

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvorna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Trček, L., 2015. Algoritem za natančen izračun potovalnih časov vlakov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Zgonc, B., somentorica Šemrov, D.): 37 str.

Datum arhiviranja: 30-09-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Trček, L., 2015. Algoritem za natančen izračun potovalnih časov vlakov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Zgonc, B., co-supervisor Šemrov, D.): 37 pp.

Archiving Date: 30-09-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

Kandidat:

LUKA TRČEK

**ALGORITEM ZA NATANČEN IZRAČUN POTOVALNIH
ČASOV VLAKOV**

Diplomska naloga št.: 203/B-GR

**ALGORITHM FOR ACCURATE CALCULATION OF
TRAIN TRAVEL TIMES**

Graduation thesis No.: 203/B-GR

Mentor:

prof. dr. Bogdan Zgonc

Somentorica:

asist. Darja Šemrov

Ljubljana, 17. 09. 2015

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Luka Trček izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Algoritem za natančen izračun potovalnih časov vlakov«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, september 2015

Luka Trček

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 656.2(043.2)
- Avtor:** Luka Trček
- Mentor:** prof. dr. Bogdan Zgonc
- Somentor:** asist. Darja Šemrov
- Naslov:** Algoritem za natančen izračun potovalnih časov vlakov
- Tip dokumenta:** diplomsko delo
- Obseg in oprema:** 37 str., 4 pregl., 27 sl., 36 en., 7 pril.
- Ključne besede:** najkrajši potovalni čas, diferencialna enačba gibanja vlaka, odpor proge, odpor vlaka, vlečna sila, karakteristični odseki, hitrostni odseki, Visual Basic, algoritem

Izvilleček:

Diplomska naloga obravnava določanje potovalnih časov vlakov. Predstavljene so osnovne enačbe, s pomočjo katerih lahko v vsakem trenutku gibanja vlaka določimo sile, ki vplivajo na gibanje vlaka. Nato je s pomočjo drugega Newtonovega zakona o gibanju teles zapisana diferencialna enačba gibanja vlaka. V nalogi je opisan postopek, kako progo glede na hitrostne omejitve in spremembe v infrastrukturi razdeliti na različne odseke in kako to upoštevati v izračunu. Poudarek naloge je na algoritmu za določitev potovalnega časa poljubnega vlaka na poljubni progi. Algoritem zajema tako obdelavo vhodnih podatkov o vlaku in infrastrukturi kot modeliranje vlaka in proge ter reševanje enačbe gibanja z diferenciali po numerični metodi »korak za korakom«. Rešitev enačbe gibanja je najkrajši možni potovalni čas določenega vlaka na progi z znanimi karakteristikami. Algoritem za izračun potovalnih časov je implementiran s programskim jezikom Visual Basic v programu Excel. V zadnjem delu so prikazani še nekateri izračuni na konkretnih primerih, ki so lahko zanimivi tudi z vidika projektiranja.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 656.2(043.2)
Author: Luka Trček
Supervisor: Prof. Bogdan Zgonc, Ph.D.
Cosupervisor: asist. Darja Šemrov
Title: Algorithm for accurate calculation of train travel times
Document type: Graduation Thesis – University studies
Scope and tools: 37 p., 4 tab., 27 fig., 36 eq., 7 ann.
Keywords: shortest travel time, differential equation of a train's movement, track resistance, train resistance, traction force, characteristic sections, speed sections, Visual Basic, algorithm

Abstract

This thesis deals with the travel time of trains. The basic equations, which are used to determine the forces affecting the movement of trains at any given time are, presented. Newton's second law, which describes the movement of objects, was used to establish the differential equation of a train's movement. The procedure of dividing a track based on speed limits and changes in the infrastructure is described as well in this paper. The emphasis of this thesis is on the algorithm of establishing the travel time of a random train on a random track. The algorithm includes the processing of the train's and track's input data, the modelling of the train and the track and the solving of the equation of motion by a difference equation approach using the numerical »step-by-step« method as well. The solution of the equation is a certain train's shortest travel time possible. The algorithm to calculate travel time is implemented with the Visual Basic programming language in Excel. A few calculations of specific examples which can be interesting from a designing perspective are shown in the final part of the paper.

ZAHVALA

Za pomoč in nasvete med pisanjem diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Bogdanu Zgoncu in somentorici asist. Darji Šemrov.

Za vso dodatno motivacijo in koristne nasvete v času študija pa bi se zahvalil tudi izr. prof. dr. Vladu Stankovskemu.

Zahvalo naj izrečem tudi družini, ki me je ves čas podpirala.

KAZALO VSEBINE

Stran za opravke, errata	I	
Izjave	II	
Bibliografsko – dokumentacijska stran in izvleček	III	
Bibliographic – documentalistic information and abstract	IV	
Zahvala	V	
Kazalo preglednic	VIII	
Kazalo slik	IX	
Okrajšave in simboli	XI	
Seznam prilog	XIII	
1 UVOD		1
1.1 Namen		1
1.2 Cilj		1
2 OSNOVE		2
2.1 Pomen ocene predvidevanih potovalnih časov		2
2.2 Temeljni podatki za oceno časov potovanj		2
3 SILE PRI GIBANJU VLAKA		3
3.1 Vlečna sila		3
3.1.1 Adhezijska vlečna sila in adhezija		3
3.1.2 Vlečna karakteristika lokomotive		4
3.2 Osnovni odpor		5
3.2.1 Odpor lokomotive		6
3.2.2 Odpor vagonov pri potniškem vlaku		6
3.2.3 Odpor vagonov pri tovornem vlaku		6
3.3 Odpor proge		7
3.3.1 Odpor na vzponu		7
3.3.2 Odpor v krivini		8
3.3.3 Odpor v predoru		9
3.4 Specifične vrednosti odporov		11
3.5 Specifična vlečna sila		12
3.6 Prispevek rotacijske kinetične energije		12
4 GIBANJE VLAKA		13
4.1 Enačba gibanja vlaka		13
4.2 Način gibanja vlaka		13
4.2.1 Pospeševanje		14
4.2.2 Gibanje s konstantno veliko hitrostjo		14
4.2.3 Prosti tek		14
4.2.4 Zaviranje		15
5 MODEL ZA IZRAČUN POTOVALNIH ČASOV		16
5.1 Karakteristični in hitrostni odseki proge		16
5.2 Modeliranje vlaka		16
5.2.1 Referenčna točka vlaka in hitrostne omejitve		17
5.2.2 Določitev trenutnega specifičnega odpora proge zaradi nagibov in krivin		17

5.2.3	Določitev trenutnega specifičnega odpora zaradi predora	18
5.2.4	Trenutni nadomestni nagib proge	19
5.3	Hitrostni odsek in vhodna hitrost, izhodna hitrost in največja hitrost	19
5.3.1	Določitev odsekov zaviranja – največje vhodne in izhodne hitrosti	19
5.3.2	Določitev odsekov pospeševanja – izhodne hitrosti	21
6	DOLOČITEV POTOVALNIH ČASOV	23
6.1	Potovalni čas pri enakomernem zaviranju	23
6.2	Reševanje enačbe gibanja z diferenciali	23
6.3	Opis algoritma za določitev potovalnih časov	25
6.3.1	Faza pospeševanja in enakomernega gibanja	25
6.3.2	Faza enakomernega zaviranja	26
6.3.3	Dolžine podintervalov	27
6.4	Opravljen delo vlečne sile in zavorne sile	28
7	IZRAČUNANA PRIMERA V PROGRAMU	30
7.1	Vpliv nagiba na območju speljevanja vlakov na potovalne čase	30
7.2	Okvirni potovalni časi vlakov na progi Koper – Divača (obstoječi in načrtovan tir)	33
8	ZAKLJUČEK	35

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Pregled najmanjših priporočenih prerezov predorov in pripadajočih obsegov pri različnih računskih hitrostih potniških vlakov pri dizelski in električni vleki (Yi et al. 2011).....	10
Preglednica 2: Oznake in osnovni podatki o vlakih, ki so uporabljeni v analizah	30
Preglednica 3: Izračunani potovalni časi za različne variante in vlake ter izračunana razlika med njimi.	31
Preglednica 4: Potovalni časi in povprečne hitrosti vlakov na obeh tirih z vmesno zaustavitvijo.	34

KAZALO SLIK

Slika 1: Adhezijska sila in vlečna sila na pogonskem kolesu	3
Slika 2: Adhezijski koeficient v odvisnosti od hitrosti vlaka pod različnimi pogoji (Steimel, 2008, str. 30).....	4
Slika 3: Vlečne karakteristike lokomotive in adhezijska omejitev (Cole, 2006, str. 257)	5
Slika 4: Nagib proge in odpor proge zaradi nagiba.....	7
Slika 5: Odpor zaradi krivine (Barkan, 2007, str. 22)	8
Slika 6: Uporabniški vmesnik za definiranje proge v programu (od leve proti desni na sliki so to sezname nagibov, krivin, predorov in hitrostnih omejitev).....	16
Slika 7: Uporabniški vmesnik za sestavo vlaka (seznam lokomotiv, potniških vagonov in tovornih vagonov), definiranje njegove poti in ostalih karakteristik.	17
Slika 8: Prehod vlaka iz odseka z nižjo progovno hitrostjo na odsek z višjo progovno hitrostjo	17
Slika 9: Trenutni specifični odpor proge zaradi različnih nagibov, na katerih se trenutno nahaja vlak	18
Slika 10: Zaviralne krivulje dobljene iz predpisanih hitrostnih omejitev	20
Slika 11: Odsek, v katerem vlak doseže največjo dovoljeno hitrost.....	21
Slika 12: Odsek, kjer vlak ne doseže največje hitrosti	21
Slika 13: Hitrostni odsek z zaviranjem, kjer vlak doseže največjo dovoljeno hitrost.....	22
Slika 14: Hitrostni odsek z zaviranjem, kjer pospeševalna krivulja vlaka seka zaviralno krivuljo.	22
Slika 15: Hitrostni odseki z označenimi začetnimi in končnimi stacionažami.	25
Slika 16: Delitev na podintervale. Modri črtkani črti predstavljata popravljene meje mejnih intervalov.	27
Slika 17: Stik med pospeševalno in zaviralno krivuljo.....	28
Slika 18: Shematičen prikaz glavnega dela algoritma za reševanje enačbe gibanja vlaka.....	29
Slika 19: Vzdolžni profil preučevanega odseka	30
Slika 20: Hitrostni profili tovornega vlaka L1.T1000 za vse možne variante..	31
Slika 21: Hitrostni profili tovornega vlaka L2.T2000 z doprejo za vse možne variante.....	31

Slika 22: Hitrostni profili potniškega vlaka mase 410 ton za vse možne variante.	32
Slika 23: Specifični odpor proge in specifična vlečna sila v primeru zaustavitve tovornih vlakov L1.T1000 in L2.T2000	32
Slika 24: Poenostavljeno modeliranje krivine s prehodnicama.	33
Slika 25: Specifični odpor kopske proge zaradi nagibov in krivin na obstoječem in načrtovanem tiru	33
Slika 26: Hitrostni profili različnih vlakovna progi Koper-Prešnica pri dobrih adhezijskih pogojih.....	34
Slika 27: Hitrostni profili različnih vlakov na načrtovani progi Koper-Divača	34

OKRAJŠVE IN SIMBOLI

A_{predor}	prečni prerez predora [m ²]
A_{vlak}	prečni prerez vlaka [m ²]
F_L	skupna adhezijska teža lokomotiv [N]
F'_L	adhezijska teža, ki odpade na eno pogonsko kolo [N]
F_R	vsota vseh odporov [N]
F_{Ti}	inducirana vlečna sila [N]
F_{Tr}	skupna vlečna sila na obodu pogonskih koles [N]
F'_{Tr}	vlečna sila na obodu opazovanega pogonskega kolesa [N]
F_b	zavorna sila [N]
L_h	dolžina opazovanega hitrostnega odseka [m]
L_R	dolžina krožnega loka [m]
L_k	dolžina opazovanega karakterističnega odseka proge [m]
L_{preh}	dolžina prehodnice [m]
$L_{v,k}$	dolžina dela vlaka, ki se nahaja na opazovanem karakterističnem odseku [m]
$L_{v,t}$	dolžina dela vlaka, ki se nahaja v predoru [m]
L_{vlak}	dolžina vlaka [m]
R_0	osnovni odpor – odpor zaradi vagonov in lokomotiv [N]
R_R	odpor proge zaradi krivine s polmerom R ([m]) [N]
R_{Tr}	odpor lokomotiv oz. vlečnih vozil [N]
R_i	odpor proge zaradi nagiba i [‰]
R_{predor}	obseg predora [m]
R_t	odpor zaradi predora [N]
R_{wf}	odpor niza tovornih vagonov [N]
R_{wp}	odpor niza potniških vagonov [N]
a_b	pojemek zaviranja [m/s ²]
f_{Tr}	specifična vlečna sila [N/kN]
f_p	faktor dodan k masi zaradi prispevka rotacijske kinetične energije vrtečih koles
i_{ef}	nadomestni nagib proge [‰]
i_{ef}^t	trenutni nadomestni nagib proge (= w_{proge}^t) [‰]
i_m	merodajni nagib [‰]
l_{predor}	dolžina predora [m]
m_{Tr}	masa lokomotiv oz. vlečnih vozil [kg]
m_w	masa vagonov [kg]
$v_{entr,max}$	največja vhodna hitrost v hitrostni odsek [m/s]
v_{entr}	vhodna hitrost vlaka v hitrostni odsek [m/s]
$v_{ex,max}$	največja izhodna hitrost iz hitrostnega odseka [m/s]
v_{ex}	izhodna hitrost vlaka iz hitrostnega odseka [m/s]
v_{max}	največja dovoljena hitrost v hitrostnem odseku [m/s]
$w_{R,k}$	specifični odpor proge zaradi krivine v karakterističnem odseku [N/kN]
$w'_{R,k}$	trenutni delni specifični odpor zaradi krivine v karakterističnem odseku [N/kN]
w_R	specifični odpor krivine s polmerom R ([m]) [N/kN]
w_R^t	trenutni specifični odpor zaradi krivin [N/kN]
w_{Tr}	specifični odpor lokomotiv oz. vlečnih sredstev [N/kN]
$w_{i,k}$	specifični odpor zaradi nagiba karakterističnega odseka [N/kN]

$w'_{i,k}$	trenutni delni specifični odpor zaradi nagiba karakterističnega odseka [N/kN]
w_i	specifični odpor zaradi nagiba i ([‰]) [N/kN]
w_i^t	trenutni specifični odpor zaradi nagibov [N/kN]
w_o	specifični osnovni odpor [N/kN]
w_{proge}	specifični odpor proge [N/kN]
w_{proge}^t	trenutni specifični odpor prog zaradi zasedenih karakterističnih odsekov ($= i_{ef}^t$) [N/kN]
$w_{t,k}$	specifični odpor predora v karakterističnem odseku [N/kN]
$w'_{t,k}$	trenutni delni specifični odpor zaradi predora v karakterističnem odseku [N/kN]
w_t^t	trenutni specifični odpor zaradi predorov [N/kN]
x_k	stacionaža začetka opazovanega odseka proge (karakteristični ali hitrostni) [m]
x_{kon}	končna stacionaža opazovanja gibanja [m]
$x_{zač}$	začetna stacionaža opazovanja gibanja [m]
F	razlika vlečne sile in vsote vseh odporov [N]
V	hitrost vlaka v [km/h]
m	masa vlaka [kg]
s	lokalna koordinata hitrostnega odseka oz. dolžina poti, ki jo vlak prevozi v opazovanem hitrostnem odseku [m]
t	čas potovanja vlaka [s]
v	hitrost vlaka v [m/s]
x	stacionaža (pozicija) glede na globalni koordinatni sistem [m]
μ	adhezijski koeficient na stiku med tirnico in pogonskimi kolesi

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A:	TABELA MERODAJNIH IN GEOMETRIČNIH NAGIBOV V PREDORIH	A1
PRILOGA B:	VLEČNE KARAKTERISTIKE IN SLIKE NEKATERIH POMEMBNEJŠIH LOKOMOTIV, KI VOZIJO NA GLAVNIH PROGAH SLOVENSКИH ŽELEZNIC	B1-B4
PRILOGA C:	GLAVNE KARAKTERISTIKE NEKATERIH TOVORNIH VAGONOV NA SLOVENSКИH ŽELEZNICAH	C1-C3
PRILOGA D:	DEFINIRANE KARAKTERISTIKE VOZIL V PROGRAMU	D1
PRILOGA E:	DEL PROGRAMSKE KODE (VBA EXCEL), NAMENJENE ZA REŠEVANJE ENAČBE GIBANJA V ODSEKU Z ZAVIRANJEM	E1-E3
PRILOGA F:	OSTALI REZULTATI IZRAČUNA IZ PRVEGA PRIMERA	F1-F6
PRILOGA G:	OSTALI PODATKI IN REZULTATI IZRAČUNA IZ DRUGEGA PRIMERA (PROGA KOPER – DIVAČA)	G1-G8

Ta stran je namenoma prazna.

1 UVOD

Železniška infrastruktura mora zagotavljati varen, zanesljiv in učinkovit prevoz potnikov in blaga. Pri načrtovanju železniške infrastrukture je potrebno upoštevati pravilnike, ki predpisujejo tehnične zahteve in pogoje za projektiranje, gradnjo, vzdrževanje in nadgradnjo železniških prog. Zavedati pa se moramo, da je infrastruktura namenjena odvijanju prometa, kar pomeni, da se mora že v fazi načrtovanja zagotavljati funkcionalnost infrastrukture kot celote. To pomeni tudi sodelovanje različnih strokovnjakov.

Potovalni čas določene vrste vlaka na odseku proge je eden bistvenih kriterijev za določevanje funkcionalnosti infrastrukture.

1.1 Namen

Namen naloge je izračunati najkrajše možne potovalne čase izbranih vlakov na določenem odseku proge. Potovalni časi vlakov so odvisni tako od značilnosti vlaka kot od značilnosti proge. Sama proga lahko na potovalni čas vpliva na več načinov, ki pa se za različne vrste vlakov različno odražajo: s progovno hitrostjo, z osnovnimi geometrijskimi elementi, ki povečujejo odpor vlaka in s prometnimi mesti preko katerih zagotavljamo čim bolj učinkovito prometno vodenje vlakov.

Ocene potovalnih časov so pomembne za izračun kapacitete vozlišč in prog, ki so odvisne od hitrosti vlakov med prostorskimi odseki. Pri tem se moramo zavedati, da so hitrosti za različne vlake lahko različne, zato poleg podatkov o progi potrebujem tudi natančne podatke o vlaku.

Osnova za izračun potovalnih časov je enačba gibanja vlaka. Za določitev potovalnega časa vlaka od ene točke do druge moramo zato poznati sile, ki med gibanje delujejo na vlak. S tem, ko v vsakem trenutku gibanja poznamo velikost sil, ki delujejo na vlak, lahko izračunamo delo, ki ga opravita vlečna in zavorna sila. To pa je osnova za optimizacijo vožnje vlaka na določeni progi ali izbor najbolj optimalne projektantske rešitve.

V nalogi se bom osredotočil na izračun najkrajših potovalnih časov različnih vlakov na različnih progah.

1.2 Cilj

Cilj moje naloge je napisati preprost program s pomočjo Excela in programskega jezika Visual Basic (VBA), ki bi za vlak poljubne sestave, poljubno progo in pot izračunal najkrajši potovalni čas. V nalogi bom s programom predstavil nekatere primere, ki prikazujejo prednosti in slabosti nekaterih projektantskih izvedb (postavitve signalnih naprav, nakloni proge in predori).

2 OSNOVE

Osnovno teoretično izhodišče naloge so razlage in enačbe Brungerja in Dahlhausa (2008).

2.1 Pomen ocene predvidevanih potovalnih časov

Ocene potovalnih časov so pomembne za izračun kapacitete vozlišč in prog, ki so odvisne od hitrosti vlakov med prostorskimi odseki. Pri tem se moramo zavedati, da so hitrosti za različne vlake lahko različne, zato potrebujemo natančne podatke o vlaku.

Za izračun potovalnih časov vlaka na odsekih moramo poznati velikost sil, ki delujejo na vlak med vožnjo. To pa je osnova za izračun porabe energije in oceno obratovalnih stroškov proge.

2.2 Temeljni podatki za oceno časov potovanj

Za oceno potovalnih časov nujno potrebujemo podatke o infrastrukturi, podatke o vlaku in njegovi dejanski poti. Brünger in Dahlhaus (2008) navajata naslednje:

- podatki o prog: razdalje, hitrostne omejitve, gradienti proge, krivine in predori;
- karakteristike lokomotive: vlečna sila, odpor lokomotive;
- karakteristike voznega parka: masa, dolžina, odpor vagonov (večinoma so parametri odvisni od vrste vlaka);
- podatki o vlakovni poti (začetni in končni pogoji, morebitne zaustavitve in omejitve voznega reda vlaka).

Pomembne so tudi informacije o signalno-varnostnih napravah, zavorni sili in nadzoru zavornega sistema. Te podatke sem v nalogi zajel s predpisanimi pojemki pri zaviranju in hitrostnimi omejitvami na prog.

Na gibanje vlaka vplivajo tudi dejavniki, ki jim težko pripišemo natančne vrednosti vplivov, to so t.i. nedeterministični dejavniki, ki jih avtorja Brünger in Dahlhaus (2008) razdelita na sledeče:

- človeški faktor (z vlakom lahko vsak strojevodja upravlja drugače);
- vremenski vplivi (mokre tirnice poslabšajo pogoje za vleko);
- stanje proge in z njo povezana vzdrževalna dela;
- stanje voznega parka in z njim povezane omejitve.

V programu, ki sem ga izdelal, je mogoče z vrednostjo adhezijskega koeficienta upoštevati adhezijske pogoje. V primeru, da bi želeli dodatno upoštevati še ostale nedeterministične vplive, k izračunanemu potovalnemu času prištejemo še časovne izgube zaradi teh vplivov. Vpliv počasne vožnje ali počasnejše vožnje preko kretnic v odklon lahko, če poznamo hitrostno omejitev na tem delu proge, zajamemo kar z zmanjšano progovno hitrostjo na določeni razdalji.

Pri oceni potovalnih časov bom izhajal iz osnovnih zvez gibanja. Upošteval bom drugi Newtonov zakon, ki pravi, da je vsota vseh sil, ki delujejo na telo enaka produktu mase in pospeška opazovanega telesa. Da bi lahko torej ocenil potovalne čase, potrebujem v vsakem trenutku gibanja vlaka smeri in velikosti vseh sil, ki nanj delujejo. V matematičnem smislu pa gre za reševanje diferencialne enačbe gibanja.

3 SILE PRI GIBANJU VLAKA

Za izračun potovalnih časov je potrebno upoštevati vplive infrastrukture in značilnosti vlaka. Te dejavnike opišemo s štirimi komponentami, in sicer: vlečna sila, odpor lokomotive, odpor železniškega vozila ali vagona in s podatki o infrastrukturi, posebno je pomemben linijski odpor proge zaradi gradienta.

Razlika med vlečno silo in vsoto vseh odporov je razpoložljiva sila za pospeševanje vlaka. Opišemo jo z enačbo:

$$F_{Tr} - \sum R_j = F, \quad (1)$$

kjer so: F_{Tr} skupna vlečna sila na obodu pogonskih koles,
 R_j odpor j (zajema odpore železniških vozil in odpor proge),
 F razlika med vlečno silo in vsemi odpori, ki delujejo na vlak.

3.1 Vlečna sila

Lokomotiva ali druga strojna oprema namenjena za vleko (v nadaljevanju bom uporabljal izraz lokomotiva) generira silo, ki je namenjena premikanju vlaka – to je t.i. inducirana vlečna sila F_{Ti} . Za vleko je pomembna vlečna sila, ki se ustvari na stiku med pogonskimi kolesi in tirnico. Kot navajata Brünger in Dahlhaus (2008), je ta omejena zaradi naslednjih razlogov:

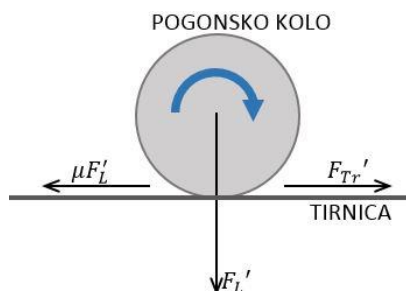
- izgube zaradi prenosa moči iz motorja na pogonska kolesa;
- omejitev vlečne sile na maksimalno vrednost zaradi možnega pregrevanja motorjev;
- vlečna sila na obodu koles je omejena z razpoložljivo adhezijsko vlečno silo.

3.1.1 Adhezijska vlečna sila in adhezija

Najbolj pomembna omejitev, od katere je odvisna vlečna sila na obodu pogonskih koles je kotalna torna sila pogonskih koles na tirnicah, ki je nasprotna smeri vrtenja koles. To silo imenujemo adhezijska vlečna sila ali adhezija F_{Tr} . Omejena je z adhezijskim koeficientom μ in adhezijsko težo pogonskega vozila F_L . Velikost vlečne sile na obodu koles torej ne more preseči velikosti adhezijske vlečne sile, sicer pride do spodrsavanja koles:

$$F_{Tr} \leq \mu F_L, \quad (2)$$

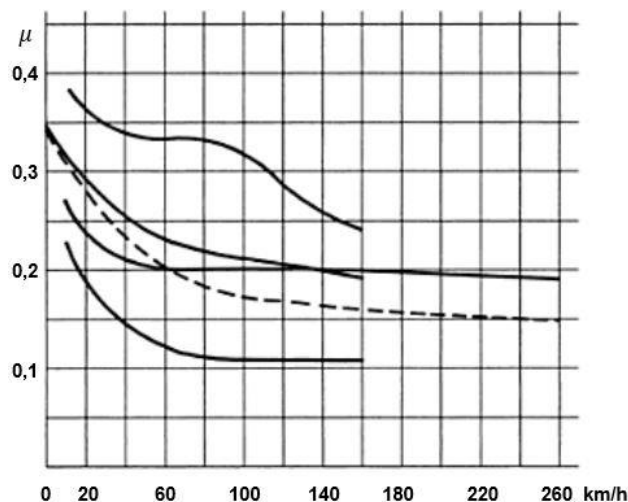
kjer so: F_{Tr} vlečna sila, ki nastane na stiku med pogonskimi kolesi in tirnicami,
 μ adhezijski koeficient na stiku med tirnico in pogonskimi kolesi,
 F_L adhezijska teža pogonskih koles.



Slika 1: Adhezijska sila in vlečna sila na pogonskem kolesu

Adhezijska teža F_L je teža, ki odpade na pogonska kolesa pri vleki in na zavirana kolesa pri zaviranju. Pri lokomotivah je adhezijska teža pri vleki največkrat enaka lastni teži lokomotive.

Adhezijski koeficient μ s hitrostjo vlaka pada. Pri mirovanju je na suhih stičnih površinah enak približno $\mu = 0,35$, na vlažnih tirnicah pa se adhezijske lastnosti bistveno poslabšajo, tudi do 40%. Značilno je tudi, da adhezijski koeficient s temperaturo stika med kolesi in tirnico narašča. V praksi adhezijske lastnosti stika med tirnico in obodom pogonskih koles izboljšujemo z nanašanjem posebnega peska med stične površine koles in tirnic ali s kontroliranim spodrsavanjem oboda koles. Povzeto po Píchlik in Zděnek (2014) ter Zgonc (2003).



Slika 2: Adhezijski koeficient v odvisnosti od hitrosti vlaka pod različnimi pogoji (Steimel, 2008, str. 30)

Srednjo vrednost adhezijskega koeficienta lahko določimo po izrazu, ki sta ga predlagala Curtius in Kniffler (Profillidis, 2006):

$$\mu(v) = \frac{7,5}{3,6 v + 44} + 0,161, \quad (3)$$

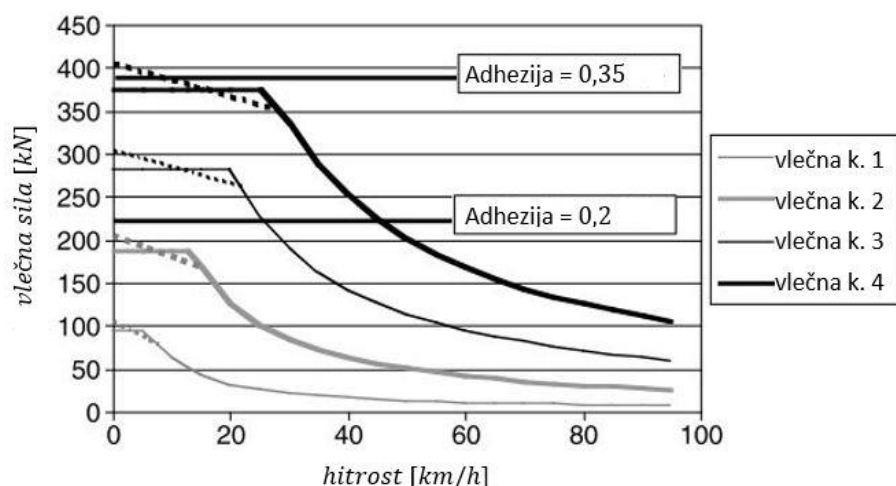
kjer sta: v hitrost vlaka v [m/s],
 μ adhezijski koeficient.

Cene (2006) v svojem članku omenja, da ima večsistemska Siemensova lokomotiva serije 541, ki vozi po slovenskih tirih, vgrajeno elektronsko krmiljenje adhezijskega koeficienta, kar pomeni, da ta pri speljevanju in velikih hitrostih znaša nespremenljivo 0,36.

3.1.2 Vlečna karakteristika lokomotive

Vlečna sila F_{Tr} predstavlja silo, ki nastane na stiku med pogonskimi kolesi in tirnicami. V splošnem je to inducirana vlečna sila zmanjšana zaradi izgube ob prenosu moči in je omejena zaradi možnega pregrevanja pogonskih motorjev in z razpoložljivo adhezijo. Kako se vlečna sila na obodu koles lokomotive spreminja s hitrostjo lokomotive, najpogosteje prikažemo s t. i. diagramom vlečne karakteristike lokomotive. Vsaka lokomotiva oz. vlečno vozilo ima svojo vlečno karakteristiko. Značilno je, da pri vleki vlakov potrebujemo veliko vlečno silo pri speljevanju in manjšo pri višjih hitrostih.

