

# Metode in tehnike operativnega planiranja gradnje longitudinalnih objektov

asistent dr. **Aleksander Srdić**, univ.dipl.inž.grad.

doc.dr. **Jana Šelih**, univ.dipl.inž.grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Ljubljana,  
Katedra za operativno gradbeništvo

---

## Povzetek

V članku je predstavljena tehnika linearnega planiranja (*Linear Scheduling*), v preteklosti poznana tudi kot ortogonalno planiranje. Njena uporaba je predvidena za operativno terminsko planiranje longitudinalnih objektov (z eno izrazito dimenzijo) med katere sodijo ceste, plinovodi, predori, železnice, kanalizacije in v nekaterih primerih tudi premostitveni objekti s ponavljajočimi se dejavnostmi. Prednost linearnega planiranja se kaže predvsem v dvodimenzionalnosti prikaza (na eni osi čas in na drugi lokacija), ki omogoča izdelavo preglednega operativnega plana izvedbe kot tudi učinkovito primerjavo med načrtovano in dejansko realizacijo gradnje. Predstavljene so tudi osnovne metode, ki omogočajo določitev časovno kritičnih dejavnosti z vidika doseganje predvidenih rokov, kar je bilo do sedaj zgolj domena tehnike mrežnega planiranja, ki se trenutno najpogosteje uporablja v praksi (na področju Slovenije).

V zaključku so predstavljena tudi računalniška orodja za podporo tehniki linearnega planiranja kot so *Tilos*, *DynaRoad* in *LinearPlus*, njihove prednosti in pomanjkljivosti ter možnost neposredne povezave z informacijskimi sistemi za vodenje projektov.

## Abstract

*Paper presents development of Linear Scheduling technique, in the past also known as orthogonal scheduling. It can be successfully used for construction scheduling of linear projects such as highways, roads, railways.. It superiority against traditional network scheduling based on Critical Path Method and Gantt chart presentation is in clarity of time-location presentation of linear schedule for the purpose of scheduling and simplicity of controlling projects.*

*Basic methods for determine critical activities or their controlling segments and productivity float represent the state of the art in theoretical development in linear scheduling domain. Different software solutions for linear scheduling – DynaRoad, LinearPlus and Tilos with their pros/cons are presented at the end.*

## 1 Uvod

V okviru vodenja gradbenih projektov predstavlja planiranje ciklični proces skozi njegovo celotno življenjsko dobo, od faze koncipiranja do same predaje gradbenega objekta v uporabo. Pojem operativno planiranje pa se nanaša na planiranje fizične realizacije objekta in je predvsem domena izvajalcev del, ki poteka od faze priprave na gradnjo (priprava ponudbe) do primopredaje objekta naročniku. Nadalje lahko delimo operativno planiranje na dva prepletajoča se procesa :

- ▶ planiranje vrste, obsega in zaporedja del - v nadaljevanju »planiranje« (ang. Planning)
- ▶ terminsko planiranje - v nadaljevanju »terminsko planiranje« (ang. Scheduling)

### 1.1 Planiranje

Obseg del temelji na projektantskem popisu del, ki pa ne vsebuje vseh del potrebnih del za izvedbo, saj so mnoga dela odvisna od izbire tehnologije in razpoložljive opreme izvajalca samega. Z vidika cestogradnje lahko izvajalec vpliva predvsem na transporte povezane z izkopnim in nasipnim materialom, kjer so ključni parametri: direktni transporti iz izkopov v nasipe, izbira stalnih in vmesnih deponij, izbira virov nasipnega materiala, potencialna lokacija mobilnih drobilnic in določitev pristopnih poti do trase grajenega odseka. Vsi ti parametri so neposredno povezani tudi s časovnim potekom izvedbe posameznih del, zato je potrebno za njihovo optimizacijo vključiti tudi terminsko planiranje (npr. nasipa iz izkopnega materiala ne moremo izvajati pred izkopom tega materiala).

