

# Odkopne metode z zasipom – okolju prijazna tehnologija

## Mining methods with backfilling – environmentally friendly technologies

UROŠ BAJŽELJ

Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geotehnologijo in rudarstvo, Univerza v Ljubljani,  
Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana;  
Faculty of natural sciences, Department of geotechnology and mining, University of Ljubljana,  
Aškerčeva 12, SI-1000 Ljubljana, Slovenia; E-mail: uros.bajzelj@uni-lj.si

**Received:** December 5, 2003    **Accepted:** December 10, 2003

**Izvleček:** S pridobivanjem rudnin se je bavil že pračlovek, ta dejavnost spremlja razvoj človeštva vse do današnjih dni in se bo nadaljevala dokler bo obstajalo človeštvo. Ne glede na trenutno situacijo rudarske panoge v svetu, pridobivanje rudnin ostaja in bo tudi v bodoče, ena najpomembnejših osnovnih dejavnosti človeka, saj brez rudnin ni napredka in razvoja. Vsekakor ima pridobivanje rudnin kjerkoli se izvaja določen vpliv na okolje. Zato je potrebno v tehnološke postopke pridobivanja in predelave rudnin vključiti elemente varovanja okolja, skladno z veljavno zakonodajo in sodobnimi dosežki tehnike. Na ta način dosežemo okolju prijazno pridobivanje in predelavo rudnin. Z uvajanjem tehnologije zaprtega ekološko – tehnološkega kroga je možno zagotoviti okolju prijazno pridobivanje in predelavo rudnin. Pri tem imajo prednost odkopne metode z zasipom. Odkopne metode z zasipom so okolju prijazna tehnologija, ki je zato tudi perspektivna in vedno bolj uporabljena. Uporaba zasipa pri jamskem odkopavanju rudnin je povezana z dodatnimi stroški zasipa, vendar so zato direktni stroški pridobivanja nižji in to zaradi zmanjšanja škodljivih vplivov na okolje, povečane varnosti zaposlenih v jami in zmanjšanja stroškov vzdrževanja jamskih objektov. Manjši direktni stroški pridobivanja z odkopnimi metodami z uporabo zasipa, lahko v celoti kompenzirajo stroške zasipa.

Uvajanje tehnologije zaprtega ekološko – tehnološkega kroga pri površinskem odkopavanju zahteva sprotno sanacijo z rudarjenjem degradiranih površin in nudi možnost zapolnjevanja že odkopanih predelov površinskega kopa z uporabo različnih vrst zasipa.

**Abstract:** Man has engaged in excavating materials since the beginning of mankind, has continued to do so ever since and is likely to continue doing so in the foreseeable future. Regardless of the current state of the mining industry, ore extraction remains and will remain one of man's most basic and important activities. There can be no progress or development without raw materials. Mining has also always had an environmental effect and technological methods for ore extraction and processing must encompass some elements of environmental protection, in line with current legislation and modern technological achievements. By introducing a closed environmental-technological cycle it is possible to assure environmentally friendly ore extraction and processing. Mining methods with backfilling have an advantage in this respect. Being an environmentally friendly technology, it is more attractive than other technologies and is as such being used increasingly frequently. Backfilling introduces additional cost into the mining pro-

cess but tends to make overall costs lower by decreasing negative environmental impact, increasing personnel safety and reducing maintenance costs. Introducing a closed environmental-technological cycle into surface mining requires immediate reclamation of the degraded surface and enables us to fill used parts of the surface dig with different types of waste material.

**Ključne besede:** okolje, odkopna metoda, zasip, utrjeni zasip,

**Key words:** environment, mining method, backfill, hardening backfill

## UVOD

S pridobivanjem rudnin (mineralnih in energetskih surovin) se je bavil že pračlovek, ta dejavnost spremlja razvoj človeštva vse do današnjih dni in se bo nadaljevala dokler bo obstajalo človeštvo. Brez pridobljenih rudnin ne bi bil možen razvoj človeka, od kamene dobe preko, bronaste in železne dobe do industrijske družbe in prihodnje informacijske dobe. Vsi industrijski proizvodi, razen poljedelskih in živalskih proizvodov in proizvodov iz lesa, so proizvedeni iz pridobljenih rudnin. Vse kovine so proizvedene s predelavo rud, ki so pridobljene z rudarskimi metodami dela. Kemični proizvodi, umetne mase, gradbeni materiali so proizvedeni iz mineralnih surovin (nekovine – industrijski minerali, gramoz, prod, glina itd.) pridobljenih z rudarskimi metodami dela. Najmanj 2/3 vse proizvedene (termoelektrarne, plinske elektrarne, nuklearke) in porabljene energije je pridobljene z rudarsko dejavnostjo.

Glede na to, da življenjski standard prebivalstva narašča, je povpraševanje po industrijskih in gradbenih proizvodih ter energiji vedno večje. Za izdelavo industrijskih in gradbenih proizvodov se vedno več surovin oziroma sekundarnih surovin pridobi z recikliranjem odpadnih. Kljub temu pa še vedno precejšen del s količino novo

pridobljenih rudnin. Energetske surovine (premog, nafta, plin, uran) pa v celoti s pridobivanjem rudnin. Zato se iščejo še nova nahajališča, primerna za masovno pridobivanje rudnin, v že poznanih nahajališčih pa se uvaja visoko produktivne metode, vse z namenom zniževanja stroškov pridobivanja. Povsod tam kjer velikost in kvaliteta nahajališča dopuščata ceneno in masovno pridobivanje je škodljivi vpliv pridobivanja rudnin na okolje velik, zato je potrebno uporabiti okolju prijazno tehnologijo pridobivanja. Tam kjer rezerve v nahajališču ne omogočajo ceneno in masovno pridobivanje, se opušča pridobivanje in zapira rudnike. V okviru zapiranja rudnikov pa je potrebno izvesti ustrezna sanacijska dela, da se prepreči dolgoročni škodljivi vpliv rudarjenja na okolje.

Pridobivanje rudnin – rudarjenje je bilo v zadnjih 500 letih močno razširjeno in zelo intenzivno v Evropi. Zaradi večje stopnje izkoriščenosti nahajališč in zaostrenih pogojev varovanja okolja, v urbanih naseljih, so stroški pridobivanja v evropskih rudnikih vedno večji. Rudniki, ki obratujejo, na novo odkritih nahajališčih, izven Evrope v Aziji (Rusiji, Kitajski), Afriki (Južnoafriški republiki), Severni ter Južni Ameriki (Kanadi, Braziliji, Peruju) in Avstraliji so

danesh sposobni pridobivati cenene rudnine in nuditi na svetovnem trgu, v zadostni količini, po konkurenčnih cenah, kovine, mineralne surovine in gradbene materiale.

V Evropi pridobljene rudnine imajo prednost, edino v nizkih transportnih stroških. To velja predvsem za rudnine, ki jih industrija potrebuje v velikih količinah kot so različni industrijski minerali – nekovine in gradbeni materiali. Ne velja pa za vse vrste rud in energetskih surovin (premog, uran, nafta, plin).

Ne glede na trenutno situacijo rudarstva v Evropi, pridobivanje rudnin v svetovnem merilu ostaja in bo tudi v bodoče, ena najpomembnejših in osnovnih dejavnosti človeka, saj brez surovin ni napredka in razvoja.

Pridobivanje rudnin ima vedno določen vpliv na okolje, zato je v tehnološke postopke pridobivanja in predelave rudnin vključiti elemente varovanje okolja, skladno z veljavno zakonodajo in sodobnimi dosežki tehnike. Pridobivanje na površinskih kopih zahteva sprotno sanacijo z rudarjenjem degradirane površine, jamsko pridobivanje pa čimmanjši vpliv rudarjenja na površino. Oba načina pridobivanja pa morata biti okolju prijazna, ne samo s tem, da se prepreči degradacija površine, temveč tudi s tem, da ne oddajata škodljivih snovi v okolje. To se doseže z uvedbe zaprtega ekološko – tehnološkega kroga.

Z uporabo odkopnih metod z zasipom v okviru jamskega pridobivanja rudnin, je možno uvesti zaprt ekološko – tehnološki krog in s tem minimizirati škodljivi vpliv rudarjenja na okolje. Še več, različne vrste odpadnih materialov, nastalih v okviru

pridobivanja in predelave rudnin in določene industrijske odpadke je možno uporabiti za zasipni material in na ta način zagotoviti okolju prijazno rudarjenje in koristno uporabiti določene vrste odpadnih snovi, ki bi sicer morale biti odložene na posebnih odlagališčih.

Torej lahko zaključimo, da so odkopne metode z zasipom – okolju prijazna tehnologija, zato tudi perspektivna in vedno bolj uporabljena tehnologija. Uporaba zasipa pri jamskem odkopavanju rudnin je povezana z dodatnimi stroški zasipa, vendar so zato direktni stroški pridobivanja nižji in to zaradi zmanjšanja škodljivih vplivov na okolje, povečane varnosti zaposlenih v jami in zmanjšanja stroškov vzdrževanja jamskih objektov. Manjši direktni stroški pridobivanja z odkopnimi metodami z uporabo zasipa, lahko v celoti kompenzirajo stroške zasipa.

Uvajanje tehnologije zaprtega ekološko – tehnološkega kroga pri površinskem odkopavanju zahteva sprotno sanacijo z rudarjenjem degradiranih površin in nudi možnost zapolnjevanja že odkopanih predelov površinskega kopa z uporabo različnih vrst zasipa.

## **OKOLJU PRIJAZNO RUDARJENJE**

### **Splošno**

Varovanje in vzdrževanje čistega okolja je vedno bolj pomembno. Z naraščanjem življenjskega standarda prebivalstva, narašča tudi količina in vrste odpadkov. Rešitev tega problema je v spremenjenem odnosu ljudi do izrabe sekundarnih in trenutno odpadnih

surovin v rudarstvu kakor tudi do odpadkov v okviru gospodarjenja z odpadki. S sprejemom osnovnega principa gospodarjenja z odpadki, da mora vsak sam poskrbeti za svoje lastne odpadke, na okolju prijazen način, je tudi rudarska stroka primorana iskati nove tehnologije pridobivanja, ki vsebujejo istočasno s pridobivanjem in predelavo tudi zmanjšanje količine odpadnih snovi in zmanjšanje škodljivega vpliva na okolje. To je možno doseči z uvedbo zaprtega ekološko – tehnološkega kroga v okviru tehnologije pridobivanja in predelave rudnin (slika 1).

V tehnološkem procesu površinskega ali jamskega pridobivanja rudnin in njihove predelave v polproizvod ali končni produkt, je možno odkopani prostor zasuti. Kot zasipni material pa uporabiti različne vrste sekundarnih ali trenutno odpadnih surovin in inertnih odpadkov.

V rudnikih kovin kjer je v neposredni bližini topilnica je možno vse trenutno odpadne snovi kot so jamska jalovina, separacijaska jalovina, flotacijska ali hidrometalurška jalovina, žgalniške ostanke, topilniško žlindro in eventualne druge sekundarne surovine (reciklirane odpadke) uporabiti za zasipni material. Z zasipavanjem odkopov se močno poveča stabilnost odkopov in hribine v krovlini kar omogoča povečanje učinkovitosti pridobivanja, zmanjšanje škodljivih vplivov na okolje in s tem nižanje direktnih stroškov pridobivanja.

V tehnološkem procesu proizvodnje električne energije v termoelektrarnah, ki kurijo s premogom iz premogovnika v neposredni bližini je možno zapolnjevati oziroma zasipati odkope z zasipnim

materialom iz trenutno odpadnih surovin rudnika, separacije in termoelektrarne (pepel, EFpepel, žlindra, produkti čistilnih naprav). Na splošno lahko ugotovimo, da odkopani prostor, ki nastane s pridobivanjem rudnin, lahko predstavlja v rudarstvu veliko prednost in vrednost v kolikor uvedemo zaprt ekološko – tehnološki krog.

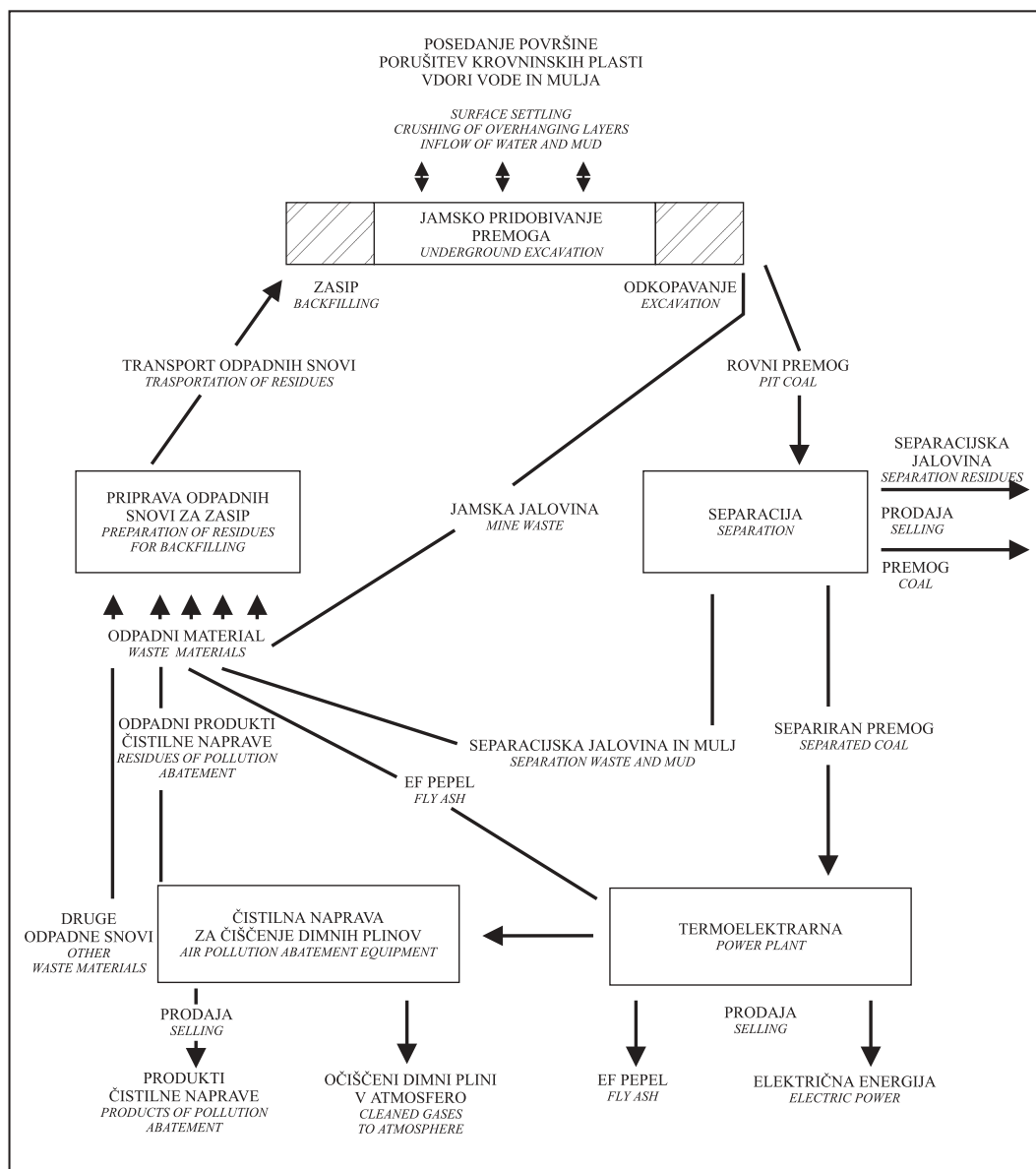
Trenutno odpadne surovine, ki nastanejo v procesu pridobivanja rudnin in produkte filtrirnih ter čistilnih naprav predelovalnih obratov, uporabimo kot surovino za nove proizvode, v kolikor imajo tržno vrednost. Sicer pa uporabimo vse trenutno odpadne surovine kot zasipni material za zapolnjevanje odkopanih prostorov. V kolikor prostornina odkopanega prostora dopušča, uporabimo za zasip poleg trenutno odpadnih surovin v okviru procesa pridobivanja in predelave rudnin še druge inertne industrijske odpadke v skladu z zakonodajo o odpadkih.

Z uvedbo zaprtega ekološko-tehnološkega kroga omogočimo okolju prijazen način pridobivanja in predelave rudnin. Končne produkte, ki imajo tržno vrednost prodamo in prečiščene dimne pline odvajamo v atmosfero. Vse ostale trenutno odpadne surovine in proizvode čistilnih naprav pa odložimo na okolju prijazen način znotraj zaprtega ekološko – tehnološkega kroga.

V primeru premogovnika in termoelektrarne, ki obratujeta v zaprtem ekološko-tehnološkem krogu se proizvede in pošilja v omrežje, okolju prijazno električno energijo. V okolje se oddaja samo očiščene dimne pline, vse trenutno odpadne surovine pa ostanejo znotraj zaprtega kroga.

V primeru uporabe trenutno odpadnih surovin in eventualno drugih inertnih odpadkov za zasipni material je le te potrebno predhodno pripraviti za zasip in transportirati od mesta nastanka do mesta zasipavanja kar zahteva dodatna investicijska

sredstva in povečuje stroške tehnološkega procesa pridobivanja in predelave rudnin. Na drugi strani pa pridobimo z uvedbo zaprtega ekološkega-tehnološkega kroga niz prednosti, ki znižujejo stroške skupnega tehnološkega procesa.



Slika 1. Okolju prijazno rudarjenje.

Figure1. Environmental safe mining.

Vsekakor morajo biti skupni stroški pridobivanja in predelave rudnin po uvedbi zaprtega ekološko-tehnološkega kroga nižji, ob upoštevanju prednosti, predvsem v pogledu varovanja okolja, ki jih nudi ta tehnologija.

### Škodljivi vplivi rudarjenja na okolje

Če sledimo tehnološkemu procesu pridobivanja, bogatenja in topljenja rud ali pridobivanju, separiranju in pretvorbi premoga v toplotno oziroma električno energijo ali pridobivanju, drobljenju, sejanju, mletju in separiranju ter predelavi nekovinskih mineralov, lahko ugotovimo več različnih vplivov na okolje. V splošnem lahko opredelimo naslednje vplive:

- A) pridobivanje**
- a) spremembe primarnega napetostnega stanja v hribini; deformacije, porušitve**
    - pojačan sistem podgrajevanja
      - na odkopih
      - v jamskih progah
    - povečano možnost nastopanja
      - vdora vod
      - vdora tekočih mas
      - večjih zruškov
    - vplivi na površino
      - poškodbe na stavbah
      - deformacije na površini
      - akumulacije vod
      - sproženje plazov
  - b) odlagališča jamske jalovine**
    - rana v okolju
    - izcedne vode
- B) mehansko procesiranje, separiranje, bogatenje**
- a) odlagališče separacijske jalovine**
    - rana v okolju
    - izcedne vode

- b) odlagališče flotacijske jalovine**
    - rana v okolju
    - izcedne vode
  - c) tehnološke vode**
  - d) mulji**
- C) topljenje rud, predelava nekovinskih mineralov, pretvorba premoga v toploto oziroma električno energijo**
- a) odlagališče žindre**
    - rana v okolju
    - izcedne vode
  - b) odlagališče pepela**
    - rana v okolju
    - izcedne vode
  - c) odlagališče EF pepela**
    - rana v okolju
    - izcedne vode
  - d) dimni plini**
    - čistilne naprave
      - odlagališče za produkte čistilnih naprav

### Zaprta ekološko-tehnološki krog pridobivanja in predelave rudnin

Vse sekundarne ali trenutno odpadne surovine, ki so proizvod pridobivanja, predelave, topljenja ali pretvorbe rudnin vračamo v odkopani prostor kot zasipni material. Na ta način smo ustvarili zaprt ekološko-tehnološki krog in zagotovili okolju prijazen tehnološki proces. (Slika 1) V ta namen je potrebno zgraditi posebne naprave za pripravo in transport zasipnih materialov ter vpeljati odkopno metodo z zasipom. Relativno velika količina odpadnih snovi, pripravljenih kot zasipni material mora biti transportirana od mesta priprave na površini v odkopani prostor v jami. Pri tem je stremeti, da je transport kolikor je največ možno direkten.

Večina trenutno odpadnih surovin (separacijska in flotacijska jalovina, hidro-metalurška jalovina, mulji, pepeli, EF-pepeli, mulji, odpadni produkti čistilnih naprav dimnih plinov, razen jamske jalovine in žindre) je fino zrnatih, zato primernih za hidravlični transport po ceveh, kot kompozit v obliki stabilne paste. Pri tem je pomembno, da ima kompozit pripravljen iz sekundarnih surovin, povsem določene fizikalne, kemične in reološke lastnosti v času transporta. Po odložitvi v odkopani prostor in utrjevanju mora pridobiti predvidene določene mehanske lastnosti s tem, da ostane kompozitu dodana voda kemično vezana v zasipu.

Glede na vrsto odpadnih snovi in izbrano odkopno metodo je določiti najustreznejši način transporta in odlaganja zasipa ter priprave odpadnih snovi.

### **Prednosti vpeljave zaprtega ekološko-tehnoškega kroga**

Pri ugotavljanju prednosti zaprtega ekološko-tehnoškega kroga moramo obravnavati celoten tehnološki proces pridobivanja, separiranja, bogatenja, topljenja ali predelave oziroma pretvorbe rudnin kot enoten celovit proces. Obravnavati moramo vse naprave, ki jih povežemo v zaprt tehnološki proces.

Ugotavljamo lahko več prednosti, ki jih pridobimo z vpeljavo zaprtega ekološko-tehnoškega kroga, tako v procesu pridobivanja kot v procesu predelave in pretvorbe pridobljenih rudnin.

