

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 ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA  
PROMETNA SMER**

Kandidatka:

**TADEJA LAVRIČ**

**KAPACITETA PROGE**

Diplomska naloga št.: **3234/PS**

**RAILWAY CAPACITY**

Graduation thesis No.: **3234/PS**

**Mentor:**  
prof. dr. Bogdan Zgonc

**Somentorica:**  
asist. Darja Šemrov

**Predsednik komisije:**  
izr. prof. dr. Janko Logar

Ljubljana, 3. 7. 2012

## **POPRAVKI**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

**IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisana **TADEJA LAVRIČ** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:  
**»KAPACITETA PROGE«**.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 5.6.2012

---

(podpis kandidatke)

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

|                         |   |
|-------------------------|---|
| <b>UDK:</b>             | <b>656.21 (043.2)</b>   |
| <b>Avtor:</b>           | <b>Tadeja Lavrič</b>  |
| <b>Mentor:</b>          | <b>prof. dr. Bogdan Zgonc, univ. dipl. inž. grad.</b>   |
| <b>Somentorica:</b>     | <b>asist. Darja Šemrov, univ. dipl. inž. grad.</b>  |
| <b>Naslov:</b>          | <b>Kapaciteta proge</b>   |
| <b>Obseg in oprema:</b> | <b>95 str., 8 pregl., 70 sl., 19 en., 5 pril.</b>   |
| <b>Ključne besede:</b>  | <b>kapaciteta, izkoriščenost kapacitete, pogostost vlakov, povprečna hitrost, stabilnost voznega reda, heterogenost obratovanja, zgoščanje voznega reda, neizkoriščena kapaciteta</b> |

### **Izvleček**

V prvem delu diplomske naloge sta opredeljena pojma kapaciteta in izkoriščenost kapacitete železniške proge. V preteklih letih so strokovnjaki uporabljali različne definicije kapacitete. V diplomski nalogi so podane nekatere definicije kapacitete in njene izkoriščenosti vključno z definicijo v kodeksu UIC 406 (2004), ki jo je določila Mednarodna železniška zveza, da bi poenotila opredelitev kapacitete. Kapaciteta in njena izkoriščenost sta neposredno odvisni od štirih parametrov, ki temeljijo na razpoložljivi infrastrukturi, dejanskem voznem redu in voznem parku. Ti štirje parametri so pogostost vlakov, povprečna hitrost, stabilnost voznega reda in heterogenost obratovanja. V nadaljevanju so opisane nekatere analitične, mikro-simulacijske, statistične in optimizacijske metode, s katerimi vrednotimo kapaciteto in njeno izkoriščenost ter posledično zanesljivost železniških storitev. Natančneje je opisan postopek določanja izkoriščenosti kapacitete po metodi UIC 406, ki temelji na zgoščanju vlakovnih poti v voznem redu v okviru predhodno določenega časovnega intervala za vsak progovni odsek posebej. Opisana so pravila zgoščanja vlakovnih poti, način razdelitve mreže železniškega omrežja na progovne odseke, določitev obravnavanega časovnega intervala, izračun izkoriščenosti kapacitete, priporočene vrednosti izkoriščenosti kapacitete in način uporabe neizkoriščene kapacitete. Obravnavane so tudi nekatere pomanjkljivosti metode UIC 406.

Pri praktičnem delu sem s programsko opremo OpenTrack simulirala obratovanje vlakov na progi Ljubljana - Jesenice. Na osnovi izhodnih podatkov sem vrednotila izkoriščenost kapacitete progovnega odseka Kranj - Jesenice. Prikazala sem spreminjanje vrednosti izkoriščenosti kapacitete v odvisnosti od dolžine obravnavanih odsekov, števila tirov ter heterogenosti obratovanja in hitrosti vlakov.

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

|                         |  |
|-------------------------|--|
| <b>UDC:</b>             | <b>656.21 (043.2)</b>  |
| <b>Author:</b>          | <b>Tadeja Lavrič</b>   |
| <b>Supervisor:</b>      | <b>Prof. Bogdan Zgonc, Ph. D.</b>  |
| <b>Co-supervisor:</b>   | <b>Assist. Darja Šemrov, B. Sc.</b>  |
| <b>Title:</b>           | <b>Railway capacity</b>  |
| <b>Scope and tools:</b> | <b>95 p., 8 tab., 70 fig., 19 eq., 5 ann.</b>  |
| <b>Keywords:</b>        | <b>capacity, capacity consumption, number of trains, average speed, timetable stability, heterogeneity, timetable compression, unused capacity</b> |

**Abstract**

In the first part of the thesis, the concepts of railway capacity and capacity consumption are defined. Experts have in the past defined railway capacity in many different ways. This thesis outlines some definitions of railway capacity and capacity consumption, including the definition of railway capacity in accordance with the UIC code 406 (2004), given by the International Union of Railways in order to standardize the definition of railway capacity. Capacity and capacity consumption are directly dependent on four parameters based on the available infrastructure, actual timetable and rolling stock. These four parameters are the number of trains, average speed, timetable stability and heterogeneity. The second part of the thesis describes some analytical, micro-simulation, statistical and optimization methods for the evaluation of capacity, capacity consumption and consequently the reliability of railway services. The process of determining capacity consumption using the UIC 406 capacity method, which is based on the timetable compression within a predefined time window for each single line section, is described more precisely. Rules for timetable compression, dividing the line network into line sections, calculation of capacity consumption, recommended values of capacity consumption and the possibility of using unused capacity to operate more trains are described. Some paradoxes of the UIC 406 capacity method are also discussed.

In the practical part of the thesis, train operation on the railway line Ljubljana - Jesenice is simulated using the computer software OpenTrack. Based on the output data, I evaluated capacity consumption of the line section Kranj - Jesenice. I showed how the level of capacity consumption differs depending on the length of the line sections, number of tracks and heterogeneity of operation and speed.

## **ZAHVALA**

Za vso podporo in pomoč pri študiju se iskreno zahvaljujem svoji mami Petri.

Za številne strokovne razlage in nasvete se zahvaljujem mentorju prof. dr. Bogdanu Zgoncu. Zahvaljujem se somentorici asist. Darji Šemrov za vso pomoč in koristne napotke pri izdelavi diplomske naloge. Zahvala gre tudi Juretu Velkavrhu za tehnično pomoč in nasvete.

Za spodbudo in razumevanje se zahvaljujem svojemu fantu Luku.

Zahvaljujem se prof. Katarini Vuga za lektoriranje diplomske naloge.

Na koncu bi se rada zahvalila še vsem sošolkam in sošolcem, s katerimi smo med študijem sodelovali in si pomagali.

**KAZALO VSEBINE**

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>UVOD.....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Namen in cilji.....   | 3         |
| <b>2</b> | <b>OSNOVNI POJMI .....</b>  | <b>4</b>  |
| 2.1      | Čas zasedenosti prostorskega odseka .....   | 4         |
| 2.2      | Tamponski čas (ang. <i>buffer time</i> ) .....  | 5         |
| 2.3      | Prostorski razmik (ang. <i>headway distance</i> ) .....                                       | 5         |
| 2.4      | Časovni interval med zaporednimi vožnjami vlakov (ang. <i>headway time</i> ).....             | 5         |
| 2.5      | Kritični prostorski odsek .....   | 5         |
| 2.6      | Dodatek časa za križanje vlakov na enotirnih progah (ang. <i>crossing buffer time</i> ) ..... | 6         |
| 2.7      | Izkoriščenost kapacitete (ang. <i>capacity consumption</i> ) .....                            | 6         |
| 2.8      | Neizkoriščena kapaciteta (ang. <i>unused capacity</i> ).....                                  | 7         |
| 2.9      | Primarna zamuda.....  | 7         |
| 2.10     | Sekundarna zamuda .....   | 7         |
| <b>3</b> | <b>OPREDELITEV POJMA KAPACITETA .....</b>   | <b>8</b>  |
| 3.1      | Teoretična in praktična kapaciteta.....   | 11        |
| <b>4</b> | <b>OPREDELITEV POJMA IZKORIŠČENOST KAPACITETE .....</b>                                       | <b>13</b> |
| <b>5</b> | <b>PARAMETRI, KI VPLIVAJO NA KAPACITETO IN NJENO IZKORIŠČENOST .....</b>                      | <b>16</b> |
| 5.1      | Razpoložljiva infrastruktura.....   | 19        |
| 5.2      | Pogostost vlakov .....  | 21        |
| 5.3      | Stabilnost voznega reda .....   | 22        |
| 5.4      | Povprečna hitrost vlakov .....  | 23        |
| 5.5      | Heterogenost obratovanja .....  | 24        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>6</b> | <b>VREDNOTENJE KAPACITETE IN ZANESLJIVOSTI ŽELEZNIŠKIH STORITEV.....</b>          | <b>28</b> |
| 6.1      | Analitične metode.....  | 30        |
| 6.2      | Mikro-simulacijske metode.....  | 34        |
| 6.3      | Statistične metode.....   | 37        |
| 6.4      | Optimizacijske metode.....  | 38        |
| <b>7</b> | <b>DOLOČANJE IZKORIŠČENOSTI KAPACITETE PO METODI UIC 406.....</b>                 | <b>40</b> |
| 7.1      | Postopek izračuna izkoriščenosti kapacitete.....                                  | 40        |
| 7.1.1    | Analiza infrastrukture.....   | 41        |
| 7.1.2    | Analiza voznega reda.....   | 41        |
| 7.1.3    | Razdelitev železniške mreže na progovne odseke.....                               | 42        |
| 7.1.4    | Določitev primernega časovnega intervala.....                                     | 42        |
| 7.1.5    | Zgoščanje voznega reda.....   | 43        |
| 7.1.6    | Izračun izkoriščenosti kapacitete.....  | 45        |
| 7.1.6.1  | Priporočene vrednosti izkoriščenosti kapacitete.....                              | 47        |
| 7.1.6.2  | Infrastruktura, kjer je izkoriščena vsa kapaciteta.....                           | 48        |
| 7.1.6.3  | Infrastruktura z neizkoriščeno kapaciteto.....                                    | 48        |
| 7.1.7    | Prikaz izkoriščenosti kapacitete.....   | 49        |
| 7.2      | Praktična uporaba metode UIC 406.....   | 50        |
| 7.2.1    | Dolžina obravnavanih progovnih odsekov.....                                       | 50        |
| 7.2.2    | Možnost uporabe neizkoriščene kapacitete.....                                     | 53        |
| 7.3      | Pomanjkljivosti metode UIC 406.....   | 54        |
| 7.3.1    | Prehitevanje.....   | 54        |
| 7.3.2    | Dodatni vlaki.....  | 55        |
| <b>8</b> | <b>ANALIZA IZKORIŠČENOST KAPACITETE NA PROGI LJUBLJANA – JESENICE..</b>           | <b>57</b> |
| 8.1      | Način določanja izkoriščenosti kapacitete progovnega odseka Kranj - Jesenice..... | 58        |
| 8.2      | Karakteristike obravnavane proge.....   | 59        |
| 8.3      | Vhodni podatki za program OpenTrack.....  | 63        |



---

|                  |   |           |
|------------------|---|-----------|
| <b>8.4</b>       | <b>Simulacija.....</b>  | <b>67</b> |
| <b>8.5</b>       | <b>Analiza rezultatov .....</b>   | <b>68</b> |
| <b>8.5.1</b>     | <b>Vpliv dolžine odsekov na izkoriščenost kapacitete.....</b>                         | <b>69</b> |
| <b>8.5.1.1</b>   | <b>Primerjava daljšega in krajšega odseka.....</b>                                    | <b>70</b> |
| <b>8.5.1.2</b>   | <b>Ostali odseki.....</b>   | <b>74</b> |
| <b>8.5.1.3</b>   | <b>Interpretacija rezultatov.....</b>   | <b>77</b> |
| <b>8.5.2</b>     | <b>Vpliv homogenosti obratovanja in hitrosti na izkoriščenost kapacitete.....</b>     | <b>78</b> |
| <b>8.5.2.1</b>   | <b>Interpretacija rezultatov.....</b>   | <b>80</b> |
| <b>8.5.2.1.1</b> | <b>Homogenost obratovanja.....</b>  | <b>80</b> |
| <b>8.5.2.1.2</b> | <b>Hitrost vlakov .....</b>   | <b>81</b> |
| <b>8.5.3</b>     | <b>Vpliv dodatnega tira na izkoriščenost kapacitete.....</b>                          | <b>83</b> |
| <b>8.5.3.1</b>   | <b>Prvi tir .....</b>   | <b>83</b> |
| <b>8.5.3.2</b>   | <b>Drugi tir.....</b>   | <b>86</b> |
| <b>8.5.3.3</b>   | <b>Interpretacija rezultatov.....</b>   | <b>87</b> |
| <b>8.5.4</b>     | <b>Neupoštevanje mrežnega efekta pri zgoščanju vlakovnih poti v voznem redu .....</b> | <b>89</b> |
| <b>9</b>         | <b>ZAKLJUČEK.....</b>   | <b>90</b> |
| <b>VIRI.....</b> |   | <b>94</b> |

## KAZALO PREGLEDNIC

|   |    |
|---|----|
| Preglednica 1: Različni vidiki kapacitete (Vir: UIC, 2004) .....  | 10 |
| Preglednica 2: Kapaciteta proge glede na število tirov, hitrost in dodatno postajo (Vir: Mattsson, 2007)<br>.....                                       | 20 |
| Preglednica 3: Kapaciteta najdaljšega predora glede na zahtevano zanesljivost p (Vir: de Kort et al.,<br>2003) .....                                    | 31 |
| Preglednica 4: Odvisnost povprečne zamude in standardnega odklona zamude od števila vlakov in<br>netočnosti odhoda (Vir: Hallowel in Harker, 1998)..... | 35 |
| Preglednica 5: Določitev izkoriščenosti kapacitete (Vir: UIC, 2004).....  | 46 |
| Preglednica 6: Predlagane vrednosti izkoriščenosti kapacitete (Vir: UIC, 2004) .....  | 47 |
| Preglednica 7: Oznake vlakov.....   | 67 |
| Preglednica 8: Izkoriščenosti kapacitete odsekov .....  | 77 |

**KAZALO SLIK**

|   |    |
|---|----|
| Slika 1: Zasedenost prostorskega odseka (Vir: Zgonc, 2003).....   | 4  |
| Slika 2: Shematičen prikaz osnovnih pojmov (Vir: Landex, 2008).....   | 6  |
| Slika 3: Poimenovanje železniške kapacitete po Landex, 2008.....  | 9  |
| Slika 4: Določanje izkoriščenosti kapacitete celotne proge (Vir: Landex, 2008).....   | 15 |
| Slika 5: Medsebojna odvisnost pogostosti vlakov, heterogenosti obratovanja, povprečne hitrosti vlakov in stabilnosti voznega reda (Vir: Landex, 2008).....  | 17 |
| Slika 6: Parametri, ki vplivajo na kapaciteto (Vir: Landex, 2008).....  | 18 |
| Slika 7: Redki in pogosti vlaki.....  | 21 |
| Slika 8: Nastanek konflikta (Vir: Landex et al., 2006).....   | 22 |
| Slika 9: Odvisnost med točnostjo in kapaciteto (Vir: Landex et al., 2006).....  | 23 |
| Slika 10: Konflikt med vlakoma (Vir: Landex et al., 2006).....  | 24 |
| Slika 11: Heterogen (a) in homogen (b) vozni red (Vir: Landex et al, 2006).....   | 25 |
| Slika 12: Homogenost glede hitrosti (voznih časov) ter postankov in heterogenost glede časa med zaporednimi vošnjami vlakov (Vir: Landex, 2008).....  | 26 |
| Slika 13: Homogen vozni red z velikim številom vlakov (levo) ima manjšo izkoriščenost kapacitete kot heterogen vozni red z manj vlaki (desno) (Vir: Landex, 2008).....  | 27 |
| Slika 14: Odvisnost povprečne zamude od števila vlakov (Vir: Abril et al., 2008).....   | 28 |
| Slika 15: Povprečna zamuda in verjetnost zamud glede na število vlakov (Vir: Huisman in Boucherie, 2001).....   | 33 |
| Slika 16: Povprečna zamuda v odvisnosti od dela dneva (Vir: Wiklund, 2003).....   | 36 |
| Slika 17: Povprečna zamuda v odvisnosti od števila vlakov na uro (Vir: Wiklund, 2003).....  | 36 |
| Slika 18: Osnovni vozni red oblikovan s programom Capres (Vir: Curchod in Lucchini, 2001).....  | 38 |
| Slika 19: Saturirani vozni red s programom Capres (Vir: Curchod in Lucchini, 2001).....   | 39 |
| Slika 20: Postopek določanja izkoriščenosti kapacitete po metodi UIC 406 (Vir: Landex et al., 2006).....  | 40 |
| Slika 21: Progovni odsek in prostorski odseki.....  | 41 |
| Slika 22: Zgoščanje voznega reda na enotirni progi (Vir: Landex, 2008).....   | 43 |
| Slika 23: Prvotni vozni red, ko vlakovne poti niso zgoščene (Vir: UIC, 2004).....   | 44 |
| Slika 24: Vozni red po zgoščanju vlakovnih poti (Vir: UIC, 2004).....   | 45 |
| Slika 25: Prikaz izkoriščenosti kapacitete na Danskem (Vir: Landex, 2008).....  | 49 |
| Slika 26: Razdelitev proge na progovne odseke (Vir: Landex et al., 2006).....   | 50 |
| Slika 27: Kritični prostorski odseki na obravnavanem progovnem odseku (Vir: Landex, 2008).....  | 51 |
| Slika 28: Načrt ustavljanja vlaka na progi Coast Line (Vir: Landex, 2008).....  | 51 |
| Slika 29: Izkoriščenost kapacitete na progi Coast Line v koničnem času (Vir: Landex et al., 2006).....  | 52 |
| Slika 30: Uporaba neizkoriščene kapacitete (Vir: Landex et al., 2006).....  | 53 |
| Slika 31: Omejitve zunaj območja obravnavanega progovnega odseka (Vir: Landex et al., 2006).....  | 53 |
| Slika 32: Izkoriščenost kapacitete progovnega odseka (a), odseka z možnostjo prehitevanja (b) in razdeljenega progovnega odseka zaradi prehitevanja (c1 in c2) (Vir: Landex et al., 2006).....                                      | 54 |
| Slika 33: Zgoščanje voznega reda v primeru prehitevanja (Vir: Landex et al., 2006).....   | 55 |
| Slika 34: Manjša izkoriščenost kapacitete zaradi dodatnega vlaka (Vir: Landex et al., 2006).....  | 56 |
| Slika 35: Osnovni elementi programa OpenTrack (Vir: Nash in Huerlimann, 2004).....  | 57 |
| Slika 36: Zgoščanje voznega reda po metodi UIC 406.....   | 58 |
| Slika 37: Železniško omrežje Slovenije (Vir: <a href="http://www.slo-zeleznice.si/sl/podjetje/infrastruktura/zeleznisko_omrezje">http://www.slo-zeleznice.si/sl/podjetje/infrastruktura/zeleznisko_omrezje</a> ((16. 3. 2012))..... | 59 |
| Slika 38: Del grafikona voznega reda za progo Ljubljana - Jesenice (Vir: SŽ).....   | 60 |
| Slika 39: Proga Ljubljana - Jesenice (Vir: <a href="http://www.miniaturna-zeleznica.com/Postaje/Gorenjska-video.htm">http://www.miniaturna-zeleznica.com/Postaje/Gorenjska-video.htm</a> (8.5.2012)).....                           | 61 |

|  |    |
|--|----|
| Slika 40: Razdelitev proge na odseke .....   | 62 |
| Slika 41: Vrste prostorskih odsekov (Zgonc, 2003).....   | 62 |
| Slika 42: Tirna shema postaje Žirovnica (Vir: <a href="http://www.slozeleznice.si/sl/podjetje/vodenje_prometa/program_omrezja/program_omrezja_republike_slovenije_za_let_2012">http://www.slozeleznice.si/sl/podjetje/vodenje_prometa/program_omrezja/program_omrezja_republike_slovenije_za_let_2012</a> (2.2.2012))..... | 64 |
| Slika 43: Postaja Kranj.....   | 64 |
| Slika 44: Postaja Podnart.....   | 64 |
| Slika 45: Postaja Lesce – Bled.....  | 65 |
| Slika 46: Postaja Žirovnica .....  | 65 |
| Slika 47: Postaja Slovenski Javornik .....   | 65 |
| Slika 48: Postaja Jesenice.....  | 66 |
| Slika 49: Postajno območje in odprta proga.....  | 66 |
| Slika 50: Simulacija voženj vlakov na progovnem odseku Kranj - Jesenice .....  | 68 |
| Slika 51: Nezgoščen vozni red Kranj - Podnart .....  | 70 |
| Slika 52: Zgoščen vozni red Kranj - Podnart .....  | 71 |
| Slika 53: Nezgoščen vozni red Slovenski Javornik - Jesenice.....   | 72 |
| Slika 54: Zgoščen vozni red Slovenski Javornik - Jesenice.....   | 73 |
| Slika 55: Zgoščen vozni red Podnart - Lesce - Bled.....  | 74 |
| Slika 56: Zgoščen vozni red Lesce - Bled - Žirovnica.....  | 75 |
| Slika 57: Zgoščen vozni red Žirovnica - Slovenski Javornik.....  | 76 |
| Slika 58: Nezgoščen vozni red Kranj - Podnart, ko vozijo samo potniški vlaki 100 km/h.....   | 78 |
| Slika 59: Zgoščen vozni red Kranj - Podnart, ko vozijo samo potniški vlaki 100 km/h.....   | 79 |
| Slika 60: Izkoriščenost kapacitete heterogenega obratovanja .....  | 81 |
| Slika 61: Izkoriščenost kapacitete homogenega obratovanja.....   | 81 |
| Slika 62: Grafi vlakovnih poti, ko vozijo vlaki pri predpisani hitrosti.....   | 82 |
| Slika 63: Grafi vlakovnih poti, ko vozijo tovorni vlaki pri predpisani hitrosti, potniški vlaki pa s hitrostjo 100 km/h. ....  | 82 |
| Slika 64: Nezgoščen vozni red Kranj - Podnart na dvotirni progi za smer Kranj - Jesenice .....   | 84 |
| Slika 65: Zgoščen vozni red Kranj - Podnart na dvotirni progi za smer Kranj - Jesenice .....   | 85 |
| Slika 66: Nezgoščen vozni red Kranj - Podnart na dvotirni progi za smer Jesenice - Kranj .....   | 86 |
| Slika 67: Zgoščen vozni red Kranj - Podnart na dvotirni progi za smer Jesenice - Kranj .....   | 87 |
| Slika 68: Zgoščen vozni red, ko vozita vlaka v isti smeri.....   | 88 |
| Slika 69: Zgoščen vozni red, ko vozita vlaka v nasprotni smeri.....  | 88 |
| Slika 70: Konflikt med vlaki .....   | 89 |

**SEZNAM KRATIC**

|     |   |
|-----|---|
| ÖBB | Österreichische Bundensbahnen (Avstrijske železnice)          |
| SŽ  | Slovenske železnice   |
| UIC | International Union of Railways (Mednarodna železniška zveza) |

## 1 UVOD

Večanje obsega železniškega prometa v Evropi in sočasno povečano povpraševanje po številnih storitvah zahtevata kakovosten železniški sistem. Zaradi visokih stroškov železniške infrastrukture mora biti razpoložljiva kapaciteta optimalno in ekonomično izkoriščena, železniške storitve pa čim bolj zanesljive. Zanesljivi transportni sistemi so bistvenega pomena za funkcioniranje sodobnih družb, saj ljudje, trg in industrija načrtujejo svoje vsakdanje aktivnosti na predpostavki, da je mogoče potovati in prevažati dobrine na hiter, varen in predvidljiv način. Razvoj transportne infrastrukture je pripomogel k temu, da je v zadnjem času prevoz ljudi in dobrin še hitrejši in bolj množičen. To je povzročilo prostorsko reorganizacijo človeških aktivnosti na lokalni in globalni ravni, ki ima tako dobre kot tudi slabe strani. V večjih mestih pomanjkanje kapacitete privede do prezasedene infrastrukture in do nezanesljivosti transporta, kar zavira vsesplošen razvoj.

Železniški sistem je zelo občutljiv na razne vrste motenj. Te motnje imajo lahko izvor znotraj ali zunaj železniškega sistema. Lahko gre za tehnične napake, neugodno vreme ali naravne katastrofe. Teroristična napada na potnike, ki so uporabljali javni transport, v Madridu leta 2004 in v Londonu leta 2005, kažeta, da ni mogoče izključiti niti namernih dogodkov, ki poškodujejo uporabnike železnice. Delovanje železnice je odvisno od številnih podsistemov, ki jo sestavljajo. Podsystemi vključujejo železniško progo, signalno varnostne naprave, električni sistem, vozni park ter zaposlene. Vsak od teh podsistemov je nujen za pravilno delovanje. Če je eden izmed podsistemov pokvarjen ali deluje pomanjkljivo, sistem kot celota ne funkcionira ali pa njegov nivo uslug drastično pade. Posebnost železnic je, da so izredno nefleksibilne, ker je vlak omejen na določen tir brez možnosti, da bi prešel na drugega, razen, kjer je to fizično omogočeno. Poleg tega so železniške povezave v primerjavi s cestnimi relativno redke. To pomeni, da je malo možnosti za preusmeritev vlaka v primeru nezgode (Mattsson, 2007).

Kapaciteta je kompleksen pojem, ki temelji na številnih merljivih parametrih in je odvisna od infrastrukture, voznega parka in voznega reda. Strokovnjaki se glede njene definicije še niso poenotili, zato se upravljavci železniške infrastrukture pri določanju kapacitete in njene izkoriščenosti poslužujejo različnih metod. Zaradi različnih pristopov vrednotenja kapacitete niso možne primerjave rezultatov posameznih analiz in splošni zaključki. Da bi poenotila opredelitev kapacitete in vrednotenje njene izkoriščenosti, je Mednarodna železniška zveza (UIC) predlagala metodo, opisano v kodeksu 406 o kapaciteti (2004). Ta metoda sodi v okvir optimizacijskih metod in temelji na zgoščanju vlakovnih poti v voznem redu v okviru predhodno določenega časovnega intervala. Izkoriščenost kapacitete se določi kot delež izbranega časovnega intervala, ko je določena proga oziroma njen odsek zasedena zaradi vlakovnih poti. Pri določanju kapacitete in vrednosti njene izkoriščenosti je zelo pomembno, da navedemo tudi okoliščine, v katerih je dosežena določena

vrednost izkoriščenosti kapacitete. Kodeks UIC 406 navaja, da si pri opisu okoliščin pomagamo s štirimi parametri. Ti štirje parametri so: pogostost vlakov, povprečna hitrost vlakov, heterogenost obratovanja in stabilnost voznega reda. Vsakega od teh parametrov je mogoče obravnavati posebej, vendar vedno v odvisnosti od ostalih treh parametrov. Metoda UIC 406 je hitra in učinkovita, vendar hkrati nekoliko pomanjkljiva, kar privede do nekaterih neskladij, na katere moramo biti posebej pozorni.

Poleg optimizacijskih metod obstajajo za vrednotenje kapacitete in zanesljivosti železniških storitev tudi druge analize, vključno z analitičnim, simulacijskim in statističnim pristopom.

Zanesljivost železniškega sistema je odvisna od izkoriščenosti kapacitete železniške infrastrukture. Najbolj nezanesljivi in občutljivi na razne motnje so tisti odseki železniških prog, ki so najbolj obremenjeni, oziroma, na katerih je izkoriščenost kapacitete največja. De Kort in sodelavci (2003) so razvili način za izračun maksimalnega števila vlakov, ki lahko vozijo na določenem odseku in v izbranem časovnem obdobju v skladu z zahtevano verjetnostjo, ki predstavlja določeno zanesljivost storitev. V njihovi študiji gre za določanje vzročne zveze med številom vlakov in zanesljivostjo storitev. Zanesljivost železniških storitev je mogoče vrednotiti na številne načine. Eden izmed najbolj učinkovitih in relevantnih načinov je določanje zanesljivosti železniških storitev na podlagi zamud vlakov.

Zamude se v splošnem delijo na primarne in sekundarne. Primarne zamude nastanejo zaradi zunanjega dogodka. Sekundarne zamude so posledica primarnih zaradi interakcije med vlaki. Z zmanjšanjem izkoriščenosti kapacitete je mogoče zmanjšati verjetnost sekundarnih zamud. Omejitev primarnih zamud je veliko bolj zahtevna. Carey (1999) je predstavil vpogled v analizo mehanizma zamud. Določil je enačbe za izračun funkcij gostote verjetnosti sekundarnih zamud kot funkcije razmikov med zaporednimi vožnjami vlakov in funkcije gostote verjetnosti primarnih zamud. Določil je tudi enačbe za izračun pričakovane sekundarne zamude. Huisman in Boucherie (2001) sta razvila analitični model za napovedovanje sekundarnih zamud v odvisnosti od števila vlakov na progah, kjer je promet heterogen. Gibson in sodelavci (2002) so razvili metodo za določanje stroškov dodatnega vlaka, ki so odvisni od sekundarnih zamud, te pa so posledica določenega deleža primarnih zamud. Namen njihove študije je oblikovanje zveze med sekundarnimi zamudami in izkoriščenostjo kapacitete, kar zagotavlja, da se stroški dodatnega vlaka pravilno odražajo v uporabnih.

## **1.1 Namen in cilji**

Namen diplomske naloge je preučitev kapacitete železniške infrastrukture in načina določanja izkoriščenosti kapacitete železniških prog. Glavni dokument, na katerega sem se sklicevala in ga imela kot vodilo pri pisanju diplomske naloge, je kodeks UIC 406 o kapaciteti. V diplomski nalogi so povzeti številni strokovni članki, ki obravnavajo kapaciteto železniške infrastrukture in način določanja njene izkoriščenosti v povezavi s sekundarnimi zamudami vlakov in posledično z zanesljivostjo železniških storitev.

Cilj diplomske naloge je s pomočjo programske opreme OpenTrack določiti izkoriščenost kapacitete železniške proge Ljubljana - Jesenice, in sicer na progovnem odseku Kranj - Jesenice. Izkoriščenost kapacitete sem vrednotila za obstoječo železniško infrastrukturo (število in dolžine tirov na postajah, dolžine medpostajnih prostorskih odsekov), za vozni park, ki obratuje na tej progi (vrsta vlaka, karakteristike lokomotiv, dolžina vlaka) in za veljaven vozni red. Izračunane vrednosti izkoriščenosti kapacitete za dejansko stanje sem primerjala s stanjem, ko sem spremenila karakteristike proge, ki vplivajo na kapaciteto in njeno izkoriščenost (dodaten tir, homogenost obratovanja).

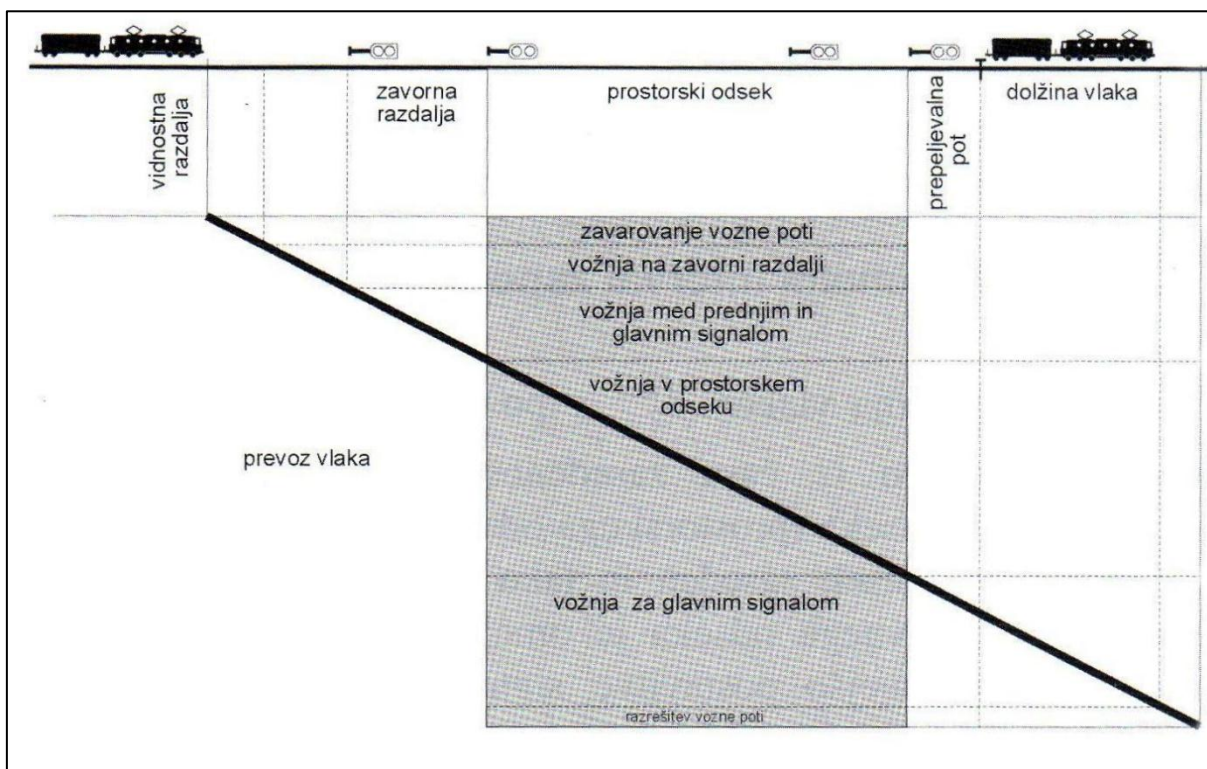


## 2 OSNOVNI POJMI

Za razumevanje kapacitete in načina določanja njene izkoriščenosti je potrebno poznati določene pojme, opisane v nadaljevanju.

### 2.1 Čas zasedenosti prostorskega odseka

Čas, ko vlak zaseda določen prostorski odsek, je odvisen od voznega časa vlaka in od signalno varnostnih naprav. Prostorski odsek je zaseden toliko časa, dokler celoten vlak ne prevozi določene točke na koncu odseka (izolirka), ki mora biti zaradi varnosti prosta.



Slika 1: Zasedenost prostorskega odseka (Vir: Zgonc, 2003)

## **2.2 Tamponski čas (ang. *buffer time*)**

Časovna razlika med dejanskim časovnim intervalom med zaporednimi vožnjami in minimalnim dopustnim časovnim intervalom med zaporednimi vožnjami (ang. *minimum headway time*) je tamponski čas. Tamponski čas je odvisen od signalno varnostnega sistema. Zadosten tamponski čas omeji sekundarne zamude. Če njegovo trajanje ni zadostno (manjše od začetne zamude), potem se zamuda prenaša na druge vlake. Nezadostno trajanje tamponskega časa privede do nezanesljivosti železniških storitev.

## **2.3 Prostorski razmik (ang. *headway distance*)**

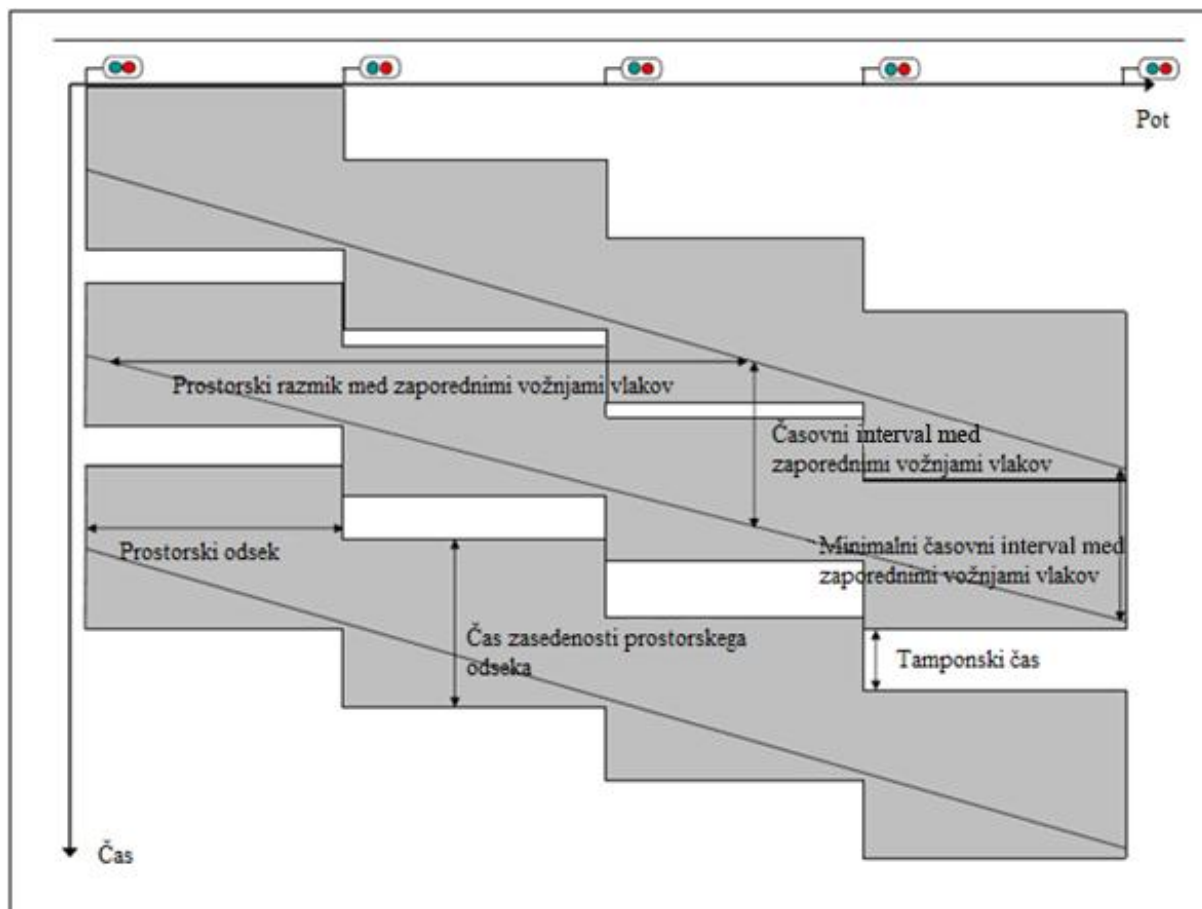
Razmik med sprednjima deloma dveh zaporednih vlakov, ki vozita po istem tiru v isto smer. Minimalni prostorski razmik (ang. *minimum headway distance*) je najmanjša možna razdalja med zaporednima vlakoma pri določeni hitrosti, ki jo dopuščajo signalno varnostne naprave.

## **2.4 Časovni interval med zaporednimi vožnjami vlakov (ang. *headway time*)**

Časovni interval med dvema zaporednima vlakoma oziroma časovni interval med sprednjima deloma dveh zaporednih vlakov, ki vozita po istem tiru v isto smer. Časovni interval med zaporednimi vožnjami vlakov je odvisen od razmika med vlaki in od hitrosti vlakov.

## **2.5 Kritični prostorski odsek**

Prostorski odsek na progi, kjer je časovni interval med zaporednimi vožnjami vlakov minimalen (ang. *minimum headway time*).



Slika 2: Shematičen prikaz osnovnih pojmov (Vir: Landex, 2008)

Če vozijo vsi vlaki z enako hitrostjo, potem sta razdalja in čas med zaporednimi voznjama vlakov ves čas konstantna. Če so hitrosti vlakov različne, se spreminjata v odvisnosti od hitrosti. Če opazujemo prva dva vlaka v voznem redu, je časovni interval med njima najkrajši v četrtem prostorskem odseku obravnavanega progovnega odseka. Ta prostorski odsek je kritični prostorski odsek. Na njem je časovni interval med zaporednima voznjama minimalen.

## 2.6 Dodatek časa za križanje vlakov na enotirnih progah (ang. *crossing buffer time*)

Dodatek časa za križanje vlakov na enotirnih progah se doda med dve trasi vlakov, ki vozita v nasprotni smeri.

## 2.7 Izkoriščenost kapacitete (ang. *capacity consumption*)

Izkoriščenost kapacitete je enaka deležu izbranega časovnega intervala, ko je infrastruktura zasedena zaradi določenega števila vlakovnih poti.

## **2.8 Neizkoriščena kapaciteta (ang. *unused capacity*)**

Neizkoriščena kapaciteta je enaka deležu izbranega časovnega intervala, ko infrastruktura ni zasedena.

## **2.9 Primarna zamuda**

Primarna zamuda nastane zaradi zunanjega dogodka. To je okvara voznega parka, poškodba infrastrukture, okvara signalno varnostnih naprav, podaljšan postanek na postaji zaradi vstopanja ali izstopanja potnikov, netočnost zaposlenih.

## **2.10 Sekundarna zamuda**

Sekundarne zamude so posledica primarnih. Nastanejo zaradi interakcije med vlakom, ki ima primarno zamudo in drugimi vlaki ali med vlakom, ki že ima sekundarno zamudo in drugimi vlaki.

### 3 OPREDELITEV POJMA KAPACITETA

Kapaciteta je kompleksen pojem, ki ima številne pomene, zato so ravno tako številne tudi njene definicije. Ker splošno veljavna definicija kapacitete ne obstaja, se strokovnjaki pri analizah kapacitete poslužujejo različnih načinov njene opredelitve.

Zgonc (2003) navaja, da je kapaciteta (prepustnost) proge število vlakov, ki jih lahko v določeni časovni enoti, običajno v enem dnevu (24ur), prepeljemo na določeni progi. Kapaciteto celotne proge določa tisti prostorski odsek, na katerem je čas vožnje vlakov najdaljši.

Burdett in Kozan (2006) sta opredelila teoretično kapaciteto, ki sta jo poimenovala kar absolutna kapaciteta. Predlagala sta, da se jo definira kot maksimalno število vlakov, ki lahko prevozijo celotno železniško progo ali kritični(e) odsek(e) v določenem časovnem obdobju.

Definicija kapacitete, ki sta jo uporabila Huisman in Boucherie (2001), določa, da je teoretična kapaciteta maksimalno število vlakov, ki lahko vozijo po tiru v določeni časovni enoti pri minimalnem možnem časovnem intervalu med vlaki, ki ga dopuščajo tehnične lastnosti infrastrukture, vključno s signalno varnostnimi napravami in razdelitvijo proge na odseke.

Mednarodna železniška zveza (UIC) je v kodeksu 406 o kapaciteti podala definicijo kapacitete, da je kapaciteta katerekoli železniške infrastrukture celotno število vseh dejanskih vlakovnih poti znotraj izbranega časovnega intervala. Njen namen je zagotavljati kvaliteto, ki jo zahteva povpraševanje (UIC, 2004).

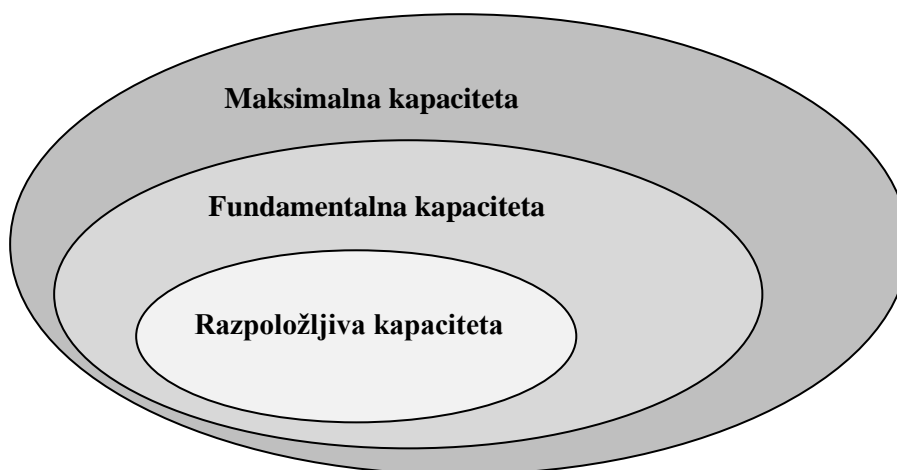
Kaas (1998) je predlagal, da se kapaciteta definira kot zmožnost infrastrukture, da omogoča vožnje vlakov pri sprejemljivi točnosti.