### 1.2 Terminsko planiranje

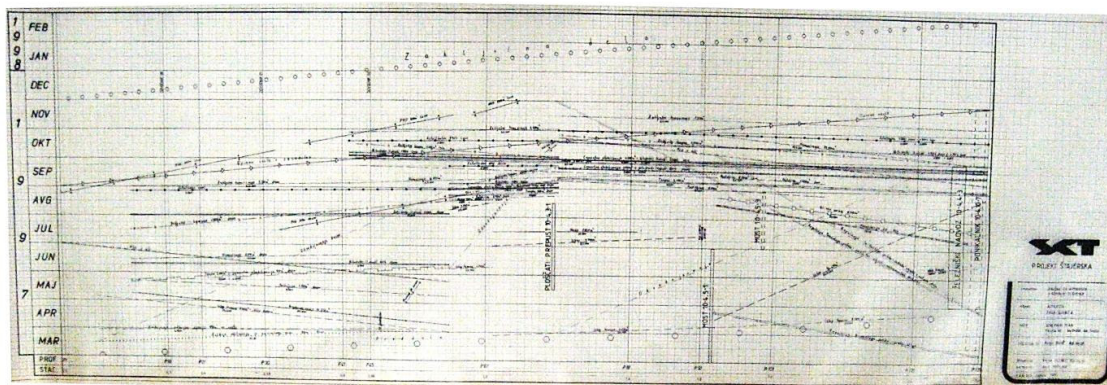
Na osnovi določenega obsega in vrste del ter posledično izbrane tehnologije, načina in načelnega zaporedja izvajanja posameznih dejavnosti v procesu terminskega planiranja najprej določimo optimalne vire (delovno silo, opremo in mehanizacijo) ter posledično tudi potreben čas za njihovo izvedbo. Tako dobljeni model poteka gradnje pa nam prvotno služi za boljše razumevanje poteka gradnje in za nadaljnje optimizacije z vidika angažiranja virov in trajanja projektov. Kakovostno narejen terminski plan je ključni del ponudbene dokumentacije saj ponudbeni predračun temelji na njem in ne obratno, kot je žal veli

kokrat praksa.

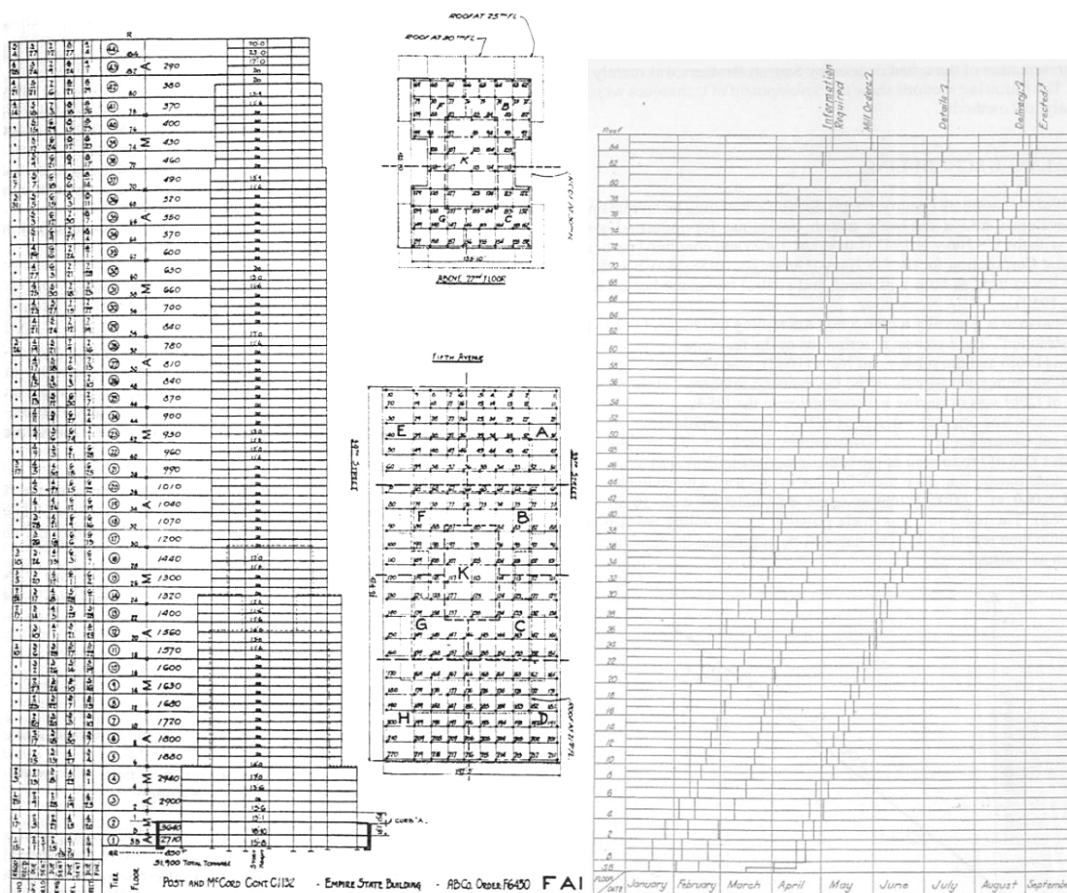
### 1.3 Metode in tehnike terminskega planiranja