Prednosti povezane s posameznimi fazami tehnološkega procesa so naslednje:

#### **A) Pridobivanje**

- a)** uporaba zasipa zmanjšuje stopnjo sprememb primarnega napetostnega stanja v hribini, kakor tudi deformacij in porušitev hribine in na ta način izboljšuje pogoje jamskega pridobivanja
  - enostavnejši in zmanjšan obseg podgraevanja, povečanje produktivnosti in zmanjšanje vzdrževalnih del
    - na odkopih
    - v jamskih progah
  - zmanjšana nevarnost nastanka
    - vdora vod
    - tekočih mas
    - večjih zruškov
  - manjše odkopne izgube
  - manjša osiromašitev pridobljene rudnine
  - bistveno manjši vplivi na površino
    - manjša rudarska škoda
  - uporaba odkopanega prostora ("starega dela") za odlaganje drugih inertnih odpadkov

#### **b) odpade gradnja odlagališča za jamsko jalovino**

#### **B) mehansko procesiranje, separiranje, bogatenje**

- a)** odpade gradnja odlagališč za separacijsko in flotacijsko jalovino ter mulje
- b)** tehnološke vode se uporabi za pripravo zasipne mešanice

#### **C) topljenje rud, predelava nekovinskih mineralov, pretvorba premoga v toploto oziroma električno energijo**

- a)** v celoti odpade gradnja odlagališč za odpadne snovi in s tem tudi rane v okolje ter obdelava izcednih vod
- b)** dimni plini
  - čistilne naprave
    - odpade gradnja odlagališč za produkte čistilnih naprav dimnih plinov.

## ODKOPNE METODE

### Uvodne pripombe

Osnovni namen rudarjenja je pridobivanje koristnih rudnin, ki so del narave in se nahajajo v različnih nahajališčih, ki pa kot vemo niso obnovljiva. Zato moramo z zalogami rudnin ravnati gospodarno.

V pogojih tržnega gospodarjenja, rudniki poslujejo enako kot ostala industrija po načelih podjetniške ekonomije, zato je potrebno pridobivanje rudnin prilagoditi tržnim razmeram, ob upoštevanju vseh vidikov varovanja okolja. Vloga rudarskega strokovnjaka je pri tem odločilna. Predvsem je pomembna pravilna izbira odkopne metode, glede na karakteristike in pogoje nahajališča kot ključne faze pridobivanja. Odkopna metoda ima neposreden vpliv na vse ostale tehnološke sklope, ki so ji podrejeni in posledično tudi na okoljevarstvene rešitve ter stroške pridobivanja.

Z izbiro odkopne metode vplivamo tudi na obseg, vrsto in velikost vseh jamskih objektov (odpiralnih in pripravljanih prog, šahtov, slepih šahtov, sipk, nadkopov, ramp itd.), na izkoriščenost nahajališča oziroma na višino odkopnih izgub ter na stopnjo osiromašitve. Zato ima pravilna izbira odkopne metode glede na dane naravne pogoje nahajališča zelo velik gospodarski pomen.

Lahko rečemo, da imamo toliko različic odkopnih metod kolikor je nahajališč. Pri izbiri odgovarjajoče odkopne metode za posamezno nahajališče moramo poleg gospodarskih vidikov upoštevati tudi

naravne danosti nahajališča, kot so debelina in naklon rudnih teles ali slojev, trdnost rudnine in mehanske lastnosti prihrabin kakor tudi globino, kar vse vpliva na proces odkopavanja. Poleg tega so, za izbiro odkopne metode pomembne zahteve, ki jih postavljamo glede obnašanja stropa v odkopu. To je odvisno od potreb varovanja površine oziroma objektov na površini, potreb obvladovanja deformacij v krovlini, da se prepreči vdore vode in/ali tekočih mas.

## ODKOPNE METODE Z ZASIPOM

### Splošno

Zasip je imel vedno pomembno vlogo v rudarstvu. Kljub temu pa ga danes zelo pogosto smatrajo kot neko pomožno dejavnost v celotni tehnologiji pridobivanja, ki povečuje stroške. Tak način obravnavanja zasipa v rudarstvu vzdrži samo v slučaju, da zanemarimo oziroma ni potrebno upoštevati škodljive vplive rudarjenja na okolje. Rudarska dejavnost je vezana na poseg v okolje in z rudarjenjem porušimo ravnotežje v okolju, ki se je ustvarilo tekom milijonov let geološke zgodovine na zemeljski obli.

Kot smo že uvodoma ugotovili pa razvoj človeštva brez proizvodov rudarske dejavnosti ni možen. Zato moramo stremeti, da s pridobivanjem rudnin v čim manjši možni meri porušimo naravno ravnotežje in s tem tudi zmanjšamo škodljivi vpliv rudarjenja na okolje. Z uvedbo zaprtega ekološko-tehnološkega kroga, ko z vračanjem vseh odpadnih snovi v odkopane prostore, uporabimo odkopne metode z zasipom, vzpostavimo okolju prijazno rudarjenje. S tem pa so dobile odkopne



metode z zasipom v tehnologiji pridobivanja rudnin pomembno mesto, ki je neločljivo povezano z okolju prijaznim rudarjenjem.

Odkopne metode z zasipom imajo niz prednosti pred odkopnimi metodami z rušenjem in pridobivajo na pomenu tako v pogledu varovanja okolja kot v ekonomskem pogledu in to kljub stroškom, ki jih povzročajo uporaba zasipa.

Odkopne metode z zasipom zagotavljajo stabilnost odkopov, s tem pa se močno zmanjšuje škodljivi vpliv odkopavanja na sosednje jamske objekte in rušne procese v krovlini ter posledično na posedanje površine. To ima za posledico nižje stroške za izvajanje podpornih ukrepov in vzdrževanja na odkopih in jamskih objektih v neposredni bližini odkopov ter manjše stroške za rudarsko škodo zaradi manjših deformacij na površini. Z zasipavanjem odkopov je krovlnina nahajališča v manjši meri podvržena rušnim procesom, zato je manjša nevarnost zruškov, vdorov tekočih mas in vode. Zaradi tega odpadejo stroški sanacije takih pojavov, ki lahko dosežejo zelo visoke vrednosti. Zagotovljena je tudi povečana varnost zaposlenih v jami.

V celoti odpade potreba po pridobivanju zasipnega materiala na površini zaradi uporabe sekundarnih ali trenutno odpadnih surovin kot zasipni material.

Odkopne izgube so manjše, poveča se izkoriščenost nahajališča v celoti. Osiromašitev pridobljene rudnine je manjša, omogočeno je dosledno izvajanje selektivnega odkopavanja. Dokazano je, da dosledno selektivno odkopavanje zelo pozitivno vpliva na gospodarnost pridobivanja.

Slaba stran odkopnih metod z zasipom je v manjši učinkovitosti in posledično v povečanih stroških vezanih na pripravo, transport in vgradnjo zasipa.

Praksa na nekaterih rudnikih, kjer so dosledno uveljavili princip okolju prijaznega rudarjenja je pokazala, da so ekonomski rezultati ugodni. Znižanje stroškov zaradi navedenih prednosti odkopnih metod z zasipom je večje od stroškov priprave, transporta in vgradnje zasipa. V področjih, ki so posebno občutljivi na škodljive vplive odkopavanja pa je pridobivanje rudnin z uporabo zasipa edini možen način rudarjenja.

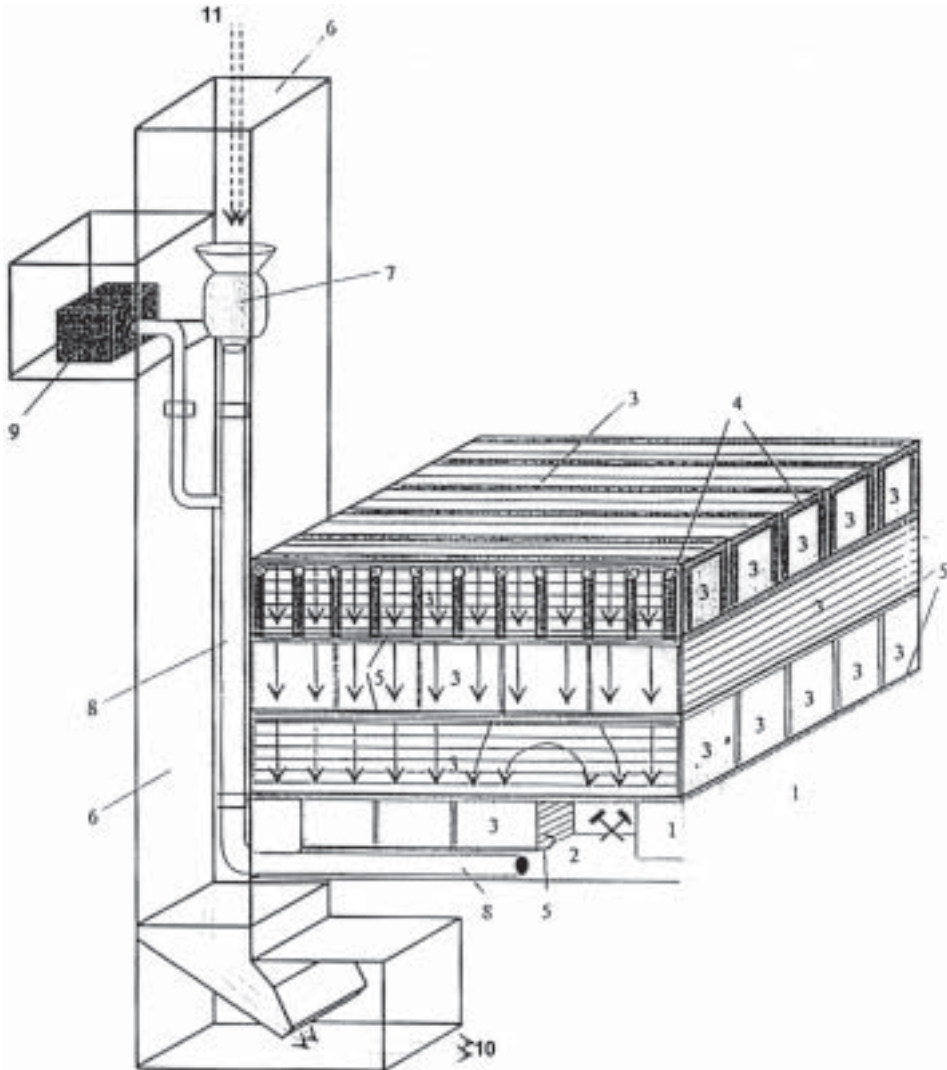
Za odkopne metode z uporabo suhega nevezanega zasipa in odkopavanjem od spodaj navzgor je značilno, da nastopijo težave z rušenjem stropa zaradi postopne komprimacije nevezanega zasipa. Da se zagotovi v takih pogojih odkopavanja varno delo je potrebno povečati obseg podgrajevalnih ukrepov. S tem pa se močno zmanjša učinkovitost odkopavanja in povečajo stroški.

Le izjemoma se je do nedavnega uporabljalo odkopavanje z zasipom od zgoraj navzdol, ki pa zahteva izdelavo umetnega stropa, kar je zamudno in drago. Poleg tega pa je potrebno na odkopih pod umetnim stropom normalno podgrajevati, kar preprečuje doseganje visokih učinkov in povečuje stroške pridobivanja.

Korak naprej v razvoju podetažnih odkopnih metod je uporaba utrjenega zasipa, ki prevzame funkcijo umetnega stropa in s katerim se eliminirajo težave značilne pri uporabi suhega nevezanega zasipa. Z uporabo utrjenega zasipa so se razmere pri odkopavanju od zgoraj navzdol bistveno

izboljšale. Z dodajanjem veziva ( apno, cement ) v zasip in uporabo zasipnih materialov z vezivnimi lastnostmi ( EF pepel, žindra iz visokih peči ) pripravimo utrjeni zasip, s

katerim smo v stanju povsem stabilizirati hribinske razmere na odkopu. S tem se močno zmanjša obseg podgrajevanja in tudi celotni stroški pridobivanja.



**Slika 2.** Podetažna odkopna metoda z uporabo utrjenega zasipa 1) ruda; 2) odkop; 3) utrjen zasip; 4) leseno podporje; 5) jeklena armatura; 6) slepi jašek; 7) zapihovalni stroj; 8) zapihovalna cev; 9) priprava cementnega mleka; 10) transport rude; 11) dovoz jalovine za zasip.

**Figure 2.** Sublevel mining method with reinforced consolidated backfilling 1) ore; 2) front area; 3) reinforced backfilling; 4) wooden support; 5) steel reinforced; 6) blindschaft; 7) blower; 8) blowing pipe; 9) preparation of cement milk; 10) transport of ore; 11) delivery of gangue for backfilling.

## **ODKOPNE METODE Z UPORABO UTRJENEGA ZASIPA**

Tehnologija izdelave utrjenega zasipa je danes dosegla že tako stopnjo, da jo lahko rentabilno uvajamo na različnih rudnikih. Celo pri odkopavanju premoga se v posebnih primerih zelo uspešno uvaja utrjevanje porušene hribine pri podetažnem odkopvanju debelih slojev.

V številnih rudnikih širom sveta je uspešno vpeljana podetažno odkopavanje z utrjenim zasipom v različnih variantah, prilagojenih pogojem nahajališča, varnosti zaposlenih in gospodarnosti pridobivanja.

### **Odkopne metode z zasipom uporabljene v slovenskih rudnikih**

V slovenskih rudnikih so bile pred drugo svetovno vojno in takoj po njej uporabljene v pretežni večini odkopne metode z zasipom. Na premogovnikih predvsem s hidravličnim zasipom in v kovinskih rudnikih z ročno vgrajenim suhim zasipom. Zaradi zniževanja stroškov pridobivanja so postopoma, po letu 1960, v vseh premogovnikih opustili zasipavanje in prešli na odkopavanje z rušenjem stropa.

Odkopne metode z zasipom so bile še v zadnjih treh desetletjih 20. stoletja uporabljene v Rudniku živega srebra Idrija in Rudniku urana Žirovski vrh. Delno zapolnjevanje odkopov s flotacijsko jalovino je bilo vpeljano tudi v Rudniku svinca in cinka v Mežici. Poiskusi delnega zasipavanja s črpanjem paste so bili izvedeni v premogovniku Velenje.

## **Odkopna metoda z uporabo utrjenega zasipa v Rudniku živega srebra Idrija**

V Rudniku živega srebra Idrija se je že od samega začetka rudarjenja odkopane prostore zasipavalo z jalovino pridobljeno z raziskovalnimi deli. Več kot tristo let se je odkopavalo s prečno odkopno metodo z etažami od spodaj – navzgor z uporabo suhega zasipa. Jalovino za zasip so pridobivali v kamnolomu na površini neposredno nad jamo, deloma so uporabili jalovino pridobljeno z raziskovalnimi deli, deloma pa žgalniške ostanke. Z uvajanjem mehanizacije se je prečna odkopna metoda prilagajala zahtevam uvedene mehanizacije in istočasno povečalo učinkovitost.

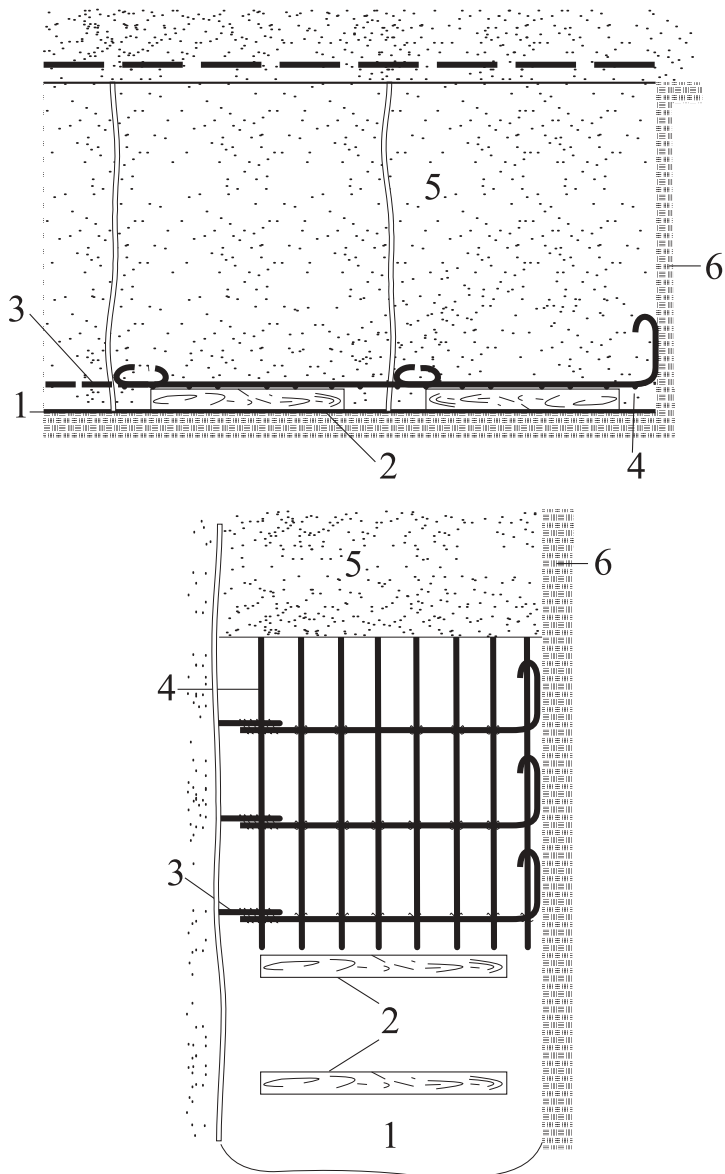
Na podlagi dolgoletnih izkušenj z uporabo suhega nevezanega zasipa pri odkopavanju s prečno odkopno metodo z etažami od spodaj – navzgor, ta metode ni prišla v poštev za pridobivanje cinobaritne rude s samorodnim živim srebrom v mehkih permokarbonskih skrilavcih. Potrebno je bilo načrtovati novo drugačno odkopno metodo, ki bo zagotavljala stabilnost odkopov, v mehanskem pogledu zelo slabi hribini (tabela 1), omogočala odkopavanje subvertikalnih rudnih teles povsem nepravilnih oblik in zmanjševala negativne vplive samorodnega živega srebra na jamsko okolje in rudarje na odkopu.

**Tabela 1.** Mehansko – fizikalne lastnosti permokarbonkega skrilavca.  
**Table 1.** Geotechnical properties of permocarboniferous Schist.

	Vrtina -50° pravokotna na plastovitost <i>Perpendicular to stratification borehole -50°</i>	Vrtina -40° paralelna s plastovitostjo <i>Parallely to stratification borehole -40°</i>	Vrtina -20° pod kotom 45° na plastovitost <i>t angle of 45° to A stratification borehole -20°</i>
Opis vzorca <i>Description of sample</i>	Horizontalna plastovitost, zelo slaba hribina <i>Horizontal stratification, very weak rock</i>	Zelo jasna skoraj vertikalna plastovitost <i>Very clear nearly vertical stratification</i>	Jasna plastovitost pod kotom 45° <i>Clear stratification at 45°</i>
Naravna vlažnost w(%) <i>Natural moisture</i>	1,8	0,97	0,8
Prostorninska teža permokarbonkega skrilavca $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) <i>Volume weight of carboniferous schist</i>	27,4	27,68	27,55
Prostorninska teža vzorca $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) <i>Smple volume weight</i>	23,76	25,2	25,14
Kot notranjega trenja $\varphi$ (°) <i>Angle of internal friction</i>	14,5	25,5	22
Kohezija c (kPa) <i>Cohesion</i>	420	460	440

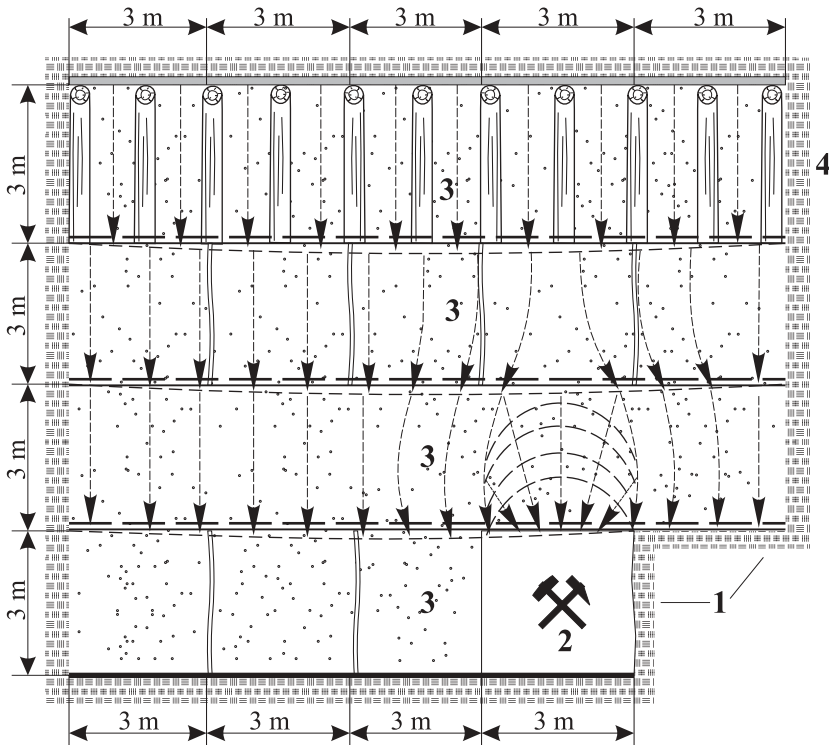
Z novo podetažno odkopno metodo z uporabo utrjenega zasipa se izdeluje odkopne etaže od zgoraj – navzdol (slika 2, 3, 4 in 4a). S tem se prepreči izguba rude in predvsem samorodnega živega srebra v zasip, zmanjša se površina sveže hribine in s tem izhlapevanje samorodnega živega

srebra in doseže stabilnost odkopov. Potreba po podgrajevanju je močno zmanjšana oziroma v celoti odpade, zaradi tega se dosega višje odkopne učinke (tabela 2 in 3), zmanjša porabo lesa za podgrajevanje, vse to pa izboljšuje ekonomičnost pridobivanja.



**Slika 3.** Odkop podetažne odkopne metode z jekleno armaturo v tleh etaže, ki zagotavlja samonosilnost stropa v naslednji nižji etaži 1) PVC folija; 2) leseni prag, ki zagotavlja pravilno lego armature; 3) jeklena armatura v prečni legi; 4) jeklena armatura v vzdolžni legi; 5) zasip - utrjen; 6) ruda.

**Figure 3.** Stope of sublevel mining method with reinforced consolidated backfill with assure selfloading capacity of roof in the lower stope level 1) plastic sheet; 2) wooden sleeper ensuring the correct position of the reinforcement; 3) steel reinforcement in traverse direction; 4) steel reinforcement in longitudinal direction; 5) fill(cemented); 6) ore.