Vlečne karakteristike nekaterih lokomotiv, ki vozijo po naših tirih so podane v prilogah B1-B4 oz. v prilogi C1 v numeričnih vrednostih, tako kot so zapisane v programu.



Slika 3: Vlečne karakteristike lokomotive in adhezijska omejitev (Cole, 2006, str. 257)

3.2 Osnovni odpor

Odpor vozila pri enakomernem gibanju v premi in horizontali imenujemo osnovni odpor. Odvisen je od konstrukcijskih karakteristik posameznega vozila in od hitrosti vožnje. Zaradi različnih lastnosti lokomotiv in potniških oz. tovornih vagonov, ki sestavljajo vagonski niz, odpore izračunavamo ločeno za lokomotivo in ločeno za vagonski niz. Celoten osnovni odpor vlaka je vsota odpora lokomotive in vagonskega niza (povzeto po Zgonc (2003)).

Vlečni motorji v lokomotivi oz. drugem vlečnem vozilu porabljajo del energije za premagovanje mehanskih odporov kot so odpor zaradi kotaljenja koles po tirnici (odpor je posledica premagovanja elastičnih deformacij), odpor zaradi adhezije med kolesom in tirnico ter odpor zaradi trenja v ležajih. Našteti odpori so odvisni od teže in konstrukcijskih lastnosti vozila, trdote kolesa in tirnice, stanja proge in vrste ležajev. Nekateri od teh se s hitrostjo ne spreminjajo in so konstantni, del pa se s hitrostjo približno linearno spreminja. Podrobnejši opis teh odporov opisuje Zgonc (2003), najdemo pa ga tudi na spletu, na primer Jain (2003).

Vlak mora med vožnjo premagovati tudi zračni upor, ki je posledica pritiska zraka na čelno površino vlaka, trenja zraka ob straneh in zračnega srka na koncu vlaka in posameznimi vagoni. Odpor zraka se povečuje s kvadratom hitrosti vlaka in je, kot omenja Zgonc (2003), neodvisen od teže vozil.

Vse odpore, ki delujejo na vlak v premi na horizontali pri hitrosti v [m/s], lahko v splošnem zapišemo s kvadratno parobolo, katere koeficienti r_i so odvisni od karakteristik vlaka in od hitrosti vetra Δv . Vrednosti koeficientov so lahko podane za celoten vlak z znano sestavo ali pa so podani posebej za vagonski niz in posebej za lokomotivo, slednji način sem tudi uporabil v nalogi:

$$R_0(v) = r_0 + r_1 (v + \Delta v) + r_2 (v + \Delta v)^2 \quad (4)$$

Za hitrost vetra se pogosto predpostavi vrednost $\Delta v = 15 \text{ km/h} = 4,17 \text{ m/s}$ (Profillidis 2006).

Formule, ki so predstavljene v tem poglavju, se pogosto uporabljajo v srednji Evropi v običajnih pogojih (na primer na nemških železnicah). Veliko železniških družb za čim boljši opis dejanskega stanja uporablja tudi druge ocene, nekaj teh (za železniške družbe v Veliki Britaniji,

Franciji, Rusiji, Kanadi, ZDA, Indiji, na Kitajskem, na Japonskem ali na Češkem) lahko najdemo na spletnih straneh (Newman, 2010; Jain, 2013) in v literaturi (Profillidis, 2006; Chandra & Agarwal, 2007; Hay, 1982). Omenjene enačbe so največkrat podane za vlake z vnaprej znano sestavo.

3.2.1 Odpor lokomotive

Odpor lokomotive lahko zajamemo z enačbo, ki jo uporablja program Open Track, Strahlovo formulo za izračun odpora lokomotive (Huerlimann in Andrew, 2003):

$$R_{Tr}(v) = g \left(\left(f_L \frac{m_{Tr}}{1000} \right) + \left(k_{St1} ((v + \Delta v) 3,6)^2 \right) \right), \quad (5)$$

kjer so:	R_{Tr}	odpor lokomotive [N],
	g	gravitacijski pospešek (9,81 m/s ²),
	m_{Tr}	masa lokomotive [kg],
	v	hitrost vlaka [m/s],
	Δv	hitrost vetra (15 km/h = 4,17 m/s),
	f_L	faktor odpora (privzeta vrednost je 3,3),
	k_{St1}	koeficient odpora (0,03 kg $\frac{s^2}{m^2}$).

3.2.2 Odpor vagonov pri potniškem vlaku

Za določitev odpora niza potniških vagonov se najpogosteje uporablja eksperimentalno in teoretično podprto Sauthoffovo enačbo. Brünger in Dahlhaus (2008) jo podajata v naslednji obliki, pri tem pa predlagata tudi vrednosti koeficientov in nekaterih spremenljivk:

$$R_{wp}(v) = \frac{m_w}{1000} g (1,9 + c_b 3,6 v) + 0,0471 (n_w + 2,7) A_f (3,6 (v + \Delta v))^2, \quad (6)$$

kjer so:	R_{wp}	odpor potniških vagonov [N],
	m_w	masa potniških vagonov [kg],
	g	gravitacijski pospešek (9,81 m/s ²),
	c_b	faktor, ki upošteva število osi vagona,
	v	hitrost vlaka [m/s],
	Δv	hitrost vetra (15 km/h = 4,17 m/s),
	n_w	število potniških vagonov,
	A_f	učinkovit prečni prerez vagona [m ²] (upošteva vpliv aerodinamike, navadno privzamemo 1,45 m ²).

Faktor c_b določimo glede na število osi, ki jih imajo vagoni. Za štiri osi je vrednost faktorja enaka 0,0025, za tri osi 0,004, za dve osi pa 0,007.

3.2.3 Odpor vagonov pri tovornem vlaku

Za tovrne vlake se za oceno odpora vagonskega niza pogosto uporablja Strahlova enačba. Brünger in Dahlhaus (2008) jo podajata v naslednji obliki s predpisanimi koeficienti:

$$R_{wf}(v) = \frac{m_w g}{1000} \left(c_a + \frac{(0,007 + c_m)(3,6v)^2}{100} \right) \quad (7)$$

kjer so:	R_{wf}	odpor tovornih vagonov [N],
----------	----------	-----------------------------

m_w	masa tovornih vagonov [kg],
g	gravitacijski pospešek [$9,81 \text{ m/s}^2$],
c_a	koeficient, odvisen od vrste ležajev (za vagonne z drsnimi ležaji privzamemo 2,0; za vagonne z valjčnimi ležaji pa 1,4),
c_m	vrednost, ki zajame zračni upor glede na vrsto tovornih vagonov.

Vrednost c_m zajame različne zračne upore glede na vrsto vagonov, in sicer:

- $c_m = 0,05$ za mešane vlake,
- $c_m = 0,032$ za polno naložene vagonne za premog ali železovo rudo,
- $c_m = 0,04$ za zaprte vagonne,
- $c_m = 0,1$ za prazne odprte vagonne.

3.3 Odpor proge

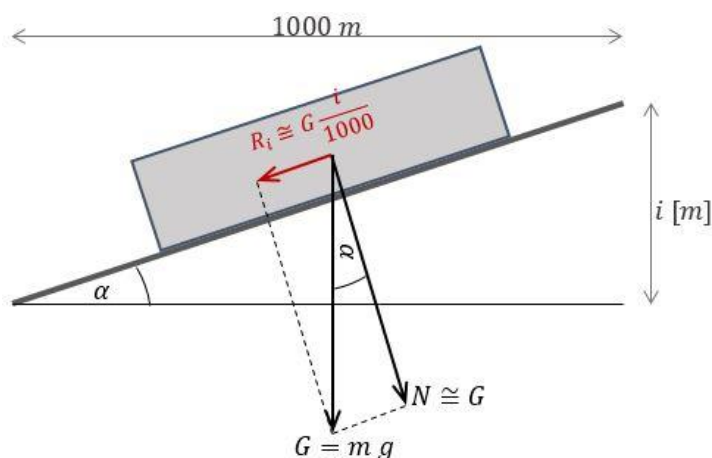
Največji odpor na vlak predstavlja ravno odpor proge, ki se vzpenja. V primeru ostrih krivin se odpor proge še poveča. Daljši predori lahko zaradi povečanega zračnega upora močno prispevajo k dodatnim odporom. Pri projektiranju ali nadgradnji prog na strmih in daljših vzponih je zato potrebno pozornost posvetiti tudi sami dolžini predora na vzponu.

3.3.1 Odpor na vzponu

Odpor vlaka na vzponu je komponenta sile teže vozila, ki deluje vzporedno z ravnino proge. V primeru vzpona (vzdolžni nagib proge je pozitiven) ta komponenta nasprotuje smeri gibanja, ko pa govorimo o padu (vzdolžni nagib proge je negativen), vzdolžna komponenta sile teže deluje v smeri gibanja. Z enačbo odpor proge zaradi nagiba zapišemo kot:

$$R_i = m g \sin \alpha \quad (8)$$

kjer so: R_i odpor zaradi vzpona [N],
 m masa vlaka [kg],
 g gravitacijski pospešek [$9,81 \text{ m/s}^2$],
 α kot vzdolžnega nagiba proge.

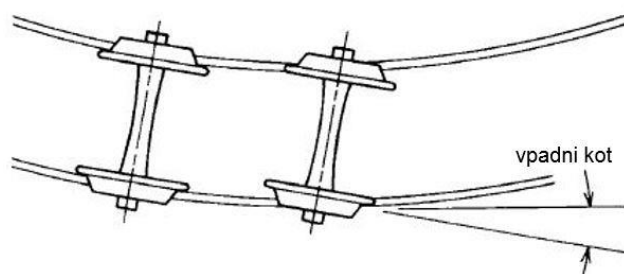


Slika 4: Nagib proge in odpor proge zaradi nagiba

Kot α je pri vzponih železniških prog zelo majhen (na primer, pri vzponu 20‰ je kot vzpona enak le $\alpha = 1^{\circ}8'$), zato lahko predpostavimo $\sin \alpha \cong \tan \alpha$. Nagib proge pa je razmerje med višinsko razliko dveh točk na določeni razdalji, torej tangens kota nagiba: $\tan \alpha = \frac{h}{l} = \frac{i[\text{‰}]}{1000}$. Odpor zaradi vzpona proge lahko izrazimo torej neposredno z nagibom proge:

$$R_i = g m \frac{i}{1000} \quad (9)$$

3.3.2 Odpor v krivini



Slika 5: Odpor zaradi krivine (Barkan, 2007, str. 22)

Odpor v krivini je teoretično težko natančno določiti, zato se za določitev tega odpora poslužujemo empiričnih enačb. Odpor, ki se pojavi pri vožnji vlaka skozi krivino je odvisen od tirne širine, koeficientom trenja med tirnico in kolesi, od primanjkljaja oz. presežka nadvišanja, od polmera krožne krivine in navsezadnje tudi od značilnosti voznih sredstev. V literaturi najdemo več različnih enačb, s katerimi lahko izračunamo odpor vozila v krivini. Chandra in Agarwal (2007) na strani 440 navajata splošno enačbo za izračun odpora zaradi krivine in odpor tudi podrobneje opišeta. Najbolj pogosto pa se uporablja empirično dobljene enačbe, ki so odvisne le od polmera krožnega loka, kjer so vrednosti ostalih parametrov že privzete. Nekaj teh najdemo na spletni strani (Jain, 2013) in v literaturi (Zgonc, 2003; Huerlimann & Andrew, 2003; Cole, 2006). V ZDA odpor zaradi krivine izražajo neposredno z ekvivalentnim vzdolžnim nagibom, kjer odpor krivine z odklonom ene stopinje kompenzirajo z 0,04‰ strmim vzdolžnim nagibom (Riley E. 2012). Odpor zaradi krivine bom v nalogi ocenil z enačbo, ki jo, kot omenja Profilidis (2006), uporabljajo tudi francoske železnice SNCF:

$$R_R = m g \frac{k}{R} \quad (10)$$

kjer so:	R_R	odpor zaradi krivine [N],
	R	polmer krivine [m],
	k	parameter z vrednostjo med 500 in 1200, povprečno 800
	m	masa vlaka [kg],
	g	gravitacijski pospešek [9,81 m/s ²].

V zgornji enačbi privzamemo vrednost faktorja $k = 800$ in s tem upoštevamo dobre pogoje v krivinah, kar pomeni, da so tirnice na teh mestih namazane. Cole (2006) utemljuje, da se v takem primeru odpor zaradi krivine lahko zmanjša tudi do 50%. Odpor vozila v krivini pa je do 200% večji od vrednosti (10) v primeru, da vozilo v krivini miruje (Cole, 2006). Odpor mirujočega vozila zaradi krivine je pomemben le pri speljevanju in ga v nalogi nisem upošteval.

3.3.3 Odpor v predoru

V predoru se zrak v okolico širi težje kot na odprti progi, zato se pri vožnji vlaka skozi predorsko cev odpor zraka poveča. V nadaljevanju povzemam besede avtorjev članka (Yi et al., 2011), v katerem navajajo enačbo za specifični odpor predora z namenom kompenzacije nagiba proge v dolgih predorih.

Učinek predora na vlak je podoben učinku premikajočega bata v cevi. Vlak se pri gibanju skozi predorsko cev najbolj upirata povečan pritisk zraka na sprednjem delu in srk zraka na zadnjem delu. K dodatnemu odporu pripomore, enako kot na prostem, trenje zaradi zraka, ki se premika ob vlak. Zračni upor v predoru je odvisen od hitrosti vlaka, velikosti predorske cevi, površine čelne strani vlaka, oblike vlaka, dolžine predora in od hrapavosti površine predora. Za koeficient, ki zajema vpliv vhodnega dela predora določimo vrednost 1,5, za koeficient notranjega trenja v predoru pa vrednost 0,025. Največji vpliv na velikost odpora zraka v predoru ima razmerje med površino prečnega prereza vlaka in površino prečnega prereza predora (A_{vlak}/A_{predor}). Avtorji za določitev dodatnega zračnega odpora v predoru podajajo teoretično izpeljano enačbo, ki pa velja le za enotirne predore, kar utemeljujejo s t.i. usmerjenim zračnim tokom (Yi et al. 2011):

$$w_t = \frac{1000 A L_{vlak} v^2}{m_{vlak}} \left(1 - \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{B + C(l_{predor} - L_{vlak})}{L_{vlak}}}} \right)^2 \quad (11)$$

$$A = \frac{0,00043 \gamma A_{predor}}{(1 - A_{vlak}/A_{predor})^2}$$

$$B = 174,419 (1 - A_{vlak}/A_{predor})^2$$

$$C = \frac{2,907(1 - A_{vlak}/A_{predor})^2}{4 A_{predor}/R_{predor}}$$

kjer so:	L_{vlak}	dolžina vlaka v predoru [m],
	l_{predor}	dolžina predora [m],
	v	hitrost vlaka [m/s],
	m_{vlak}	masa vlaka [kg],
	γ	gostota zraka [kg/m^3] (privzamemo $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$),
	A_{vlak}	površina prečnega prereza vlaka [m^2], privzamemo $12,6 \text{ m}^2$
	A_{predor}	učinkovita površina prečnega prereza predora [m^2],
	R_{predor}	obseg predora [m],

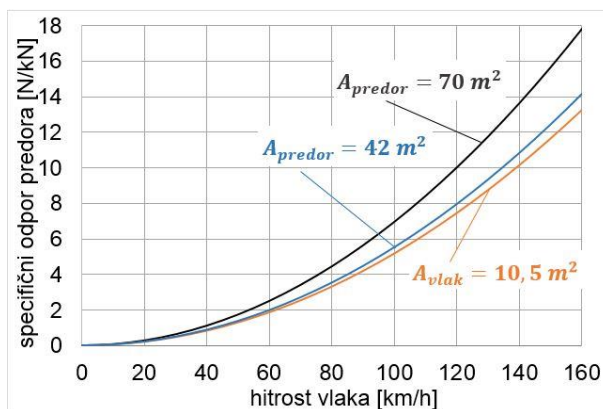
Za določitev učinkovite površine prereza predora avtorji največkrat navajajo razmerje površin sprednjega dela vlaka in prečnega prereza predora A_{vlak}/A_{predor} . Profillidis (2006) v svoji knjigi priporoča razmerje za enotirne predore $A_{vlak}/A_{predor} = 0,50 - 0,30$ in za dvotirne predore $A_{vlak}/A_{predor} = 0,15$. Avtorji zgoraj omenjenega članka podajajo tudi preglednico najmanjših priporočenih vrednosti površine prereza glede na računsko hitrost in vrsto vleke na progi in privzete vrednosti obsegov R_{predor} .

Preglednica 1: Pregled najmanjših priporočenih prerezov predorov in pripadajočih obsegov pri različnih računskih hitrostih potniških vlakov pri dizelski in električni vleki (Yi et al. 2011).

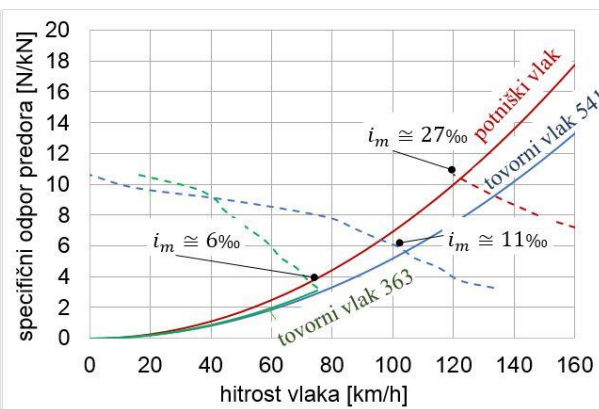
Računska hitrost potniškega vlaka	Učinkovit prerez $A_{predor} [m^2]$				obseg $R_{predor} [m]$	
	električna vleka		dizelska vleka		enotirni predor	dvtirni predor
	enotirni predor	dvtirni predor	enotirni predor	dvtirni predor		
do 120 km/h	37		31			
do 160 km/h	42	76	42	76	22,5	31,55
do 200 km/h	50	80	50	80		34,5
do 250 km/h	58	90	58	90	28	35
do 350 km/h	70	100	70	100	32	37,5

Podana enačba za odpor v predoru (11) predstavlja približno vrednost odpora. V izračunu se izkaže tudi njena pomanjkljivost, saj v določenem območju izraz ob večjih prerezih predora vrne večje vrednosti odpora kot v primeru manjših prerezov. Rezultat je v nasprotju z osnovno predpostavko, ki pravi, da se odpor z večjo površino prečnega prereza predora manjša. Zanimivo pa je, da izraz vrne manjši odpor ob manjšem prerezu vlaka, kar je v skladu s predpostavko, da se z manjšim razmerjem A_{vlak}/A_{predor} odpor predora zmanjša.

Na sliki (6), levi diagram prikazuje, kako hitrost vlaka (vlak z maso 1000 ton, dolžine 450 metrov) in velikosti prereza predora ali vlaka vplivajo na vrednost dodatnega specifičnega odpora zaradi predora. V primeru manjšega prereza vlaka (iz $12,6 m^2$ na $10,5 m^2$) se odpor zmanjša. Daleč največji vpliv na vrednost odpora zaradi predora ima hitrost vlaka. Diagram na sliki (7) pa prikazuje, kako na specifični odpor predora vpliva različna sestava vlaka. Narisani so grafi treh različnih vlakov; potniški vlak z 10 vagoni, ki ga vleče lokomotiva serije 541, tovorni vlak mase 1000 ton z lokomotivo serije 541 in tovorni vlak z maso 800 ton, ki ga vleče lokomotiva serije 363. Grafi predstavljeni s prekinjeno črto predstavljajo specifični odpor predora, ki ga dobimo preko merodajnega nagiba za vsak vlak pri določeni hitrosti iz tabele v prilogi A. Kjer se grafa prekrivata, je odpor dobljen iz enačbe enak odporu dobljenemu iz tabele. Merodajni nagib je odvisen od sestave vlaka in karakteristike lokomotive, zato so te točke zelo razpršene.



Slika 6: Grafični prikaz odpora predora dolžine 5 km pri različnih prerezih vlaka in predora



Slika 7: Odpor predora dolžine 5 km pri različnih vlakih

Zavedati se je potrebno, da enačba (11) ne upošteva morebitnih odprtih v predoru, ki so namenjene zmanjšanju zračnega nadtlaka pred vlakom in podtlaka za vlakom in s tem zmanjšanju odpora v predoru. Na ta način so namreč v predoru pod Rokavskim prelivom moč, potrebno za premagovanje zračnega upora v predoru pri hitrosti vlaka 140 km/h, zmanjšali za skoraj 60%; iz potrebnih 13,5 MW na 5,8 MW (Profillidis, 2006, str. 357).

Zgonc (2003) v svojem delu spomni na dejstvo, da je v predoru poleg povečanega odpora lahko zaradi vlage bistveno zmanjšan tudi adhezijski koeficient, kar pomeni slabše pogoje za vleko, zato je treba pri projektiranju proge v predoru posebno pozornost posvetiti ublažitvi nagibov po posebnih predpisih.

3.4 Specifične vrednosti odporov

Vse sile, ki smo jih omenili, lahko zapišemo s specifičnimi vrednostmi oz. s skupnim nadomestnim nagibom $i_{ef} [\%_0]$ tako, da znane odpore delimo s celotno težo vlaka. Vsota posameznih specifičnih odporov predstavlja skupni specifični odpor, ki trenutno deluje na vlak. To pomeni, da skupni odpor, ki odpade na kN teže vlaka, lahko izrazim kot vzpon proge na dolžini 1000 metrov oz. zapisano z enotami: $[N/kN] = [\%_0]$.

Osnovni specifični odpor je vsota specifičnih odporov lokomotive in vagonskega niza. Določimo ga lahko, ko poznamo sestavo vlaka in njegovo hitrost:

$$w_0(v) = w_{Tr} + w_{wp} + w_{wf} \quad [N/kN], \quad (12)$$

kjer so: $w_{Tr} = R_{Tr}/(1000 \text{ m g})$ specifični odpor lokomotive,
 $w_{wp} = R_{wp}/(1000 \text{ m g})$ specifični odpor niza potniških vagonov,
 $w_{wf} = R_{wf}/(1000 \text{ m g})$ specifični odpor niza tovornih vagonov.

Kot sem že omenil, je osnovni odpor tisti odpor, ki je odvisen od karakteristik posameznih vozil, zato je neodvisen od infrastrukture. Tu se tudi izkaže ena od prednosti železnice, saj so odpori vozil na tirih precej manjši od odporov vozil na cesti (Zgonc, 2003).

Specifični odpor proge je vsota specifičnih odporov zaradi krivin, nagibov in predorov. Specifična odpora krivine in nagiba sta odvisna le od parametrov proge, zato ju lahko določimo v vsaki točki proge, kjer poznamo njen nagib i in njeno horizontalno ukrivljenost $1/R$. Specifični odpor predora pa je odvisen tako od lastnosti predora kot od lastnosti vlaka in njegove hitrosti. Z enačbo to pomeni:

$$w_{proge}(i, R, v) = w_i + w_R + w_t \quad [N/kN] \quad (13)$$

kjer so: $w_i = i$ specifični odpor zaradi vzpona,
 $w_R = 800/R$ specifični odpor zaradi krivine,
 $w_t = \dots$ glej enačbo (11) specifični odpor zaradi predora.

Odpor proge je velikokrat prevladujoč odpor. Na strmih in dolgih vzponih in v dolgih enotirnih predorih lahko zaradi povečanega odpora pride do zmanjšanja hitrosti in s tem daljšega potovalnega časa vlakov, kar negativno vpliva na funkcionalnost proge.

3.5 Specifična vlečna sila

Podobno kot smo zapisali specifične odpore, lahko zapišemo tudi specifično vlečno silo, ki odpade na kN teže vlaka:

$$f_{tr}(v) = F_{tr}/(1000 m g) \quad [\text{N/kN}] \quad (14)$$

Vlečna sila lokomotive s hitrostjo vlaka pada, medtem ko se odpor vlaka s hitrostjo povečuje. Za popoln izkoristek razpoložljive vlečne sile lokomotive so pomembni dobri adhezijski pogoji, ki stalno zagotavljajo stik pogonskih koles s tirnico brez spodrsavanj. Slabi adhezijski pogoji v primeru deževnega vremena pomenijo manjšo adhezijsko vlečno silo in s tem tudi nizke hitrosti težkih vlakov.

3.6 Prispevek rotacijske kinetične energije

Vlak del energije porabi za vrtenje koles. Ta učinek rotacijske kinetične energije vrtečih koles upoštevamo kot faktor dodan k masi vlaka f_p . Za lokomotivo je faktor navadno znan, sicer lahko po oceni Brüngerja in Dahlhausa (2008) privzamemo vrednost $f_{pT} = 1,09$. Za potniške in tovarne vagona pa avtorja podajata oceno $f_{pW} \cong 1,06$. Za celoten vlak prispevek rotacijske kinetične energije upoštevamo tako, da v razmerju mas vagonov in lokomotive zajamemo faktorja f_{pT} in f_{pW} :

$$f_p = \frac{f_{pT}m_{Tr} + f_{pW}m_W}{m_{Tr} + m_W}, \quad (15)$$

kjer sta: m_{Tr} masa lokomotive,
 m_W masa vagonov.

4 GIBANJE VLAKA

Pri računanju potovalnega časa vlaka na določenem odseku proge sem privzel, da se vlak vzdolž poti lahko giblje na naslednje načine: lahko pospešuje, se giblje s konstantno hitrostjo, se giblje v prostem teku (to je takrat, ko za gibanje ne uporablja ne vlečne sile in ne zavornih sil) ali pa zavira. Za določitev najkrajšega potovalnega časa prostega teka ne bom upošteval, saj ta v primerjavi s pospeševanjem in zaviranjem podaljšuje potovalni čas. Na kakšen način se bo vlak gibal, je določeno s hitrostnimi omejitvami, ki so določene z voznim redom in progovno hitrostjo proge ter seveda z razpoložljivo vlečno silo in s silo odpora.

4.1 Enačba gibanja vlaka

Pri določevanju časa gibanja izhajam iz osnovnih zvez enačb gibanja. Po drugem Newtonovem zakonu velja splošna zveza, da je rezultanta vseh sil, ki deluje na telo $\sum \mathbf{F}$ enaka produktu mase m in vektorja pospeška \mathbf{a} : $\sum \mathbf{F} = m \mathbf{a}$.

V našem primeru na vlak delujejo le sile, ki so vzporedne s smerjo premikanja, zato vektorski zapis lahko izpustim in pri računu s predznaki upoštevam le smeri delovanja sil in pospeška. V enačbi s faktorjem f_p zajamem še prispevek rotacijske kinetične energije: $\sum F = f_p m a$.

V prejšnjih poglavjih smo zajeli dve bistveni komponenti sile, ki vplivata na hitrost vožnje vlaka. Na eni strani je to vlečna sila na obodu pogonskih koles, ki vedno deluje v smeri gibanja in je odvisna od karakteristike lokomotive in adhezijskega koeficienta. Na drugi strani pa so odpori zaradi vozil v vlaku in odpori zaradi proge, ki nasprotujejo smeri gibanja vlaka. V primeru, ko govorimo o padu proge, lahko odpor proge deluje v smeri gibanja vlaka, kar pomeni dodaten prispevek k vlečni sili. Prevelik pad pa lahko pomeni, da mora vlak aktivirati zavorne sile.

Ob privzetih karakteristikah vlaka (poznamo lokomotivo in njeno vlečno karakteristiko, odpor vozil) in znanih karakteristikah proge (krivine, nagibi, predori, progovna hitrost, adhezijski koeficient) ter znanih začetnih in končnih pogojih, lahko rešimo enačbo gibanja vlaka, pri čemer upoštevamo, da je pospešek vlaka enak odvodu hitrosti vlaka po času $a = dv/dt$:

$$F_{Tr}(v, \mu) - F_R(v, x) = f_p m \frac{dv}{dt}, \quad (16)$$

kjer so:	F_{Tr}	adhezijska vlečna sila na obodu koles [N],
	F_R	vsota vseh odporov, ki delujejo na vlak med gibanjem [N],
	f_p	faktor, ki upošteva prispevek rotacijske kinetične energije,
	m	masa celotnega vlaka [kg],
	v	hitrost vlaka [m/s],
	μ	adhezijski koeficient,
	x	pozicija vlaka na progi [m].

4.2 Način gibanja vlaka

Spreminjanje velikosti hitrosti vlaka s časom sem zajel s pojmom »način gibanja vlaka«. Pri tem razumemo naslednje načine: pospeševanje, gibanje s konstantno hitrostjo, prosti tek in zaviranje.

4.2.1 Pospeševanje

Pri pospeševanju privzamemo, da je na razpolago celotna vlečna sila, ki jo lahko lokomotiva oz. vlečna enota inducira in prenese na tirnice ob danih adhezijskih pogojih: $F_{Tr} \leq \mu F_L$, pri čemer adhezijski koeficient μ izračunamo po enačbi (3).

Vlak lahko pospešuje le dokler velja, da je vlečna sila po velikosti večja od velikosti vseh odporov:

$$F_{Tr} - F_R > 0 \Rightarrow \text{pospeševanje.}$$

V primeru, ko vsota vseh odporov preseže vrednost vlečne sile na obodu pogonskih koles, hitrost vlaka pada dokler se vlečna sila ne izenači s silo odporov oz. dokler vrednost sile odporov ni nižja kot vrednost vlečne sile:

$$F_{Tr} - F_R < 0 \Rightarrow \text{zmanjševanje hitrosti.}$$

Vlečna sila se z zmanjševanjem hitrosti povečuje, medtem ko je sila odporov na vlak odvisna tudi od pozicije vlaka na progi, saj so ti poleg od tirnih vozil odvisni tudi od karakteristik proge.