V projektne managementu je za potrebe terminskega planiranja najpogosteje uporabljena tehnika mrežnega planiranja na osnovi metode kritične poti (CPM – Critical Path Method), kar velja tudi za področje (slovenskega) gradbeništva. Vzrok za njeno dominanco leži predvsem v dostopnosti programskih rešitev (Microsoft Project, Oracle Primavera, Asta PowerProject). Metoda je zelo splošna in temelji na dejavnostih in njihovih medsebojnih odvisnostih in ni najprimernejša za področje gradbeništva. Pri izvajanju gradbenih del je namreč zelo pomembna tudi lokacija njihovega izvajanja saj hkratio izvajanje različnih del na isti lokaciji onemogoča optimalno izrabo virov kar povzroči padec produktivnosti, vmesne zastoje in poveča verjetnost napak. Z vidika projekta pa to predstavlja nedoseganje zastavljenih projektnih ciljev (čas, stroški in kakovost). V zadnjem desetletju se je razvoj novih programskih (računalniških) rešitev za terminsko planiranje gradbenih projektov oprijel t.i. metode Location-Based Scheduling. Slovenski prevod naziva te metode ne obstaja (predlog: Lokacijsko terminsko planiranje), vendar to ne pomeni, da je v slovenskem prostoru povsem nova, saj so se v preteklosti v Sloveniji že uporabljale tehnike terminskega planiranja (brez računalniške podpore), ki temeljijo na lokaciji izvajanja del: ortogonalno planiranje (linijski objekti – infrastrukturni, nizko-gradnja) in ciklogramsko planiranje (več etažne zgradbe - visokogradnja). Njuna skupna lastnost je dvodimenzionalni prikaz terminskega plana, kjer ena od osi predstavlja čas, druga pa lokacijo. V primeru ortogonalnih planov (slika 1) je to lahko sama stacionaža (npr. cestnega odseka), pri ciklogramih (slika 2) pa je lokacija strukturirana na osnovi projekta (objekti / etaže/etape/faze...).

Uporaba teh dveh tehnik terminskega planiranja je v obdobju razvoja računalniških programov na osnovi tehnike mrežnega planiranja skoraj povsem zamrla (izjema so večja gradbena podjetja). Hkrati z njima pa tudi poklic planerja - planer, ki ne zna zgolj (površno) uporabljati Microsoft Project v smislu risanja gantogramov, temveč strokovnjak, ki razume celoten proces terminskega planiranja in dobro pozna posamezne metode.



Slika 1: Primer ortogonalnega plana (vir: arhiv SCT d.d.)



Slika 2: Primer ciklogramskega plana - plan vgradnje konstrukcijskega jekla Empire State Buildinga za potrebe naročanja, oznak tehničnih risb in datumov dobave (vir: Shreve, 1930)

Preboj uporabe metode lokacijskega terminskega planiranja se na področju visokogradnje izvaja tudi s paradigmo BIM (Building Information Model – informacijski model zgradbe), kjer že obstajajo informacijske rešitve, ki temeljijo na enovitem modelu zgradbe od zasnove, do izračuna stroškov, terminskega plana in spremljanja izvedbe (npr. [VicoSoftware](http://www.vicosoftware.com/) - <http://www.vicosoftware.com/>, [Synchro](http://www.synchro.com/) - <http://www.synchro.com/>, ...). Na področ-

ju nizogradnje pa žal še ne obstaja celovitih rešitev, ki bi omogočale tok podatkov skozi vse faze, obstajajo pa programske rešitve za podporo procesa terminskega planiranja od katerih so zgolj tri zadosti razvite, da omogočajo delo na zahtevnih in kompleksnih projektih: Tilos (<http://www.tilos.org/>), DynaRoad (<http://www.dynaroad.fi/>) in LinearPlus (<http://www.pcfltd.co.uk/products/linearplus/index.html>).

## 2 Tehnika linearnega planiranja

### 2.1 Razvoj

Za gradnjo linearnih objektov, kot so avtoceste, železnice in plinovodi je značilno, da se kot linija odvijajo na neki razdalji v prostoru oziroma okolju. Za tovrstne projekte je v začetku osemdesetih let prejšnjega stoletja Johnston razvili tehniko linearnega planiranja, z namenom njene uporabe pri gradnji in vzdrževanju avtocestnega omrežja v ZDA. Predlagana tehnika, je bila omejena predvsem na grafični prikaz časovnega poteka linijskih projektov, kjer je praviloma na abscisi dolžinsko, na ordinati pa časovno merilo. Sicer je vsebovala algoritem, ki preprečuje križanje tehnološko soodvisni procesov saj se le ti ne morejo sočasno izvajati na isti lokaciji, ni pa vsebovala nobene analitične metode za določanje kritične poti in potencialne pomičnosti (rezervnih časov), kot jo vsebuje tehnika mrežnega planiranja.

Po nekajletnih raziskavah na različnih projektih gradnje avtocest sta Rowings in Harmelink (1993-98) razvila algoritem, ki določa kritično pot v linearnem terminskem planu (vir 000). Ta algoritem, poimenovan »model linearnega terminskega planiranja« (Linear Scheduling Model), identificira kritično pot oziroma »nadzorovano pot« dejavnosti (CAP – controlling activity path) s preračunom od začetka do konca projekta in nazaj analogno metodi kritične poti, le da njegov rezultat niso kritične dejavnosti, temveč le posamezni lokacijski intervali (lahko tudi celotna lokacija) kjer izvajanje dejavnosti vpliva na končni čas projekta.