**Slika 4.** Shematski prikaz principa idrijske podetažne odkopne metode z uporabo utrjenega zasipa 1) ruda; 2) odkop v izdelavi; 3) zasip; 4) lesena podgradnja v I. etaži.

**Figure 4.** Schematic presentation of the principle of sublevel mining method (cut – and – fill stoping) with reinforced consolidated (cemented) backfill 1) ore; 2) stope in the process of construction; 3) fill - cement; 5) timbering in I. level.

Glavne značilnosti podetažne odkopne metode z utrjenim zasipom so:

- napredovanje etaž od zgoraj navzdol,
- strop vsake naslednje etaže je utrjeni zasip armiran z jekleno mrežo,
- pnevmatski zasip z dodajanjem cementnega mleka zasipnemu agregatu.

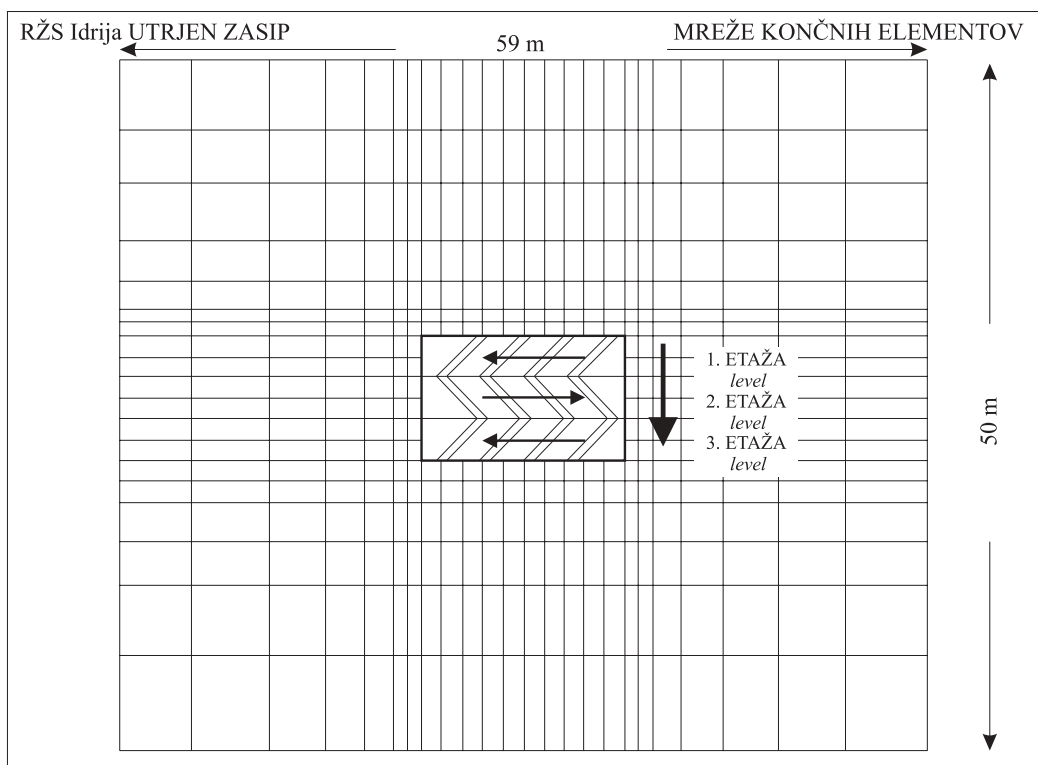
Razvoj napetostno deformacijskih stanj v okolni hribini pri odkopavanju s podetažno odkopno metodo z utrjenim zasipom je možno analitično zasledovati s simulacijo zaporedja vseh nastopajočih faz dela

(odkopavanje, podgrajevanje, zasipavanje) z uporabo računalniškega programa UTAH 2 (slika 5). Prednost tega programa je v tem, da lahko spremljamo vse faze dela na odkopu od odkopavanja do zasipa. Rezultat analitične simulacije vključuje tudi zgodovino in način razvoja odkopavanja. Program omogoča, da pri izračunih napetostno – deformacijskih pogojev upoštevaboljšanje trdnostnih in deformabilnostnih lastnosti utrjenega zasipa. (slika 6, 7, 8 in 9).

Geotehnične lastnosti utrjenega zasipa se razlikujejo od navadnega suhega pnevmatskega zasipa predvsem v naslednjem:

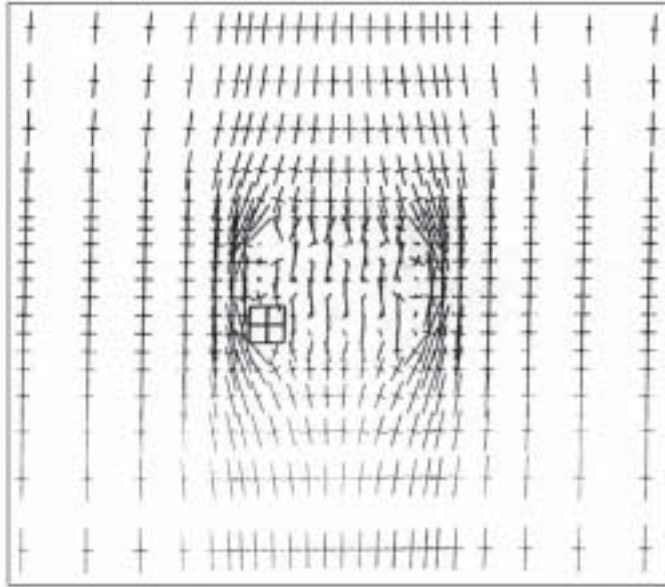
- trdnostne in deformabilnostne lastnosti utrjenega zasipa so boljše od lastnosti okolne hribine (skrilavec v intaktnem stanju),

- utrjeni zasip s časom pridobiva na trdnosti ob zmanjševanju deformabilnosti
- utrjeni zasip takoj po vgraditvi bistveno hitreje pridobiva na trdnosti kot pa v naslednjih dneh, kar ugodno vpliva na raznos dodatnih napetosti v hribini

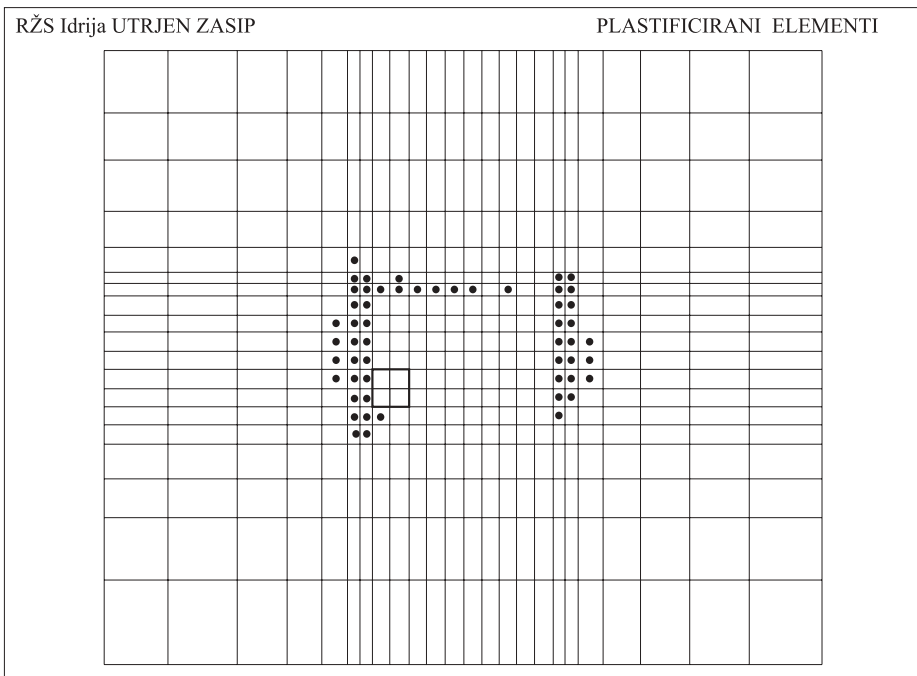


**Slika 5.** Mreža končnih elementov s shematskim prikazom simulacije odkopavanja od zgoraj – navzdol.

**Figure 5.** Finite elements mesh with schematic presentation of excavation from above to down

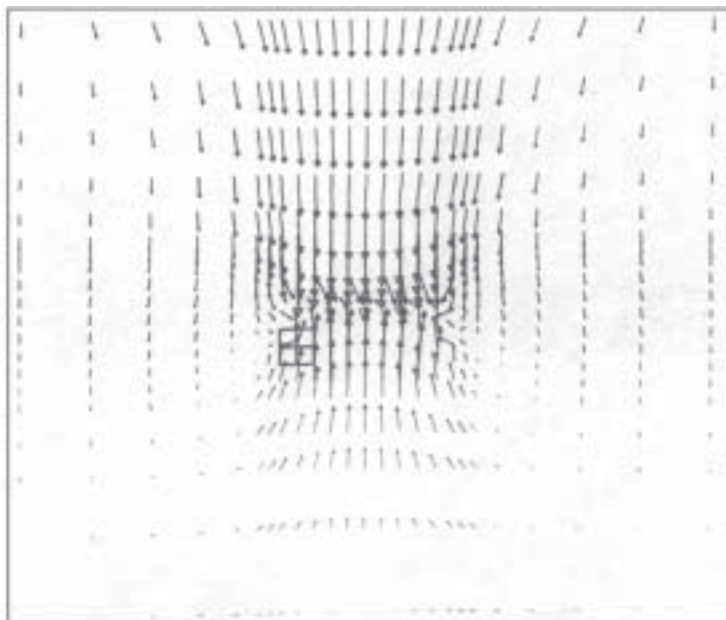


**Slika 6.** Lega in velikost glavnih napetosti po zaključku odkopavanja in zasipa tretje etaže.  
**Figure 6.** Position and largeness of calculated main stresses after excavation and backfill the third level.

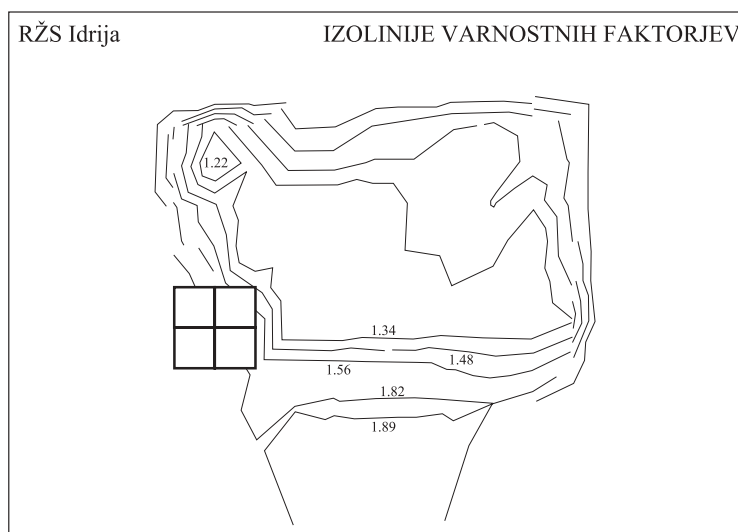


**Slika 7.** Širjenje porušenih območij po zaključku odkopavanja in zasipa tretje etaže.  
**Figure 7.** Widening of destroyed range after excavation and backfill the third level.





**Slika 8.** Razvoj deformacijskih polj po zaključku odkopavanja in zasipa tretje etaže.  
**Figure 8.** Progress of deformations fields after excavation and backfill the third level.



**Slika 9.** Izolinije varnostnih količnikov, glede na razpoložljivo trdnost po zaključku odkopavanja in zasipa tretje etaže.

**Figure 9.** Isoline of safty factors, regards of available strenght after excavation and backfill the third level.

Na podlagi rezultatov analitične simulacije prikazanih na slikah 5, 6, 7, 8 in 9 je možno povzeti, da je pri odkopavanju z utrjenim zasipom raznos dodatnih napetosti enakomernejši pri utrjenem zasipu kot pa pri navadnem suhem pnevmatskem zasipu. Saj prav utrjeni zasip s svojimi geotehničnimi lastnostmi omogoča prevzemanje dodatnih obremenitev. To dejstvo je pogojeno z njegovimi togostnimi karakteristikami.

Koncentracije napetosti ob bokih so manjše, kar ima za posledico minimalno širjenje porušeni območij v okolno hribino. Ob tem je preprečen razvoj deformacij, kar izjemno ugodno vpliva na pogoje odkopavanja. Zadostni varnostni količniki računsko ugotovljeni glede na možne porušitve kažejo, da je uporabljeni utrjen zasip dovolj kvaliteten.

**Tabela 2.** Odkopni in etažni učinki.  
**Table 2.** Stope and level efficiency.

Zaporedna številka <i>Running number</i>		Doseženi odkopni in etažni učinek <i>Outputs achieved in mining</i>	
		Odkopni učinek t/dnino <i>Stope t/manshift</i>	Etažni učinek t/dnino <i>Level output t/manshift</i>
1	Prečna odkopna metoda <i>Acient stoping method</i>		
	- povprečje <i>- mean output</i>	11	9,25
	- maximum <i>- max. output</i>	14,95	11,9
2	Podetažna odkopna metoda <i>test of the new stoping method</i>		
	- povprečje <i>- average</i>	21,23	13,11

V vsak posamezen odkop (širine 3 m do 5 m in višine 3 m) se pred zasipavanjem vgradi v tla odkopa PVC folija s katero se prepreči vezava betona z ostanki zdrobljene rude v tleh odkopa. Nato se položijo na razdalji 1,5 m leseni pragovi višine 5 cm, ki zagotavljajo pravilno lego armature (slika 3). Jeklena armatura je dimenzionirana na težo

utrjenega zasipa v višini etaže. Položi se v vzdolžni in prečni smeri odkopa. Ko je položena armatura se zasuje celotni odkop z utrjenim zasipom. Količina dodanega veziva - cementa znaša od 5 - 10 do največ 15 % na težo zasipnega materiala, glede na kvaliteto zasipnega materiala in količino položene armature.

**Tabela 3.** Učinki na zasipu.**Table 3.** Efficiencies on the backfill.

Zaporedna številka		Doseženi odkopni in etažni učinek	
		<i>Outputs achieved in stowing</i>	
<i>Running number</i>		Ročni zasip m <sup>3</sup> /dnino	Pnevmatski zasip m <sup>3</sup> /dnino
		<i>Placing the backfill m<sup>3</sup>/manshift</i>	<i>Reinforcing the backfill m<sup>3</sup>/manshift</i>
1	Prečna odkopna metoda		
	<i>Acient stoping method</i>		
	- povprečje	5,01	11,97
	- <i>mean output</i>		
	- maximum	-	22,5
	- <i>max. output</i>		
2	Podetažna odkopna metoda		
	<i>test of the new stoping method</i>		
	- povprečje	-	24,88
	- <i>average</i>		

**Slika 4a.** Poizkusni odkop v Rudniku Idrija.**Figure 4a.** Experimental stope in the Idrija mine.

Tako se izdelava z vsakim odkopom pas utrjenega zasipa z armaturo v tleh etaže. S povezavo armature med posameznimi odkopi, ki so zasuti z utrjenim zasipom, postopoma nastane na nivoju odkopne etaže debela plošča iz utrjenega zasipa, ki predstavlja na naslednji spodnji etaži strop odkopa. Z odkopavanjem večjega števila etaž ene izpod druge nastane večjo število debelih plošč iz armiranega utrjenega zasipa, ki zapolnjujejo celotni odkopani prostor in zagotavljajo stabilnost okolne hribine in preprečijo večje deformacije hribine iznad odkopov (slika 4). Teža utrjenega zasipa večjega števila etaž nad odkopno etažo se ne prenaša direktno na strop odkopa, temveč se porazdeli po celi površini utrjenega zasipa na odkopni etaži. Zato pri odkopavanju pod armirano betonsko ploščo ni pritiska, ki bi ga povzročila teža zasipa. Tekom odkopavanja posameznega odkopa na spodnji etaži se takoj po napredovanju odkopa, plošča utrjenega zasipa malenkostno povesi. Tako je plošča utrjenega zasipa neposredno nad odkopom obremenjena s težo ene plošče utrjenega zasipa, ki jo prevzame v utrjeni zasip vgrajena armatura. Teža ostalih višje ležečih plošč utrjenega zasipa se ne prenaša direktno na odkop, ki je v izdelavi, temveč se porazdeli na površino celotne odkopne etaže. Zato število odkopnih etaž ene izpod druge ni omejeno. Podgrajevanje odkopov ni potrebno.

Opisana odkopna metoda je primerna za odkopavanje sub vertikalnih rudnih teles s sorazmerno veliko tlorisno površino, v hribini z izredno slabimi geološkimi, rudarskimi in mehanskimi lastnostmi.

### **Odkopna metoda z zasipom uporabljena v Rudniku urana Žirovski vrh**

Pri izbiri odkopne metode za odkopavanje uranove rude v Rudniku urana Žirovski vrh je bilo upoštevanih večje število vplivnih faktorjev, dva pa sta najpomembnejša in sicer:

- pogoji delovnega okolja ( oblika in velikost rudnih teles, geološka struktura hribine, tektonika in varnost )
- zahteve po selektivnem pridobivanju s ciljem čimanjše osiromašitve rude pri odkopavanju in uporaba jamske jalovine v rudniku

Na območju rudišča Žirovski vrh se pojavlja orudjenje v rudnem pasu znotraj katerega so rudna telesa majhnih dimenzij, povsem neenakomernih oblik in nepravilno razporejena. Hribina v rudnem pasu je poškodovana zaradi delovanja tektonike. V rudnem pasu nastopajo različne diskontinuitete (slika 10). Hribina ima anizotropične karakteristike. Zaradi nadaljnega postopka pridobivanja urana iz uranove rude, je izredno pomembno, da je kvaliteta t.j. vsebina urana v pridobljeni rudi v okviru določene vrednosti brez večjih in nepričakovanih nihanj. To je možno zagotoviti s selektivnim pridobivanjem rude.

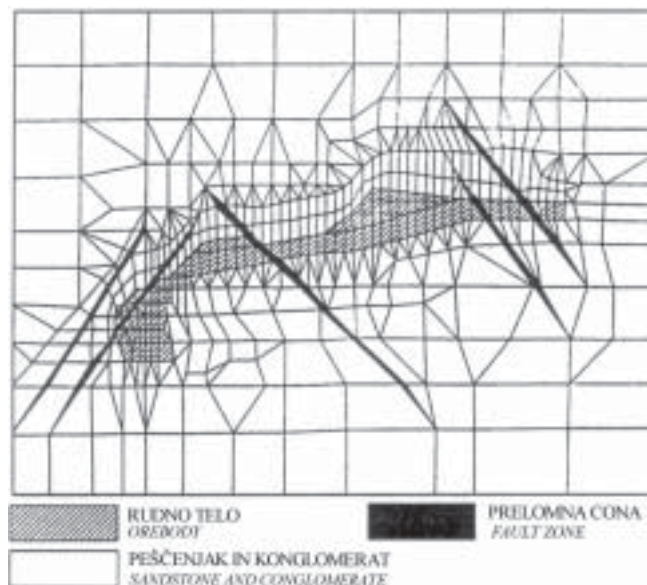
### ***Geotehnične preiskave***

Z metodo obvrtaanja (over coring) je bila določena smer in magnituda primarne napetosti v hribini, v neposredni okolici bodočih odkopov.

Na podlagi zbranih vhodnih podatkov primarnega napetostnega stanja, mehanskih lastnosti hribin z upoštevanjem anizo-

tropičnosti in pomembnejših prelomov je bilo z uporabo računalniških programov, na osnovi končnih elementov in s simulacijo

posameznih faz napredovanja odkopov s programom Utah 2, računsko ugotovljena stabilnost odkopov (Slika 10 in Tabela 4).



**Slika 10.** Tipičen geološki presek skozi orudeni del rudišča z mrežo končnih elementov.

**Figure 10.** Typically geological section of uranium deposit Zirovski vrh with the finite elements mesh.

**Tabela 4.** Mehansko – fizikalne lastnosti hribinskih materialov in zasipa .

**Table 4** Geotechnical properties of rock materials and of backfill.

Vrsta - hribine, zasipa	Prostorninska teža $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Elastični moduli $E_i$ (Mpa)	Poissonov količnik $\nu_i$	Enoosna tlačna trdnost $C_i$ (kPa)	Natezna trdnost $T_i$ (kPa)	Strižna trdnost $R_i$ (kPa)	Kot anizotropnosti $\alpha$ (°)
<i>Typ of material</i>	<i>Unit weight</i>	<i>Elastic moduls</i>	<i>Poisson's ratio</i>	<i>Unconfined compressive strenght</i>	<i>Tensile strenght</i>	<i>Shear strenght</i>	<i>Angle of anisotropy</i>
Peščenjak <i>Sandstone</i>	26	$E_1 = 3080$ $E_2 = 4620$ $E_3 = 3080$	$\nu_1 = 0,20$ $\nu_2 = 0,22$ $\nu_3 = 0,21$	$C_1 = 618$ $C_2 = 5162$ $C_3 = 7700$	$T_1 = 618$ $T_2 = 927$ $T_3 = 618$	1265	40
Diskontinuiteta <i>Fault zone</i>	25	1500	0,27	1280	50	146	0
"Stari" zasip <i>Old backfill</i>	23	2000	0,25	7000	700	1278	0
"Nov" zasip <i>New backfill</i>	23	1500	0,25	4000	400	730	0

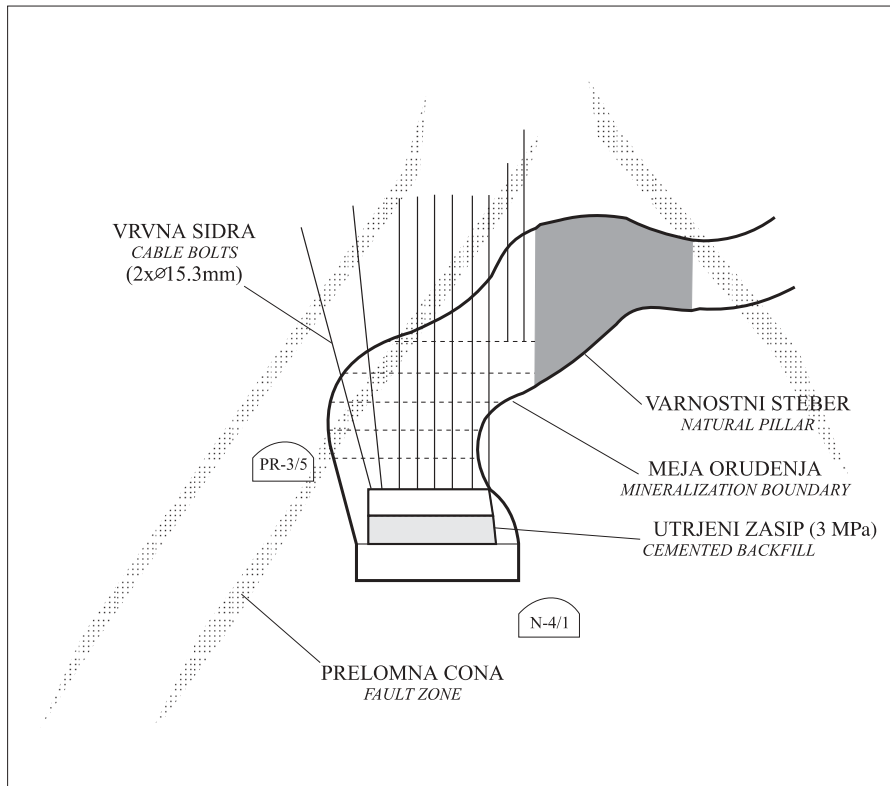
### Odkopne metode

Predlagane so bile različne nove variante odkopnih metod z uporabo utrjenega zasipa in vrvnih sider. Pri tem se je povežalo raziskovalna, odpiralna in pripravljalna dela z odkopno metodo in uvedlo sistematično odkopavanje s poudarkom na selektivnem pridobivanju, ob istočasnem zmanjšanju odkopnih izgub in uvedbi načrtnega podgrajevanja, s katerim se je zagotovila varnost rudarjev tudi v primeru hitrega in nepričakovanega menjavanja inženirsko – geoloških pogojev in mehanskih lastnosti hribine.