4.2.2 Gibanje s konstantno veliko hitrostjo

Ko vlak doseže hitrostno omejitev, se začne gibati s konstantno veliko hitrostjo. Pri tem načinu vleke mora po prvem Newtonovem zakonu veljati, da je rezultanta vseh sil na vlak enaka nič. To pomeni, da je potrebno razpoložljivo vlečno silo reducirati na velikost vseh odporov, oziroma v primeru prevelikega pada, uporabiti zavorne sile.

Dokler velja, da je velikost razpoložljive vlečne sile F_{Tr} večja ali enaka vsoti vseh odporov F_R , se vlak lahko giblje s konstantno veliko hitrostjo:

$$F_{Tr,max}(v) \geq F_{Tr,uporabljena}(v) = F_R \Rightarrow \text{gibanje s konstantno hitrostjo.}$$

Enako kot pri pospeševanju, se v fazi gibanja s konstantno veliko hitrostjo lahko zgodi, da odpor proge na določenem mestu preseže velikost vlečne sile (odseki s strmimi vzponi ali dolgimi predori), kar se odraža z zmanjševanjem hitrosti in posledično v daljšem potovalnem času vlaka.

4.2.3 Prosti tek

Prosti tek se računa enako kot pospeševanje, pri čemer privzamemo, da je vlečna sila enaka nič. Kako upoštevati odseke, kjer se vlak giba brez vlečne sile, je odvisno od namena izračuna. Dolžino odsekov, kjer lokomotiva ne inducira ne vlečne in ne zavorne sile bi potrebovali v primeru, ko bi želeli izračunati tak način vožnje vlaka, da bi na svoji poti porabil čim manj energije.

V nalogi nas zanimajo najkrajši možni potovalni časi, zato teh odsekov ne bom upošteval, razen v primeru gibanja s konstantno veliko hitrostjo, ko velja, da je odpor zaradi pada proge nasprotno enak vsem ostalim odporom. Takrat se izkaže, da vlečne sile ne potrebujemo.

4.2.4 Zaviranje

Ocena časa zaviranja je težko enolično določljiva. Teoretično lahko zaviranje obravnavamo enako kot pospeševanje, kjer vlečno silo nadomestimo z zavornimi silami (pri tem večino zavorne sile prispevajo vagoni). Pri zaviranju se je potrebno zavedati, da v normalnih okoliščinah strojevodja zavira v udobnem načinu in ne s polno zavorno silo, ki je namenjena zasilni zavori. Četudi poznamo lokomotivo pa ne poznamo točno zavornih sil vagonov, zato razpoložljivo zavorno silo težko določimo. V interoperabilnih sistemih, kamor sodi tudi naše železniško omrežje, se za vodenje in nadzor prometa vlakov največkrat uporablja izračun s konstantnim zaviranjem, zasledimo v Brünger in Dahlhaus (2008). To pomeni, da za izračun potovalnih časov med zaviranjem privzamemo kar konstantni pojemek zaradi zavornih sil a_b [m/s²].

Na splošno se vrednosti pojemkov pri zaviranju razlikujejo glede na vrsto vlaka in način zaviranja. V literaturi lahko najdemo privzete vrednosti pojemkov; tudi Brünger in Dahlhaus (2008) predlagata naslednje vrednosti za različne vlake:

- | | |
|-------------------------------|---|
| – $a_b = 0,525 \text{ m/s}^2$ | primestni vlaki (običajno), |
| – $a_b = 0,375 \text{ m/s}^2$ | potniški vlaki (običajen ali udoben način), |
| – $a_b = 0,225 \text{ m/s}^2$ | tovorni vlaki (običajno), |
| – $a_b = 0,7 \text{ m/s}^2$ | primestni vlaki (hitro zaviranje), |
| – $a_b = 0,5 \text{ m/s}^2$ | potniški vlaki (hitro zaviranje), |
| – $a_b = 0,3 \text{ m/s}^2$ | tovorni vlaki (hitro zaviranje). |

5 MODEL ZA IZRAČUN POTOVALNIH ČASOV

V nalogi sem model za računanje najkrajšega potovalnega časa sestavil s pomočjo programskega jezika VBA v Excelu. Pri tem sem model razdelil na tri sklope; to so vhodni podatki o progi in vlaku, definiranje odporov in algoritem za računanje potovalnih časov.

5.1 Karakteristični in hitrostni odseki proge

Za definiranje vhodnih podatkov o progi in za definiranje modela, ki je sposoben upoštevati bistvene lastnosti proge, je progno smiselno razdeliti na t.i. *karakteristične odseke*, ki jih razmejujejo spremembe v infrastrukturi – krivine, nagibi in predori. Za določitev začetnih in končnih pogojev pri reševanju diferencialne enačbe gibanja je potrebno progno razdeliti tudi na t.i. *hitrostne odseke*, ki jih med seboj razmejujejo največje dovoljene hitrosti na progi. Za definiranje lastnosti proge potrebujemo torej vsega skupaj štiri sezname – tri s karakterističnimi odseki proge in enega s hitrostnimi odseki.

Izhodišče koordinatnega sistema proge je v začetni stacionaži prvega infrastrukturnega odseka. Vhodni podatki o vlaku pa zajemajo podatke o lokomotivah in vagonih (glej enačbe (5), (6) in (7)).

IZBRIŠI CELOTNO PROGO

IZBRIŠI NAGIBE

NAGIBI			
STACIONAŽA ZAČETKA ODSEKA	DOLŽINA ODSEKA	NAGIB PROGE	ADHEZIJA
oznaka	x	l_odsek	i
enota	[m]	[m]	[%]
	6000	1500	17

DODAJ NAGIB

Shrani nagibe

STACIONAŽA ZAČETKA ODSEKA	DOLŽINA ODSEKA	NAGIB PROGE	MAX ADHEZIJSKI KOEFICIEN
[m]	[m]	[%]	[/]
0	826,34	-0,876	0,36
826,34	185	0	0,36
1011,34	115,5	1,99	0,36

IZBRIŠI KRIVINE

KRIVINE		
STACIONAŽA ZAČETKA ODSEKA	DOLŽINA ODSEKA	POLMER KRIVINE
oznaka	x	l_odsekR
enota	[m]	[m]
	6000	4500

DODAJ KRIVINO

Shrani krivine

STACIONAŽA ZAČETKA ODSEKA	DOLŽINA ODSEKA	POLMER KRIVINE
[m]	[m]	[m]
0	1190,81	0
1190,81	192	800
1382,81	376,45	0

IZBRIŠI PREDORE

PREDORI			
STACIONAŽA ZAČETKA PREDORA	DOLŽINA PREDORA	SVETLI PREČNI PREREZ PREDORA	OBSEG PREDORA
oznaka	x	l_T	R_t
enota	[m]	[m]	[m]
	15098,91	602,5	27

DODAJ PREDOR

Shrani predore

STACIONAŽA ZAČETKA PREDORA	DOLŽINA PREDORA	SVETLI PREČNI PREREZ	OBSEG PREDORA
[m]	[m]	[m ²]	[m]
15098,91	602,5	27	27

IZBRIŠI HITROSTNE ODSEKE

PROGOVNE HITROSTI		
STACIONAŽA ZAČETKA ODSEKA	DOLŽINA ODSEKA	PROGOVNA HITROST
oznaka	x	l_V
enota	[m]	[km/h]
	6000	70

DODAJ ODSEK

Shrani hitrostne odseke

STACIONAŽA ZAČETKA ODSEKA	DOLŽINA ODSEKA	PROGOVNA HITROST
[m]	[m]	[km/h]
0	1000	40
1000	29000	70
30000	0	70

Slika 6: Uporabniški vmesnik za definiranje proge v programu (od leve proti desni na sliki so to sezname nagibov, krivin, predorov in hitrostnih omejitev). Odseki so enolično določeni s stacionažo začetka odseka in dolžino odseka.

5.2 Modeliranje vlaka

Vlak lahko modeliramo na več načinov. Najenostavnejši je masni točkovni model vlaka na progi in ga v literaturi uporabljata tudi Brunger in Dahlhaus (2008). Slaba stran točkovnega modela je ta, da ne upošteva karakteristik proge po celotni dolžini vlaka, temveč se spremembe v infrastrukturi odražajo hipno s spremembo infrastrukture. Vpliv dolžine vlaka avtorja upoštevata tako, da točke, kjer pride do sprememb v infrastrukturi, zamakneta za polovico dolžine vlaka naprej v smeri gibanja. S tem vsaj delno upoštevamo, da se sprememba odraža po celotni dolžini vlaka. Pri modeliranju vlaka za referenčno točko privzameta sprednji del vlaka.

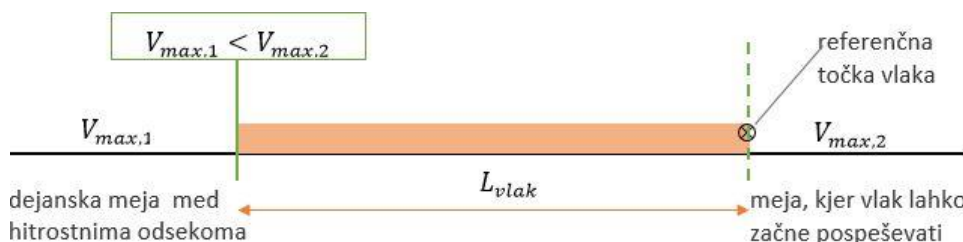
V svoji nalogi sem vlak modeliral s homogeno črto. Kot poudarjata tudi avtorja, je model vlaka kot homogena črta z enakomerno porazdeljeno maso po vsej dolžini vlaka bliže realnemu stanju in je kot tak priročen predvsem takrat, ko vlak stoji (ali se pelje) hkrati na več različnih odsekih proge z različnimi lastnostmi (z različnimi nagibi in polmeri krivin).

Sestavi nov vlak																													
Dodaj lokomotivo		Dodaj potniške vagon			Dodaj tovorne vagon																								
Izberi lokomotivo:	Izberi vagon:	masa vagona [t]	dolžina vagona [m]	število vagonov	Izberi vagon:	masa vagona[t]	dolžina vagona [m]	število vagonov																					
541 "Živa"	potniški 4-osni	41	20	9	tovorni zaprt	80	15	5																					
541 "Živa" 363 "Brižita"-T 363 "Brižita"-P 342 "Moped" 310 "Pendolino" avstrijska "Hercules" "Idealno"																													
KARAKTERISTIKE VLAKA																													
dolžina vlaka [m]	199,58																												
masa vagonov [t]	369																												
adhezijska masa [t]	87																												
masa vlaka [t]	456																												
faktor fp [/]	1,07																												
vlakovna hitrost [km/h]	160																												
pojemek zaviranja [m/s ²]	0,325																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">VLAKOVNA POT</th> <th></th> </tr> <tr> <th>status</th> <th>stacionaža [m]</th> <th>hitrost [km/h]</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>začetek opazovanja</td> <td>1200</td> <td>0</td> <td>Spremeni začetek</td> </tr> <tr> <td>konec opazovanja</td> <td>10400</td> <td>75</td> <td>Spremeni konec</td> </tr> <tr> <td>zaustavitev vlaka</td> <td>6650</td> <td>0</td> <td>Dodaj zaustavitev</td> </tr> </tbody> </table>										VLAKOVNA POT				status	stacionaža [m]	hitrost [km/h]		začetek opazovanja	1200	0	Spremeni začetek	konec opazovanja	10400	75	Spremeni konec	zaustavitev vlaka	6650	0	Dodaj zaustavitev
VLAKOVNA POT																													
status	stacionaža [m]	hitrost [km/h]																											
začetek opazovanja	1200	0	Spremeni začetek																										
konec opazovanja	10400	75	Spremeni konec																										
zaustavitev vlaka	6650	0	Dodaj zaustavitev																										
<div style="border: 1px solid blue; padding: 5px; display: inline-block;">TRENUTNA POT</div>																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>status</th> <th>stacionaža [m]</th> <th>hitrost [km/h]</th> <th>IZBRIŠI POT</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ZAČETEK OPAZOVANJA</td> <td>1200</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>KONEC OPAZOVANJA</td> <td>10400</td> <td>75</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ZAUSTAVITEV</td> <td>6650</td> <td>0</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>										status	stacionaža [m]	hitrost [km/h]	IZBRIŠI POT	ZAČETEK OPAZOVANJA	1200	0		KONEC OPAZOVANJA	10400	75		ZAUSTAVITEV	6650	0					
status	stacionaža [m]	hitrost [km/h]	IZBRIŠI POT																										
ZAČETEK OPAZOVANJA	1200	0																											
KONEC OPAZOVANJA	10400	75																											
ZAUSTAVITEV	6650	0																											

Slika 7: Uporabniški vmesnik za sestavo vlaka (seznam lokomotiv, potniških vagonov in tovornih vagonov), definiranje njegove poti in ostalih karakteristik.

5.2.1 Referenčna točka vlaka in hitrostne omejitve

Za referenčno točko vlaka si bomo izbrali sprednji del vlaka. Ne glede na model velja, da noben del vlaka ne sme presegati hitrostne omejitve, ki velja na določenem hitrostnem odseku proge. To pomeni, da je odsek z nižjo progovno hitrostjo zamaknjen naprej v smeri gibanja za celotno dolžino vlaka – vlak lahko torej začne pospeševati šele takrat, ko njegov sprednji del prevozi to »namišljeno« točko oz. ko njegov zadnji del prevozi točko, kjer se konča odsek z nižjo hitrostno omejitvijo.



Slika 8: Prehod vlaka iz odseka z nižjo progovno hitrostjo na odsek z višjo progovno hitrostjo

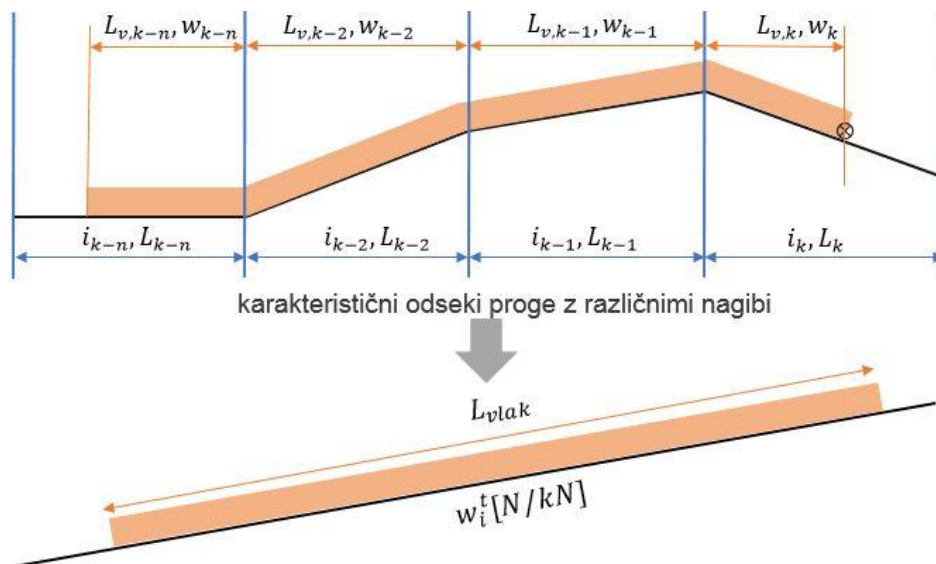
5.2.2 Določitev trenutnega specifičnega odpora proge zaradi nagibov in krivin

Če v določenem času potovanja vlaka poznamo njegovo pozicijo (stacionažo njegove referenčne točke), dolžino vlaka in dolžino posameznih karakterističnih odsekov proge na katerih se nahaja, lahko ob upoštevanju enakomerno porazdeljene mase po vsej dolžini določimo trenutni specifični odpor proge.

Predpostavimo, da se vlak dolžine L_{vlak} [m] trenutno nahaja na $n + 1$ karakterističnih odsekih z nagibi $i_k, i_{k-1}, i_{k-2}, \dots, i_{k-n}$ [‰] in dolžinami odsekov $L_k, L_{k-1}, L_{k-2}, \dots, L_{k-n}$ [m]. Če želimo določiti skupni odpor vseh odsekov, moramo poznati dolžino dela vlaka, ki se nahaja na posameznem odseku. Prvi in zadnji odsek sta pokrita le delno, in sicer prvi odsek z dolžino $L_{v,k}$ in zadnji odsek z dolžino $L_{v,k-n}$. Vmesni odseki pa so pokriti v celoti, in velja: $L_{v,k-j} = L_{k-j}$, za $2 \leq j \leq n - 1$. V primeru pada nagib i zapišemo z negativnim predznakom.

Trenutni specifični odpor zaradi nagibov w_i^t lahko ob predpostavki, da je masa vlaka enakomerno porazdeljena po celotni njegovi dolžini, izrazimo kot vsoto delnih specifičnih odporov $w'_{i,k}, w'_{i,k-1}, \dots, w'_{i,k-n}$ posameznih odsekov:

$$w_i^t = \sum_{j=0}^n w'_{i,k-j} = \sum_{j=0}^n \frac{L_{v,k-j}}{L_{vlak}} w_{i,k-j}. \quad (17)$$



Slika 9: Trenutni specifični odpor proge zaradi različnih nagibov, na katerih se trenutno nahaja vlak. Na podoben način kot smo izračunali trenutni specifični odpor nagibov izračunamo tudi trenutni specifični odpor zaradi krivin w_R^t , kjer je $w'_{R,k-j}$ delni specifični odpor krivine v karakterističnem odseku $k - j$:

$$w_R^t = \sum_{j=0}^n w'_{R,k-j} = \sum_{j=0}^n \frac{L_{v,k-j}}{L_{vlak}} w_{R,k-j}. \quad (18)$$

5.2.3 Določitev trenutnega specifičnega odpora zaradi predora

Trenutni specifični odpor predora w_t^t sem določil na podoben način kot smo to storili pri nagibih in krivinah; torej tako da sem v primeru, ko se vlak v celoti nahaja v predoru upošteval celotni odpor po izrazu (11); če pa se v predoru ob času t nahaja le del vlaka, sem vrednost specifičnega odpora w_t reduciral s koeficientom $L_{v,t}/L_{vlak}$, kjer je $L_{v,t}$ dolžina dela vlaka, ki se trenutno nahaja v predoru. Če se nahaja v več predorih hkrati, pa se odpori vseh predorov seštejejo.

5.2.4 Trenutni nadomestni nagib proge

Trenutni odpor proge w_{proge}^t je vsota trenutnih odporov zaradi nagibov w_i^t , krivin w_R^t in predorov w_t^t , ki v trenutku t delujejo na vlak (glej enačbi (17), (18) ter poglavje 5.2.3). Vsoto pa lahko izrazimo neposredno z nadomestnim nagibom proge i_{ef}^t :

$$i_{ef}^t = w_{proge}^t = w_i^t + w_R^t + w_t^t. \quad (19)$$

5.3 Hitrostni odsek in vhodna hitrost, izhodna hitrost in največja hitrost

Progo sem modeliral tako, da sem njene podatke zajel v štirih seznamih. Trije sezname zajemajo podatke o infrastrukturi in so pomembni za določevanje odporov zaradi proge. Četrty seznam s hitrostnimi odseki pa zajema podatke o mejnih hitrostih na progi, vključno s predpisano začetno in končno hitrostjo ter morebitnimi vmesnimi zaustavitvami, kjer je hitrost vlaka enaka nič. Podatki o hitrostnih omejitvah na progi so pomembni za določevanje načina vožnje vlaka na posameznem hitrostnem odseku.

Če želimo določiti, kako se bo vlak na določenem odseku gibal, moramo za vsak hitrostni odsek h poznati njegovo največjo hitrost v_{max}^h , največjo vhodno hitrost v_{entr}^h in največjo izhodno hitrost v_{ex}^h .

Največja dovoljena hitrost na posameznem odseku je odvisna od največje dovoljene progovne hitrosti in največje dovoljene hitrosti vlaka. Progovno hitrost določajo geometrijski elementi proge, njeno tehnično stanje ter stabilne električne in signalnovarnostne naprave. Največja hitrost vlaka pa je poleg od progovne hitrosti odvisna tudi od tehnično-tehnoloških elementov vlaka in je določena z voznim redom vlaka (Zgonc, 2012).

Največja izhodna hitrost na odseku je odvisna od največje dovoljene hitrosti odsekov, ki sledijo opazovanemu odseku. Zagotavljati mora, da vlak ne prekorači predpisane največje hitrosti naslednjih odsekov. Sprva predpostavimo, da za vsak odsek h poznamo največjo izhodno hitrost v_{ex}^h , ki naj bo enaka največji dovoljeni hitrosti naslednjega hitrostnega odseka $v_{ex}^h = v_{max}^{h+1}$.

V primeru, da je največja izhodna hitrost na odseku manjša od največje dovoljene hitrosti, je potrebno vlak zavirati, v nasprotnem primeru je zavorna pot vlaka na tem odseku enaka nič.

5.3.1 Določitev odsekov zaviranja – največje vhodne in izhodne hitrosti

Prvi korak za računanje potovalnega časa vlaka je določitev zavornih poti vlaka na vsakem odseku, kjer je največja dovoljena hitrost naslednjega odseka manjša od največje dovoljene hitrosti opazovanega odseka ali drugače, če je izpolnjen pogoj za posamezen hitrostni odsek:

$$v_{max} > v_{ex} \Rightarrow \text{zaviranje s pojemkom } a_b.$$

Za določitev največje vhodne hitrosti vlaka za posamezen odsek je ključno izračunati potrebno zavorno pot s_{red} , ki jo vlak prevozi pri predpisanem pojemku zaviranja a_b , da hitrost iz največje dovoljene v_{max} zmanjša na največjo izhodno hitrost v_{ex} :

$$s_{red} = \frac{v_{max}^2}{2 a_b} - \frac{v_{ex}^2}{2 a_b}. \quad (20)$$

Največja vhodna hitrost vlaka v odsek mora zagotavljati, da vlak na opazovanem odseku lahko varno zmanjša hitrost na predpisano izhodno hitrost. V primeru zaviranja zato lahko nastopita dva različna primera:

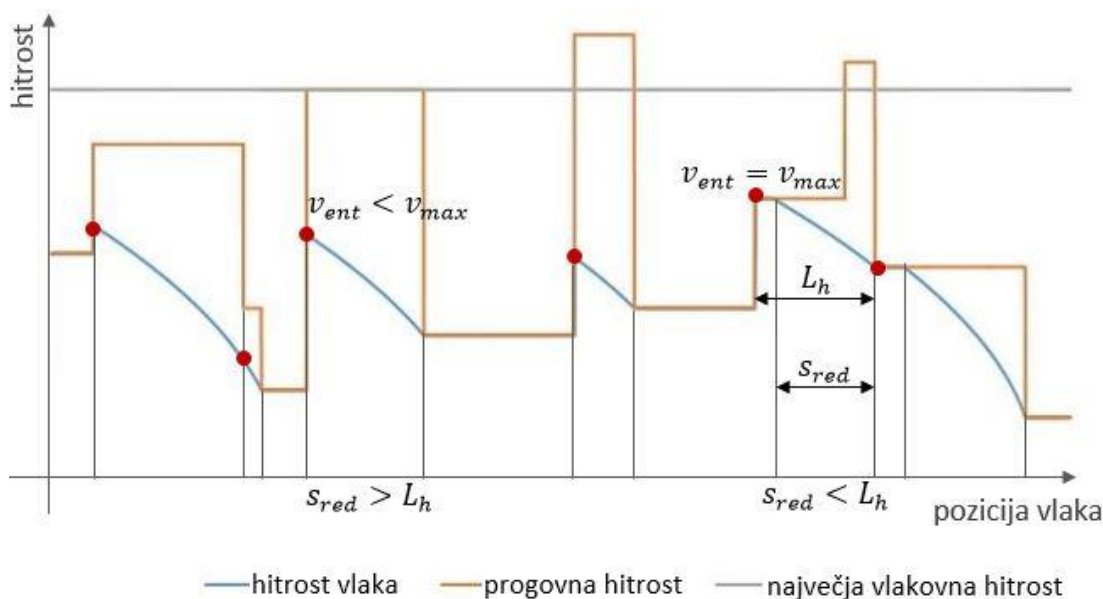
1. Zavorna pot s_{red} je manjša od dolžine opazovanega hitrostnega odseka L_h . V tem primeru lahko v odseku nastopita tako voznja s konstantno hitrostjo v_{max} (če je zagotovljena dovolj velika vlečna sila) kot zaviranje s pojemkom a_b . Največja vhodna hitrost je v takem odseku enaka največji dovoljeni hitrosti $v_{entr} = v_{max}$. Na kratko:

$$s_{red} < L_h \Rightarrow v_{entr} = v_{max}. \quad (21)$$

2. Zavorna pot s_{red} je daljša ali enaka dolžini opazovanega hitrostnega odseka L_h . V tem primeru moramo največjo vhodno hitrost v odsek v_{entr} določiti tako, da jo bo vlak z zaviranjem do konca odseka uspel zmanjšati na največjo izhodno hitrost v_{ex} . Največjo vhodno hitrost lahko ob privzetem enakomernem zaviranju s pojemkom a_b izračunamo po naslednji enačbi:

$$s_{red} \geq L_h \Rightarrow v_{entr} = \sqrt{2 a_b L_h + v_{ex}^2}. \quad (22)$$

V zadnjem koraku je potrebno korigirati še največje izhodne hitrosti v odsekih. V tistih odsekih, kjer se izkaže, da je največja dovoljena hitrost predhodnega odseka večja od največje vhodne hitrosti, izhodno hitrost prejšnjega odseka zmanjšam na velikost največje vhodne hitrosti opazovanega odseka: $v_{ex}^{h-1} = v_{entr}^h$. Prav zaradi tega je smiselno, da odseke z zaviranjem in s tem vhodne hitrosti odsekov določam v nasprotni smeri – od zadnjega odseka do prvega odseka.



Slika 10: Zaviralne krivulje dobljene iz predpisanih hitrostnih omejitev

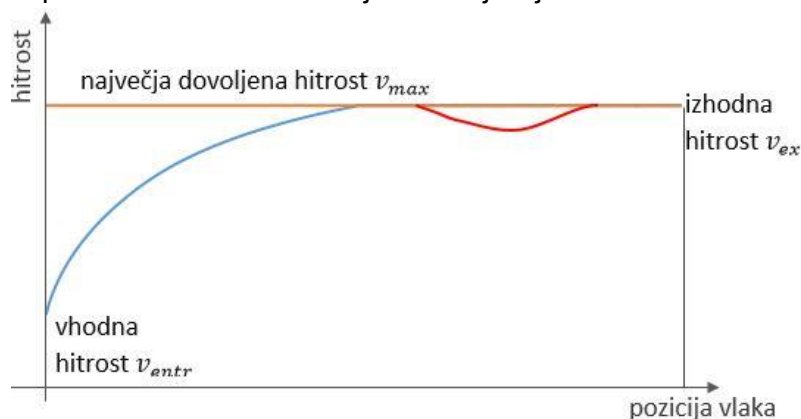
5.3.2 Določitev odsekov pospeševanja – izhodne hitrosti

Naslednja faza računa je določitev odsekov, kjer predpostavimo, da vlak pospešuje z vso razpoložljivo vlečno silo. To se zgodi na tistem hitrostnem odseku, kjer je vhodna hitrost vlaka manjša od največje dovoljene hitrosti vlaka:

$$v_{entr} < v_{max} \Rightarrow \text{pospeševanje s silo } F_{tr}.$$

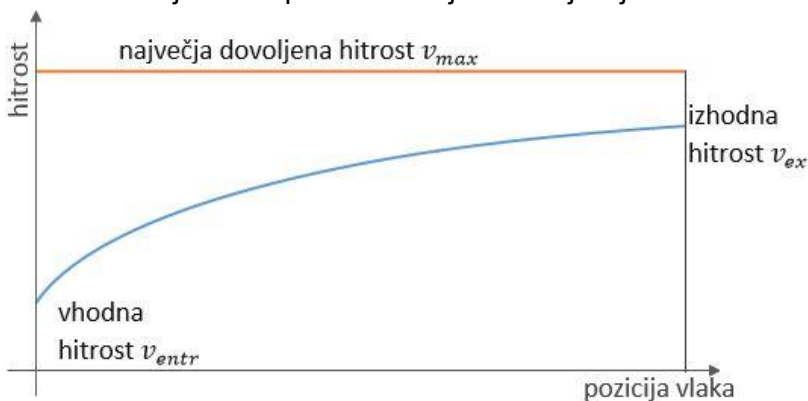
Hitrost, ki jo vlak doseže na koncu odseka, je izhodna hitrost odseka in ne sme presegati največje izhodne hitrosti. V odsekih s pospeševanjem lahko pride do naslednjih možnosti:

1. V odseku brez zaviranja vlak doseže največjo predpisano hitrost in nato ob zadostni vlečni sili lahko vozi s konstantno veliko hitrostjo. Skozi celoten odsek se za gibanje uporablja vlečna sila, ki pa tudi v delu z enakomernim gibanjem ni nujno konstantna, saj se odpor proge skozi hitrostni odsek lahko spreminja. Če je zagotovljena dovolj velika vlečna sila ob določenem odporu proge, je izhodna hitrost enaka največji izhodni hitrosti. Z rdečo krivuljo na sliki (11) je ponazorjen primer, do katerega pride takrat, ko vrednost odpora proge preseže razpoložljivo vlečno silo. Lahko se zgodi, da je zaradi prevelikega odpora izhodna hitrost manjša od največje izhodne hitrosti.



Slika 11: Odsek, v katerem vlak doseže največjo dovoljeno hitrost

2. Vlak v odseku ne doseže predpisane največje hitrosti in največje izhodne hitrosti. V tem primeru ni pomembno ali gre za odsek z zaviranjem ali ne, saj do zaviranja sploh ne pride. Izhodna hitrost je v tem primeru manjša od največje izhodne hitrosti.