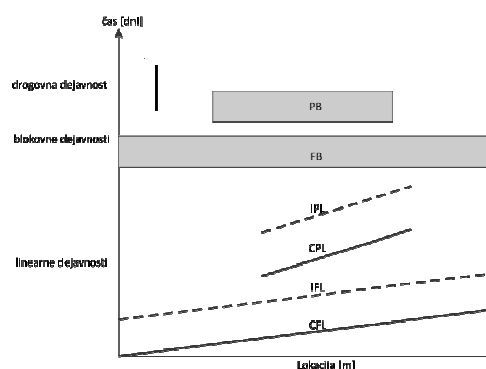
Zadnje teoretične dosežke na področju tehnike linearnega terminskega planiranja je leta 2009 predstavil avtor Gunnar Lucko s sodelavci (vir 00) z izboljšanim konceptom definiranja kritičnosti lokacij posameznih dejavnosti in njihove pomičnosti.

### 2.2 Dejavnosti, odvisnosti in produktivnosti

V linearnih terminskih planih ima dejavnost lahko rahlo drugačen pomen kot pri tehniki mrežnega planiranja saj bolj opredeljuje posamezen proces gradnje. (npr. izkop zemljine ne predstavlja izkopa zemljine od lokacije  $x$  do  $y$  temveč izkop na celotnem odseku), pomen pa je seveda odvisen od samega tipa dejavnosti. V bistvu lahko nastopajo trije gla-

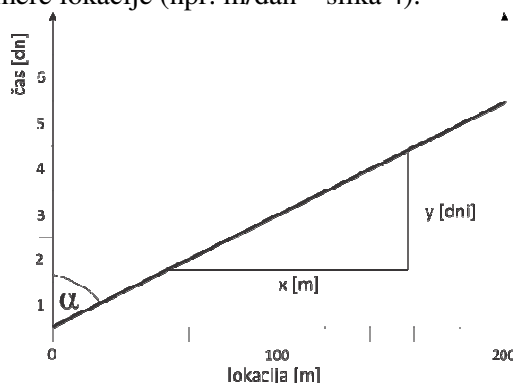
vni tipi dejavnosti, ki jih nadalje delimo glede na lokacijo in neprekinjenost trajanja (vir 0) v:

- ▶ linearne
  - ❖ potekajo na celotni dolžini lokacije
    - ❖ časovno neprekinjene - CFL<sup>1</sup>
    - ❖ časovno prekinjene - IFL<sup>2</sup>
  - ❖ potekajo le na določenih lokacijah
    - ❖ časovno neprekinjene - CPL<sup>3</sup>
    - ❖ časovno prekinjene - IPL<sup>4</sup>.
- ▶ blokovne
  - ❖ potekajo na celotni dolžini lokacije – FB<sup>5</sup>
  - ❖ potekajo le na določenih lokacijah – PB<sup>6</sup>
- ▶ drogovne dejavnosti.



Slika 3: Tipi dejavnosti v linearnem terminskem planu

Časovni potek linearnih dejavnosti je neposredno povezan s samo stopnjo produktivnosti, ki pa v linearnem terminskem planu predstavlja napredovanje procesa na enoto mere lokacije (npr. m/dan – slika 4).



Slika 4: Stopnja lokacijske produktivnosti =  
naklon linije  $\rightarrow \operatorname{tg} \alpha = \frac{x}{y} \dots \dots \dots \left[ \frac{\text{m}}{\text{dan}} \right]$

<sup>1</sup> CFL – Continuous full-span linear

<sup>2</sup> IFL – Intermittent full-span linear

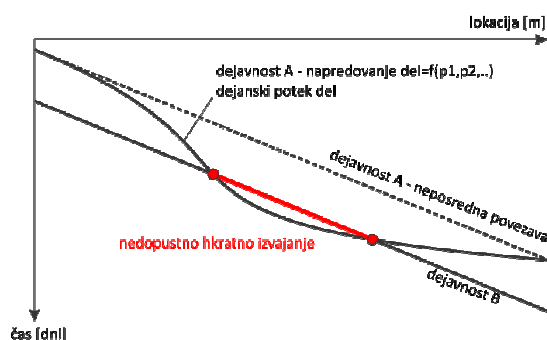
<sup>3</sup> CPL – Continuous partial-span linear