Pridobivanje uranove rude je povežano z izhajanjem plina radona, ki je stalno prisoten v jamskem zraku vsakega rudnika urana.

Zato je potrebno v rudnikih urana izvajati posebne varnostne ukrepe s katerimi se prepreči, da bi rudarji dosegli mejo ekspozicijske absorbirane doze. Pomembno je, da so ti ukrepi integrirani v vse faze tehnologije pridobivanja uranove rude z upoštevanjem načel radiološke zaščite in prezračevanja v uranskih rudnikih.

Ob upoštevanju osnovnih principov za zmanjšanje izpostavljenosti rudarjev radioaktivnemu sevanju in ob upoštevanju montan-geoloških pogojev, višine odkopnih izgub ter možnosti selektivnega odkopavanja je bil podan predlog za odkopavanje uranove rude s komorno-steberno metodo od spodaj – navzgor z uporabo utrjenega zasipa, z izdelavo



Slika 11. Shematski prikaz odkopne metode za subvertikalni del rudnega telesa.

Figure 11. Principle of mining in the sub-vertical section of the ore block.

umetnih stebrov iz utrjenega zasipa in podgrajevanje z vrtnimi sidri. (Slika 11 in 12).

Predlagani sta bili dve različici odkopnih metod in sicer za sub-vertikalne dele rudnih teles (slika 11) in horizontalne dele rudnih teles (slika 12)

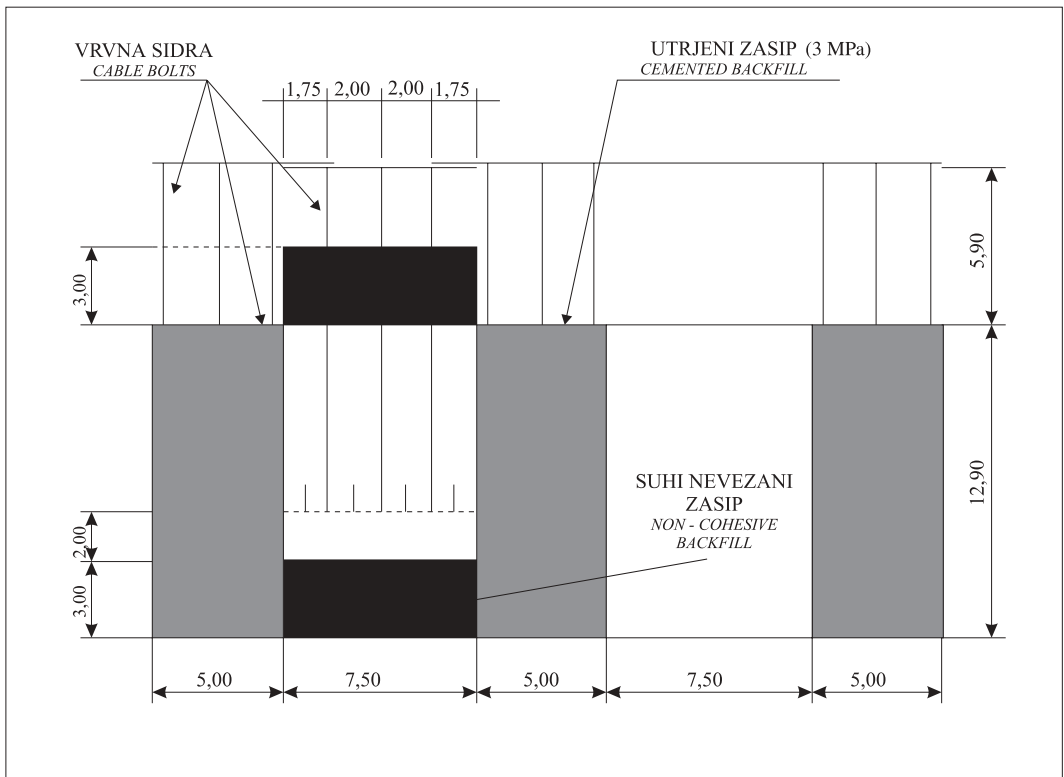
### **Princip odkopne metode za sub-vertikalni del rudnega telesa**

Sub – vertikalni del rudnega telesa se odkopava tako, da se najprej izdela prva etaža višine 2,5 m s separatnim prezračevanjem odkopa. Vzporedno z napredovanjem odkopa se vgrajuje v strop dolga vrtna sidra. Odkopani prostor se zapolni z utrjenim

zasipom, trdnosti 3 Mpa. Utrjeni zasip predstavlja tla naslednje višje etaže. Dosežena trdnost zasipa omogoča nemoteno gibanje samohodne mehanizacije. Z dvigovanjem etaž se odkoplje celoten sub-vertikalni del rudnega telesa od spodaj – navzgor selektivno, s predhodno zavarovanim stropom in pretočnim zračenjem.

### **Princip odkopne metode za horizontalni del rudnega telesa**

Horizontalni del rudnega telesa se odkopava v vertikalnih stebrih tudi od spodaj - navzgor. Najprej se odkopava steber širine 5 m v horizontalnih etažah po celi dolžini rudnega telesa s sprotnim vgrajevanjem kratkih sider



**Slika 12.** Shematski prikaz odkopne metode za horizontalni del rudnega telesa (v metrih).

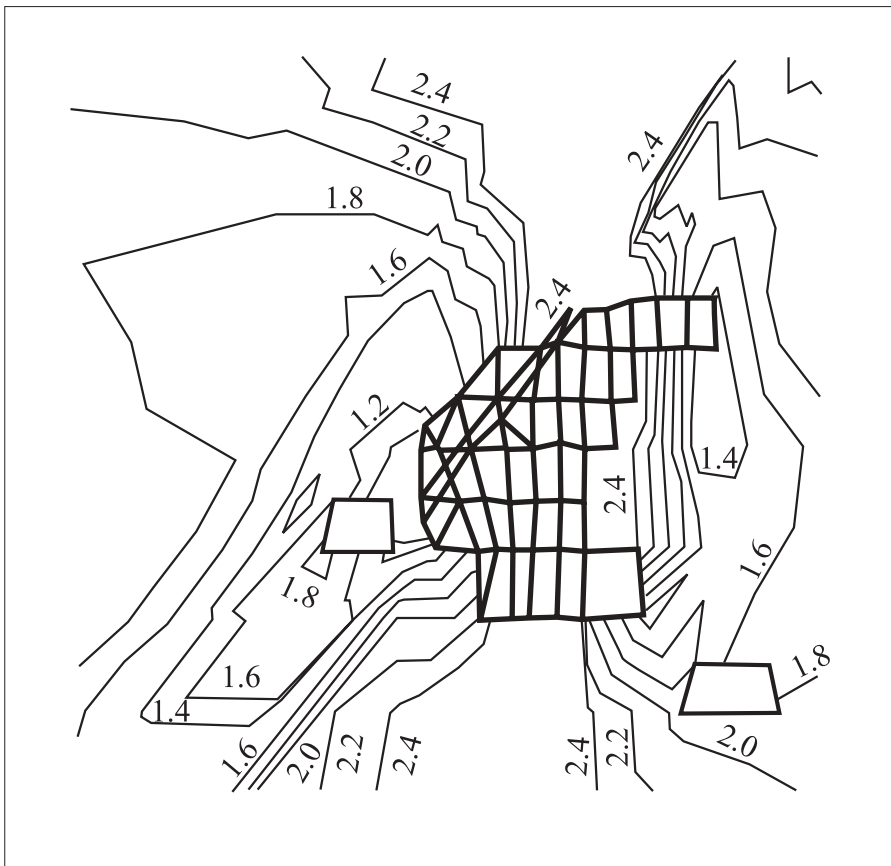
**Figure 12.** Schematic illustration of mining in the horizontal section of the ore block (dimensions in metres).

za varovanje stropa.. Pred napredovanjem v višjo etažo se odkopani prostor zapolni z utrjenim zasipom, trdnosti 7 Mpa. Napredovanje odkopnih etaž v višino se nadaljuje do meje orudenja. V zadnji najvišji etaži se vgradi za zavarovanje stropa in zagotavljanje stabilnosti rudnega bloka vrвна sidra dolžine 5 m. Med stebri širine 5 m, ki se odkopljejo najprej in zapolnijo s utrjenim zasipom se izdelajo odkopi širine 7,5 m. Odkopne etaže napredujejo od spodaj navzgor s tem, da se odkopani prostor zapolni z nevezanim suhim zasipom. V prvi etaži se vgradijo vzporedno z napredovanjem odkopa dolga vrвна sidra s katerimi se zagotavlja

stabilnost stropa v etažah med umetnimi stebri iz utrjenega zasipa. Zavarovanje stropa pa se izvede s kratkimi sidri. Kritična faza odkopavanja nastopi tik predno prevzamejo umetno izdelani stebri vlogo nosilnih stebrov.

### *Izračun napetostno – deformacijskih stanj med odkopavanjem*

Orientacijsko dolžino in nosilnost vrvnih sider se je določilo na podlagi načrtovanih osnov odkopne metode. Na podlagi laboratorijskih preiskav so bili pridobljeni vhodni podatki za matematično modeliranje z metodo končnih elementov.



**Slika 13.** Izolinije varnostnih količnikov brez upoštevanja vrvnih sider.

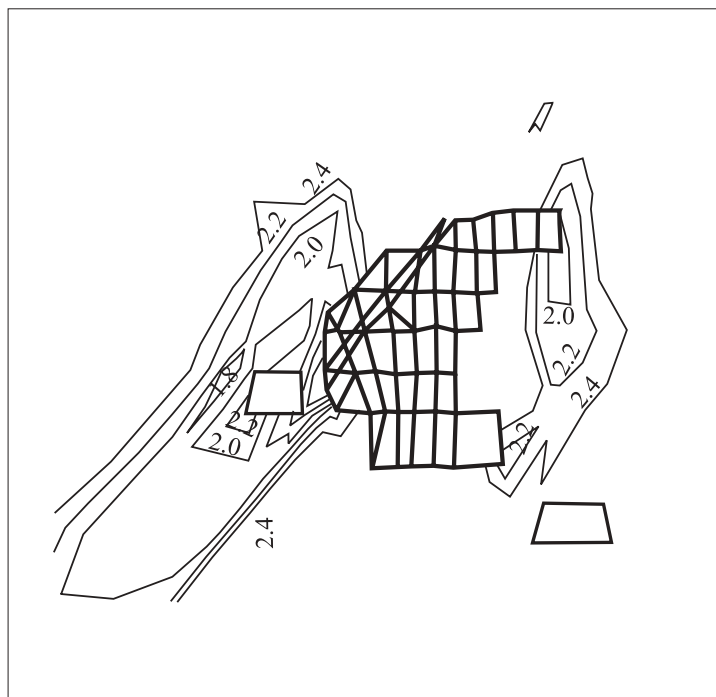
**Figure 13.** Safety factors calculated without cable bolts.



Matematični model Utah 2 omogoča simulacijo posameznih delovnih operacij odkopavanja v zaporednem vrstnem redu kot se izvajajo na odkopu. Mreža končnih elementov na tipičnem prognostičnem geološkem profilu je razvidna na sliki 10. Posebej so bile upoštevane diskontinuitete, komprimirane v anizotropičnem modelu. Parametre anizotropnosti se je upoštevalo z različnimi vrednostmi materialnih karakteristik v smeri in pravokotno na smer diskontinuitet. Diskontinuitete širine 1 m so se upoštevale kot hribina z minimalno natezno trdnostjo. Karakteristike za zasip so se upoštevale različno glede na čas vgradnje zasipa. Za nekonsolidiran zasip so bile vzete vrednosti za “novi” zasip in za konsolidirani zasip po 28 dneh od vgradnje, vrednosti za “stari” zasip.

Z matematičnim modelom s katerim so se upoštevale tektonske značilnosti in dejansko zaporedje delovnih faz na odkopu se je izračunalo primarno napetostno deformacijsko stanje. V prvi fazi odkopavanja prve etaže so bili izračuni izvedeni brez vrwnih sider. Sekundarno napetostno deformacijsko stanje je pokazalo nizke varnostne faktorje (slika 13), ki so posledica elastoplastičnih lastnosti hribine in tektonsko porušenih zon.

V nadaljnih izračunih je bila upoštevana vgradnja in obremenitev vrwnih sider. Z vgradnjo vrwnih sider v prvi etaži se izboljša karakteristike hribine. Zato so se pri nadaljnih izračunih upoštevale izboljšanim karakteristikam primerne vrednosti.



**Slika 14.** Izolinije varnostnih faktorjev z upoštevanjem vrwnih sider.  
**Figure 14.** Safety factors calculated with using cable bolts.

Sekundarno napetostno stanje izračunano za faze dela po vgradnji vravnih sider, pokaže višje varnostne količnike (slika 14).

### ***Vgradnja vravnih sider***

Vrvna sidra uporabljena v Rudniku urana Žirovski vrh so utrjena s cementno malto po celi dolžini. Vgrajena so vrvna sidra dolžine do 25 m.

Uporabljena je posebna jeklena vrv premera 16 mm, ki je ovita s 7 jeklenimi žicami premera 15,3 mm. Tako konstruirana vrv je bila dovolj toga za vgradnjo navzgor v vertikalno vrtino. Prednapenjanje vrvi ni bilo potrebno ker se je sidro aktiviralo zaradi deformacij nastalih s sproščanjem hribinske napetosti. Vrtine za vgradnjo vravnih sider imajo premer 51 mm ali 64 mm, glede na to ali je vgrajeno v vrtino eno ali dva vrvna sidra, odvisno od zahtevane nosilnosti.

Kvalitetno vgrajevanje cementne malte je zelo pomembno, za zanesljivo nosilnost vravnega sidra. Zato se je vrtanju vrtine in pripravi cementne malte posvečala posebna pozornost. Pred polnitvijo vrtine s cementno malto se je vrtina očistila. Cementna malta se je vgradila v vrtino s pomočjo dolge pregibne cevi od dna do ustja vrtine. Potrebno je bilo zagotoviti povsem zapolnjeno vrtino s cementno malto. Cementna malta je bila posebej pripravljena v razmerju voda – cement 1:3. Vrvno sidro se je potisnilo v vrtino ko je bila le-ta popolnoma zapolnjena s cementno malto.

Za potrebe vgrajevanja vravnih sider je bil razvit poseben stroj poimenovan "Beril", skonstruiran v Rudarskem inštitutu Ljubljana – RIL in izdelan v tovarni Belt – Črnomelj. Stroj je bil prirejen za pripravo in vgradnjo

cementne malte ter potiskanje vravnega sidra v vrtino.

### ***Tehnologija zasipavanja***

Za odkopavanje uranove rude z opisano odkopno metodo so bili uporabljeni trije različni tipi zasipa in sicer:

1. nevezani suhi zasip
2. utrjeni zasip s trdnostjo 3 MPa (MB3)
3. utrjeni zasip s trdnostjo 7 MPa (MB7)

Nevezani suhi zasip in utrjeni zasip MB3 se je vgrajevalo direktno z iztresanjem zasipnega materiala iz jamskih kamionov pri zadostni višini odkopa. Vgrajevanje teh dveh tipov zasipa ni povzročalo težav. Razlika med vgrajevanjem nevezanega suhega zasipa in utrjenega zasipa MB3 je v tem, da se je utrjeni zasip vgrajeval v tanjših plasteh, medtem ko se je nevezani suhi zasip vgrajeval v eni plasti poljubne višine. Za doseganje zahtevane trdnosti in gostote je bilo potrebno utrjeni zasip MB3 vgraditi preden se je pričel proces vezanja, sicer je bilo nemogoče dosegati zahtevano trdnost utrjenega zasipa. Vgradnja zasipa je, zaradi relativno velike oddaljenosti betonarne, ki je bila na površini, do odkopa v jami, zahtevala dobro organizacijo brez zastojev.

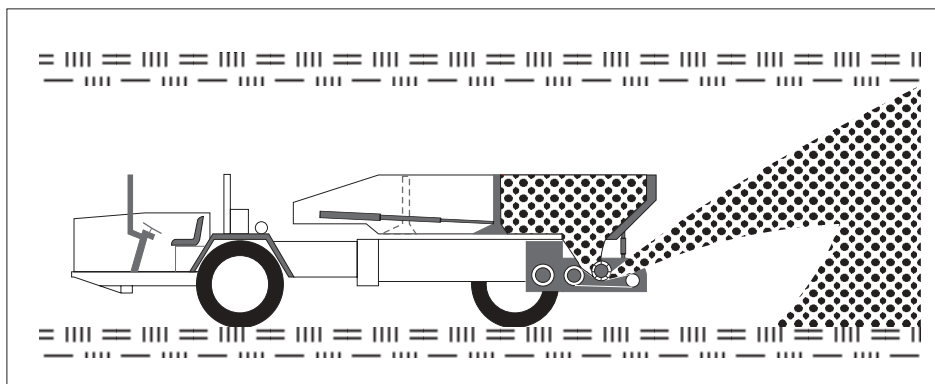
Vgrajevanje utrjenega zasipa MB7 pa je zahtevalo posebno tehnologijo. Ta tip zasipa se je vgrajeval z lučalcem (slika 15), montiranim na posebej za ta namen prirejeni jamski kamion.

Za pripravo utrjenega zasipa MB3 se je uporabila jamska jalovina brez predhodne obdelave, medtem ko se je za pripravo utrjenega zasipa MB7 uporabil gramoz z zrnatostjo do največ 34 mm.

Osnovni princip delovanja lučalca je v hitrem prehodu kinetične energije hitrotekočega traku na zrna zasipnega materiala. Hitrotekoči kratki gumijasti transportni trak je montiran na zadnjem delu jamskega kamiona pod zabojnikom (slika 16). Z

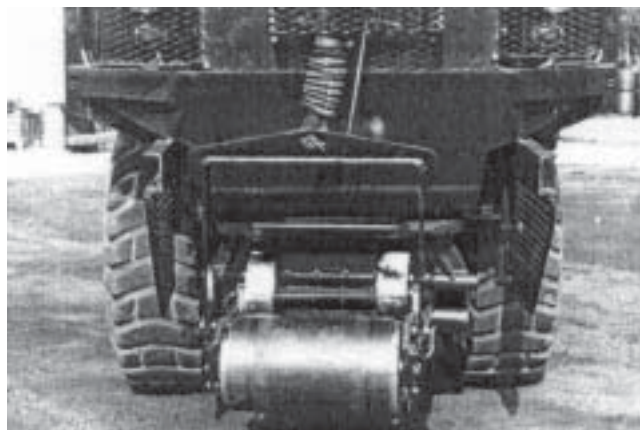
regulacijo hitrosti in naklona traku se je regulirala višina in gostota vgrajenega zasipa.

Pri zasipavanju z lučalcem se je dosegalo povprečne učinke 90 do 100 m<sup>3</sup>/izmeno pri oddaljenosti betonarne 2 do 4 km.



**Slika 15.** Shematski prikaz delovanja lučalca za vgrajevanje utrjenega zasipa.

**Figure 15.** Schematic view of the belt thrower used for the placement of cemented backfill.



**Slika 16.** Lučalec montiran na zadnjem delu jamskega kamiona.

**Figure 16.** A view of the throwing device on the belt thrower.

### ***Povzetek odkopnih metod v Rudniku urana Žirovski vrh***

Steberno – komorna odkopna metoda z uporabo kratkih sider se ni uveljavila, zaradi večjih porušitev stropa, ki so ogražala varnost rudarjev. Odkopna metoda z uporabo utrjenega zasipa in vgradnjo vrvnih sider kot glavni podporni ukrep je omogočala odkopavanje uranove rude z manjšo osiromašitvijo, omogočala uporabo odpadne jalovine v jami ter istočasno zagotavljala večjo varnost rudarjem na odkopih in stabilnost jamskih prostorov.

Uspešna vpeljava odkopne metode z uporabo utrjenega zasipa in vgradnjo vrvnih sider je zahtevala obsežne predhodne analize različnih parametrov, ki vplivajo na pridobivanje uranove rude. Izvedene so bile tako laboratorijske kot "in situ" preiskave in meritve ter obširni numerični izračuni posameznih parametrov odkopne metode. Na tej osnovi se je načrtovalo posamezne faze odkopne metode, konstruiral lučalec in stroj za vgradnjo sider. Izdelan je bil predlog za odkopno metodo, ki je v vseh pogledih odgovarjala pogojem pridobivanja uranove rude v Rudniku urana Žirovski vrh.

