavitvi postopkov merjenja hitrosti, saj so ostale metode potratne predvsem z vidika porabe časa za merjenje ter obdelavo podatkov. Z razvojem tehnologije laserskega merjenja razdalje lahko v prihodnosti pričakujemo še natančnejše naprave, s katerimi bomo lahko s še večjo zanesljivostjo ugotavljali ključne parametre sprinterskega teka.

Z vidika standardizacije je pomembno, da je postopek meritve standardiziran. S tem zagotovimo enake pogoje merjenja in obdelave podatkov. Tak način dela nam omogoča primerjavo med različnimi meritvami in lažje ugotavljanje učinkov sprinterskega treninga ter ugotavljanje forme športnika.

## 9. VIRI IN LITERATURA

Čoh, M. (2002). Atletika: tehnika in metodika nekaterih atletskih disciplin (tretja izdaja). Ljubljana: Fakulteta za šport, Inštitut za šport.

Čoh M., Babič V., Supej M., Štuhec S., Vertič R. (2015). KINEMATIČNA ANALIZA TEKA NA 100 M USAINA BOLTA. Šport, 63, 1/2, str. 99–103.

Delecluse, C., Van Coppenolle, H., Willems, E., Van Leemputte, M., Diels, R., Goris, M. (1995). INFLUENCE OF HIGH RESISTANCE AND HIGH-VELOCITY TRAINING ON SPRINT PERFORMANCE. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 27(8), str. 1203–1209.

Dolenec A., Čoh M. (2009). PRIMERJAVA FOTOCELIČNIH IN OPTOJUMP MERITEV MAKSIMALNE TEKAŠKE HITROSTI. *Kinesiologia Slovenica*, 15, 2, str. 16–24.

Dickwach H., Hildebrand F., Perlt B. (1994). A LASER VELOCITY MEASURING DEVICE. *New studies in Athletics* 9: 4, str. 31–40.

Ebben W., Petushek E., Clewein R. (2009). A COMPARISON OF MANUAL AND ELECTRONIC TIMING DURING 20 AND 40 YARDS SPRINTS. *Journal of Exercise Physiology*, 12: 5.

Emri I., Cvelbar R. (2006). UPORABA GLADILNIH FUNKCIJ ZA GLAJENJE PODATKOV PODANIH V DISKRETNI OBLIKI. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering* 52(2006), str. 181–194.

Ferligoj A., Leskošek K., Kogovšek T. (1995). ZANESLJIVOST IN VELJAVNOST MERJENJA. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za družbene vede.

Graubner R., Nixdorf E. (2011). BIOMECHANICAL ANALYSIS OF THE SPRINT AND HURDLES EVENTS AT THE 2009 IAAF WORLD CHAMPIONSHIPS IN ATHLETICS. *New studies in Athletics* 26: 1/2, str. 19–53.

Harrison A. J., Randall L., Donoghue O. (2005). RELIABILITY AND VALIDITY OF LASER DISTANCE AND VELOCITY DETERMINATION DURING RUNNING. *Measurement in physical education and exercise science* 9(4), str. 219–231.

Haugen T., Buchheit M. (2016). SPRINT RUNNING PERFORMANCE MONITORING: METHODOLOGICAL AND PRACTICAL CONSIDERATIONS. *Sports Medicine* 46(5), str. 641–656.

Hay, J. G. (1993). THE BIOMECHANICS OF SPORTS TECHNIQUES (4 ED.): Prentice Hall.

Lames M., McGarry T., Nebel B., Roemer K. (2011). COMPUTER SCIENCE IN SPORT – SPECIAL EMPHASIS: FOOTBALL. Gradivo za seminar.

Mero, A., Komi, P. V., Gregor, R. J. (1992). BIOMECHANICS OF SPRINTING RUNNING. *Sport medicine* 13 (6): 376–392.

Rejc J. (2008). HITRE IN TOČNE BREZKONTAKTNE MERITVE RAZDALJ V INDUSTRIJSKEM OKOLJU. Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko.

LASER DISTANCE MEASUREMENT DEVICE LDM301 – OPERATING MANUAL, Release 002, Revision 007. Pridobljeno 1. 6. 2016 s spletnega vira:  
<http://www.jenoptik.com/docs>

Ministrstvo za delo, družino in socialne zadeve, Sektor za varnost in zdravje pri delu (2010). UMETNA OPTIČNA SEVANJA, Priročnik z osnovnimi informacijami in navodili. Pridobljeno 1. 6. 2016 s spletnega vira:  
<http://www.osha.mddsz.gov.si/resources/files/pdf/opticnasevanja-prirocnik-final.pdf>