Hansen (2004) je opredelil kapaciteto kot zmožnost infrastrukture, da se železniški promet na njej odvija skladno z enim ali več voznimi redi.

Mattsson (2007) je definiral teoretično kapaciteto kot maksimalno število vlakov, ki lahko vozijo na določenem železniškem sistemu oziroma kritičnem odseku v določeni časovni enoti.

Landex (2008) je predlagal, da se kapaciteta glede na njeno vrednost razdeli na maksimalno, fundamentalno in razpoložljivo kapaciteto. Maksimalna kapaciteta predstavlja maksimalno število vlakov na odseku znotraj danega časovnega intervala v idealnih pogojih, ki v realnosti niso mogoči zaradi zunanjih faktorjev in procesov, ki kapaciteto zmanjšujejo. Fundamentalna kapaciteta je

kapaciteta pri obratovanju vlakov pri normalnih pogojih. Fundamentalna kapaciteta je omejena zaradi nezanesljivosti infrastrukture, voznega parka in zaposlenih v železniškem prometu in je zato manjša od maksimalne kapacitete. Vrednost fundamentalne kapacitete je odvisna od verjetnosti raznih motenj. Na voljo ni nobene metode, s katero bi bilo mogoče na podlagi maksimalne kapacitete, eksplicitno določiti fundamentalno kapaciteto. Zato se fundamentalno kapaciteto določi kot delež maksimalne. Landex (2008) je navedel, da fundamentalna kapaciteta znaša 60% - 85% maksimalne kapacitete izračunane po metodi kodeksa UIC 406. Vrednost se spreminja glede na čas dneva in glede na vrsto železniške proge. Čeprav je maksimalna kapaciteta že zmanjšana na vrednost fundamentalne, lahko nastane še dodatno pomanjkanje kapacitete zaradi pomanjkanja delovnega osebja in v primeru nesreč ali izjemnih vremenskih pogojev. Še dodatno zmanjšana kapaciteta je t.i. razpoložljiva kapaciteta, ki je enaka ali manjša od fundamentalne.



Slika 3: Poimenovanje železniške kapacitete po Landex, 2008

Definicije se razlikujejo predvsem zato, ker vsaka država določa kapaciteto po svojih merilih in kriterijih ali pa zato, ker je kapaciteta določena v povezavi z določenim projektom.

Dodaten razlog za različna pojmovanja kapacitete je tudi ta, da je kapaciteta vrednotena z različnih stališč. Povpraševanje, načrtovanje infrastrukture in obratovanja ter oblikovanje voznega reda obravnavajo in interpretirajo kapaciteto na različne načine.

Preglednica 1: Različni vidiki kapacitete (Vir: UIC, 2004)

| Trg   | Načrtovanje infrastrukture                              | Načrtovanje voznega reda                     | Obratovanje                             |
|---|---|--|---|
| Pričakovano število vlakovnih poti (konica)   | Pričakovano število vlakovnih poti (povprečno)          | Zahtevano število vlakovnih poti             | Dejansko število vlakov                 |
| Pričakovana raznolikost prometa in hitrosti (konica)  | Pričakovana raznolikost prometa in hitrosti (povprečno) | Zahtevana raznolikost prometa in hitrosti    | Dejanska raznolikost vlakov in hitrosti |
| Potrebna kakovost infrastrukture  | Pričakovano stanje infrastrukture                       | Obstoječe stanje infrastrukture              | Dejansko stanje infrastrukture          |
| Čim krajši možen potovalni časi   | Časovni dodatek za pričakovane motnje                   | Časovni dodatki za pričakovane motnje        | Zamude zaradi motenj obratovanja        |
| Predhodno zbiranje podatkov o kratkoročnih in dolgoročnih potrebah za doseganje optimalnih storitev | Strategije vzdrževanja                                  | Časovni dodatki za vzdrževanje               | Zamude zaradi dela na tirih             |
|   |   | Povezovalne storitve na postajah             | Zamude zaradi zgrešenih povezav         |
|   |   | Zahteve izven rednih intervalov voznega reda |   |

Povpraševanje zahteva tolikšno kapaciteto, da ponudba zadosti povpraševanju v konicah. Z vidika načrtovanja infrastrukture je pomembna ekonomična in donosna izkoriščenost kapacitete. S stališča voznega reda je kapaciteta odvisna od dane infrastrukture in od zahtevanih vlakovnih poti. Z vidika obratovanja se kapaciteta neprestano spreminja in je odvisna od trenutno razpoložljive infrastrukture, vzdrževanja, zamud, preusmeritev in števila dodatnih vlakov. Vsaka od teh situacij je pravilna glede na svoje specifično ozadje.

Poleg navedenih so se pojavljale še mnoge druge definicije kapacitete. Čeprav se definicije med seboj razlikujejo, je vsem skupno, da so odvisne od voznega reda, infrastrukture in voznega parka.

### 3.1 Teoretična in praktična kapaciteta

Kapaciteto železniške infrastrukture je mogoče razdeliti na teoretično in na praktično.

V linearnem, zveznem in homogenem prostoru je teoretična kapaciteta enaka maksimalnemu pretoku:

$$K = f_{max} = \max (v \cdot q), \quad (1)$$

kjer so:

$K$  ...kapaciteta [vlaki/h/tir],

$f_{max}$ ...maksimalni pretok,

$v$  ... hitrost [km/h],

$q$ ... gostota [vlaki/km/tir].

Na 50 km dolgi progi, kjer je promet izmenično enosmeren in vozijo vlaki s hitrostjo 100 km/h, lahko vozi naenkrat največ en vlak. Gostota te proge znaša  $q = 1/50$  vlakov/km/tir, teoretična kapaciteta pa znaša  $K = 100/50 = 2$  vlaka/h/tir. Če je proga dvotirna, vlaki vozijo na vsakem tiru samo v eno smer s hitrostjo 100 km/h. Ker je hitrost homogena, je predpostavljen konstanten časovni interval med zaporednimi vožnjami (ang. *headway time*), ki traja 5 min. Povprečna gostota znaša  $q = 60/(5 * 100)$ , teoretična kapaciteta pa je enaka  $K = 100 * 60/(5 * 100) = 12$  vlakov/h/tir (Mattsson, 2007).

Teoretična kapaciteta je določena kot maksimalno število vlakov na odseku v določeni časovni enoti. Izračunamo jo tako, da predpostavimo idealne okoliščine, ko vlaki vozijo popolnoma v skladu z voznim redom in pri minimalnem časovnem intervalu med zaporednimi vožnjami vlakov (ang. *minimum headway time*), ki ga dopuščata signalno varnostni sistem in dolžina odseka. Predpostavljeno je tudi, da je promet popolnoma homogen (to pomeni, da so vsi vlaki identični, da je enaka njihova hitrost, enaki postanki in enak časovni interval med zaporednimi vožnjami) in da ni nobenih zunanjih motenj. Teoretična kapaciteta določa največjo vrednost, ki jo je mogoče doseči le pod izredno ugodnimi, praktično nerealnimi pogoji. Ker takšna definicija ne upošteva dejanskih okoliščin, razmere v prometu in pri obratovanju se namreč neprestano spreminjajo, v realnosti ni smiselna.

Praktična kapaciteta (običajno samo kapaciteta) železniške infrastrukture pomeni dejansko število vlakov znotraj določenega časovnega intervala (konična ura in 24 ur) v normalnih obratovalnih pogojih in pri zahtevani kakovosti obratovanja. To pomeni, da pri določanju praktične kapacitete upoštevamo vse parametre, ki vplivajo na kapaciteto (heterogenost obratovanja, dejanski časovni interval med zaporednimi vožnjami, zahtevana stabilnost voznega reda).



Kapaciteto določimo po enačbi:

$$K = q \cdot n_t, \quad (2)$$

kjer je:

$K$  ...kapaciteta [vlaki/h/tir],

$q$  ...dejanska gostota prometa [vlaki/h],

$n_t$  ...število tirov.

Ker je železniški sistem odvisen od številnih podsistemov, za katere velja verjetnost določenih okvar in motenj, pride v realnih obratovalnih okoliščinah v poštev samo definicija praktične kapacitete. Ko navajamo vrednost kapacitete proge, je pomembno, da navedemo tudi vrednosti posameznih parametrov, ki nanjo vplivajo (povprečna hitrost, dolžina odsekov, zahtevana stabilnost voznega reda; poglavje 5).

#### 4 OPREDELITEV POJMA IZKORIŠČENOST KAPACITETE

Glede vrednotenja izkoriščenosti kapacitete so si strokovnjaki enotni. Predlagajo, da se izkoriščenost kapacitete določi kot delež izbranega časovnega intervala, ko je infrastruktura zasedena zaradi določenega števila vlakovnih poti. Kodeks UIC 406 priporoča, da je izkoriščenost kapacitete od 60% do 85%, odvisno od vrste proge in od dela dneva (24 ur ali konična ura) (poglavje 7.1.6.1). Vrednost izkoriščenosti kapacitete velja za normalne obratovalne pogoje, ko vlaki vozijo pri zahtevani kakovosti obratovanja.

Tako kot kapaciteta je tudi njena izkoriščenost zelo odvisna od pogostosti vlakov, povprečne hitrosti, heterogenosti obratovanja in stabilnosti voznega reda. Zato je potrebno pri navajanju vrednosti izkoriščenosti kapacitete navesti tudi okoliščine, v katerih je bila določena vrednost dosežena (torej pogostost vlakov, povprečno hitrost, heterogenost obratovanja in stabilnost voznega reda; poglavje 5).

Burdett in Kozan (2006) sta navedla, da je izkoriščenost kapacitete enaka deležu izbranega časovnega intervala, ko dejanska kombinacija vlakov uporablja določen odsek.

Švedska nacionalna administracija za železnice je izdelala priročnik za izračun izkoriščenosti kapacitete (Banverket (2001)), ki se uporablja pri analizah stroškov in koristi investicij v železniški sektor. Po tem priročniku je izkoriščenost kapacitete enaka trajanju določenega časovnega obdobja, ko je odsek proge med dvema postajama zaseden zaradi vlakovnih poti. Banverket (2001) je predlagal, da se 80% izkoriščenost kapacitete smatra za mejno vrednost. Če je izkoriščenost kapacitete več kot 80%, je proga preobremenjena. 80% izkoriščenost kapacitete pomeni, da je 80% izbranega časovnega intervala proga (ali njen odsek) zasedena. Če bi si za časovni interval izbrali 2 uri, bi to pomenilo, da je proga ali odsek zasedena 1,6 h (oziroma 1h 36 min).

Mattsson (2007) je opisal določitev kapacitete enotirne in dvotirne proge. Najprej je obravnaval enotirno progo med dvema postajama, na kateri ni možnosti za križanje ali prehitevanje. Če vlaki vozijo izmenično enosmerno, vsak vlak zaseda tir toliko časa, kot traja njegov celotni vozni čas med dvema postajama. Celoten čas zasedenosti tira je vsota voznih časov vseh vlakov, ki vozijo po tem tiru v določenem časovnem obdobju. Celotnemu času zasedenosti tira je potrebno prišteti še dodatek časa za križanje vlakov na enotirnih progah (ang. *crossing buffer time*).

Na dvotirni progi je mogoče razdeliti promet glede na smer vožnje, da je na vsakem od tirov promet enosmeren. Ni nujno, da vlak zaseda tir toliko časa, kolikor dolgo traja njegovo potovanje med postajama, saj mu, še preden pride do ciljne postaje, lahko prične slediti zaporedni vlak, v kolikor to dopuščajo signalno varnostne naprave. Čas zasedenosti tira je odvisen od potrebnega časovnega

intervala med zaporednimi vožnjami vlakov (ang. *headway time*). Če vozi zaporedni vlak z enako ali manjšo hitrostjo kot prvi, med vlakoma zadostuje minimalni časovni interval (ang. *minimum headway time*). Če vozi zaporedni vlak z višjo hitrostjo, je nujno povečati časovni interval, da zaporedni vlak ne dohiti prvega. Povečanje časovne razlike med dvema zaporednima vlakoma je odvisno od razlike vozni časov prvega (počasnejšega) in drugega (hitrejšega) vlaka. To pomeni, da je časovni interval med zaporednimi vožnjami vlakov odvisen predvsem od razlik v hitrosti posameznih vlakov. Celoten čas zasedenosti dvotirne proge z enosmernim prometom izračunamo po enačbi:

$$T_d^o = \sum_{k=1}^K t_k^h + (t_k^r - t_{k+1}^r) + t_k^p, \quad (3)$$

kjer so:

$k = 1, 2, \dots, K$  ...oznaka vlaka glede na zaporedje v voznem redu,

$t_k^h$  ...minimalni čas med zaporednimi vožnjami vlakov,

$t_k^r$  ...vozni čas,

$t_k^p$  ...dodatni čas za hitre vlake, da lahko na postajah prehitijo počasne vlake,

$(t_k^r - t_{k+1}^r)^+ \equiv t_k^r - t_{k+1}^r$ , če je  $t_k^r > t_{k+1}^r$ , sicer je enako 0.

Izkoriščenost kapacitete dvotirne proge izračunamo po enačbi:

$$C_d = \frac{T_d^o}{aT}, \quad (4)$$

kjer so:

$T_d^o$  ...čas zasedenosti dvotirne proge,

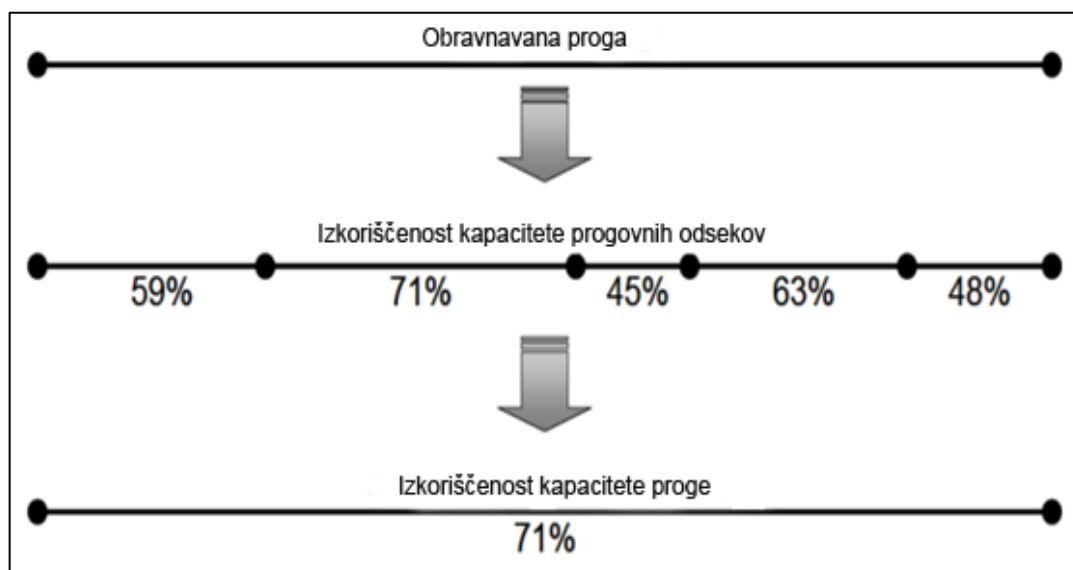
$T$  ...dolžina izbranega časovnega obdobja,

$a$  ...redukcijski faktor pri izračunu izkoriščenosti kapacitete;

$a = 0.8$ , ko se upošteva celoten dan oz.  $a = 1$ , ko se upošteva konično uro.

Metoda UIC 406 določa, da mora biti proga, preden računamo izkoriščenost kapacitete, razdeljena na progovne odseke. Vlakovne poti v voznem redu morajo biti zgoščene v okviru izbranega časovnega intervala. Izkoriščenost kapacitete določamo kot delež izbranega časovnega intervala, ko je progovni odsek zaseden zaradi določenega števila vlakovnih poti. Vrednosti izkoriščenosti kapacitete se med progovnimi odseki razlikujejo. Za merodajno vrednost izkoriščenosti kapacitete celotne proge

vzamemo največjo izmed izračunanih vrednosti izkoriščenosti kapacitete na posameznih progovnih odsekih.



Slika 4: Določanje izkoriščenosti kapacitete celotne proge (Vir: Landex, 2008)

Vse vrednosti kapacitete in njene izkoriščenosti, ki so obravnavane v naslednjih poglavjih, se nanašajo na definicijo kapacitete in njene izkoriščenosti po metodi UIC 406.

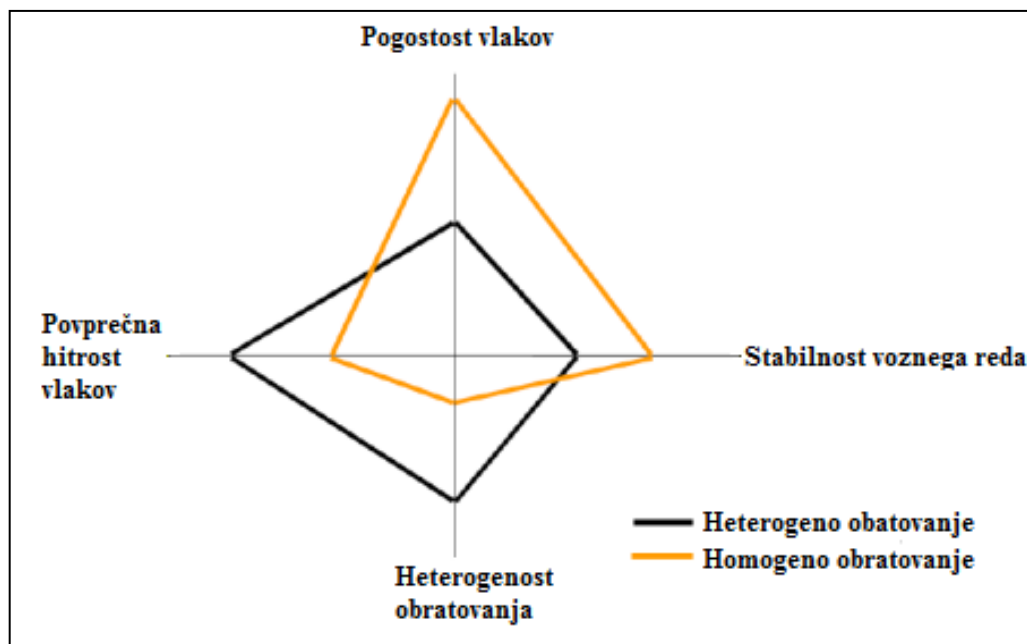
## 5 PARAMETRI, KI VPLIVAJO NA KAPACITETO IN NJENO IZKORIŠČENOST

Kapaciteto in njeno izkoriščenost je v realnih pogojih težko določiti zaradi kompleksnosti železniške mreže ter zaradi diskretnih in heterogenih lastnosti železniškega sistema. Ko govorimo o kapaciteti železnice v realnih pogojih, ne gre več za zvezni pretok kot pri elektriki ali hidravliki. Ker pogoji niso idealni, torej vlaki niso enaki in ne vozijo z enako hitrostjo in konstantnim minimalnim časovnim intervalom med zaporednimi vožnjami, nam zgolj vrednost kapacitete (npr. 5 vlakov na uro) ne pove veliko. Smisel dobi šele, če navedemo, v kakšnih okoliščinah je ta vrednost dosežena. Pri opisu okoliščin, v katerih določamo kapaciteto, si pomagamo s štirimi parametri. Ti štirje parametri so:

- pogostost vlakov,
- heterogenost obratovanja (hitrosti, postankov, časovni interval med zaporednimi vožnjami),
- povprečna hitrost vlakov,
- stabilnost voznega reda.

Zvezo med zgornjimi parametri prikazuje Slika 5. Črte črne oziroma oranžne barve povezujejo točke na koordinatnih oseh, ki ustrezajo vrednostim posameznih parametrov. Oranžni lik povezuje vrednosti, ki ustrezajo homogenemu obratovanju, črni lik pa vrednosti, ki ustrezajo heterogenemu obratovanju. Ploščina črnega oziroma oranžnega lika predstavlja kapaciteto.

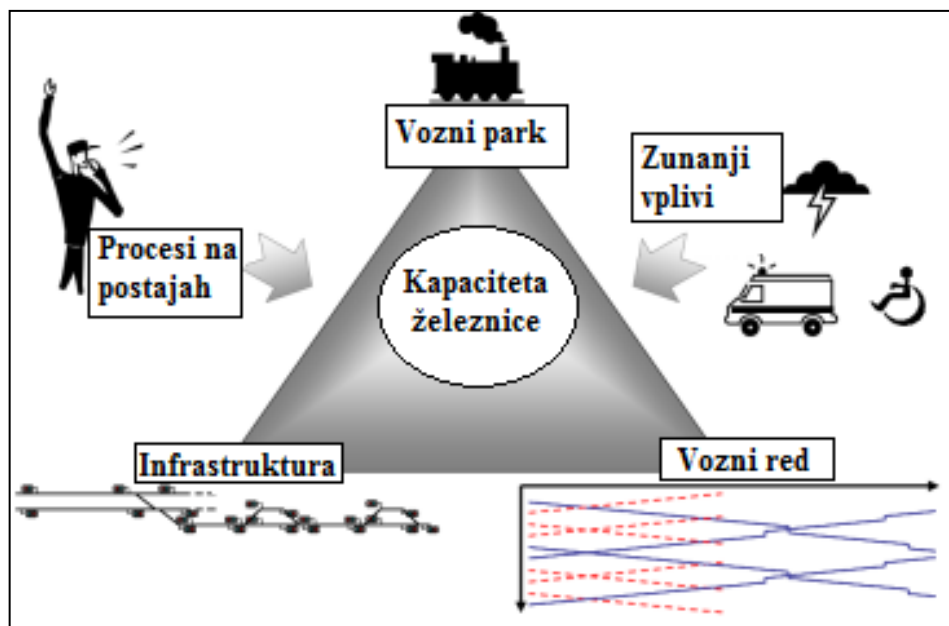
Parametri so med seboj odvisni in vplivajo eden na drugega. To pomeni, da če se vrednost enega izmed parametrov poveča, se vrednost ostalih parametrov sorazmerno zmanjša oziroma poveča, odvisno, za kateri parameter gre. To je razvidno iz primerjave oranžnega in črnega lika na sliki (Slika 5). Na železniških mrežah z visoko heterogenostjo je mogoče doseči visoko povprečno hitrost. Pri visoki povprečni hitrosti in visoki heterogenosti pa ni mogoče zagotoviti tolikšne točnosti, kot če je promet homogen in povprečna hitrost nižja. Če je zaradi velikega povpraševanja potrebno, da so vlaki zelo pogosti, mora biti promet homogen.



Slika 5: Medsebojna odvisnost pogostosti vlakov, heterogenosti obratovanja, povprečne hitrosti vlakov in stabilnosti voznega reda (Vir: Landex, 2008)

Ti štiri parametri temeljijo na infrastrukturi, voznem redu in voznem parku. Zaradi fizičnih in dinamičnih karakteristik voznega parka je kapaciteta odvisna od dejanske kombinacije različnih vrst vlakov, ki vozijo v določenem zaporedju in pri različnih hitrostih. Povprečna hitrost je torej odvisna od voznega parka. Poleg tega vpliva na kapaciteto tudi vozni red, ki zajema določeno število vlakovnih poti v določenem zaporedju pri določeni točnosti. Pogostost vlakov in stabilnost voznega reda sta torej odvisni od zahtev v voznem redu. Heterogenost obratovanja je odvisna tako od voznega reda kot tudi od voznega parka. Predpogoj za določanje vseh teh parametrov je razpoložljiva infrastruktura. Najpomembnejše tehnične lastnosti infrastrukture, ki vplivajo na kapaciteto železnice so: število tirov, število mest za križanje ali prehitevanje vlakov in razdelitev proge na odseke. Skupno vsem tem parametrom je to, da je nanje mogoče vplivati in jih natančno napovedati.

Poleg zgoraj naštetih parametrov, ki vplivajo na kapaciteto, so tudi različni procesi na postajah (podaljšani postanki zaradi velikega števila potnikov, ki vstopajo in izstopajo na/iz vlaka ...) in zunanji vplivi (vreme, nesreče ...). Takšnim dogodkom se ni mogoče izogniti, ker se pojavljajo nepričakovano. Nanje ni mogoče vplivati, jih je pa mogoče v voznem redu upoštevati tako, da idealnim voznim časom dodamo časovne dodatke.



Slika 6: Parametri, ki vplivajo na kapaciteto (Vir: Landex, 2008)

Kodeks UIC 406 navaja še dodatne posebnosti, ki jih je potrebno upoštevati pri vrednotenju kapacitete. Mednje spadajo prioritete vlakov, ki določajo, kateri vlaki imajo prednost pred drugimi (mednarodni vlaki imajo prednost pred ostalimi vlaki). Dodatne omejitve predstavljajo tudi pravila na mejnih postajah pri določanju mednarodnih poti vlakov. Države imajo namreč različna pravila glede najavljanja vlakov, še posebej v primerih izrednih prevozov, ko se uporabljajo t. i. ponudbene trase. Sem sodijo tudi predpisi, ki so povezani z zaščito okolja. Nanašajo se predvsem na emisije hrupa. Zaradi teh predpisov so prepovedani hrupni vlaki ob določenih delih dneva. Te vrste omejitev veljajo tudi pri prevozih nevarnih tovorov (npr. vnetljive snov).

Vsi naštetni parametri vplivajo na kapaciteto in določajo njeno vrednost. Parametri lahko kapaciteto proge povečujejo (dodatni tiri, pogosti vlaki, visoka in homogena hitrost vlakov ...) ali pa zmanjšujejo (heterogenost hitrosti, zahtevana povečana stabilnost voznega reda, prioritete vlakov ...).

V nadaljevanju je natančneje opisano, kako pogostost vlakov, heterogenost obratovanja, stabilnost voznega reda in povprečna hitrost vlakov vplivajo na kapaciteto in njeno izkoriščenost, ki sta določeni glede na definicijo, ki jo navaja kodeks UIC 406 (poglavje 3, 4). Vsakega izmed štirih parametrov lahko obravnavamo samostojno, vendar vedno v odvisnosti od ostalih treh parametrov.

## 5.1 Razpoložljiva infrastruktura

Mattsson (2007) je opisal, kako na kapaciteto vpliva razpoložljiva infrastruktura v odvisnosti od različnih hitrosti vlakov in od heterogenosti obratovanja. Obravnaval je odsek proge med dvema postajama, ki je dolg 50 km. Če vozijo vsi vlaki s hitrostjo 120 km/h, znaša vozni čas 25 min. Tamponski čas (ang. *buffer time*) traja 5 min.

Najprej je predpostavil, da je obravnavana proga enotirna. Če vlaki vozijo izmenično enosmerno s hitrostjo 120 km/h, znaša kapaciteta 2 vlaka na uro, en vlak pa zaseda odsek 25+5 min. Če vlaki vozijo s hitrostjo 200 km/h, vsak vlak zaseda odsek 15+5 min, kar pomeni, da kapaciteta znaša 3 vlake na uro. Kapaciteto je mogoče povečati tako, da se na sredini odseka vlakom omogoči križanje. Dodatno mesto za križanje vlakov razdeli odsek, dolg 50 km, na dva odseka, dolga 25 km. Vlak, ki vozi s hitrostjo 120 km/h, zaseda vsakega od odsekov 12,5+5=17,5 min, za razliko od prej, ko je zasedal odsek 25+5=30 min. Ker so odseki krajši, jih vlak zaseda manj časa, zato se kapaciteta poveča z dveh na 3,4 vlake na uro, če vlaki vozijo 120 km/h. Če znaša hitrost 200 km/h, potem se kapaciteta zaradi dodatnega mesta za križanje poveča s 3 na 4,8 vlakov na uro. Ker je obratovanje homogeno se, hkrati s povečevanjem hitrosti in z zmanjševanjem dolžine obravnavanega odseka, povečuje kapaciteta.

Če je proga dvotirna, vlake razdelimo glede na smer vožnje in dodatno mesto za križanje ni potrebno. Če vsi vlaki vozijo z enako hitrostjo, je kapaciteta določena glede na minimalni časovni interval med zaporednimi vožnjami vlakov. Minimalni časovni interval med zaporednimi vožnjami vlakov je odvisen od razdelitve proge na odseke in od hitrosti vlakov. Za vse vlake je predpostavljen minimalni časovni interval med zaporednimi vožnjami vlakov 5 min. Kapaciteta tira se poveča na 12 vlakov na uro, ne glede na to, ali vozijo vlaki s hitrostjo 120 km/h ali 200 km/h. Če bi minimalni časovni interval med zaporednimi vožnjami znašal 2 min, bi bila kapaciteta tira 30 vlakov na uro. Krajši kot je minimalni časovni interval med zaporednimi vožnjami, večja je kapaciteta.

Če na dvotirni progi vozijo vlaki različnih hitrosti (heterogeno obratovanje), je kapaciteta manjša. Predpostavimo, da vlaki vozijo izmenično pri hitrostih 120 km/h in 200 km/h (en vlak s hitrostjo 120 km/h in nato en vlak s hitrostjo 200 km/h) in da ni dodatne postaje za prehitevanje na sredini odseka. Vozni čas traja 25 min za počasnejši vlak oziroma 15 min za hitrejši. Časovni interval med zaporednimi vožnjami traja 10 min, dodaten čas za prehitevanje pa 5 min. Dva vlaka torej zasedata progo 25 min (vsota časovnega intervala med zaporednima vožnjama vlakov, razlike vozniških časov in časa za prehitevanje). To pomeni, da se kapaciteta zmanjša z 12 na 4,8 vlakov na uro v primeru, ko vlaki vozijo z različno hitrostjo. Če je na sredini odseka dodatna postaja za prehitevanje, znaša



kapaciteta tira 6 vlakov na uro. Kapaciteta je v tem primeru večja zaradi krajših odsekov in zaradi krajšega minimalnega časovnega intervala med zaporednimi vožnjami.

Če je proga štiritirna, vlake razdelimo glede na smer vožnje in hitrost. Kapaciteta je tudi v tem primeru določena glede na minimalni časovni interval med zaporednimi vožnjami vlakov. Kapaciteta tira znaša 12 vlakov na uro. To velja ne glede na to, ali je vmesna dodatna postaja (ali je ni) in ne glede na hitrost.

Preglednica 2 prikazuje, kako se spreminja vrednost kapacitete v odvisnosti od hitrosti vlakov, heterogenosti obratovanja in razpoložljive infrastrukture. Iz primerjave rezultatov sledi, da večanje števila tirov povečuje kapaciteto, vendar ne linearno. Dodatno mesto za križanje vlakov poveča kapaciteto enotirne proge. To je razvidno iz primerjave 1. in 3. ali 2. in 4. vrstice v preglednici (Preglednica 2). Dodatno mesto za prehitevanje vlakov v primeru heterogenega obratovanja na dvotirni progi ravno tako poveča kapaciteto. To je razvidno iz primerjave 7. in 8. vrstice v tabeli.

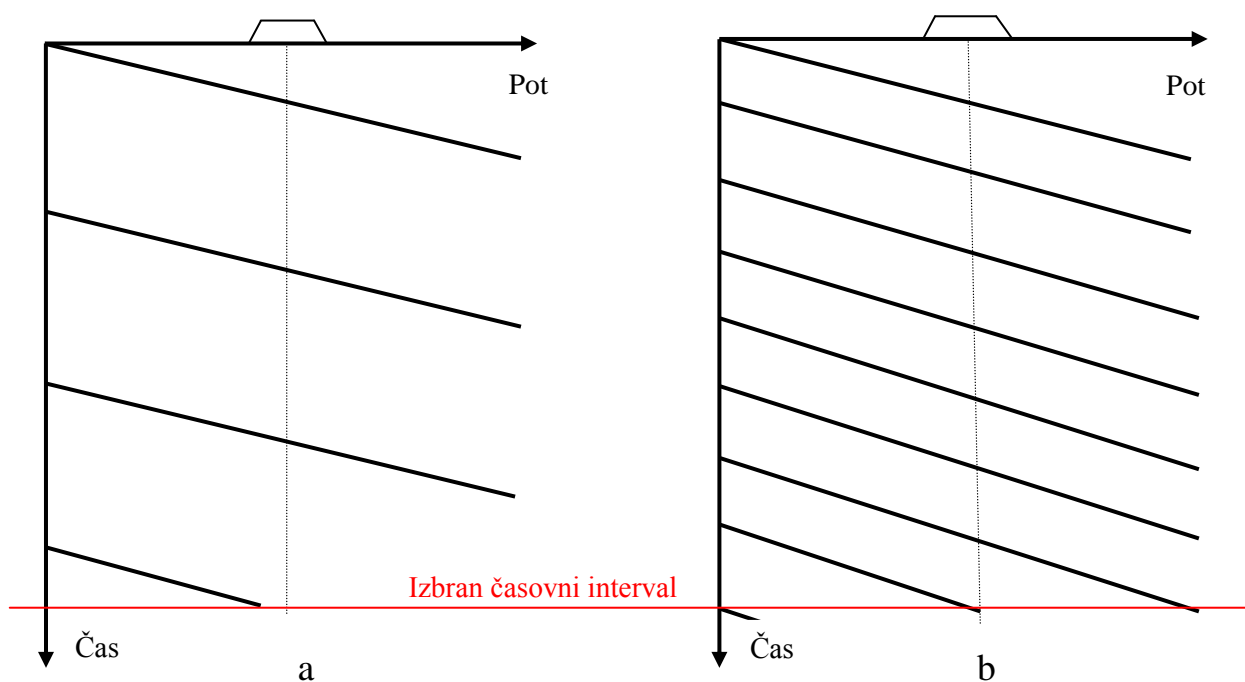
Preglednica 2 prikazuje tudi, da kapaciteta ni odvisna samo od tehničnih lastnosti infrastrukture, torej od števila tirov in postaj za križanje ali prehitevanje, ampak tudi od hitrosti vlakov in od razlik hitrosti vlakov. Različna hitrost vlakov negativno vpliva na doseganje visoke vrednosti kapacitete. Razlog, zakaj imajo različne hitrosti tako negativen vpliv na kapaciteto, je v tem, da je povprečna maksimalna gostota vlakov zmanjšana, saj je vozni red zasnovan tako, da hitrejši vlaki nikoli ne dohitijo počasnejših. Če imamo za hitre in počasne vlake ločene tire, - to je možno, če je proga štiritirna - lahko vlaki vozijo z maksimalno hitrostjo, ne da bi bila gostota nižja.

Preglednica 2: Kapaciteta proge glede na število tirov, hitrost in dodatno postajo (Vir: Mattsson, 2007)

| Število tirov | Hitrost [km/h] | Dodatna postaja | Kapaciteta tira [vlaki/h] |
|---------------|----------------|-----------------|---------------------------|
| 1             | 120            | Ne              | 2                         |
| 1             | 200            | Ne              | 3                         |
| 1             | 120            | Da              | 3,4                       |
| 1             | 200            | Da              | 4,8                       |
| 2             | 120            | Ne/da           | 12                        |
| 2             | 200            | Ne/da           | 12                        |
| 2             | 120/200        | Ne              | 4,8                       |
| 2             | 120/200        | Da              | 6                         |
| 4             | 120/200        | Ne/da           | 12                        |

## 5.2 Pogostost vlakov

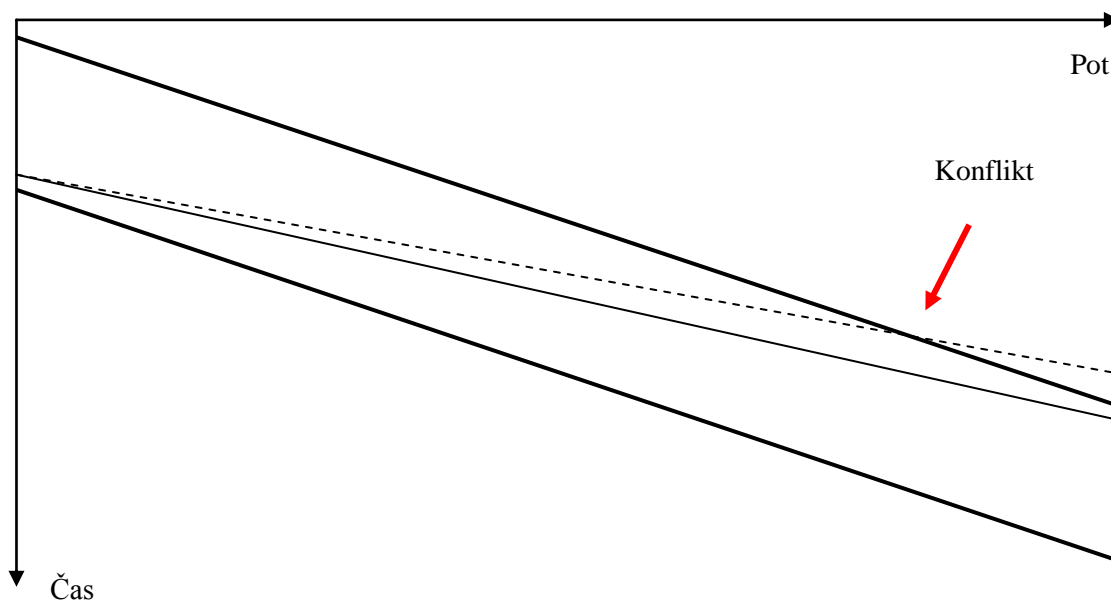
Na progah, kjer je obratovanje homogeno, so vlaki lahko zelo pogosti. Če so vlaki pogosti, je število vlakovnih poti v izbranem časovnem intervalu večje, kot če so redki. Pogostejši kot so vlaki, večja je kapaciteta.



Slika 7: Redki in pogosti vlaki

Če so vlaki pogosti (Slika 7b), znaša kapaciteta obravnavanega odseka 8 vlakov/h. Če so vlaki redkejši (Slika 7a), znaša kapaciteta 4 vlake/h. Če bi določali izkoriščenost kapacitete za primer na sliki (Slika 7), bi bila izkoriščenost kapacitete večja v primeru b, ker so vlaki pogostejši in je znotraj izbranega časovnega intervala večje število vlakovnih poti. Večje kot je število vlakovnih poti, daljši je čas zasedenosti infrastrukture, zato je izkoriščenost kapacitete večja.

Na progah, kjer vozijo različni vlaki, se zgodi, da hitrejši vlak dohiti počasnejšega, če časovni interval med zaporednimi vožnjami (ang. *headway time*) ni zadosten. Ker hitrejši vlak dohiti počasnejšega, mora hitrost in postanke prilagoditi hitrosti in postankom počasnejšega vlaka. Da preprečimo konflikte med hitrejšimi in počasnejšimi vlaki in omejimo sekundarne zamude, mora biti časovni interval med zaporednimi vožnjami dovolj dolg. Zaradi daljšega časa med zaporednimi vožnjami na progah za različne vlake ni možno, da bi bili vlaki tako pogosti, kot na progah, kjer vozijo vsi vlaki z enako hitrostjo. Zaradi heterogenosti obratovanja (različna hitrost vlakov, postanki in časovni interval med zaporednimi vožnjami) in zaradi večje hitrosti nekaterih vlakov, kar zahteva daljše časovne intervale med zaporednimi vožnjami, je kapaciteta proge manjša.

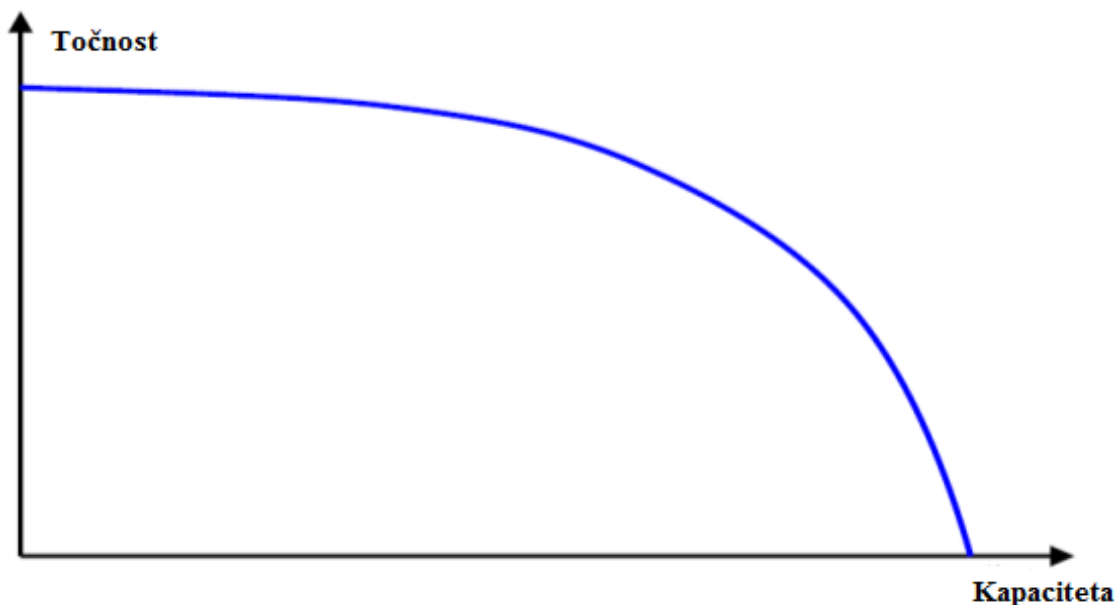


Slika 8: Nastanek konflikta (Vir: Landex et al., 2006)

Konflikt nastane, ko hitrejši vlak dohiti počasnejšega. Ker bo moral hitri vlak voziti za počasnejšim, ne bo več zagotavljal takšnih storitev, kot bi jih moral.

### 5.3 Stabilnost voznega reda

Od stabilnosti voznega reda je odvisna točnost železniških storitev. Stabilnost voznega reda, ki še ni bil uporabljen v praksi, je težko vrednotiti. Z izkušnjami je mogoče oceniti točnost vlakov, če so v voznem redu ali na infrastrukturi manjše spremembe. Če želimo oceniti točnost vlakov, kadar imamo večjo spremembo v voznem redu, je potrebno točnost preveriti s simulacijskimi orodji. Čeprav je točnost težko predvideti, v splošnem velja, da se točnost pri homogenem obratovanju zmanjša, če se poveča kapaciteta proge in njena izkoriščenost. Točnost je odvisna od stabilnosti voznega reda. Stabilnost voznega reda pa je neposredno povezana s tamponskim časom (ang. *buffer time*). Večja kot je zahtevana stabilnost voznega reda, daljši je tamponski čas. V primeru homogenega obratovanja je zaradi daljšega tamponskega časa kapaciteta manjša, ker lahko v izbranem časovnem intervalu odsek prevozi manjše število vlakov. Če je zahtevana manjša stabilnost, so vlaki lahko pogostejši in je zato kapaciteta večja. Tudi izkoriščenost kapacitete je obratno sorazmerna z zahtevano stabilnostjo voznega reda v primeru homogenega obratovanja.



Slika 9: Odvisnost med točnostjo in kapaciteto (Vir: Landex et al., 2006)

Če so vlaki zelo pogosti, torej je časovni interval med zaporednimi vožnjami krajši (ang. *headway time*), že majhna zamuda enega vlaka povzroči zamude številnih drugih vlakov. Zamude se pri prenašanju z enega vlaka na drugega samo še povečujejo. Če so vlaki zelo pogosti, je bolje, da se katerega izmed vlakov ukine. Zaradi tega se bo povečal tamponski čas, nevarnost zamud bo manjša, vrednost kapacitete in njene izkoriščenosti pa bo še vedno velika. Kapaciteto torej izkoristimo za točnost, ne pa za večje število vlakov.