### **Odkopna metoda z delnim zasipavanjem v Premogovniku Velenje**

#### ***Splošno***

V Premogovniku Velenje se je tehnologija odkopavanja razvijala preko enostavnih odkopnih metod do sedaj uveljavljene visokoproduktivne velenjske odkopne metode s popolnoma mehaniziranim načinom pridobivanja.

Razvoj odkopnih metod na RLV lahko strnemo v:

- steberno odkopno metodo
- komorno odkopno metodo
- metodo dolgih stebrov
- bunkersko odkopno metodo
- velenjsko širokočelno odkopno metodo

Vse navedene metode so metode z rušenjem stropa, brez zasipa.

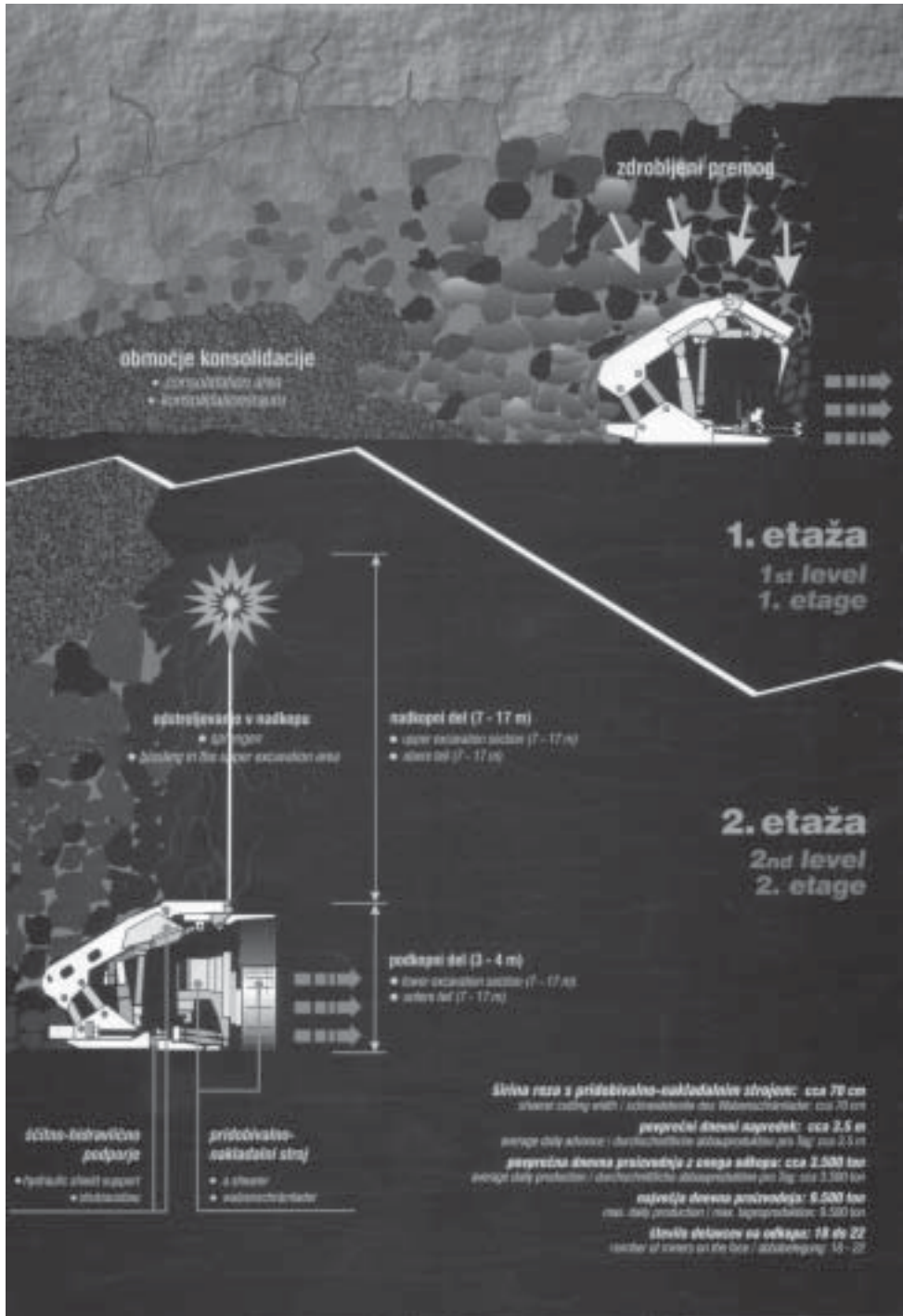
Naveden postopen razvoj odkopnih metod v Premogovniku Velenje je pripeljal do danes uporabljene velenjske visokoproduktivne odkopne metode. Velenjska odkopna metoda spada med najproduktivnejše odkopne metode v svetu, za odkopavanje debelih slojev premoga (slika 17 in 18 – prospekt Premogovnika Velenje). Odkopna plošča je razdeljena na dva dela:

- podkopni del ( 2,5 do 3,2 m )
- nadkopni del (7,5 do 12 m )

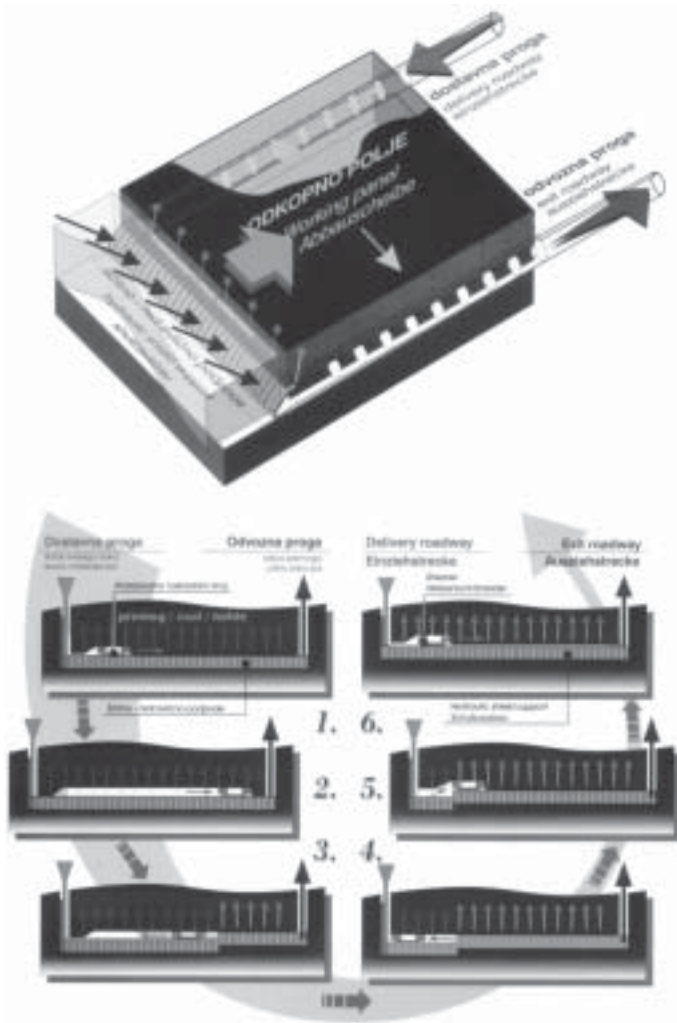
Premog se pridobiva na širokem čelu ločeno iz podkopnega in nadkopnega dela. Najprej se z odkopnim strojem (rezalnim bobnom – kombajnom) pridobi premog v podkopnem delu, nato pa z rušenjem in točenjem še premog iz nadkopnega dela.

Odkopne plošče napredujejejo od zgoraj – navzdol. Strop spodnje odkopne plošče je komprimiran porušeni strop zgornje odkopne plošče.

Predvideno je tudi odkopavanje zahodnega dela premoške kadunje, kjer gradijo krovino poleg tanjših nepropustnih glinastih sedimentov tudi sloji tekočega peska. Sloji tekočega, vodonosnega peska so nevarni za



Slika 17. Velenjska odkopna metoda.  
Figure 17. The Velenje longwall method.



**Slika 18.** Shema napredovanja podporja in pridobivalnega stroja v odkopnem polju (prospekt Velenje).  
**Figure 18.** Coal face plan (prospekt Velenje).

nepričakovane vdore vode in blata, še posebej ker obstoječa tehnologija pridobivanja na visokoproduktivnih širokih čelih temelji na rušenju krovnine v staro delo. Da se zmanjša nevarnost nepričakovanih vdorov vode, se je poleg že uveljavljenih varnostnih ukrepov, pričelo z raziskavami in poiskusnim odkopom za novo podetažno odkopno metodo z delnim zasipavanjem starega dela

tik za odkopom. Delno zasipavanje starega dela je predvideno z vtiskanjem paste pripravljene iz EF pepela in dodatki veziva ter dodatki za stabilnost paste (slika 19). V proučevanju je tudi uporaba "stabilizata" v jami premogovnika Velenje tako za zaplavljanje opuščanih delov jame kot za delni zasip in rudarsko – gradbeni material. »Stabilizat« pripravljajo v TEŠ kot enotni

odpadni material v obliki mešanice sadre in EF pepela.

“Stabilizat” je zmes produktov odžvepljevanja dimnih plinov in EF pepela. V stabilizatu prevladuje sadra ( $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ ), ki v procesu nevtralizacije kristali v obliki uniformnih, slabo graduiranih zrn velikosti melja in peščenega melja.

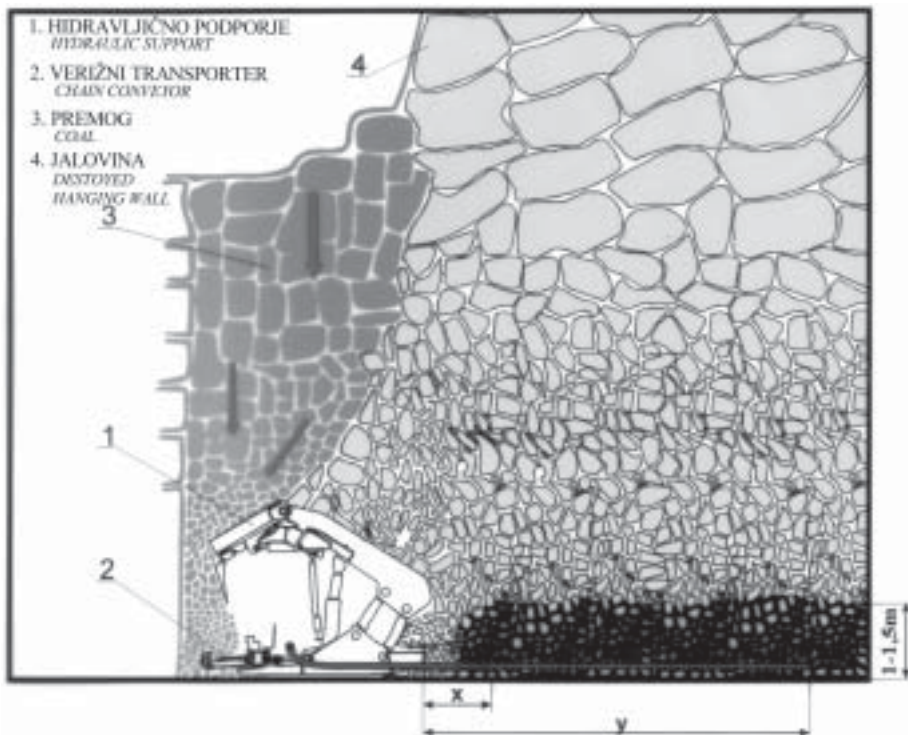
Na ta način se zmanjšajo deformacije v stropu odkopa in s tem posedanje krovinskih plasti s čimer se zmanjša nevarnost nenadnih nepričakovanih vdorov vode in peska. Istočasno se uporabi kot zasipni material EF pepel, in sadra ter s tem zmanjša deponije na površini in izkoristi prednosti odkopavanja z zasipom. Uvede se zaprt ekološko-tehnološki krog.

Tako sta nastali dve možni varianti podetažne odkopne metode z delnim zapolnjevanjem starega dela (slika 19):

- podetažna odkopna metoda brez nadkopnega pridobivanja z delnim zasipavanjem starega dela
- podetažna odkopna metoda z nadkopnim pridobivanjem in delnim zapolnjevanjem starega dela

Zasipavanje oziroma zapolnjevanje starega dela je lahko:

- delno - služi kot indikativni zasip pri nadkopnem pridobivanju premoga
- delno - za povečanje izolacijske plasti, s čimer zmanjšamo nevarnost za vdore vode in blata na odkope



Slika 19. Velenjska odkopna metoda z delnim zasipavanjem starega dela.

Figure 19. The Velenje longwall method with partly backfill of goaf.

V obeh primerih pa zmanjšamo količino deponiranega EF pepela in sadre na površini ter na ta način uvajamo okolju prijazno rudarjenje na podlagi zaprtega ekološko – tehnološkega kroga med termoelektrno in premogovnikom

### ***Raziskave in preiskave posameznih zasipnih materialov in kompozita***

Pridobivanje premoga v Premogovniku Velenje z širokočelno odkopno metodo z rušenjem omogoča masovno odkopavanje premoga s praviloma nižjo stopnjo izkoriščenosti nahajališča in z rušnim procesom v krovlini, ki se v odvisnosti od mehanskih lastnosti hribine, nadaljuje do površine, kjer nastanejo ugreznine.

Uporaba pastoznih zasipnih materialov (pasta iz EF pepela in dodatki, stabilizat) je možna tako na področju delnega zasipavanja odkopov, v rudarsko-gradbeni dejavnosti kakor tudi za intervencijske namene in za zapolnjevanje opuščenih jamskih prostorov ob njihovi likvidaciji. Do sedaj uporabljeni “emulgat” (redka tekoča mešanica EF pepela in vode) se v celoti lahko zamenja s pastoznimi zasipnimi materiali pripravljenimi iz produktov gorenja premoga in čistilnih naprav dimnih plinov.

Na podlagi obširnih predhodnih preiskav, določimo fizikalne in kemične lastnosti vsakega posameznega odpadnega materiala. Glede na zahtevane lastnosti transporta, tehnologije vgradnje zasipa in končnih lastnosti zasipa določimo količinske deleže posameznega odpadnega materiala in dodatke ter na ta način dobimo sestavo kompozita.

Za kompozit izvedemo ustrezne reološke, geotehnične in okoljevarstvene laboratorijske raziskave s katerimi opredelimo ustreznost kompozita za vse spredaj navedene namene.

### ***Transport in vgradnja zasipnega kompozita v obliki paste***

#### *Splošno*

V okviru poskusnega odkopavanja z delnim zapolnjevanjem starega dela pri odkopavanju odkopne plošče B/5b je bila zgrajena posebna avtomatska mešalno črpalna postaja za pripravo zasipnega kompozita v obliki paste. Velike količine zasipnega materiala ni možno transportirati po obstoječih transportnih poteh. Prirava paste v mešalno – črpalni postaji na površini in črpanje paste po ceveh direktno v staro delo je vsekakor optimalna rešitev. Glede na predvideno tehnologijo vtiskanja paste v staro delo je postavljena zahteva po najmanj 4 urni stabilnosti paste v ceveh. Sprotno vtiskanje paste v staro delo ob istočasnem napredovanju širokega čela sestavljajo naslednje tehnološke faze:

- priprava paste,
- transport paste,
- vtiskanje paste v staro delo,
- čiščenje cevovoda in naprav.

Da se zagotovi predviden potek posameznih operacij v vseh tehnoloških fazah je zagotoviti enoten kontrolni sistem. Tehnologija vtiskanja paste v porušeni del starega dela zahteva pripravo paste z znanimi karakteristikami, ki morajo biti določene s predhodnimi laboratorijskimi preiskavami in poskusi. Karakteristike paste v prvi vrsti

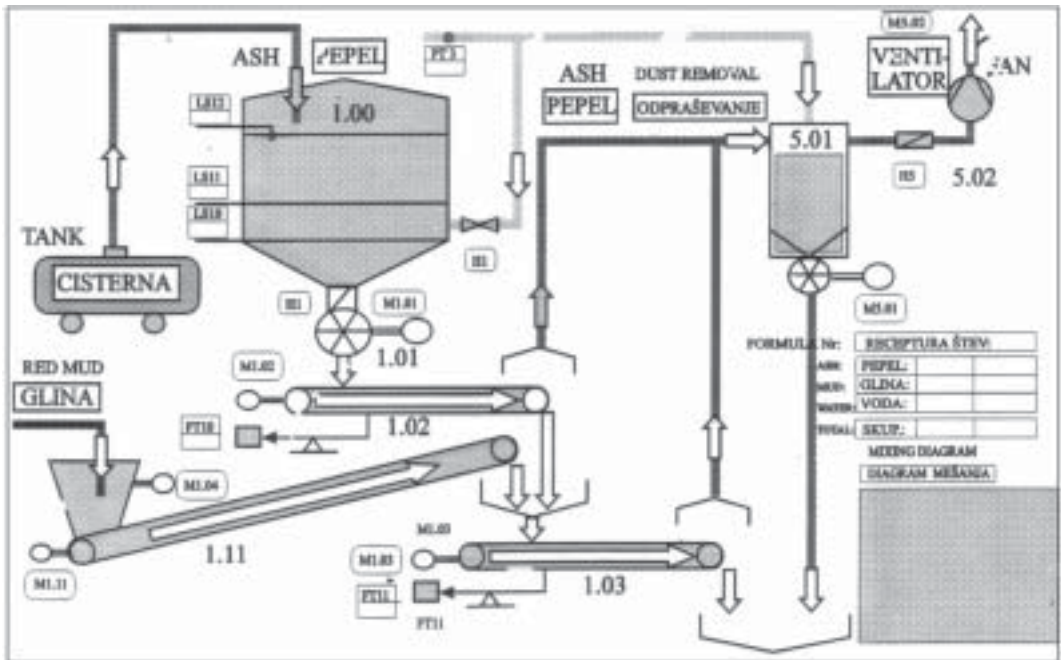


določajo posamezne komponente iz katerih je sestavljen kompozit, predvsem kemične in mineraloške lastnosti, granulacija, temperatura, pH, pucolanske lastnosti itd. Vsi navedeni parametri, nekateri od njih so časovno odvisni, vplivajo na stabilnost, viskoznost in čas utrjevanja ter imajo tudi vpliv na pogoje črpanja, posebej na padec pritiska v cevi na dolžinsko enoto.

### Priprava paste

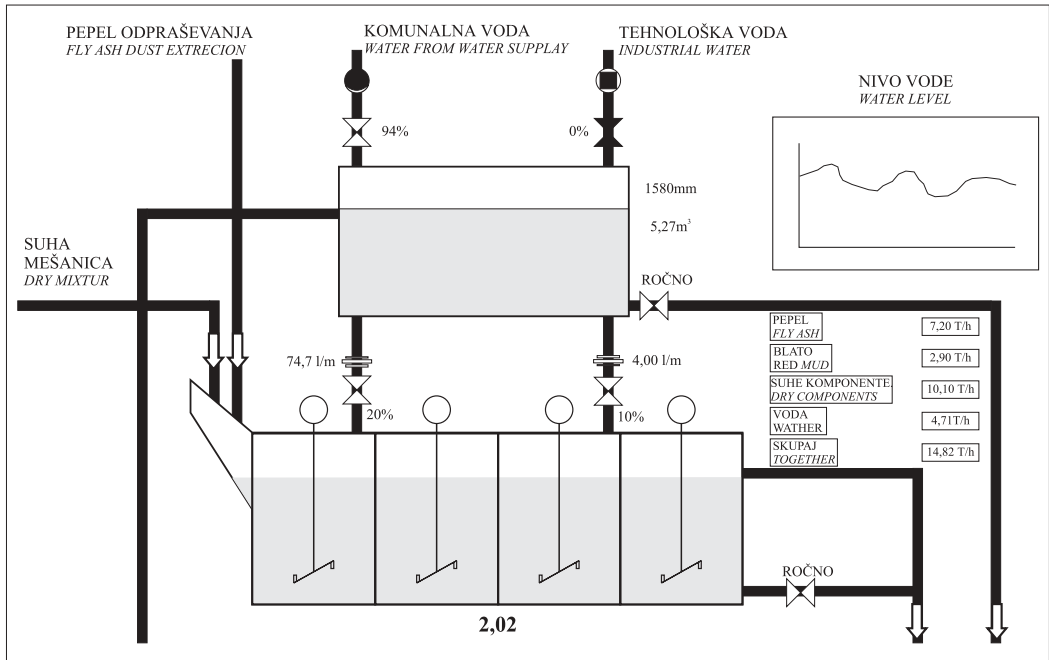
Pripravo paste lahko razdelimo v tri tehnološke faze:

- doziranje v sorazmernih deležih posameznih komponent kompozita (slika 20)
- priprava paste v mešalnici (slika 21)
- stabiliziranje in črpanje ter meritve (slika 22, 23 in 24)



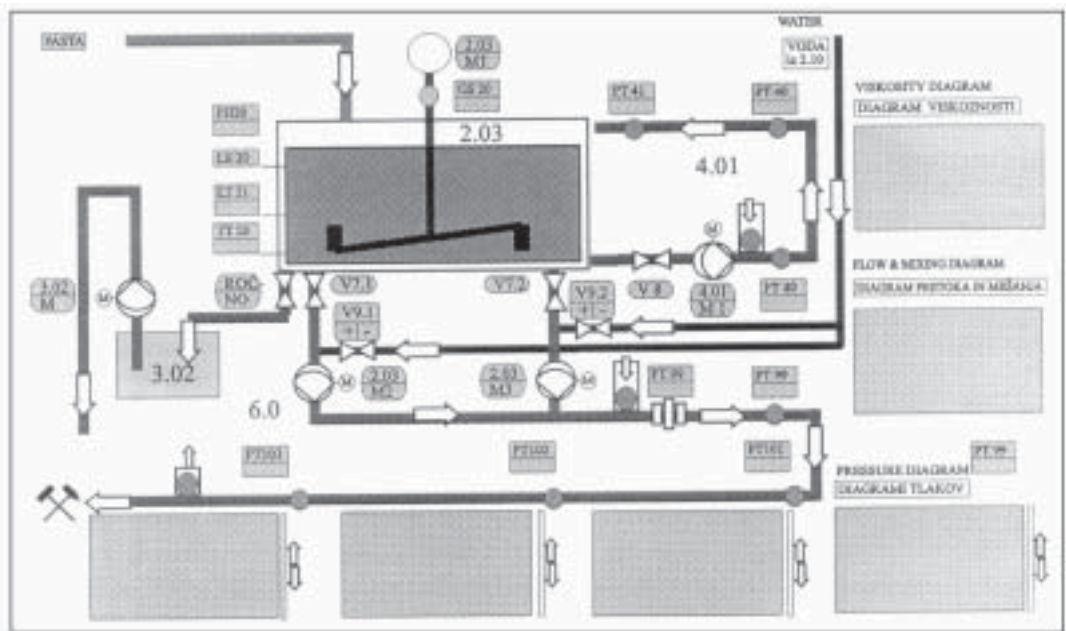
Slika 20. Doziranje suhih komponent kompozita.