Slika 12: Odsek, kjer vlak ne doseže največje hitrosti

3. V odseku z zaviranjem vlak doseže največjo dovoljene hitrost. Nato vozi s konstantno hitrostjo dokler ne doseže točke, kjer mora pričeti zavirati. V tem primeru je izhodna hitrost enaka največji izhodni hitrosti.



Slika 13: Hitrostni odsek z zaviranjem, kjer vlak doseže največjo dovoljeno hitrost

4. V odseku z zaviranjem vlak doseže zaviralno krivuljo. V tem primeru predpostavimo, da se v presečišču krivulj gibanje vlaka hipno spremeni iz pospeševanja v zaviranje.



Slika 14: Hitrostni odsek z zaviranjem, kjer pospeševalna krivulja vlaka seka zaviralno krivuljo.

Po izračunu pospeševanja vlaka od prvega do zadnjega hitrostnega polja za vsak odsek poznamo izhodno hitrost iz odseka. Vhodna hitrost naslednjega odseka zato postane enaka izhodni hitrosti predhodnega odseka.

Na podlagi vhodnih, izhodnih in največjih dovoljenih hitrosti znam definirati način gibanja vlaka. Pri zaviranju je postopek izračunavanja potovalnega časa preprost, saj sem predpostavil enakomerno zaviranje. V hitrostnih odsekih, kjer pride do pospeševanja, pa je potrebno rešiti diferencialno enačbo gibanja, saj sile, ki nastopijo v enačbi gibanja spreminjajo tako s hitrostjo kot s potjo. S hitrostjo se spreminjata vlečna sila in sila osnovnega odpora vlaka, s potjo pa se spreminja sila odpora proge.

6 DOLOČITEV POTOVALNIH ČASOV

V nalogi nas zanima najkrajši čas, ki ga vlak potrebuje, da pripelje iz začetne točke s podano začetno hitrostjo do končne točke z znano končno hitrostjo. Začetna hitrost je enaka dejanski vhodni hitrosti vlaka v prvem hitrostnem odseku, končna hitrost vlaka pa je največja izhodna hitrost vlaka zadnjega hitrostnega odseka, zato je ta lahko večja od dejanske izhodne hitrosti.

6.1 Potovalni čas pri enakomernem zaviranju

V fazi zaviranja je predpostavljeno enakomerno zaviranje s pojemkom a_b , neodvisno od velikosti odporov. Če poznamo trenutno hitrost vlaka v , pri kateri vlak začne zavirati in izhodno hitrost v_{ex} , potrebni čas zaviranja izračunam po enačbi:

$$t = \frac{v - v_{ex}}{a_b}. \quad (23)$$

6.2 Reševanje enačbe gibanja z diferenciali

Enačba (16), ki opisuje gibanje vlaka, je navadna diferencialna enačba prvega reda. Rezultanto vseh sil, ki ob času t delujejo na vlak označimo z $F(t)$. Enačbo gibanja lahko zapišemo kot:

$$F(t) = F_{Tr}(t) - F_R(t) = f_p m \frac{dv}{dt} \Rightarrow t = \int_{v_{zac}}^{v_{kon}} \frac{f_p m}{F(v, x)} dv. \quad (24)$$

Pri tem poznam osnovni zvezi med hitrostjo in pospeškom ter zvezo med hitrostjo in potjo $a = dv/dt$ in $v = ds/dt$. Enačbo (24) lahko rešujemo na več načinov. Za reševanje enačbe moramo poleg znanih podatkov o vlaku in infrastrukturi poznati tudi začetno hitrost v_{zac} in največjo možno končno hitrost v_{kon} . V programu Excel VBA sem enačbo reševal za vsak hitrostni odsek posebej po numeričnem postopku z diferenciali po metodi korak za korakom.

Vsak hitrostni odsek dolžine L_h , ki se začne na stacionaži x_h , lahko globalno glede na progo zapišemo kot interval $[x_h, x_h + L_h]$ oziroma v lokalnem koordinatnem sistemu z izhodiščem v začetku hitrostnega odseka kot interval $[0, L_h]$. Interval $[0, L_h]$ razdelimo na majhne podintervale $U_{i=1}^n[s_i, s_{i+1}]$ dolžine $\Delta s_i = s_{i+1} - s_i$. Na vsakem od teh podintervalov predpostavim konstantno vrednost pospeška dv/dt in konstantne vrednosti vseh sil, ki v opazovani točki x_i pri hitrosti v_i delujejo na vlak. Rezultanto sil, ki delujejo na vlak na i -tem intervalu označim z F_i :

$$F_i = F(s_i, v_i) = m g \left(f_{Tr}(v_i) - w_0(v_i) - w_{proge}(s_i) \right). \quad (25)$$

S temi predpostavkami lahko ob znani hitrosti $v_i(s_i)$ na začetku intervala $[s_i, s_{i+1}]$ določim hitrost in čas na koncu intervala.

Za dovolj majhne Δs_i veljata približka:

$$\frac{ds}{dt} \cong \frac{\Delta s_i}{\Delta t_i} = \frac{s_{i+1} - s_i}{t_{i+1} - t_i},$$

$$\frac{dv}{dt} \cong \frac{\Delta v_i}{\Delta t_i} = \frac{v_{i+1} - v_i}{t_{i+1} - t_i}.$$

Z upoštevanjem zgornjih zvez enačbo gibanja, zapisano z rezultanto sil F , preoblikujemo in razrešimo po hitrosti v_{i+1} :

$$\begin{aligned} F &= f_p m \frac{dv}{dt} \frac{dt}{ds} v \Rightarrow \frac{F}{v} = f_p m \frac{dv}{ds}, \\ \frac{F_i}{v_i} &= f_p m \frac{\Delta v_i}{\Delta s_i} \Rightarrow \Delta v_i = \frac{F_i \Delta s_i}{f_p m v_i} m, \\ v_{i+1} &= v_i + \frac{F_i \Delta s_i}{f_p m v_i}. \end{aligned} \quad (26)$$

Podobno kot za hitrost v_{i+1} , enačbo gibanja razrešimo še po času t_{i+1} .

$$\begin{aligned} F_i &= f_p m \frac{\Delta v_i}{\Delta t_i}, \\ \Delta t_i &= \frac{f_p m \Delta v_i}{F_i} = \frac{f_p m \Delta v_i}{f_p m \frac{\Delta v_i}{\Delta s_i} v_i} = \frac{\Delta s_i}{v_i}, \\ t_{i+1} &= t_i + \frac{\Delta s_i}{v_i}. \end{aligned} \quad (27)$$

Ob znani vrednosti pojemka $a_b > 0$ lahko v vsakem trenutku gibanja določimo tudi potrebno zavorno silo F_b . Zavorno silo lahko v enačbi gibanja obravnavamo kot vlečno silo z negativnim predznakom:

$$\begin{aligned} F_i &= f_p m a_b, \\ F_{b,i} &= -F_{Tr} = f_p m a_b - R_0(v_i) - R_i(x) - R_R(x) - R_t(x, v_i). \end{aligned} \quad (28)$$

Za znan prirast hitrosti $\Delta v_i = v_{i+1} - v_i$ lahko enačbo gibanja razrešimo po času t_{i+1} :

$$\begin{aligned} F_i &= f_p m \frac{\Delta v_i}{t_{i+1} - t_i}, \\ t_{i+1} &= t_i + \frac{f_p m \Delta v_i}{F_i}; \end{aligned} \quad (29)$$

in po poti s_{i+1} :

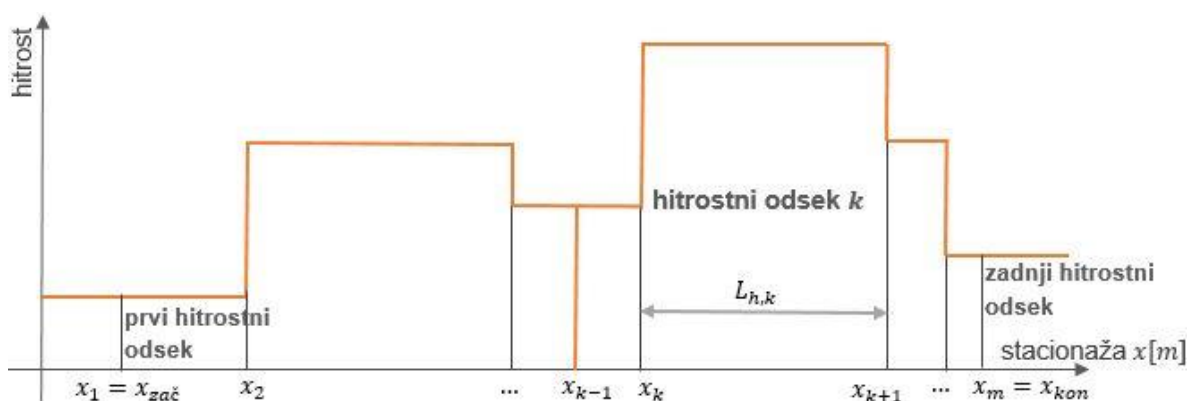
$$\begin{aligned} \frac{F_i}{v_i} &= f_p m \frac{\Delta v_i}{s_{i+1} - s_i}, \\ s_{i+1} &= s_i + \frac{f_p m \Delta v_i v_i}{F_i}. \end{aligned} \quad (30)$$

Ob znanem pojemku a_b se izraza za t_{i+1} in s_{i+1} poenostavita:

$$t_{i+1} = t_i + \frac{\Delta v_i}{a_b}, \quad (31)$$

$$s_{i+1} = s_i + \frac{v_i \Delta v_i}{a_b}. \quad (32)$$

Enačbi (26) in (27) lahko uporabimo kot rekurzivni zvezi za v_i in t_i po vseh podintervalih $[s_i, s_{i+1}]$, pri čemer za začetno vrednost poti v vsakem hitrostnem odseku privzamemo $s_1 = 0$, za začetni čas pa privzamemo skupni čas, ki ga je vlak potreboval za potovanje od začetne točke do začetka opazovanega oseka $t_1 = t$. Pozicijo referenčne točke vlaka glede na progo označim s stacionažo $x[m]$, na kateri se ta točka nahaja. V vsakem koraku rekurzije je potrebno glede na trenutno stacionažo določiti trenutni odpor proge in glede na trenutno hitrost določiti trenutni osnovni odpor ter vlečno silo.



Slika 15: Hitrostni odseki z označenimi začetnimi in končnimi stacionažami. Gibanje vlaka se začne v začetni točki x_{zac} in konča v končni točki x_{kon} . Na odseku $k - 1$ se mora vlak zaustaviti, zato je vhodna hitrost na tem odseku enaka $v_{entr,k-1} = 0$.

Pri računanju hitrosti in časov z rekurzivnima zvezama moramo med seboj ločiti dva kriterija, ki določata, do kdaj naj se rekurzija ponavlja. Prvi kriterij velja za odseke, kjer ne pride do zaviranja, drugi kriterij pa za hitrostne odseke z zaviranjem, kjer moramo biti pozorni na presečišče pospeševalne in zaviralne krivulje.

Omenjeni postopek izračunavanja potovalnih časov lahko uporabimo tudi na tistih delih, kjer se vlak giblje s konstantno hitrostjo ali z enakomernim zaviranjem. S tem lahko v vsakem trenutku gibanja določimo potrebno vlečno oz. zavorno silo, ki je potrebna za ohranjanje določenega nivoja hitrosti.

6.3 Opis algoritma za določitev potovalnih časov

V tem poglavju je natančneje opisan algoritem, ki sem ga uporabil v programu za računanje potovalnega časa vlaka. Matematično gledano gre za numerični postopek reševanja enačbe gibanja po metodi reševanja diferencialne enačbe korak za korakom. V fazi pospeševanja in enakomernega gibanja je izhodišče reševanja privzeta vrednosti diferenciala poti Δs , v fazi zaviranja pa je izhodišče reševanja privzeta vrednost diferenciala hitrosti Δv .

6.3.1 Faza pospeševanja in gibanja s konstantno veliko hitrostjo

Vlak z vhodno hitrostjo v_{entr} bo pospeševal ali se gibal s konstantno veliko hitrostjo, če pripelje v hitrostni odsek dolžine $L_{h,k}$, v katerem velja eden od začetnih pogojev:

- a) vhodna hitrost je manjša od največje vhodne hitrosti: $v_{entr} < v_{entr,max}$

- b) vhodna hitrost je enaka največji vhodni hitrosti, zavorna pot na odseku pa je krajša od dolžine odseka: $v_{entr} = v_{entr,max} = v_{max}$ in $s_{red} < L_{h,k}$.

Fazi pospeševanja in gibanja s konstantno veliko hitrostjo lahko obravnavamo na zelo podoben način. Pri določanju načina gibanja moramo biti pozorni na velikost vlečne sile. Algoritem za izračunavanje potovalnega časa za opazovan odsek k lahko v tem primeru zapišemo z naslednjimi koraki:

- (i) Za prvi podinterval $[s_i, s_{i+1}] = [s_1, s_2]$ poznamo začetno hitrost $v_i = v_1 = v_{entr}$, trenutno stacionažo $x = x_k$ in trenutni potovalni čas $t_i = t_1$.
- (ii) Na podlagi hitrosti in trenutne stacionaže referenčne točke vlaka $x = x_k + s_i$ lahko določimo trenutno razpoložljivo vlečno silo $F_{Tr}(v_i)$, osnovni odpor vlaka $R_0(v_i)$, odpor proge zaradi nagibov $R_i(x)$, krivin $R_R(x)$ in predorov $R_t(x, v_i)$.
- (iii) Na osnovi rezultante odporov in trenutne hitrosti vlaka določimo potrebno vlečno silo:
 - ◆ Trenutna hitrost je enaka največji dovoljeni hitrosti $v_i = v_{max}$ in vrednost vseh odporov lahko kompenziramo z vlečno silo, tako da velja $F_{Tr}(v_i) \geq F_R$. V tem primeru je izpolnjen pogoj za gibanje s konstantno hitrostjo. Vlečno silo reduciramo na rezultanto vseh odporov $F_{Tr} = R_0(v_i) + R_i(x) + R_R(x) + R_t(x, v_i)$.
 - ◆ Trenutna hitrost vlaka je manjša od največje dovoljene ($v_i < v_{max}$) ali pa je dosežena največja hitrost vlaka $v_i = v_{max}$ in rezultante vseh odporov, ki v trenutku t_i delujejo na vlak, z vlečno silo ne moremo povsem kompenzirati ($F_{Tr}(v_i) < F_R$). Pogoj za gibanje s konstantno hitrostjo ni izpolnjen. V tem primeru za vrednost vlečne sile privzamemo največjo možno vrednost pri trenutni hitrosti $F_{Tr} = F_{Tr}(v_i)$.
- (iv) Na podlagi vseh poznanih sil, ki vplivajo na gibanje vlaka, lahko po zvezah (26) in (27) določimo hitrost in čas potovanja na koncu intervala $[s_i, s_{i+1}]$.
- (v) Izračunana hitrost v_{i+1} in čas t_{i+1} postaneta začetni vrednosti naslednjega podintervala $i + 1$. Dolžino poti povečamo na $s_{i+1} = s_i + \Delta s_i$
- (vi) Korake od (iii) do (v) ponavljamo:
 - ◆ za odseke brez zaviranja ($s_{red} = 0$): dokler razdalja s_i ne preseže dolžine hitrostnega odseka $L_{h,k}$;
 - ◆ za odseke z zaviranjem ($s_{red} > 0$): dokler razdalja s_i ne preseže dolžine $L_{h,k} - s_{red}(v_i)$ in dokler je $s_i < L_{h,k}$, pri čemer je $L_{h,k}$ dolžina odseka, $s_{red}(v_i)$ pa dolžina zavorne poti pri hitrosti v_i . V primeru, da je največja izhodna hitrost večja od trenutne, je $s_{red}(v_i) < 0$.

6.3.2 Faza enakomernega zaviranja

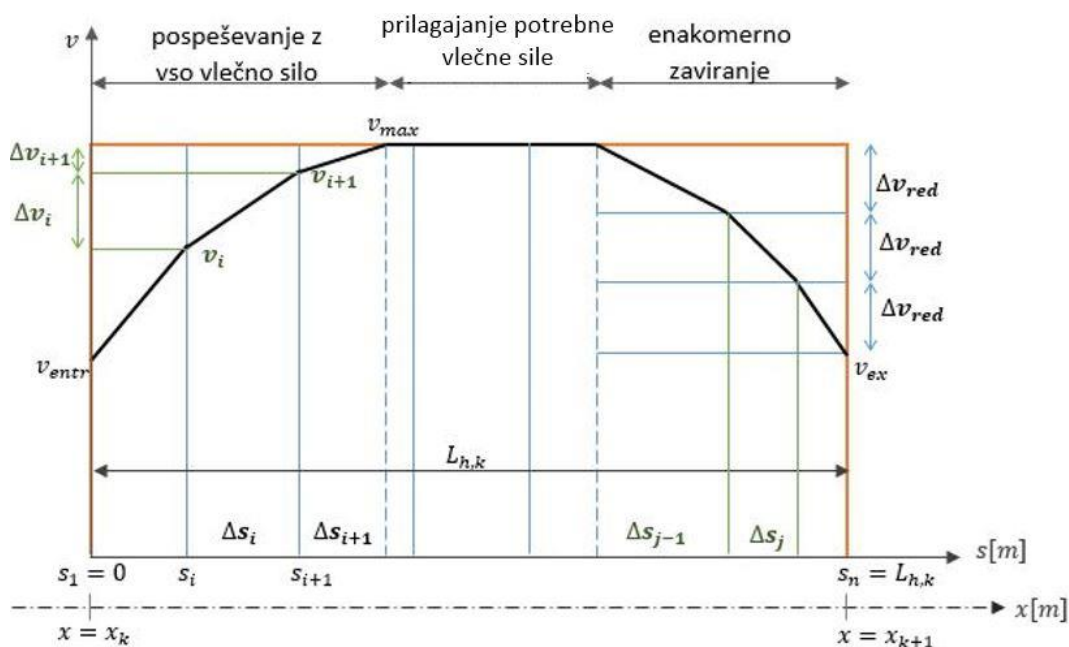
Vlak z vhodno hitrostjo v_{entr} bo v hitrostnem odseku dolžine $L_{h,k}$ začel enakomerno zavirati, če velja začetni pogoj:

- vhodna hitrost je enaka največji vhodni hitrosti, dolžina zavorne poti pa je enaka dolžini hitrostnega odseka: $v_{entr} = v_{entr,max}$ in $s_{red} = L_{h,k}$.

Zgornji pogoj se lahko zgodi le v odsekih, kjer je dolžina zavorne poti enaka dolžini odseka. Do zaviranja pa pride tudi v vseh ostalih odsekih, kjer je največja izhodna hitrost manjša od največje dovoljene hitrosti ($v_{ex} < v_{max}$).

V vsakem primeru se zaviranje začne, ko za interval $[s_i, s_{i+1}]$ velja pogoj $s_{red}(v_i) = L_{h,k} - s_i$. Čas zaviranja lahko ob znani začetni hitrosti zaviranja $v = v_i$ in izhodni hitrosti v_{ex} natančno določimo po enačbi (23). Če nas zanimajo velikosti sil, ki med zaviranjem s pojemkom a_b delujejo na vlak, lahko po enostavnem algoritmu razrešimo enačbo gibanja:

- (i) Hitrostni interval $[v_i, v_{ex}]$ razdelimo na podintervale enakih dolžin Δv_{red} : $[v_i, v_{i+1}], [v_{i+1}, v_{i+2}], \dots, [v_{n-1}, v_n]$.
- (ii) Ob znani začetni hitrosti zaviranja v_i in začetni stacionaži referenčne točke vlaka $x = x_k + s_i$ določimo velikosti odporov, ki delujejo na vlak v trenutku t_i .
- (iii) Potrebno zavorno silo F_b v trenutku t_i določimo po izrazu (28). Prirast časa in poti v hitrostnem intervalu $\Delta v_i = \Delta v_{red}$ pa po izrazih (31) in (32).
- (iv) Izhodiščna hitrost naslednjega podintervala postane $v_{i+1} = v_i - \Delta v_{red}$ z začetnim časom t_{i+1} in potjo s_{i+1} .
- (v) Korake od (ii) do (iv) ponavljamo dokler trenutna hitrost ne doseže izhodne hitrosti $v_i = v_{ex}$.



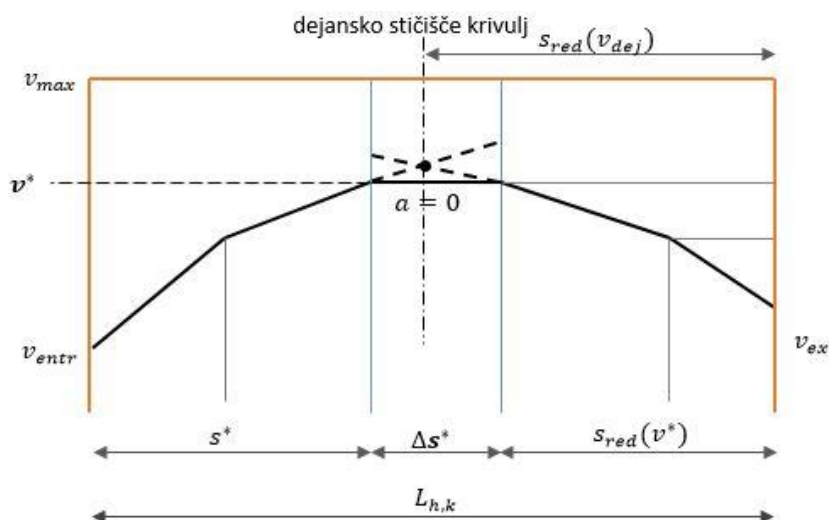
Slika 16: Delitev na podintervale. Modri črtkani črti predstavljata popravljeni meji mejnih intervalov.

6.3.3 Dolžine podintervalov

Pri določanju dolžin podintervalov moramo biti pozorni na to, da te zaradi natančnosti izračuna niso premajhne. Dodatno pozornost pa je potrebno nameniti podintervalom, ki mejijo na mejne vrednosti:

- a) Podinterval z dolžino Δs_i , na katerem je presežena največja dovoljena hitrost ($v_i < v_{max}$ in $v_{i+1} > v_{max}$), ustrezno skrajšamo na dolžino $\Delta s_i^* = \frac{v_{max}}{v_{i+1}} \Delta s_i$, tako da velja $v_{i+1} = v_{max}$.
- b) Končni podinterval $[s_i, s_{i+1}]$ dolžine Δs_i na odseku dolžine L_h , za katerega velja $s_i < L_h$ in $s_{i+1} > L_h$ ustrezno skrajšamo na dolžino $\Delta s_i^* = L_h - s_i$, da velja $s_{i+1} = L_h$.
- c) Podinterval $[s_i, s_{i+1}]$ z dolžino Δs_i , ki seka zaviralno krivuljo, ustrezno skrajšamo na dolžino Δs_i^* , da velja $\Delta s_i^* = L_{h,k} - s_{red}(v_{i+1}) - s_i$. Zaradi poenostavitve lahko

predpostavimo, da na tem intervalu velja gibanje s konstantno hitrostjo $v_{i+1} = v_i = v_i^*$ (glej sliko 17).



Slika 17: Stik med pospeševalno in zaviralno krivuljo.

6.4 Opravljeno delo vlečne sile in zavorne sile

V opisanem algoritmu smo v vsakem časovnem koraku izračunali trenutno vlečno silo (če $F_{Tr} > 0$) oziroma trenutno zavorno silo (če $F_{Tr} < 0$), zato lahko brez večjega napora izračunamo še opravljeno delo vlečne in zavorne sile na celotni poti.

Če opravljeno delo vlečne sile definiramo kot integral:

$$A_{Tr} = \int_{x_{zac}}^{x_{kon}} F_{Tr} dx, \quad \text{za } F_{Tr} > 0 \quad (33)$$

in delo zavorne sile kot integral:

$$A_{red} = \int_{x_{zac}}^{x_{kon}} F_{Tr} dx, \quad \text{za } F_{Tr} < 0, \quad (34)$$

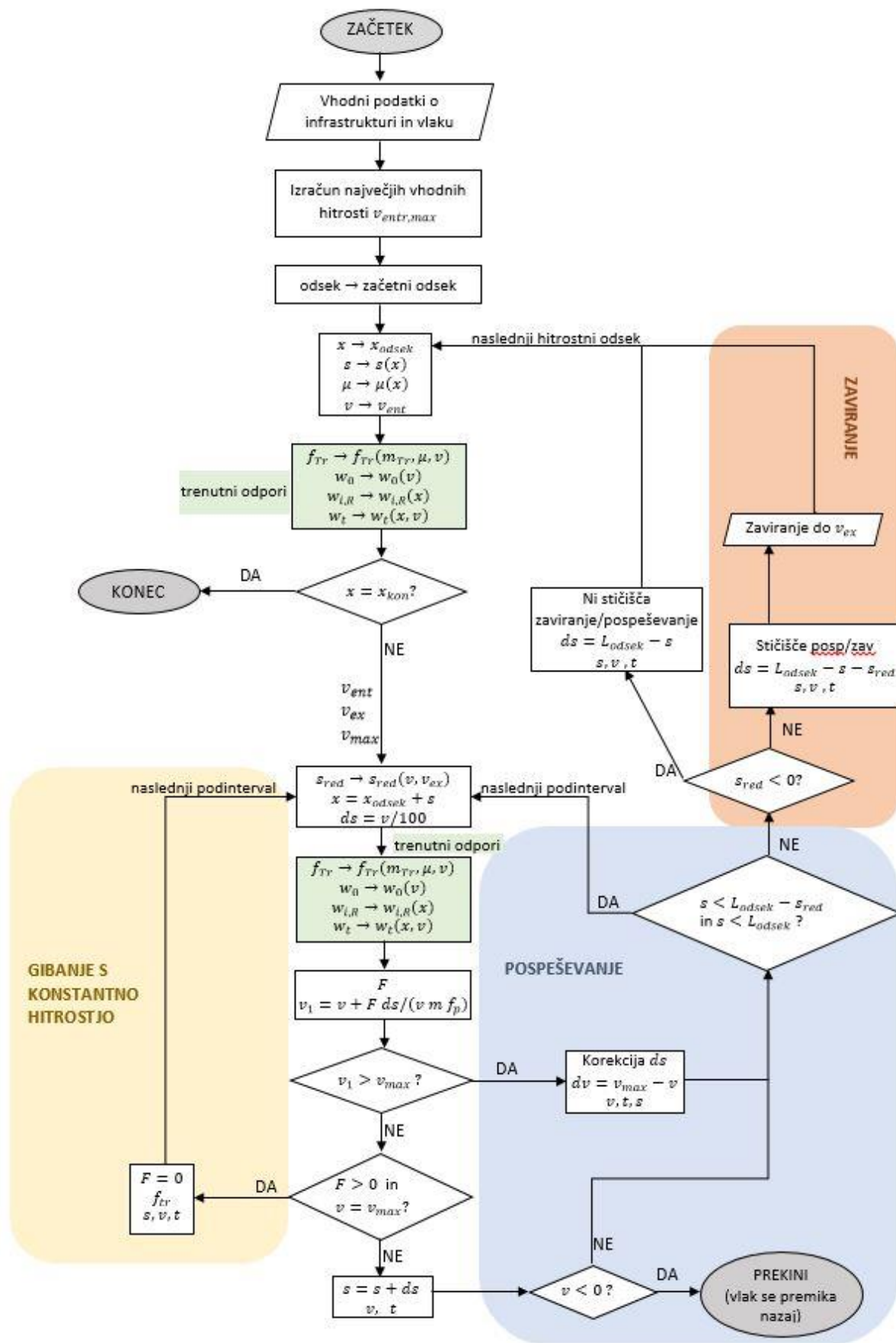
lahko v vsakem časovnem koraku določimo A_{Tr} in A_{red} z rekurzivno zvezo, podobno kot smo določili čas in dolžino prevožene poti:

$$A_{Tr,i+1} = A_{Tr,i} + F_{Tr,i} \Delta s_i, \quad \text{če } F_{Tr} > 0; \quad (35)$$

$$A_{red,i+1} = A_{red,i} + F_{Tr,i} \Delta s_i, \quad \text{če } F_{Tr} < 0. \quad (36)$$

Izračun opravljenega dela vlečne sile je osnova za optimizacijo vleke, to je določiti tak potek vožnje, da vlak na svoji poti porabi čim manj energije. V program sem vključil le izračun opravljenega dela vlečne in zavorne sile v primeru najkrajšega možnega potovalnega časa vlaka.

Del algoritma, zapisanega v programskem jeziku VBA, je priložen v prilogi E.



Slika 18: Shematičen prikaz glavnega dela algoritma za reševanje enačbe gibanja vlaka

7 IZRAČUNANA PRIMERA V PROGRAMU

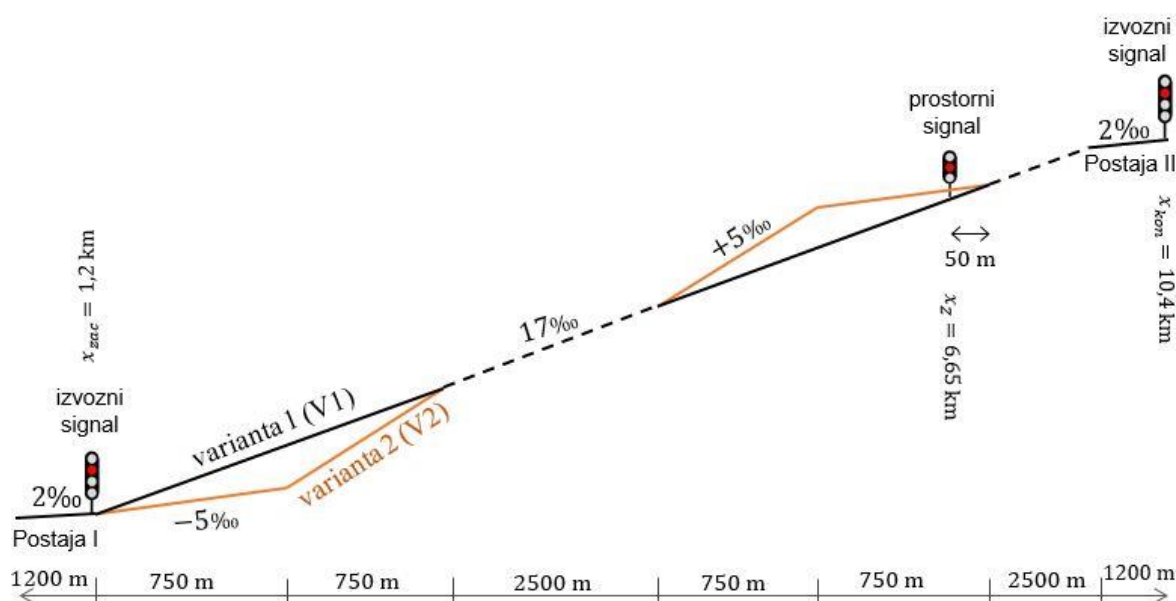
V zadnjem poglavju podajam dva primera, izračuna v programu. V preglednici (2) so izpisani vlaki, ki sem jih uporabil v primerih. Karakteristike vozni sredstev so priložene v prilogi B in C. Vsi ostali rezultati izračunov, ki niso bistveni za nalogi, so v prilogah F in G.