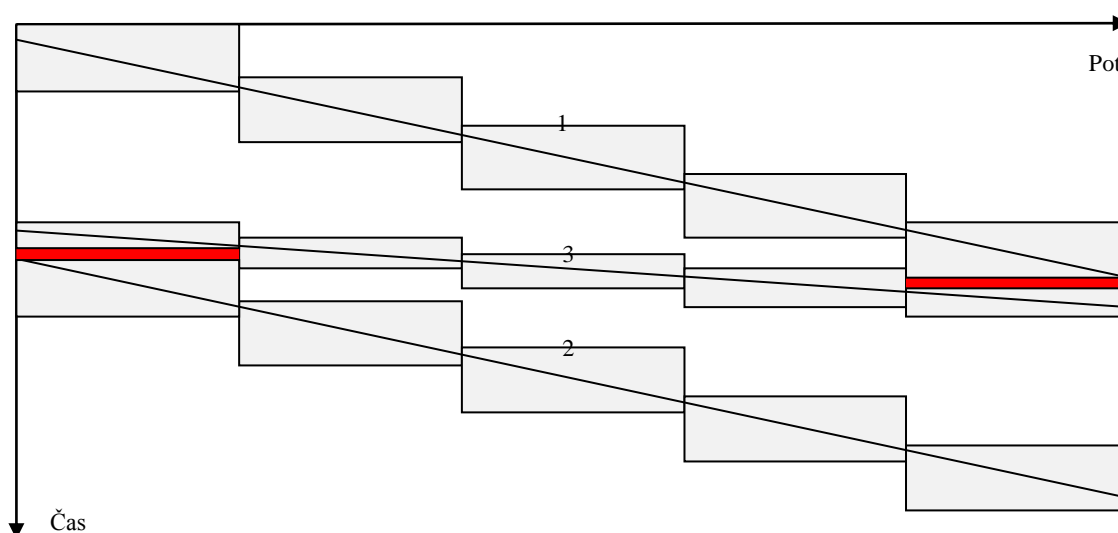
#### 5.4 Povprečna hitrost vlakov

Najprimernejšo potovalno hitrost je mogoče določiti na različne načine. Z vidika potnikov je najprimernejša potovalna hitrost takšna, pri kateri je celoten potovalni čas minimalen. Na obremenjeni železniški progi je optimalna potovalna hitrost tista, ki omogoča minimalen časovni interval med zaporednimi vožnjami vlakov (ang. *minimum headway time*), ker je kapaciteta tako najbolj izkoriščena. Optimalna potovalna hitrost za prevoznike je hitrost, ki zagotavlja najprimernejšo potovalno hitrost za potnike kot tudi minimalni časovni interval med zaporednimi vožnjami vlakov (Landex in Kaas, 2005).

Hitrost vlakov pomembno vpliva na kapaciteto. Ko vlak miruje, zaseda odsek neskončno dolgo. Ko vlak spelje, zaseda odsek krajši čas. Hitreje kot vozi vlak, hitreje odsek prevozi in ga zapusti, zato je odsek prej prost za zaporedni vlak. Hitreje kot vlaki vozijo, več jih prevozi določen odsek v izbranem časovnem intervalu. Vrednost kapacitete je večja. Z naraščanjem hitrosti pa narašča zavorna razdalja,

zato je zaradi varnosti potrebno povečati prostorski razmik in časovni interval med zaporednimi vožnjami vlakov. Daljši časovni interval in prostorski razmik zmanjšuje vrednost kapacitete.

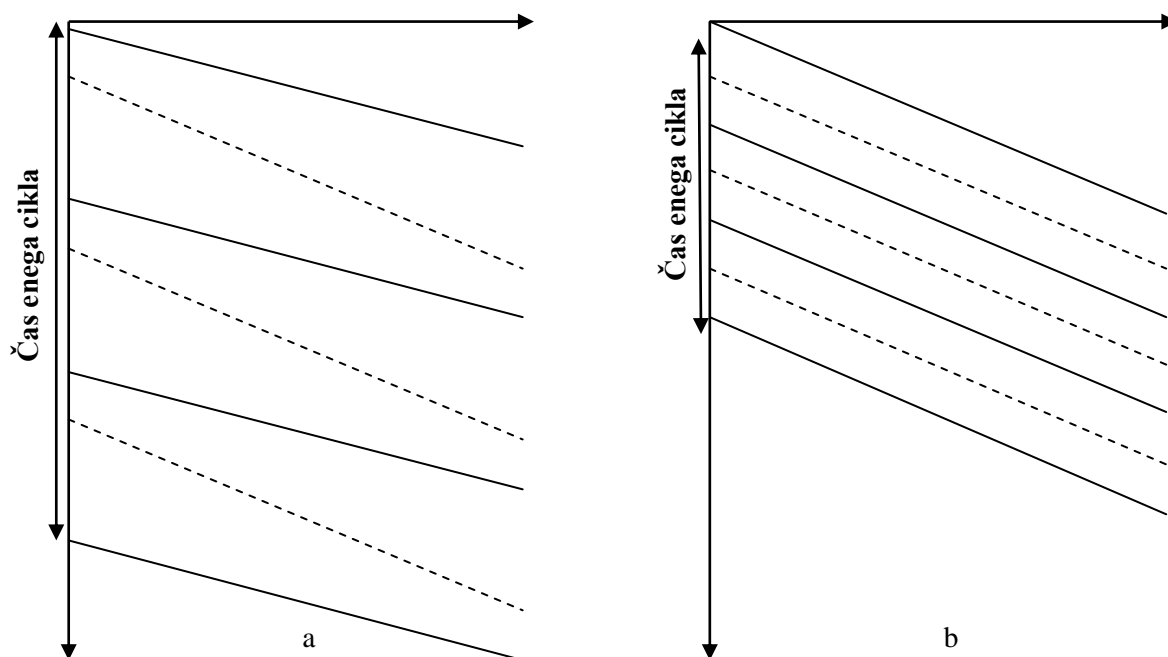
Visoko povprečno hitrost je mogoče doseči na progah, kjer je promet heterogen, vendar mora imeti proga na razpolago dovolj kapacitete, sicer pride do konfliktov med vlaki, kar prikazuje slika 10. Sivi pravokotniki, ki prikazujejo, koliko časa določen vlak zaseda posamezni odsek, se med seboj nikoli ne smejo prekrivati. Če bi se med seboj prekrivali, bi to pomenilo, da bi na določenem odseku vozilo več vlakov hkrati. To pa zaradi varnosti ni dovoljeno. Na sliki 10 sta z rdečo označena konflikta, kjer dva vlaka hkrati zasedata prostorski odsek.



Slika 10: Konflikt med vlakoma (Vir: Landex et al., 2006)

## 5.5 Heterogenost obratovanja

Heterogen vozni red pomeni, da na določeni progi vlaki vozijo z različno hitrostjo, postanki in časovnimi intervali med zaporednimi vožnjami (ang. *headway time*). Čas, ki je potreben za en cikel, je pri heterogenem voznem redu daljši kot pri homogenem. Vzrok za to so daljši časovni intervali med zaporednimi vožnjami, ki preprečujejo, da bi prišlo do konflikta med hitrejšimi in počasnejšimi vlaki. Posledica tega je manjše število vlakov na časovno enoto (torej manjša kapaciteta) v primeru heterogenega voznega reda.



Slika 11: Heterogen (a) in homogen (b) vozni red (Vir: Landex et al, 2006)

Za določitev heterogenosti voznega reda se uporabljata enačbi za izračun *SSHR* in *SAHR*. *SSHR* je obratna vrednost vsote najkrajših časov med zaporednima vožnjama vlakov (ang. *sum of shortest headway time reciprocals* = *SSHR*) in opisuje heterogenost hitrosti vlakov ter razporejenost vlakov v uri:

$$SSHR = \sum_{i=1}^N \frac{1}{h_{t,i}^A}, \quad (5)$$

kjer je:

$h_{t,i}^A$  ... najkrajši čas med zaporednimi vožnjama vlakov,

$N$  ... število opazovanih vlakov v nekem zaključenem ciklu.

*SAHR* je obratna vrednost vsote časov med zaporednimi vožnjama vlakov (ang. *sum of arrival headway time reciprocals* = *SAHR*) in opisuje raspored vlakov v uri na postaji:

$$SAHR = \sum_{i=1}^N \frac{1}{h_{t,i}}, \quad (6)$$

kjer je:

$h_{t,i}^-$  ...opazovan čas med zaporednimi vožnjami vlakov na koncu odseka,

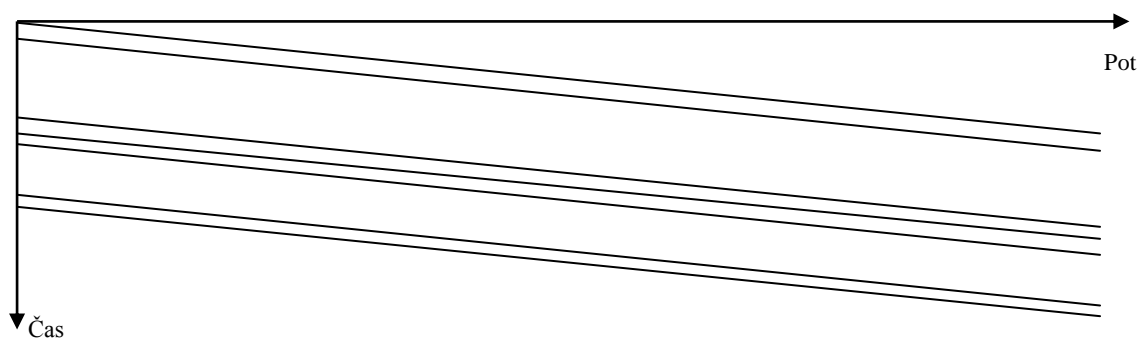
$N$  ...število opazovanih vlakov znotraj zaključenega cikla.

$SAHR$  je vedno manjši od  $SSHR$ . Enaka sta samo, ko je vozni red popolnoma homogen. Bolj kot je vozni red heterogen, večja je razlika med njima.

Homogenost lahko določimo, če združimo zgornji dve enačbi:

$$Homogenost = \frac{SAHR}{SSHR} = \frac{SAHR = \sum_{i=1}^N \frac{1}{h_{t,i}^-}}{SSHR = \sum_{i=1}^N \frac{1}{h_{t,i}^+}}, \quad (7)$$

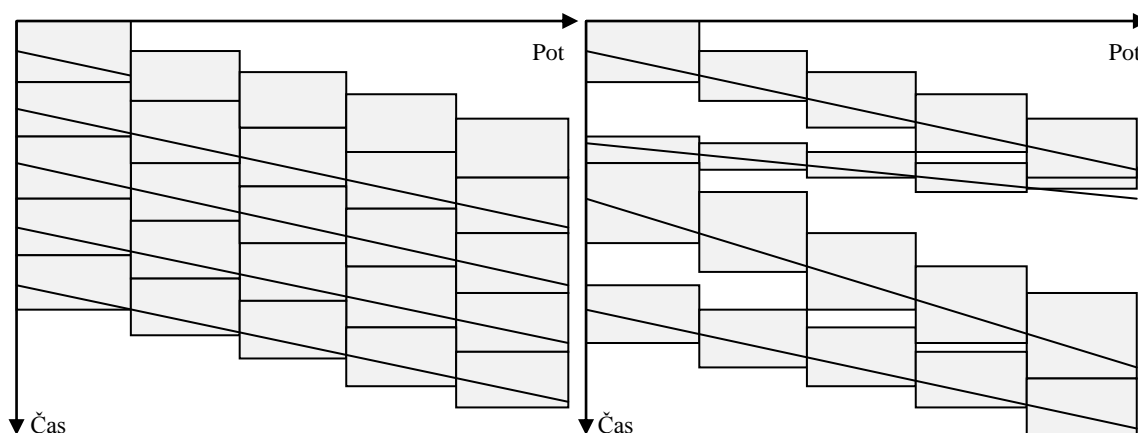
Faktor homogenosti je enak 1 tudi, ko so časovni intervali med zaporednimi vožnjami vlakov (ang. *headway time*) različni, čeprav se takšno obratovanje vlakov ne smatra za popolnoma homogeno.



Slika 12: Homogenost glede hitrosti (voznih časov) ter postankov in heterogenost glede časa med zaporednimi vožnjami vlakov (Vir: Landex, 2008)

Heterogenost obratovanja ima zelo velik vpliv na kapaciteto in njeno izkoriščenost. Vpliv ostalih treh parametrov (pogostost vlakov, povprečna hitrost, stabilnost voznega reda) je bil v predhodnih poglavjih (5.2, 5.3, 5.4) obravnavan z vidika homogenega obratovanja. V primeru homogenega obratovanja je veljalo, da je zaradi bolj pogostih vlakov znotraj izbranega časovnega intervala izkoriščenost kapacitete večja in obratno, zaradi manjšega števila vlakov pa manjša. Če je obratovanje heterogeno, pa lahko manj vlakov znotraj istega časovnega intervala pomeni večjo izkoriščenost kapacitete, kot v primeru homogenega obratovanja. Če primerjamo homogeno in heterogeno obratovanje znotraj istega časovnega intervala, večje število vlakov ne pomeni enostavno večje izkoriščenosti kapacitete.

Slika 13 prikazuje primer, ko ima homogen vozni red z večjim številom vlakov manjšo izkoriščenost kapacitete kot heterogen vozni red z manjšim številom vlakov.



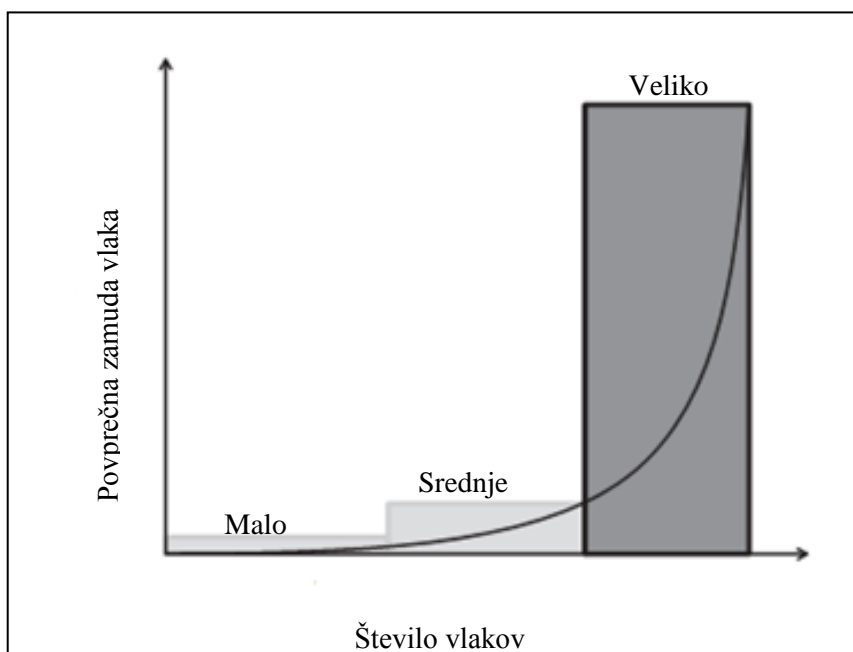
Slika 13: Homogen vozni red z velikim številom vlakov (levo) ima manjšo izkoriščenost kapacitete kot heterogen vozni red z manj vlaki (desno) (Vir: Landex, 2008)

Kolikšna je izkoriščenosti kapacitete heterogenega voznega reda, je odvisno od tega, kolikšne so razlike v hitrostih vlakov in v kakšnem vrstnem redu vlaki vozijo. Pomembno vlogo imajo prostorski odseki, kjer je časovni interval med zaporednimi vožnjami minimalen (t. i. kritični prostorski odseki), saj določajo, koliko so vlakovne poti pri določanju izkoriščenosti kapacitete lahko zgoščene. Ker so ti štirje parametri zelo odvisni eden od drugega, je potrebno poleg izkoriščenosti kapacitete vedno navesti tudi vrednosti vseh teh parametrov.



## 6 VREDNOTENJE KAPACITETE IN ZANESLJIVOSTI ŽELEZNIŠKIH STORITEV

Kapaciteta in zanesljivost storitev sta med seboj povezani. Zanesljivost sistema pomeni sposobnost, da sistem opravi funkcijo, ki mu je namenjena v skladu z zahtevanimi pogoji in v zahtevanem časovnem intervalu. Zanesljivost železniškega sistema najpogosteje določamo glede na točnost. Točnost pomeni, da večina vlakov vozi v skladu z voznim redom oziroma, da so odstopanja dejanskega voznega časa od načrtovanega minimalna. Točnost je odvisna od stabilnosti voznega reda. Stabilnost je zmožnost kompenziranja zamud in zagotovitev takšnih časov prihodov in odhodov vlakov, ki se čim bolj skladajo s prihodi in odhodi vlakov v voznem redu. V železniškem sistemu se zelo pogosto pojavljajo stohastični procesi, ki zmanjšujejo kapaciteto in povzročajo primarne zamude. Stohastični procesi so slučajni procesi, ki se spreminjajo s časom in krajem v skladu z zakoni verjetnosti. Stohastični procesi v železniškem prometu so nesreče, okvare voznega parka, poškodbe infrastrukture in podobno. Primarne zamude, ki so posledica stohastičnih procesov, povzročajo sekundarne zamude. Sekundarne zamude omejimo s časovnimi dodatki v voznem redu. Daljši kot so časovni dodatki, manjša je izkoriščenost kapacitete in večja zanesljivost železniških storitev. Potrebno je poiskati optimalno zvezo med izkoriščenostjo kapacitete in zanesljivostjo storitev, ki zadovoljuje tako uporabnika železnice, ki si želi največjo zanesljivost in pogostost storitev kot tudi upravljavca železniške infrastrukture, čigar cilj je zagotovitev čim večjega števila vlakovnih poti. Zanesljivost železniških storitev lahko vrednotimo na različne načine. Povprečna zamuda vlaka je dober indikator zanesljivosti storitev, ker prikazuje odvisnost med zanesljivostjo in izkoriščenostjo kapacitete, saj eksponentno narašča, če se kapaciteta povečuje (Abril et al., 2008).



Slika 14: Odvisnost povprečne zamude od števila vlakov (Vir: Abril et al., 2008)

Mattsson (2007) je opisal zvezo med načrtovano in nenačrtovano zamudo na primeru vlaka med dvema postajama. Predpostavil je, da je  $t_{min}$  minimalni vozni čas v idealnih pogojih, medtem ko je  $t$  dejanski vozni čas. Razlika med tema dvema spremenljivkama je (celotna) zamuda  $d$ . Del te zamude je že vključen v vozni red kot časovni dodatek voznemu času. Ta zamuda se imenuje načrtovana zamuda:

$$d_s = t_s - t_{min} \quad (8)$$

kjer sta:

$t_s$  ...načrtovani vozni čas glede na vozni red,

$t_{min}$  ...minimalni vozni čas.

Celotna zamuda je enaka:

$$d = d_s + d_u(d_s), \quad (9)$$

kjer sta:

$d_s$  ... načrtovana zamuda,

$d_u(d_s)$ ... nenačrtovana zamuda.

Načrtovana zamuda se spreminja od vlaka do vlaka na stohastičen način in je odvisna od načrtovane zamude samega vlaka in drugih vlakov. Nenačrtovana zamuda je negativna, če pride vlak na postajo prej, kot je predvideno v voznem redu.

Dejanski vozni čas izrazimo kot vsoto minimalnega voznega časa, načrtovane zamude in nenačrtovane zamude:

$$t = t_{min} + d_s + d_u(d_s), \quad (10)$$

Vsota prvih dveh spremenljivk je vozni čas, ki se nanaša na vozni red. Če bi potniki vrednotili vozni čas, bi bila njihova želja čim bolj zmanjšati pričakovani dejanski vozni čas  $E(t)$ . Znano je, da potniki in prevozniki veliko bolj negativno ocenijo nenačrtovano zamudo kot pa načrtovan vozni čas, ki jim je znan vnaprej. Če bi bilo znano, koliko je nenačrtovana zamuda odvisna od načrtovane, kot nakazuje funkcija  $d_u(d_s)$ , bi bil logičen cilj voznega reda poiskati načrtovano zamudo  $d_s$ , ki zmanjšuje dejanski vozni čas, ki ga zapišemo kot:

$$t_{min} + d_s + \tau E(d_u(d_s)), \quad (11)$$

kjer je:

$\tau$  ... relativni prirastek vrednosti časa nenačrtovane zamude v primerjavi z načrtovanim voznim časom.

Sočasno z večanjem načrtovane zamude vlakov se pričakovana nenačrtovana zamuda zmanjša. Ali se spleča povečati načrtovane zamude, je odvisno od vrednosti  $\tau$  in od točne funkcijske zveze med načrtovano in pričakovano nenačrtovano zamudo (Mattsson, 2007).

Za vrednotenje kapacitete železnice in zanesljivosti železniških storitev obstajajo številni pristopi. Najpomembnejše metode je mogoče razdeliti v štiri skupine: analitične, mikro-simulacijske, statistične in optimizacijske metode.

## 6.1 Analitične metode

Analitične metode so posebej uporabne v fazi načrtovanja, ko je potrebno oceniti veliko investicijskih možnosti, ko točen vozni red ni znan in ko je še nejasno, kako bo nova infrastruktura izkoriščena v prihodnosti. Za oblikovanje analitičnega modela je potrebno narediti določene poenostavitve, ki so v fazi načrtovanja veliko bolj sprejemljive, saj so podatki o oblikovnih parametrih, obratovalnih pogojih in povpraševanju v prihodnosti precej nenatančni. Analitične metode oblikujejo modele v obliki matematičnih enačb in algebrskih izrazov, ki so pogosto zelo zamudni za reševanje. Rezultati, dobljeni z različnimi analitičnimi metodami, pa se med seboj razlikujejo zaradi različnih poenostavitev in vhodnih podatkov. Primerjava rezultatov je zahtevna, splošni zaključki pa manj natančni in nezanesljivi. Prednost analitičnih metod je v tem, da ne zahtevajo toliko vhodnih podatkov kot simulacijski modeli.

Carey (1999) je z analitičnega vidika obravnaval zamude na dvotirnih progah, kjer so vlaki ločeni glede na smer vožnje. Določil je enačbe za izračun funkcij gostote verjetnosti sekundarnih zamud kot funkcije prostorskih razmikov (ang. *headway distance*) in funkcije gostote verjetnosti primarnih zamud. Določil je tudi enačbo za izračun pričakovane sekundarne zamude.

De Kort in sodelavci (2003) so opisali zanimiv način določanja kapacitete načrtovane železniške infrastrukture v odvisnosti od zahtevane zanesljivosti storitev. Razvili so metodo za izračun maksimalnega števila vlakov, ki lahko vozijo na določenem odseku in v določenem časovnem obdobju, z verjetnostjo, ki je večja ali enaka  $p$ . Vrednost  $p$  predstavlja zahtevano zanesljivost storitev. Ta pristop je bil uporabljen pri načrtovanju dvotirne proge za hitre vlake na Nizozemskem. Proga je dolga nekaj več kot 100 km in vključuje tri predore, od katerih je najdaljši dolg 7 km. Vsak predor ima ločeni cevi za vsako smer. Zaradi evakuacijskih razlogov mora biti ena od tunelskih cevi vedno prosta

in na razpolago za izhod v sili. Predori delujejo kot enotirna proga na sicer dvotirni progi. Za vsako smer se načrtuje 8 vlakov na uro. Ta vrednost naj bi se do leta 2015 povečala na 16 vlakov na uro. Preglednica prikazuje kapaciteto najdaljšega predora v odvisnosti od zahtevane zanesljivosti. Pristop, ki so ga predlagali De Kort in sodelavci (2003), prikazuje vzročno zvezo med kapaciteto in zanesljivostjo storitev. Vzročna zveza pomeni zvezo med dvema spremenljivkama, v tem primeru sta to kapaciteta in zanesljivost storitev, ki sta odvisni ena od druge. Sprememba ene spremenljivke pomeni spremembo druge spremenljivke. Povečevanje zahtevane zanesljivosti pomeni zmanjševanje kapacitete.

Preglednica 3: Kapaciteta najdaljšega predora glede na zahtevano zanesljivost  $p$  (Vir: de Kort et al., 2003)

| Zahtevana zanesljivost $p$          | 0.70 | 0.75 | 0.80 | 0.85 | 0.90 | 0.95 | 0.99 |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Kapaciteta [vlaki na uro in na tir] | 5    | 5    | 5    | 4    | 4    | 4    | 2    |

Huisman in Boucherie (2001) sta razvila model, uporaben za analizo zamud v odvisnosti od števila vlakov na dvotirnih progah, kjer je promet heterogen in kjer prehitevanje ni možno. Z uporabo tega modela je mogoče določiti, ali vozi vlak s prostim ali z dejanskim voznim časom in kolikšne so zamude. Prednost modela je, da je uporaben za analizo zamud tudi, ko so samo napovedi o pogostosti različnih vrst vlakov, ni pa točnega voznega reda. Z modelom je mogoče določiti vrstni red vlakov, pri katerem so zamude najmanjše.

Matematična ideja modela je, da za določeno število vlakov v zaporedju velja rekurzivnost. Pri rekurzivnem zaporedju je podanih nekaj začetnih členov, ostale člene pa izračunamo po določeni enačbi s pomočjo prejšnjih členov. Dejanski vozni čas vlaka  $n$  v zaporedju vlakov določimo po enačbi:

$$R_0 = F_0, \tag{12}$$

$$R_n = \max (F_n, R_{n-1} - A_n), \tag{13}$$

kjer so:

$R_n$  ...dejanski vozni čas vlaka  $n$ ,

$R_{n-1}$ ...dejanski vozni čas vlaka  $n-1$ ,

$F_n$  ...prosti vozni čas vlaka  $n$  (vozni čas, ko vlak nima zamude),

$T_n$  ...čas, ko vlak  $n$  vstopi v določen odsek,

$H_n$  ... minimalni čas med zaporednima vožnjama vlakov (ang. *minimum headway time*),

$A_n$  ... dejanski tamponski čas (ang. *actual buffer time*), ki ga določimo po enačbi:

$$A_n = T_n - (T_{n-1} + H_n). \quad (14)$$

Vlak  $n$  lahko vozi v skladu s prostim voznim časom  $F_n$  samo, če ne zamuja zaradi zamud drugih vlakov (nima sekundarne zamude). Prosti vozni čas  $F_n$  vlaka  $n$  je vedno krajši od dejanskega voznega časa  $R_n$ .

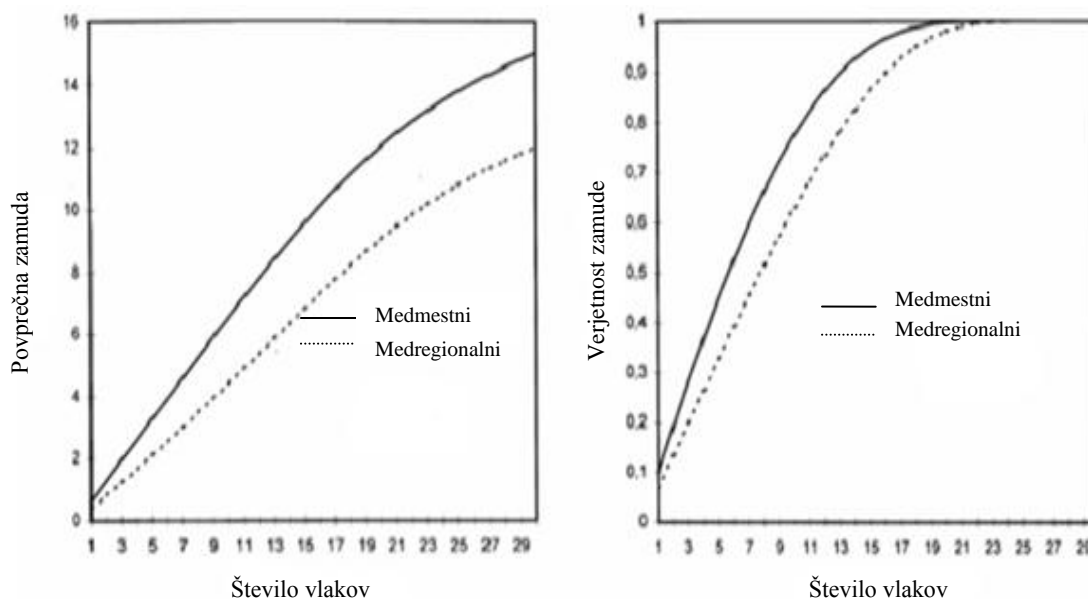
Ker na istem odseku ne moreta voziti dva vlaka hkrati, mora veljati tudi:

$$T_{n-1} + R_{n-1} + H_n \leq T_n + R_n. \quad (15)$$

Vlak  $n$  ne sme zapeljati na odsek, na katerem je vlak  $n-1$ , dokler se ne izteče dejanski vozni čas  $R_{n-1}$  vlaka  $n$  in minimalni čas med zaporednimi vožnjami  $H_n$ .

Model je bil uporabljen za analizo zamud na 67 km dolgi dvotirni progi na Nizozemskem, ko vozni red še ni bil na voljo. Edina informacija je bila pogostost različnih vrst vlakov. Na progi vozijo trije različni vlaki: regionalni, medregionalni in medmestni. Prosti vozni časi znašajo 33 min za medmestni, 36 min za medkrajevni in 48 min za regionalni vlak. Predpostavili so, da so vsi vlaki v povprečju približno enako pogosti in da pridejo na cilj v naključnem vrstnem redu. Tamponski čas je eksponentno porazdeljen, minimalni čas med zaporednimi vožnjami znaša 2 min.

Slika 15 prikazuje, kako se povprečne zamude in verjetnost zamud spreminjajo glede na število vlakov na uro na tir. Regionalni vlaki so najpočasnejši vlaki na progi in nikoli ne dohitijo nobenega drugega predhodnega vlaka, zato lahko vozijo v skladu s prostim voznim časom, ki traja 48 min ne glede na to, kolikšno je število vlakov. Ko je vlakov malo, ni nobenih sekundarnih zamud, ker zaradi dolgega časa med zaporednimi vožnjami hitrejši vlaki ne dohitijo počasnejših. Vsi vlaki vozijo s prostim voznim časom. Ko se število vlakov poveča, se povečata povprečna zamuda in verjetnost zamud, ker hitri vlaki dohitijo počasnejše zaradi krajšega časa med zaporednimi vožnjami. Ko znaša kapaciteta tira 30 vlakov/h (to je največje možno število vlakov na uro in na tir pri danem minimalnem časovnem intervalu med zaporednimi vožnjami 2 min), vozijo vsi vlaki s hitrostjo regionalnega vlaka. Torej medmestni in medregionalni vlak ne vozita več s prostim voznim časom, ampak z dejanskim voznim časom, ki znaša  $R_n = R_{n-1} - A_n$ . Njun vozni čas je odvisen od predhodnega regionalnega vlaka, ki ga dohitita. Povprečne zamude so  $48-36=12$  min za medregionalni in  $48-33=15$  min za medmestni vlak.



Slika 15: Povprečna zamuda in verjetnost zamud glede na število vlakov (Vir: Huisman in Boucherie, 2001)

Mednarodna železniška zveza je leta 1983 predlagala metodo UIC 405, opisano v kodeksu UIC 405-1 in 405-2. Ta metoda je bila leta 1996 nadomeščena z novo objavo v kodeksu UIC 405 OR, ki pa ne predpisuje več metodologije izračuna, pač pa določa samo enotna načela in smernice za izračun propustnosti (kapacitete) železniških prog v odvisnosti od kakovosti obratovanja (Zgonc, 2003). Slovenske železnice določajo kapaciteto prog po metodi UIC 405-1 in 405-2 ob upoštevanju smernic kodeksa UIC 405 OR.

Kapaciteto  $N$  izračunamo po enačbi:

$$N = \frac{T}{I_p^{min} + t_r + t_d}, \quad (16)$$

kjer so:

$T$  ... časovno obdobje, za katerega se računa kapaciteta (običajno 24 ur),

$t_r$  ... rezervni čas, namenjen omejitvi sekundarnih zamud, ki znaša  $0,67 I_p^{min}$  [min] za obdobje 24 ur,

$t_d$  ... funkcija števila postaj oziroma števila medpostajnih odsekov in znaša  $0,25 n$  [min], kjer je  $n$  število postaj na obravnavani progi,

$I_p^{min}$  ... minimalni interval med zaporednimi vožnjami vlakov.

Kapaciteta celotne proge je enaka kapaciteti omejitvenega prostorskega odseka. To je tisti odsek, na katerem je čas vožnje vlakov najdaljši (Zgonc, 2003).

## 6.2 Mikro-simulacijske metode

Pri simulacijah gre za posnemanje dinamičnega obnašanja železniškega sistema v odvisnosti od predhodno definiranih karakteristik infrastrukture, voznega reda in voznega parka. S simulacijami lahko prikažemo katerikoli zapleten proces, pri katerem vlaki vplivajo eden na drugega. Slaba stran simulacijskih modelov je, da zahtevajo zelo natančne vhodne podatke o infrastrukturi, voznem parku in voznem redu. Če uporabljamo simulacijske metode v fazi načrtovanja, so podatki o voznem redu še neznan, zato je potrebno narediti določene predpostavke. Te predpostavke vpeljejo v rezultate netočnosti.

Hallowel in Harker (1998) sta v svoji študiji obravnavala povprečne zamude in standardni odklon zamude. Simulirala sta železniški promet na dveh različnih železniških progah v ZDA. Predstavljeni so rezultati simulacij na eni izmed prog, in sicer na progi, dolgi 444 km, ki je manj kot 3% dvotirna. Na dan lahko vozi 22, 29 ali 33 vlakov. Netočnost odhodov vlakov na začetku železniške proge je eksogeno podana (netočnost zaradi sekundarnih ali eksogenih zamud) in znaša 50% (nizka), 100% (povprečna) in 150% (visoka) povprečnega standardnega odklona ( $SD$  = standardna deviacija) napake časa odhoda.

Rezultati simulacije so prikazani v preglednici (Preglednica 4). Zamuda je definirana kot razlika med dejanskim in prostim voznim časom vlaka. Povprečna zamuda je zelo občutljiva na število vlakov in neobčutljiva na netočnost časa odhoda. Za povprečni nivo netočnosti (100%) odhoda povprečna zamuda naraste z 51 min na 90 min, če se število vlakov poveča z 22 na 33 vlakov na dan. Za standardni odklon zamude je situacija obratna. Standardni odklon zamude je precej občutljiv na netočnost odhoda, ni pa občutljiv na število vlakov. Če vozi na dan 29 vlakov, se standardni odklon poveča z 18 min na 23 min, če se netočnost odhoda poveča s 50% na 150% povprečnega standardnega odklona napake odhoda. Za povprečno netočnost odhoda se standardni odklon poveča z 18 min na 20 min, če se število vlakov poveča z 22 na 33 na dan.

Preglednica 4: Odvisnost povprečne zamude in standardnega odklona zamude od števila vlakov in netočnosti odhoda (Vir: Hallowel in Harker, 1998)

| Število vlakov | Netočnost odhoda | SD napake časa odhoda | Povprečna zamuda | SD zamude |
|----------------|------------------|-----------------------|------------------|-----------|
| 22 na dan      | Nizka            | 2.6                   | 49.7             | 12.6      |
|                | Povprečna        | 5.1                   | 51.2             | 17.9      |
|                | Visoka           | 7.7                   | 51.1             | 22.3      |
| 29 na dan      | Nizka            | 2.6                   | 72.1             | 18.0      |
|                | Povprečna        | 5.1                   | 71.0             | 19.7      |
|                | Visoka           | 7.7                   | 74.1             | 23.2      |
| 33 na dan      | Nizka            | 2.6                   | 89.5             | 16.3      |
|                | Povprečna        | 5.2                   | 89.7             | 19.7      |
|                | Visoka           | 7.7                   | 89.7             | 24.0      |

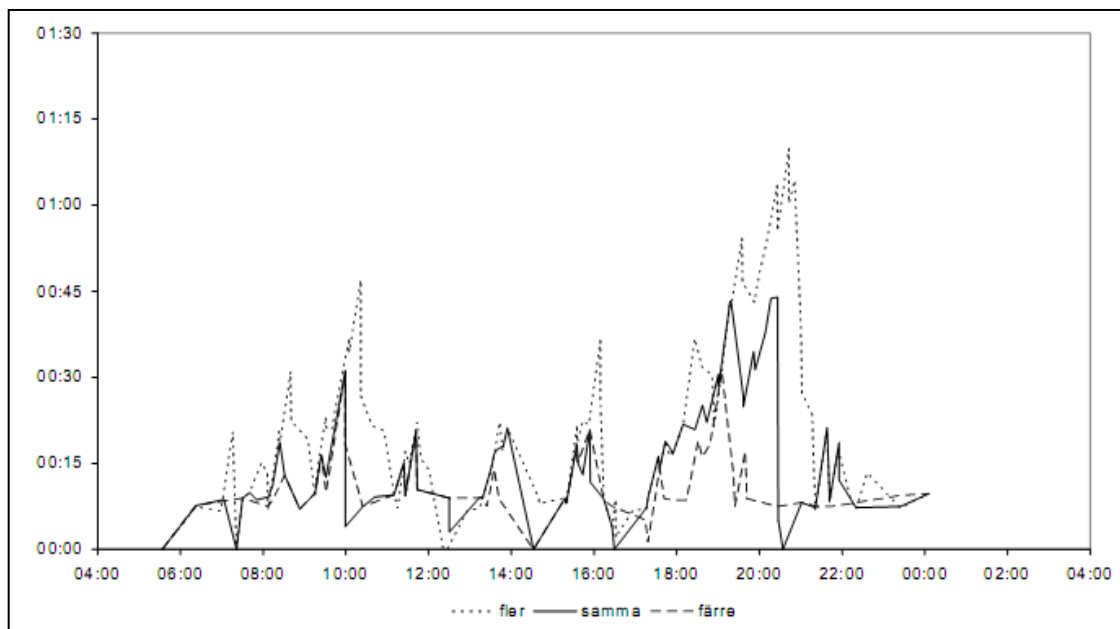
V nadaljevanju je opisana analiza nezanesljivosti železniškega sistema zaradi izrednih okvar (Wiklund, 2003). Simulacija stanja po okvari tehničnega sistema, ki podpira delovanje železnice, je bila narejena z uporabo mikro-simulacijskega programa RailSys. RailSys je bil prvotno razvit za izdelavo voznega reda in za načrtovanje novih ali obstoječih prog, vozlišč ali mrež. S simulacijo prekinjenih in neprekinjenih voženj vrednoti tudi stabilnost in kakovost voznega reda.

Obravnavali so požar v centrali signalno varnostnih naprav na železniški postaji Järna na dvotirni progi približno 40 km južno od Stockholma, ki se je zgodil poleti 2000. Zaradi te nesreče signalno varnostne naprave niso delovale. Ko je promet ponovno stekel, je vozilo manj vlakov kot pred nesrečo, hitrost je bila zmanjšana na 40 km/h in električni signalni sistem je nadomestil ročni. Postaja je delovala kot dvotirna proga, na kateri je bila hitrost zelo zmanjšana. Z uporabo programa RailSys so izvedli obsežno kalibracijo modela. Povprečna simulirana zamuda je znašala 16.1 min, povprečna opazovana zamuda v prvih dneh po nesreči pa je znašala 17.6 min.

Slika 16 prikazuje vrednosti povprečne zamude glede na tri različne vrednosti števila vlakov: 66 vlakov na dan, 84 vlakov na dan in 50 vlakov na dan. Povprečna zamuda se med dnevom zelo spreminja. Konice so okoli 10. in 20. ure. Pri dejanskem številu vlakov (66 vlakov na dan), ki so vozili po nesreči, znaša povprečna zamuda 30 min v jutranji konici in 45 min v večerni konici. 84 vlakov na dan ustreza dejanskemu številu vlakov pred nesrečo. Če bi tudi po nesreči vozilo 84 vlakov na dan, bi znašala povprečna zamuda 46 min v jutranji konici in 70 min v večerni konici. Če je 50 vlakov na dan, znaša povprečna zamuda 30 min tako v jutranji kot tudi v večerni konici. Vse zamude so povprečne zamude, dejanske pa nihajo okrog teh vrednosti.

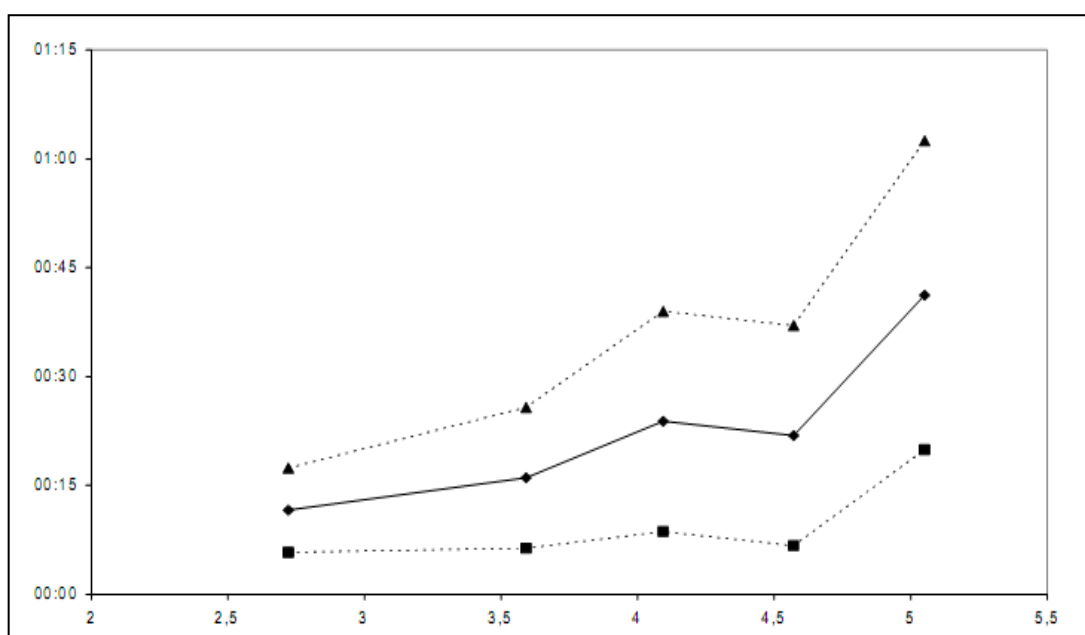


Slika 16 in slika 17 prikazujeta spreminjanje vrednosti povprečne zamude in njenega standardnega odklona glede na čas dneva in število vlakov na uro. Z naraščanjem števila vlakov se povprečna zamuda povečuje, vendar njuna odvisnost ni linearna. To si razlagamo tako, da ko se število vlakov poveča, je potrebno povečati načrtovani vozni čas, zato da je vozni red izvedljiv.



Slika 16: Povprečna zamuda v odvisnosti od dela dneva (Vir: Wiklund, 2003)

Prikazani so trije različni nivoji izkoriščenosti kapacitete: »fler« pomeni 84 vlakov na dan, »samma« pomeni 66 vlakov na dan, »färre« pomeni 50 vlakov na dan.



Slika 17: Povprečna zamuda v odvisnosti od števila vlakov na uro (Vir: Wiklund, 2003)

Polna črta predstavlja povprečno zamudo, črtkana črta pa njen standardni odklon ( $\pm$ ).

Eno izmed orodij za simulacijo železniškega sistema je tudi OpenTrack (OpenTrack Railway Technology). Več o programu je v poglavju 8.

### 6.3 Statistične metode

Statistične analize so eden izmed načinov za študijo zveze med izkoriščenostjo kapacitete in zamudami. Pomembna je študija Gibsona in sodelavcev (2002), ki temelji na podatkih o britanski železniški mreži po uvedbi uporabnine. Razvili so metodo za definiranje mejnih stroškov dodatnega vlaka, ki so odvisni od sekundarnih zamud, te pa so posledica določenega deleža primarnih zamud.