Figure 20. Proportioning of dry components.



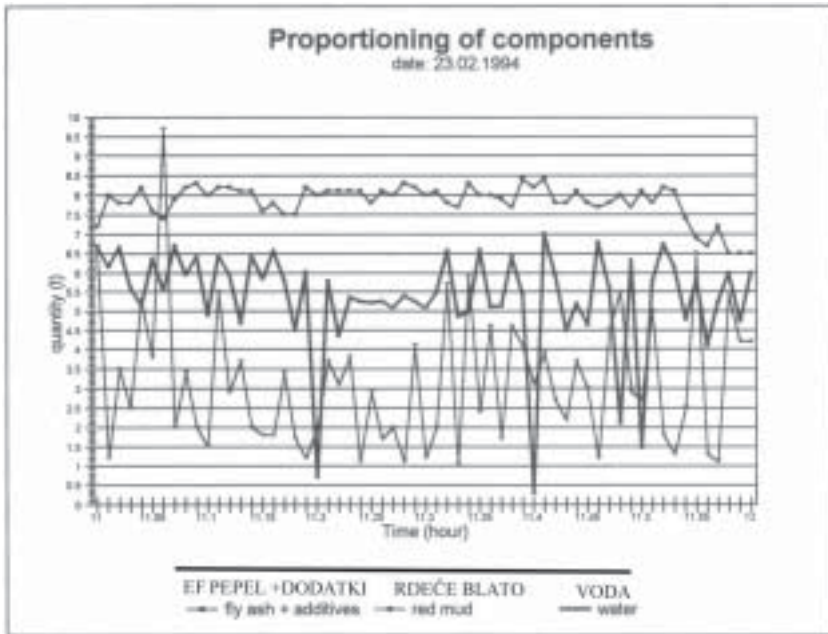
Slika 21. Priprava paste v mešalnici.

Figure 21. Disintegration in the attrition mill.

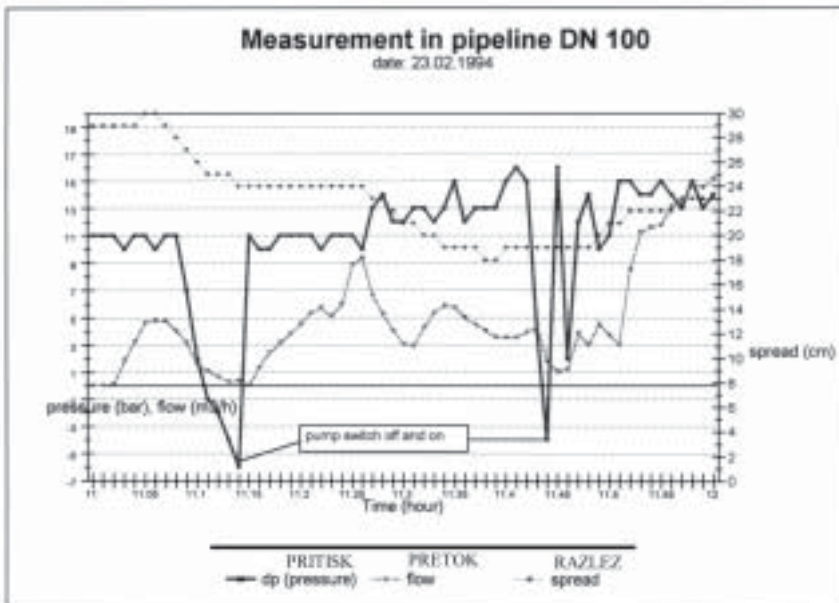


Slika 22. Stabiliziranja in črpanje ter meritve.

Figure 22. Stabilization and pumping.



Slika 23. Meritve količin posameznih suhih komponent kompozita.  
 Figure 23. Proportioning of dry components.

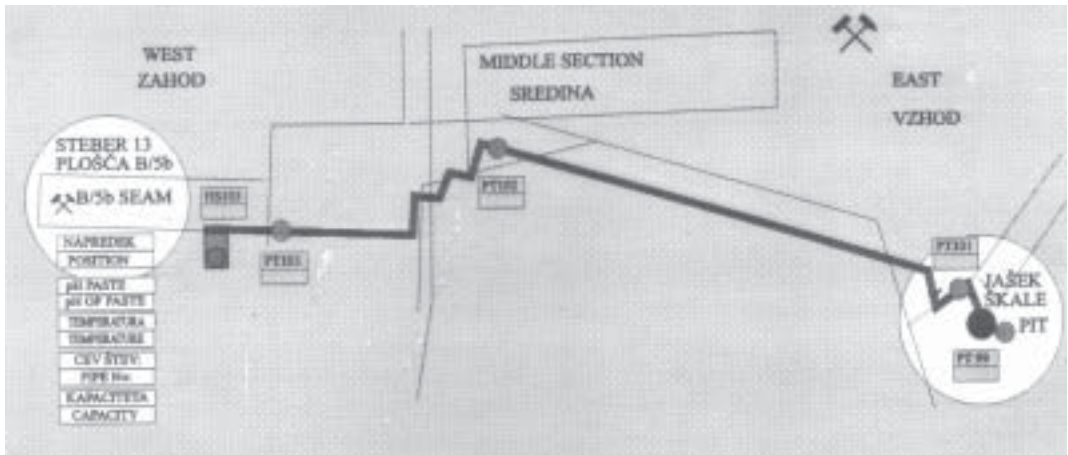


Slika 24. Meritve lastnosti paste v cevi med transportom.  
 Figure 24. Measurements in pipeline.

### Transport paste

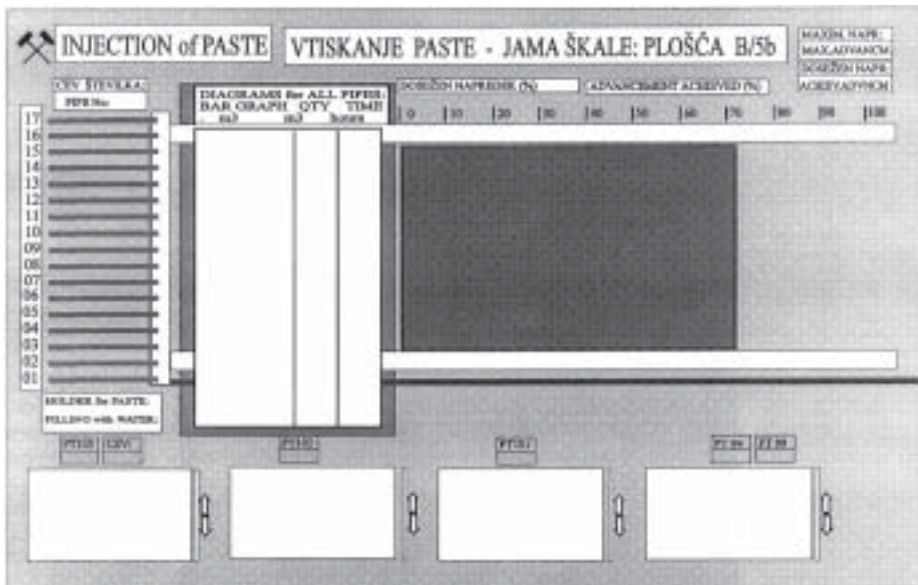
Pasta se črpa s hidravlično črpalko firme SCHWING preko cevododa DN 100, NP 160. Premer cevododa je reduciriran na DN 80 tik pred širokim čelom. Pasta se vtiska v staro delo preko cevi premera DN 64. Cevi

za transport in vtiskanje paste v staro delo se izpere z vodo pred pričetkom črpanja. S tem se izboljšajo transportni pogoji in preverita tesnost cevododa. V cevodod DN 100 so vgrajeni trije merilci pritiska in merilec pretoka in hitrosti paste v cevi. (slika 25)



Slika 25. Shema cevododa, črpanje paste – jama škale.

Figure 25. Pumping of paste.



Slika 26. Injektiranje paste v staro delo.

Figure 26. Injection of paste.

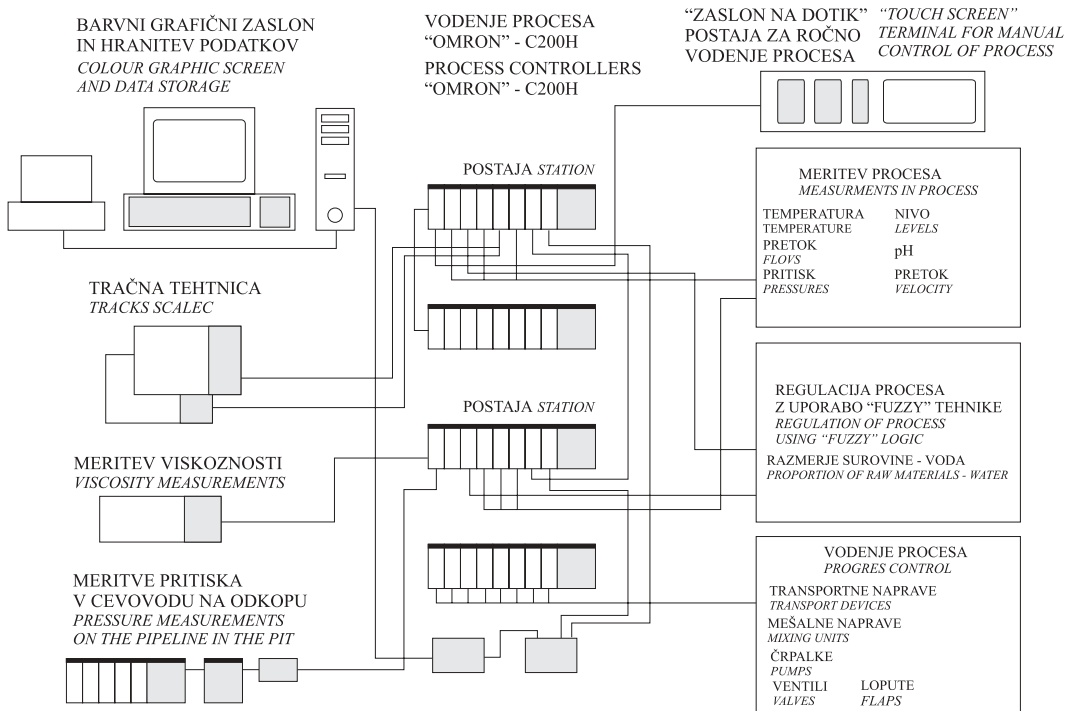
### Vtiskanje paste v staro delo

Vtiskanje paste v staro delo se izvaja preko 17 injekcijskih cevi DN64. (slika 26) Z merilcem pritiska v cevovodu DN 80 se kontrolira injektiranje paste v staro delo. Vtiskanje paste v staro delo se izvaja posamično preko ene injekcijske cevi. Vtiskanje se prekine po 10 minutah ali pri dosežem pritisku vtiskanja 40 barov. Vtiskanje se prekine tudi v slučaju, ko pasta priteka na čelo odkopa. Ko je vtiskanje paste izvedeno preko vseh sedemnajst injekcijskih cevi se celotni postopek vtiskanja ponovi, skladno z napredovanjem širokega čela. V skladu z napredovanjem širokega čela se krajša tudi fleksibilni del cevovoda DN 80.

Sistem meritev celotnega tehnološkega procesa priprave, transporta in vtiskanja paste. Sistem meritev tehnološkega procesa vtiskanja paste v staro delo zajema regulacijo naslednjih parametrov (slika 27):

- doziranje posameznih komponent kompozita,
- regulacija viskoznosti,
- regulacija kapacitete mešalnice.

Sistem meritev in regulacije deluje neprekinjeno, kar zahteva uporabo visokozmogljivih računalnikov in kompleks matematičnih algoritmov. To je rešeno z uporabo FUZZY ali "mehke" logike. Japonska firma OMRON je razvila FUZZY logiko za direktno kontrolo tehnološkega procesa.

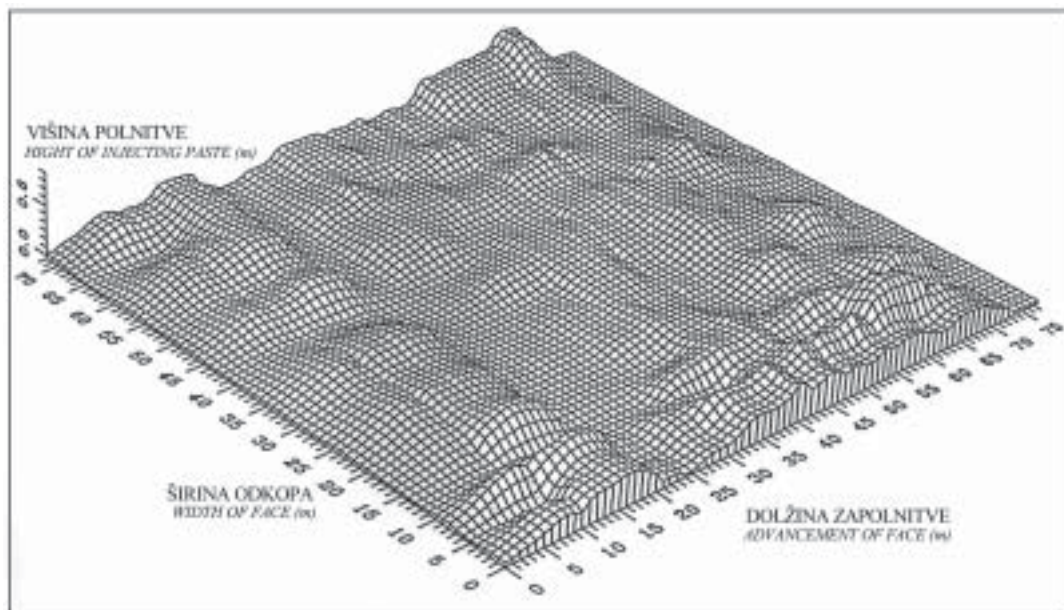


Slika 27. Sistem meritev in kontrole tehnološkega procesa.

Figure 27. Measurement and control system of technological process.

### Rezultat poskusnega odkopavanja z delnim zapolnjevanjem starega dela

Rezultat poskusnega odkopavanja z delnim zapolnjevanjem starega dela s črpanim zasipom je prikazan na sliki 28. V povprečju je bila dosežena višina zapolnjevanja 0,5m.



Slika 28. Delni zasip starega dela poskusnega odkopa plošče B/5b.

Figure 28. Partly backfilling of goaf.

## ZASIPNI SISTEMI IN POSTOPKI

### Splošno

Ne glede na uporabljeno odkopno metodo v posameznem rudniku, lahko uvedemo različne postopke zasipa, ki jih vključimo v sistem okolju prijaznega rudarjenja kot integralni del pridobivanja.

Za uspešno uvedbo zasipavanja z utrjenim zasipom je odločilnega pomena pravilna izbira načina priprave utrjenega zasipa, glede na razpoložljivi zasipni material in pravilna rešitev transporta zasipnega materiala iz površine do odkopa.

Praviloma morata biti priprava utrjenega zasipa in transport avtomatizirana. Pri tem stremimo za enoten sistem transporta iz površine do vgradnje zasipa v staro delo.

Na podlagi načina vgradnje zasipa ločimo različne zasipne postopke (Tabela 5).

V praksi so izvedene različne kombinacije priprave in transporta utrjenega zasipa v okviru navedenih postopkov zasipavanja.

Izbira vrste zasipa je za vsak rudnik povsem specifična in zelo kompleksna. Predvsem je odvisna od naravnih pogojev, ki so značilni za vsak posamezen rudnik. Nadalje od

**Tabela 5.** Zasipni postopek in vrste zasipa.**Table 5.** Backfilling procedure and type of backfill.

<b>ZASIPNI POSTOPEK</b> <i>Backfilling Procedure</i>	<b>VRSTE ZASIPA</b> <i>Type of Backfill</i>	<b>NAČIN VGRADNJE</b> <i>Way of building-in</i>
<i>GRAVITACIJSKI</i> <i>Gravitational</i>	ročni zasip* <i>Manual backfilling</i>	ročno z lopato <i>Manually with spad</i>
	iztresanje* <i>Dumping</i>	prostopadno iztresanje na srtmino ali preko žleba <i>Gravitionally dumping over slope or chute</i>
	tekoči zasip* <i>Flowing backfill</i>	prostopadno po cevi <i>Gravitionally by pipe</i>
<i>HIDRAVLJIČNI</i> <i>Hydraulic</i>	plavljeni zasip <i>Flooded backfill</i>	prostopadno ali s črpalko po cevi z veliko vode <i>Gravitionally or with a pump by pipe with a lot of water</i>
	črpáni zasip* <i>Pumped backfill</i>	s črpalko po cevi z malo vode <i>With a pump by pipe with little water</i>
<i>STROJNI</i> <i>Mechanical</i>	pihani zasip* <i>Blown backfill</i>	s komprimiranim zrakom po cevi <i>With air pressure by pipe</i>
	lučani zasip* <i>Cast backfill</i>	s kratkim transportnim trakom <i>With short transportation belt ( Slinger belt )</i>

\* z dodajanjem veziva (cement, apno, EF pepel) in dodatkov dobimo različne vrste utrjenega zasipa

\* by adding additives for harden ( cement, hydrated lime, fly ash) and other additives we get different type of hardening backfill

fizikalnih, kemičnih, mehanskih in reoloških lastnosti in granulacije razpoložljivega zasipnega materiala. Izbira vrste zasipa je tudi odvisna od načina transporta, ki je vpeljan na rudniku (lokomotivski, kamionski, s trakovi, po cevi, po šahtu, po nadkopu itd.), od načina predelave pridobljene rudnine, mokri ali suhi postopek mehansko procesne tehnike (separiranja in/ali flotiranja), topilniške predelave (žganje, topljenje), pretvorbe kemične v toplotno energijo (gorenje). Na izbiro vrste zasipa vplivajo tudi lokalne energetske razmere in pogoji, način transporta veziva in mesto dodajanja veziva in dodatkov in še cela vrsta specifičnih pogojev, ki jih je potrebno upoštevati. Izbira vrste zasipa in načina transporta utrjenega zasipa je zelo kompleksna in zato tudi zahtevna faza načrtovanja odkopne metode.

## ZASIPNI MATERIALI ZA PRIPRAVO UTRJENEGA ZASIPA

### Splošno

Mešanica za utrjeni zasip je sestavljena iz treh osnovnih komponent in dodatkov in sicer:

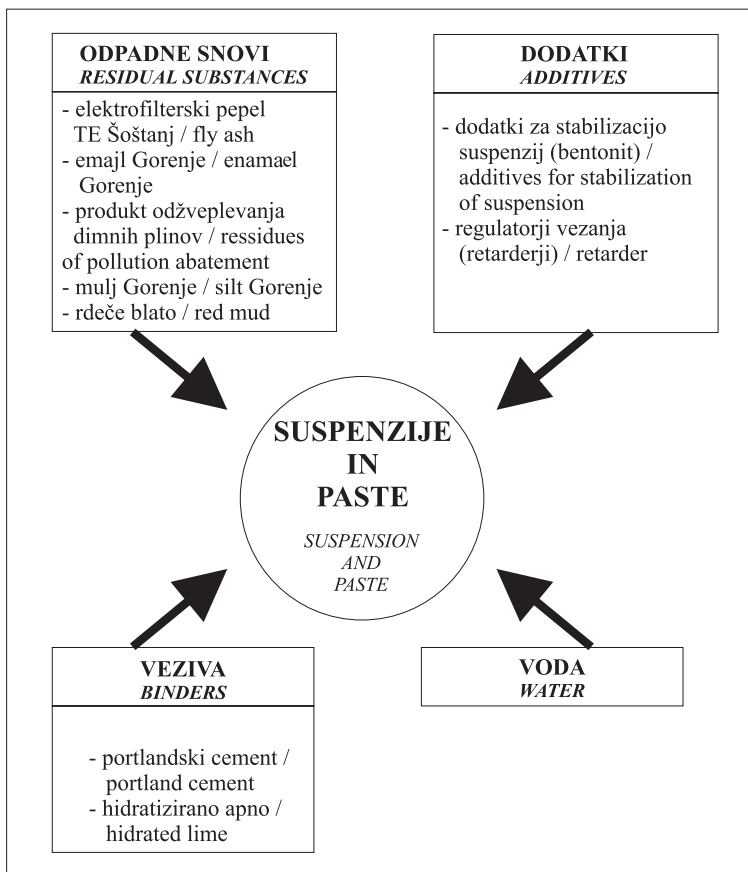
- a g r e g a t a, ki je lahko ustrezno pripravljena jamska jalovina, separacijska jalovina, flotacijska jalovina, žgalniški ostanki, topilniška žlindra, EF pepel, produkti različnih čistilnih naprav, drugi inertni odpadki primerni za zasipni material
- v e z i v a, ki je lahko apno, cement, EF pepel, cementni odpadki, naravni anhidrid, vodno steklo in podobno
- v o d e

- **d o d a t k o v**, s katerimi zagotavljamo zahtevane lastnosti utrjenega zasipa. To so bentonit, razni dispergatorji, zgoščevalci, zakasnilci itd.

Prednost utrjenega zasipa je v tem, da se kot agregat lahko uporabijo materiali, ki so na dotični lokaciji na razpolago. V večini primerov so to odpadni materiali, ki imajo potrebne lastnosti zasipnega materiala in ki jih je potrebno tako ali drugače okolju primerno odložiti.

### Priprava odpadnih materialov za zasip

Priprava odpadnih materialov za zasip v obliki paste je zelo primerna oblika, ki omogoča avtomatiziran direkten transport in enostaven način zasipavanja odkopanih prostorov. Prednost pastoznih zasipnih materialov je tudi v tem, da nimajo odvečne vode, ki bi po vgradnji zasipa odtekala po jamskih progah ali onesneževala tekoče vode na površini.