Preglednica 2: Oznake in osnovni podatki o vlakih, ki so uporabljeni v analizah

oznaka	vrsta vlaka	lokomotive	masa vagonov	dolžina vlaka	hitrostna omejitev
L1.T1000	tovorni-premog	SŽ 541	1000 t	250 m	75 km/h
L2.T2000	tovorni-kontejnerji	2 x SŽ 541	2000 t	740 m	75 km/h
L2.T1600	tovorni-nafta	SŽ 541, SŽ 363-T	1500 t	360 m	75 km/h
L1.T800	tovorni-mešani	SŽ 363-T	800 t	490 m	75 km/h
L1.P410	potniški 10 vag.	SŽ 541	410 t	280 m	160 km/h
L1.P330	potniški 8 vag.	SŽ 342	330 t	225 m	120 km/h
ICS	ICS	SŽ 310	152 t	81 m	160 km/h

7.1 Vpliv nagiba na območju speljevanja vlakov na potovalne čase

Zanima nas, kako v primeru strmejših vzponov proge lahko skrajšamo potovalne čase, če mora vlak na vzponu speljevati. Vpliv krivin in predorov zanemarim, saj nas njihovi vplivi v tem primeru ne zanimajo. Na spodnji sliki je prikazan vzdolžni profil preučevanega odseka proge. Vzpon proge med postajama na razdalji 8000 m je v prvi varianti trase (V1) konstanten 17‰, v drugi varianti (V2) pa vzpon trase na območju, kjer lahko pride do zaustavitve in ponovne izpeljave vlaka, ublažimo za 5‰. Na medpostajnem območju je na stacionaži 6650 m postavljen prostorni signal. Začetna in končna točka potovanja sta na stacionažah glavnih signalov prve in druge postaje. Za vsak vlak sta za vsako varianto izračunana dva časa; in sicer v primeru, ko se mora vlak pred prostornim signalom ustaviti in v primeru, ko vlak lahko prostorni signal prepelje. Začetna hitrost vlakov je $V_{zac} = 0$ km/h, konča hitrost pa $V_{kon} = 75$ km/h. Progovna hitrost na medpostajnem območju naj bo 160 km/h.

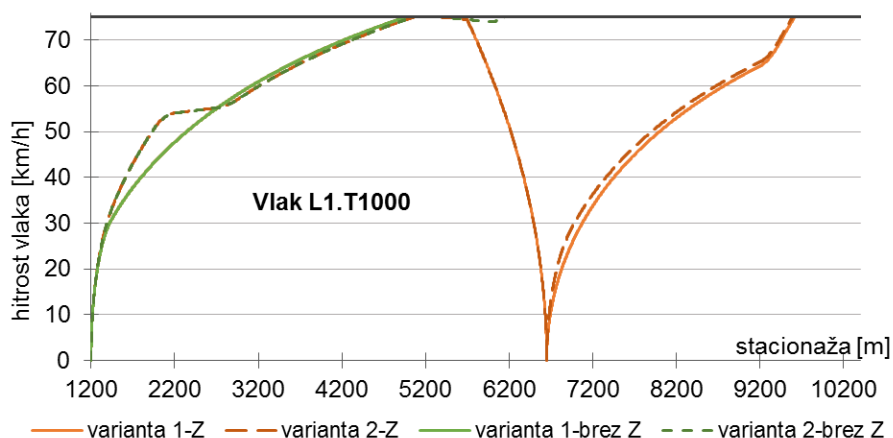


Slika 19: Vzdolžni profil preučevanega odseka

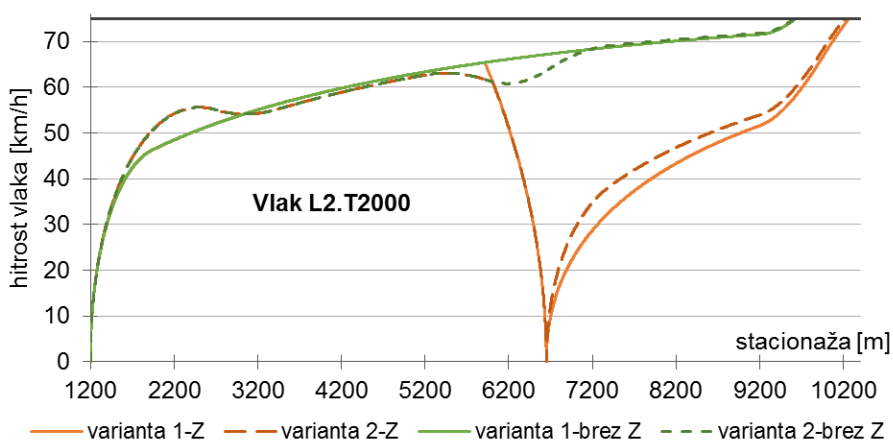
Izračuni pokažejo, da je vpliv nagibov na različne vlake različen. Izkaže se, da se položnejši vzpon na območju izpeljave težkih tovornih vlakov precej bolj pozna kot pri lažjem potniškem vlaku. Manjši vzpon na območju izpeljave vlakov pomeni večji pospešek in s tem višje hitrosti in krajši čas potovanja. Na račun manjšega vzpona pa je potrebno del vzpona povečati, kar negativno vpliva v primerih, ko vlak lahko vzpon prepelje z nezmanjšano hitrostjo brez vmesne zaustavitve pred prostornim signalom. V našem primeru se izkaže, da je pri vseh vlakih, kljub negativnemu vplivu strmejšega dela vzpona ($i = 22 ‰$), čas potovanja v primeru brez vmesne zaustavitve še vedno krajši od časa, ki ga vlak potrebuje pri varianti 1.

Preglednica 3: Izračunani potovalni časi za različne variante in vlake ter izračunana razlika med njimi.

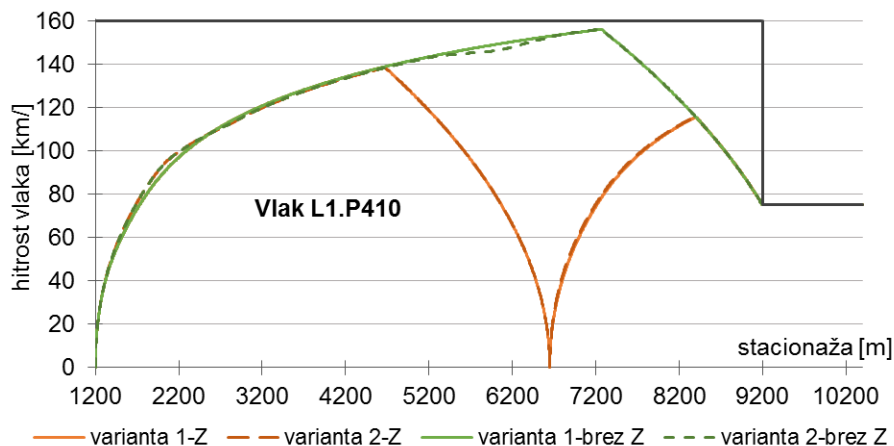
L1.T800				L1.T1000				L2.T2000				L1.P410			
zaustavitev		brez zaustavitve		zaustavitev		brez zaustavitve		zaustavitev		brez zaustavitve		zaustavitev		brez zaustavitve	
V1	V2	V1	V2	V1	V2	V1	V2	V1	V2	V1	V2	V1	V2	V1	V2
13' 24"	13' 3"	11' 17"	11' 16"	11' 59"	11' 28"	8' 57"	8' 48"	13' 14"	12' 27"	9' 33"	9' 31"	7' 4"	7' 1"	5' 19"	5' 18"
-21 s		-1 s		-31 s		-9 s		-47 s		-2 s		-4 s		-1 s	



Slika 20: Hitrostni profili tovornega vlaka L1.T1000 za vse možne variante. Na območju enakomernega gibanja je viden rahel padec hitrosti zaradi večjega vzpona.

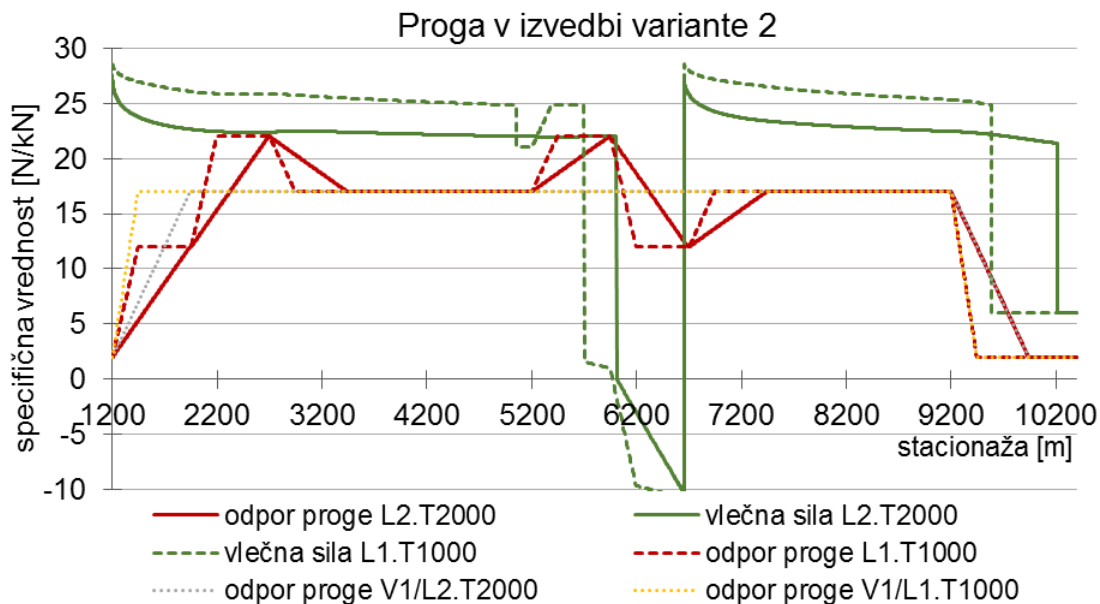


Slika 21: Hitrostni profili tovornega vlaka L2.T2000 z doprego za vse možne variante. V primeru vmesne zaustavitve se vidi, da vlak pri drugi varianti dosega višje hitrosti.



Slika 22: Hitrostni profili potniškega vlaka mase 410 ton za vse možne variante. Pozitiven učinek položnejšega vzpona je pri lahkem vlaku precej manjši.

Če primerjamo hitrostne profile vlakov L1.T1000 in L2.T2000 in vrednosti njihovih odporov vzdolž poti, opazimo, da na učinek nagiba poleg mase vlake vpliva tudi dolžina vlaka. Vlak L1.T1000 je težek, a relativno kratek, zato se na položnem delu nagiba v celoti nahaja dalj časa kot daljši vlak. To pa pomeni, da lahko hitreje doseže višje hitrosti. Na sliki (22) so na diagramu prikazani poteki specifičnih vrednosti odporov proge za oba vlaka v primeru obeh variant in specifične vrednosti vlečnih sil v primeru druge variante.



Slika 23: Specifični odpor proge in specifična vlečna sila v primeru zaustavitve tovornih vlakov L1.T1000 in L2.T2000

Vlak L1.T800, ki ga vleče lokomotiva serije 363 za prepeljano pot potrebuje največ časa, čeprav ima najmanjšo maso med tovornimi vlaki. Račun pokaže, da je vlečna karakteristika lokomotive serije 363 precej slabša od novejšje večsistemske lokomotive serije 541.

Rezultati analize za vlak L1.T800 in vsi ostali rezultati izračuna tega primera so priloženi v prilogi F. Nadalje bi lahko raziskali še, kako na potovalne čase različnih vlakov in s tem na prepustnost proge vpliva mesto postavitve prostornega signala.

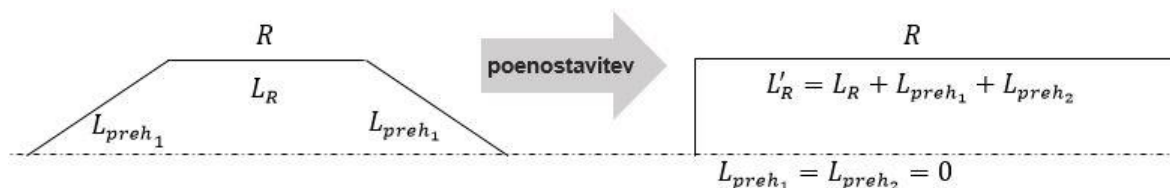
7.2 Okvirni potovalni časi vlakov na progi Koper – Divača (obstoječi in načrtovan tir)

Za primer vzemimo progo Koper – Divača in primerjajmo izračunane potovalne čase različnih vlakov s potovalnimi časi na načrtovanem drugem tira. Za obstoječi tir je značilno, da ima velike vzpone, do 26 ‰, in veliko krivin z majhnimi radiji, tudi pod 300 m. Za načrtovan drugi tir pa je značilno, da ima precej manjši in konstanten vzpon 17 ‰ in velik delež predorov ter krivine z velikimi radiji. Karakteristike obeh tirov so priložene v prilogi G.

Obstoječi tir Divača – Koper je dolg 45,5 km. Pri vnosi podatkov o infrastrukturi sem upošteval le njen 29 km dolg odsek od tovarne postaje v Kopru do cepišča v Prešnici in privzel progovno hitrost 70 km/h. Za oceno potovalnega časa vlaka na celotnem odseku Koper – Divača privzamemo, da se vsak vlak na 16,5 km dolgem odseku Prešnica – Divača giblje s konstantno veliko progovno hitrostjo 70 km/h, to je okoli $\frac{16500m}{(70km/h)/3,6} \cong 15$ min.

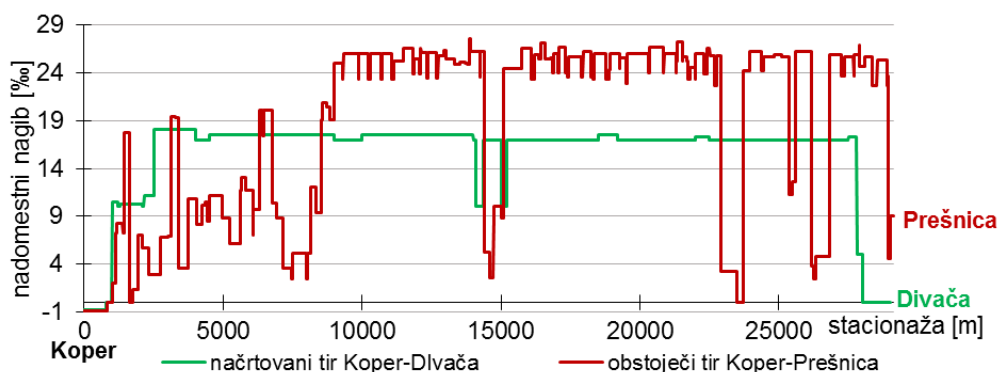
Za dolžino trase in progovno hitrost načrtovanega drugega tira privzemimo vrednost iz načrtov projekta za gradbeno dovoljenje drugega tira. To je 27,1 km in največjo progovno hitrost 160 km/h.

Krivine pri modeliranju proge poenostavimo tako, da po celotni dolžini krivine predpostavimo konstantno ukrivljenost $1/R$, kjer je R polmer krožnega loka krivine (glej sliko 24).



Slika 24: Poenostavljeno modeliranje krivine s prehodnicama.

Predpostavimo, da se vsak vlak, ki ga bomo uporabili, na obstoječem tiru ustavi na izogibališču Hrastovlje Dol (razdalja od začetne točke 14,7 km) in na načrtovanem tiru na izogibališču na razdalji 15 km od začetne točke.

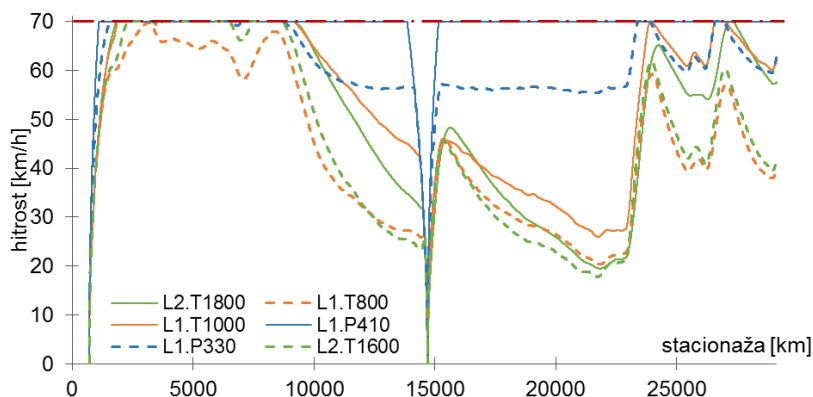


Slika 25: Specifični odpor kopske proge zaradi nagibov in krivin na obstoječem in načrtovanem tiru

V predorih zaradi povečane vlage privzamemo največji adhezijski koeficient $\mu = 0,25$, drugod pa upoštevam $\mu = 0,36$ (glej poglavje 3.1.1).

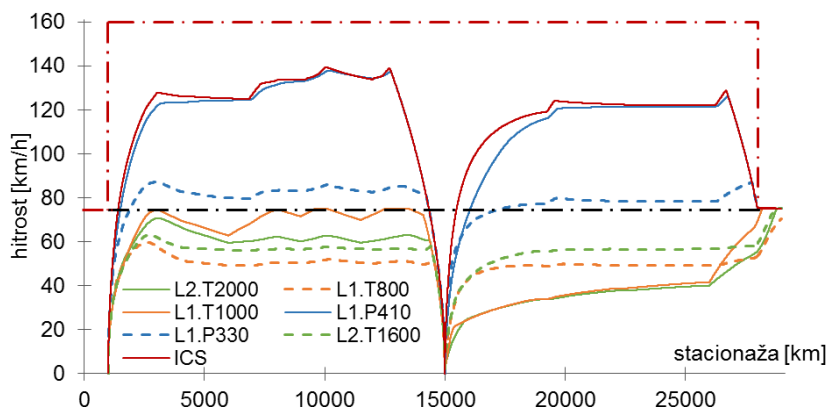
Rezultati izračunov na obstoječem tiru pokažejo, da je le potniški vlak L1.P410 ves čas sposoben voziti s konstantno veliko hitrostjo (slika 26). Za najtežji vlak L2.T2000 se izkaže, da

kljub dobrim adhezijskim pogojem vzpona ne more prepeljati, zato sem v analizo vključil podoben vlak, L2.T1800, z maso 1800 ton. Vsi tovorni vlaki, ki sem jih uporabil v modelu, na najzahtevnejšem delu odseka dosegajo relativno nizke hitrosti, okoli 20 km/h.



Slika 26: Hitrostni profili različnih vlakov na progi Koper-Prešnica pri dobrih adhezijskih pogojih

Na načrtovanem tiru se pri težkih tovornih vlakih pozna velik vpliv zmanjšane adhezijskega koeficienta v predoru. Pri hitrejših potniških vlakih pa odpor zaradi predora doseže in ponekod celo preseže vrednost odpora zaradi nagiba proge (priloga G). Pri tem se je potrebno zavedati, da v predoru nismo upoštevali stranskih odprtih, ki lahko močno zmanjšajo upor v predoru.



Slika 27: Hitrostni profili različnih vlakov na načrtovani progi Koper-Divača

Po izračunih sodeč, so potovalni časi na novem tiru bistveno krajši. Višje so tudi povprečne hitrosti, razen za tovorni vlak L1.T1000. Zanj se izkaže, da je zaradi manjše adhezije v predoru, njegov čas pospeševanja po zaustavitvi zelo podaljšan (glej sliko 27). V tem primeru ima vlak, ki ga vleče lokomotiva serije 363, prednost, saj ima večjo adhezijsko težo.

Preglednica 4: Potovalni časi in povprečne hitrosti vlakov na obeh tirih, z vmesno zaustavitvijo

Vlak	obstoječi tir		načrtovan tir		Vlak	obstoječi tir		načrtovan tir	
	čas	povprečna hitrost	čas	povprečna hitrost		čas	povprečna hitrost	čas	povprečna hitrost
L2.T2000	<i>ne zmore prepeljati</i>		40 min	41,6 km/h	L1.T800	60 min	45,5 km/h	36 min	47,3 km/h
L2.T1800	55 min	49,6 km/h	28 min	60,0 km/h	L1.P410	41 min	66,6 km/h	17 min	99,6 km/h
L2.T1600	61 min	44,8 km/h	32 min	52,0 km/h	L1.P330	44 min	62,0 km/h	23 min	74,3 km/h
L1.T1000	51 min	53,5 km/h	38 min	44,3 km/h	ICS	40 min	68,3 km/h	16 min	104,8 km/h

8 ZAKLJUČEK

V okviru diplomskega dela sem izdelal algoritem, implementiran v programskem jeziku VBA v Excelu, ki je sposoben izračunati najkrajši potovalni čas poljubnega vlaka na poljubni progi ob danih začetnih in končnih pogojih ter ob znanih hitrostnih omejitvah ter morebitnih vmesnih zaustavitvah. Naloga je sicer teoretično zastavljena, a sem s primeroma v sedmem poglavju želez prikazati uporabnost programa in zakaj nas bi lahko takšni izračuni, kot je najkrajši čas potovanja, zanimali. Znani časi potovanja različnih vlakov na določenem odseku so pomembni tudi pri določanju zmogljivosti proge in na splošno njene funkcionalnosti ter ekonomičnosti.

Ugotovili smo, da je skupni specifični odpor v določenem trenutku gibanja odvisen tako od infrastrukture kot od vrste vlaka in njegove dolžine. Začetnega povišanega odpora pri speljevanju vlaka, ki ga omenja Zgonc (2003), v izračunu potovalnih časov nisem upošteval, zato začetni pospeški pri speljevanju vlakov v modelu lahko odstopajo od realnosti.

V programu sem podatke o infrastrukturi zajel v štirih seznamih – seznam nagibov, krivin, predorov in hitrostnih omejitev na progi. S hitrostnimi omejitvami na progi bi lahko poleg progovne hitrosti lahko zajeli tudi druge hitrostne omejitve na progi, ki so lahko posledica drugih dejavnikov (počasne vožnje, vožnja v odklonsko smer preko kretnice itd.).

V izračunanih primerih se izkaže ena od prednosti železnice; to je, da je velikost osnovnega odpora vlaka precej majhna. V primerjavi z odporom proge ali daljšega predora je velikokrat zanemarljiva in ne predstavlja omejitve pri gibanju v območju nizkih hitrosti. Značilno pa je, da ima infrastruktura na gibanje vlakov zelo velik vpliv, tako pri speljevanju kot v primeru višjih hitrosti. Pozitiven učinek položnejšega nagiba pri speljevanju težkih tovornih vlakov je očiten iz prvega izračunanega primera. Vlogo pri tem igra tudi dolžina vlaka. To bi lahko bilo izhodišče nadaljnje raziskave, če bi nas zanimalo, na kolikšni razdalji pred signalom naj se vlak z določeno dolžino ustavi, da bo njegov čas pospeševanja čim krajši. Iz drugega primera, ko primerjam potovalne čase vlakov na obstoječem tiru Koper – Divača s potovalnimi časi na načrtovanem drugem tiru, pa lahko opazimo prednost manjšega nagiba, obenem pa slabost predorov zaradi povečanega zračnega upora in manjšega adhezijskega koeficienta, v primeru zadrževanja vlage v predorih. Stiki med pogonskimi kolesi in tirnico so namreč edini stiki, ki preko oboda pogonskih koles lokomotive omogočajo prenos vlečne sile, ki premaguje sile vseh odporov, ki delujejo na vlak med gibanjem. Ob slabem adhezijskem stiku je zato pomembna tudi teža lokomotive, kar pokaže tudi izračun v drugem primeru, saj vlak s težjo lokomotivo kljub slabši vlečni karakteristiki pospešuje manj časa kot vlak z lažjo lokomotivo, ki pa je sicer bistveno močnejša. V tem izračunu sem predpostavil, da je adhezijski stik med kolesi in tirnico pri obeh lokomotivah enak.

VIRI IN LITERATURA

- Barkan, C. 2007. Railroad Transportation Energy Efficiency. University of Illinois at Urbana-Champaign, Department of Civil and Environmental Engineering: 61 str.
<http://www.istc.illinois.edu/about/SeminarPresentations/20091118.pdf> (Pridobljeno 1.8.2015).
- Brünger, O., Dahlhaus, E. 2008. Running time estimation. V: Hansen, I. A. (ur.), Pachl, J. (ur.). Railway timetable and traffic. Hamburg, Eurailpress: str. 58–80.
- Cene, B., 2006. Zmogljivost nove Siemensove lokomotive na Slovenskih železnicah. Strojniški vestnik 51, 5: 260–266.
[http://www.sv-jme.eu/scripts/download.php?file=/data/upload/2005/5/SV-JME_51\(2005\)05_260-266_Cene.pdf](http://www.sv-jme.eu/scripts/download.php?file=/data/upload/2005/5/SV-JME_51(2005)05_260-266_Cene.pdf) (Pridobljeno 17.6.2015).
- Chandra, S., Agarwal, M. 2007. Railway engineering. New Delhi, Oxford University Press: str. 436–450.
http://www.getebook.in/resources/civil_ebook/new_ebook_30092014/Railway-Engineering-Satish-Chandra-M-M-Agarwal.pdf (Pridobljeno 24.5.2015).
- Cole, C. 2006. Longitudinal Train Dynamics. V: Iwnicki S. (ur.). Handbook of Railway Vehicle Dynamics. ZDA, CRC press: str. 256–263.
- Hay, W.W. 1982. Railroad Engineering. ZDA, John Wiley & Sons: str. 69–90 .
<https://books.google.com/books?id=ygKio-Ks0doC&pgis=1> (Pridobljeno 22.8.2015).
- Huerlimann, D., Andrew, B.N. 2003. Open Track Simulation of railway networks Version 1.3. Švica, ETH Zurich, Institute for Transport Planning and Systems: str. 53–64.
- Jain, M. 2013.
<https://www.railelectrica.com/traction-mechanics/train-grade-curve-and-acceleration-resistance-2/> (Pridobljeno 30.7.2015).
- Newman, C. 2010.
<http://5at.co.uk/index.php/definitions/terms-and-definitions/resistance.html> (Pridobljeno 7.8.2015).
- Píchlík, P., Zděnek, J. 2014. Overview of slip control methods used in locomotives. Transactions on Electrical Engineering 3, 2: 38–43.
<http://www.transonleng.org/2014/20142c.pdf> (Pridobljeno 5.7.2015).
- Profillidis, V.A. 2006. Railway Management and Engineering. Anglija, Ashgate Publishing Limited: str. 350–369.
https://books.google.si/books?id=MumsYYDF2xAC&pg=PA350&hl=sl&source=gbs_toc_r&cad=2#v=onepage&q&f=false (Pridobljeno 11.7.2015).
- Riley E. J. 2012. Module 5: Tractive Effort. American Railway Engineering and Maintenance. Federal Railroad Administration: 30 str.
<http://www.slideserve.com/adele/module-5-tractive-effort> (Pridobljeno 27.7.2015).
- Steimel, A. 2008. Electric Traction – Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Nemčija, Oldenbourg Industrieverlag: str. 29–32.

Yi, S., Nie L., Chen, Y., Qin, F. 2011. Reasonable compensation coefficient of maximum gradient in long railway tunnels. *Journal of Modern Transportation* 19, 1: 12–18.
<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84870594522&partnerID=40&md5=ca9d27b3f1089e7fd32c6ab4df97e8c1> (Pridobljeno 16.5.2015).

Zgonc, B., 2012. *Železniška infrastruktura*. Portorož, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet: str. 83.

Zgonc, B., 2003. *Železniški promet*. Portorož, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet: str. 67–104.

Ta stran je namenoma prazna.