Namen študije Gibsona in sodelavcev (2002) je določitev zveze med sekundarno zamudo in izkoriščenostjo kapacitete, da se tako omogoči, da se stroški dodatnega vlaka pravilno odražajo v uporabninah. Gibson in sodelavci (2002) so spreminjali vrednosti sekundarnih zamud v odvisnosti od izkoriščenosti kapacitete za različne odseke proge in za različna časovna obdobja. Ugotovili so, da zvezi med sekundarnimi zamudami in izkoriščenostjo kapacitete najboljše ustreza eksponenten odnos:

$$D_{it} = A_i \exp(\beta C_{it}), \quad (17)$$

kjer so:

$D_{it}$  ...sekundarna zamuda na progi  $i$  v časovnem obdobju  $t$ ,

$A_i$  ...specifična konstanta odseka,

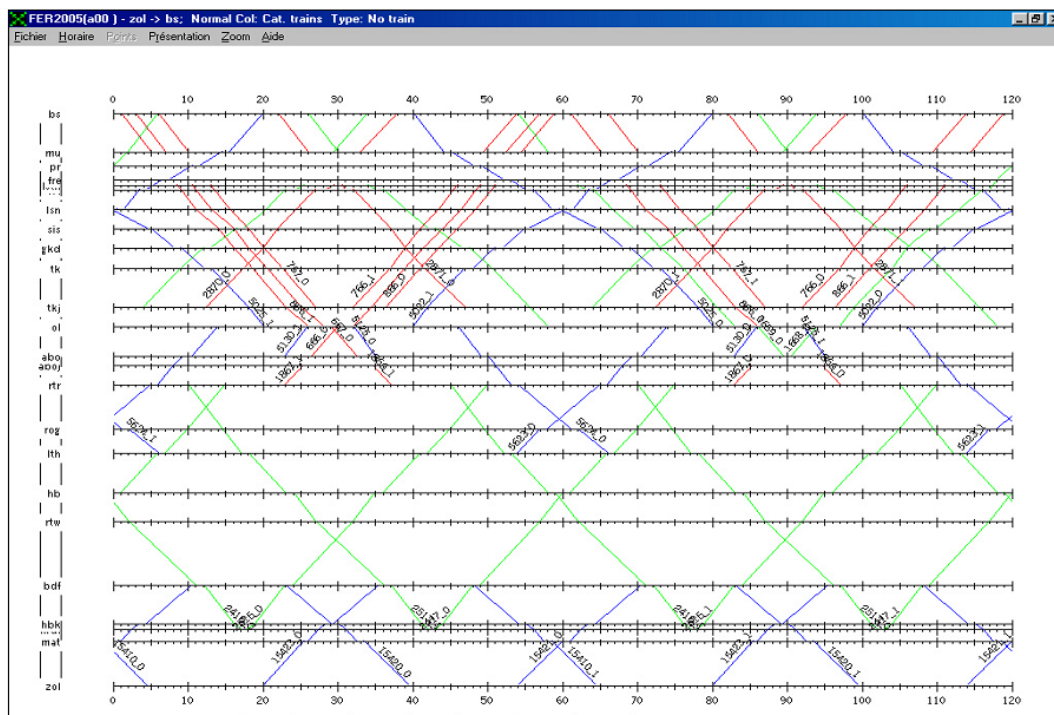
$\beta$  ...specifična konstanta proge (običajno se giblje med 1,1 in 4,1),

$C_{it}$  ...je izkoriščenost kapacitete na odseku  $i$  v časovnem obdobju  $t$ .

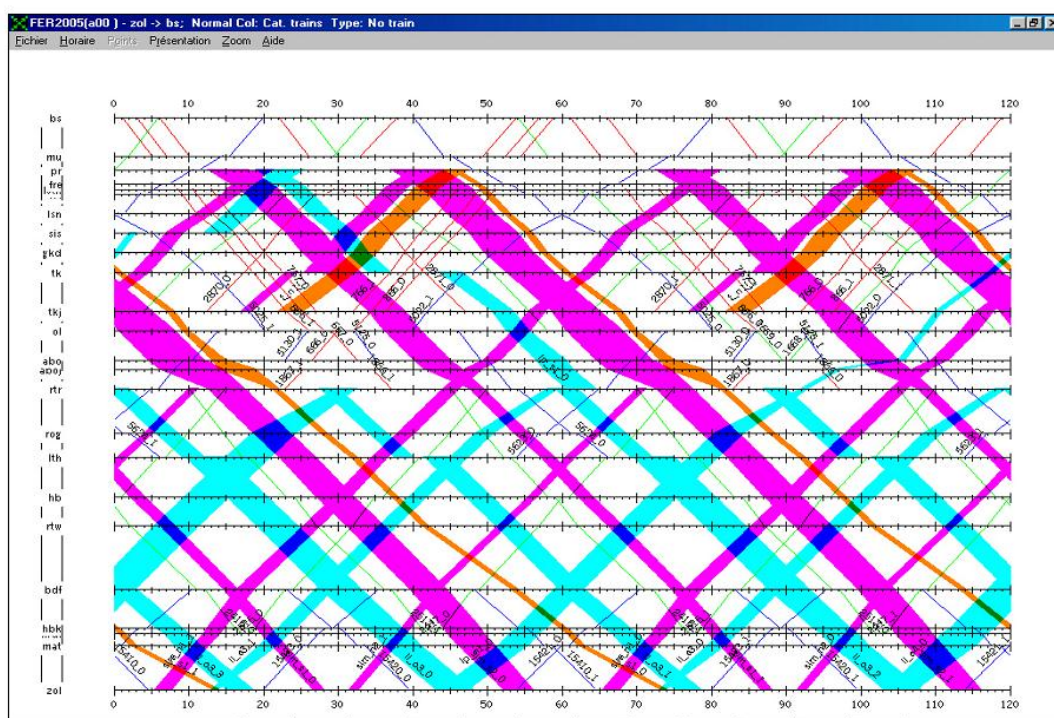
Našli so pozitivna in statistično značilna razmerja za 20 do 24 prog v mreži. Ta študija kaže, da je mogoče izpeljati pomembne odnose med sekundarnimi zamudami in izkoriščenostjo kapacitete. Ocenjeni konstanti  $\beta$  in  $A$  odražata razlike med obravnavanimi odseki prog vključno z »normalnim« deležem primarnih zamud za različne odseke proge. Odnosi so empirično podprti, vendar ne prikazujejo, kako primarne zamude povzročajo sekundarne.

## 6.4 Optimizacijske metode

Namen optimizacijskih modelov pri vrednotenju kapacitete železniških prog je doseganje optimalno zasičenih (ang. *saturated*) vozni redov. Optimalno zasičene vozne rede strokovnjaki običajno oblikujejo s pomočjo tehnik matematičnega programiranja. Posebna optimizacijska metoda je t. i. saturacija (ang. *saturation*). Cilj te metode je dodajanje čim večjega števila vlakov v osnovni vozni red v skladu z omejitvami infrastrukture, voznega parka in karakteristik obratovanja (vozni čas vlakov, čas postanka vlakov, interval med zaporednimi vlaki, zahtevan nivo uslug, prednosti ...). Capres je računalniški model, ki se uporablja pri izdelavi osnovnih vozni redov in njihovi saturaciji.



Slika 18: Osnovni vozni red oblikovan s programom Capres (Vir: Curchod in Lucchini, 2001)



Slika 19: Saturirani vozni red s programom Capres (Vir: Curchod in Lucchini, 2001)

Nekateri optimizacijski modeli se uporabljajo tudi kot podporni sistemi, ki so v pomoč tistim, ki razpošiljajo vlake, da v realnem času, ko so zamude že nastale, vlake ponovno razporedijo.

Mednarodna železniška zveza je leta 2004 v kodeksu UIC 406 o kapaciteti predlagala metodo za vrednotenje kapacitete železniške infrastrukture, ki sodi v okvir optimizacijskih metod. Bistvo te metode je zgoščanje vlakovnih poti v voznem redu. Metoda je natančneje opisana v nadaljevanju.

## 7 DOLOČANJE IZKORIŠČENOSTI KAPACITETE PO METODI UIC 406

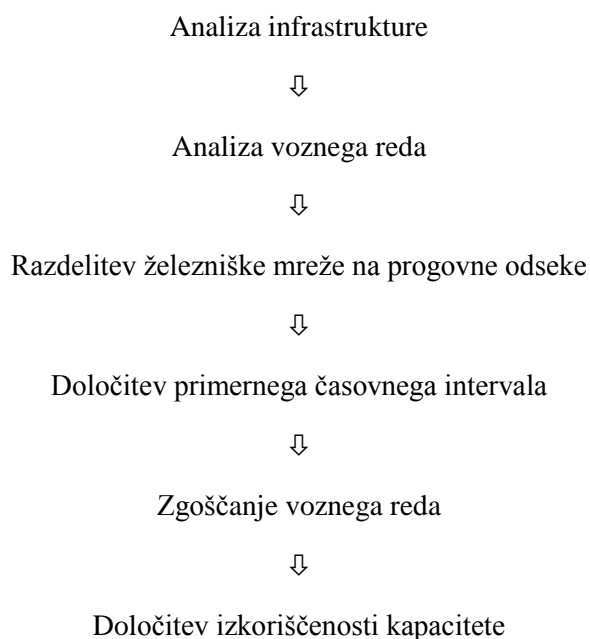
Metoda UIC 406 predstavlja enega izmed načinov določanja izkoriščenosti kapacitete in temelji na dejanski infrastrukturi in voznem redu. Princip te metode je zgoščanje voznega reda oz. vlakovnih poti v voznem redu znotraj predhodno določenega časovnega intervala.

Metoda UIC 406 je neke vrste referenca, ne pa zakon ali norma. Ker se metoda UIC 406 obnaša kot referenca in zaradi dejstva, da niti dve železniški progi nista identični, morajo biti poleg analize nujno prisotne interpretacije.

Metoda UIC 406 omogoča upravljavcem železniške infrastrukture, da določijo izkoriščenost kapacitete na osnovi različnih kriterijev, kot so: povpraševanje (potrebe trga ali zahteve podjetji), kvaliteta voznega reda (zahteve oblikovalcev voznega reda) ali učinkovita ter ekonomična izkoriščenost infrastrukture (zahteve upravljavcev infrastrukture).

### 7.1 Postopek izračuna izkoriščenosti kapacitete

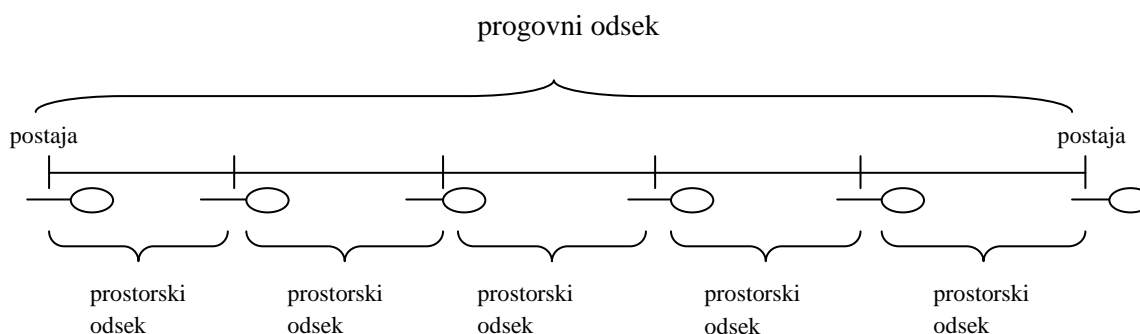
Slika 20 prikazuje potek določanja izkoriščenosti kapacitete po metodi UIC 406:



Slika 20: Postopek določanja izkoriščenosti kapacitete po metodi UIC 406 (Vir: Landex et al., 2006)

### 7.1.1 Analiza infrastrukture

Prvi korak pri vrednotenju kapacitete železnice je analiza infrastrukture. Obravnavana železniška mreža mora biti razdeljena na posamezne proge, proge pa morajo biti razdeljene na progovne odseke. Progovni odseki so sestavljeni iz posameznih prostorskih odsekov.



Slika 21: Progovni odsek in prostorski odseki

### 7.1.2 Analiza voznega reda

Vozni redi so osnovani za celotno mrežo in ne samo za progovni odsek, ki nas zanima pri analizi kapacitete. To pomeni, da je vozni red znotraj območja obravnave odvisen od infrastrukture in voznega reda zunaj območja obravnave, t. i. mrežni efekt. Mrežni efekt ima na železniški promet velik vpliv zato, ker je obratovanje vlakov med seboj zelo odvisno in mora biti temu primerno oblikovan tudi vozni red. Ko vlak na postaji zaseda določen tir, ne more drugi vlak zapeljati na isti tir, ampak mora počakati pred uvoznim signalom, da se tir sprost. Tudi določen prostorski odsek lahko zaradi varnostnih razlogov zaseda največ en vlak.

Pri zgoščevanju vlakovnih poti v voznem redu pa se medsebojni vplivi (mrežni efekt) med progovnimi odseki ne upoštevajo, saj se na podlagi zgoščanja določa samo vrednost izkoriščenosti kapacitete. Ne dela se nobenih zaključkov glede izvedljivosti zgoščenega voznega reda.

### 7.1.3 Razdelitev železniške mreže na progovne odseke

Izkoriščenost kapacitete proge mora biti določena za vsak progovni odsek posebej.

Progovni odseki so deli proge, kjer se:

- raznolikost prometa in/ali število vlakov,
- infrastruktura in signalne naprave

načeloma ne spreminjajo.

Progovni odsek omejujeta dve postaji ali vozlišči. Postaje so točke na mreži, kjer je mogoče prehitevanje, križanje in spreminjanje smeri, vključno z ranžirnimi postajami. Vozlišča so točke na mreži, kjer se združita najmanj dve progi. Vozlišča so lahko postaje ali križišča.

Progovni odsek lahko omejujeta dve sosednji postaji ali pa dve postaji, med katerima so vmesne postaje.

Izbira dolžine progovnega odseka, na katerem bo uporabljena metoda zgoščevanja, je bistvenega pomena. Kodeks UIC 406 navaja navodila glede zgoščevanja voznega reda na kratkih in dolgih progovnih odsekih. Kratki progovni odseki so odseki med dvema postajama. Lahko so med dvema sosednjima postajama ali pa med dvema postajama, med katerima so še vmesne postaje. Dolgi progovni odseki znašajo približno 300 km in se uporabljajo pri dolgih mednarodnih poteh tovornih vlakov.

### 7.1.4 Določitev primerne časovnega intervala

Vozni red analiziramo z zgoščevanjem načrtovanih vlakovnih poti v okviru predhodno določenega časovnega intervala.

Izkoriščenost kapacitete se spreminja glede na čas dneva, tedna in leta. Za zgoščanje vlakovnih poti v voznem redu izberemo reprezentativni dan (npr. četrtek).

Priporočeni časovni intervali so:

- konični čas,
- 24 ur na dan (reprezentativni dan).

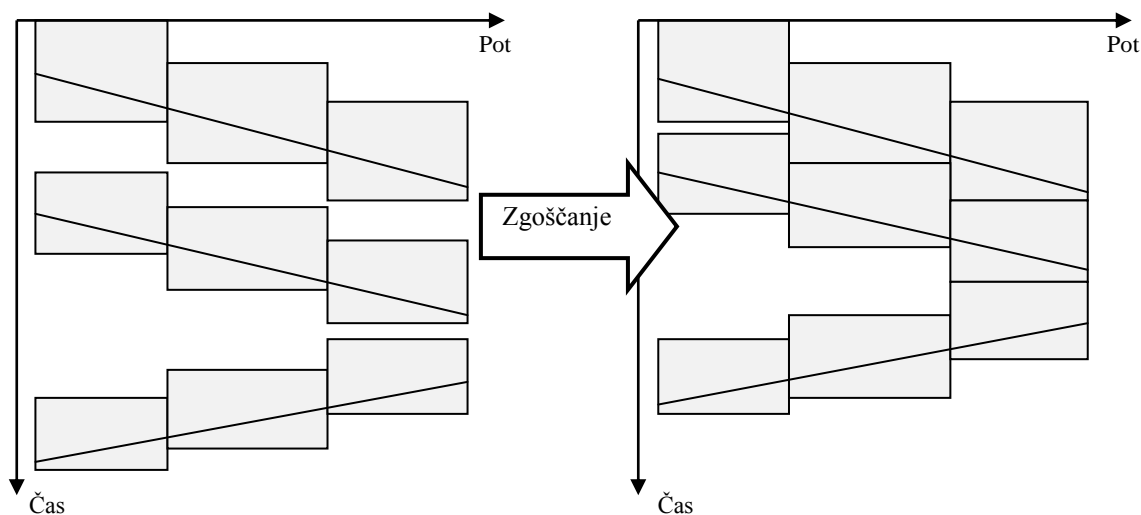
Progovne odseke in časovne intervale moramo določiti v skladu z upoštevanjem lastnosti posamezne proge.

### 7.1.5 Zgoščanje voznega reda

Vlakovne poti v voznem redu morajo biti tako zgoščene, da sta teoretični časovni interval med zaporednimi vožnjami in tamponski čas minimalna. Če je obratovanje homogeno, je tamponski čas na vseh prostorskih odsekih obravnavanega progovnega odseka po zgoščanju enak nič.

Pri zgoščanju vlakovnih poti mora zaporedje vlakov ostati enako. Ne sme se spreminjati voznega časa, dodatka voznemu času in časa postanka. Dovoljena so samo prehitevanja in križanja, ki so načrtovana v voznem redu.

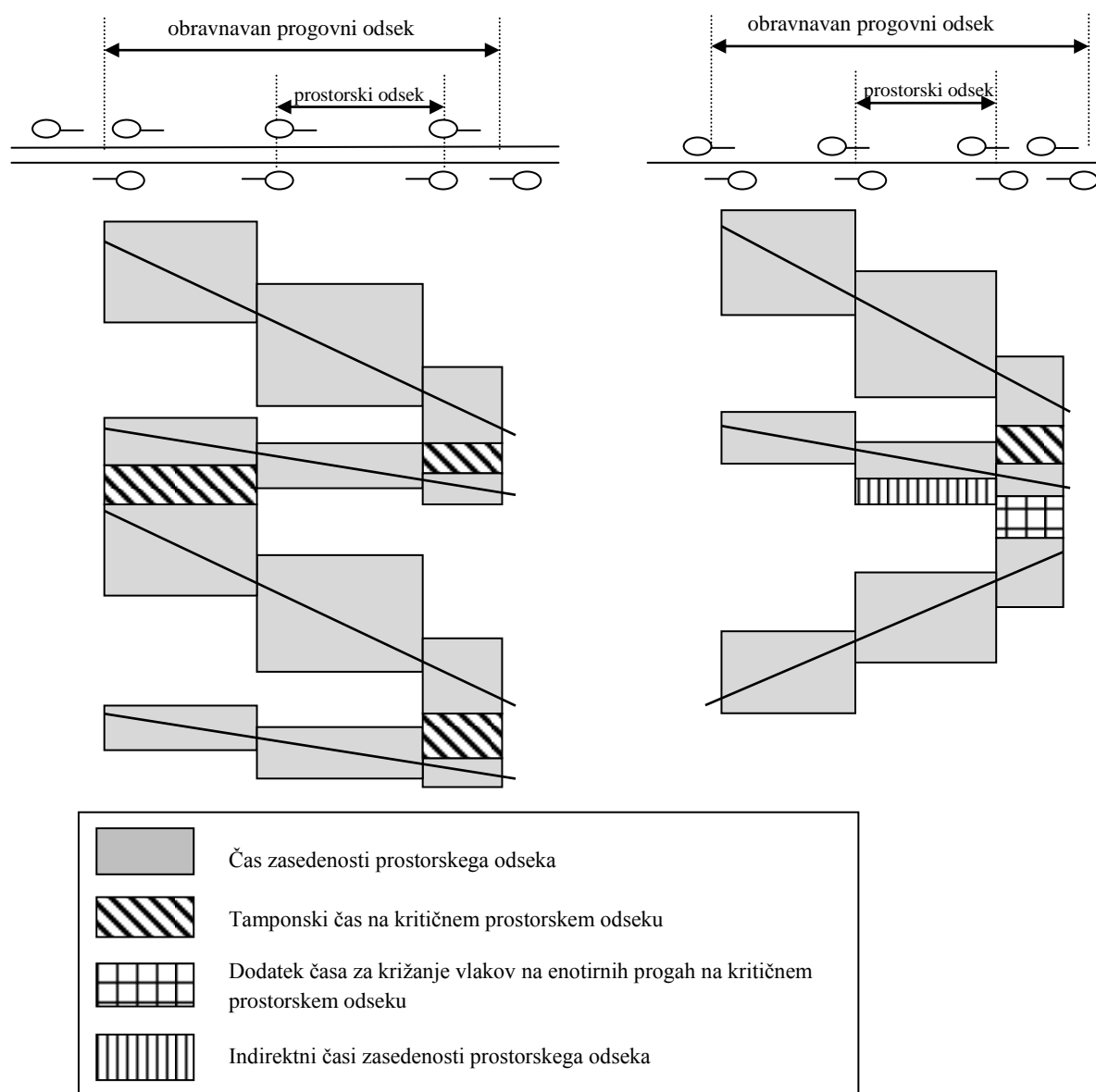
Zgoščanje je narejeno na podlagi grafične analize ali z analitičnim postopkom.



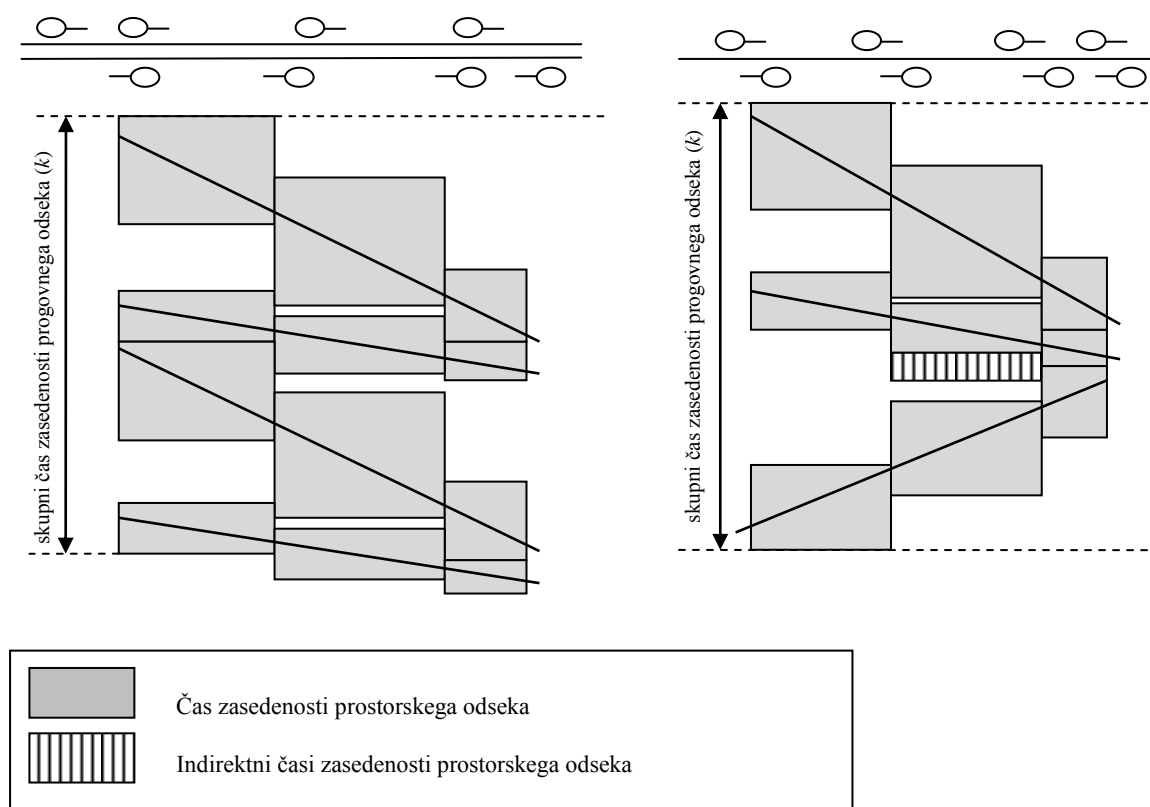
Slika 22: Zgoščanje voznega reda na enotirni progi (Vir: Landex, 2008)

Zgoščanje vlakovnih poti v voznem redu na izbranem progovnem odseku omejujejo prostorski odseki, na katerih je časovni interval med zaporednimi vožnjami minimalen (ang. *minimum headway time*) – kritični prostorski odseki. Tamponski čas je na odsekih, kjer je časovni interval med zaporednimi vožnjami minimalen, po zgoščanju enak nič.





Slika 23: Prvotni vozni red, ko vlakovne poti niso zgoščene (Vir: UIC, 2004)



Slika 24: Vozni red po zgoščanju vlakovnih poti (Vir UIC, 2004)

### 7.1.6 Izračun izkoriščenosti kapacitete

Izkoriščenost kapacitete je določena glede na zasedenost infrastrukture, kateri je potrebno prišteti še tamponski čas, dodatek časa za križanje vlakov na enotirnih progah (ang. *crossing buffer time*) in časovni dodatek za vzdrževanje infrastrukture (ang. *supplement for maintenance*). Zasedenost infrastrukture je vsota časov zasedenosti progovnega odseka vseh vlakov na progovnem odseku v izbranem časovnem intervalu. Zasedenost infrastrukture se določa na prvem prostorskem odseku vzdolž obravnavanega progovnega odseka.

K zasedenosti infrastrukture morajo biti prišteti tudi morebitni indirektni časi zasedenosti prostorskega odseka. Indirektni časi zasedenosti prostorskega odseka so časi, ko je tir zaseden bodisi zaradi priklapljanja/odklapljanja vagonov in menjavanja lokomotiv ali pa zaradi ranžiranja na postajah brez ranžirnih tirov.

Preglednica 5: Določitev izkoriščenosti kapacitete (Vir: UIC, 2004)

|  |  |          |   |   |  |
|--|--|----------|---|---|--|
| Izkoriščenost kapacitete [%] (ang. <i>capacity consumption</i> ) | <b>K</b>   | <b>A</b> | Zasedenost infrastrukture [min]   | Skupni čas zasedenosti progovnega odseka ( <b>k</b> ) [min] | Izbran časovni interval ( <b>U</b> ) [min] |
|  |  | <b>B</b> | Tamponski čas (ang. <i>buffer time</i> ) [min]  |   |  |
|  |  | <b>C</b> | Dodatek časa za križanje vlakov na enotirnih progah (ang. <i>crossing buffer time</i> ) [min] |   |  |
|  |  | <b>D</b> | Časovni dodatek za vzdrževanje infrastrukture (ang. <i>supplement for maintenance</i> ) [min] |   |  |
| Neizkoriščena kapaciteta [%] (ang. <i>unused capacity</i> )      | Uporabna kapaciteta [%] (ang. <i>usable capacity</i> ) |          |   |   |  |
|  | Neuporabna kapaciteta [%] (ang. <i>lost capacity</i> ) |          |   |   |  |

Izkoriščenost kapacitete določimo po enačbah:

$$k = A + B + C + D, \quad (18)$$

$$K = k * 100 / U, \quad (19)$$

kjer je:

*K* ... izkoriščenost kapacitete [%],

*U* ... izbran časovni interval [min].

Dobljeno vrednost izkoriščenosti kapacitete je potrebno primerjati s priporočenimi vrednostmi v kodeksu UIC 406 (poglavje 7.1.6.1).

Uporabna kapaciteta obstaja, če je mogoče neizkoriščeno kapaciteto uporabiti za dodatne vlake, ki zadovoljujejo zahteve uporabnikov za obravnavano območje in če so upoštevane stabilnostne zahteve

voznega reda. Če neizkoriščene kapacitete ni mogoče uporabiti za vključitev dodatnih vlakov, jo imenujemo neuporabna kapaciteta (UIC, 2004).

### 7.1.6.1 Priporočene vrednosti izkoriščenosti kapacitete

Mednarodna železniška zveza (UIC) je predlagala priporočene vrednosti izkoriščenosti kapacitete. Vrednosti se razlikujejo glede na vrsto proge in glede na izbran časovni interval.

Priporočene vrednosti so bile določene na osnovi metodologije zgoščanja na različnih železniških progah po Evropi.

Preglednica 6: Predlagane vrednosti izkoriščenosti kapacitete (Vir: UIC, 2004)

| Vrsta proge                       | Konična ura | Obdobje celega dneva | Dodatna pojasnila   |
|-----------------------------------|-------------|----------------------|---|
| Namenski podeželski potniški vlak | 85%         | 70%                  | Pri veliki izkoriščenosti kapacitete je možna odpoved katerega izmed vlakov.                      |
| Hitre proge                       | 75%         | 60%                  |   |
| Proge za mešani promet            | 75%         | 60%                  | Vrednost je lahko višja, če je število vlakov manjše (manj kot 5 na uro) z visoko heterogenostjo. |

Na primer, na progah za mešani promet je priporočena izkoriščenost kapacitete 75% v konični uri in 60% tekom ostalega dela dneva. Za konično uro je priporočena večja vrednost izkoriščenosti kapacitete, ker je takrat večje število potnikov, kar zahteva dodatne ali daljše vlake. Večja vrednost izkoriščenosti kapacitete v konični uri pomeni prevoz čim večjega števila potnikov, vendar hkrati povečano nevarnost sekundarnih zamud.

Na podlagi uporabe omenjene metodologije zgoščanja na železniških progah po Evropi, so upravljavci železniške infrastrukture ugotovili, da je priporočena vrednost izkoriščenosti kapacitete odvisna predvsem od deleža tamponskega časa – stabilnostne zahteve. Ker ne obstaja nobena splošna metoda, na podlagi katere bi bilo mogoče natančno določiti, kolikšno je zadostno trajanje tamponskega časa, je tudi natančne vrednosti izkoriščenosti kapacitete težko predpisati. Zaradi tega je Mednarodna železniška zveza (UIC) predlagala samo priporočene vrednosti. Pri uporabi v konkretnem primeru morajo biti priporočene vrednosti prilagojene lastnostim obravnavane proge oziroma progovnega odseka. Pri prilagajanju priporočenih vrednosti karakteristikam obravnavane proge moramo upoštevati naslednje kriterije:

- zanesljivost infrastrukture,
- zanesljivost voznega parka,
- medsebojna odvisnost med posameznimi progovnimi odseki proge (zamude na enem odseku vplivajo na zamude na drugem odseku in obratno),
- stopnja kakovosti, ki jo zahtevajo prevozniki v železniškem prometu,
- omejitve voznega časa,
- število vlakov na uro,
- dolžina progovnega odseka na progi in možnost, da se na njem omogoči prehitevanje in križanje.

#### **7.1.6.2 Infrastruktura, kjer je izkoriščena vsa kapaciteta**

Če je vrednost izkoriščenosti kapacitete višja od priporočenih vrednosti izkoriščenosti kapacitete (UIC, 2004), potem se takšno infrastrukturo smatra kot infrastrukturo, na kateri je vsa kapaciteta izkoriščena. V tem primeru ni mogoče vključiti dodatnih vlakovnih poti brez spreminjanja infrastrukture.

Teoretično je lahko izkoriščenost kapacitete oziroma čas zasedenosti progovnega odseka enaka trajanju izbranega časovnega intervala (torej je izkoriščenost kapacitete 100%). Če je vrednost večja od 100%, potem gre za infrastrukturo, na kateri je vsa kapaciteta izkoriščena.

#### **7.1.6.3 Infrastruktura z neizkoriščeno kapaciteto**

Če je vrednost izkoriščenosti kapacitete manjša od priporočene vrednosti izkoriščenosti kapacitete (UIC, 2004), pomeni, da kapaciteta določene infrastrukture še ni v celoti izkoriščena. Če je mogoče, je potrebno v vozni red vključiti dodatne vlakovne poti. Dodatne vlakovne poti morajo biti določene glede na potrebe trga in glede na stabilnostne zahteve voznega reda.

Če dodatnih vlakovnih poti ni mogoče vključiti, je neizkoriščena kapaciteta neuporabna (ang. *lost capacity*).

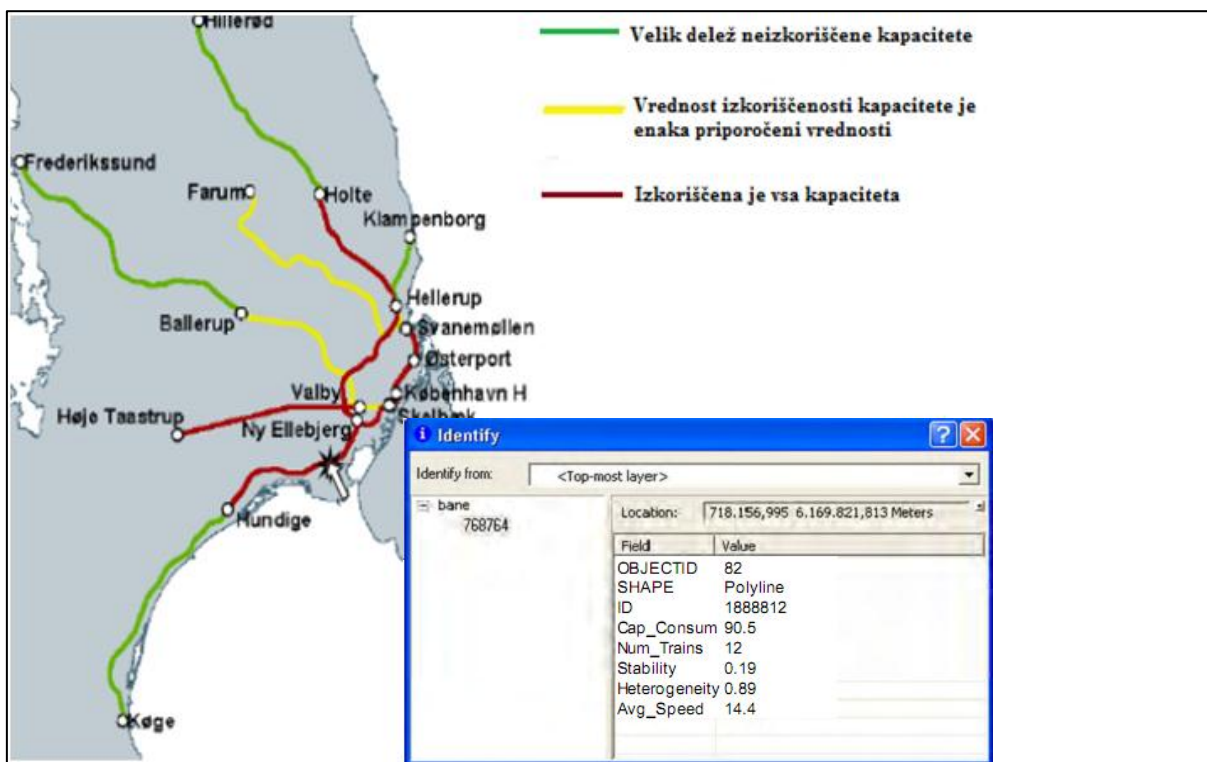
Če je dodatne vlakovne poti mogoče vključiti, je neizkoriščena kapaciteta uporabna (ang. *usable capacity*). V tem primeru je potrebno ponovno zgotoviti vozni red, ki vsebuje dodatne vlakovne poti. Če je po zgoščanju še vedno prisotna neizkoriščena kapaciteta, je potrebno vključiti dodatne vlakovne

poti v vozni red. Teoretično bi bilo postopek mogoče ponavljati, dokler ni izkoriščena vsa kapaciteta dane infrastrukture ali dokler ni več mogoče vključiti dodatnih poti. Uporaba metodologije zgoščanja na različnih progah po Evropi je pokazala, da se mora dodajanje vlakovnih poti ustaviti na določeni ravni, ker sicer niso izpolnjene zahteve glede stabilnosti voznega reda. Skratka, neizkoriščena kapaciteta ne pomeni vedno, da je mogoče v vozni red vključiti dodatne vlakovne poti.

### 7.1.7 Prikaz izkoriščenosti kapacitete

Upravljalci infrastrukture morajo pogosto oblikovati zemljevide, na katerih je prikazana izkoriščenost kapacitete železniške mreže. Ti zemljevidi kažejo predhodno in trenutno stanje, nekatere železnice (npr. Avstrijske – ÖBB) pa na njih prikazujejo tudi prihodnje scenarije izkoriščenosti kapacitete, ki temeljijo na prometnih prognozah in kombinaciji mikro in makro simulacij.

Strokovnjaki priporočajo, da pri prikazu izkoriščenosti kapacitete ne navedemo samo njene vrednosti, ampak tudi pogostost vlakov, povprečno hitrost, stabilnost voznega reda in heterogenost obratovanja. Če se zbere veliko statističnih podatkov o izkoriščenosti kapacitete in o pogostosti vlakov, heterogenosti obratovanja, povprečni hitrosti in stabilnosti voznega reda, se lahko predvidi in napove tudi točnost voznega reda v prihodnosti. Točnost je osnova za izračun zamud vlakov in vodilo za oblikovanje kvalitetnejših voznih redov.



Slika 25: Prikaz izkoriščenosti kapacitete na Danskem (Vir: Landex, 2008)

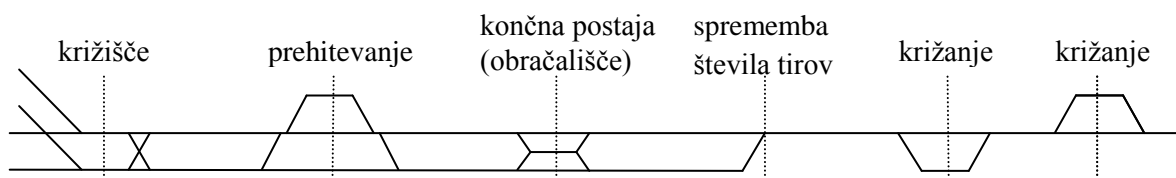
Pomembno je, da se pri oblikovanju zemljevidov izkoriščenosti kapacitete vsako leto uporabi enake progovne odseke, saj je le tako možna primerjava rezultatov.

## 7.2 Praktična uporaba metode UIC 406

### 7.2.1 Dolžina obravnavanih progovnih odsekov

Kodeks UIC 406 navaja, da mora biti proga razdeljena na progovne odseke povsod tam, kjer so postaje. Danski strokovnjaki so navodila glede razdelitve proge na progovne odseke definirali natančneje. Določili so, da mora biti železniška proga razdeljena na progovne odseke tudi (Landex et al., 2006):

- na vseh križiščih (to so točke na mreži, kjer se združita vsaj dve progi in ni možno prehitevanje, križanje ali spreminjanje smeri),
- na enotirnih progah, kjer je omogočeno križanje vlakov,
- povsod tam, kjer se spremeni število tirov,
- kjer je omogočeno prehitevanje,
- na končnih postajah, ki služijo kot obračališča.

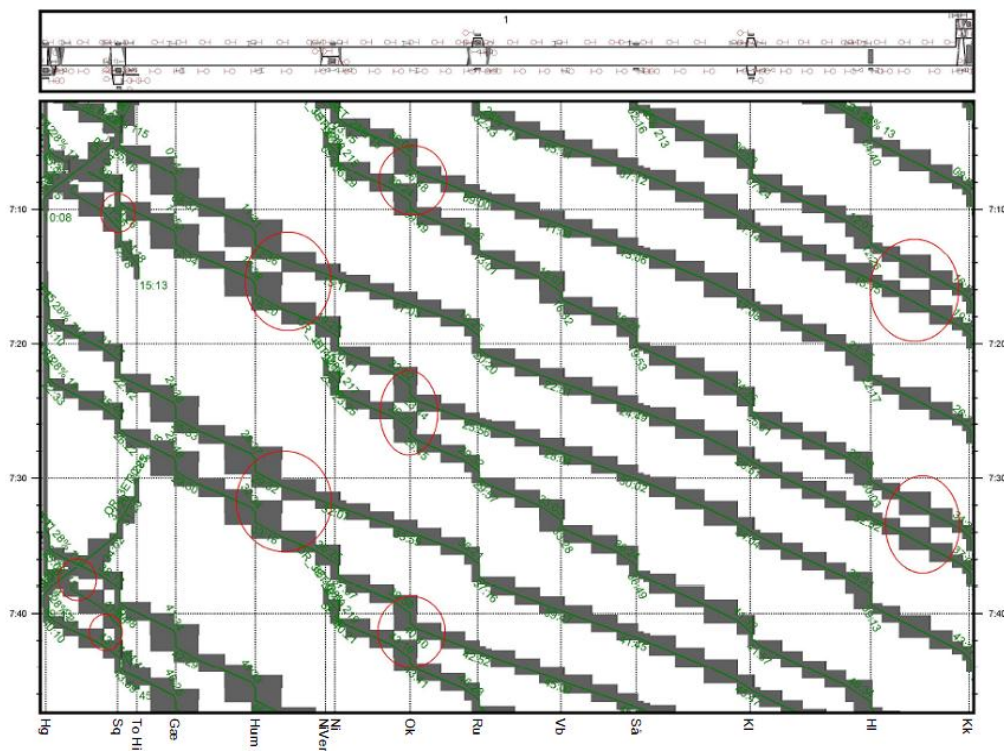


Slika 26: Razdelitev proge na progovne odseke (Vir: Landex et al., 2006)

Pri obravnavanju kapacitete proge je dolžina progovnih odsekov, na katere je proga razdeljena, bistvenega pomena. Če obravnavamo kapaciteto proge, po kateri določeni vlaki vozijo od začetne do končne postaje, drugi pa se ustavijo in obrnejo, še preden pridejo do končne postaje, bomo ugotovili, da je kapaciteta te proge slabo izkoriščena.

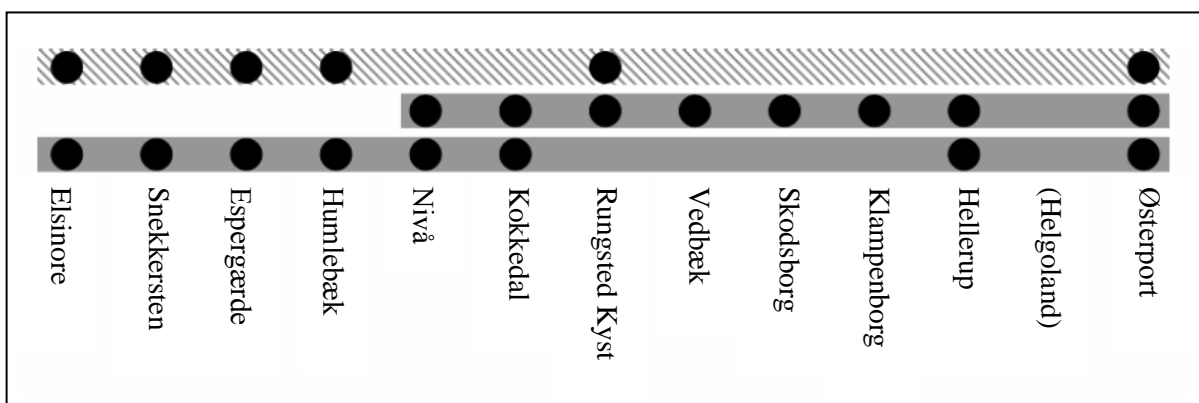
Izračun izkoriščenosti kapacitete temelji na zgoščanju vlakovnih poti v voznem redu. Prostorski odseki, znotraj obravnavanega progovnega odseka, na katerih je časovni interval med zaporednimi vožnjami vlakov minimalen, omejujejo možnost zgoščanja vlakovnih poti v voznem redu. To so t. i. kritični prostorski odseki. Pri homogenem obratovanju so lahko kritični odseki kjerkoli na progi. Običajno pa so nekje v bližini postaje ali mesta, kjer je hitrost precej zmanjšana. Obravnavano proggo moramo razdeliti na progovne odseke tam, kjer so postaje. Če se kritični prostorski odseki nahajajo v

bližini postaj, moramo progo razdeliti na progovne odseke zelo pazljivo, ker bi lahko bil zaradi nepravilne razdelitve kritičen prostorski odsek (ali več kritičnih prostorskih odsekov) nehote izključen iz analize.