Slika 29. Sestav suspenzij in past.

Figure 29. Components of suspensions and pastes.



**Tabela 6.** Primer sestave mešanic – receptur in rezultatov preiskav past za utrjeni zasip.**Table 6.** Case of mixture compositions – recipes and analysis results of paste for hardening backfill.

	<b>Receptura 116 <i>Recipe 116</i></b>	<b>Receptura 133 <i>Recipe 133</i></b>	<b>Receptura 130 <i>Recipe 130</i></b>	<b>Receptura 141 <i>Recipe 141</i></b>
<b>Razmerje tekoče : trdno (%)</b> <i>Proportion liquid:solid</i>	<b>45 : 55</b>	<b>45 : 55</b>	<b>46 : 54</b>	<b>46 : 54</b>
<b>Razlez (cm)</b> <i>Spread</i>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
<b>Sestav suhe mešanice (ut.%) / Composition of dray mixture</b> <b>Odpadne snovi / Waste materials</b>				
- EF pepel TE Šoštanj <i>Fly ash</i>	82%	82%	70%	77%
- galvanski mulj - Gorenje <i>Galvanic silt</i>	-	3%	4%	-
- odpadni emajl - Gorenje <i>Waste enamel</i>	5%	-	3%	-
- rdeče blato - Talum <i>Red mud</i>	-	3%	6%	-
- produkt odžveplevanja dimnih plinov TE Šoptanj <i>Residues of air pollution abatement equipment</i>	-	-	5%	10%
<b>Dodatki za utrjevanje / Additives for harden</b>				
- cement Anhovo PC30dz45s <i>Cement</i>	10%	10%	-	10%
- hidratizirano apno <i>Hydrated lime</i>	-	-	10%	-
<b>Drugi dodatki / Other additives</b>				
- bentonit IBECO S-80 <i>Bentonite</i>	3%	2%	2%	3%
- retarder C <i>Retarder</i>	1‰	-	1‰	1‰
<b>Enoosna tlačna trdnost / Unconfined compressive strength</b>				
<b>- čas staranja / Time aging</b>				
3 dni /days	-	< 0,3 Mpa	-	-
7 dni / days	<0,8Mpa	0,8 - 2,0 Mpa	-	< 0,7 Mpa
28 dni / days	3,5 - 5,0 Mpa	2,0 - 3,5 Mpa	3,0 - 5,0 Mpa	3,5 - 5,5 Mpa
60 dni / days	5,0 - 6,5 Mpa	3,5 - 5,0 Mpa	4,5 - 6,5 Mpa	5,5 - 7,0 Mpa
<b>Stabilnost in dinamična viskoznost / Stability and dinamic viscosity</b>				
- stabilna do 4 ure po pripravi <i>Stable 4 hours after prepering</i>	da /yes	da / yes	da / yes	da / yes
<b>Črpalni preiskus / Pumping test</b>				
- temperatura	24,6°C	22,4°C	23,5°C	20,5°C

Na podlagi obširnih predhodnih preiskav s katerimi določimo fizikalne in kemične lastnosti vsakega posameznega odpadnega materiala, določimo sestavo kompozita (mešanice) za pripravo suspenzije ali paste (Slika 29).

Glede na zahtevane lastnosti transporta, tehnologije vgradnje zasipa in končnih lastnosti zasipa, določimo sestavo mešanice – recepture (tabela 6). Tako pripravljene mešanice - pasti določimo fizikalne, kemične, mehanske in rudarske lastnosti. Tako za sveže kot za utrjene mešanice – paste (tabela 6).

Mešanici – pasti pripravljene iz odpadnih materialov dodamo različne dodatke s katerimi vplivamo na lastnosti paste.

Pripravljena mešanica iz odpadnih materialov in dodatkov med samo vgradnjo in predvsem po vgradnji ne sme škodljivo vplivati na okolje.

## **PREDNOSTI ODKOPNIH METOD**

### **Z ZASIPOM**

#### **Splošno**

Prednosti odkopnih metod z zasipom so naslednje:

- povečanje izkoristka nahajališča (manjše odkopne izgube),
- izboljšanje kvalitete pridobljene rudnine (manjša osiromašitev oziroma mešanje jalovine z rudnino),
- povečana stabilnost odkopov (manjši stroški podgrajevanja na odkopih in jamskih objektih v bližini odkopov, povečani odkopni učinki),

- manjše deformacije v krovlini in manjše posedanje površine (nižji stroški rudarske škode),
- omogoča uporabo sekundarnih in/ali trenutno odpadnih surovin v rudarstvu, za zasipni material.

Pridobivanje rudnin z odkopnimi metodami z utrjenim zasipom zmanjšuje ali preprečuje možnost nastopanja:

- vdora vode,
- vdora tekočih mas,
- večjih zruškov,
- posedanja površine.

Odpade izgradnja odlagališč na površini za:

- jamsko jalovino,
- separacijsko jalovino,
- za separacijski mulj,
- pepel,
- EF pepel,
- odpadne produkte čistilnih naprav,
- žgalniške ostanke,
- topilniško žlindro.

Navedene prednosti odkopavanja z odkopnimi metodami z utrjenim zasipom je možno doseči le pod pogojem, da ima vgrajeni zasip naslednje lastnosti:

- majhno stisljivost,
- zgodnjo nosilnost,
- zahtevano trdnost,
- kemično in fizikalno obstojnost v specifičnih pogojih vgrajevanja,
- nima škodljivega vpliva na okolje,
- možnost direktnega in avtomatiziranega transporta.

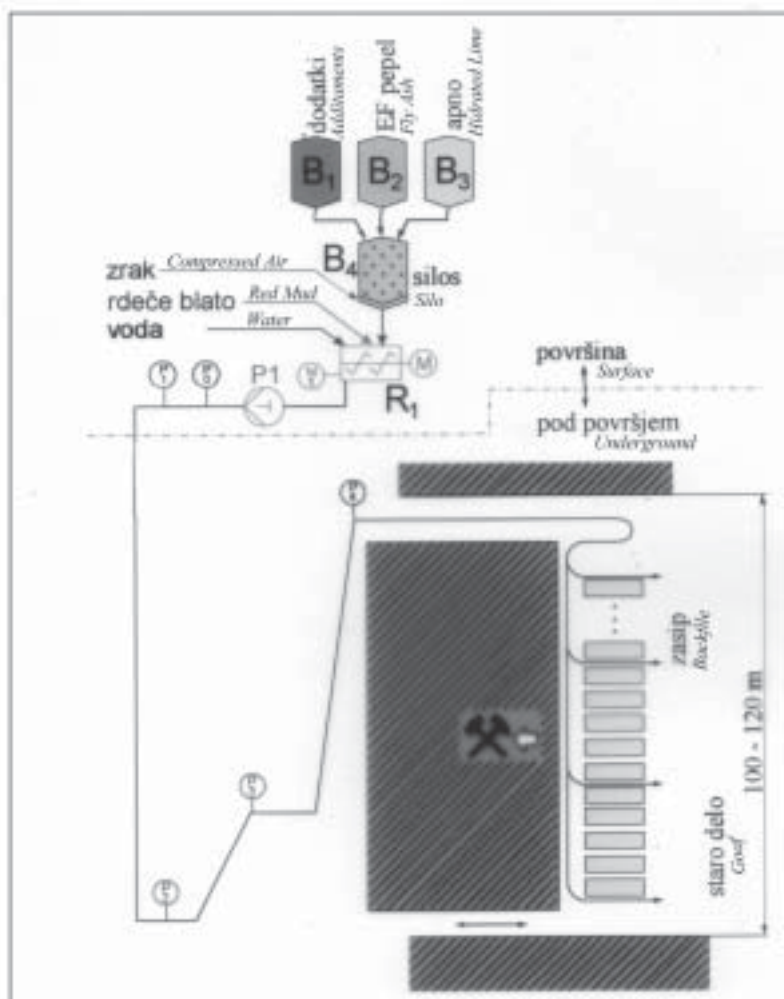
Za dosego navedenih lastnosti utrjenega zasipa je potrebno izdelati celoten tehnološki postopek sestave in priprave ter transporta zasipne mešanice na podlagi predhodno

ugotovljenih fizikalnih, kemičnih, trdnostnih in reoloških lastnosti posameznih zasipnih materialov in kompozita pripravljene za zasip pred in po utrjevanju. Vsak zasipni material sam po sebi še ni primeren za zasip. Potrebno je glede na zahtevane lastnosti utrjenega zasipa, vhodne zasipne materiale, ki so lahko sekundarne in/ali trenutno

odpadne surovine v rudarstvu, predhodno pripraviti za zasip.

Predvideti je medsebojno vsklajen in mehaniziran sistem (slika 30):

- pridobivanja,
- transporta,
- podgraevanja,
- zasipavanja.



**Slika 30.** Primer koordiniranega in mehaniziranega sistema odkopavanja, podpiranja in zasipavanja za rudnik s širokočelno odkopno metodo.

**Figure 30.** Model of coordinating and mechanized system of excavation, supporting and backfilling on the mine with longwall mining method with partly backfill of goaf.

## GOSPODARNOST ODKOPNIH METOD Z ZASIPOM

### Splošno

Tehnologija pridobivanja rudnin in njihova predelava, ima določene škodljive vplive na okolje. Odprava teh škodljivih vplivov je povezana s stroški. Z uvedbo okolju prijaznega rudarjenja je možno nekatere škodljive vplive v celoti odpraviti, nekatere pa zmanjšati. Zato je potrebno vzpostaviti zaprti ekološko – tehnološki krog med rudnikom in predelovalnim obratom oz. premogovnikom in termoelektrarno. V tem primeru je spremeniti dosednji način obravnavanja rudnika in topilnice oziroma premogovnika in termoelektrarne kot samostojna podjetja. Izvesti je najgospodarnejšo rešitev za celoten tehnološki proces pridobivanja in predelave rudnin oziroma pridobivanja in toplotne pretvorbe premoga.

Vzpostavitev zaprtega ekološko – tehnološkega kroga pomeni, uporabo vseh trenutno odpadnih surovin znotraj tega kroga in mogoče še drugih inertnih odpadkov kot zasipni material ter uvedbo pridobivanja z odkopno metodo z zasipom.

### Skupni stroški obratovanja pred uvedbo okolju prijaznega rudarjenja

Skupne stroške pridobivanja, separiranja, bogatenja, predelave ali pretvorbe pridobljene rudnine lahko prikažemo kot vsoto :

$$C = C1 + C2 + C3$$

Pri čemer pomeni :

- C skupni celotni stroški obratovanja (rudnik + separacija + predelava)
- C1 stroški pridobivanja
- C2 stroški separiranja oz. bogatenja
- C3 stroški predelave oz. pretvorbe

Skupne celotne stroške in stroške posameznega tehnološkega sklopa, razporedimo na tehnološke stroške in stroške povezane s škodljivim vplivom na okolje oziroma stroške, ki so povezani z varovanjem okolja.

$$C = B + D$$

- B tehnološki stroški
- D stroški za varovanje okolja

Na isti način razporedimo tudi stroške posameznih tehnoloških sklopov.

$$C1 = B1 + D1$$

$$C2 = B2 + D2$$

$$C3 = B3 + D3$$

Z uvedbo okolju prijaznega rudarjenja na podlagi zaprtega ekološko – tehnološkega kroga se spremeni tehnologija, uvede nove in opusti stare tehnološke postopke.

### Skupni stroški obratovanja po uvedbi okolju prijaznega rudarjenja

Zaradi spremenjene tehnologije se spremenijo tudi stroški. Skupne stroške obratovanja v okviru nove oz. spremenjene tehnologije se lahko prikaže enako kot za tehnologijo pred uvedbo okolju prijaznega rudarjenja kot vsoto stroškov posameznih tehnoloških sklopov.

$$S = S1 + S2 + S3$$

- S skupni celotni stroški obratovanja po uvedbi okolju prijaznega rudarjenja
- S1 stroški pridobivanja po uvedbi okopne metode z zasipom
- S2 stroški separiranja po spremenjeni tehnologiji
- S3 stroški predelave oz. pretvorbe po spremenjeni tehnologiji

Skupne celotne stroške in stroške za posamezen tehnološki sklop, razporedimo enako kot pred uvedbo okolju prijaznega rudarjenja na tehnološke stroške in stroške, ki so povezani z varovanjem okolja

$$S = T + V$$

- T tehnološki stroški po uvedbi okolju prijaznega rudarjenja
- V stroški za varovanje okolja po uvedbi okolju prijaznega rudarjenja

Na isti način razporedimo tudi stroške posameznih tehnoloških sklopov.

$$S1 = T1 + V1$$

$$S2 = T2 + V2$$

$$S3 = T3 + V3$$

Z uvedbo odkopne metode z zasipom se upravičeno pričakuje povečanje tehnoloških stroškov v okviru okolju prijaznega rudarjenja, zato velja

$$B < T$$

Istočasno se zmanjšajo stroški za varovanje okolja, zato velja

$$D > V$$

Gospodarnost uvedbe okolju prijaznega rudarjenja na podlagi zaprtega ekološko – tehnološkega kroga in odkopne metode z zasipom pa je dosežena ko velja

$$C > S$$

$$B + D > T + V$$

$$T - B < D - V$$

Razlika ( $T - B$ ) med tehnološkimi stroški pred uvedbo okolju prijaznega rudarjenja in po uvedbi mora biti manjša kot je razlika ( $D - V$ ) med stroški za varovanje okolja pred uvedbo okolju prijaznega rudarjenja in po uvedbi.

Z drugimi besedami povedano, povečanje tehnoloških stroškov zaradi uvedbe odkopne metode z zasipom mora biti manjše od prihranka stroškov za varovanje okolja.

Zaželeno je, ni pa nujno, da se enake gospodarske rezultate spremenjene tehnologije doseže znotraj vsakega posameznega tehnološkega sklopa. Pomembno je, da se skupni celotni stroški obratovanja s katerim zagotavljamo okolju prijazno rudarjenje zmanjšajo ali v najslabšem primeru ostanejo enaki kot pred uvedbo okolju prijaznega rudarjenja torej, da je

$$S \leq C.$$

## **PRIHODNOST OKOLJU PRIJAZNEGA RUDARSTVA**

Brez uvedbe in dosledne uporabe okolju prijaznega rudarjenja, pridobivanje in predelava rudnin ne bo več mogoča. To še posebej velja za Evropo, ki je zaradi večje koncentracije prebivalstva zelo občutljiva na vsako škodljivo spremembo okolja.

Princip okolju prijaznega rudarjenja je možno uvesti na področju celotnega rudarstva tako na kovinskih rudnikih, premogovnikih, rudnikih, ki pridobivajo industrijske minerale ali gradbene materiale.

Pri tem se ne rešuje samo odlaganje odpadnih snovi znotraj zaprtega ekološko – tehnološkega kroga. S pridobivanjem in predelavo rudnin se ustvari dovolj praznega prostora, ki ga je možno uporabiti za zasip s sekundarnimi surovinami, ki so pridobljene iz odpadnih snovi, ki nastanejo izven rudarske dejavnosti. Z razvojem tehnologije zasipavanja in izgradnje multibariernega zaščitnega sistema ter ustrezne priprave odpadnih snovi bo, čedalje več odkopanih prostorov, možno zapolnjevati s sekundarnimi surovinami pridobljenih iz odpadnih snovi.

Tehnološki postopki zasipavanja bodo pridobivali na pomenu in bodo posredno preko sekundarnih surovin, uporabljeni za odlaganje odpadnih snovi. Gospodarnost pa bo zagotovljena s prodajo pridobljenih rudnin in plačila odškodnine za okolju prijazno uporabo sekundarnih surovin za zasip.

## **SKLEP**

Uporaba različnih vrst sekundarnih in/ali trenutno odpadnih surovin v rudarstvu ter inertnih odpadkov za zasip v aktivnih rudnikih, omogoča uvedbo okolju prijaznega rudarjenja. To pomeni bistveno zmanjšanje vseh vrst škodljivih vplivov rudarjenja na okolje. Vzporedno odpravlja okolju neprijazna odlagališča na površini in omogoča končno odlaganje nekaterih industrijskih odpadkov. Vse naštete prednosti uporabe odpadnih materialov za zasip pa povečujejo stroške pridobivanja, ki pa se kompenzirajo z zmanjšanjem stroškov rudarske škode, stroškov vzdrževanja jamskih objektov, odpravo stroškov odlaganja na površini, izboljšanjem kvalitete pridobljene rudnine (kurilnosti pri premogih, vsebnosti kovine pri rudah in vsebnosti mineralov pri nekovinah) in dohodkom za uporabo sekundarnih surovin in inertnih odpadkov za zasip.

Glede na vedno bolj zaostrene pogoje varovanja okolja je uvedba okolju prijaznega rudarjenja edina možnost za nadaljevanje rudarske dejavnosti. Zato je potrebno proučiti vse možnosti prilagoditve, celotne tehnologije pridobivanja, okolju prijaznemu rudarjenju v smeri znižanja stroškov pod mejo, ki je dosežena pred uvedbo okolju prijaznega rudarjenja.

Priprava zasipnega kompozita iz sekundarnih surovin, trenutno odpadnih snovi in inertnih odpadkov, zahteva predhodne raziskave fizikalnih, kemičnih in trdnostno-deformabilnih lastnosti kompozita pred in po odlaganju v zasip. Na podlagi dosedajšnjih raziskav so bili razviti postopki ugotavljanja lastnosti zasipnih mešanic, ki jih je potrebno še standardizirati.

Odloženi zasipni kompoziti iz odpadnih materialov ne smejo v času odlaganja in po odlaganju dolgoročno kakorkoli škodljivo vplivati na okolje. Zato je potrebno s sistematskimi raziskavami in testi to predhodno dokazati. V ta namen smo uporabili že uveljavljene standardne teste izlužljivosti (IAEA) in razvili enodimenzionalni model pretoka nečistoč iz končnega vira preko homogene, izotropne, neporušene porozne hribine. Tudi postopke raziskav in testov za dokaz vpliva odloženega zasipnega kompozita pripravljenega iz odpadnih materialov na okolje je potrebno še standardizirati. Standarne postopke ugotavljanja škodljivega vpliva na okolje odloženih zasipnih kompozitov pa uporabiti za izdelavo okolju varstvene ocene.

## SUMMARY

### **Mining methods with backfilling – environmentally friendly technologies**

#### ***Introduction***

Even since ancient times man has participated in some form of mining (i.e., digging and chiseling stone etc.), has continued doing so to date and will continue doing so in the foreseeable future.

With an increasing standard of living there has been a steady increase in the demand for industrial and construction products as well as energy. The amount of raw materials (ore and secondary materials) produced increases every year to fit the demand. New deposits, suitable for mass mining of ore, are constantly being sought, while existing mines are striving for higher productivity in order to reduce costs.

Wherever the size and quality of the deposits allows inexpensive, large-scale mining, the harmful environmental effects of this process are considerable. In order to prevent this, environmentally friendly technologies are required. This means that technological methods must include some element of environmental protection, in line with current legislation and modern technological achievements. This is achieved by introducing a closed environmental-technological (eco-technological) cycle into the mining process.

By using the backfill mining method it is possible to introduce such a closed cycle and minimize the harmful effects mining has on the environment.

We can conclude that the backfill method is an environmentally friendly technology and is as such more attractive and being used increasingly frequently. The use of backfilling does introduce additional costs into the mining process, but tends to make overall costs smaller by decreasing negative environmental impact, increasing personnel safety and reducing maintenance costs.

#### ***Environmentally safe mining***

In order to achieve an environmentally safe mining method, we must alter the mining process (including ore/coal preparation where possible) into a closed eco-technological cycle. The essential feature of a closed eco-technological cycle is that all technological processes include the necessary pollution decreasing elements. Furthermore, all production and ore and coal preparation residues are returned into the excavated space in such a way that no pollution occurs during or after the backfilling. Figure 1 shows

the scheme of environmentally safe mining in a closed eco-technological cycle of ore/coal mining and processing.

Since all residue that occurs during mining and processing is returned into excavated spaces, the ore and coal mining and processing remain the basic technological phases of the entire process. This means that backfilling is an integral part of the mining process and should be treated as such technologically as well as economically.

An optimally feasible solution (in the technological and economical sense) should be found. The lowest cost of electrical power is the right indicator for such a solution in an integrated power plant and coal mine, lowest production cost for a metal ore mine and melting plant and the lowest cost of final products made of industrial materials.

### ***Mining methods***

The basic objective of mining is of course the production of useful ore or coal. These occur naturally at specific sites and are not artificially reproducible. That is one motivation for a careful and economical exploitation of ore and coal deposits.

As the operation of mines is governed by the free market economy, the mining process of the ore or coal itself must be adjusted accordingly.

The role of the mining engineer is decisive. The right selection of the mining method is crucial as it is the main phase of the mining process and has a direct influence on other subordinate technological phases.

Selecting an appropriate mining methods and its optimization according to site-specific conditions has an enormous influence on the overall cost of the process. The mining method indirectly determines the extent, type and size of the mine's structure, the efficiency of ore and coal deposit exploitation as well as the condition of the mine after excavation.

As this paper is concerned with environmentally safer mining in an eco-technological cycle, where all residue is returned to the excavated space, we will only concentrate on mining methods that involve backfilling.

### ***Mining methods with backfill***

Mining methods that involve backfilling offer obvious advantages over other methods by being environmentally friendly and have gained in importance. They assure the stability of the excavated spaces and much decrease the harmful impact of the excavation on the adjoining mine structures and surface. This leads to lower costs in maintenance, decreases the cost of supporting the excavated space and adjacent buildings and decrease surface subsidence. The increased stability diminishes the risk of crushing water and sludge inflow, as well as mud infiltration. The subsequent costs of excavation are lower. Using waste (residual) products produced during the ore and coal preparation does not require the excavation of backfill materials on the surface. Mining methods with backfill enable lower excavation losses and the introduction of selective excavation. Recent research has confirmed that selective mining has a large influence on the economics of mining.



Backfilling does, however, introduce additional costs for the preparation, transportation and actual implementation of the backfill. Nonetheless, the experience of several mines, which utilize backfilling, shows that the economic benefits of backfilling surpass these additional costs.

#### *Mining methods with cemented backfill*

The technology of preparing a cemented backfill has improved greatly and enables us to use this method in many different types of mines.