PRILOGA A: TABELA MERODAJNIH IN GEOMETRIČNIH NAGIBOV V PREDORIH

Dolžina predora (m)	Geometrični vzpon predora (‰)	Merodajni nagib (‰)											
		6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
300		6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
500		5,55	7,48	9,35	11,26	13,16	15,08	16,97	18,88	20,80	22,69	24,59	26,46
1000		4,54	6,31	7,90	9,60	11,26	13,00	14,66	16,36	18,07	19,72	21,40	22,98
1500		6,36	4,97	6,24	7,73	9,14	10,68	12,08	13,56	15,05	16,44	17,86	19,14
2000		3,24	4,83	6,09	7,55	8,94	10,46	11,87	13,33	14,78	16,17	17,57	18,82
3000		3,02	4,60	5,80	7,24	8,59	10,09	11,44	12,87	14,31	15,66	17,01	18,24
4000		2,82	4,36	5,54	6,94	8,25	9,73	11,05	12,45	13,83	15,15	16,47	17,66
5000		2,70	4,23	5,39	6,76	8,07	9,51	10,83	12,21	13,61	14,90	16,21	17,36
6000		2,36	3,88	5,00	6,35	7,63	9,05	10,33	11,70	13,05	14,32	15,60	16,70
7000		2,00	3,44	4,83	5,86	7,10	8,52	9,78	11,10	12,44	13,68	14,94	16,00
8000		—	3,05	4,08	5,38	6,60	7,98	9,20	10,51	11,80	13,01	14,22	15,20
9000		—	2,73	3,74	5,02	6,20	7,57	8,75	10,04	11,32	12,47	13,67	14,65
10000		—	2,39	3,36	4,62	5,76	7,12	8,27	9,54	10,78	11,94	13,10	14,02
11000		—	2,24	3,21	4,47	5,61	6,97	8,12	9,39	10,63	11,75	12,95	13,93
12000		—	2,13	3,08	4,36	5,48	6,86	8,00	9,28	10,58	11,68	12,84	13,82
13000		—	2,05	3,02	4,28	5,43	6,76	7,93	9,20	10,28	11,60	12,76	13,76
14000		—	2,01	2,98	4,24	5,39	6,32	7,89	9,16	10,24	11,56	12,72	13,70
15000		—	2,00	2,98	4,24	5,39	6,32	7,89	9,16	10,24	11,56	12,72	13,70

Vir: Kočar, B. 2014. Priročnik za strojevodje. Ljubljana, SŽ – Tovorni promet d.o.o, SŽ – Potniški promet d.o.o.: str. 66.
<http://vlekaljubljana.wix.com/turnusi#!prironik/ccyc> (Pridobljeno 17.5.2015).

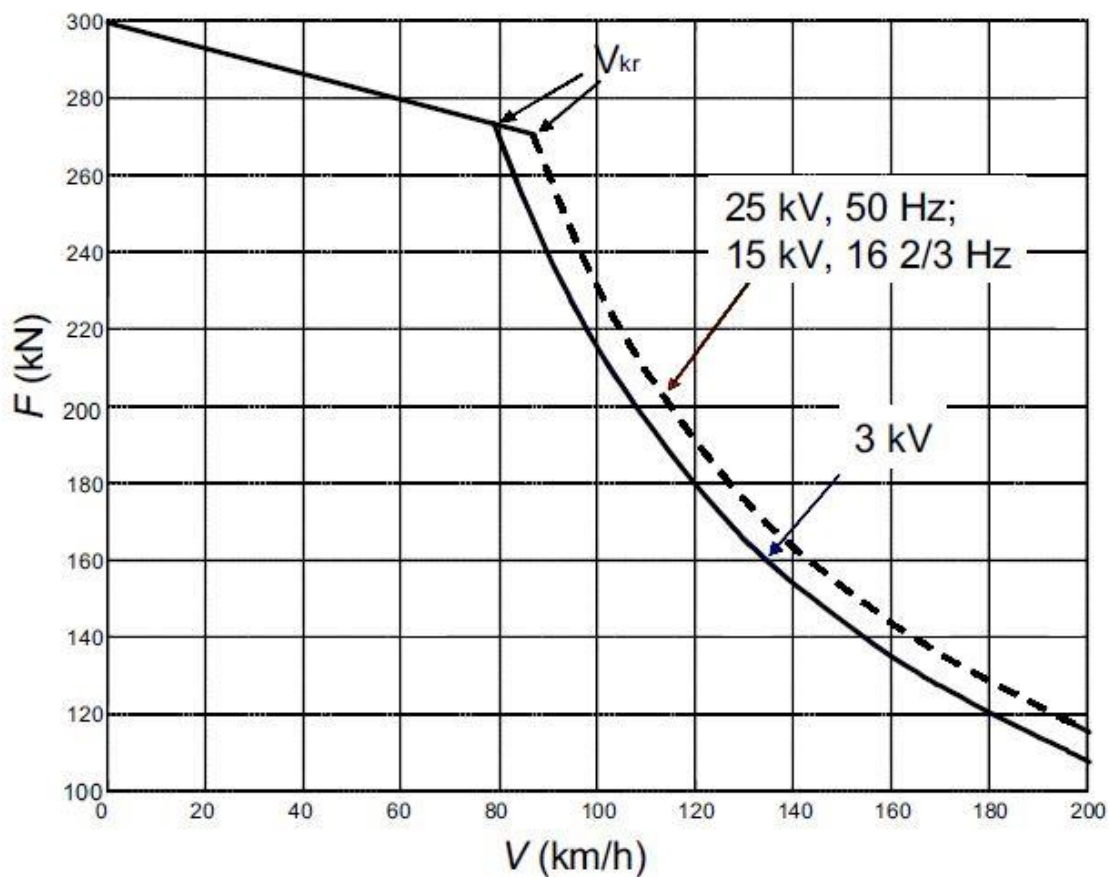
PRILOGA B: VLEČNE KARAKTERISTIKE IN SLIKE NEKATERIH POMEMBNEJŠIH LOKOMOTIV, KI VOZIJO NA GLAVNIH PROGAH SLOVENSКИH ŽELEZNIC

Vlečna karakteristika večsistemske Siemensove lokomotive serije 541:



Lokomotiva serije 541

Vir: Bahnbilder. <http://www.bahnbilder.de/1200/sz-541-108-am-04102013-mit-727538.jpg>
(Pridobljeno 25.8.2015).



Vlečna karakteristika lokomotive serije 541.

Vir: Cene, B., 2006. Zmožljivost nove Siemensove lokomotive na Slovenskih železnicah. Strojniški vestnik 51, 5: 260–266.

[http://www.sv-jme.eu/scripts/download.php?file=/data/upload/2005/5/SV-JME_51\(2005\)05_260-266_Cene.pdf](http://www.sv-jme.eu/scripts/download.php?file=/data/upload/2005/5/SV-JME_51(2005)05_260-266_Cene.pdf) (Pridobljeno 17.6.2015).

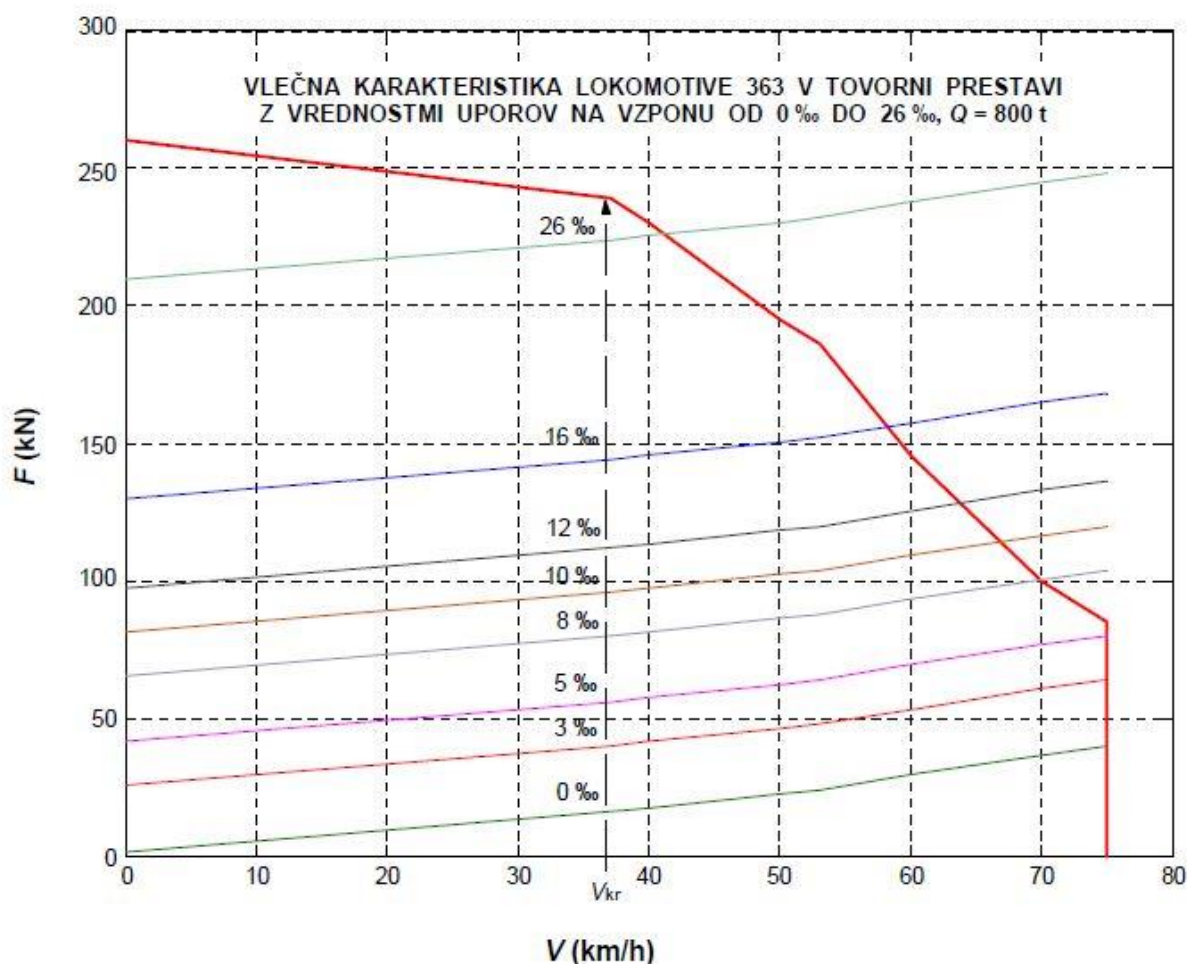
Vlečna karakteristika lokomotive serije 363 v tovorni prestavi:



Lokomotiva serije 363

Vir: Wikimedia.

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/13/S%C5%BD_class_363_between_%C4%8Crnoti%C4%8De_and_Hrastovlje.jpg (Pridobljeno 25.8.2015).



Vlečna karakteristika lokomotive serije 363 v tovorni prestavi.

Vir: Cene B., 2000. Splošna energetika, Električna vleka. Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, 31– 32.

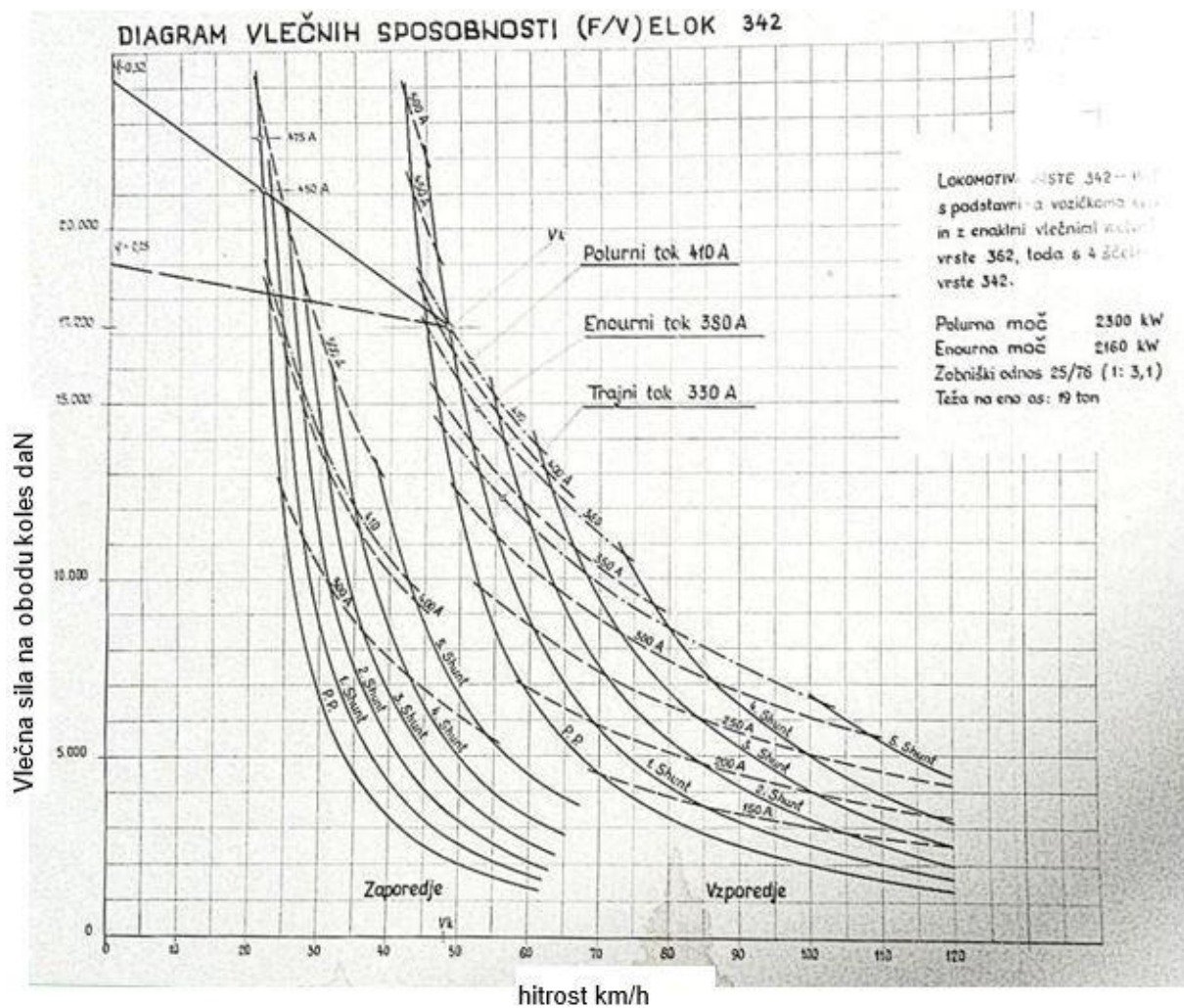
http://www.powerlab.uni-mb.si/novo2012/Download/Literatura/Elektricna_vleka.pdf

Vlečna karakteristika lokomotive serije 342 (v nalogi upoštevan diagram trajni tok 330 A):



Lokomotiva serije 342

Vir: Rail Pictures. <http://www.rail-pictures.com/1024/s-342-022-is-hauling-ec158-11656.jpg>
 (Pridobljeno 25.8.2015).



Vlečne karakteristike lokomotive 342

Vir: Švajgar V. 1970. Biro za študij razvoja osnovnih sredstev. V: Električna lokomotiva 342 II. Ljubljana, Združeno železniško transportno podjetje Ljubljana: str. 5.

Vlečna karakteristika potniškega vlaka serije 310




Vir: Darja Šemrov. Elektronska pošta (13.5.2015).

Vlak z nagibno tehniko serije 310:
 Vir: Railway media.
<http://www.railwaymedia.co.uk/Foreign/Slovenia/SZ/i-2JsRwjb/0/M/310005%20Rimske%20Toplice%20160910g-M.jpg>
 (Pridobljeno 25.8.2015)








from V [km/h]	from V [mph]	from F [kN]	average V [km]	average V [m]	average F [kN]	to V [km/h]	to V [mph]	to F [kN]	Type
0.000	0.000	106.000				10.000	6.214	105.840	Straight line ($F = a + b \cdot V$)
10.000	6.214	105.840				20.000	12.427	105.700	Straight line ($F = a + b \cdot V$)
20.000	12.427	105.700				30.000	18.641	105.530	Straight line ($F = a + b \cdot V$)
30.000	18.641	105.350				40.000	24.855	105.400	Straight line ($F = a + b \cdot V$)
40.000	24.855	105.400				50.000	31.069	105.200	Straight line ($F = a + b \cdot V$)
50.000	31.069	105.200				60.000	37.282	105.070	Straight line ($F = a + b \cdot V$)
60.000	37.282	105.070				66.000	41.010	103.600	Straight line ($F = a + b \cdot V$)
66.000	41.010	103.600				70.000	43.496	99.000	Hyperbola ($F = a + b/V^2$)
70.000	43.496	99.000				80.000	49.710	88.000	Hyperbola ($F = a + b/V^2$)
80.000	49.710	88.000				90.000	55.923	78.200	Hyperbola ($F = a + b/V^2$)
90.000	55.923	78.200				100.000	62.137	70.200	Hyperbola ($F = a + b/V^2$)
100.000	62.137	70.200				110.000	68.351	63.200	Hyperbola ($F = a + b/V^2$)
110.000	68.351	63.200				120.000	74.565	57.800	Hyperbola ($F = a + b/V^2$)
120.000	74.565	57.800				130.000	80.778	53.600	Hyperbola ($F = a + b/V^2$)
130.000	80.778	53.600				140.000	86.992	50.260	Hyperbola ($F = a + b/V^2$)
140.000	86.992	50.260				150.000	93.206	47.260	Hyperbola ($F = a + b/V^2$)
150.000	93.206	47.260				160.000	99.419	43.800	Hyperbola ($F = a + b/V^2$)
160.000	99.419	43.800				170.000	105.633	41.150	Hyperbola ($F = a + b/V^2$)
170.000	105.633	41.150				180.000	111.847	39.000	Hyperbola ($F = a + b/V^2$)
180.000	111.847	39.000				190.000	118.061	36.800	Hyperbola ($F = a + b/V^2$)
190.000	118.061	36.800				200.000	124.274	35.000	Hyperbola ($F = a + b/V^2$)

PRILOGA C: GLAVNE KARAKTERISTIKE NEKATERIH TOVORNIH VAGONOV NA SLOVENSКИH ŽELEZNICAH

VAGON	LASTNA MASA [t]	KATEGORIJA PROGE	DOLŽINA MED ODBOJNIKI [m]
		MEJNA NAKLADALNA MASA [t]	
Eas 	21,0	A/B1/B2/C2 43/49/51/59	14,04
Faccs 	20,0	A/B1/B2/C2/C3/C4 38,5/41/52/58/60/60	12,24
Fals 	23,5	A/B1/B2/C2/C3/C4 35,5/38/48/55/56/56	12,34
Hablliinss 	27,5	A/B/C/D 36,5/44,5/54,5/62,5	23,27
Hbbins 	15,3	A/B/C/D 16,5/20,5/24,5/29,5	15,5





se nadaljuje...

... nadaljevanje preglednice priloge C

VAGON	LASTNA MASA [t]	KATEGORIJA PROGE	DOLŽINA MED ODBOJNIKI [m]
		MEJNA NAKLADALNA MASA [t]	
<p>Himrrs</p> 	30,5	A/B/C/D 33,5/41,5/49,5/59,5	2 x 15,50
<p>Kgs</p> 	13,0	A/B/C 19/23/27	13,86
<p>Laags</p> 	22,5	A/B/C 39/47/55	2 x 13,86
<p>Laess</p> 	23,5	A/B/C 20/20/20	24,84
<p>Regs</p> 	24,0	A/B/C 40/48/56	19,9

se nadaljuje...

... nadaljevanje preglednice priloge C

VAGON	LASTNA MASA [t]	KATEGORIJA PROGE	DOLŽINA MED ODBOJNIKI [m]
		MEJNA NAKLADALNA MASA [t]	
Sgns 	19,5	A/B/C/D 44,5/52,5/62,5/70,5	19,74
Tadds 	27,0	A/B/C 37/45/53	19,04
Uacs 	21,5	A/B1/B2/C 42,5/49,5/50,5/58,5	15,86
Zaes 	21,5	A/B/C 42,5/50,5/58,5	15,7

Vir: Vagoni – Slovenske železnice d.o.o






<http://www.slo-zeleznice.si/sl/tovorni-promet/vagoni> (Pridobljeno 17.8.2015).

PRILOGA D: DEFINIRANE KARAKTERISTIKE VOZIL V PROGRAMU

Vhodni podatki o vagonih v Excelu

POTNIŠKI VAGONI				TOVORNI VAGONI			
oznaka vagona	faktor cb []	površina Af [m ²]	faktor fpw	oznaka vagona	faktor ca []	faktor cm []	faktor fpw
potniški 4-osni	0,0025	1,45	1,06	tovorni zaprt-star	2	0,04	1,06
potniški 3-osni	0,004	1,45	1,06	tovorni zaprt	1,4	0,04	1,06
potniški 2-osni	0,007	1,45	1,06	tovorni odprt naložen-star	2	0,032	1,06
				tovorni odprt naložen	1,4	0,032	1,06
				tovorni odprt prazen-star	2	0,1	1,06
				tovorni odprt prazen	1,4	0,1	1,06

Vhodni podatki o lokomotivah v Excelu

Lokomotiva	Slika	Faktor fpT [] (prispevek rotacijske)	adhezijska masa [t]	Vlečna sila [kN] v odvisnosti od hitrosti [km/h]																					dolžina [m]												
541 "Živa"		1,09	87,00	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	19,58
363 "Brižita"-T		1,09	115,00	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	20,1
342 "Moped"		1,09	81,00	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	15,8
310 "Pendolino"		1,06	152,00	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	81
avstrijska "Hercules"		1,06	90,00	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	20
"Idearno"		1,00	10000,00	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	0,01

PRILOGA E: DEL PROGRAMSKE KODE (VBA EXCEL) NAMENJENE ZA REŠEVANJE ENAČBE GIBANJA V ODSEKU Z ZAVIRANJEM

```

Sub EnacbaGibanja()
Dim x As Double, t_polje As Double, s_skupna As Double 'stacionaža in čas ---> GRAF
Dim s As Double, ds As Double, t As Double, dt As Double, v As Double, dv As Double
Dim adhezija As Double
Dim F_vlecna As Double 'vlečna sila(v)
Dim F_odpor As Double 'skupni odpor
Dim R_proga As Double 'odpor proge (i,R)
Dim R_predor As Double 'odpor predora (v, l,A,R)
Dim R_vlak As Double 'osnovni odpor vlaka (v)
Dim odsekV As Long 'številka hitrostnega odseka na progi
Dim m As Double 'masa vlaka
Dim pospesek As Double 'pospešek vlaka
Dim D As Long
Dim deloF As Double
Dim deloB As Double

D = 100 '!!! če popraviš D, popravi še N "izpisiCasGibanja"
Call izbrisiCase

Vvlak = List4.Cells(18, 5)
pojemek = List4.Cells(19, 5)
m = masaVlaka * 1000
stevec = 0
t = 0
deloF = 0
Call IzracunajOdporVlaka
Call merodajniNagib
Call seznamPolj 'določim urejen seznam vhodnih hitrosti
Call IzracunajZavorneRazdalje 'določim nove vhodne - izhodne hitrosti

'ALGORITEM ZA REŠEVANJE EN. GIBANJA VLAKA
'reševanje v osnovnih enotah! v[m/s], t[s], x[m])

zacetnoPolje = karakteristikniOdsek(stacZ, stacPolja)
koncnoPolje = karakteristikniOdsek(stacK, stacPolja)
s_skupna = 0
For polje = zacetnoPolje To koncnoPolje
x = stacPolja(polje)
s = 0
v = max(Vex(polje - 1), 0.000001)
Vproge = hitrosti(hitrostniOdsek(x, stacV))
adhezija = trenutnaAdhezija(x)
F_vlecna = adhezijskaVlecnaSila(adhezijskaMasa, adhezija, v) '[N]
R_vlak = osnovniOdpor(v) '[N]
R_proga = trenutniOdporI(x) + trenutniOdporR(x) '[N]
R_predor = trenutniOdporT(x, v) '[N]
'končna točka
If x = stacK Then
Exit For
End If

'1 ***polja brez zaviranja - pospeševanje in enakomerno gibanje***
If zavorneRazdalje(polje) = 0 Then
Do While s + ds < Lpolje(polje)
stevec = stevec + 1
x = stacPolja(polje) + s
ds = v / D

Vproge = hitrosti(hitrostniOdsek(x, stacV))
adhezija = trenutnaAdhezija(x)
F_vlecna = adhezijskaVlecnaSila(adhezijskaMasa, adhezija, v) '[N]
R_vlak = osnovniOdpor(v) '[N]
R_proga = trenutniOdporI(x) + trenutniOdporR(x) '[N]
R_predor = trenutniOdporT(x, v) '[N]

F = F_vlecna - R_vlak - R_proga - R_predor
v1 = v + (F * ds) / (v * m * fp)

```



```
'2 ***polja z zaviranjem ***
Else
s_red = v ^ 2 / (2 * pojemek) - Vex(polje) ^ 2 / (2 * pojemek)
ds = 0
Do While s + ds <= Lpolje(polje) - s_red And s + ds < Lpolje(polje)
stevec = stevec + 1
x = stacPolja(polje) + s
ds = v / D

Vproge = hitrosti(hitrostniOdsek(x, stacV))
adhezija = trenutnaAdhezija(x)
F_vlecna = adhezijskaVlecnaSila(adhezijskaMasa, adhezija, v) '[N]
R_vlak = osnovniOdpor(v) '[N]
R_proga = trenutniOdporI(x) + trenutniOdporR(x) '[N]
R_predor = trenutniOdporT(x, v) '[N]

F = F_vlecna - R_vlak - R_proga - R_predor
v1 = v + (F * ds) / (v * m * fp)

'2a pospeševanje na ds'
If v1 > Vmax(polje) And v < Vmax(polje) Then
dv = Vmax(polje) - v
v = v + dv
t = t + m * fp * dv / F
s = s + m * fp * v * dv / F

'2b enakomerno gibanje - dosežena Vmax
ElseIf F > 0 And v = Vmax(polje) Then
F = 0
F_vlecna = R_vlak + R_proga + R_predor
s = s + ds
v = v + F * ds / (v * m * fp)
t = t + ds / v

'2c pospeševanje na ds
Else
s = s + ds
v = v + F * ds / (v * m * fp)
t = t + ds / v
End If
s_red = v ^ 2 / (2 * pojemek) - Vex(polje) ^ 2 / (2 * pojemek)
pospesek = F / m
Call izpisiCas(stevec, x, v, t, F_vlecna, R_vlak, R_proga, R_predor, pospesek, Vvlak)

If s < 0 Or v < 0 Then
MsgBox ("Vlak leze nazaj!" & vbNewLine & "Razpoložljiva vlečna sila: " & F_vlecna &
Exit Sub
End If
'DELO VLEČNE IN ZAVORNE SILE
If F_vlecna > 0 Then
deloF = deloF + F_vlecna * ds
Else
deloB = deloB - F_vlecna * ds
End If
Loop
'stišišča pospeševanje/zaviranje ne obstaja (hitrost ni presežena)
If s_red < 0 Then
ds = Lpolje(polje) - s
s = s + ds
v = v + F * ds / (v * m * fp)
t = t + ds / v
Else
'obstaja stišišče pospeševanje/zaviranje (hitrost je dosežena)
ds = Lpolje(polje) - s - s_red
F = 0
s = s + ds
v = v + F * ds / (v * m * fp)
t = t + ds / v
'zaviranje
dv = (Vex(polje) - v) / (Int(Vex(polje) - v) * D)
Do While v - dv > Vex(polje)
x = stacPolja(polje) + s
```

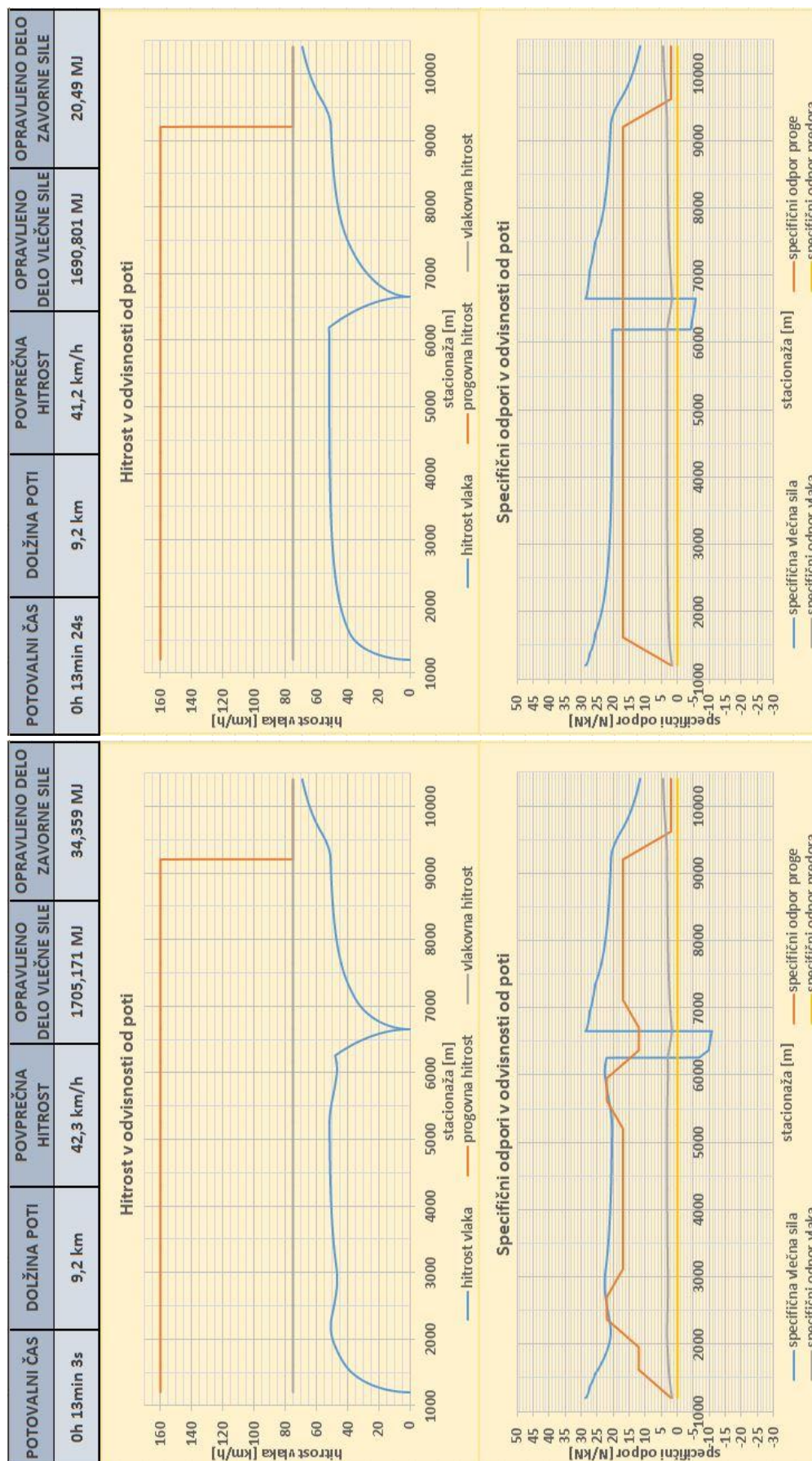
```

Vproge = hitrosti(hitrostniOdsek(x, stacV))
adhezija = trenutnaAdhezija(x)
R_vlak = osnovniOdpor(v) '[N]'
R_proga = trenutniOdporI(x) + trenutniOdporR(x) '[N]'
R_predor = trenutniOdporT(x, v) '[N]'
F_vlecna = -pojemek * m * fp + R_vlak + R_proga + R_predor '[N]'
pospesek = -pojemek
stevec = stevec + 1
v = v - dv
t = t + dv / pojemek
s = s + v * dv / pojemek
'DELO VLEČNE IN ZAVORNE SILE
If F_vlecna > 0 Then
deloF = deloF + F_vlecna * v * dv / pojemek
Else
deloB = deloB - F_vlecna * v * dv / pojemek
End If
Call izpisiCas(stevec, x, v, t, F_vlecna, R_vlak, R_proga, R_predor, pospesek, Vvla:
Loop
'
dv = v - Vex(polje)
v = v - dv
t = t + dv / pojemek
s = s + v * dv / pojemek

Vproge = hitrosti(hitrostniOdsek(x, stacV))
adhezija = trenutnaAdhezija(x)
R_vlak = osnovniOdpor(v) '[N]'
R_proga = trenutniOdporI(x) + trenutniOdporR(x) '[N]'
R_predor = trenutniOdporT(x, v) '[N]'
F_vlecna = -pojemek * m * fp + R_vlak + R_proga + R_predor '[N]'
pospesek = -pojemek
stevec = stevec + 1
'
End If
End If
s_skupna = s_skupna + s
Vex(polje) = v
If polje < koncnoPolje Then
Vent(polje + 1) = Vex(polje)
End If
stevec = Round(stevec / D) * D
x = stacPolja(polje) + s
Call izpisiCas(stevec, x, v, t, F_vlecna, R_vlak, R_proga, R_predor, pospesek, Vvla:
Next polje
Call casPotovanja(t)
Call dolzinaPoti(stacK - stacZ)
Call povprecnaHitrost((stacK - stacZ) / t)
Call opravljenoDelo(deloF)
Call opravljenoDeloB(deloB)
End Sub

```

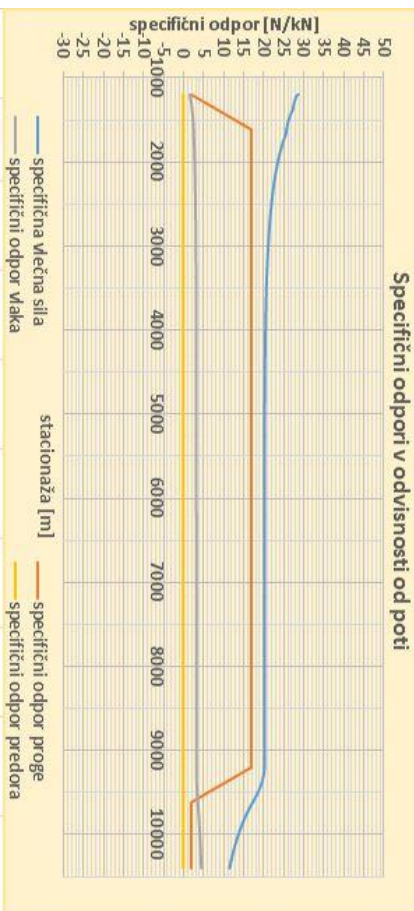
PRILOGA F: OSTALI REZULTATI IZRAČUNA IZ PRVEGA PRIMERA



Rezultati za tovorni vlak L1.T800 (z lokomotivo 363) v primeru zaustavitve pri varianti 1.