<sup>4</sup> IPL – Intermittent partial-span linear

<sup>5</sup> FB – Full-span block

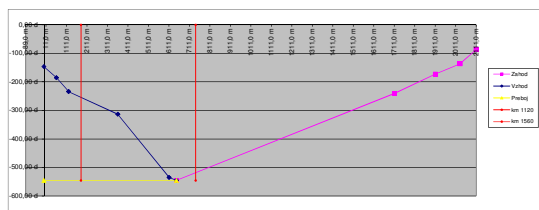
<sup>6</sup> PB – Partial-span block

Taka »stopnja linearne produktivnosti« je lahko v neposredni povezavi s samo stopnjo produktivnostjo dejavnosti le kadar je njena merska enota izražena v dolžinski enoti (npr. montaža zaščitne ograje), običajno pa ta povezava ni neposredna saj na lokacijsko napredovanje del lahko vpliva več parametrov, ki se spreminjajo glede na lokacijo poteka dejavnosti (npr. pri izkopu: širina izkopa oziroma površina prečnega prereza, kategorija zemljine, pogoji dela, transportne razdalje,...). Posledica neupoštevanja posredne povezave lahko privede do napačnega terminskega plana (0)



Slika 5: Posledice neupoštevanja posredne povezave med stopnjo »lokacijske produktivnosti« in dejavnostne produktivnosti

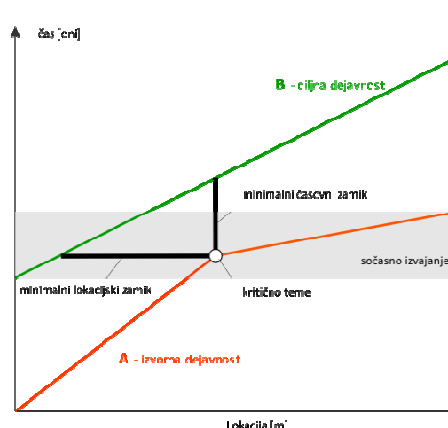
Temu se lahko izognemo z delitvijo lokacije na posamezne odseke, kjer so vsaj najbolj vplivni parametri okvirno enaki (npr. širina in kategorija zemljine izkopa; kategorija kamnine pri izkopu tunela). Tak pristop je uporabljen tudi s stani DARS d.d. pri razpisno/pogodbeni dokumentaciji za oddajo del izgradnje tunelov (slika 6).



Slika 6: Primer enostavnega linearnega terminskega plana (del razpisne dokumentacije DARS d.d.) izdelanega v MS Excel-u.

Podobno kot pri tehniki mrežnega planiranja tudi pri tehniki linearnega uporabljamo t.i. odvisnosti med dejavnostmi, s to razliko da slednja uvaja dva pojma odvisnosti: loka-

cijsko in časovno oziroma lokacijski in časovni zamik. Časovni zamik je predvsem tehnološke narave, lokacijski pa predstavlja potreben zamik v lokaciji z vidika nemotenega izvajanja predhodne dejavnosti (slika 7).

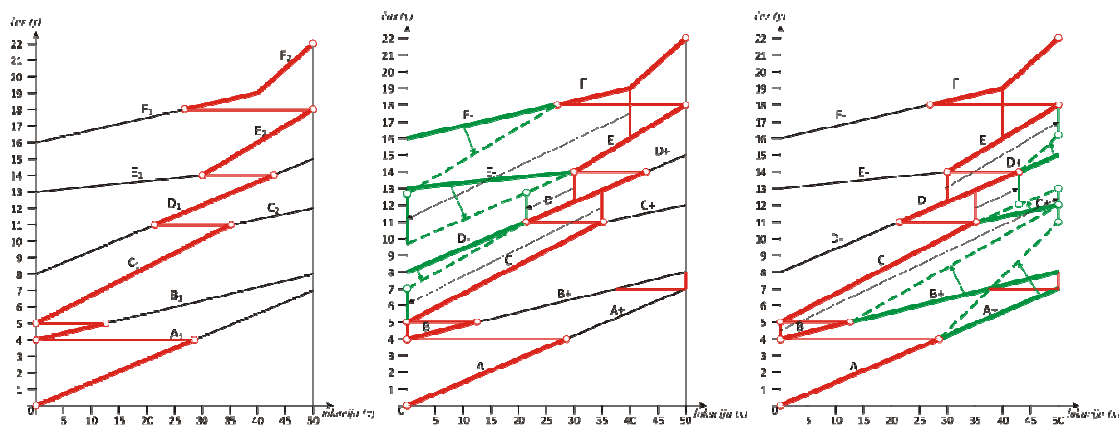


Slika 7: Lokacijski in časovni zamik med dejavnostma

S smiselno uporabo obeh zamikov lahko vnaprej (v izhodiščnem terminskem) preprečimo potencialno nevarnost sočasnega izvajanja dveh dejavnosti na istem mestu in lokaciji, kot posledica spremenjenih okoliščin izvajanja gradnje.