Slika 27: Kritični prostorski odseki na obravnavanem progovnem odseku (Vir: Landex, 2008)

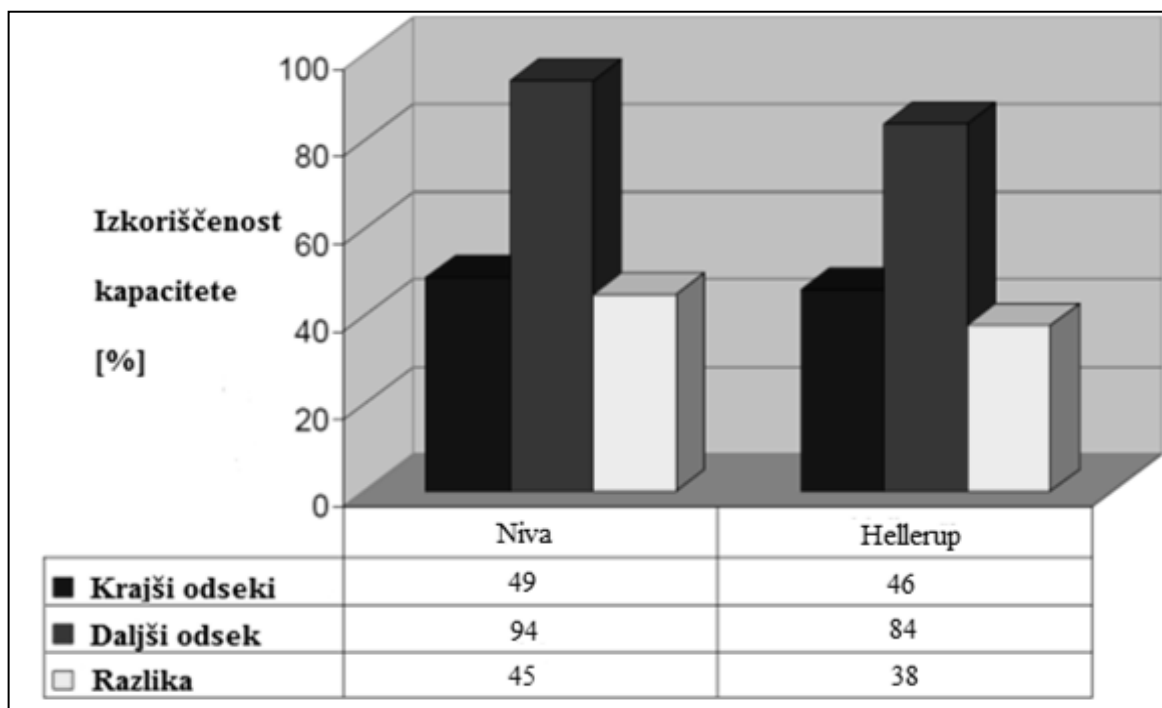
Kako pomembna je pravilna razdelitev proge na progovne odseke, prikazuje primer, ki obravnava železniško progo Coast Line na Danskem, ki med seboj povezuje Copenhagen in Elsinore. Danes velja za najbolj obremenjeno progo na Danskem, na kateri je promet heterogen, saj vozijo tako potniški kot tudi tovorni vlaki. Kritični prostorski odseki na progi Coast Line se pojavijo pri postajah Nivå in Hellerup, kjer se vlaki med seboj dohitijo in je hitrost precej zmanjšana (Slika 27). Območja kitičnih prostorskih odsekov so analizirali z uporabo metode UIC 406.



Slika 28: Načrt ustavljanja vlaka na progi Coast Line (Vir: Landex, 2008)



Obravnavali so tri različne progovne odseke: Kokkedal - Humlebæk, Helgoland - Klampenborg in celoten progovni odsek Helgoland - Elsinore. Ker je hitrost na kritičnih prostorskih odsekih v obravnavanem primeru zelo zmanjšana (torej je čas zasedenosti prostorskih odsekov daljši), je skupni čas zasedenosti progovnega odseka daljši. Zaradi tega lahko predpostavimo, da je izkoriščenost kapacitete velika. Kakšna pa je bila dejansko izračunana, predstavlja Slika 29:



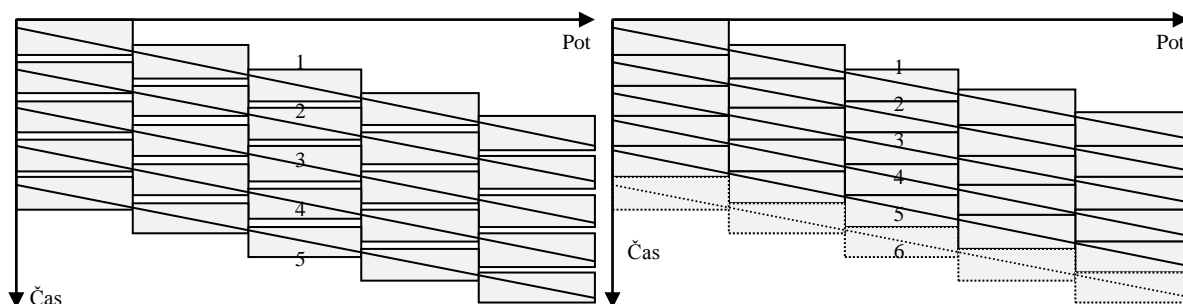
Slika 29: Izkoriščenost kapacitete na progi Coast Line v koničnem času (Vir: Landex et al., 2006)

Če obravnavamo krajša progovna odseka Kokkedal - Humlebæk in Helgoland - Klampenborg, potem dobimo precej manjšo izkoriščenost kapacitete, kot če bi obravnavali celoten progovni odsek Helgoland - Elsinore. Pri Nivå je izkoriščenost kapacitete 49%, če obravnavamo samo progovni odsek Kokkedal - Humlebæk. Če pa obravnavamo celoten progovni odsek Helgoland - Elsinore, je pri Nivå izkoriščenost kapacitete 94%. Razlika izkoriščenosti kapacitete znaša 45%. Ker gre za odseke, kjer je hitrost zelo zmanjšana, je 94% izkoriščenost kapacitete veliko bližje realni vrednosti.

Na podlagi obravnavanega primera lahko zaključimo, da je zelo pomembno, na katerih mestih razdelimo progo na progovne odseke. Če se v bližini določenih postaj nahajajo prostorski odseki, na katerih je hitrost zelo zmanjšana in so zato zasedeni dlje časa, je pametneje, da na teh postajah proge ne razdelimo na progovne odseke. Bolje je, da obravnavamo daljše progovne odseke.

### 7.2.2 Možnost uporabe neizkoriščene kapacitete

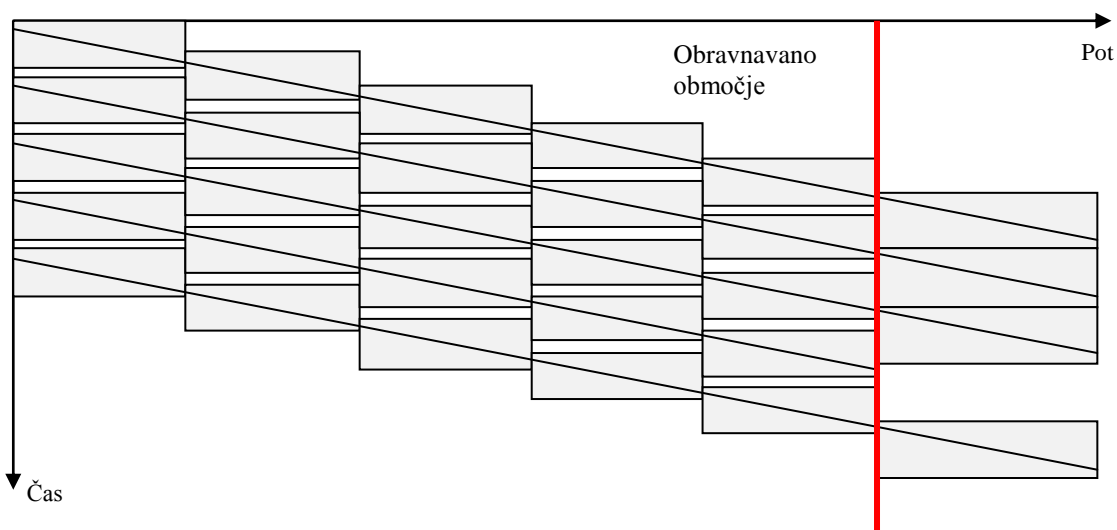
Neizkoriščena kapaciteta je lahko uporabljena za vožnjo večjega števila vlakov. Slika 30 prikazuje, kako lahko na račun tamponskega časa (ang. *buffer time*) zgostimo vlakovne poti v voznem redu in tako omogočimo, da vozi dodatni vlak.



Slika 30: Uporaba neizkoriščene kapacitete (Vir: Landex et al., 2006)

Neizkoriščene kapacitete oziroma tamponskega časa, ni vedno smiselno uporabiti za vožnjo dodatnega vlaka. Zaradi večjega števila vlakov je vlake težje razpošiljati. Poleg tega se zaradi skrajšanja tamponskega časa zmanjša stabilnost voznega reda in je zato nevarnost nastanka sekundarnih zamud večja. Kot že rečeno, če želimo, da so storitve v okviru določene točnosti, izkoriščenosti kapacitete ne smemo povečati preko določene vrednosti.

Vožnjo dodatnega vlaka lahko onemogoča daljši progovni odsek, ki se nahaja zunaj območja obravnave – mrežni efekt (Slika 31).



Slika 31: Omejitve zunaj območja obravnavanega progovnega odseka (Vir: Landex et al., 2006)

Mrežnega efekta pri zgoščanju vlakovnih poti za sam izračun izkoriščenosti kapacitete ne upoštevamo. Ko pa želimo v vozni red vključiti dodatni vlak, moramo preveriti, ali vožnjo dodatnega vlaka dopuščajo vsi progovni odseki.

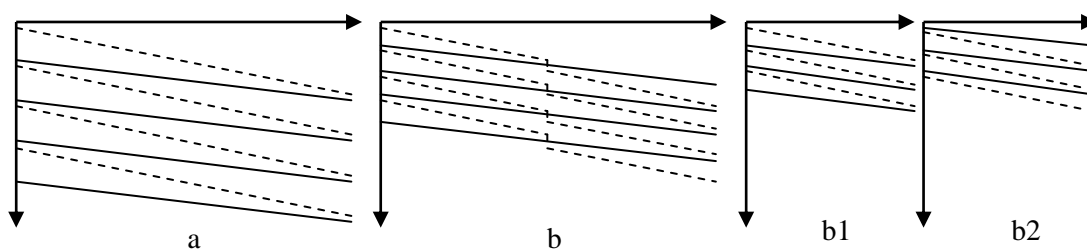
Vseh možnih poti ni smiselno uporabiti tudi zato, ker mnoge od njih niso atraktivne in niti smiselne z vidika večjega zasluga. Načrtovalec mora za vsak primer posebej pretehtati, kako je najbolje uporabiti neizkoriščeno kapaciteto.

### 7.3 Pomanjkljivosti metode UIC 406

Opisane so nekatere pomanjkljivosti metode UIC 406, ki nastanejo pri razdelitvi proge na krajše progovne odseke v skladu z dansko različico metode UIC 406 (poglavje 7.2.1).

#### 7.3.1 Prehitevanje

Možnost prehitevanja na progi, kjer je kapaciteta v veliki meri izkoriščena, pomeni dodatno kapaciteto. Če se držimo načel danske različice metode UIC 406, mora biti proga razdeljena na dodatne progovne odseke tudi tam, kjer je omogočeno prehitevanje (poglavje 7.2.1). Zaradi krajših progovnih odsekov je izkoriščenost kapacitete manjša.



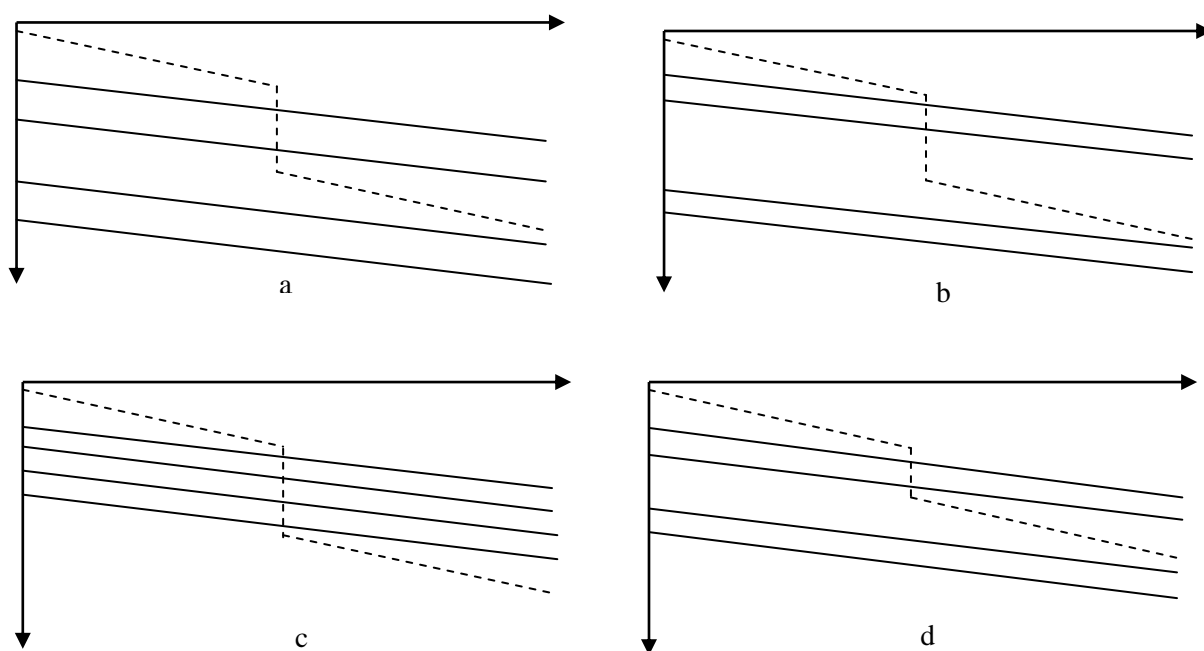
Slika 32: Izkoriščenost kapacitete progovnega odseka (a), odseka z možnostjo prehitevanja (b) in razdeljenega progovnega odseka zaradi prehitevanja (c1 in c2) (Vir: Landex et al., 2006)

Če se v primeru prehitevanja progovnega odseka ne razdeli na dva manjša, je potrebno posebej pazljivo zgoščati vlakovne poti v voznem redu (Slika 33a) (Landex et al., 2006).

Zgoščanje vlakovnih poti v voznem redu v primeru prehitevanja brez spreminjanja časa postanka ali vrstnega reda vlakov ima za posledico veliko izkoriščenost kapacitete (Slika 33b). Kapaciteto je mogoče bolje izkoristiti tako, da se spremeni vrstni red vlakov (Slika 33c). Vendar če vlak, ki ima

postanek, prehitijo več vlakov, kot je načrtovano v voznem redu, povzroči to konflikte zunaj obravnavanega odseka. Da do tega ne pride, mora zaporedje vlakov ostati enako.

Danski strokovnjaki so navodila metode UIC 406 še nekoliko prilagodili. Odločili so se, da bodo namesto vrstnega reda vlakov spremenili čas postanka vlaka, ki ga drugi vlaki med njegovim postankom prehitijo (Slika 33d). Čas postanka vlaka je lahko minimalen, torej ravno tolikšen, da ga drugi vlaki uspejo prehiteti (Landex et al., 2006).



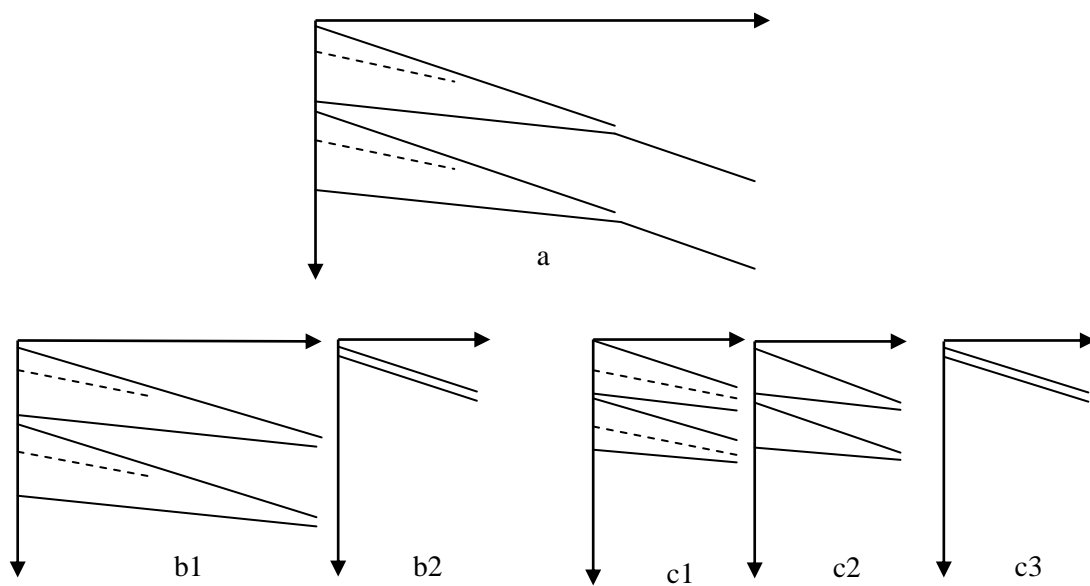
Slika 33: Zgoščanje voznega reda v primeru prehitevanja (Vir: Landex et al., 2006)

### 7.3.2 Dodatni vlaki

Dodatna pomanjkljivost metode UIC 406 je v tem, da dodaten vlak odraža manjšo izkoriščenost kapacitete. Če se metoda UIC 406 uporablja dosledno (danska različica), je potrebno progo razdeliti na dodatni progovni odsek, tudi ko je prisoten dodaten vlak z novo končno postajo. Ko je proga razdeljena na dodatni progovni odsek, se pojavi nov krajši progovni odsek, za katerega je izkoriščenost kapacitete manjša.

Slika 34 prikazuje primer, ko je zaradi dodatnega vlaka izkoriščenost kapacitete manjša. Vlaki, ki so označeni črtkano, so dodatni vlaki na voznem redu (Slika 34a). Slika 34b prikazuje, kako je vozni red zgoščen glede na obstoječe progovne odseke (izkoriščenost kapacitete bi bila enaka tudi brez dodatnih vlakov). Metoda UIC 406 zahteva, da mora biti progovni odsek b1 razdeljen na dva nova progovna

odseka c1 in c2. Ker sta nova progovna odseka c1 in c2 krajša, je zato tudi izkoriščenost kapacitete manjša.



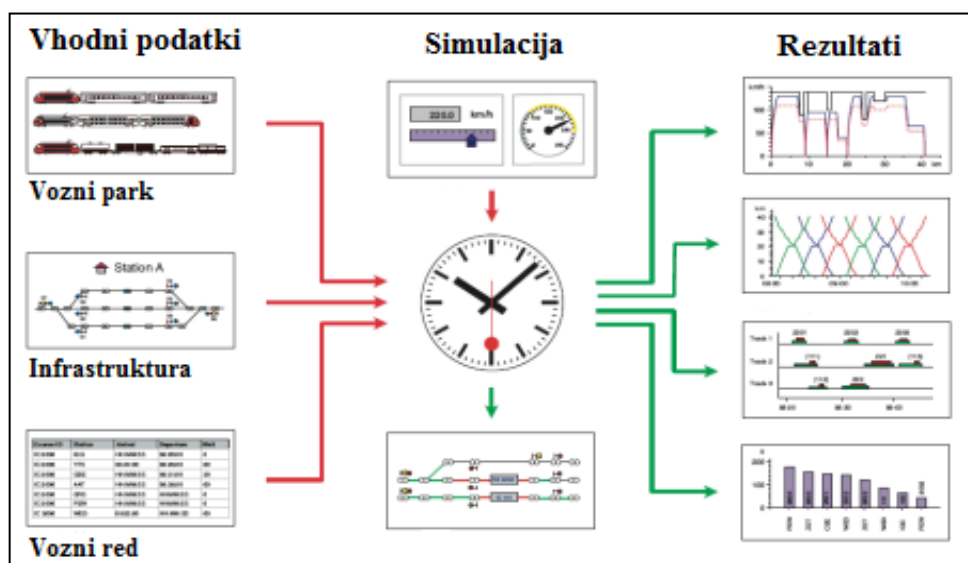
Slika 34: Manjša izkoriščenost kapacitete zaradi dodatnega vlaka (Vir: Landex et al., 2006)

## 8 ANALIZA IZKORIŠČENOST KAPACITETE NA PROGI LJUBLJANA – JESENICE

Pri obravnavanju proge Ljubljana - Jesenice z vidika kapacitete sem uporabila programsko orodje OpenTrack (OpenTrack Railway Technology). Program OpenTrack so razvili na švicarskem inštitutu za tehnologijo v Zürichu (ETH ITV).

OpenTrack je mikro-simulacijski model, ki modelira in prikazuje obratovanje vlakov. Vlaki vozijo v skladu s predhodno določenimi karakteristikami infrastrukture, voznega parka in voznega reda. Program pri simulaciji vedno upošteva medsebojni vpliv vlakov. To pomeni, da če vlak zaseda določen tir, na katerega želi zapeljati vlak, ki mu sledi, bo program usmeril sledeči vlak v skladu s signalno varnostnimi omejitvami, kot jih je uporabnik predhodno določil. Zaporedni vlak bo torej počakal pred uvoznim signalom in zapeljal na tir šele, ko bo prost. Program simulira obratovanje vlakov znotraj predhodno izbranega časovnega intervala.

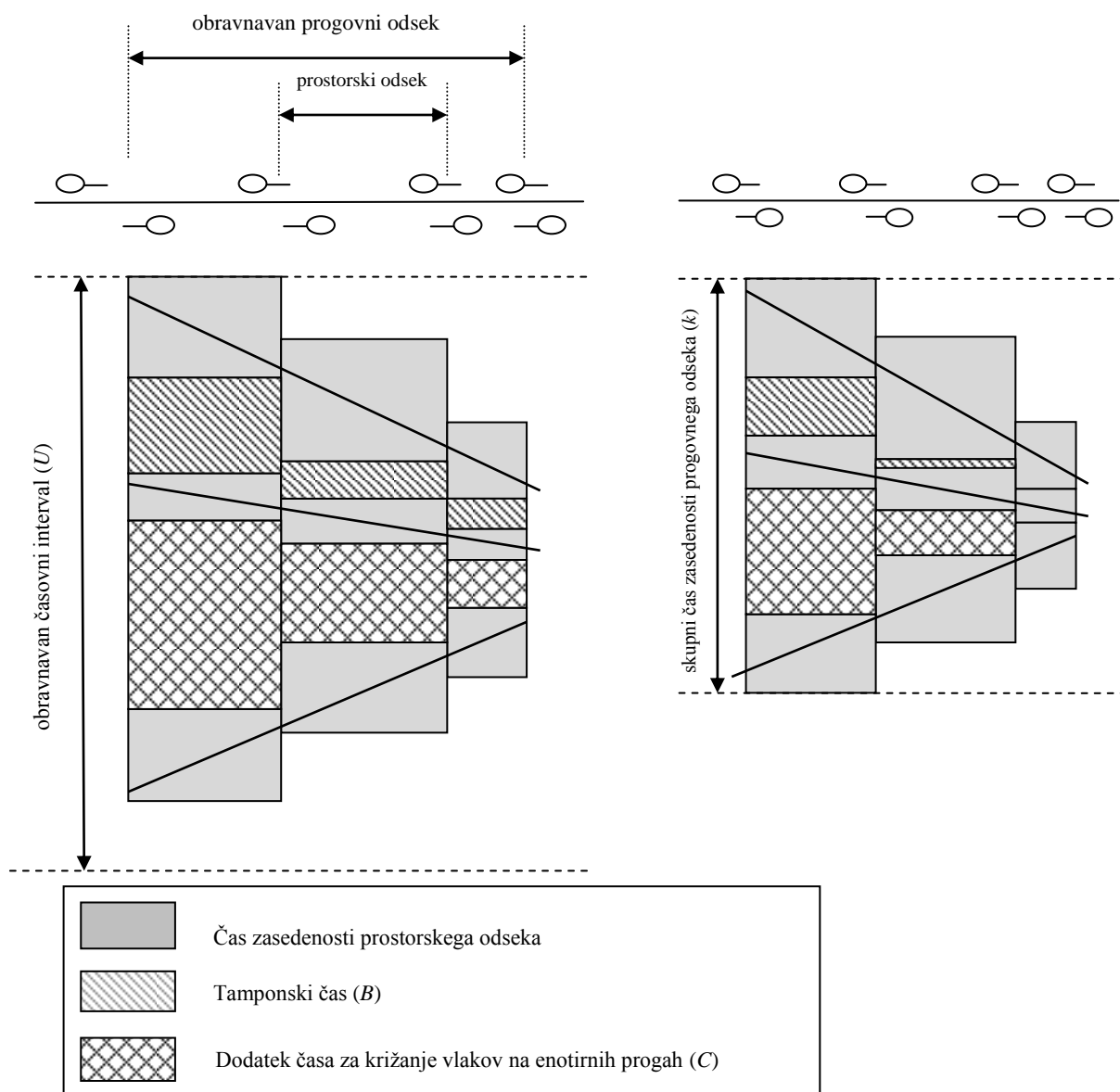
Glede na izbran časovni interval program oblikuje širok spekter izhodnih podatkov v obliki grafov, tabel in slik. Namen programskega orodja OpenTrack je predvsem testiranje in vrednotenje infrastrukture ter načrtovanega obratovanja za optimizacijo železniške mreže in voznih redov. Poleg tega se lahko OpenTrack uporablja tudi za preverjanje stabilnosti (novega) voznega reda, za vrednotenje koristi dolgoročnih izboljšav železniške infrastrukture in za analizo vplivov različni voznih parkov (Nash in Huerlimann, 2004).



Slika 35: Osnovni elementi programa OpenTrack (Vir: Nash in Huerlimann, 2004).

### 8.1 Način določanja izkoriščenosti kapacitete progovnega odseka Kranj - Jesenice

Izkoriščenost kapacitete proge Ljubljana - Jesenice (progovnega odseka Kranj - Jesenice) sem določala po metodi UIC 406. Metoda UIC 406 določa, da moramo izkoriščenost kapacitete vrednotiti za vsak progovni odsek posebej. Preden določimo vrednost izkoriščenosti kapacitete, moramo vlakovne poti v voznem redu zgostiti v okviru predhodno določenega časovnega intervala. Na podlagi zgoščenega voznega reda določimo skupni čas zasedenosti progovnega odseka ( $k$ ), ki je vsota zasedenosti infrastrukture ( $A$ ), tamponskega časa (ang. *buffer time*) ( $B$ ), dodatka časa za križanje vlakov na enotirnih progah (ang. *crossing buffer time*) ( $S$ ) in dodatka za vzdrževanje ( $D$ ). Skupni čas zasedenosti progovnega odseka ( $k$ ) določamo na prvem prostorskem odseku vzdolž obravnavanega progovnega odseka. Izkoriščenost kapacitete ( $K$ ) je enaka deležu izbranega časovnega intervala ( $U$ ), ko je progovni odsek zaseden zaradi določenega števila vlakovnih poti (poglavje 7.1.6).



Slika 36: Zgoščanje voznega reda po metodi UIC 406

## 8.2 Karakteristike obravnavane proge

Obravnavala sem progno od Ljubljane do Jesenic, in sicer progovni odsek med postajama Kranj in Jesenice. Ta železniška proga je enotirna in sodi v skupino glavnih prog. Proga je del X. koridorja, ki poteka od Salzburga do Soluna.

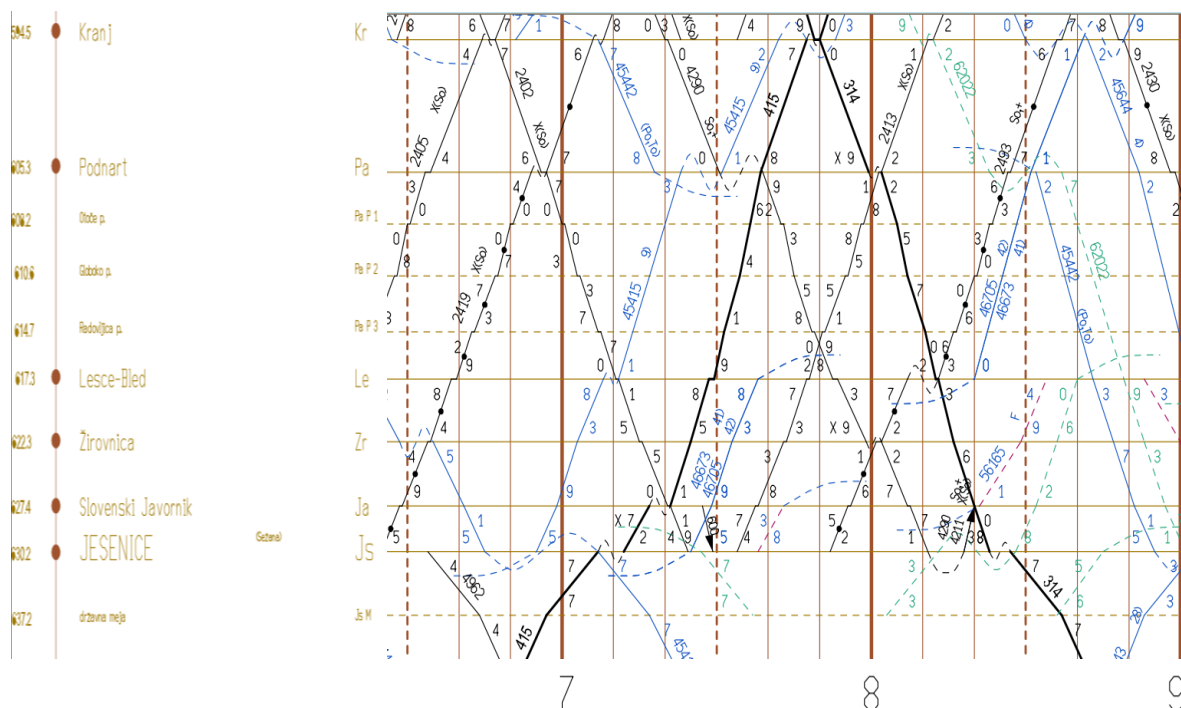


Slika 37: Železniško omrežje Slovenije (Vir: [http://www.slo-zeleznice.si/sl/podjetje/infrastruktura/zeleznisko\\_omrežje](http://www.slo-zeleznice.si/sl/podjetje/infrastruktura/zeleznisko_omrežje) ((16. 3. 2012))

Proga je namenjena tako potniškemu kot tovornemu prometu, zato je obratovanje heterogeno. Obratovanje vlakov se razlikuje v hitrosti vlakov in njihovih postankih (mesta postankov, trajanje postankov).

Vlakovne poti so grafično prikazane v voznem redu. Vlakovne poti potniških vlakov so označene s črno barvo, vlakovne poti tovornih vlakov pa z modro barvo (Slika 38).





Slika 38: Del grafikona voznega reda za progo Ljubljana - Jesenice (Vir: SŽ)

Poleg stalnih tras so v voznem redu obravnavane proge tudi ponudbene trase. Ponudbene trase služijo prosilcem samo kot informacija o možnih prostih vlakovnih poteh, ki jih lahko po potrebi koristijo, če so takrat proste.

Ker je obravnavana proga enotirna, je prehitevanje in križanje vlakov na obravnavanem progovnem odseku mogoče samo na postajah. Na odseku od Kranja do Jesenic je postaj šest.



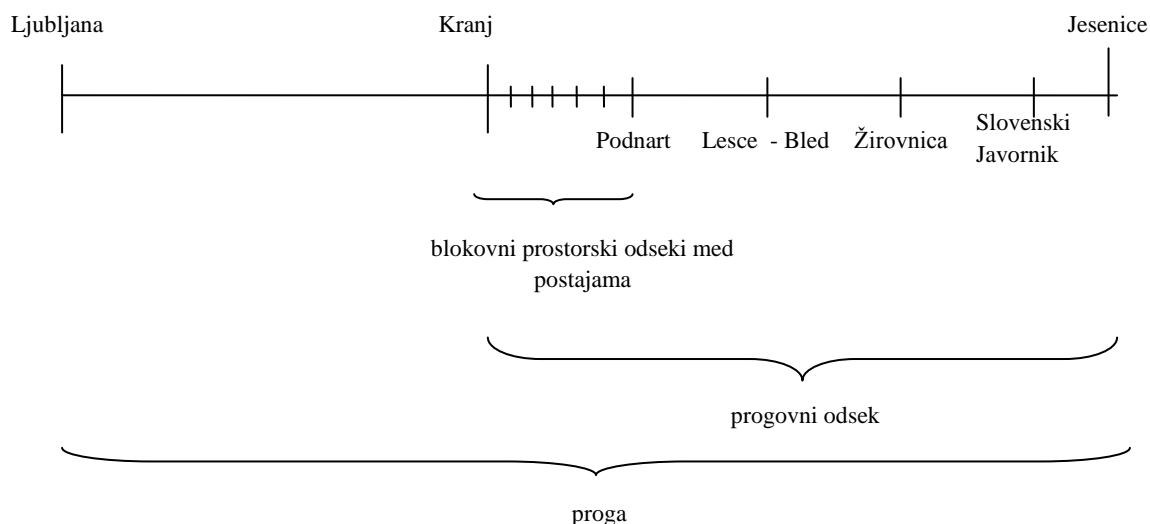
Slika 39: Proga Ljubljana - Jesenice (Vir: <http://www.miniaturna-zeleznica.com/Postaje/Gorenjska-video.htm> (8.5.2012))

Postaje so:

- Kranj,
- Podnart,
- Lesce - Bled,
- Žirovnica,
- Slovenski Javornik,
- Jesenice.

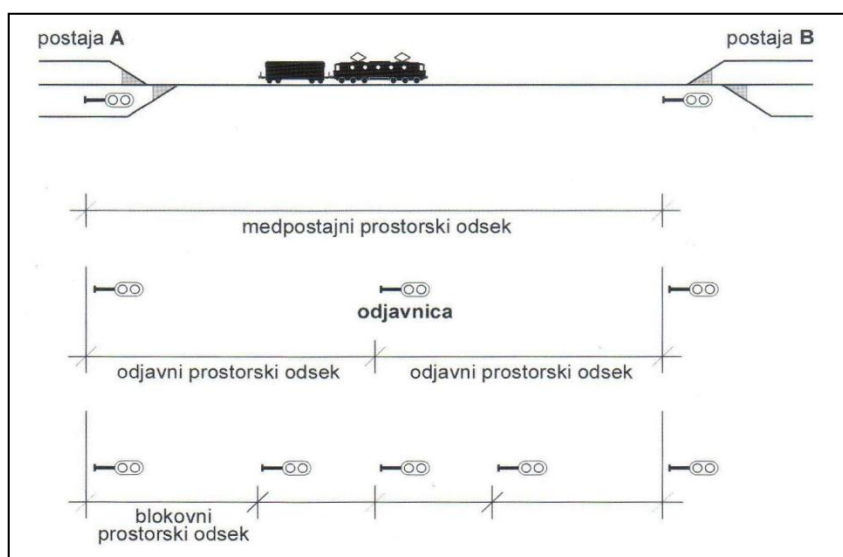
Kodeks UIC 406 določa, da mora biti obravnavana proga na postajah razdeljena na t. i. progovne odseke. Ključno vlogo pri razdelitvi proge na progovne odseke imajo postaje. Progovni odsek je lahko

odsek med dvema sosednjima postajama (npr. progovni odsek Žirovnica - Slovenski Javornik), lahko pa je progovni odsek med dvema postajama, med katerima so dodatne postaje (npr. progovni odsek Kranj - Jesenice).



Slika 40: Razdelitev proge na odseke

Progovni odseki med dvema sosednjima postajama (Kranj - Podnart, Podnart - Lesce - Bled ...) so razdeljeni na (blokovne) prostorske odseke, ki jih na obeh straneh določajo prostorski signali. Prostorski signali so glavni signali, ki kažejo prostost oziroma zasedenost prostorskega odseka, ki ga ščitijo. Poleg blokovnih obstajajo še odjavni in medpostajni prostorski odseki. Odjavni prostorski odseki so prostorski odseki med postajo in odjavnico. Medpostajni prostorski odseki pa so prostorski odseki med dvema postajama (Zgonc, 2003) (Slika 41).



Slika 41: Vrste prostorskih odsekov (Zgonc, 2003)

Progovnega odseka Kranj - Jesenice nisem obravnavala kot celoto (vlakovnih poti nisem zgoščala za celoten progovni odsek Kranj - Jesenice). Obravnavala sem posamezne krajše (progovne) odseke znotraj progovnega odseka Kranj - Jesenice, za katere sem določala vrednosti izkoriščenosti kapacitete.

Na obravnavanem progovnem odseku je pet krajših (progovnih) odsekov. Ti odseki so Kranj - Podnart, Podnart - Lesce - Bled, Lesce - Bled - Žirovnica, Žirovnica - Slovenski Javornik, Slovenski Javornik - Jesenice. Odsek Kranj - Podnart je dolg približno 11 km, odsek Podnart - Lesce - Bled 12 km, odsek Lesce - Bled - Žirovnica 5 km, odsek Žirovnica - Slovenski Javornik 5 km in odsek Slovenski Javornik - Jesenice 3 km.

Globoko, Otoče in Radovljica niso postaje, ampak postajališča, ki so med postajama Podnart in Lesce - Bled. Slovenske železnice označujejo postajališče kot mesto na železniški progi, ki je namenjeno vstopanju in izstopanju potnikov. Vlaki, ki vozijo na relaciji med Kranjem in Jesenicami, imajo na postajališčih zelo kratke postanke, ki trajajo 1 min ali manj. Postajališče ima samo en železniški tir in peron ter pripadajočo infrastrukturo, ki lahko oskrbuje le en vlak naenkrat, zato ne omogoča prehitevanja in križanja vlakov. Postaja pa je prometno mesto z najmanj eno kretnico, ki omogoča prehitevanje in križanje vlakov, vstopanje in izstopanje potnikov ter nakladanje in razkladanje blaga. Ker omenjena postajališča nimajo glavnega signala, niso pomembna pri razdelitvi proge na odseke.

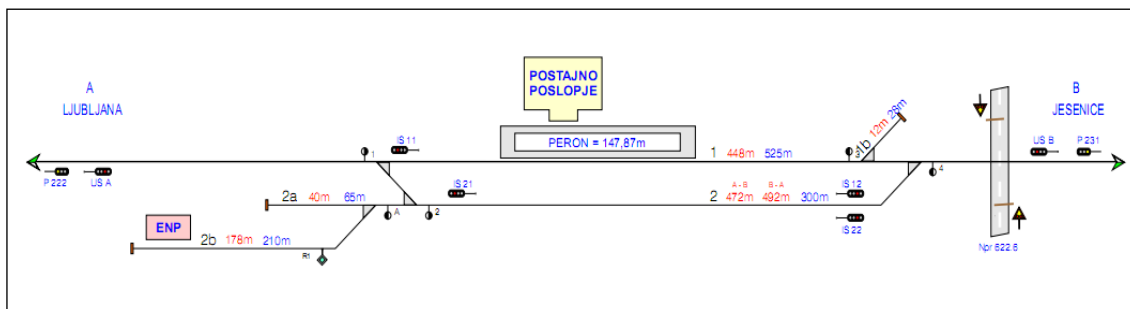
### **8.3 Vhodni podatki za program OpenTrack**

Vhodni podatki o obravnavani progi so razdeljeni v tri skupine:

- podatki o voznem parku,
- podatki o infrastrukturi,
- podatki o obratovanju proge.

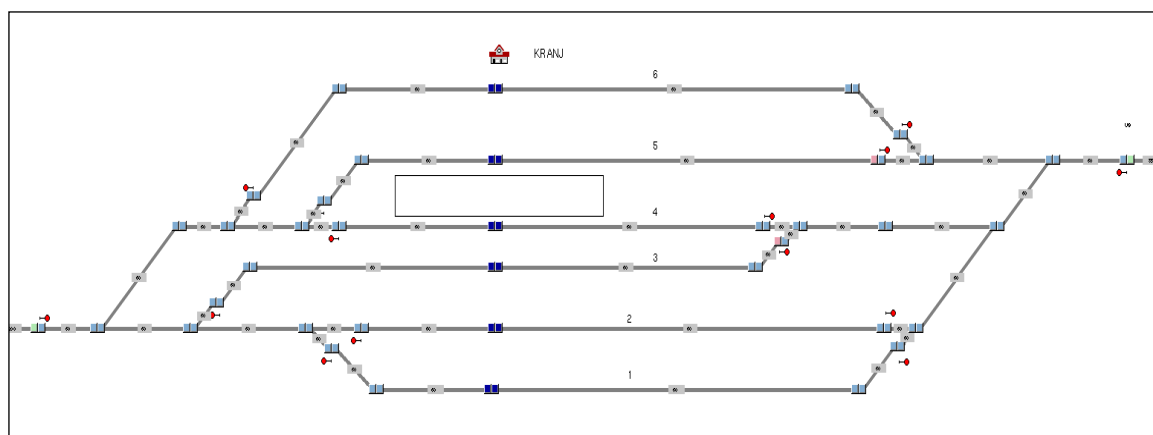
Podatki o voznem parku so podatki o lokomotivah in vagonih. To so med drugim vrsta vlaka (potniški, tovorni), vrsta lokomotive, masa in dolžina lokomotive in vagonov.

Podatki o infrastrukturi so podatki o odprti progi (število tirov, število odsekov, prostorski signali, nagib proge) in podatki o postajnem območju (število in imena postaj, kilometraža postaj, število in koristne dolžine tirov na postajah, uvozni in izvozni signali, postajna območja). Podatke o karakteristikah proge sem dobila na osnovi podatkov Programa omrežja Republike Slovenije za leto 2012.