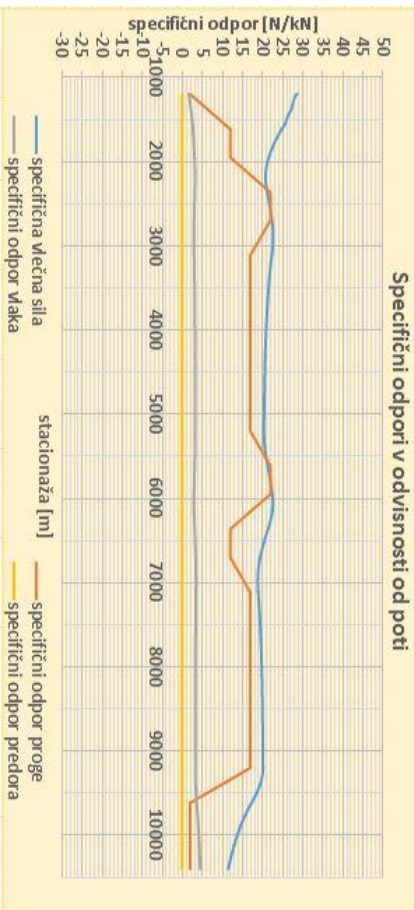
Rezultati za tovorni vlak L1.T800 (z lokomotivo 363) v primeru zaustavitve pri varianti 2.

POTOVALNI ČAS	DOLŽINA POTI	POVPREČNA HITROST	OPRAVLENO DELO VLEČNE SILE	OPRAVLENO DELO ZAVORNE SILE
0h 11min 17s	9,2 km	48,9 km/h	1687,338 MJ	0 MJ

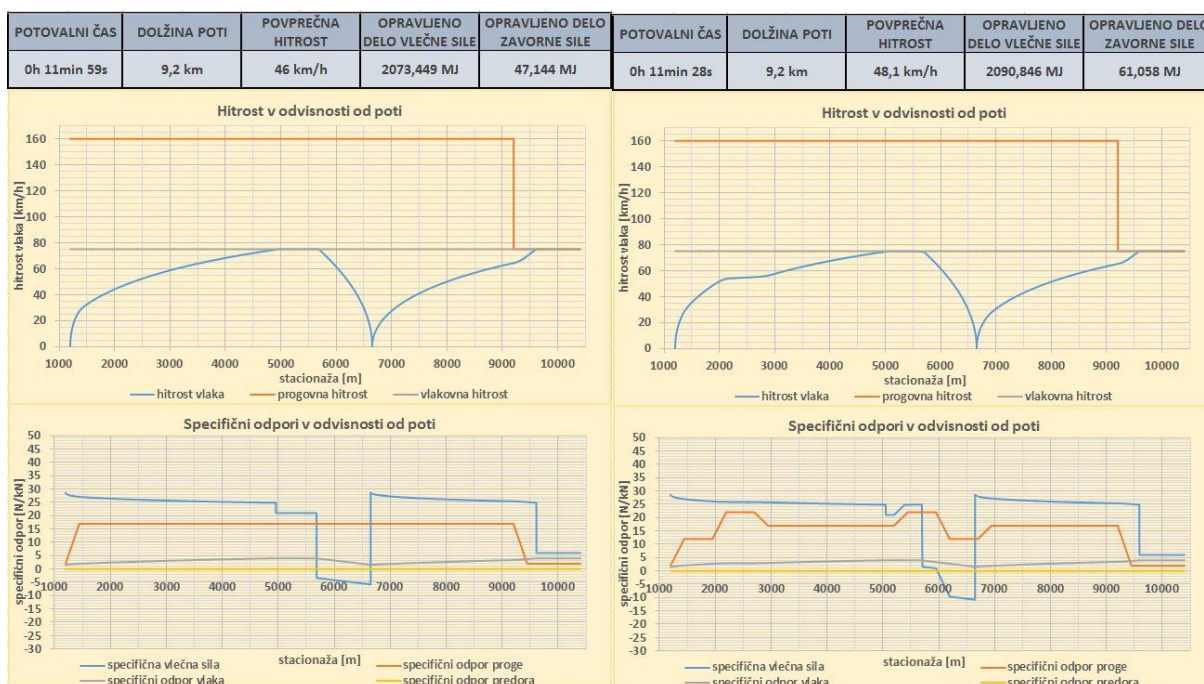


Rezultati za tovorni vlak L1.T800 (z lokomotivo 363) v primeru brez zaustavitve pri varianti 1.

POTOVALNI ČAS	DOLŽINA POTI	POVPREČNA HITROST	OPRAVLENO DELO VLEČNE SILE	OPRAVLENO DELO ZAVORNE SILE
0h 11min 16s	9,2 km	49 km/h	1687,535 MJ	0 MJ

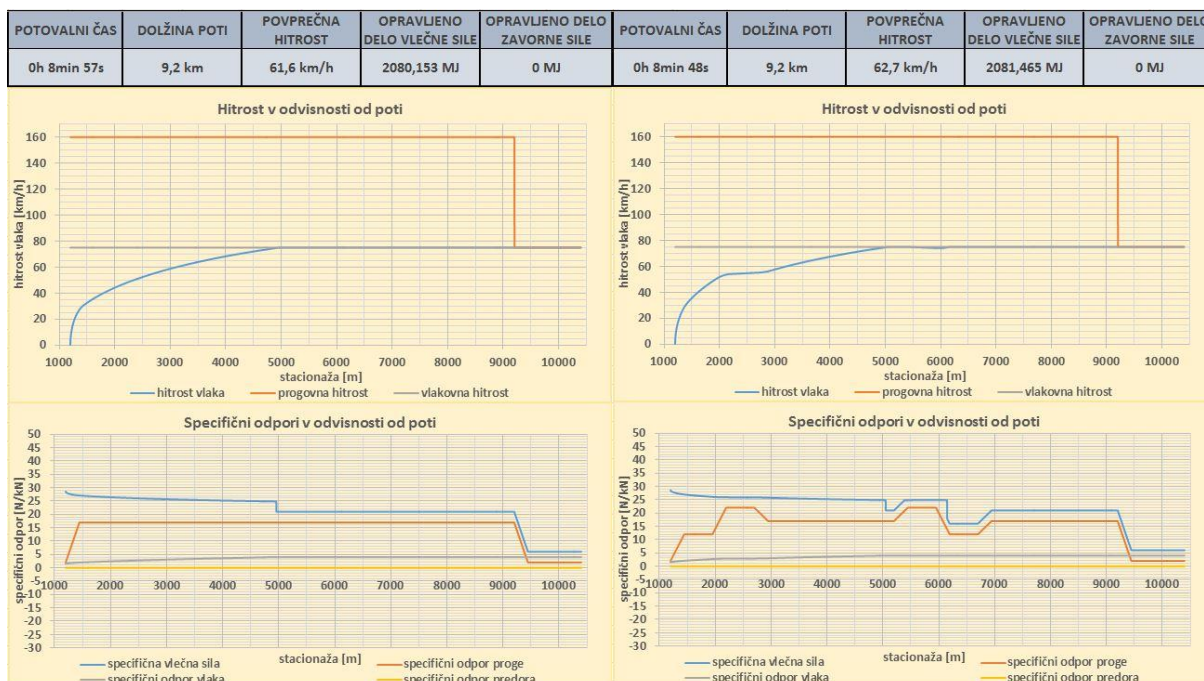


Rezultati za tovorni vlak L1.T800 (z lokomotivo 363) v primeru brez zaustavitve pri varianti 2.



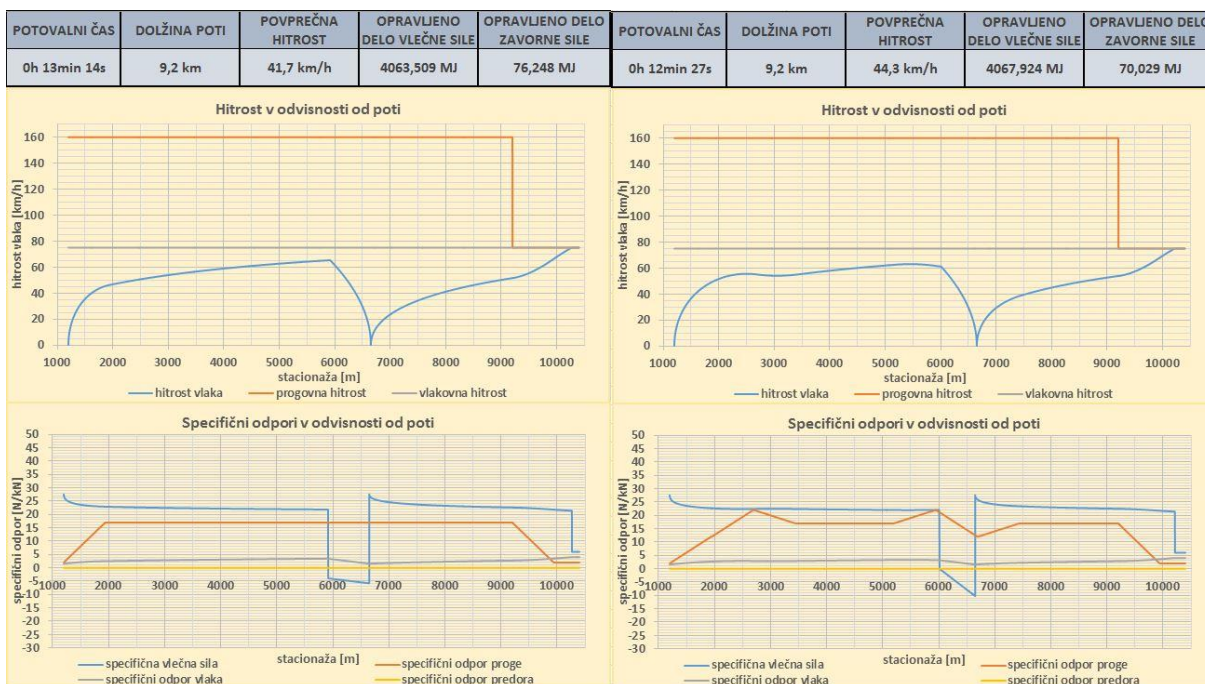
Vlak L1.T1000; zaustavitev; varianta 1

Vlak L1.T1000; zaustavitev; varianta 2



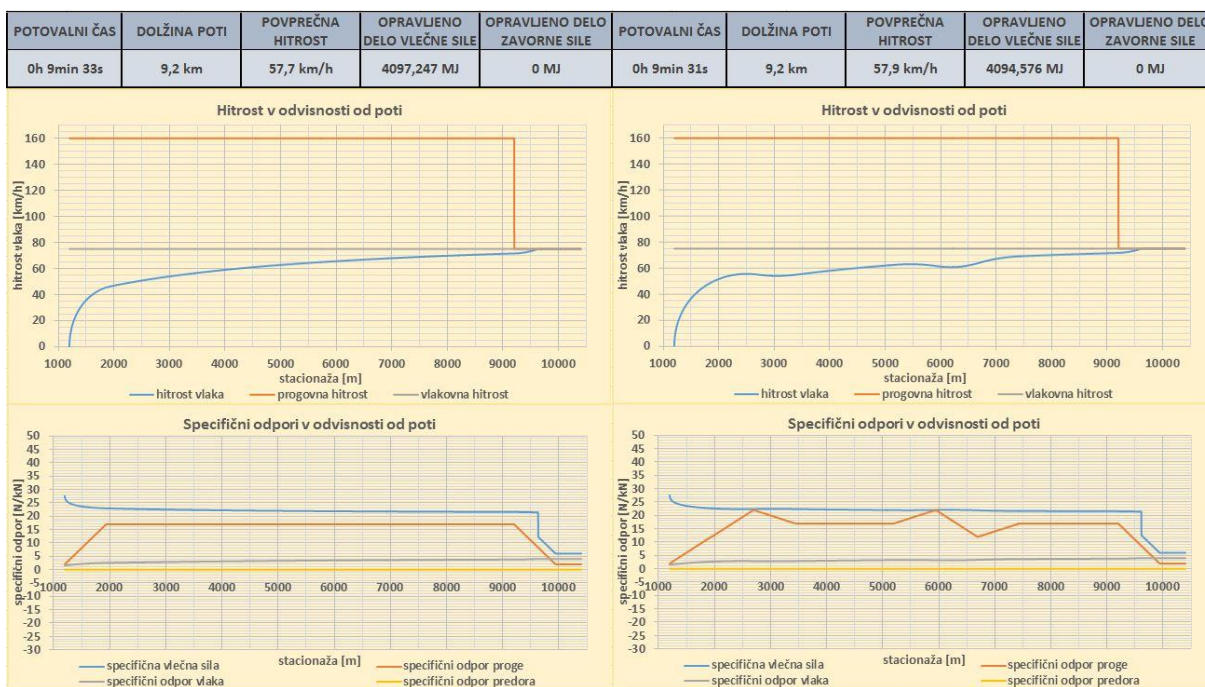
Vlak L1.T1000; brez zaustavitve; varianta 1

Vlak L1.T1000; brez zaustavitve; varianta 2



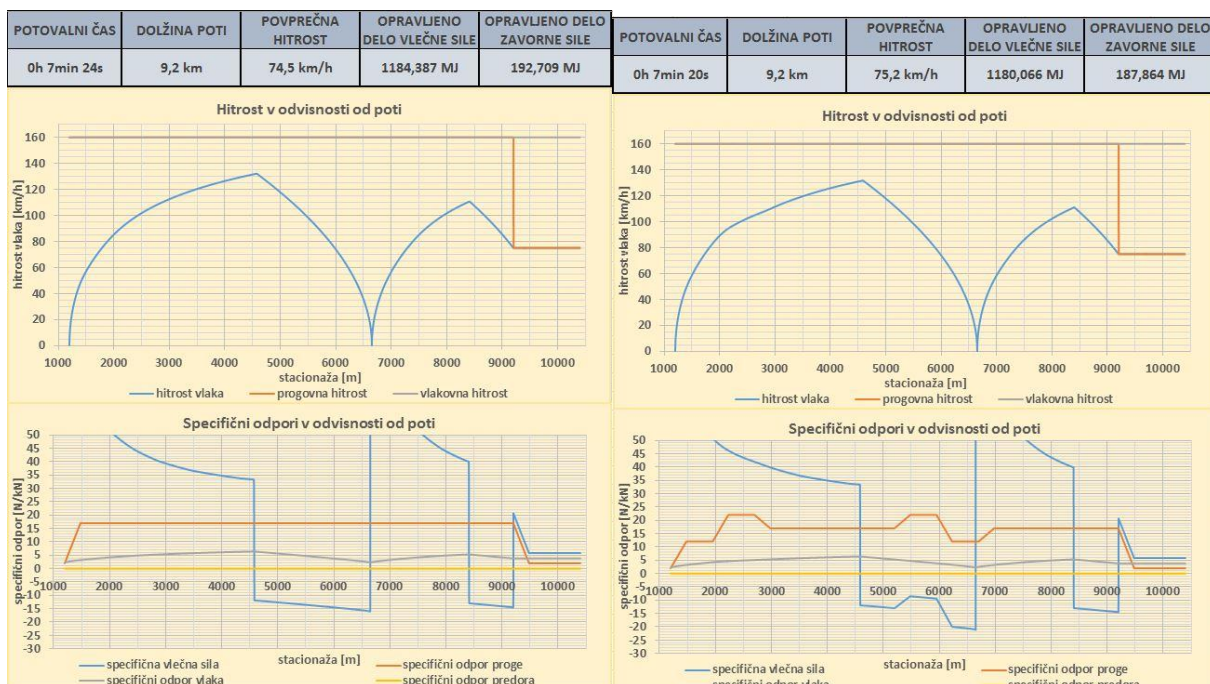
Vlak L2.T2000; zaustavitev; varianta 1

Vlak L2.T2000; zaustavitev; varianta 2



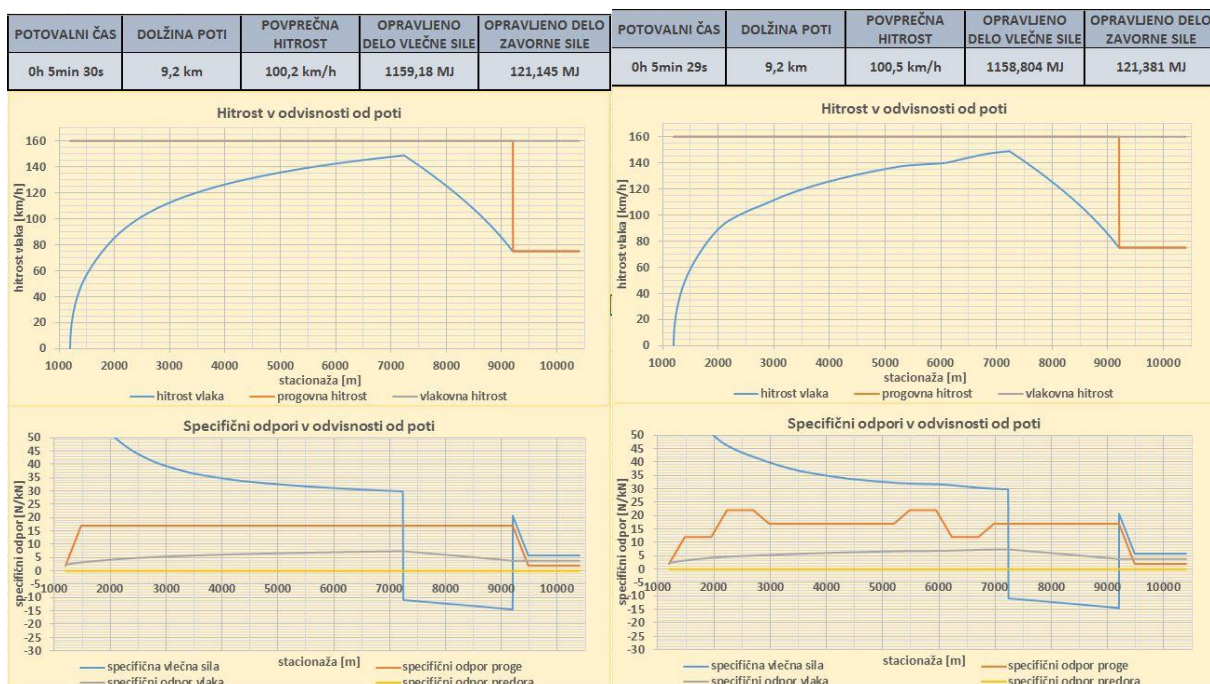
Vlak L2.T2000; brez zaustavitve; varianta 1

Vlak L2.T2000; brez zaustavitve; varianta 2



Vlak L1.P410; zaustavitev; varianta 1

Vlak L1.P410; zaustavitev; varianta 2



Vlak L1.P410; brez zaustavitve; varianta 1

Vlak L1.P410; brez zaustavitve; varianta 2

PRILOGA G: OSTALI PODATKI IN REZULTATI IZRAČUNA IZ DRUGEGA PRIMERA (PROGA KOPER – DIVAČA)

Seznam nagibov na obstoječem odseku proge Koper–Prešnica, izpis iz programa

STACIONAŽA ZAČETKA ODSEKA	DOLŽINA ODSEKA	NAGIB PROGE	MAX ADHEZIJA	...nadaljevanje			
[m]	[m]	[‰]	[/]				
0*	826,34	-0,876	0,36	14416,84	309,95	2,61	0,36
826,34	185	0	0,36	14726,79	373,65	8,86	0,36
1011,34	115,5	1,99	0,36	15100,44	654,4	21,28	0,36
1126,84	300	7,23	0,36	15754,84	442,2	23,39	0,36
1426,84	215	17,72	0,36	16197,04	668,1	25,48	0,36
1641,84	285	0	0,36	16865,14	511,75	24,05	0,36
1926,84	400	5,73	0,36	17376,89	598,85	23,57	0,36
2326,84	400	2,88	0,36	17975,74	340	23,58	0,36
2726,84	400	6,8	0,36	18315,74	586,6	23,34	0,36
3126,84	280	19,34	0,36	18902,34	360,4	24,39	0,36
3406,84	320	3,6	0,36	19262,74	261,55	22,85	0,36
3726,84	630	8,16	0,36	19524,29	817,8	24,03	0,36
4356,84	630	8,5	0,36	20342,09	951,95	23,97	0,36
4986,84	620	6,1	0,36	21294,04	440,3	25,26	0,36
5606,84	470	11,7	0,36	21734,34	775,2	23,38	0,36
6076,84	230	7	0,36	22509,54	387,25	22,62	0,36
6306,84	483	17,4	0,36	22896,79	838,3	0	0,36
6789,84	357	7,75	0,36	23735,09	695,4	24,24	0,36
7146,84	1012	2,5	0,36	24430,49	950,3	25,64	0,36
8158,84	371	9,38	0,36	25380,79	197,25	11,25	0,36
8529,84	464	19,11	0,36	25578,04	578,1	24,88	0,36
8993,84	2151,7	23,39	0,36	26156,14	660,45	2,5	0,36
11145,54	330,8	22,61	0,36	26816,59	1062,25	23,67	0,36
11476,34	642,7	23,9	0,36	27878,84	470,65	24,64	0,36
12119,04	615	23,5	0,36	28349,49	578,1	22,65	0,36
12734,04	301	25,75	0,36	28927,59	96,95	3,48	0,36
13035,04	870,25	24,95	0,36	29024,54	116,6	8,01	0,36
13905,29	511,55	23,57	0,36	29141,14			

se nadaljuje...

*Začetna stacionaža 0 je na tovorni postaji v Kopru (na dejanski stacionaži po uradnem načrtu KM 29+052,81)

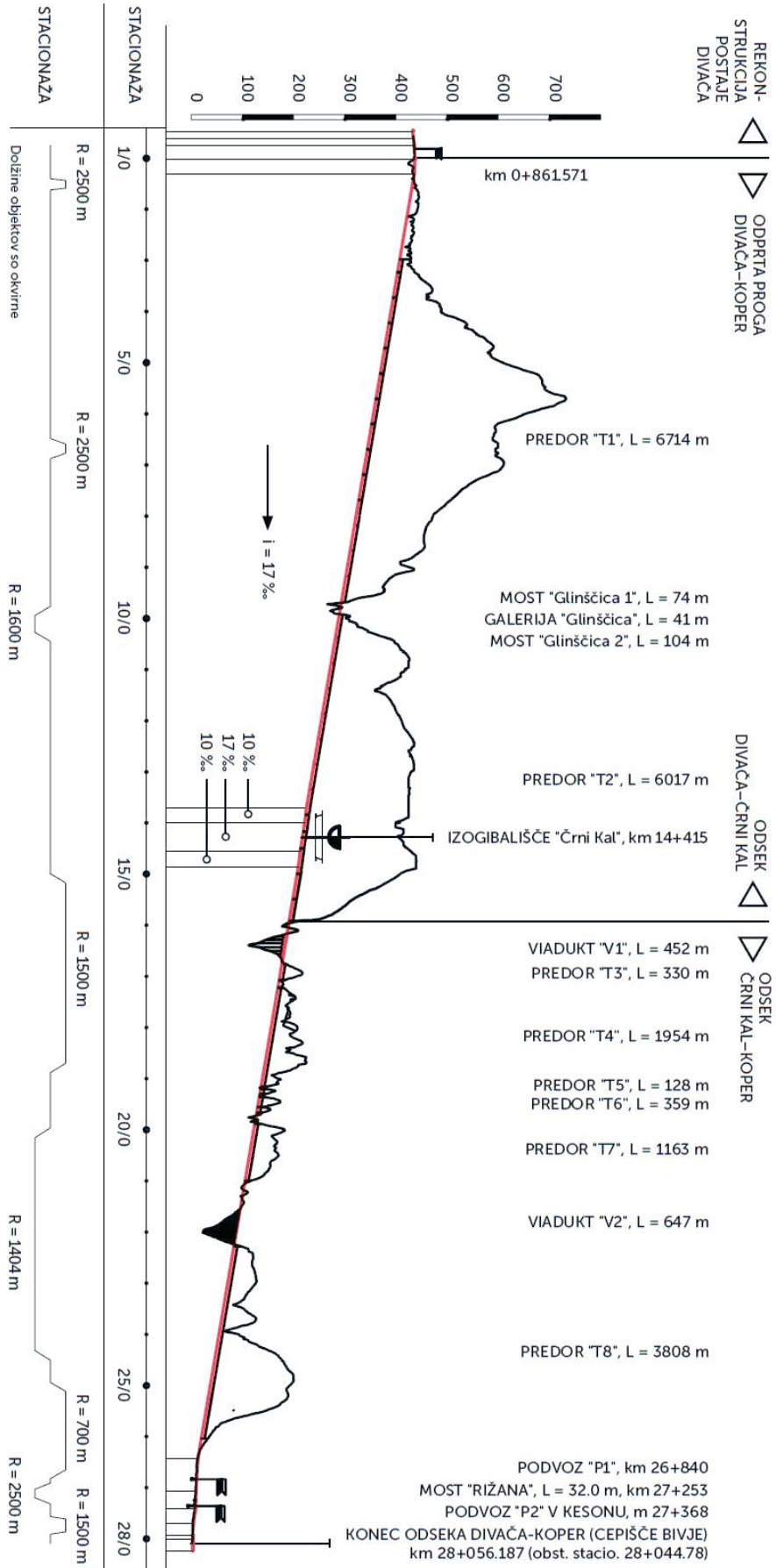
Seznam krivin na odseku Prešnica – Koper (poenostavitev krivin – brez prehodnic)

STACIONA ŽA ZAČETKA	DOLŽINA ODSEKA	POLMER KRIVINE	...nadaljevanje			...nadaljevanje		
[m]	[m]	[m]						
0	1190,81	0	11144,76	426,2	300	18924,56	345,05	500
1190,81	192	800	11570,96	266,35	300	19269,61	238,05	300
1382,81	376,45	0	11837,31	45,4	0	19507,66	40,35	0
1759,26	334,5	600	11882,71	181	500	19548,01	423,55	400
2093,76	917,65	0	12063,71	19,35	0	19971,56	340,1	395
3011,41	287,4	6000	12083,06	254	300	20311,66	27,45	0
3298,81	428,65	0	12337,06	16,55	0	20339,11	490	300
3727,46	309,3	300	12353,61	315	300	20829,11	32,95	0
4036,76	204,45	0	12668,61	270,4	0	20862,06	422,4	400
4241,21	186,6	400	12939,01	392,5	1441	21284,46	51,9	0
4427,81	84,6	0	13331,51	182,5	0	21336,36	180,9	400
4512,41	318,25	300	13514,01	85	6614	21517,26	21,4	0
4830,66	389,25	300	13599,01	100	5263	21538,66	145,75	1750
5219,91	451,55	0	13699,01	95	6954	21684,41	132,5	0
5671,46	148,55	600	13794,01	75,55	0	21816,91	159,05	700
5820,01	262,1	0	13869,56	365,9	300	21975,96	32,35	0
6082,11	333,65	300	14235,46	26,35	0	22008,31	296,1	301
6415,76	31,35	0	14261,81	334,2	300	22304,41	116,1	1650
6447,11	465,4	300	14596,01	134,05	0	22420,51	263,15	250
6912,51	256,3	770	14730,06	291,5	700	22683,66	78,35	0
7168,81	285	750	15021,56	69,45	0	22762,01	710	250
7453,81	35,3	0	15091,01	980,5	250	23472,01	23,59	248
7489,11	512,2	300	16071,51	147,45	0	23495,6	446	0
8001,31	26,7	0	16218,96	130	2000	23941,6	429,55	400
8028,01	332,7	300	16348,96	71,2	0	24371,15	449,7	0
8360,71	205,8	0	16420,16	150,2	500	24820,85	281,31	3000
8566,51	163	450	16570,36	223,3	0	25102,16	367,2	0
8729,51	109,2	600	16793,66	60	6000	25469,36	780,81	600
8838,71	160,3	0	16853,66	38,95	0	26250,17	83,7	0
8999,01	292,8	500	16892,61	167,15	400	26333,87	908,91	350
9291,81	28,7	0	17059,76	28,7	0	27242,78	115,69	0
9320,51	221,6	300	17088,46	208,5	300	27358,47	327,2	400
9542,11	320,4	300	17296,96	121,8	0	27685,67	10,63	0
9862,51	14,2	0	17418,76	487,35	370	27696,3	186,96	350
9876,71	339,35	300	17906,11	41	0	27883,26	208,84	0
10216,06	88,75	0	17947,11	290,6	300	28092,1	269,39	800
10304,81	361,1	300	18237,71	97,2	0	28361,49	165,99	0
10665,91	55,95	0	18334,91	195,4	300	28527,48	354,37	300
10721,86	361	300	18530,31	241,05	300	28881,85	30,48	0
11082,86	61,9	0	18771,36	153,2	0	28912,33	138,8	743
						29051,13	90,01	750
						29141,14		

se nadaljuje...

se nadaljuje...