## 2.3 Kritična pot in pomicnost stopnje lokacijske produktivnosti

Kritična pot, posamezni avtorji jo imenujejo tudi nadzorovana pot dejavnosti (Controlling Activity Path) je neprekinjena pot skozi projekt (lokacijsko in časovno), ki določa zaporedje dejavnosti oziroma njihovih odsekov, ki morajo biti izvedeni v planiranem času, sicer lahko nastopi zakasnitev dokončanja projekta. Po tem, ko s pomočjo računskega algoritma (njegovo razlago omejena dolžina prispevka ne dopušča) na osnovi lokacijsko-časovnega poteka posameznih dejavnosti, njihovih medsebojnih tehnoloških odvisnosti ter minimalnih časovnih in lokacijskih zamikov terminski plan »stisnemo«, lahko s pomočjo algoritma za določanje kritične poti določimo t.i. nadzorovane in nenadzorovane lokacijske segmente posameznih dejavnosti (primer - 0).



Slika 8: Kritična pot (nadzorovani segmenti), začetni in končni nenadzorovani segmenti

Nadzorovani segmenti se lahko pojavijo kjerkoli vzdolž lokacije linearne dejavnosti. Možne so kombinacije teh dveh vrst segmentov:

- ▶ samo nadzorovani segment,
- ▶ samo nenadzorovani segment,
- ▶ najprej nenadzorovani segment, ki mu sledi nadzorovani segment ali
- ▶ obratno najprej nadzorovani in nato nenadzorovani segment.

Ena dejavnost ima lahko največ tri segmente v določenem zaporedju: nenadzorovan - nadzorovan segment - nenadzorovan segment.

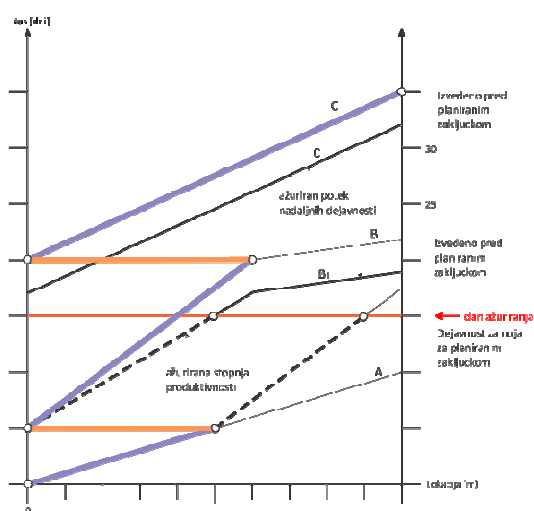
Tehnike mrežnega planiranja, ki uporabljajo metodo kritične poti, uporabljajo pomičnost dejavnosti za določitev, za koliko časa se lahko neka nekritična dejavnost podaljša, ali za koliko časa lahko zamudi začetek, preden postane ta dejavnost kritična. Pri nelinearnih dejavnostih je v linearnem terminskem planu (blokavne in drogovne) je definicija pomičnosti enaka. Koncept pomičnosti je pri linearnih dejavnostih pa je nekoliko drugačen - namesto pojma pomičnost se uporablja izraz *pomičnost stopnje lokacijske produktivnosti*, ki pomeni združitev pojma stopnje lokacijske produktivnosti in pomičnosti dejavnosti. Predstavlja količino, za katero se lahko zmanjša stopnja produktivnosti nenadzorovane dejavnosti ali segmenta le-te, preden bi ta dejavnost (ali segment) postala nadzorovana. Vendar pa je pomen pomičnosti odvisen tudi od lege nenadzorovanega segmenta:

- ▶ *Začetni nenadzorovani segment* – dejavnost se lahko prične izvajati prej in z manjšo produktivnostjo (npr. dodeljena mehanizacija prej razpoložljiva vendar v manjšem obsegu)
- ▶ *Končni nenadzorovani segment* - lahko zmanjšamo obseg dodeljenih virov in

jih dodelimo dejavnostim, ki se že lahko izvajajo in so na nadzorovanem segmentu – pospešitev gradnje

## 2.4 Spremljanje in kontrola gradnje

Pri spremljavi terminskega plana evidenciramo dejanski potek dejavnosti na osnovi izhodiščnega plana. Za razliko od mrežnega terminskega plana, kjer spremljava gradnje temelji na deležu dokončanja posamezne dejavnosti, je edina informacija, potrebna za ažuriranje linearnega terminskega plana, lokacija dokončanja dejavnosti v času ažuriranja, kar je enostavno izvedljivo na terenu brez dodatnih preračunavanj.