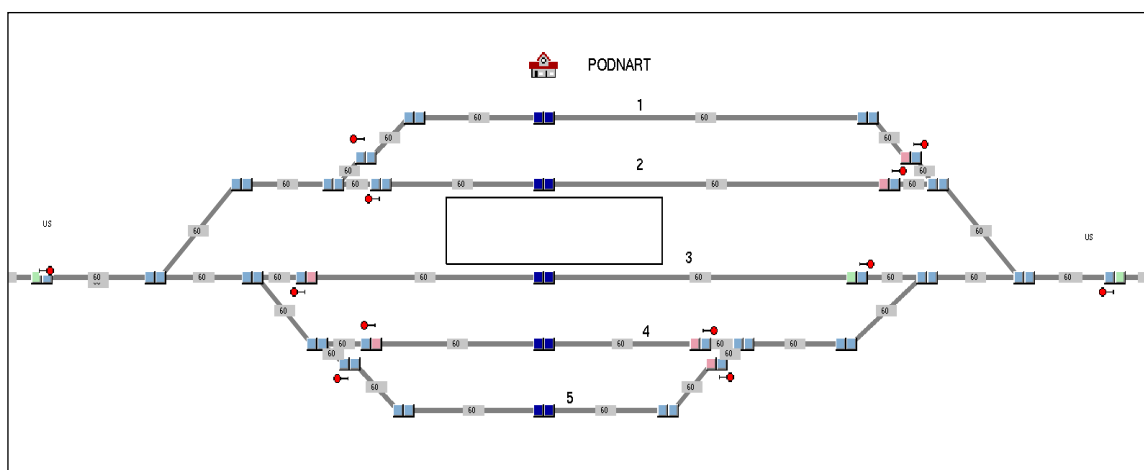


Slika 42: Tirna shema postaje Žirovnica (Vir: [http://www.slo-zeleznice.si/sl/podjetje/vodenje\\_prometa/program\\_omrezja/program\\_omrezja\\_republike\\_slovenije\\_za\\_let\\_2012](http://www.slo-zeleznice.si/sl/podjetje/vodenje_prometa/program_omrezja/program_omrezja_republike_slovenije_za_let_2012) (2.2.2012))

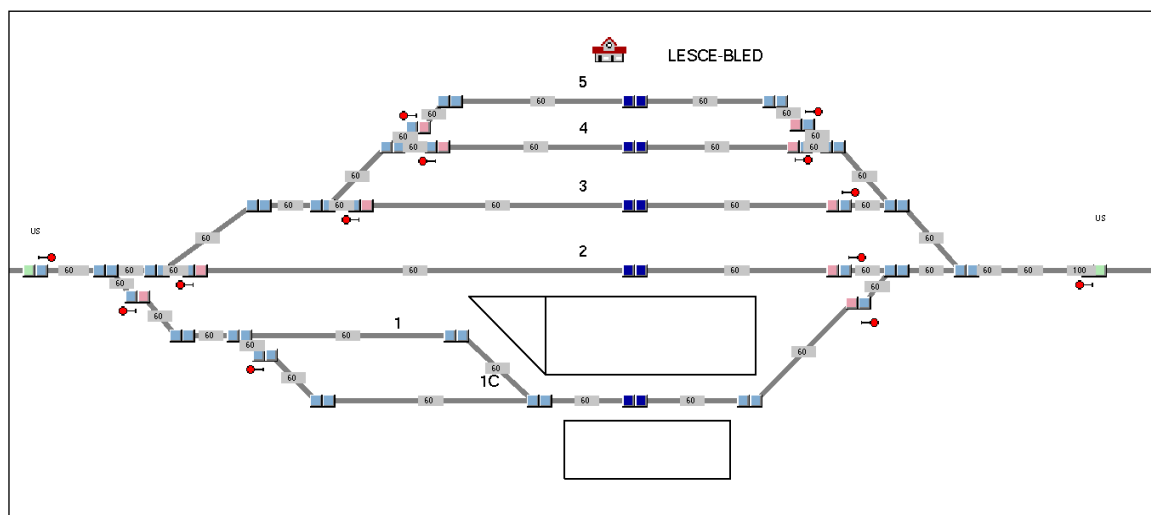
Na slikah spodaj so prikazane sheme postaj v programu OpenTrack. Za vsako postajo sem morala označiti postajno območje. Tire na postajah sem oštevilčila in podala njihove uporabne dolžine. Vsak tir mora imeti tudi svoj izvozni signal.



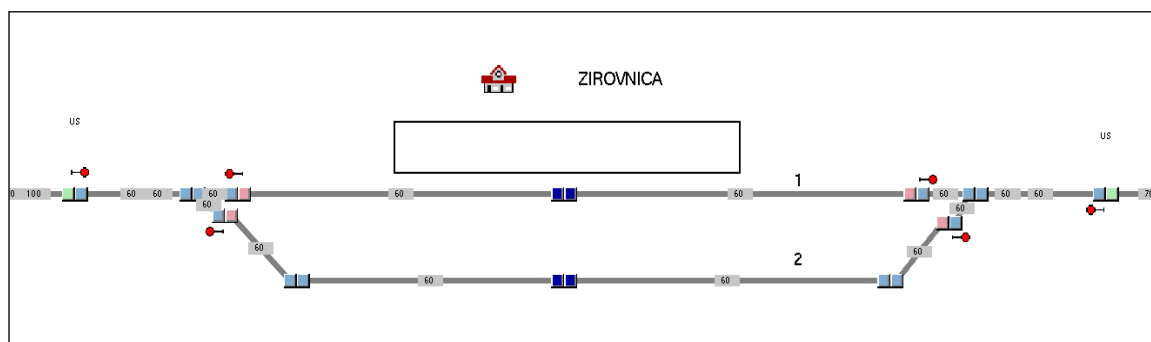
Slika 43: Postaja Kranj



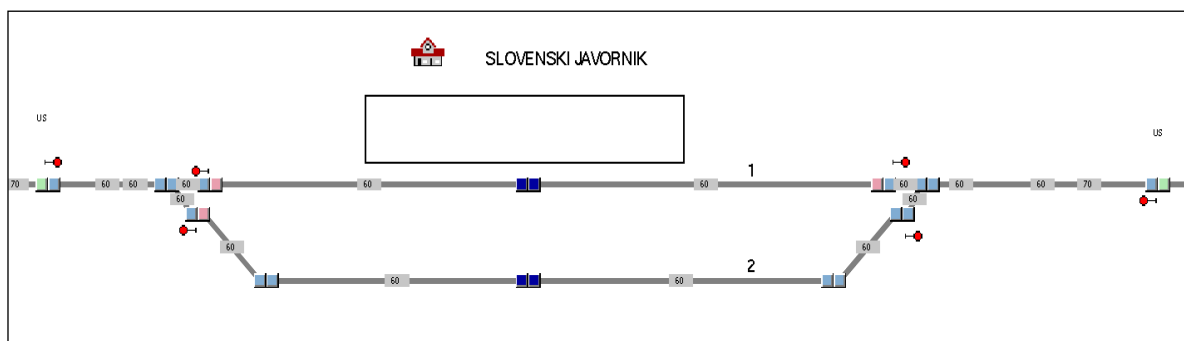
Slika 44: Postaja Podnart



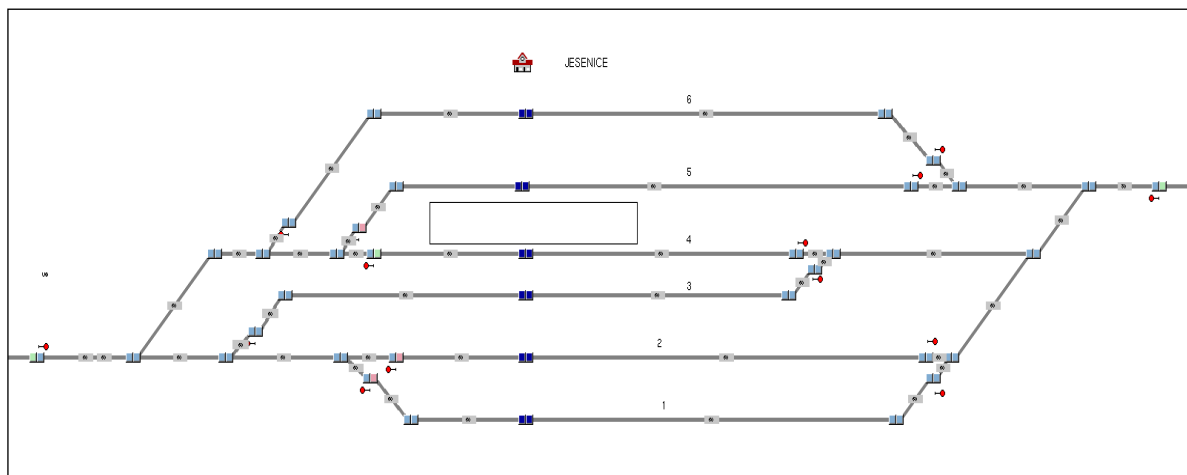
Slika 45: Postaja Lesce – Bled



Slika 46: Postaja Žirovnica



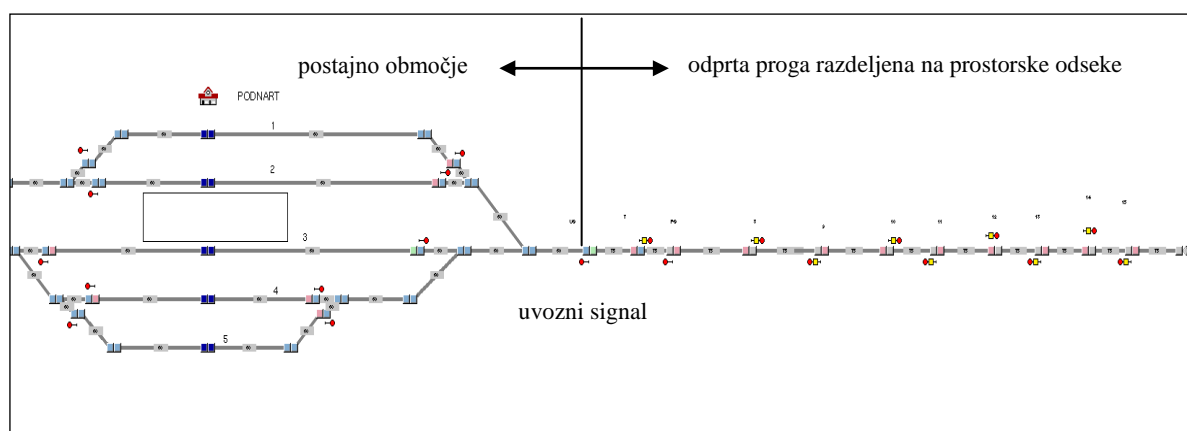
Slika 47: Postaja Slovenski Javornik



Slika 48: Postaja Jesenice

Podatki o obratovanju proge zajemajo hkrati podatke o infrastrukturi in podatke o voznem redu. K tem podatkom sodijo podatki o prostorskih razmikih (ang. *routh*). Prostorski razmiki na odprti progi so varnostni sistem, ker so na obeh straneh opredeljeni z glavnimi signali, ki dopuščajo ali prepovedujejo vožnjo v določen prostorski odsek. Sledijo jim podatki o vlakovnih poteh (ang. *path*), ki so sestavljene iz prostorskih razmikov, ter podatki o relaciji vlaka (ang. *itinerary*), ki so sestavljene iz vlakovnih poti. Vlakovna pot posameznega vlaka (ang. *courses*) je podana s parametri: vrsta vlaka (potniški, tovorni), relacija vlaka in vozni reda vlaka.

Podatke o voznih redih vlakov sem dobila na podlagi grafikona voznega reda za progo Ljubljana - Jesenice (Slika 38).



Slika 49: Postajno območje in odprta proga

## 8.4 Simulacija

Simulirala sem obratovanje vlakov od 6.00 do 9.30, ker so znotraj tega časovnega intervala vlaki najpogostejši. V obravnavanem časovnem intervalu je v veljavnem voznem redu enajst vlakov, sedem potniških in štiri tovorni. Vlaki so zaradi boljše preglednosti pri simulaciji in izhodnih podatkih poimenovani drugače kot v grafikonu voznega reda za progo Ljubljana - Jesenice (SŽ) (Slika 38).

Preglednica 7: Oznake vlakov

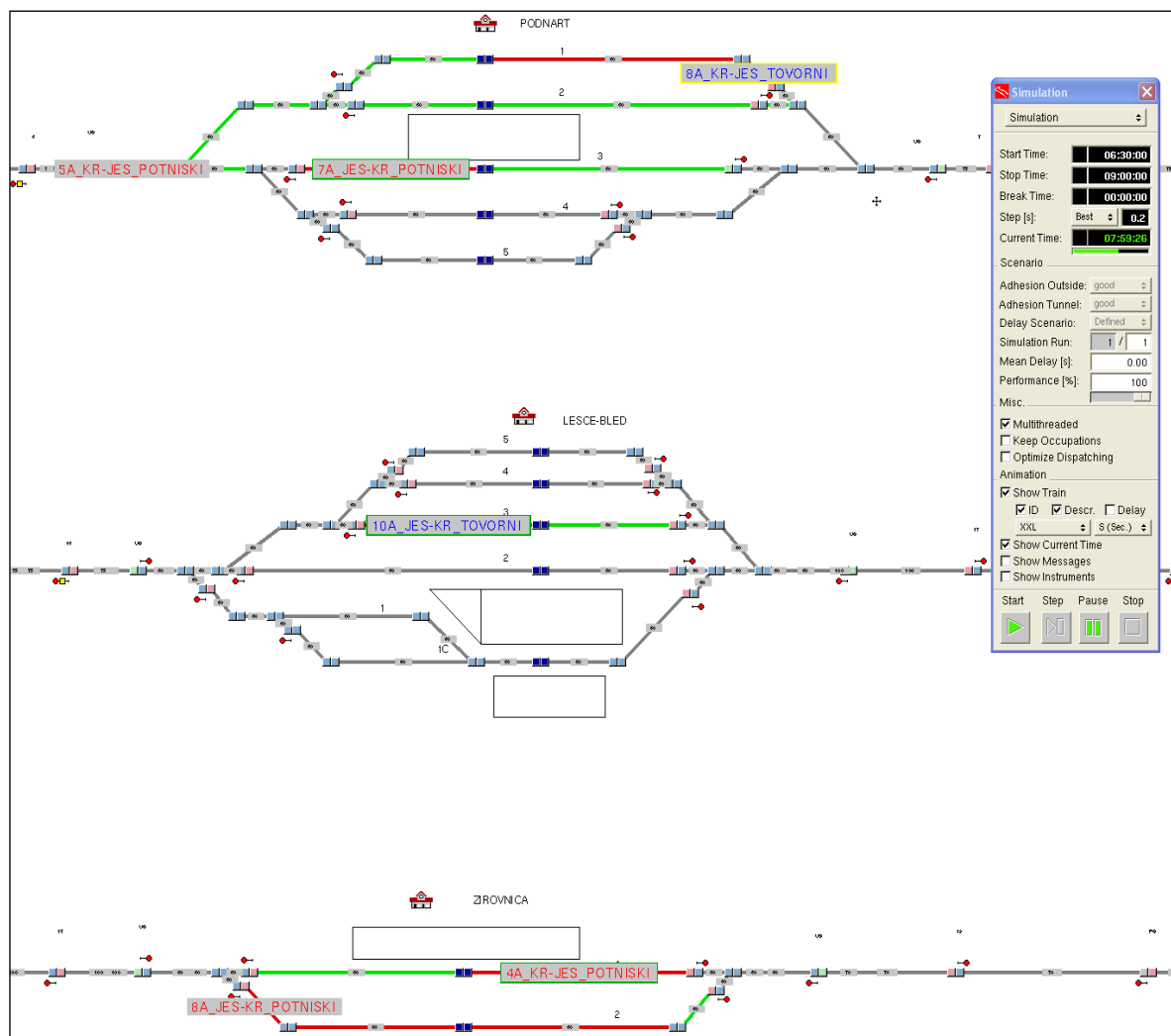
| Oznaka vlaka v grafikonu | Oznaka vlaka pri simulaciji in izhodnih podatkih |
|--------------------------|--|
| 2402                     | 3A_KR - JES_POTNISKI                             |
| 4290                     | 4A_KR - JES_POTNISKI                             |
| 314                      | 5A_KR - JES_POTNISKI                             |
| 2430                     | 6A_KR - JES_POTNISKI                             |
| 415                      | 6A_JES - KR_POTNISKI                             |
| 2413                     | 7A_JES - KR_POTNISKI                             |
| 2493                     | 8A_JES - KR_POTNISKI                             |
| 45442                    | 8A_KR - JES_TOVORNI                              |
| 45644                    | 9A_KR - JES_TOVORNI                              |
| 45415                    | 9A_JES - KR_TOVORNI                              |
| 46673                    | 10A_JES - KR_TOVORNI.                            |

Simulacijo sem izvajala za čas od 6.30 do 9.00, izkoriščenost kapacitete pa sem računala za časovni interval od 7.00 do 8.00. Če bi tudi simulacijo izvajala samo za čas ene ure (od 7.00 do 8.00), bi znotraj izbranega intervala vozil samo en vlak (6A potniški vlak z Jesenic proti Kranju). Program OpenTrack namreč obravnava samo tiste vlake, ki imajo čas odhoda in čas prihoda znotraj izbranega časovnega intervala (torej od 7.00 do 8.00) pri simulaciji.

Simulacijo sem izvajala za heterogeno (potniški in tovorni vlaki) in homogeno (potniški vlaki) obratovanje ter pri različnih hitrostih vlakov.

Glavni izhodni podatek pri simulaciji s programskim orodjem OpenTrack je grafikon voznega reda za progovni odsek Kranj - Jesenice (Priloga A, B, C, D, E). Grafikon voznega reda mi je služil kot osnova, na podlagi katerega sem zgoščala vlakovne poti.





Slika 50: Simulacija voženj vlakov na progovnem odseku Kranj - Jesenice

## 8.5 Analiza rezultatov

Izkoriščenost kapacitete sem vrednotila pri različnih karakteristikah infrastrukture, voznega parka in voznega reda. Na podlagi izhodnih podatkov, natančneje na podlagi grafikona voznega reda za progovni odsek Kranj - Jesenice, sem vrednost izkoriščenosti kapacitete določala za dejansko stanje. Najprej sem primerjala izkoriščenost kapacitete dveh različno dolgih odsekov (Kranj - Podnart, Slovenski Javornik - Jesenice), nato sem določila še izkoriščenost kapacitete ostalih odsekov na obravnavanem progovnem odseku. V nadaljevanju sem določala izkoriščenost kapacitete pri spremenjeni hitrosti vlakov in homogenem obratovanju (samo potniški vlaki). Nazadnje pa sem preverila kolikšna bi bila izkoriščenost kapacitete, če bi bila obravnavana proga dvotirna.

Ker sem izkoriščenost kapacitete določala po metodi UIC 406, sem obravnavan progovni odsek na progi Ljubljana - Jesenice razdelila na krajše (progovne) odseke, za katere sem zgoščala vlakovne poti

v voznem redu. Izkoriščenost kapacitete ( $K$ ) sem določila kot delež izbranega časovnega intervala, ko je odsek zaseden zaradi določenega števila vlakovnih poti. Torej glede na skupni čas zasedenosti obravnavanega odseka ( $k$ ) (poglavje 7.1.6).

Vlakovne poti na določenem odseku so lahko zgoščene toliko, kolikor dopuščajo kritični prostorski odseki, kjer je časovni interval med zaporednimi vožnjami minimalen (ang. *minimum headway time*). Na dvotirnih progah, kjer so vlaki razdeljeni glede na smer vožnje, je po zgoščanju voznega reda tamponski čas na kritičnem prostorskem odseku enak nič. Na enotirnih progah je na kritičnem prostorskem odseku tamponski čas po zgoščanju enak nič, če vlaku sledi vlak, ki vozi v isto smer kot predhodni vlak. Če pa vlaku sledi vlak, ki vozi v nasprotni smeri kot predhodni vlak, je na kritičnem prostorskem odseku po zgoščanju dodatek časa za križanje vlakov enak nič.

### 8.5.1 Vpliv dolžine odsekov na izkoriščenost kapacitete

Ena izmed pomembnih tehničnih lastnosti infrastrukture, ki vpliva na kapaciteto in njeno izkoriščenost, je razdelitev proge na progovne odseke, za katere določamo vrednost izkoriščenosti kapacitete. Če obravnavamo krajši progovni odsek, je skupni čas zasedenosti progovnega odseka zgoščenega voznega reda manjši, kot če na isti progi obravnavamo daljši progovni odsek. Ker ima dolžina progovnih odsekov velik vpliv na skupni čas zasedenosti progovnega odseka ( $k$ ) in posledično na izkoriščenost kapacitete ( $K$ ), je priporočljivo, da so poleg rezultatov prisotne tudi interpretacije in pojasnila glede dolžine progovnih odsekov in drugih karakteristik proge.

Da bi prikazala, kako dolžina progovnih odsekov vpliva na izkoriščenost kapacitete, sem najprej obravnavala dva različno dolga odseka in ju primerjala med sabo. Daljši odsek je odsek Kranj - Podnart, ki je dolg približno 11 km. Krajši odsek pa je odsek Slovenski Javornik - Jesenice, ki je dolg približno 3 km.

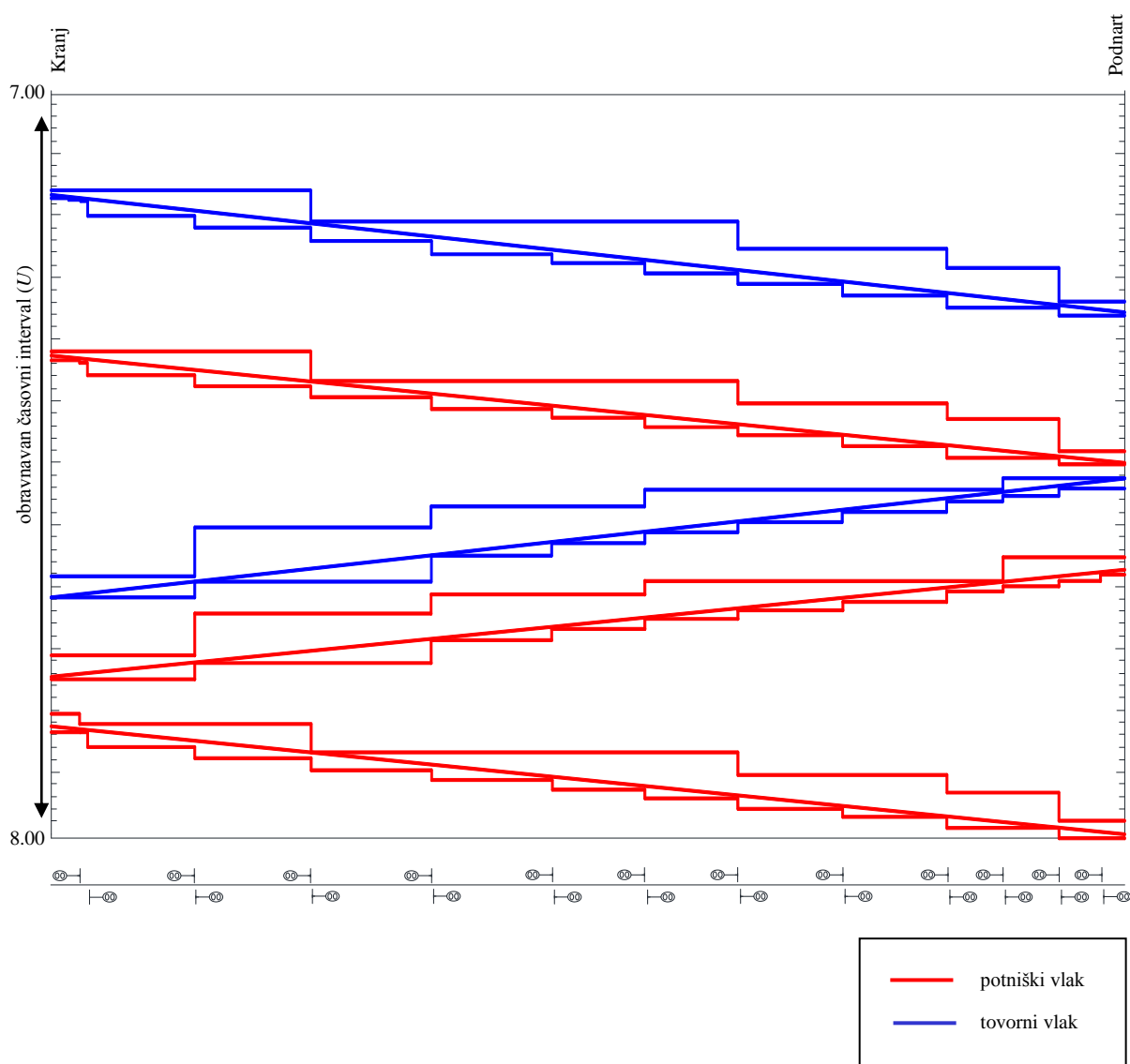
V nadaljevanju sem izkoriščenost kapacitete določala še za ostale odseke (odsek Podnart - Lesce - Bled, Lesce - Bled - Žirovnica in Žirovnica - Slovenski Javornik).

Vlakovne poti sem zgoščala na podlagi grafikona voznega reda, ki sem ga dobila kot izhodni pri simulaciji obratovanja vlakov na relaciji Kranj - Jesenice (Priloga A).

### 8.5.1.1 Primerjava daljšega in krajšega odseka

Daljši odsek je odsek Kranj - Podnart. Preden sem pričela z zgoščanjem vlakovnih poti, sem na grafikonu voznega reda označila kritične prostorske odseke med vlakovnimi potmi na obravnavanem odseku (Priloga A).

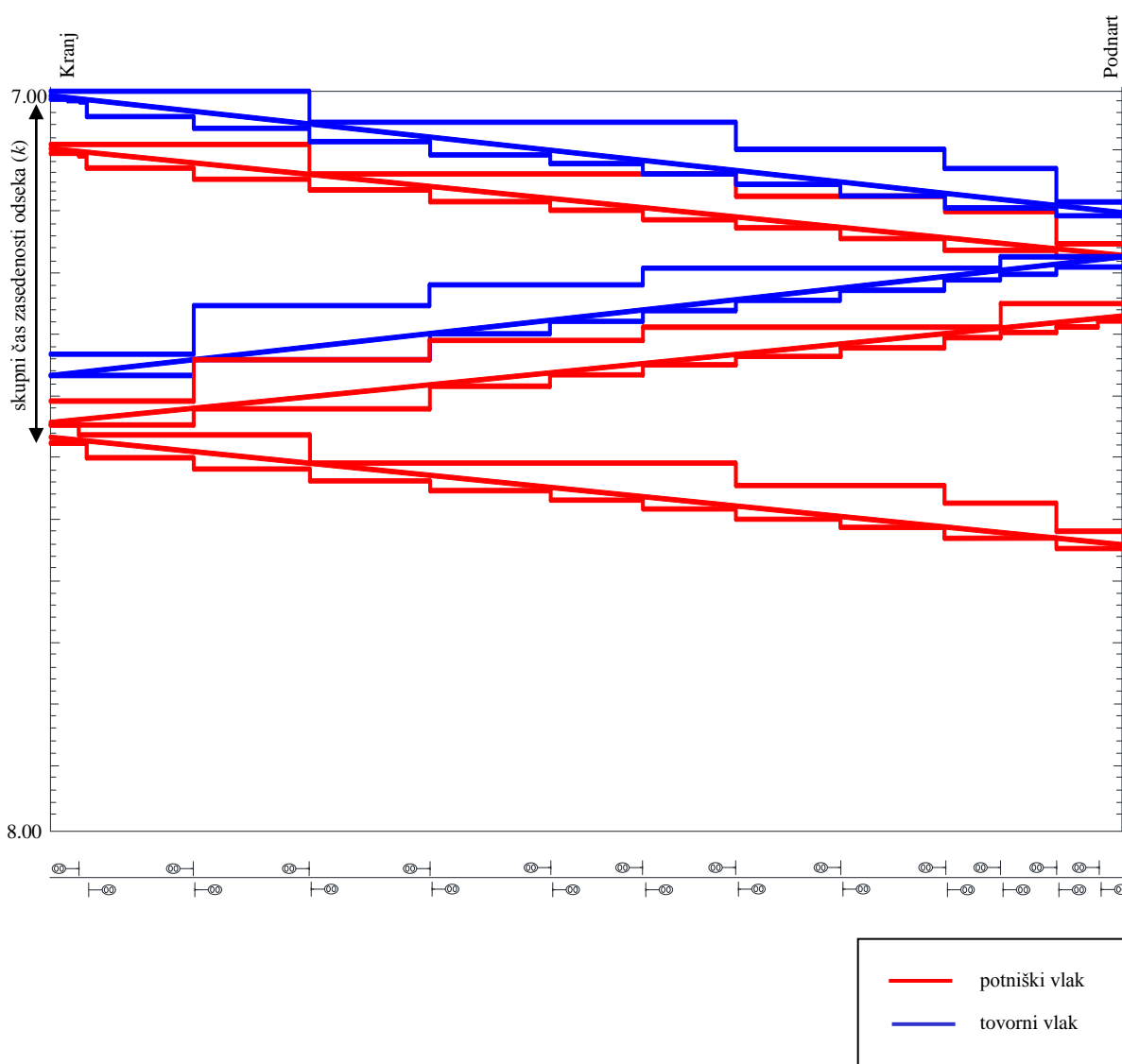
Tamponski čas na kritičnem prostorskem odseku je prisoten med vlakovnimi potmi vlakov 45442 in 4290 ter vlakov 45415 in 415. Dodatek časa za križanje vlakov na enotirnih progah je med vlaki vlakovnimi potmi vlakov 4290 in 45415 ter 415 in 314 (Priloga A).



Slika 51: Nezgoščen vozni red Kranj - Podnart

Obravnavala sem časovni interval od 7.00 do 8.00, zato sem znotraj tega intervala zgoščala vlakovne poti v voznem redu.

Tamponski časi in dodatki časa za križanje vlakov na enotirnih progah so po zgoščanju voznega reda na kritičnih prostorskih odsekih enaki nič.

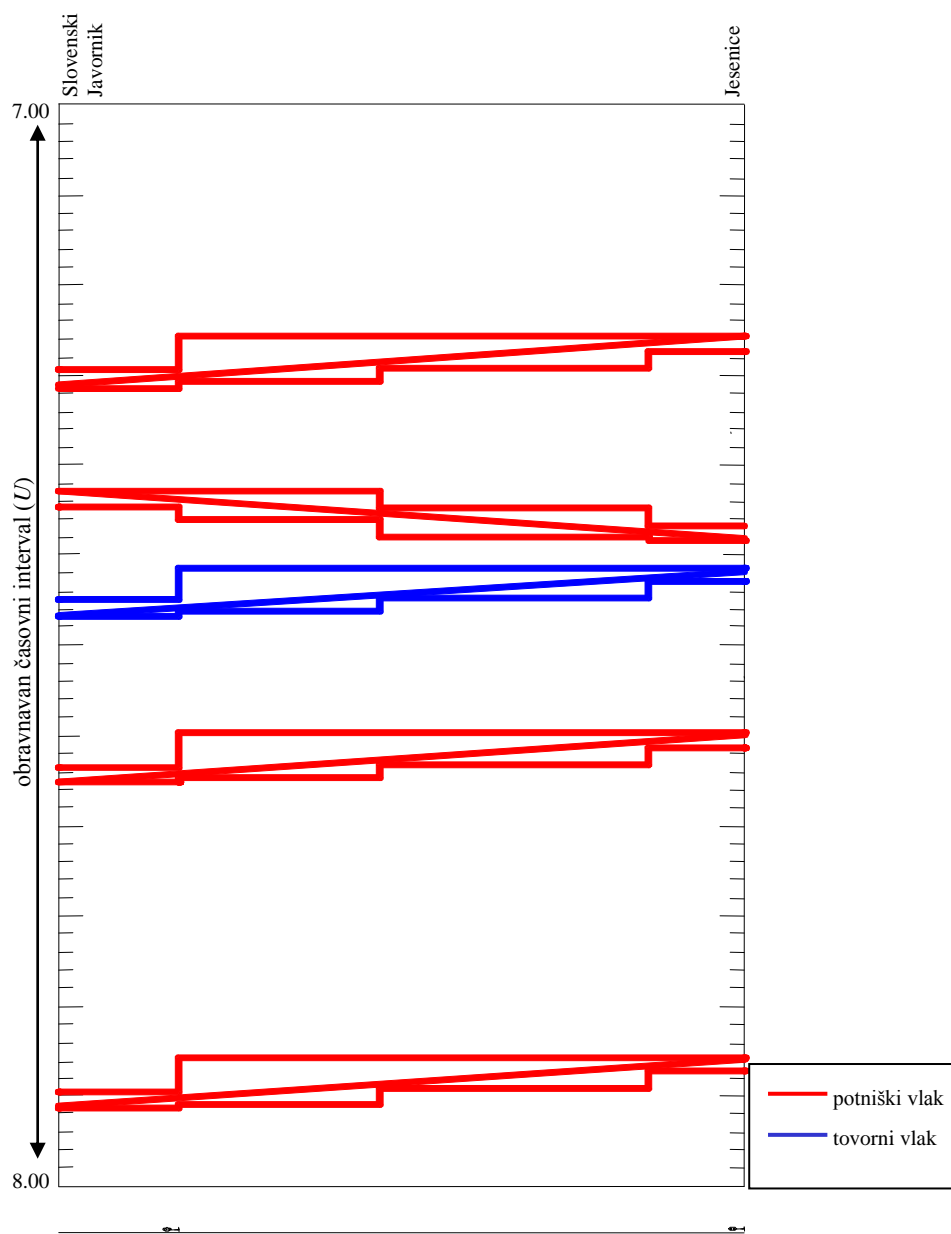


Slika 52: Zgoščen vozni red Kranj - Podnart

Skupni čas zasedenosti odseka ( $k$ ) sem določala na prvem prostorskem odseku vzdolž obravnavanega progovnega odseka, ki traja po zgoščanju voznega reda 29 min. Izkoriščenost kapacitete ( $K$ ) znaša 48 %.

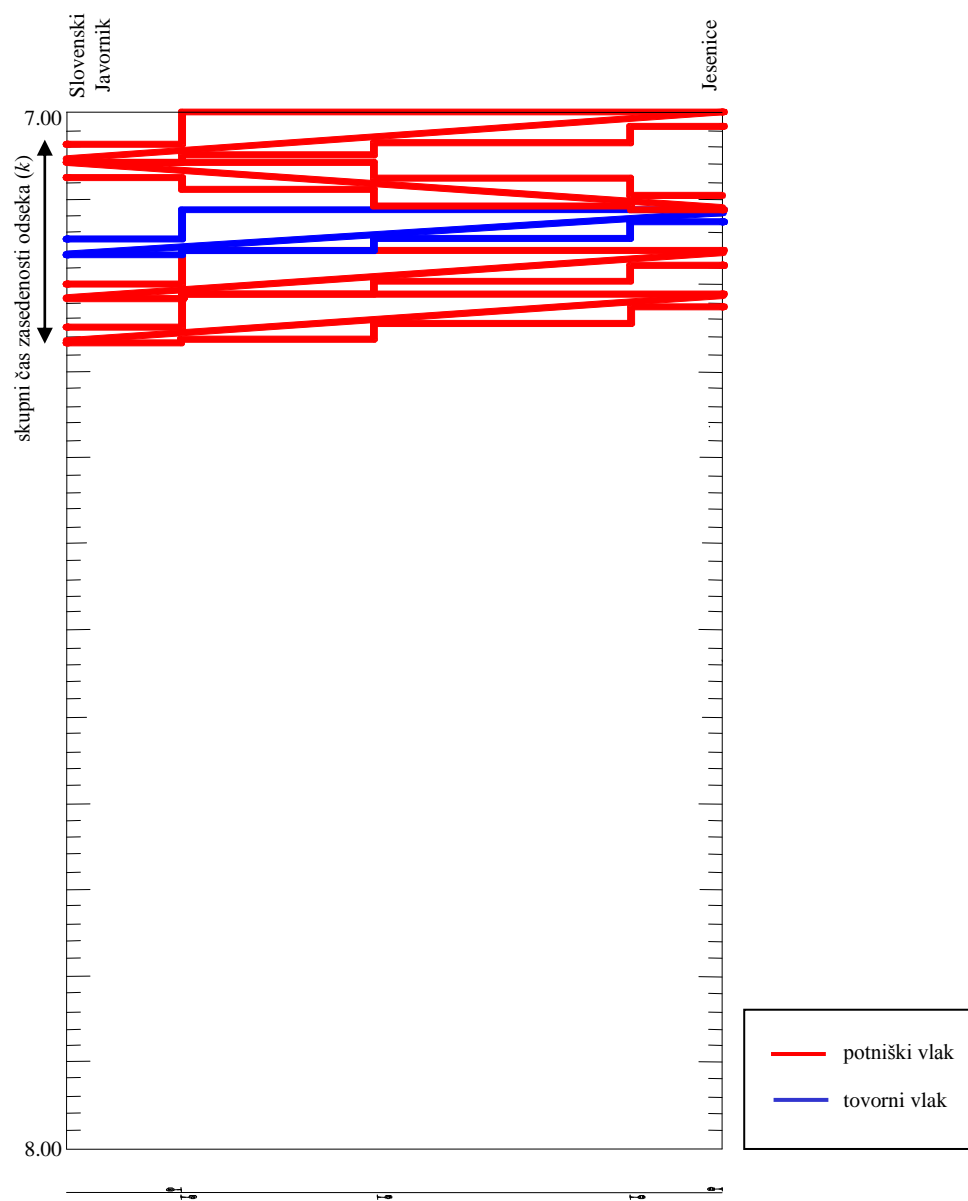
Krajši odsek je odsek Slovenski Javornik - Jesenice. Preden sem pričela z zgoščanjem vlakovnih poti, sem na grafikonu voznega reda označila kritične prostorske odseke med vlakovnimi potmi na

obravnanim odseku Slovenski Javornik - Jesenice (Priloga A). Tamponski čas na kritičnem prostorskem odseku je prisoten med vlakovnimi potmi vlakov 2493 in 2413 ter 46673 in 2413. Dodatek časa za križanje vlakov na enotirnih progah je med vlakovnimi potmi vlakov 46673 in 2402 ter 415 in 2402 (Priloga A).



Slika 53: Nezgoščen vozni red Slovenski Javornik - Jesenice

Znotraj obravnavanega časovnega intervala od 7.00 do 8.00 sem zgoščala vlakovne poti v voznem redu.



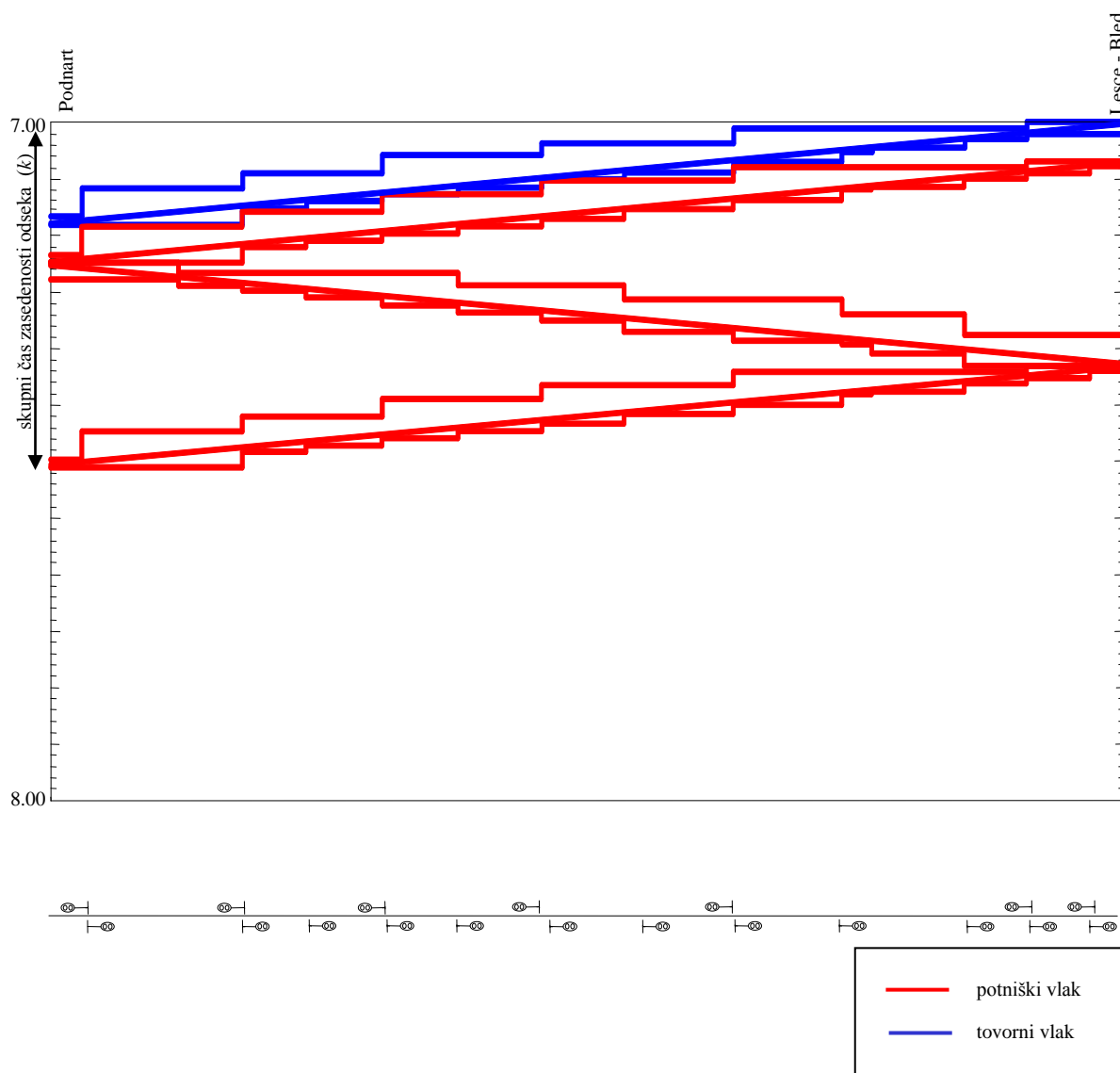
Slika 54: Zgoščen vozni red Slovenski Javornik - Jesenice

Po zgoščanju traja čas zasedenosti odseka ( $k$ ) 13 min. Izkoriščenost kapacitete ( $K$ ) znaša 22 %.

### 8.5.1.2 Ostali odseki

Znotraj časovnega intervala od 7.00 do 8.00 sem zgostila vozni red še drugih odsekov na progovnem odseku Kranj - Jesenice (kritični prostorski odseki so označeni v Prilogi A).

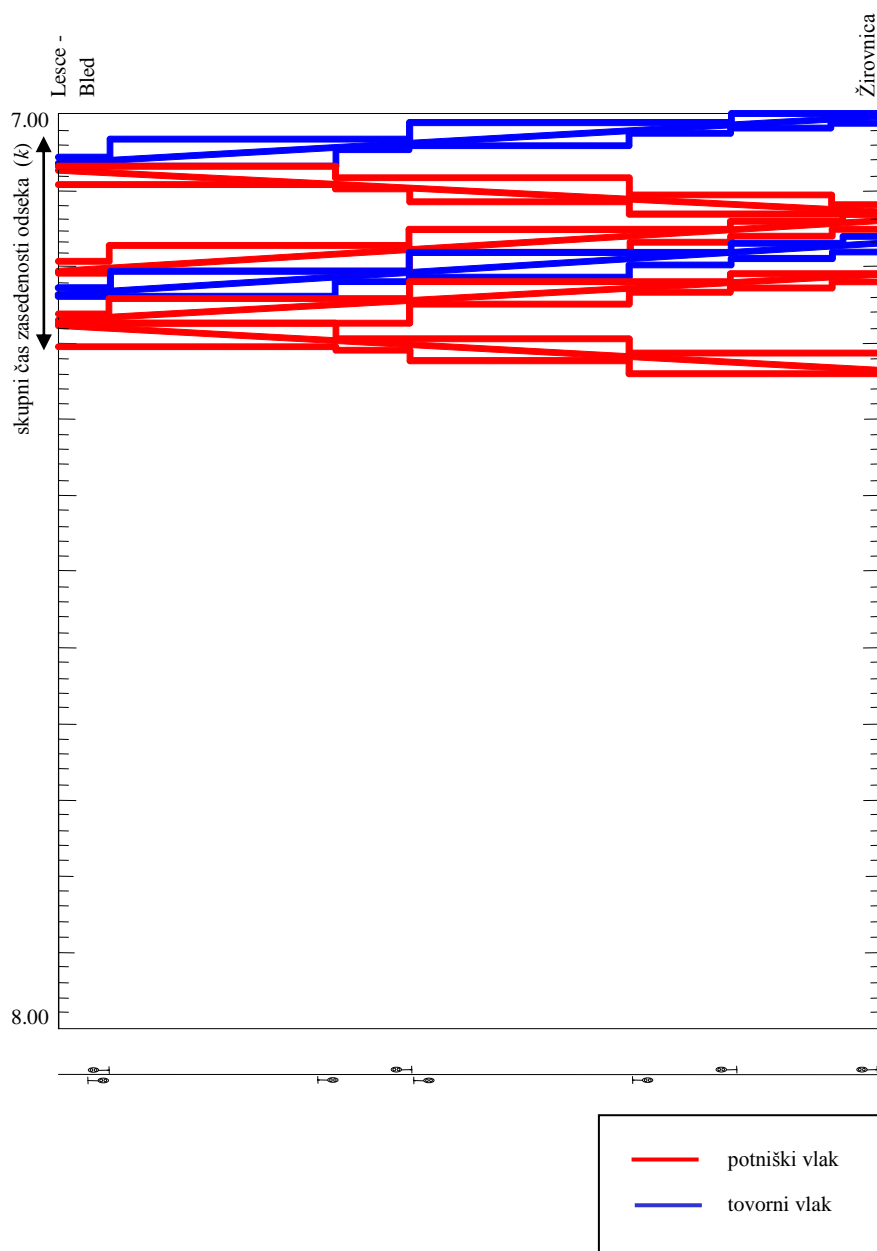
- Odsek Podnart - Lesce - Bled



Slika 55: Zgoščen vozni red Podnart - Lesce - Bled

Po zgoščanju traja čas zasedenosti odseka ( $k$ ) 30 min. Izkoriščenost kapacitete ( $K$ ) znaša 50 %.