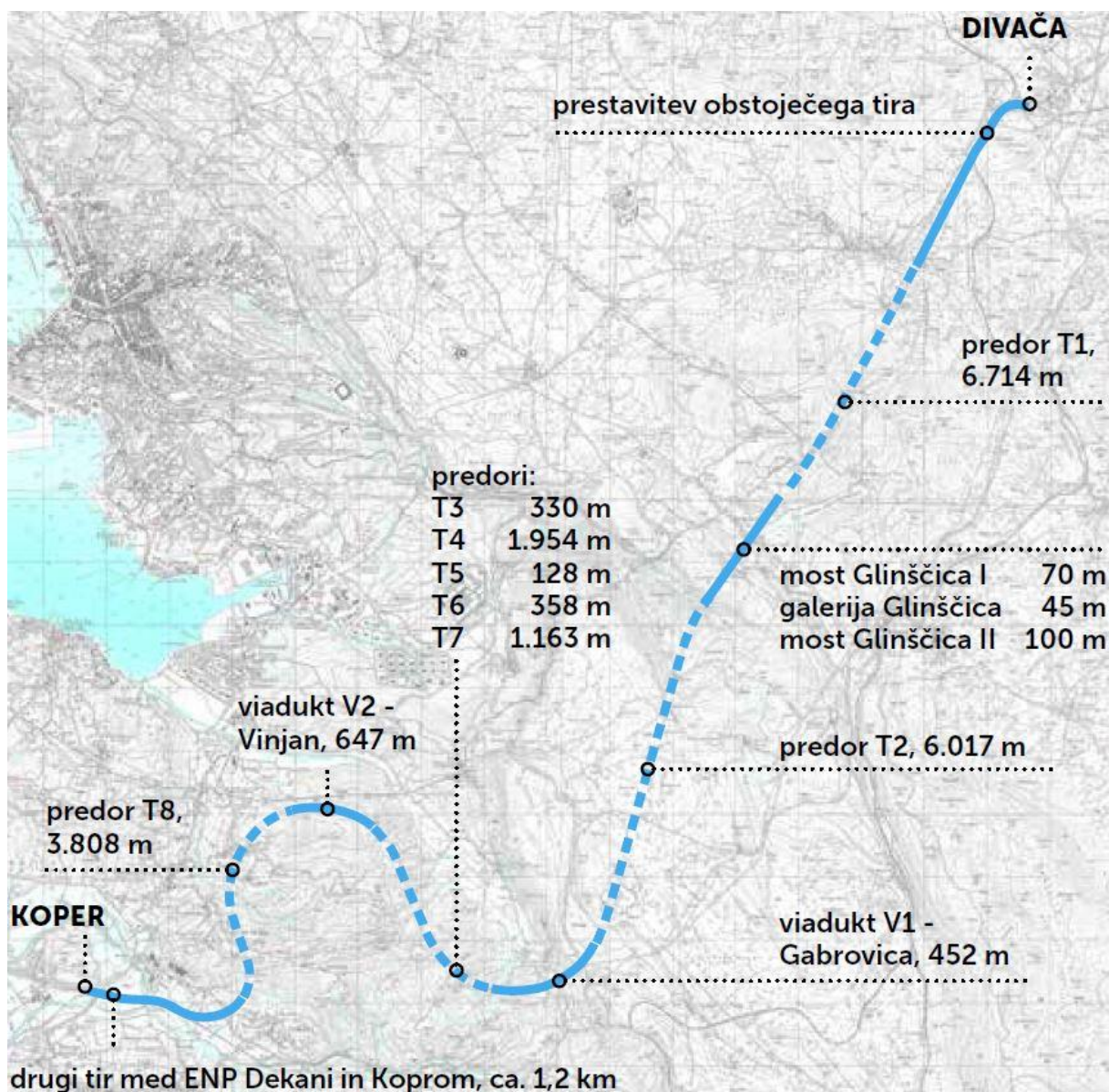
PREGLEDNI VZDOLŽNI PROFIL DRUGEGA TIRA ŽELEZNIŠKE PROGE DIVAČA-KOPER



Vzdolžni profil načrtovanega drugega tira Divača-Koper

VIR: Bučič, T. (ur.), Žličar, B. (ur.) 2015. Drugi tir železniške proge Divača - Koper. Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za infrastrukturo: str. 47

http://www.družitir.si/resources/files/pdf/DRUGI_TIR_brosura_SLO_web.pdf (Pridobljeno 1.9.2015)



Glavni elementi in karakteristike proge drugega tira železniške proge Divača–Koper.

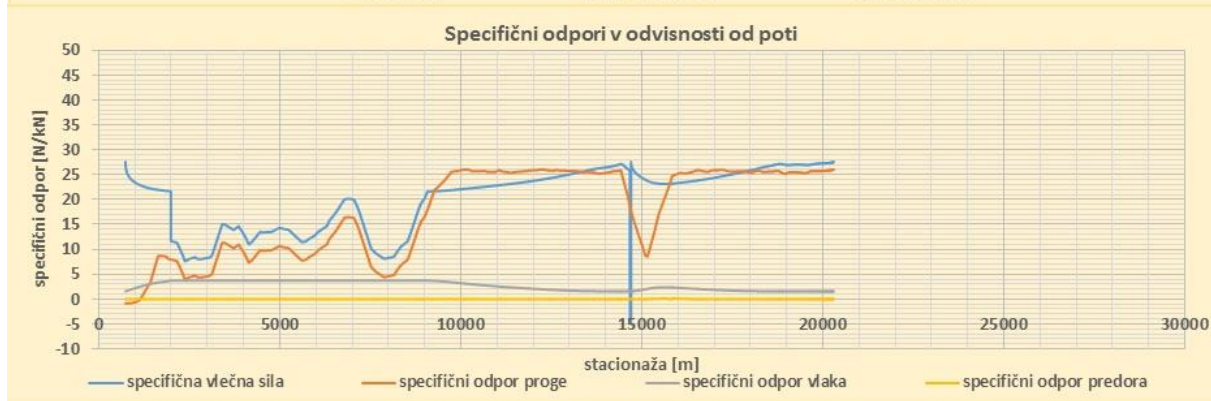
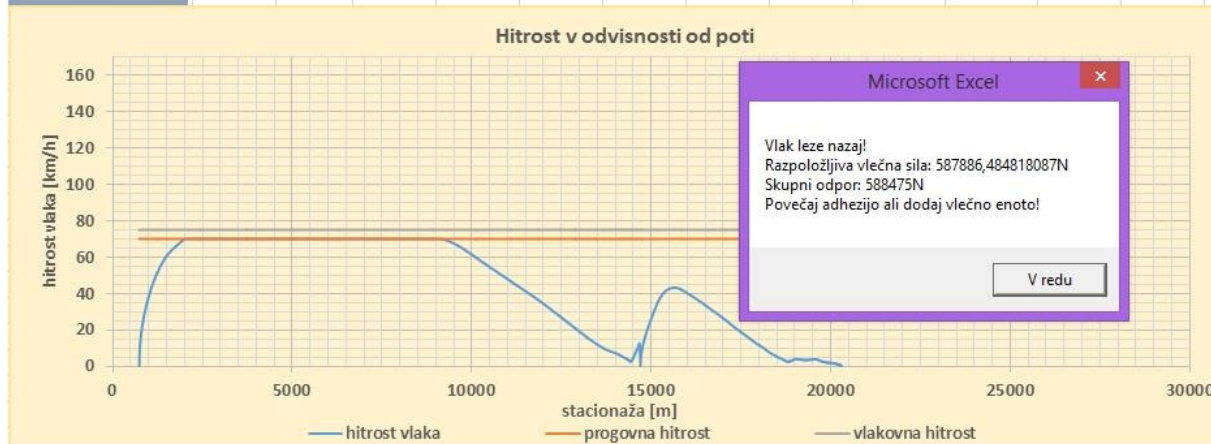
VIR: Bučič, T. (ur.), Žličar, B. (ur.) 2015. Drugi tir železniške proge Divača - Koper. Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za infrastrukturo: str. 46.

http://www.drugitir.si/resources/files/pdf/DRUGI_TIR_brosura_SLO_web.pdf (Pridobljeno 1.9.2015).

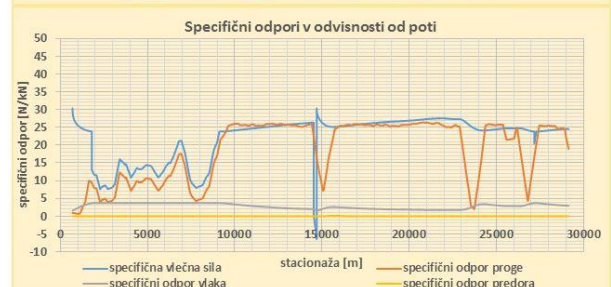
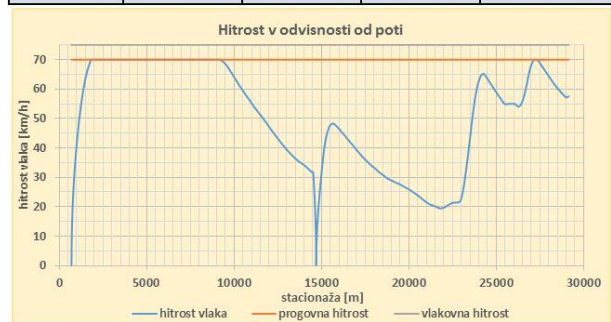
Obstoječi tir Koper – Divača, izračun

zgoraj: Vlak L2.T2000, spodaj levo: L2.T1800, spodaj desno L2.1600

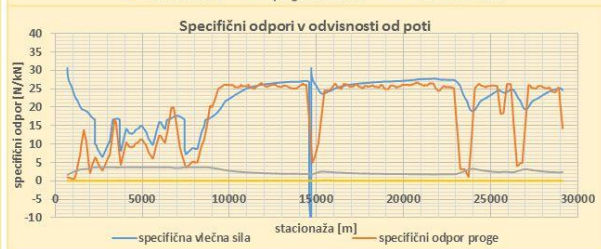
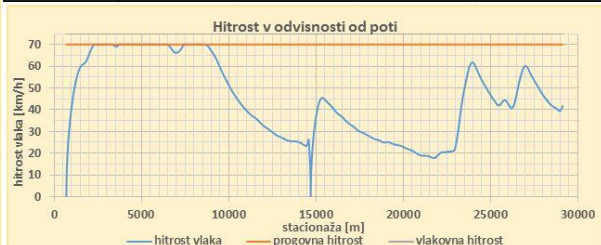
Izračunaj potovalne čase	POTOVALNI ČAS	DOLŽINA POTI	POVPREČNA HITROST	OPRAVLJENO DELO VLEČNE SILE	OPRAVLJENO DELO ZAVORNE SILE
	0h 8min 44s	9,26 km	63,5 km/h	2989,311 MJ	0 MJ



POTOVALNI ČAS	DOLŽINA POTI	POVPREČNA HITROST	OPRAVLJENO DELO VLEČNE SILE	OPRAVLJENO DELO ZAVORNE SILE
0h 40min 17s	28,441 km	42,4 km/h	12180,374 MJ	10,142 MJ

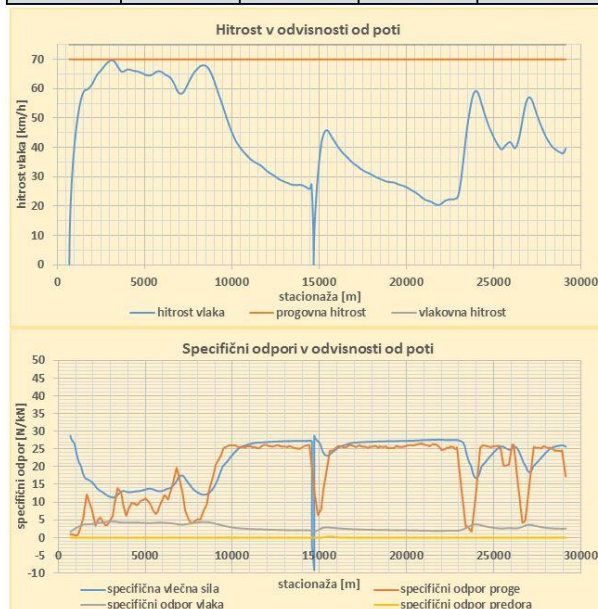


POTOVALNI ČAS	DOLŽINA POTI	POVPREČNA HITROST	OPRAVLJENO DELO VLEČNE SILE	OPRAVLJENO DELO ZAVORNE SILE
0h 45min 58s	28,44 km	37,1 km/h	10958,822 MJ	20,59 MJ

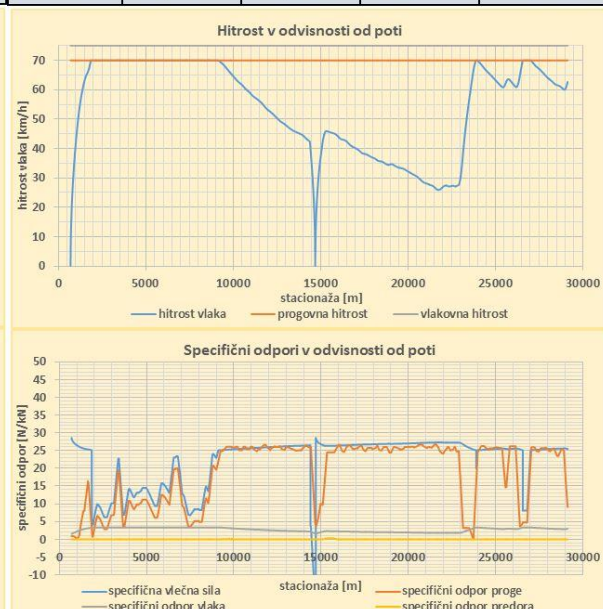


Obstoječi tir Koper – Divača, izračun

POTOVALNI ČAS	DOLŽINA POTI	POVPREČNA HITROST	OPRAVLJENO DELO VLEČNE SILE	OPRAVLJENO DELO ZAVORNE SILE	POTOVALNI ČAS	DOLŽINA POTI	POVPREČNA HITROST	OPRAVLJENO DELO VLEČNE SILE	OPRAVLJENO DELO ZAVORNE SILE
0h 45min 18s	28,441 km	37,7 km/h	5623,657 MJ	6,854 MJ	0h 35min 46s	28,441 km	47,7 km/h	6758,668 MJ	26,342 MJ

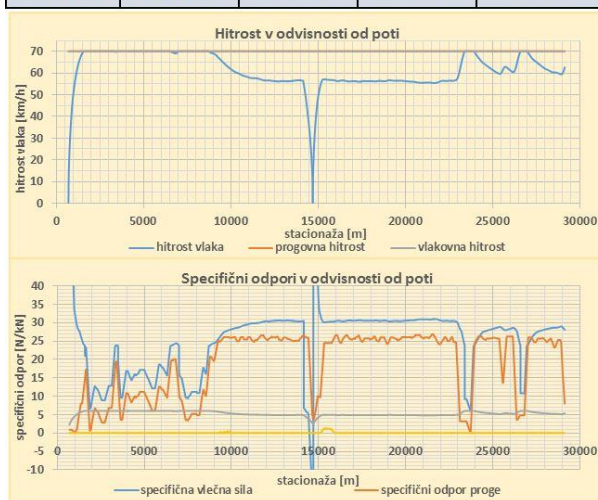


L1.T800



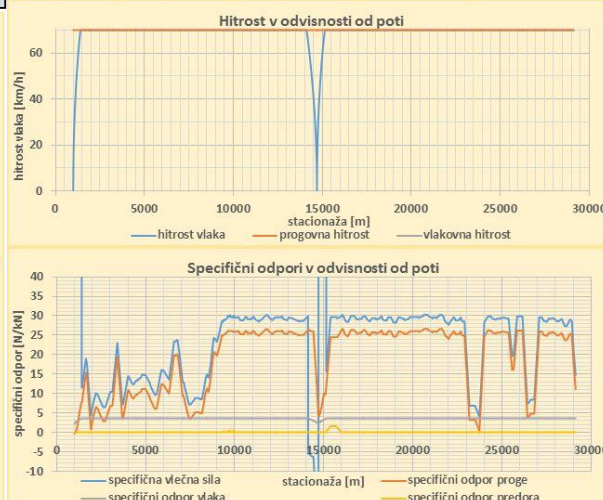
L1.T1000

POTOVALNI ČAS	DOLŽINA POTI	POVPREČNA HITROST	OPRAVLJENO DELO VLEČNE SILE	OPRAVLJENO DELO ZAVORNE SILE
0h 28min 59s	28,44 km	58,9 km/h	2842,781 MJ	9,63 MJ



L2.T1600

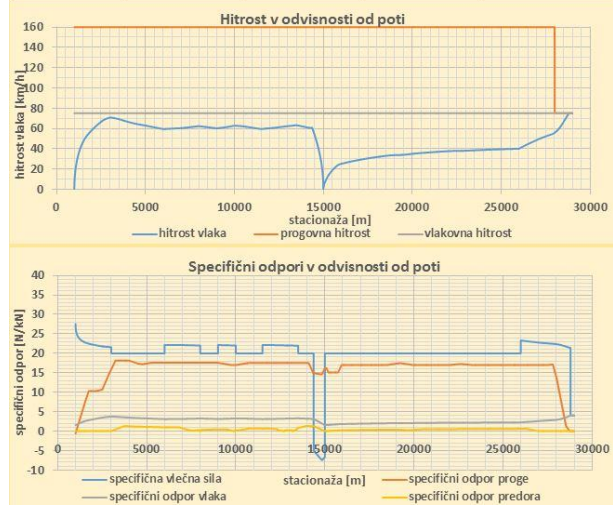
POTOVALNI ČAS	DOLŽINA POTI	POVPREČNA HITROST	OPRAVLJENO DELO VLEČNE SILE	OPRAVLJENO DELO ZAVORNE SILE
0h 25min 15s	28,141 km	66,8 km/h	3249,098 MJ	32,358 MJ



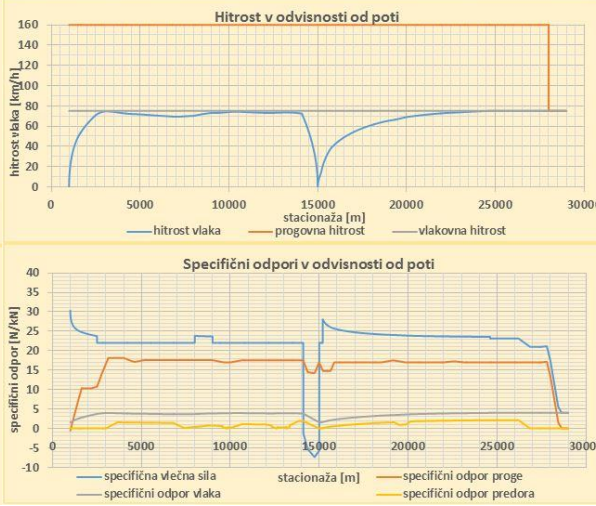
L1.P410

Načrtovan drugi tir Koper – Divača, izračun

POTOVALNI ČAS	DOLŽINA POTI	POVPREČNA HITROST	OPRAVLJENO DELO VLEČNE SILE	OPRAVLJENO DELO ZAVORNE SILE	POTOVALNI ČAS	DOLŽINA POTI	POVPREČNA HITROST	OPRAVLJENO DELO VLEČNE SILE	OPRAVLJENO DELO ZAVORNE SILE
0h 40min 21s	28 km	41,6 km/h	12087,481 MJ	86,909 MJ	0h 28min 0s	28 km	60 km/h	11802,756 MJ	96,32 MJ

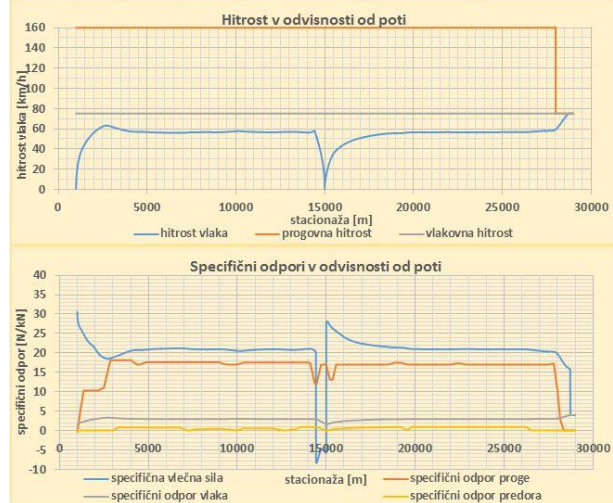


L2.T2000

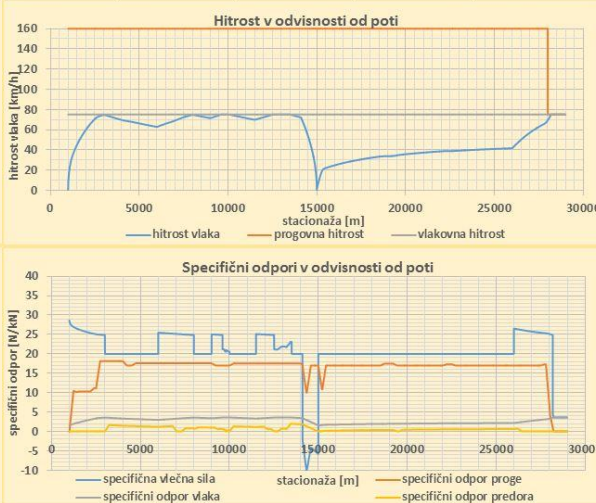


L2.T1800

POTOVALNI ČAS	DOLŽINA POTI	POVPREČNA HITROST	OPRAVLJENO DELO VLEČNE SILE	OPRAVLJENO DELO ZAVORNE SILE	POTOVALNI ČAS	DOLŽINA POTI	POVPREČNA HITROST	OPRAVLJENO DELO VLEČNE SILE	OPRAVLJENO DELO ZAVORNE SILE
0h 32min 16s	28 km	52 km/h	10165,366 MJ	60,896 MJ	0h 37min 54s	28 km	44,3 km/h	6116,424 MJ	56,095 MJ



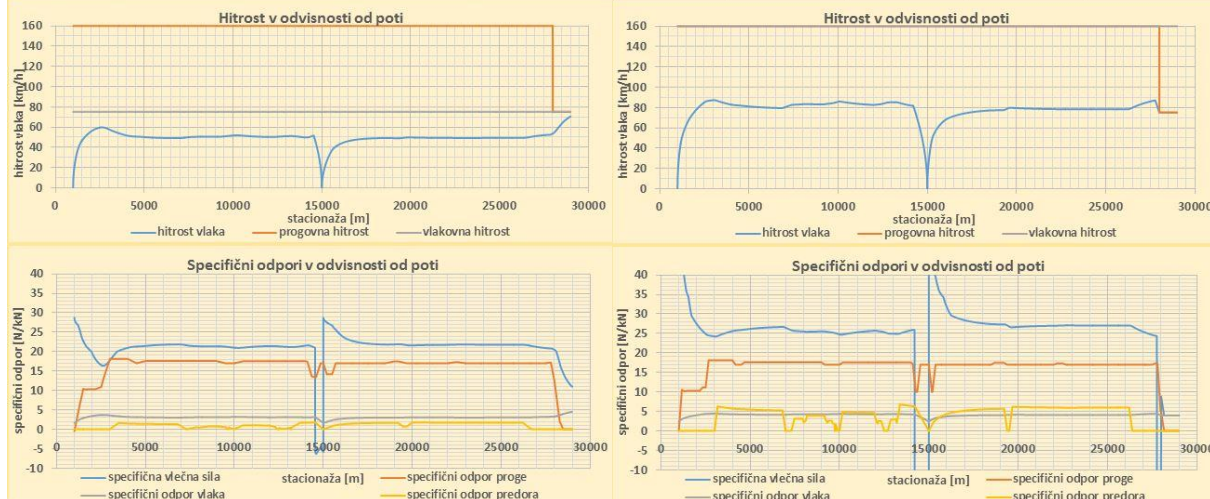
L2.T1600



L1.T1000

Načrtovan drugi tir Koper – Divača, izračun

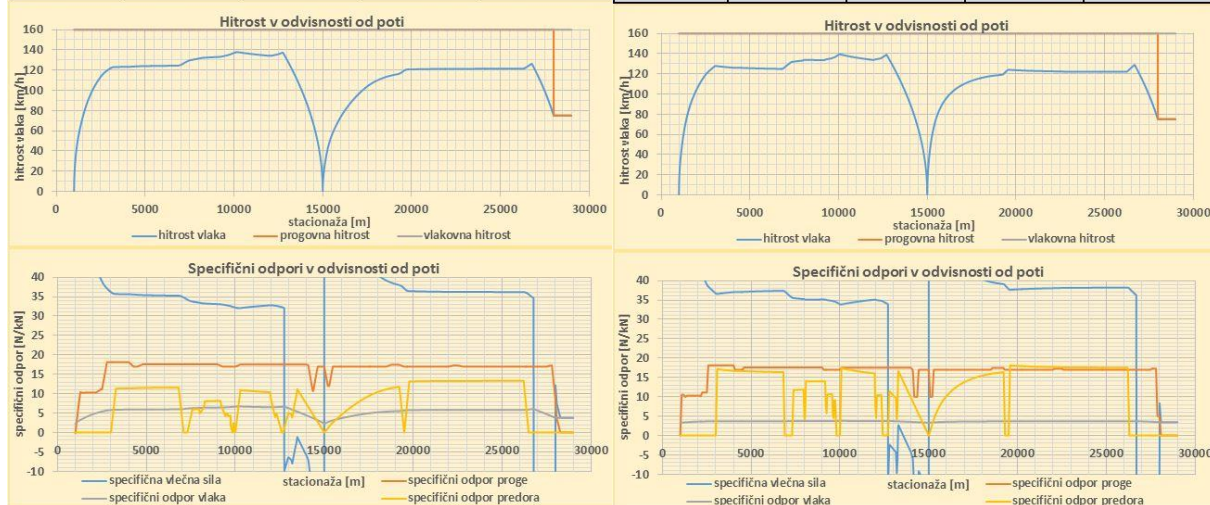
POTOVALNI ČAS	DOLŽINA POTI	POVPREČNA HITROST	OPRAVLJENO DELO VLEČNE SILE	OPRAVLJENO DELO ZAVORNE SILE	POTOVALNI ČAS	DOLŽINA POTI	POVPREČNA HITROST	OPRAVLJENO DELO VLEČNE SILE	OPRAVLJENO DELO ZAVORNE SILE
0h 35min 30s	28 km	47,3 km/h	5290,214 MJ	22,457 MJ	0h 22min 37s	28 km	74,3 km/h	2290,782 MJ	49,852 MJ



L1.T800

L1.P330

POTOVALNI ČAS	DOLŽINA POTI	POVPREČNA HITROST	OPRAVLJENO DELO VLEČNE SILE	OPRAVLJENO DELO ZAVORNE SILE	POTOVALNI ČAS	DOLŽINA POTI	POVPREČNA HITROST	OPRAVLJENO DELO VLEČNE SILE	OPRAVLJENO DELO ZAVORNE SILE
0h 16min 51s	28 km	99,6 km/h	4293,401 MJ	177,852 MJ	0h 16min 1s	28 km	104,8 km/h	1389,608 MJ	53,439 MJ



L1.P410

ICS