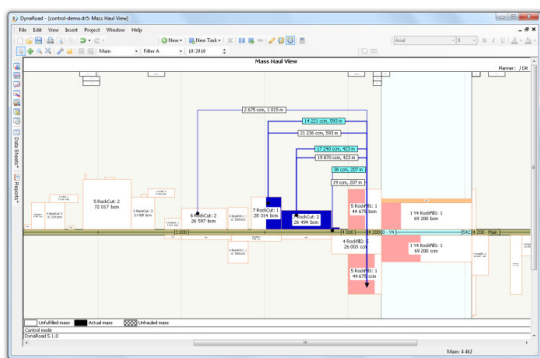
Slika 9: Ažuriranje linearnega terminskega plana

### 3 Programske rešitve za podporo linearnemu terminskemu planiranju

V zadnjem desetletju so se pojavili prvi produkti za podporo linearnemu planiranju. Kljub razmeroma majhnemu številu so marsikateri ustavili svoj razvoj in izginili s tržišča. Dejansko so ostali le trije res uporabni produkti, ki nadaljuje z razvojem in dodajanjem novih funkcionalnosti:

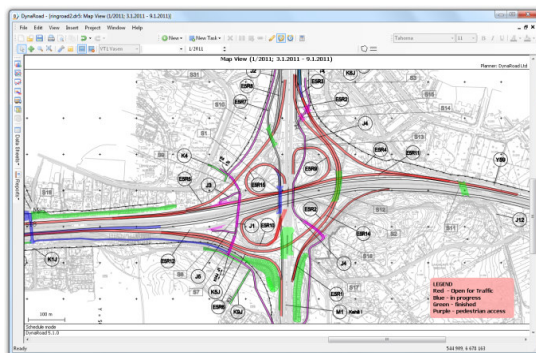
**Dynaroad** je edini predstavnik, ki podpira tudi fazo planiranja in ne zgolj terminskega planiranja.

- ▶ Omogoča optimizacijo transportov materiala iz izkopov v nasipe, z možnostjo lociranja drobilnice materiala in posameznih deponij.



Slika 10: Dynaroad - grafični prikaz transportov po izvedeni optimizaciji

- ▶ Naslednja lastnost, ki ga loči od ostalih dveh, je možnost prikaza statusa izvajanja del na več odsekih hkrati, kar je še posebej primerno pri vzdrževalnih delih oziroma pri širitvah in gradnji novih priključnih cest (slika 11).

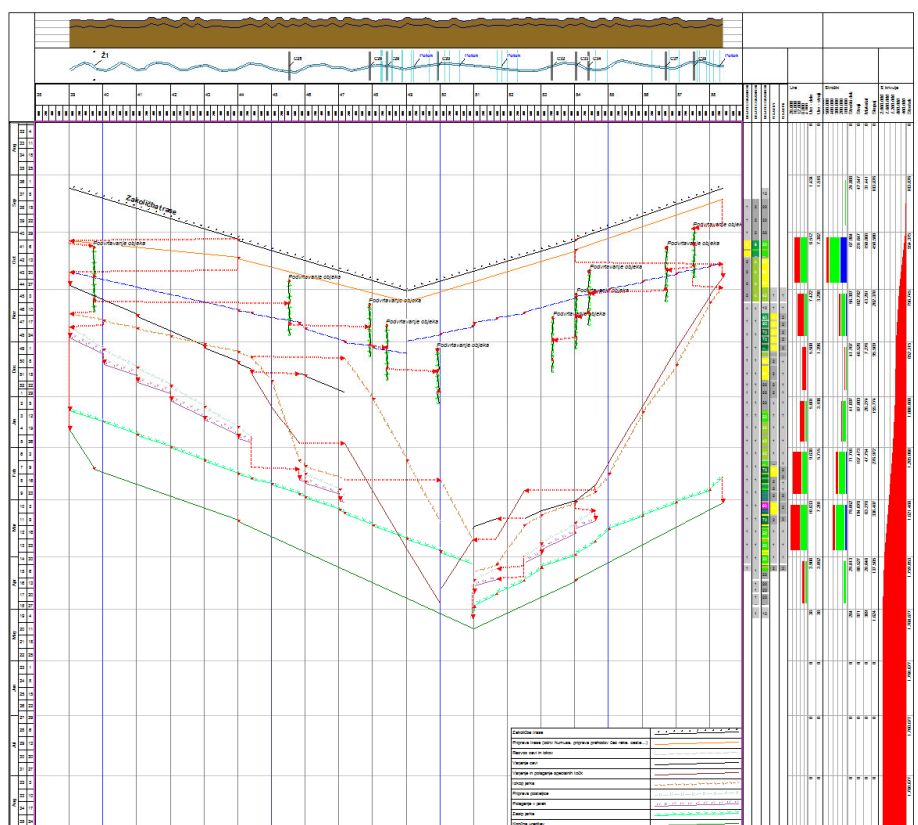


Slika 11: Dynaroad - prikaz statusa projekta po posameznih odsekih

- ▶ Možen je uvoz podatkov iz drugih programov (npr. masni profil) preko izmenjevalnih datotek formata MS Excel.
- ▶ Na nivoju dejavnosti omogoča vnos podatkov o virih, njihovi produktivnosti, ter količinah posameznih del v njenem okviru. Vsi podatki so lokacijsko (npr. količina izkopa, produktivnost glede na kategorijo zemljine) in časovno (npr. razpoložljivost izkopske mehanizacije) variabilni, kar omogoča izdelavo zelo podrobnega modela poteka gradnje.
- ▶ Glede zmožnosti prikaza linearnega terminskega plana je še dokaj omejen, vendar omogoča prikaz linearnega terminskega plana, gantograma ter spremljajočih planov – histograme virov (mehanizacija in delovna sila), kumulativne diagrame virov (poraba materiala) in časovni finančni tok (Cashflow).
- ▶ Nima vgrajenega algoritma za določanje kritične poti