#### *The usage of backfill methods in Slovenian mines*

Mining methods with backfill were heavily used in Slovenian coalmines, but many have reverted to other methods due to lower costs.

Metal mines, however, have used these methods up to the end of last century.

#### The underhand mining method with backfill – Idria mercury mine

When designing a mining method for mining mercury ore in the permocarboniferous shiest with native mercury (Table 1), it was necessary to decrease the negative environmental impact of the native mercury and simultaneously enabling considerable adaptability to different sizes and shapes of the ore deposits, with respect to the necessity of selective mining.

With the underhand mining method, the ore is mined in floors from the top to the bottom (Figures 2, 3, 4 and 4a). The losses of native mercury in the backfill are minimized and the active evaporation surface of the mercury is decreased. By using a cemented backfill, it is possible to greatly improve the sta-

bility of the mine. The need for support is, with the exception of the first floor, minimal, thereby achieving higher mining productivity and economic feasibility. The use of the UTAH 2 software (Figures 5, 6, 7, 8 and 9) enables us to study the evolution of stress deformational states in the surrounding rocks by simulating all work phases – excavation, support and backfill.

Tables 2 and 3 show the advantages of the underhand method with cemented backfill compared to the traditional stopping method.

By using this method, it is possible to achieve a high level of control over the rock pressure. Even though the cement and reinforcement introduce additional costs, it is possible to achieve lower overall mining costs (compared to the traditional stopping method) by eliminating the need for timber and increasing outputs.

#### Mining method with backfill and cable bolts – Zirovski vrh uranium mine

During the mining method selection process for the excavation of uranium ore at the Zirovski vrh uranium mine a great variety of factors had to be considered, two of which being especially important:

- working environmental conditions,
- requirements for selective mining.

The ore body lies some 140m below the surface so that a great part of it starts in the form of a fold and goes over in the horizontal position. As Figure 10 shows, the ore body can be divided into subvertical and horizontal parts. The ore blocks are therefore mined in the subvertical and horizontal sections separately.

### *Geotechnical research and measurements*

Before the mining method with backfill and cable bolts was introduced, samples of rock were taken and tested in the laboratory. The overcoring method was used to determine the primary stress around the analyzed block.

Table 4 shows the results of these measurements.

### *Mining methods*

The room and pillar mining method was originally used at Zirovski vrh uranium mine, but changes in the geometrical characteristics of the ore block configuration – a large amount of ore was left in pillars – required a change in mining method.

Different types of mining methods were considered, including the construction of minor artificial pillars and the virtually full extraction of the ore block with the reinforced backfill.

### *The principles of mining in the sub-vertical section of the ore block*

The sub-vertical section of the ore block (Figure 11) is mined by advancing on the first level with separate ventilation. Cable bolts are inserted high into the roof, producing a space 2.5 m in height. As the face moves higher, the remaining void is filled with cemented backfill with strength of approx. 3 MPa – this enables the mining machinery to move along the face. The ascending mining along the strike of the sub-vertical section is shown in Figure 11.

### *The principles of mining in the horizontal section of the ore block*

The mining of the horizontal section of the ore block is illustrated in Figure 12. First,

approx. 5m wide faces are mined and are packed with cemented backfill with strength of approx. 7 MPa. The system ascends as far as the mineralisation boundary. In the last face, cable bolts are inserted to provide the required roof reinforcement and prevent the mining conditions and the intermediate 7.5 m wide pillars from deteriorating. The critical phase of the mining process is the mining of ore from the face before the cemented backfill takes over the role of load bearing pillars. In the secondary 7.5 m wide face, cable bolts are inserted simultaneously with the advance, so that roof stability is ensured after the last mining room has been filled with non-cohesive backfill.

### Calculations of the strain and stress conditions

The orientation and load bearing capacities of the cable bolts as the main supporting element were determined first.

Table 4 shows all the material characteristics used in the calculations.

First, the primary stress and strain state was calculated by means of a mathematical model where tectonic characteristics and existing mine conditions were taken into account.

The first phase consisted of simulating the strain and stress levels in proposed levels without using cable bolts for support. The calculated secondary stress and strain state showed insufficient safety with respect to the elastoplastic properties of rocks and crushed zones (Figure 13).

Arrangements of cable bolts were then taken into account. By using cable bolts during the phase of mining the first level, rock charac-

teristics are improved. As this was taken into account in the calculations, the results showed higher safety levels than those produced in the previous calculation (Figure 14).

#### Rope bolts installation technique

A system of rope bolts was selected in which the wire rope is grouted along its whole length in the borehole.

Wire ropes of 16 mm in diameter and later steel strands 15.3 mm in diameter (with 7 strands), which were stiff enough to be built in vertically upwards in the borehole, were used. The prestressing of the steel strands was not necessary as the rock stress relaxations make bolts active. The grouting procedure is the most important phase of the rope installation process so extra care should be devoted to borehole preparation and cement quality. Accordingly, a mechanized bolt installation technique was devised so that the process of cement mortar preparation and its injection into the borehole, as well as the process of drawing out the cementation tube would run in an exactly defined proportion.

#### Technological principles of backfilling

The following three types of backfill were used:

1. non-cohesive backfill
2. cemented backfill with a strength of 3MPa (MB3)
3. cemented backfill with a strength of 8 MPa (MB7).

Types (1) and (2) were placed by pit tippers – an operation that cause no major difficulties when the mining faces are high enough to allow the use of the full tip height of the pit tippers. The application of Type (3) MB7

backfill requires special technology. It was placed with a belt thrower. The belt thrower for the placing of cemented backfills is shown in Figures 15 and 16.

#### Summary

Using the room and pillar mining method and supporting by short bolts lead to collapses in the mine. A mining method with cemented backfill was introduced primarily for two reasons: smaller ore impoverishment and the possibility of using the waste in the mine. Long cable bolts were introduced as the main supporting elements as a result of hard geological conditions expressed above all in the complex tectonics and microfissuration. This lead to a sufficient improvement in the mine's stability conditions.

#### *Mining methods with backfill – Velenje goaf colliery*

The mining methods used at the Velenje mine range from simple methods to highly productive and fully mechanized mining technology currently in use at Velenje (Figures 17 and 18).

The recent expansion of the mining fields has brought operations to the western part of the deposit, where the roof is comprised of sand strata in addition to impervious clay sediments. Studies of roof rocks have shown that these sands are water bearing and as such could cause invasions of water and mud into excavated areas, particularly because the technology currently used is based on the collapsing of the roof into the excavated space. Additionally, the conversion of coal into electric power at the Sostanj thermal power plant, which exclusively uses coal from Velenje for fuel, generates enormous

quantities of ash, which needs to be deposited. This led to the idea of developing a new sublevel mining method involving the filling of the goaf with fly ash paste. The backfilling of areas behind the face with ash paste will simultaneously reduce the size of surface depots and produce all the benefits of backfill mining.

Backfilling of the goaf may be:

- partial – serving as an indicator for the next underlying level (Figure 19),
- complete – the insulation layer is enlarged, the danger of water and mud invasion at mine faces is prevented and the depositing of large quantities of waste material on the surface is avoided.

#### *Research and analysis of individual backfill components*

The backfilling of goafs with fly ash paste enables us to benefit from the technological advantages of the backfilling mining methods.

The backfilling process can utilize several different transport systems of the backfill material from the preparation site to the mine, depending on the type of backfill. Priority is given to systems that enable direct transportation from the preparation plant, with a high level of mechanization and automation.

The Velenje colliery used hydraulic transportation systems for pumping the ash paste.

On the basis of previous research it was possible to determine the physical, chemical and mechanical properties of the paste, in its soft (fresh) state, as well as its hardened state.

We can achieve the required physical, chemical, geotechnical, geological and environmental properties by adding different components.

#### *Transportation and injection of the paste*

The preparation of paste in the surface mixing plant and then pumping it to the appropriate area of the mine seems an optimal solution. The selected technological procedure requires at least 4 hours of stability for the paste. The injections of paste into the goaf is simultaneous with the advancement of the long wall face and is comprised of the following technological stages:

- paste preparation,
- transport,
- injection,
- cleaning pipelines and equipment.

#### *Paste preparation:*

The paste preparation process can be divided into three phases:

- proportioning of paste components (Figure 20)
- mixing (Figure 21)
- stabilization, pumping and measurements (Figures 22,23 and 24).

#### *Transport:*

The paste is pumped hydraulically with the help of a Schwing pump through the DN100, NP160 pipeline, whose size is reduced to the size of the injection pipe (DN80) when it approaches the site. The paste is injected into the goaf through a DN64 injection pipe. The interior of the pipes is rinsed with water before and after the transport. Three built-in pressure gauges are used to monitor the pressure a flow meter is used to monitor the velocity of the paste (Figure 25).

**Injection:**

The injection is performed with seventeen DN64 injection pipes (Figure 26). The injection phase is done one injection pipe at a time and is stopped when the pressure in the injecting pipe rises to 40 bar. When all 17 injections have been completed, the procedure is repeated simultaneously with the advancement of the face.

**Paste preparation process control:**

The paste preparation process control includes the regulation of the following parameters (Figure 27):

- the proportioning of the paste components
- viscosity
- mixing capacity.

The regulation of the paste components requires the use of high capacity computers and complex mathematical algorithms. OMRON of Japan has developed a FUZZY logic application for direct integration with process controllers.

Results of the trial excavation with partial backfilling:

The results of the trial excavation with partial backfilling are shown in Figure 28. The backfill reached an average height of 0.5 m.

***Backfilling systems and procedures***

Different backfilling procedures can be integrated into the mining process as an integral part of environmentally friendly mining, regardless of the mining method used. There are several distinct methods, which differ in the process of implementing the backfill (Table 5).

***Backfill mixtures***

The backfill mixture for cemented backfill consists of the following components:

- aggregate (fine and/or small fractions),
- binders,
- water,
- special additives.

Different materials can be used as the aggregate – this is usually the waste material that is available at the specific location. The mixture is then treated to get the granulometric composition, which is correct for the specific method of backfilling.

***Preparing backfill mixtures***

The precise composition of the backfill mixture is determined on the basis of the chemical, physical and mechanical properties of the backfill materials available. Determining the correct composition is a crucial process which should consider the properties of the backfill materials, method of transport, method of injection, as well as the required final properties of the backfill (depending on the mining conditions and the method used).

***Advantages of backfilling***

The advantages if backfilling can be summarized as follows:

- increased efficiency if deposit exploitation (decreased excavation losses),
- higher coal/ore quality (less pollution by mine waste),
- decreased rock pressure around the excavations (decreasing the cost of support),
- increased stability of the mine.

To achieve these advantages, we need a synchronized and fully mechanized system (Figure 30), which includes the following processes:

- ore or coal excavation,
- transportation,
- supporting,
- backfilling.

### ***Economics of backfilling***

Mining and processing ore or coal has a negative environmental impact. We can decrease and even abolish some of these negative effects by introducing a closed ecological-technological cycle, but this requires some costly modifications to the process.

### *Cost of mining before the ecological-technological cycle*

Let

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

Where:

$C$  = total costs

$C_1$  = excavation costs

$C_2$  = separation costs

$C_3$  = processing costs

The total cost  $C$  and total cost in individual categories must be divided into a net cost of technology ( $B$ ) and environmental protection cost ( $D$ ).

So:

$$C = B + D$$

And correspondingly:

$$C_1 = B_1 + D_1$$

$$C_2 = B_2 + D_2$$

$$C_3 = B_3 + D_3$$

*Total cost of environmentally friendly mining*  
A change in technology naturally means a change in costs.

If we adopt a similar definition of costs, then let  $S$  be the total cost of mining after the introduction of the closed eco-technological cycle.

Let

$$S = S_1 + S_2 + S_3$$

Where

$S$  = total costs

$S_1$  = new excavation costs

$S_2$  = new separation costs

$S_3$  = new processing costs

Again, splitting these costs into net technology cost ( $T$ ) and environmental protection cost ( $V$ ) components:

$$S = T + V$$

And correspondingly

$$S_1 = T_1 + V_1$$

$$S_2 = T_2 + V_2$$

$$S_3 = T_3 + V_3$$

The introduction of backfilling increases the technology costs so the following is true

$$B < T$$

It simultaneously decreases the cost of environmental protection

$$D > V$$

It is not difficult to see that in order to achieve economic feasibility for the eco-technological cycle,

$$C > S$$

Therefore

$$T - B < D - V$$

i.e., the saving in environmental protection must offset the loss in technology costs.

### ***The future of environmentally friendly mining***

In the future, mining and processing of ore and coal will cease to be possible without the introduction and consistent use of environmentally friendly mining methods. This is especially true for Europe, which is extremely sensitive to the slightest of environmental changes, owing to its high population density.

The principles of environmentally friendly mining can be applied to the mining industry throughout, including metal mines, collieries and mines producing industrial minerals and construction materials.

This does not only solve the problem of depositing waste materials in a closed ecological-technological cycle. By mining and processing ore, we created large amounts of empty space that can be filled with secondary waste materials, produced outside the mining industry. By further developing technologies used in backfilling, multi-barrier protection systems and waste material treatment, it will be possible to use the excavated spaces as deposits of secondary waste materials.

Backfilling technologies will continue to grow in importance and will be used for depositing waste materials. Economic feasibility will be provided by profits from selling the produced ore and compensation for using secondary waste materials for the backfills.

### **Conclusions**

Environmentally friendly mining can be achieved by using backfill technologies with various types of secondary and waste materials, those produced in mines and elsewhere. This results in a considerable decrease on the environmental impact of the mining process. It also eliminates the need for surface waste depots and provides a solution to the industrial waste storage problem. All these advantages come at a higher cost of mining, but this is compensated with a decrease in production losses, maintenance costs, surface depot costs and with a higher quality of the produced ore. Some income can also be generated from secondary and waste materials during the backfill process.

As compliance with increasingly strict environmental protection legislation is required, the introduction of environmentally friendly mining is a prerequisite if the mining industry should survive. Further research is therefore necessary to lower the cost of environmentally friendly mining and make it cheaper than the alternatives.

The preparation of a backfill composite made out of secondary and waste materials requires preliminary research into the hardness, deformational and other physical and chemical characteristics of the composite, before and after the backfill. Methods for determining the properties of backfill composites have

been developed during recent research but they are yet to be standardized.

Deposited backfill composites should not have any negative environmental impact, neither during the backfill process nor in the long term. This needs to be proved with system-

atic research. We have used IAEA standard for this purpose and developed a one-dimensional model of the flow of waste from its source through homogenous and isotropic rock. The procedures for analyzing backfill composites and proving they are environmentally safe are also yet to be standardized.

## REFERENCE

- BAJŽELJ, U. (1972): Rezultati uvajanja mehanizacije v jamo rudnika živega srebra Idrija, RMZ, *Rudarsko-metalurški zbornik*, letnik 19, št. 1, pp. 1-17.
- BAJŽELJ, U. (1984): Underhand Cut-and-Fill Stopping Experiments in Carboniferous Schists at the Idrija Mine, Symposium AIME – *Society of Mining Engineers, Geomechanics Applications in Underground Hardrock Mining*, Editor W. G. PARISEAU, Published by Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc. New York, New York, pp. 163-183.
- BAJŽELJ, U. (1984): Podetažne odkopne metode z uporabo urjenega zasipa – *RMZ-Rudarsko-metalurški zbornik*, letnik 31, št. 2, pp. 123-150.
- BAJŽELJ, U., LIKAR, J., ŽIGMAN, F., HROVATIČ, A., ŠUBELJ, A. in SEDOVČEK, A. (1987): Face and Room Supporting by Long Cable Bolts, *13<sup>th</sup> World Mining Congress, Improvement of Mine Productivity and Overall Economy by Modern Technology*, Volume Two, Round table theme 5. Mechanized scaling and rock support, Stockholm, Sweden, pp. 797-804.
- BAJŽELJ, U. (1988): *Vpliv parametrov delovnega okolja na tehnologijo pridobivanja v pogojih nastopanja živosrebrnih hlapov in radona*. Disertacija, 248 p.
- BAJŽELJ, U. in LIKAR, J. (1991): Analysis of the Stress-Deformational State in the Wider Area of Stopes at the Idrija Mine; *Associazione Mineraria Subalpina*, Anno XXVIII, Numero 4.
- BAJŽELJ, U., RUNOVČ, F. in LIKAR, J. (1992): Operation of Coal Mines and Thermal Power Plants in a Closed Ecological-Technological Cycle; *Proceedings of the XV World Mining Congress*, pp. 947 – 966, 25-29 May, Madrid, Spain.
- BAJŽELJ, U., LIKAR, J. in ŽIGMAN, F. (1993): Mining with Cemented Backfill in the Republic of Slovenia, *Proceeding MINEFILL 93*, Johannesburg, pp. 357-360.
- BAJŽELJ, U. in RUNOVČ, F. (1993): Backfilling in an Integrated Operation Involving Coal Mining and Power Generation; *MINEFILL 93*. Johannesburg, SAIMM, pp. 397-401.
- VELENJE LIGNITE MINE (1994): Preparation and Transport of Paste in to Škale Pit, Desgn: Mlel, AMI, Techno Soft, Vematic and RLV Velenje, Date: December 1993 – January 1994.
- BAJŽELJ, U., RUNOVČ, F. in LIKAR, J. (1994): Exploitation d'une mine de charbon et d'une centrale thermique par circuit eco/technologique ferme; *Les Techniques*, pp. 1-7.
- BAJŽELJ, U. (1994): Environmentaly Safe Mining Technology Based on Backfilling; *Proceedings of the Second European Metals Conference, EMC '94*, Mining, Freiberg and Dresden, 14-18 June, pp. 77-92.
- Prospekt The Velenje Coal Mine, 24 strani, Premogovnik Velenje, Partizanska cesta, 3320 Velenje, Slovenija, 1995.
- BAJŽELJ, U. (1996): The Influence of Mining Method on the Concentration of Mercury Vapour in Air in the Pit; *Proceedings of the Meeting of Researchers*, Entitled: Idrija as a Natural and Anthropogenic Laboratory, Mercury as a Major Pollutant, May 24 and 25, Idrija, Slovenia, pp. 81-85.
- BAJŽELJ, U. (1996): Aplikativno razvojna raziskava – Utrjevanje in zapolnjevanje podzemnih prostorov in analiza vplivov na okolje, naročnik Premogovnik Velenje, raziskovalna organizacija Univerza v Ljubljani, NTF – OGR, končno poročilo za leto 1995, junij 1996, Ljubljana.



- BAJŽELJ, U. (1998): Raziskovalni projekt – Podzemna odlagališča s posebnim ozirom na tehniko zapolnjevanja in okolje-varstveno oceno, poročilo za leti 1996 in 1997, naročnik Premogovnik Velenje, raziskovalne organizacije vključene v projektno skupino IRGO, Univerza v Ljubljani, NTF – OGR in Premogovnik Velenje, Sektor za raziskave in razvoj, 38 strani in 21 prilog.
- BAJŽELJ, U. (1997): Premogovnik – termoelektrana zaključen tehnološko – ekološki krog. *Posvetovanje Rudnikov rjavega premoga Slovenije – Društvo inženirjev in tehnikov, Medijske Toplice – Izlake*, pp. 45-65.
- BAJŽELJ, U. in KORTNIK, J. (1997): Use of multi-barrier water-proofing system for the construction of underground waste deposits. *6<sup>th</sup> International Mine Water Association Congress, Bled, 1997*, pp. 451-462.
- KORTNIK, J. in BAJŽELJ, U. (1997): Podzemna odlagališča odpadkov. *Posvetovanje rudarjev ob 35. Skoku čez kožo*, Ljubljana, pp. 125-136.
- BAJŽELJ, U. (1998): *Podzemna odlagališča s posebnim ozirom na tehniko zapolnjevanja in okoljevarstveno oceno*; Letno poročilo – Univerza v Ljubljani, NTF – Oddelek za geotehnologijo in rudarstvo, Ljubljana.
- BAJŽELJ, U. (1998): Uporaba in odlaganje pepela v podzemnih prostorih. *Mednarodno srečanje avstrijskih in slovenskih strokovnjakov v Ljubljani*, Ljubljana.
- BAJŽELJ, U., KORTNIK, J., PETKOVŠEK, B. in FIFER, K. (1998): Environment Friendly Underground Excavation of Dimension Stone; *Proceeding of APCOM '98, 27<sup>th</sup> International Symposium on Computer Applications in the Minerals Industries, 19.-23. April, London, United Kingdom*, pp. 11-22.
- BAJŽELJ, U. (1999): *Podzemna odlagališča s posebnim ozirom na tehniko zapolnjevanja in okoljevarstveno oceno*; Zaključno poročilo o rezultatih raziskovalnega projekta, Univerza v Ljubljani, NTF – Oddelek za geotehnologijo in rudarstvo, Ljubljana.
- BAJŽELJ, U. (1999): Uporaba odpadnih materialov za zasip; *RMZ*, let. 46, št. 2, pp. 183-193.
- BAJŽELJ, U. in KORTNIK, J. (1999): Podzemno odlagališče metalurških odpadkov; *RMZ*, let. 46., št. 2, pp. 195-201.
- BAJŽELJ, U. (2000): *Technische aspekte Abfallverbringung an den aktiver Braunkohlenwerken*, Seminar, Vyšna Boca, Slovaška, 10. 05. – 12. 05.
- BAJŽELJ, U. (2001): Environmentally Friendly Closure of Mines – Slovenian Experiences; *RMZ-Materials and Geoenvironment*, Vol. 48, No. 2, pp. 261-280.
- BAJŽELJ, U. (2002): An Environmentally Friendly Mining Method and the Closure of the Idria Mercury Mine; *6<sup>th</sup> International Symposium on Cultural Heritage in Geosciences, Mining and Metallurgy*, Libraries-Archives-Museums, Proceedings Volume, June 17-21, Idrija, Slovenia, pp. 113-118.
- BAJŽELJ, U. (2002): *Testiranje utrjevalnih past za uporabo v Premogovniku Velenje*, Razvojno – raziskovalna naloga, naročnik Premogovnik Velenje, raziskovalna organizacija Univerza v Ljubljani, NTF – OGR, končno poročilo po pogodbi št. 16/01, 22 strani, 5 prilog, Ljubljana.
- REUTHER, E.-U. (1989) *Lehrbuch der Bergbaukunde, Erster Band*, 11. vollständig neu bearbeitete Auflage, Verlag Glückauf GmbH, Essen.