- Odsek Lesce - Bled - Žirovnica

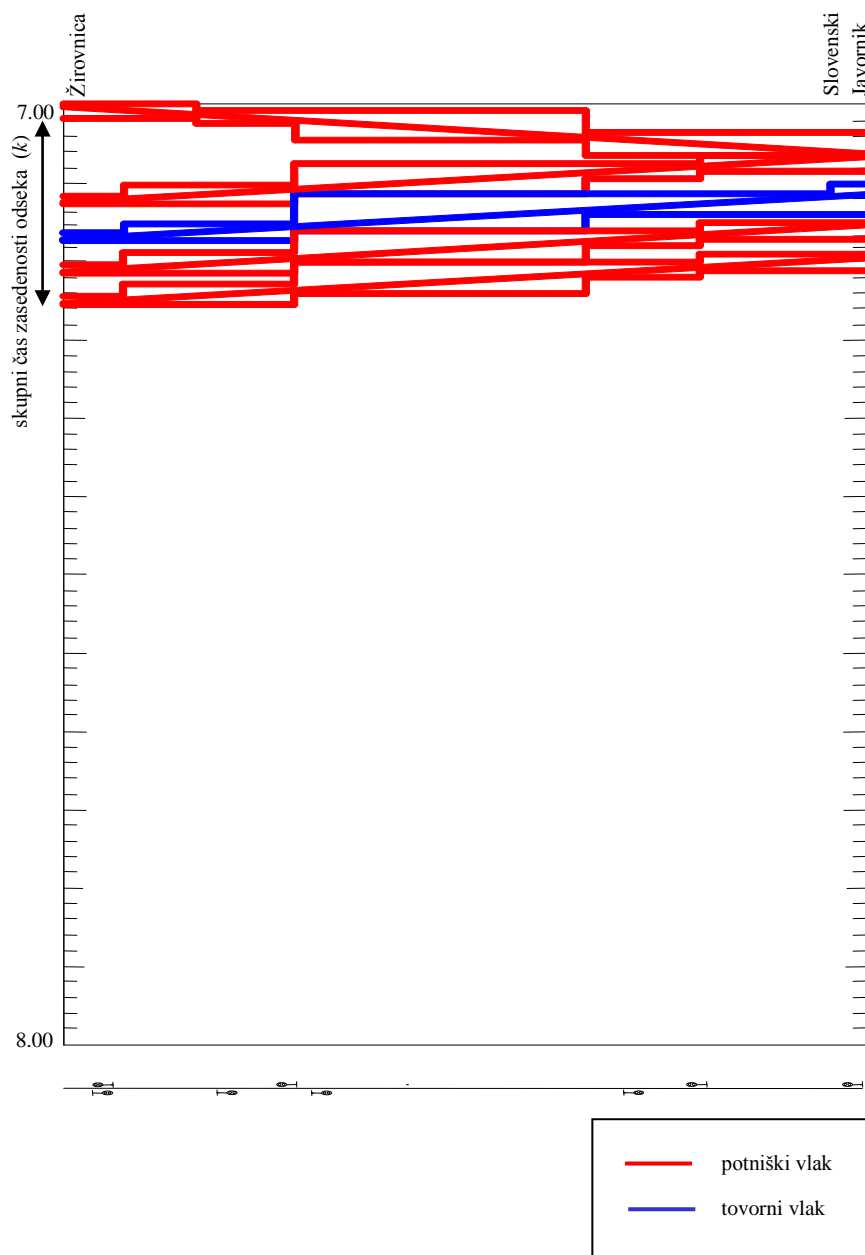


Slika 56: Zgoščen vozni red Lesce - Bled - Žirovnica

Po zgoščanju traja čas zasedenosti odseka ( $k$ ) 15 min. Izkoriščenost kapacitete ( $K$ ) znaša 25 %.



- Odsek Žirovnica - Slovenski Javornik



Slika 57: Zgoščen vozni red Žirovnica - Slovenski Javornik

Po zgoščanju traja čas zasedenosti odseka ( $k$ ) 13 min. Izkoriščenost kapacitete ( $K$ ) znaša 22 %.

### 8.5.1.3 Interpretacija rezultatov

Na obeh odsekih Kranj - Podnart in Slovenski Javornik - Jesenice vozi enako število vlakov, vendar se skupni čas zasedenosti posameznega odseka ( $k$ ) precej razlikuje. Razlog za to je dolžina obravnavanih odsekov. Na daljšem odseku traja skupni čas zasedenosti odseka ( $k$ ) 29 min, zato znaša izkoriščenost kapacitete 48 %. Na krajšem odseku pa traja skupni čas zasedenosti odseka ( $k$ ) 13 min, izkoriščenost kapacitete pa znaša 22%. Kljub temu, da gre za isto progo in enako število vlakov, je izkoriščenost kapacitete daljšega odseka za 26 % večja od izkoriščenosti kapacitete krajšega odseka.

Na krajšem odseku je mogoče bolj zgostiti vlakovne poti, ker je manj prostorskih odsekov, ki so krajši. Zaradi krajših prostorskih odsekov je tudi čas zasedenosti prostorskih odsekov krajši in prav tako tudi skupni čas zasedenosti odseka ( $k$ ). Izkoriščenost kapacitete ( $K$ ) krajših odsekov je zato manjša.

Tudi vrednosti izkoriščenosti kapacitete na ostalih odsekih se spreminjajo v skladu z njihovo dolžino. V splošnem velja, da daljši kot je odsek, večja je izkoriščenost kapacitete, čeprav se pojavljajo nekatera odstopanja, ki so najpogosteje posledica organizacije odprave vlakov (Slika 68 in Slika 69).

Preglednica 8: Izkoriščenosti kapacitete odsekov

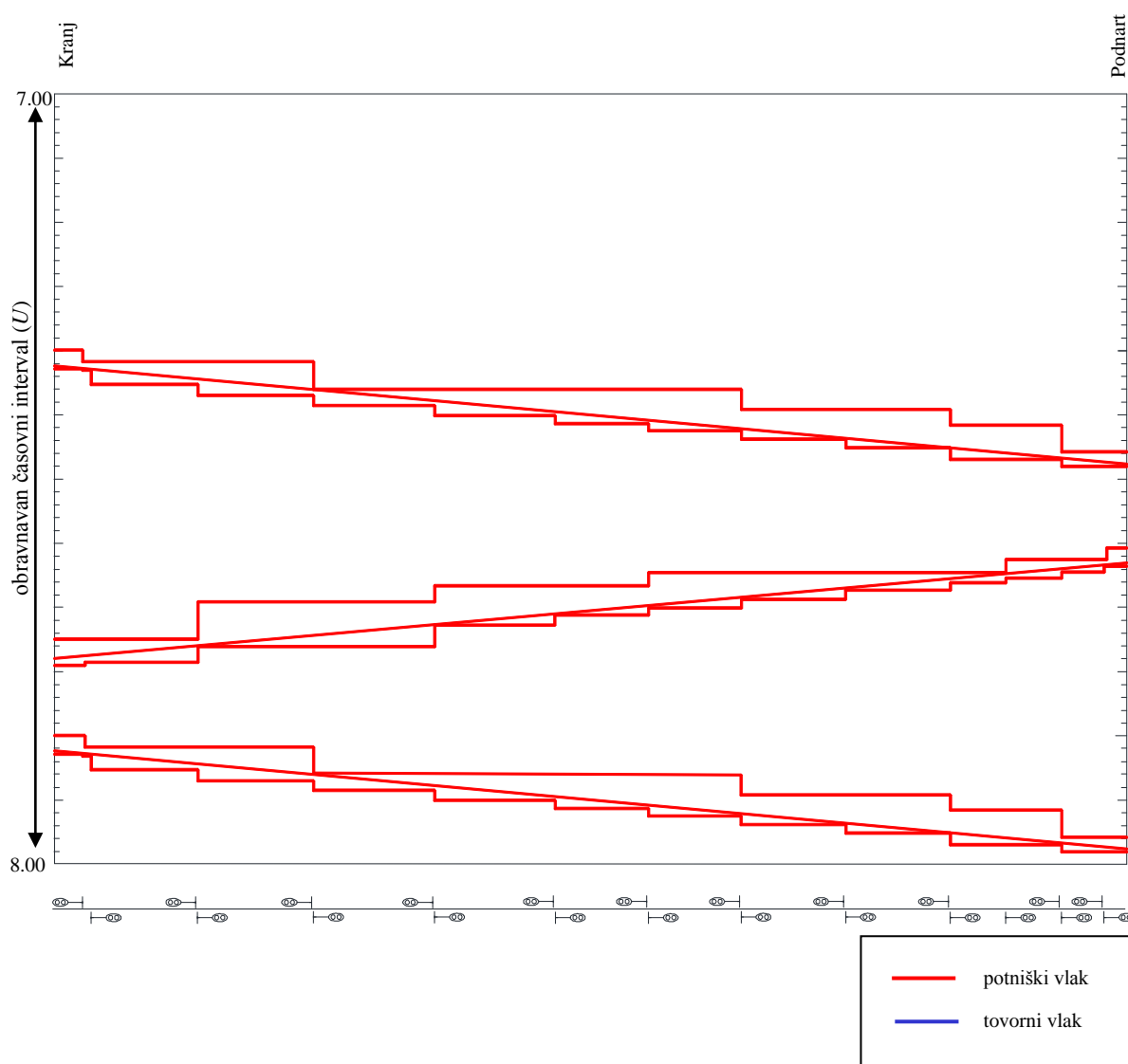
| Odsek                          | Dolžina [km] | Število vlakov | Skupni čas zasedenosti odseka ( $k$ ) [min] | Izkoriščenost kapacitete ( $K$ ) [%] |
|--------------------------------|--------------|----------------|---|--------------------------------------|
| Kranj – Podnart                | 11           | 5              | 29  | 48                                   |
| Podnart - Lesce - Bled         | 12           | 4              | 30  | 50                                   |
| Lesce - Bled - Žirovnica       | 5            | 6              | 15  | 25                                   |
| Žirovnica - Slovenski Javornik | 5            | 5              | 13  | 22                                   |
| Slovenski Javornik - Jesenice  | 3            | 5              | 13  | 22                                   |

Izkoriščenost kapacitete je največja na odseku Podnart - Lesce - Bled. Ta odsek določa izkoriščenost kapacitete celotnega progovnega odseka Kranj - Jesenice, ki znaša 50 %.

### 8.5.2 Vpliv homogenosti obratovanja in hitrosti na izkoriščenost kapacitete

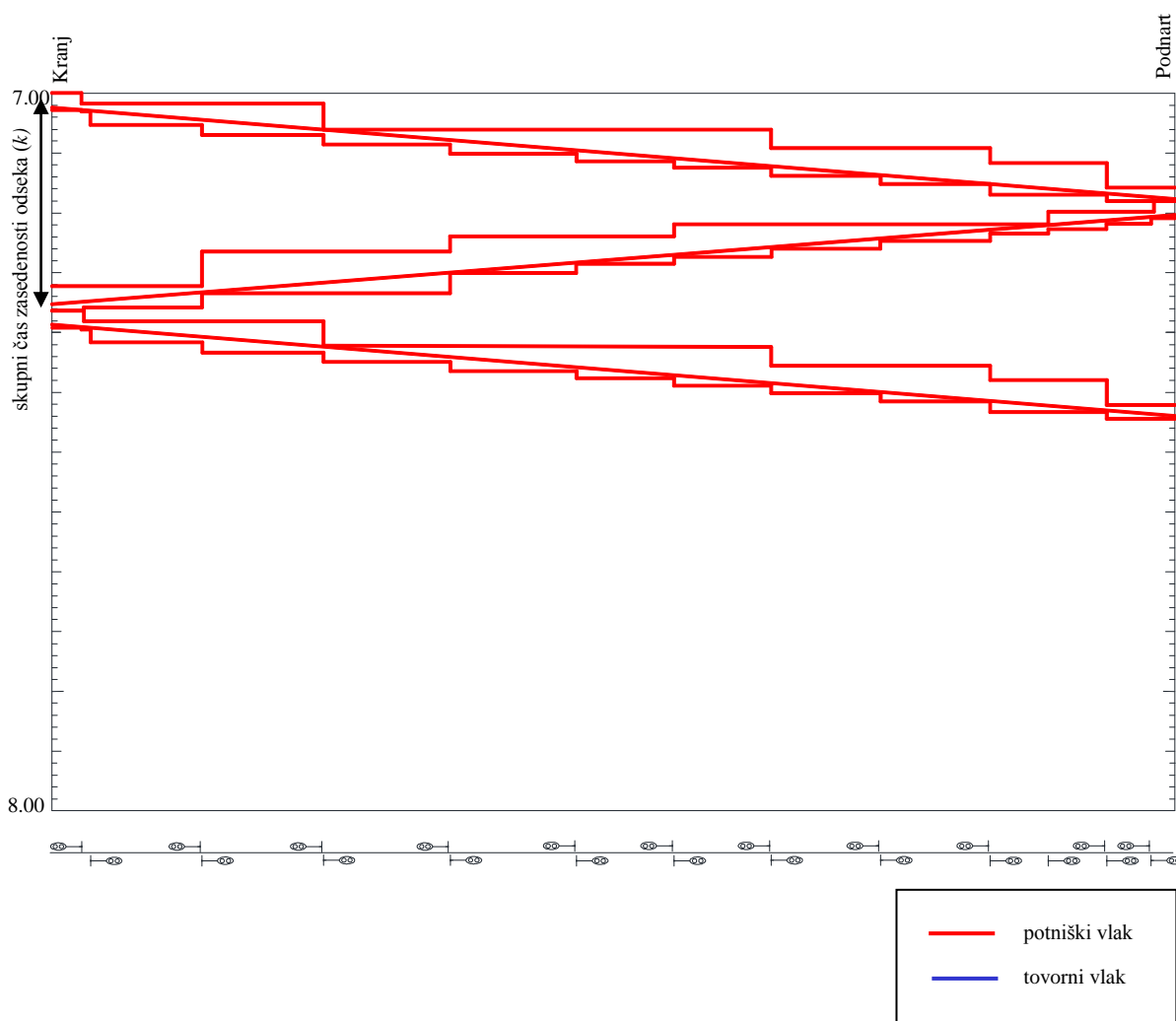
Vpliv hitrosti in homogenosti obratovanja na izkoriščenost kapacitete sem obravnavala v primeru, ko vozijo samo potniški vlaki s hitrostjo 100 km/h. Obravnavala sem odsek Kranj - Podnart (Priloga B).

Na odseku vozijo trije potniški vlaki (vlak 4290, vlak 314 in vlak 415). Zaporedje vlakov je takšno, da vozijo vlaki izmenično v nasprotnih smereh. Med vlakovnimi potmi je zato dodatek časa za križanje vlakov na enotirnih progah (ang. *crossing buffer time*).



Slika 58: Nezgoščen vozni red Kranj - Podnart, ko vozijo samo potniški vlaki 100 km/h

Predem sem zgostila vlakovne poti v vozni red sem označila kritične prostorske odseke med vlakovnimi potmi (Priloga B). Kritična prostorska odseka sta tik za postajo Kranj in tik pred postajo Podnart.



Slika 59: Zgoščen vozni red Kranj - Podnart, ko vozijo samo potniški vlaki 100 km/h

Po zgoščanju traja čas zasedenosti odseka ( $k$ ) 20 min. Izkoriščenost kapacitete ( $K$ ) znaša 33 %.

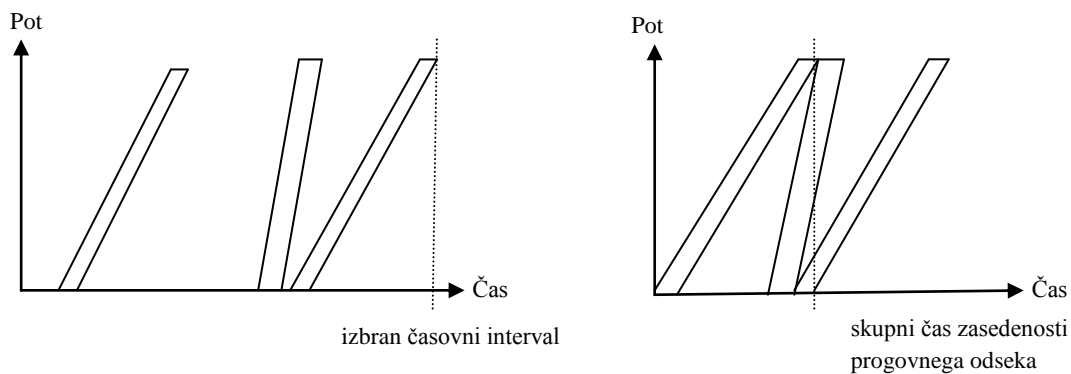
### 8.5.2.1 Interpretacija rezultatov

#### 8.5.2.1.1 Homogenost obratovanja

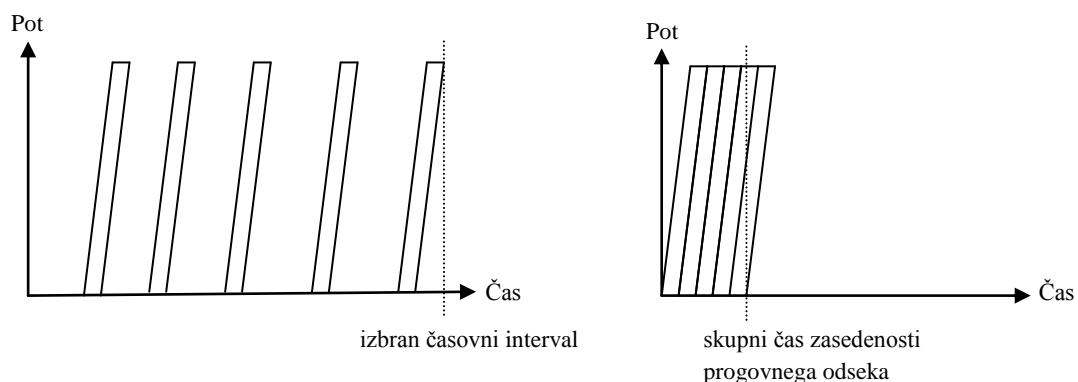
Če skupni čas zasedenosti odseka Kranj - Podnart ( $k$ ) homogenega obratovanja (20 min) primerjamo s skupnim časom zasedenosti istega odseka ( $k$ ) pri heterogenem obratovanju (29 min) (poglavje 8.5.1), ugotovimo, da je skupni čas zasedenosti odseka ( $k$ ) krajši pri homogenem obratovanju. Zaradi tega je tudi izkoriščenost kapacitete ( $K$ ) homogenega obratovanja manjša in znaša 33 %, za razliko od izkoriščenosti ( $K$ ) heterogenega obratovanja, ki znaša 48 %.

Krajši skupni čas zasedenosti odseka ( $k$ ) pri homogenem obratovanju je posledica dejstva, da pri homogenem obratovanju na odseku Kranj - Podnart samo trije vlaki, pri heterogenem pa pet.

Če bi obravnavali enotirno progo, na kateri bi v obravnavanem časovnem intervalu vozili vsi vlaki v isti smeri, bi se lahko celo zgodilo, da bi bila izkoriščenost kapacitete homogenega obratovanja z večjim številom vlakov manjša kot izkoriščenost kapacitete heterogenega obratovanja z manjšim številom vlakov. Razlog za krajši skupni čas zasedenosti progovnega odseka pri homogenem obratovanju je v tem, da so vlakovne poti v voznem redu pri homogenem obratovanju lahko bolj zgoščene kot pri heterogenem. Pri homogenem obratovanju je mogoče vlakovne poti tako zgostiti, da je tamponski čas na vseh prostorskih odsekih znotraj obravnavanega progovnega odseka enak nič. Pri heterogenem obratovanju pa je tamponski čas med vlakovnima potema enak nič samo na tistem prostorskem odseku, kjer je časovni interval med zaporednimi vožnjami (ang. *minimum headway time*) minimalen (kritični prostorski odsek). Posledično je zato tudi izkoriščenost kapacitete pri homogenem obratovanju, ki se določa glede na skupni čas zasedenosti progovnega odseka, manjša. Če bi določali kapaciteto (torej število vlakov/h), bi bila njena vrednost pri homogenem obratovanju večja. Če je obratovanje homogeno, lahko več vlakov prepelje določen odsek v izbranem časovnem intervalu, kot če je obratovanje heterogeno. Ko določamo vrednost izkoriščenosti kapacitete, pa večje število vlakov v izbranem časovnem intervalu ne pomeni nujno večje izkoriščenosti kapacitete. Prav zaradi tega neskladja je tako pomembno, da poleg vrednosti izkoriščenosti kapacitete navedemo vedno tudi pogostost vlakov, stabilnost voznega reda, heterogenost obratovanja in povprečno hitrost vlakov (poglavje 5).



Slika 60: Izkoriščenost kapacitete heterogenega obratovanja



Slika 61: Izkoriščenost kapacitete homogenega obratovanja

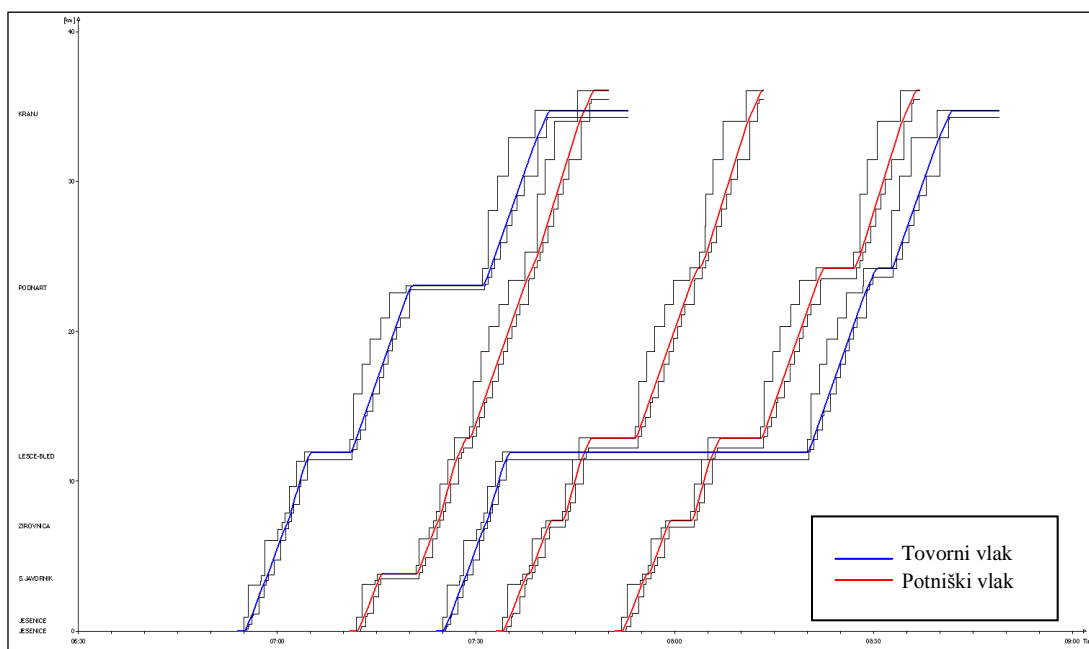
#### 8.5.2.1.2 Hitrost vlakov

Na vrednost izkoriščenosti kapacitete pomembno vpliva tudi hitrost. Če bi obravnavali dva primera obratovanja vlakov, ki se med seboj razlikujeta samo v hitrosti vlakov, vse ostalo pa je enako (enako število, zaporedje, vrsta vlakov ...), bi bila izkoriščenost kapacitete manjša v tistem primeru, ko je hitrost vlakov večja.

Pri večji hitrosti vlakov, je čas zasedenosti posameznega prostorskega odseka zaradi določene vlakovne poti krajši. Zato je zasedenost infrastrukture ( $A$ ) pri večji hitrosti manjša kot pri enakem številu vlakov, če je njihova hitrost manjša. Skupni čas zasedenosti progovnega odseka ( $k$ ) je krajši.

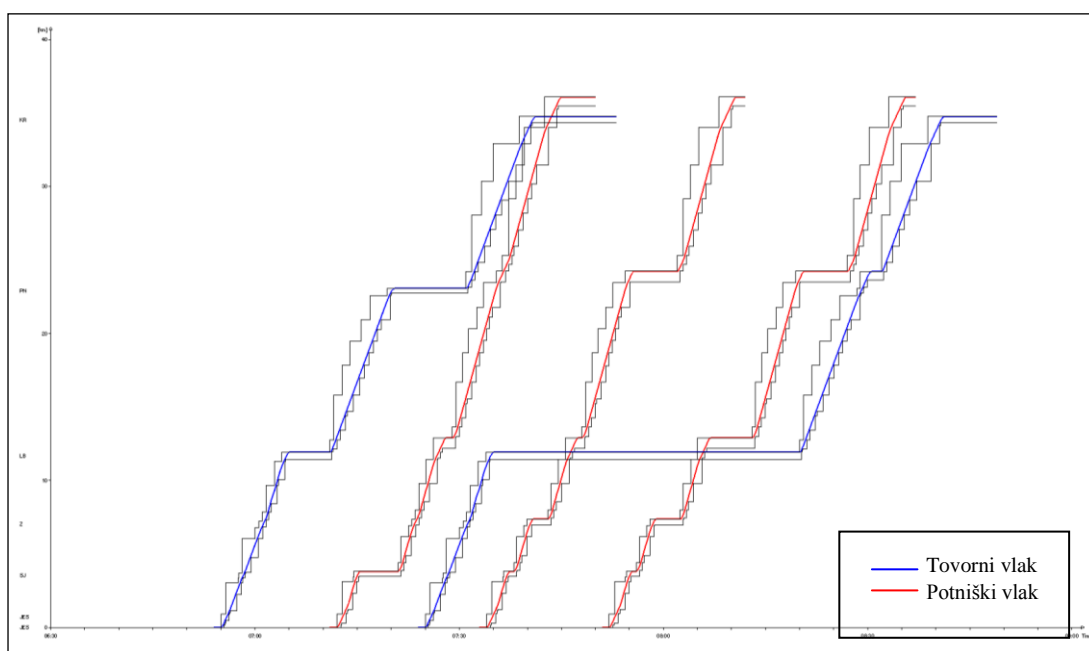
Večja hitrost pri enakem številu vlakov pomeni torej večji delež neizkoriščene kapacitete, kar omogoča vključitev dodatnih vlakovnih poti v vozni red in hkrati izboljšanje izkoriščenosti razpoložljive kapacitete.

Slika 62 in Slika 63 prikazujeta grafe vlakovnih poti pri heterogenem obratovanju. Tovorni vlaki vozijo v obeh primerih z enako hitrostjo, medtem ko je hitrost potniških vlakov različna.



Slika 62: Grafi vlakovnih poti, ko vozijo vlaki pri predpisani hitrosti.

Progovne hitrosti so predpisane v programu omrežja Slovenskih železnic v prilogi 3/6. Predpisane hitrosti na odprti progi se gibljejo od 70 km/h do 100 km/h in se razlikujejo glede na odsek proge in glede na vrsto vlaka.



Slika 63: Grafi vlakovnih poti, ko vozijo tovorni vlaki pri predpisani hitrosti, potniški vlaki pa s hitrostjo 100 km/h.

Grafi vlakovnih poti potniških vlakov so zaradi večje hitrosti bolj strmi, zato je ploščina črno obrobjenih pravokotnikov manjša (Slika 63). Če bi določali izkoriščenost kapacitete ( $K$ ) za obravnavana primera (Slika 62 in Slika 63), bi bila vrednost v drugem primeru manjša zaradi večje hitrosti vlakov.

### **8.5.3 Vpliv dodatnega tira na izkoriščenost kapacitete**

Izkoriščenost kapacitete celotne proge bi lahko določili, če bi vrednosti izkoriščenosti kapacitete izračunali za vse odseke na progi Ljubljana - Jesenice. Če bi izkoriščenost kapacitete obravnavane proge presegla priporočeno vrednost izkoriščenosti kapacitete (7.1.6.1), bi bila ena izmed možnosti povečanja kapacitete dodaten tir na progi. Zahteve po dodatnem tiru bi lahko nastale tudi zaradi povečanega deleža tovrnega prometa in pogostejših potniških vlakov v prihodnosti. Število tirov je poleg razdelitve proge na progovne odseke in števila mest za križanje ter prehitevanje ena izmed tehničnih lastnosti infrastrukture, ki pomembno vpliva na kapaciteto in njeno izkoriščenost.

Analizirala sem vpliv dodatnega tira, torej kolikšna bi bila izkoriščenost kapacitete, če predpostavimo, da je priporočena vrednost izkoriščenosti kapacitete dosežena in zato vlake razdelimo glede na smer vožnje.

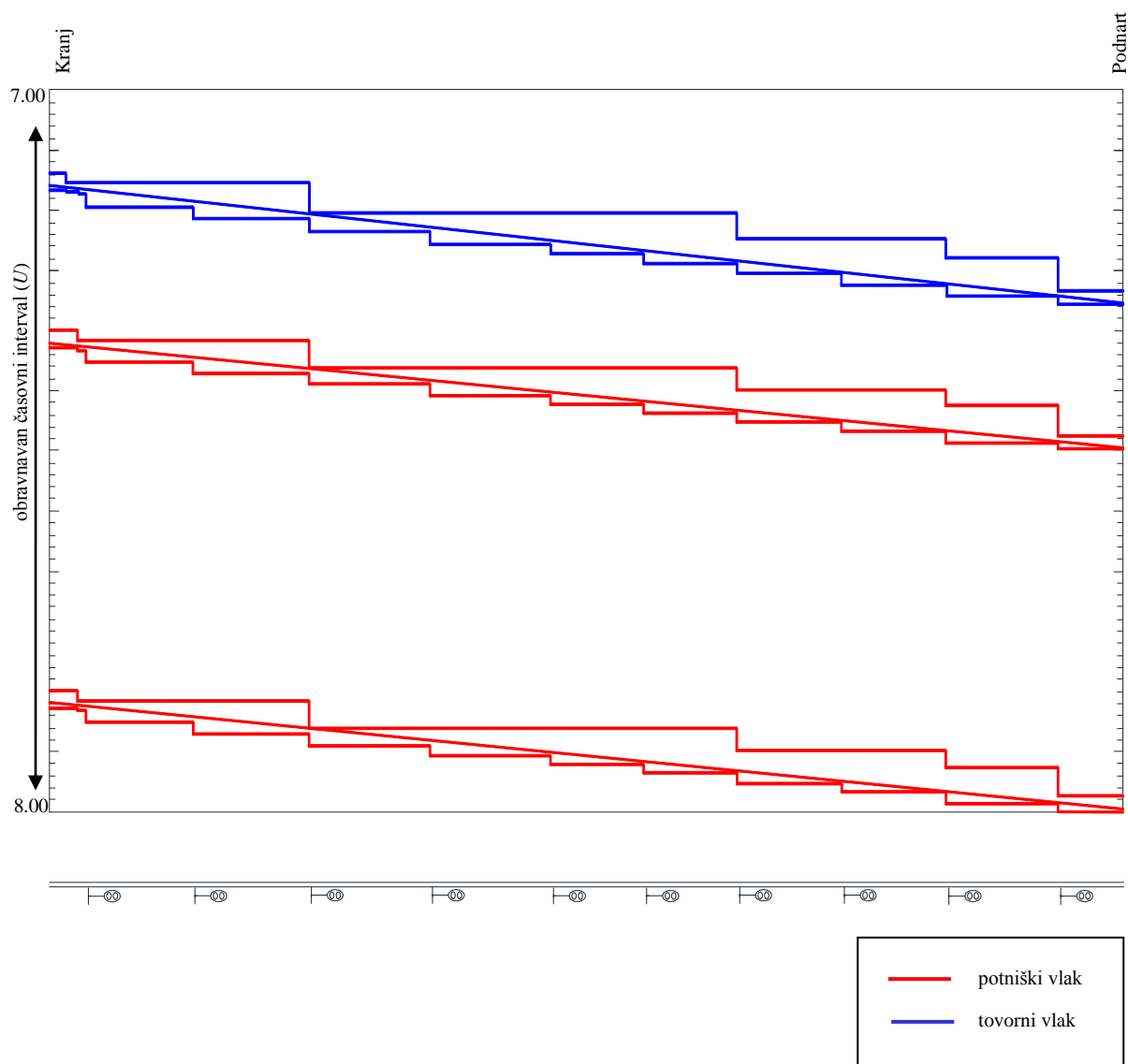
#### **8.5.3.1 Prvi tir**

Prvi tir je namenjen vlakom, ki vozijo v smeri iz Kranja proti Jesenicam. Karakteristike voznega parka in karakteristike voznega reda so enake karakteristikam dejanskega stanja.

Obravnavala sem odsek Kranj - Podnart (Priloga C). V obravnavanem časovnem intervalu od 7.00 do 8.00 vozijo na obravnavanem odseku trije vlaki, en tovorni in dva potniška.

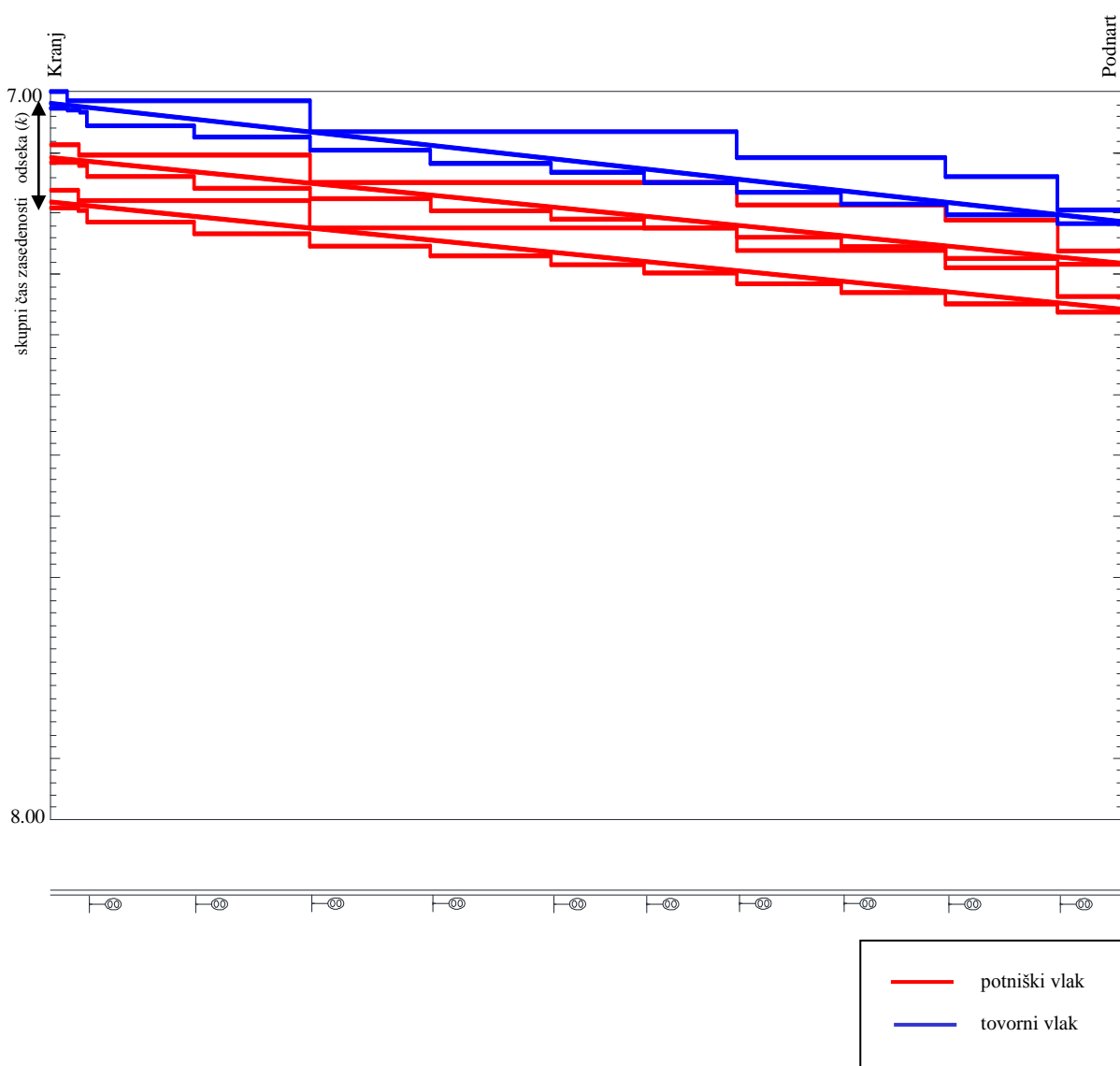
Preden sem pričela z zgoščanjem vlakovnih poti v voznem redu sem na obravnavanem odseku označila kritične prostorske odseke (Priloga C). Ker vozijo vsi vlaki v isti smeri, je med vlakovnimi potmi tamponski čas. Na dvotirnih progah dodatek časa za križanje vlakov ni potreben.





Slika 64: Nezgoščen vozni red Kranj - Podnart na dvotirni progi za smer Kranj - Jesenice

Vlakovne poti v voznem redu sem zgostila, kolikor omogočajo kritični odseki, na katerih je po zgoščanju tamponski čas enak nič.



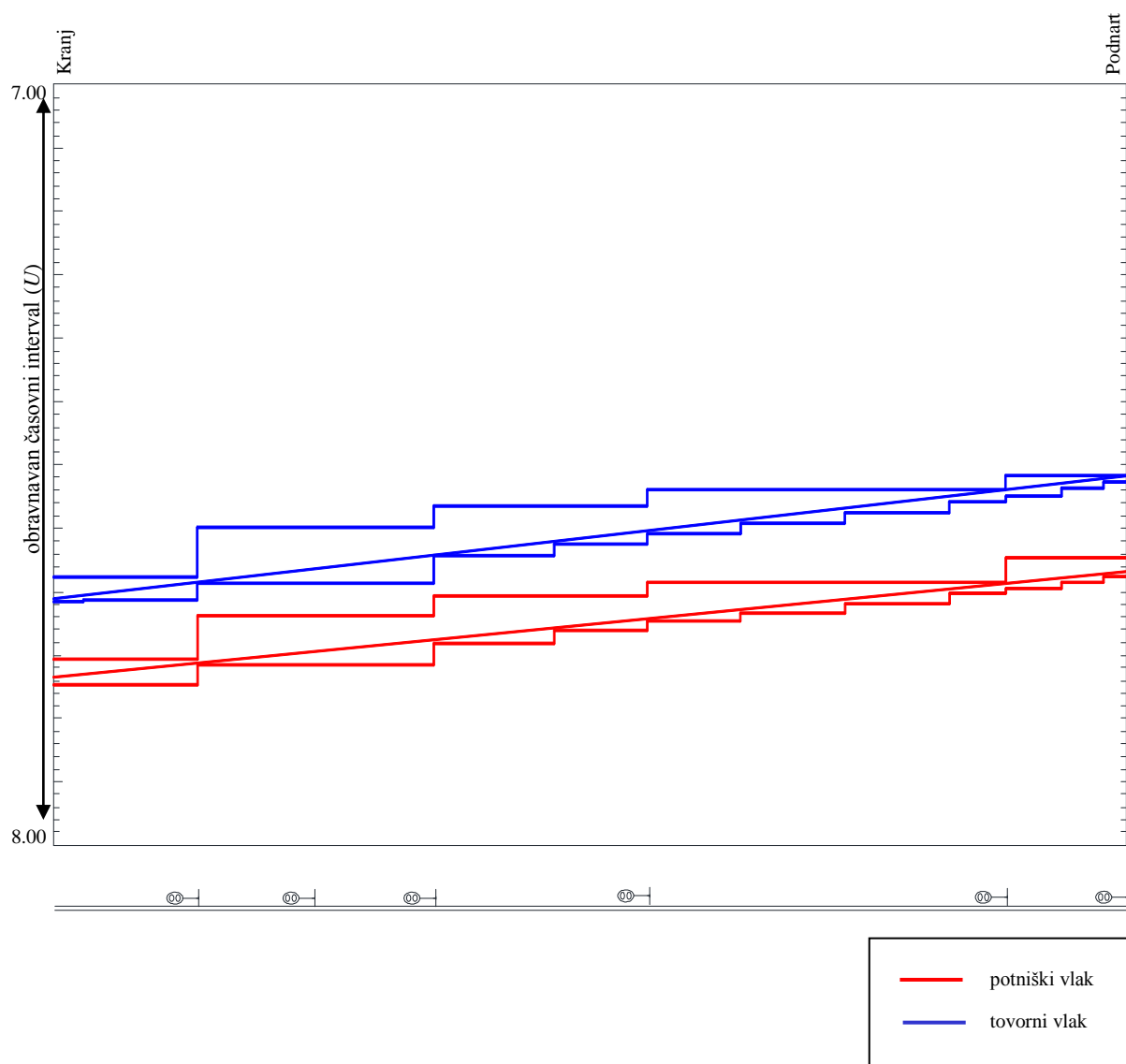
Slika 65: Zgoščen vozni red Kranj - Podnart na dvotirni progi za smer Kranj - Jesenice

Po zgoščanju traja čas zasedenosti odseka ( $k$ ) 10 min. Izkoriščenost kapacitete znaša ( $K$ ) 17 %.