**Linear Plus** je glede na svoje zmožnosti in fleksibilnost najslabši od predstavljenih orodij. Uporaben je zgolj kot grafično okolje za prikaz linearnega terminskega plana na osnovi terminskih preračunov izvedenih v drugih orodjih (Oracle Primavera, MS Project,...).

**Tilos** je v svojem razvoju dosegel že različico 7.0, kar nakazuje na njegovo zrelost in uporabnost. Sicer ne podpira faze planiranja količin in transportov vendar je v fleksibilnost in zmožnosti grafičnega prikaza trenutno neprekosljiv (slika 12).



Slika 12: Tilos – Linearni terminski plan izgradnje plinovoda

- ▶ Poleg naštetih lastnosti programa DynaRoad omogoča še direktno (XML format) in posredno (preko MS Excela) povezavo s programom MS Project. Povezava omogoča prenos seznama dejavnosti, medsebojnih odvisnosti in dejavnostim dodeljenih virov. Tako omogoča dokaj netežaven in postopen prehod na uporabo tehnike linearnega terminskega planiranja.
- ▶ Dodatno omogoča vnos več hkratnih odvisnosti med dvema dejavnostma (npr. start-start in finish-finish).
- ▶ Žal trenutno tudi on ne podpira algoritma določanja kritične poti kot to definirata avtorja Harmelink in Lucko, temveč določi kritično pot na osnovi metode kritične poti.

## 4 Zaključek

Predstavljene teoretične osnove in programska oprema prikazujejo trenutno stanje na področju linearnega terminskega planiranja. Nedvomno je to edini pravi pristop k obvladovanju gradnje linijskih objektov kot so ceste, železnice, plinovodi, ... . Od slovenskih gradbenih podjetij (po znanih podatkih) postopoma prehaja na linearno terminsko pla-

niranje zgolj eno podjetje (SCT d.d.), predvsem po zaslugi mlade ekipe inženirjev, ki so se pri svoji diplomski nalogi usmerili v to področje.

Razvoj teorije in algoritmov linearnega terminskega planiranja se trenutno usmerja v iskanje algoritmov za optimizacijo razporejanja virov (Resource Leveling), ki na področju tehnike mrežnega planiranja že obstajajo. Trenutno teoretične osnove presegajo že vgrajeno funkcionalnost programskih rešitev, njihovo implementacijo pa lahko pričakujemo v nekaj letih. Razvoj programske opreme po bo moral iti tudi v smer shranjevanja projektov v podatkovne baze (npr. SQL), s ciljem izvajanja skupne analize vseh planiranih in že izvajanih projektov, saj le tako lahko vršimo nadzor in optimizacijo uporabe sredstev na nivoju celotnega podjetja. (podobno kot rešitev MS Project Server), hkrati pa lahko programsko orodje neposredno povežemo z ostalimi informacijskimi sistemi v podjetju.

## Literatura

- Harmelink, D. J., Rowings, J. E. 1998. Linear scheduling model: Development of controlling activity path. *Journal of construction engineering and management* 124, 4: 263–268.



- Harmelink, D. J., 2001. Linear scheduling model: Float characteristics. *Journal of construction engineering and management* 127, 4: 255–260.
- Harmelink, D. J., Yamin, R. A. 2001. Development and application of linear scheduling techniques to highway construction projects. final report FHWA/IN/JTRP-2000/21, Indiana Department of Transportation
- Harmelink, D. J., Yamin, R. A. 2001. Comparison of linear scheduling model (LSM) and critical path method (CPM). *Journal of construction engineering and management* 127, 5: 374-381.
- Kallantzis, A., Lambropoulos. S. 2004. Critical path determination by incorporating minimum and maximum time and distance constraints into linear scheduling. *Engineering, Construction and Architectural Management*. Vol 11, 3: 211-222
- Lucko, G. 2009. Productivity scheduling method: Linear schedule analysis with singularity functions. *Journal of construction engineering and management* 135, 4: 246-253.
- Lucko, G., Orozco Pena, A. A. 2009. Float types in linear schedule analysis with singularity functions., *Journal of construction engineering and management* 135, 5: 368-377.
- Lucko, G. 2007. Flexible modeling of linear schedules for integrated mathematical analysis. *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*