### 8.5.3.2 Drugi tir

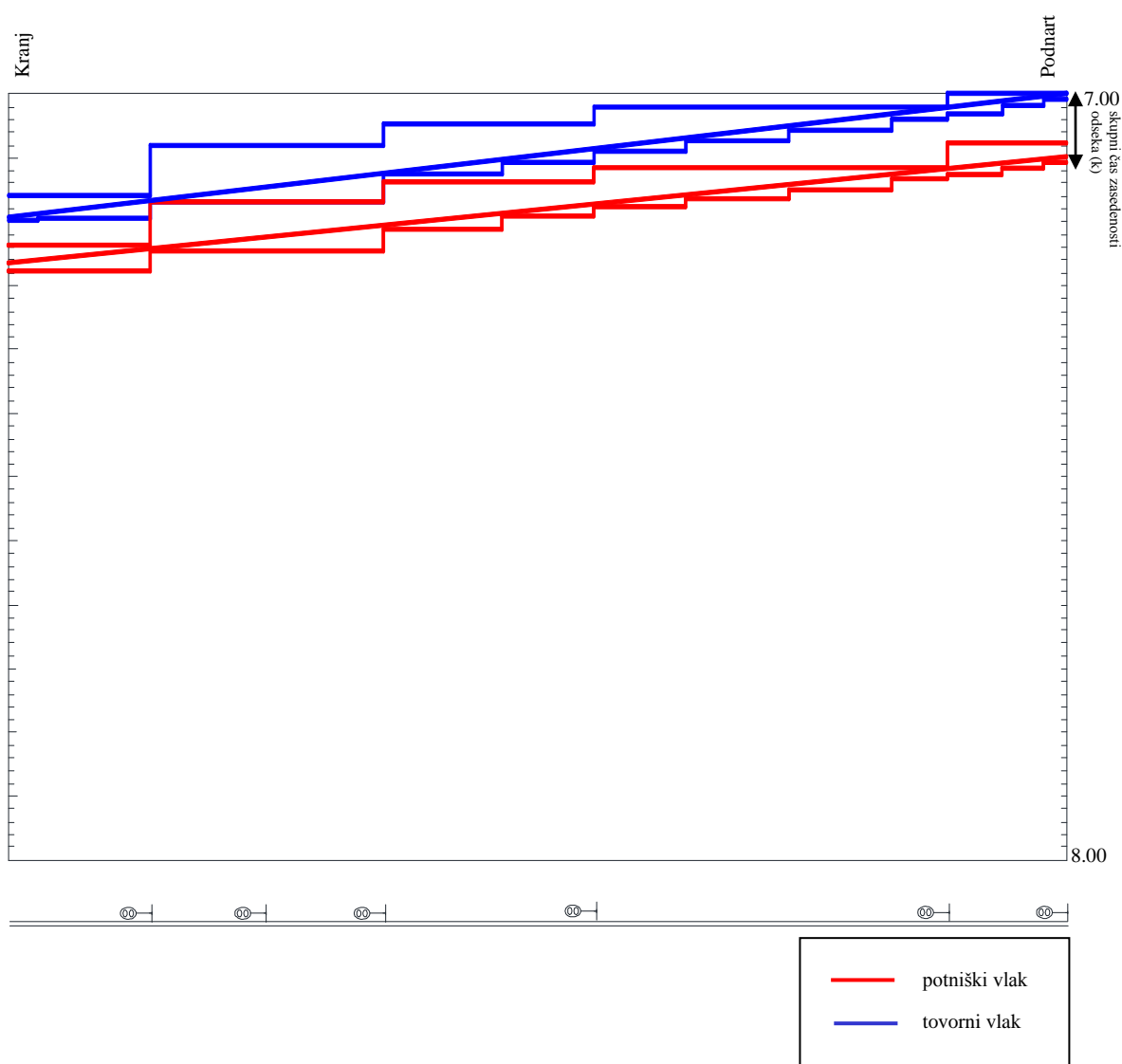
Drugi tir je namenjen vožnji vlakov z Jesenic proti Kranju. Obravnavala sem isti odsek, kot v primeru 8.5.3.1, torej odsek Kranj - Podnart (Priloga D).

V obravnavanem časovnem intervalu od 7.00 do 8.00 vozita na odseku samo dva vlaka, en potniški in en tovorni. Preden sem zgoštila vlakovne poti v voznem redu, sem na obravnavanem odseku označila kritične prostorske odseke (Priloga D).



Slika 66: Nezgoščen vozni red Kranj - Podnart na dvotirni progi za smer Jesenice - Kranj

Ker vozijo vsi vlaki v isti smeri, je med vlakovnimi potmi tamponski čas, ki je po zgoščanju na kritičnem prostorskem odseku enak nič.



Slika 67: Zgoščen vozni red Kranj - Podnart na dvotirni progi za smer Jesenice - Kranj

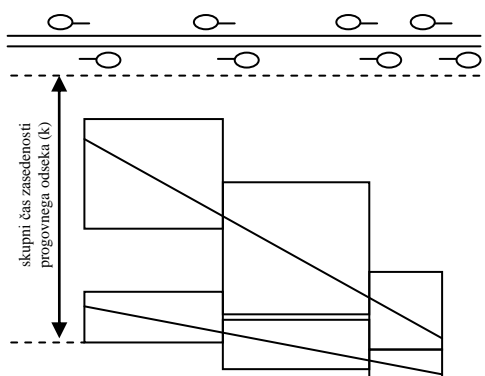
Po zgoščanju traja čas zasedenosti odseka ( $k$ ) 6 min. Izkoriščenost kapacitete ( $K$ ) znaša 10 %.

### 8.5.3.3 Interpretacija rezultatov

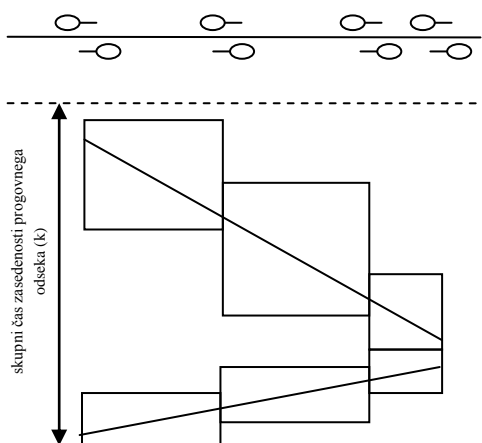
V primeru dvotirne proge, bi trajal skupni čas zasedenosti odseka ( $k$ ) za smer Kranj - Jesenice 10 min, za smer Jesenice - Kranj pa 14 min. Izkoriščenost kapacitete prvega tira je večja in znaša 17 %, medtem ko znaša izkoriščenost kapacitete drugega tira 23 %. Iz Kranja proti Jesenicam vozijo trije vlaki, zato je skupni čas zasedenosti odseka ( $k$ ) daljši od skupnega časa zasedenosti odseka drugega tira.

Če obravnavamo odsek Kranj - Podnart na enotirni progi (poglavje 8.5.1), traja skupni čas zasedenosti odseka ( $k$ ) 29 min, izkoriščenost kapacitete ( $K$ ) znaša 48 %, vlakov pa je pet. Če vlake razdelimo glede na smer vožnje in obravnavamo isti odsek na dvotirni progi, traja skupni čas zasedenosti odseka ( $k$ ) za prvi tir 10 min, izkoriščenost kapacitete znaša ( $K$ ) 17 %, vlaki pa so trije. Za drugi tir traja skupni čas zasedenosti odseka ( $k$ ) 6 min, izkoriščenost kapacitete ( $K$ ) znaša 10 %, vlaka pa sta dva. Število vlakov dvotirne proge lahko po tirih seštejemo in dobimo število vlakov na enotirni progi, tega pa ne moremo trditi tudi za skupni čas zasedenosti odseka in vrednost izkoriščenosti kapacitete.

Razlog za to sta smer vožnje vlakov in zaporedje, v katerem so vlaki v voznem redu razporejeni (organizacija odprave vlakov). Vozni red, kjer so vlaki razdeljeni glede na smer vožnje (dvotirna proga), lahko bolj zgoščimo (krajši skupni čas zasedenosti odseka) kot vozni red za enotirno progo, kjer vozijo vlaki v nasprotnih smereh. Razlog za to, je ta, da lahko na dvotirni progi zaporedni vlak prične slediti prvemu, še preden ta pride do postaje. Na enotirni progi pa lahko zaporedni vlak, ki vozi v nasprotni smeri kot prvi, začne svojo vožnjo šele takrat, ko pride prvi vlak na postajo. Skupni čas zasedenosti odseka ( $k$ ) je zato po zgoščanju na dvotirni progi krajši (Slika 68) kot na enotirni progi (Slika 69).



Slika 68: Zgoščen vozni red, ko vozita vlaka v isti smeri



Slika 69: Zgoščen vozni red, ko vozita vlaka v nasprotni smeri

Delež neizkoriščene kapacitete za dvotirno progo znaša 70 % (prvi tir), oziroma 77 % (drugi tir). V vozni red bi bilo mogoče vključiti dodatne vlake, v kolikor bi to dopuščale omejitve zaradi mrežnega efekta.

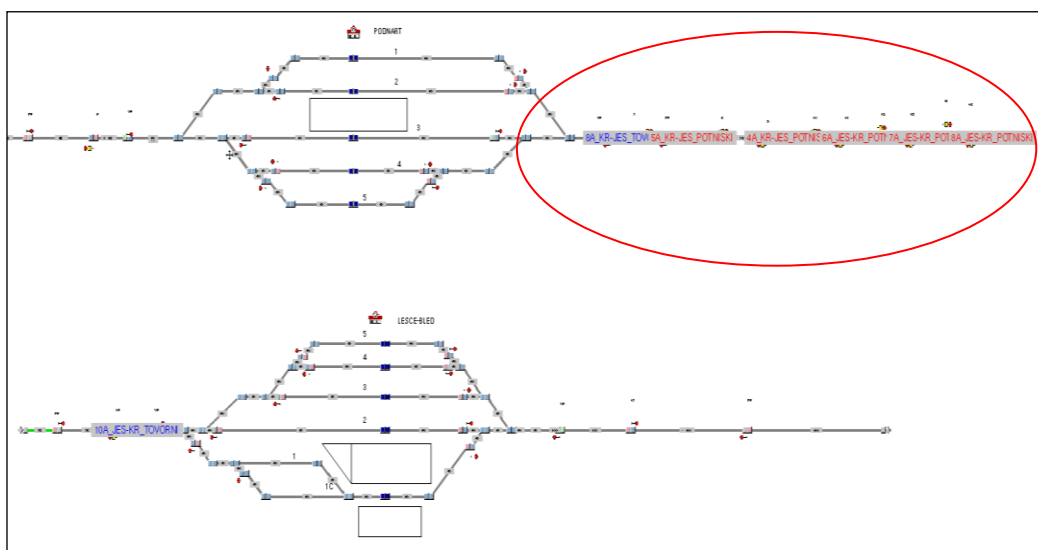
#### 8.5.4 Neupoštevanje mrežnega efekta pri zgoščanju vlakovnih poti v voznem redu

Mrežnega efekta pri zgoščanju vlakovnih poti ne upoštevamo. Pri zgoščanju vlakovnih poti v voznem redu je potrebno upoštevati medsebojni vpliv samo vlakov znotraj izbranega (progovnega) odseka. Minimalni časovni interval med zaporednimi vožnjami vlakov (ang. *minimum headway time*) na ostalih odsekih nas pri zgoščanju ne zanimajo. Neupoštevanje mrežnega efekta je dopustno, ker se na podlagi zgoščanja voznega reda vrednoti samo izkoriščenost kapacitete.

Mrežni efekt, oziroma omejitve zunaj območja obravnave je potrebno upoštevati takrat, ko izračun izkoriščenosti kapacitete pokaže, da je v vozni red mogoče vključiti dodatne vlakovne poti (poglavje 7.2.2).

Konstruiranje voznega reda je težak optimizacijski (NP – polni) problem, pri katerem je potrebno upoštevati številne kriterije in omejitve. Neupoštevanje mrežnega efekta pri oblikovanju voznega reda povzroči konflikte med vlaki.

Prekinjeni grafi vlakovnih poti na prilogi E prikazujejo nastanek konfliktov med vlaki pri oblikovanju voznega reda, če ne upoštevamo mrežnega efekta.



Slika 70: Konflikt med vlaki

## 9 ZAKLJUČEK

Investicije v železniško infrastrukturo so drage, zato mora biti razpoložljiva infrastruktura optimalno izkoriščena. Če je kapaciteta določene proge v večji meri izkoriščena, je potrebno, preden se začne graditi dodatno infrastrukturo, preveriti vse druge možnosti, ki omogočajo izboljšanje izkoriščenosti kapacitete (ang. *capacity consumption*). Te možnosti so bodisi sprememba voznega reda (sprememba heterogenosti, stabilnosti, pogostosti vlakov) bodisi povečanje povprečne hitrosti, če to omogočajo karakteristike proge.

Najbolj optimalno je kapaciteta izkoriščena na progah za hitre vlake ali na podzemnih železnicah, kjer je obratovanje homogeno. Homogeno obratovanje omogoča zelo pogoste vlake in dokaj visoko povprečno hitrost. Poleg tega je tudi nevarnost sekundarnih zamud (ang. *secondary delay*) majhna, saj vozijo vsi vlaki z enako hitrostjo in pride med njimi redko do konfliktov.

Sekundarne zamude so pomembni indikatorji določanja izkoriščenosti kapacitete, od katere je odvisna zanesljivost železniških storitev. Ker so ceste že precej obremenjene, je potrebno uporabnike in prevoz dobrin preusmeriti na železnice. Zanesljivost železniških storitev je poleg njihove pogostosti eden od ključnih faktorjev, od katerega je odvisno, v kolikšni meri bodo železniške storitve pritegnile uporabnike in prevoznike, da jih bodo uporabljali.

Zanesljivost železniških storitev v odvisnosti od kapacitete in njene izkoriščenosti je mogoče vrednotiti na različne načine. Predstavila sem nekatere analitične, mikro-simulacijske, statistične in optimizacijske metode. Najpomembnejša med njimi je metoda, ki jo navaja kodeks UIC 406 o kapaciteti. Po tej metodi vrednotimo izkoriščenost kapacitete proge po principu zgoščanja vlakovnih poti v voznem redu (ang. *timetable compression*) znotraj predhodno določenega časovnega intervala. Vrednost izkoriščenosti kapacitete določamo za vsak progovni odsek posebej.

Metoda UIC 406 ne vrednoti kapacitete, ampak njeno izkoriščenost, ki se ne določa kot število vlakov na uro, ampak kot delež izbranega časovnega intervala, ko je progovni odsek zaseden zaradi določenega števila vlakovnih poti. Pomemben je skupni čas zasedenosti progovnega odseka ( $k$ ). Ker je izkoriščenost kapacitete odvisna zgolj od trajanja skupnega časa, ko je progovni odsek zaseden zaradi določenega števila vlakovnih poti, lahko nastanejo določena neskladja. Primer takšnega neskladja lahko ponazorimo z dvema namišljenima potniškima vlakoma, ki bi vozila od Kranja do Jesenic 3 ure (potniški vlaki vozijo na tej relaciji običajno manj kot eno uro). Ker vozita vlaka zelo počasi, zasedata vsak posamezen prostorski odsek na progi dolgo časa, zato je zasedenost infrastrukture ( $A$ ) velika. Posledično je skupni čas zasedenosti progovnega odseka ( $k$ ) velik, prav tako tudi izkoriščenost kapacitete ( $K$ ). Če bi torej izkoriščenost kapacitete vrednotili zgolj na podlagi njene vrednosti, bi za

obravnani primer lahko zaključili, da je proga dobro izkoriščena, saj je vrednost izkoriščenosti kapacitete velika. Če pa situacijo pogledamo širše, vidimo, da kljub visoki vrednosti izkoriščenosti kapacitete, kapaciteta proge nikakor ni dobro izkoriščena (samo dva zelo počasna vlaka).

Zaradi takšnih situacij je pomembno, da poleg izkoriščenosti kapacitete navedemo tudi skupni čas zasedenosti progovnega odseka ( $k$ ), zraven pa podamo tudi pogostost vlakov, heterogenost obratovanja (ang. *heterogeneity*), povprečno hitrost vlakov in stabilnost voznega reda (ang. *timetable stability*). Šele na podlagi teh štirih parametrov lahko presodimo, ali je razpoložljiva kapaciteta dobro izkoriščena ali ne.

Več vlakov v izbranem časovnem intervalu pri homogenem obratovanju pomeni daljši skupni čas zasedenosti progovnega odseka. Zaradi večje stabilnosti voznega reda pri homogenem obratovanju je skupni čas zasedenosti progovnega odseka manjši. Večja povprečna hitrost vlakov pri homogenem obratovanju pa pomeni več vlakov v izbranem časovnem intervalu, hkrati pa krajši skupni čas zasedenosti progovnega odseka (poglavje 5).

Zelo pomemben vpliv na izkoriščenost kapacitete ima heterogenost obratovanja. Če je obratovanje heterogeno, ima lahko vozni red z manjšim številom vlakov v časovnem intervalu daljši skupni čas zasedenosti progovnega odseka in zato večjo izkoriščenost kapacitete kot homogen vozni red z večjim številom vlakov. Tudi tu gre za eno od neskladij metode UIC 406, kjer večje število vlakov ne pomeni nujno večje izkoriščenosti kapacitete (Slika 13). Razlog za to, da je skupni čas zasedenosti progovnega odseka pri homogenem obratovanju krajši kot pri heterogenem, je, da je mogoče homogen vozni red bolj zgostiti kot pa heterogen vozni red. Pri homogenem voznem redu je tamponski čas (ang. *buffer time*) na vseh prostorskih odsekih po zgoščanju enak nič. Pri heterogenem obratovanju pa je po zgoščanju tamponski čas enak nič samo na kritičnem prostorskem odseku (Slika 60 in Slika 61).

Vrednost izkoriščenosti kapacitete po metodi UIC 406 je zelo odvisna od karakteristik obravnavane proge, saj te narekujejo, kako bo proga razdeljena na progovne odseke. Dolžine progovnih odsekov so bistvenega pomena, te pa so odvisne od lege postaj, oziroma od lege glavnih signalov. Progovni odseki so lahko odseki med dvema sosednjima postajama, lahko pa so odseki med dvema postajama, med katerima so dodatne vmesne postaje. Glede na lastnosti obravnavane proge in karakteristike obratovanja se sami odločimo, kako dolg progovni odsek bomo pri analizi izbrali. Ker se dolžine in lastnosti obravnavanih progovnih odsekov razlikujejo, pa je priporočljivo, da so vedno poleg rezultatov prisotne tudi interpretacije in pojasnila. Rezultate posameznih prog pa je vedno potrebno primerjati samo relativno (poglavje 8.5.1).



Metoda UIC 406 vrednoti izkoriščenost kapacitete odprte proge. Določanje izkoriščenosti kapacitete postaj ni zajeto v analizi.

Pri zgoščanju vlakovnih poti v voznem redu so zelo pomembni kritični prostorski odseki. To so prostorski odseki, na katerih je časovni interval med zaporednimi vožnjami minimalen (ang. *minimum headway time*). Če je na kritičnih prostorskih odsekih pred zgoščanjem prisoten tamponski čas, oziroma dodatek časa za križanje vlakov na enotirnih progah (ang. *crossing buffer time*), je po zgoščanju ta čas enak nič.

Na enotirnih progah je zgoščanje vlakovnih poti v voznem redu zelo odvisno od organizacije odprave vlakov. Pomembna je smer vožnje vlakov in vrstni red, v katerem so vlaki razporejeni. Če vlaku, ki vozi iz Kranja proti Jesenicam, sledi vlak, ki vozi v isti smeri, je vozni red mogoče veliko bolj zgostiti, kot če vlaku, ki vozi iz Kranja proti Jesenicam sledi vlak, ki vozi v nasprotni smeri, torej z Jesenic proti Kranju (Slika 68 in Slika 69).

Mrežnega efekta pri zgoščanju vlakovnih poti v voznem redu ni potrebno upoštevati, ker gre za preoblikovanje voznega reda zgolj zaradi izračuna izkoriščenosti kapacitete. Če pa izračun pokaže, da je delež neizkoriščene kapacitete zadosten za vključitev dodatnega vlaka v vozni red, moramo pri preoblikovanju voznega reda zaradi dodatne vlakovne poti nujno upoštevati mrežni efekt, sicer lahko nastane konflikt med vlaki (Slika 31).

Pri praktičnem delu diplomske naloge sem določala izkoriščenost kapacitete proge Ljubljana - Jesenice. Obravnavala sem progovni odsek Kranj - Jesenice. Izkoriščenost kapacitete sem določala pri različnih karakteristikah infrastrukture in obratovanja. Najprej sem primerjala izkoriščenost kapacitete dejanskega stanja dveh različno dolgih odsekov (odsek Kranj - Podnart in odsek Slovenski Javornik - Jesenice). Vrednost izkoriščenosti kapacitete znaša za daljši odsek (Kranj - Podnart) 48 % in za krajši odsek (Slovenski Javornik - Jesenice) 27 %.

Vrednosti izkoriščenosti kapacitete na ostalih odsekih znašajo: 50 % na odseku Podnart - Lesce - Bled, 25 % na odseku Lesce - Bled - Žirovnica in 22% na odseku Žirovnica - Slovenski Javornik. Vrednost izkoriščenosti kapacitete progovnega odseka Kranj - Jesenice je enaka največji vrednosti izkoriščenosti kapacitete obravnavanih odsekov in znaša 50 %.

Za proge, kjer je promet mešan, znaša priporočena vrednost izkoriščenosti kapacitete 75% v konični uri (UIC, 2004). Obravnavani odseki priporočene vrednosti izkoriščenosti kapacitete ne dosejajo, kar pomeni, da obstaja neizkoriščena kapaciteta, ki jo je mogoče uporabiti za vožnjo dodatnih vlakov.

Za določitev vrednosti izkoriščenosti kapacitete celotne proge bi bilo potrebno v nadaljnjih analizah izračunati izkoriščenost kapacitete za vse progovne odseke na celotni progi Ljubljana - Jesenice. Progovni odsek, na katerem bi bila vrednost izkoriščenosti kapacitete največja, bi bil merodajen. Določal bi izkoriščenost kapacitete celotne proge.

Če bi bila izračunana vrednost izkoriščenosti kapacitete za progo Ljubljana - Jesenice manjša od 75% (poglavje 7.1.6.1), bi to pomenilo, da razpoložljiva infrastruktura ni optimalno izkoriščena, saj je na voljo še precej neizkoriščene kapacitete. Na osnovi deleža neizkoriščene kapacitete bi lahko v nadaljnjih raziskavah preučili, ali lahko v vozni red vključimo dodatne vlake. Za natančnejšo analizo kapacitete in njene izkoriščenosti bi bilo potrebno v nadaljnjih študijah določiti pogostost vlakov, povprečno hitrost, heterogenost obratovanja in stabilnost voznega reda.

Merodajen odsek na progi Ljubljana - Jesenice, ki bi določal vrednost izkoriščenosti kapacitete celotne proge, bi bil najverjetneje eden izmed odsekov med Ljubljano in Kranjem. Na tej relaciji so potniški vlaki veliko bolj pogosti zaradi številčnejših uporabnikov iz Kranja in okolice, ki se vsak dan vozijo v Ljubljano in nazaj.

Pri praktičnem delu diplomske naloge sem preverila tudi, kako bi se izkoriščenost kapacitete odseka Kranj - Podnart spremenila, če bi bilo obratovanje homogeno in če bi vlaki vozili z višjo hitrostjo, kot je trenutno predvidena na progi. Vrednost izkoriščenosti kapacitete za progovni odsek Kranj - Podnart bi znašala 33 %. Na obravnavanem odseku bi bil še velik delež neizkoriščene kapacitete.

Če bi izkoriščenost kapacitete obravnavane proge presegla priporočeno vrednost izkoriščenosti kapacitete (7.1.6.1), bi bila ena izmed možnosti povečanja kapacitete dodaten tir na progi. Zahteve po dodatnem tiru bi lahko nastale tudi zaradi povečanega deleža tovornega prometa in pogostejših potniških vlakov v prihodnosti. Preverila sem, kolikšna bi bila izkoriščenost kapacitete, če bi bila proga dvotirna. Vrednosti izkoriščenosti kapacitete bi znašale 17 % za prvi tir in 23 % za drugi tir. Na progi bi bilo še veliko neizkoriščene kapacitete, ki bi omogočala vključitev dodatnih vlakov v vozni red.

**VIRI**

UIC CODE 406R. 2004. 1st edition: 21 str.

Abril M., Barber F., Ingolotti L., Salido M. A., Tormos P., Lova A. 2007. An assessment of railway capacity. Department of Information Systems and Computation, Department of Applied Statistics and Operational Research, and Quality, Technical University of Valencia: loč. pag.

Banverket. 2001. Beräkningshandledning: Hjälpmedel för samhällsekonomiska bedömningar inom järnvägssektorn (Calculation manual: Aid for cost - benefit analysis in the railway sector). Handbook BVH 706.00. Banverket, Borlange: loč. pag.

Burdet R. L., Kozan E. 2006. Techniques for absolute capacity determination in railways. Transportation research B, Brisbane, Queensland University of Technology: loč. pag.

Carey M. 1999. Ex ante heuristic measures for schedule reliability. Transportation research B 33: 225-494.

Curchod A., Lucchini L. 2001. CAPRES, General Description of the model. Lausanne, Laboratoire d'Intermodalité des Transports et de Planification: loč. pag.

De Kort A. F., Heidergott B., Ayhan H. 2003. A probabilistic (max, +) approach for determining railway infrastructure capacity. European Journal of Operational Research 148: 644-661.

Dicembre A., Ricci S. 2011. Railway traffinc on high density urban corridors. Capacity, signalling and timetable. Rome, Sapienza Università di Roma, Department of Civil. Building and Environmental Engineering, Transport Area: loč. pag.

Gibson S., Cooper G., Ball B. 2002. Development in transport policy: The evolution of capacity charges on the UK rail network. Journal of Transport Economics and Policy 36: 341-354.

Hallowell S. F., Harjer P. T. 1998. Predicting on - time performance in sceduled railroad operations: methodology and application to train scheduling. Transportation Research A 32: 279-295.

Huisman T. Boucherie P. T. 1998. Running times on railway section with heterogenous train traffic. Transportation research B 35: 271-292.

Landex A., Kaas A. H. 2005. Planning the most suitable travel speed for high frequency railway lines. V: Proceedings of the 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, Delft, Netherlands: p. 1-19.

Landex A., Kaas A. H., Schittenhelm B., Schneider - Tilli J. 2006. Evaluation of railway capacity. V: Proceedings of the Annual Transport Conference at Aalborg University, Esbjerg, Danemark: loč. pag.

Landex A. 2007. Capacity statement for railways. V: Proceedings of the Annual Transport Conference at Aalborg University, Esbjerg, Denmark: p. 1-19.

Landex A. 2008. Methods to estimate railway capacity and passenger delays. PhD thesis. Kongens Lyngby, (A. Landex): 217 str.

Mattsson L. G. 2007. Railway capacity and train delay relationship. Stockholm, Department of Transport and Economics, Royal Institute of Technology: loč. pag.

Nash A., Huerlimann D. 2004. Railroad simulation using OpenTrack. V: Proceedings of the Ninth International Conference on Computer in Railways (Comrail IX), J. Allan (ur.), C. A. Brebbia (ur.), R. J. Hill (ur.), G. Sciutto (ur.) & S. Sone (ur.), Dresden, Germany, p. 44-54.

Nash A., Huerlimann D. 2003. OpenTrack – Simulation of Railway Network. User manual for the version 1.3. of OpenTrack. Zürich, Swiss Federal Institute of Technology, Institute for Transportation Planning and System: loč. pag.

Slovenske železnice (SŽ) - Program omrežja. 2012.

[http://www.slo-](http://www.slo-zeleznice.si/sl/podjetje/vodenje_prometa/program_omrezja/program_omrezja_republike_slovenije_za_leto_2012)

[zeleznice.si/sl/podjetje/vodenje\\_prometa/program\\_omrezja/program\\_omrezja\\_republike\\_slovenije\\_za\\_leto\\_2012](http://www.slo-zeleznice.si/sl/podjetje/vodenje_prometa/program_omrezja/program_omrezja_republike_slovenije_za_leto_2012) (Pridobljeno 2.2.2012.)

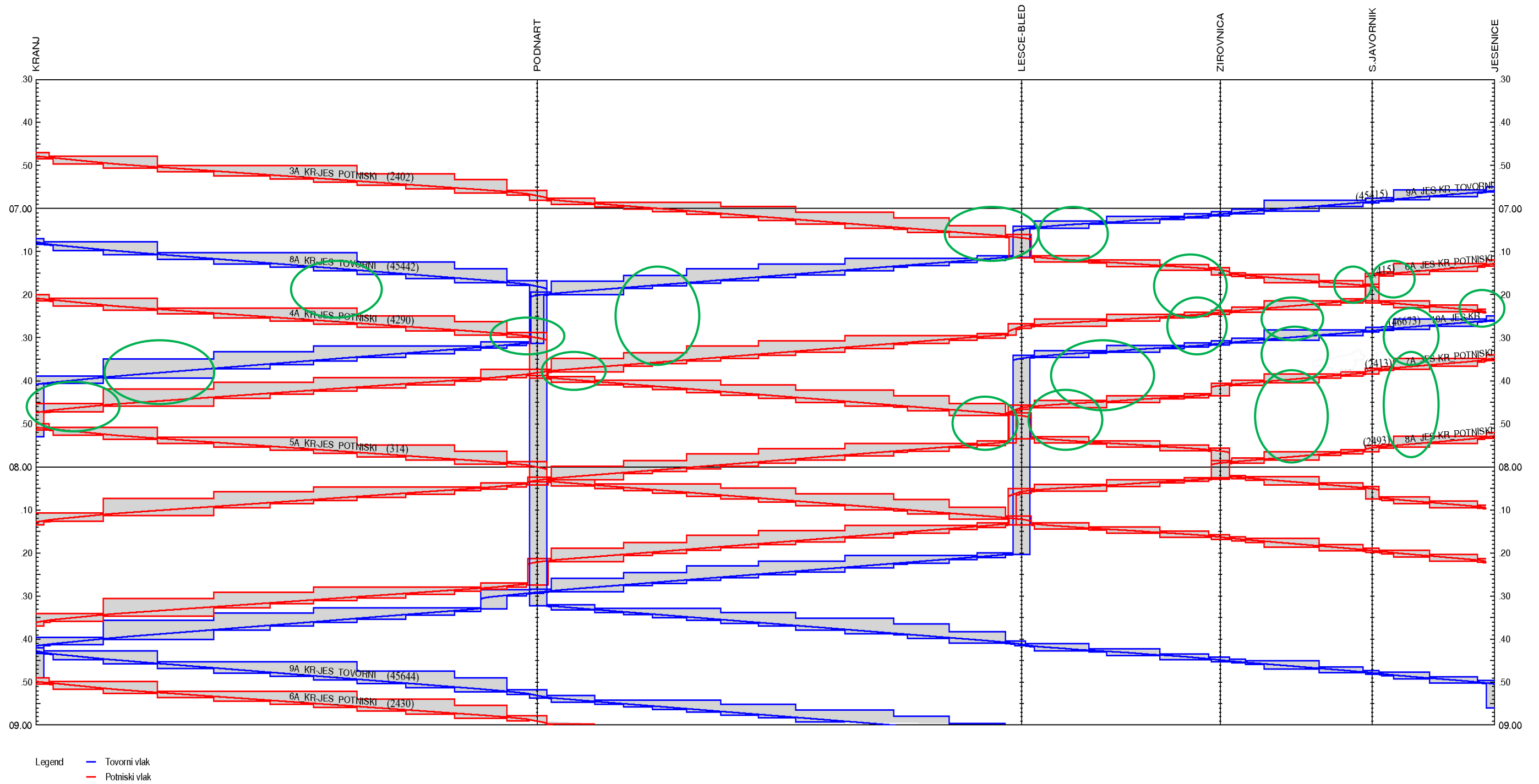
Zgonc, B. 2003. Železniški promet. Portorož, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet: 216 str.

Wiklund M. 2003. Allvarliga funktionsstörningar i baninfrastrukturen: Beräkning av effekter på tågtrafiken (Serious breakdowns in the track infrastructure: calculation of effects on rail traffic. VTI meddelande 959: loč. pag.

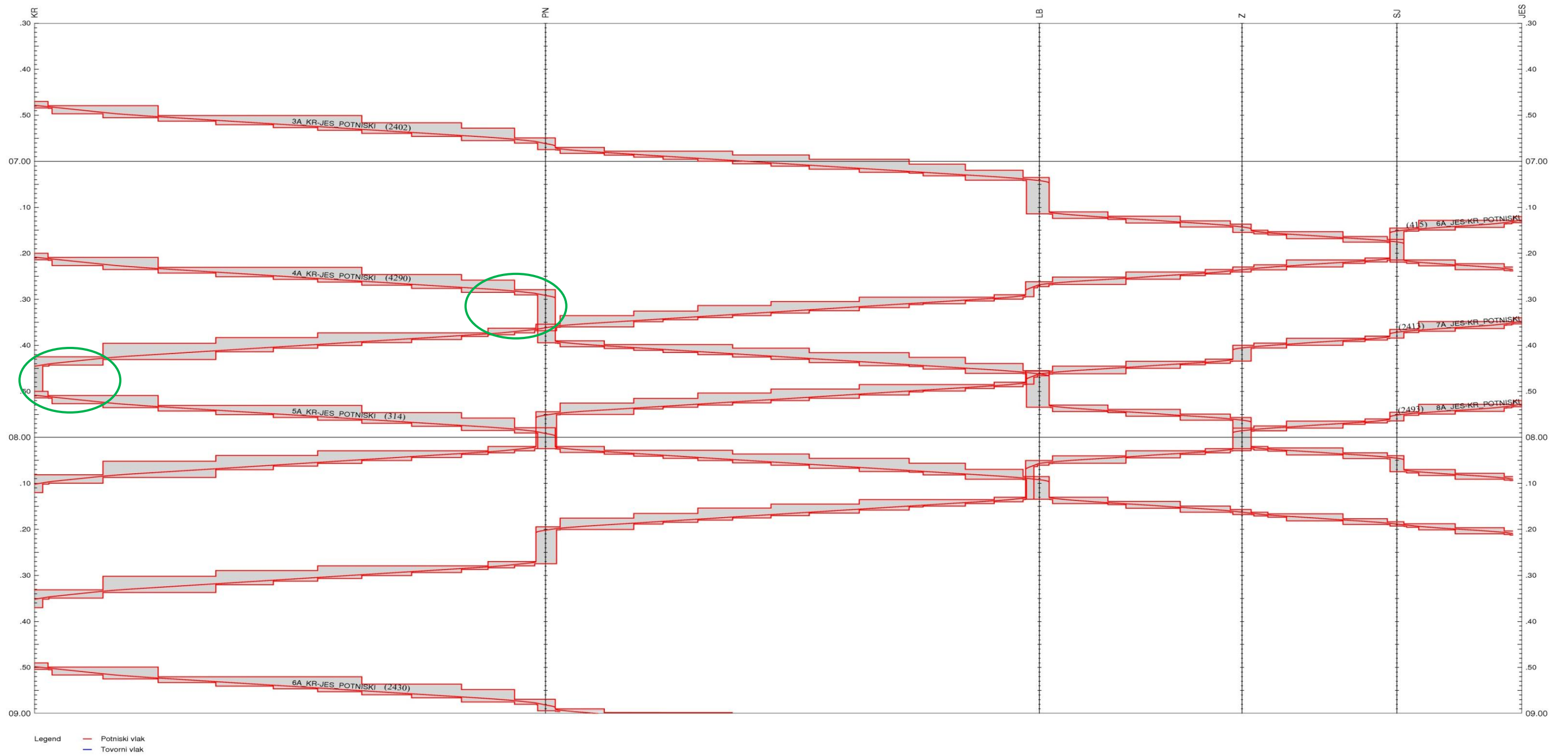
## **SEZNAM PRILOG**

- Priloga A: VOZNI RED KRANJ - JESENICE S KRITIČNIMI PROSTORSKIMI ODSEKI
- Priloga B: VOZNI RED KRANJ - JESENICE PRI HOMOGENEM OBRATOVANJU  
VLAKOV  
KRITIČNI PROSTORSKI ODSEKI NA ODSEKU KRANJ - PODNART
- Priloga C: VOZNI RED KRANJ - JESENICE NA DVOTIRNI PROGI (ZA SMER KRANJ -  
JESENICE)  
KRITIČNI PROSTORSKI ODSEKI NA ODSEKU KRANJ - PODNART
- Priloga D: VOZNI RED KRANJ - JESENICE NA DVOTIRNI PROGI (ZA SMER JESENICE -  
KRANJ)  
KRITIČNI PROSTORSKI ODSEKI NA ODSEKU KRANJ - PODNART
- Priloga E: KONFLIKTI MED VLAKI ZARADI NEUPOŠTEVANJA MREŽNEGA EFEKTA

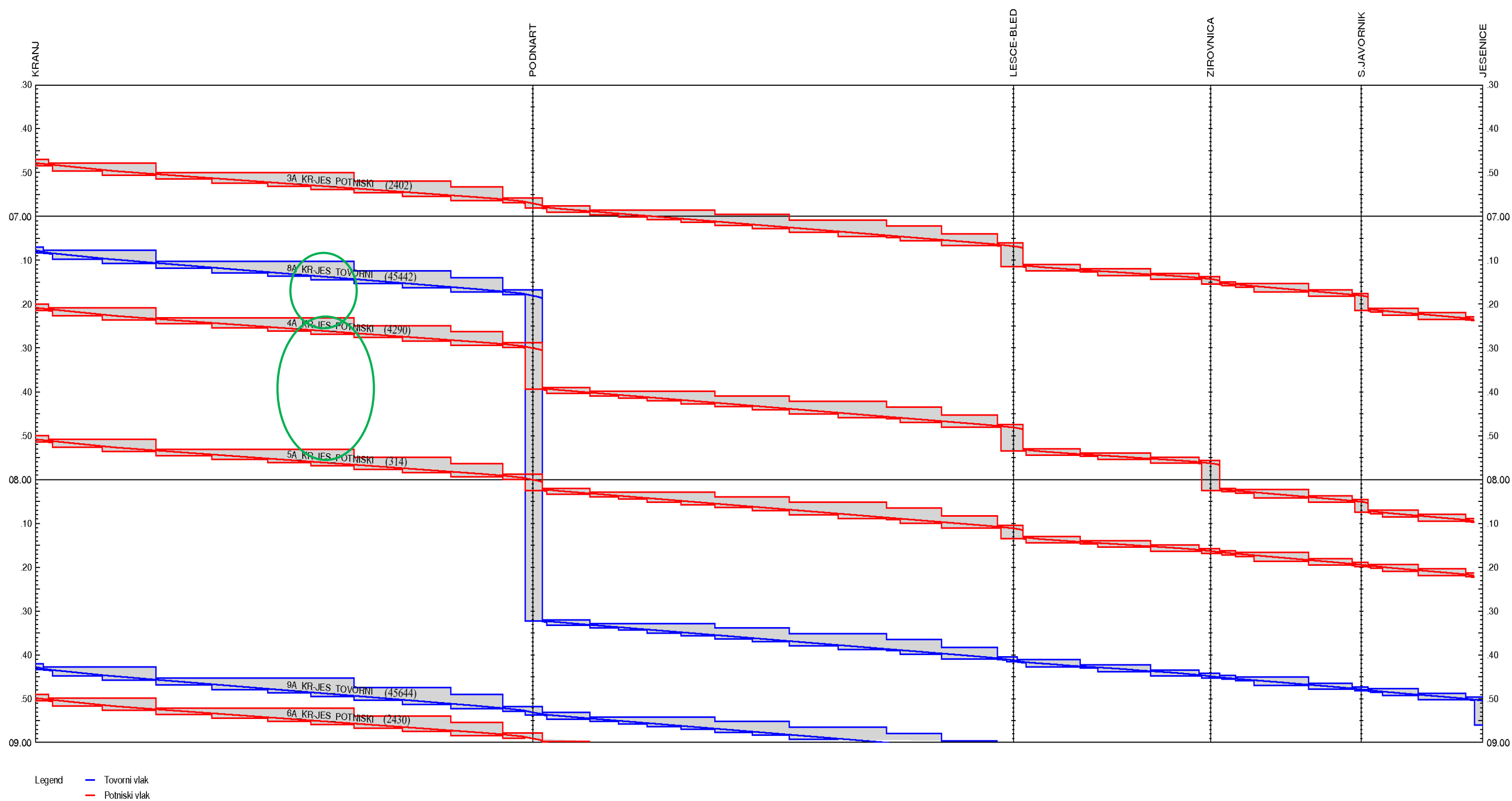
Priloga A: VOZNI RED KRANJ - JESENICE S KRITIČNIMI PROSTORSKIMI ODSEKI



Priloga B: VOZNI RED KRANJ - JESENICE PRI HOMOGENEM OBRATOVANJU VLAKOV  
KRITIČNI PROSTORSKI ODSEKI NA ODSEKU KRANJ - PODNART

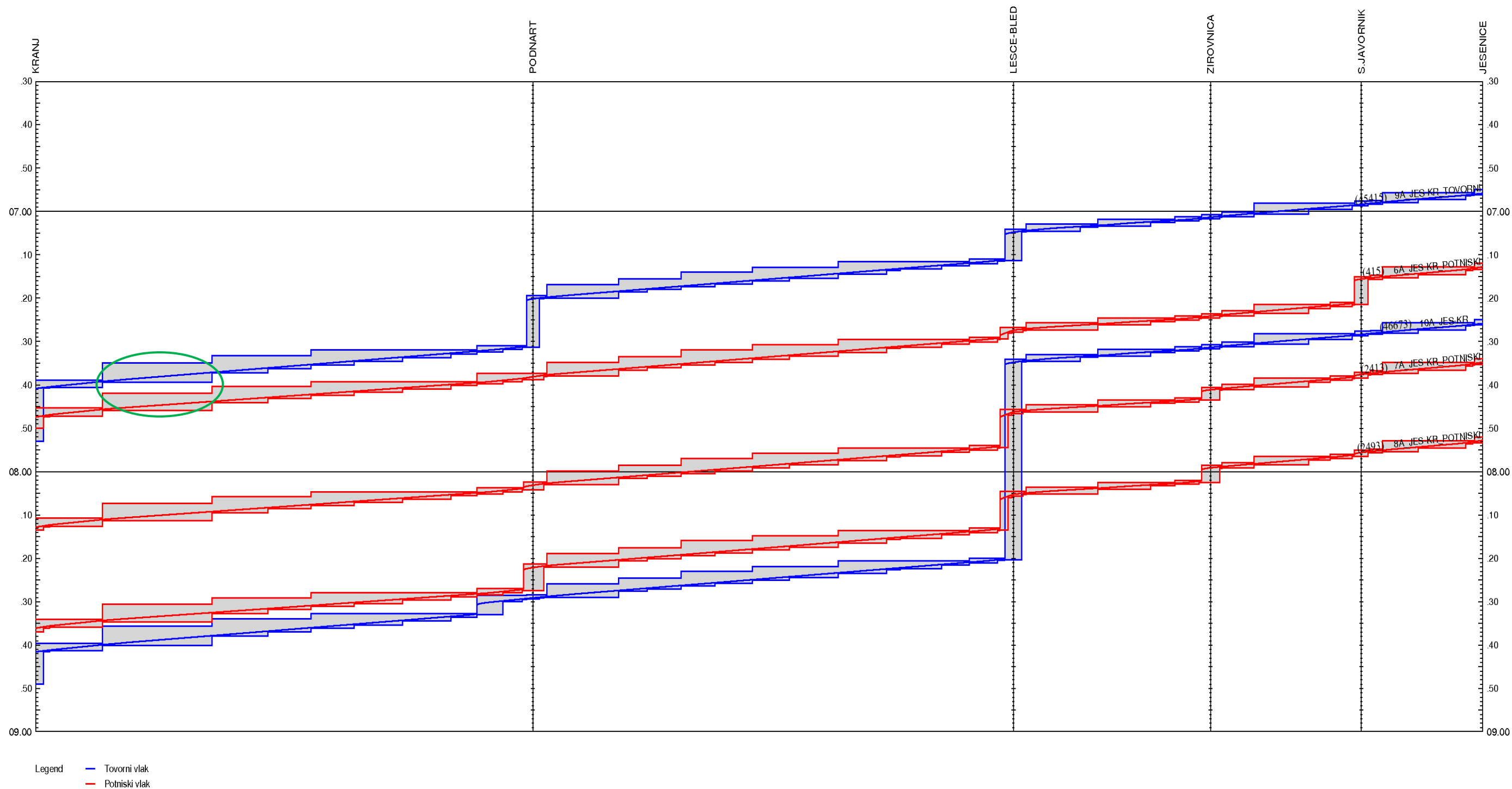


Priloga C: VOZNI RED KRANJ - JESENICE NA DVOTIRNI PROGI (ZA SMER KRANJ - JESENICE)  
KRITIČNI PROSTORSKI ODSEKI NA ODSEKU KRANJ - PODNART





Priloga D: VOZNI RED KRANJ - JESENICE NA DVOTIRNI PROGI (ZA SMER JESENICE - KRANJ)  
KRITIČNI PROSTORSKI ODSEKI NA ODSEKU KRANJ - PODNART



Priloga E: KONFLIKTI MED VLAKI ZARADI NEUPOŠTEVANJA MREŽNEGA EFEKTA

