

# TVEGANJE ZA POSAMEZNIKA V OKOLICI MERILNIH IN MERILNO-REGULACIJSKIH POSTAJ ZA ZEMELJSKI PLIN

## Risk to the individual in the vicinity of metering and metering-regulation stations for natural gas

Tom Bajcar\*, Franc Cimerman\*\*\*, Brane Širok\*\*\* UDK 614.8:622.691.5

Povzetek	Abstract
<p>Merilne in merilno-regulacijske postaje za zemeljski plin so del plinovodne infrastrukture. Zaradi prisotnosti vnetljivega zemeljskega plina zato predstavljajo tudi nevarnost za okolico in ljudi. Poglavitni neželeni dogodek je eksplozija uhajajočega plina v fizično omejenih prostorih takšnih postaj. Naloga operaterja je, da te dogodke upošteva in predvidi ustrezne ukrepe za zagotavljanje še sprejemljivega tveganja v okolici postaj. Stopnjo tveganja je mogoče oceniti posebej za to narejenih modelih. Takšni modeli so v pomoč tako pri umeščanju novih plinovodnih objektov oziroma postaj v okolje kot tudi pri nadzoru in obvladovanju tveganja na že delujočih postajah.</p>	<p>Metering and metering-regulation stations for natural gas form a part of gas pipeline infrastructure. They present a potential threat to the environment and people due to the presence of flammable gas. The explosion of released gas in physically obstructed areas of such stations is indeed the main unwanted incident. Operators should pay attention to such events and foresee appropriate mitigation measures. Risk level and its evaluation can be assessed by risk assessment models specially built for this purpose. Such models are of help not only in terms of planning and installation of new stations into the environment, but also in monitoring and managing the risk on existing stations.</p>

## Uvod

Merilna ali merilno-regulacijska postaja za zemeljski plin je postaja z napravami in opremo za merjenje (MP) ali merjenje in regulacijo (MRP) pretoka, tlaka in temperature plina, tehnološko je povezana s plinovodom. MP in MRP so postavljene vzdolž prenosnega cevovoda za zemeljski plin in omogočajo operaterju cevovoda nadzor pretoka zemeljskega plina. Poleg tega služijo MRP kot postaje za zmanjšanje tlaka zemeljskega plina, namenjene končnim uporabnikom. Pri redukciji tlaka nastopi zaradi realnega dušilnega učinka znižanje temperature plina, zato je treba v MRP z obratovalnimi tlaki, višjimi od 10 barov, plin dogrevati, da ne pride do nedovoljene podhladitve opreme ali celo do napak pri regulaciji tlaka ali pretoka plina. Značilni videz postaje MRP je na sliki 1. Postajo sestavlja ena ali več zgradb s prezračevani-

mi prostori s plinskimi napeljavami. Del plinskih napeljav (predvsem izpuhi varnostnih ventilov) je na zunanji strani objekta ali ob njem. Zgradbe in plinske napeljave so obdane z zaščitno ograjo, ki definira območje postaje in preprečuje vstop tretjim osebam ali nedovoljene posege na tem območju. Na območju MP ali MRP navadno ni ljudi, pristojno in kvalificirano osebje je prisotno le občasno med rednimi (obdobnimi) pregledi opreme in obratovanja postaje ter vzdrževalnimi deli.

Prisotnost zemeljskega plina ter izvorov vžiga na območju MP in MRP prinaša tveganje za okolico in ljudi, ki živijo ali se dalj časa zadržujejo v objektih v bližini teh postaj. Operater cevovoda upravlja MP in MRP skladno z ustreznimi varnostnimi pravilniki in standardi. Kljub majhnemu številu dogodkov, ki so povezani z neželenimi ali nenadzorovanimi izpusti plina ter njegovim vžigom na območju MP ali MRP, se operater trudi nenehno izboljševati varnostne razmere na regulacijskih postajah ter uveljavljati operativne postopke in prakse, ki povečujejo zaščito zaposlenih, drugih oseb in okolja.

Tveganje je na splošno definirano kot merilo za pogostost in resnost poškodb zaradi neželenih dogodkov, ki so posledica nevarnosti. V tem primeru je nevarnost označe-

\* dr., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, Ljubljana, tom.bajcar@fs.uni-lj.si

\*\* Plinovodi, d. o. o., Cesta Ljubljanske brigade 11 b, Ljubljana, franc.cimerman@plinovodi.si

\*\*\* dr., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, Ljubljana, brane.sirok@fs.uni-lj.si



Slika 1: Merilno-regulacijska postaja (MRP) za zemeljski plin  
 Figure 1: Example of a metering-regulation station (MRS) for natural gas.

na s prisotnostjo zemeljskega plina, ki ima eksplozivne in gorljive lastnosti in lahko povzroči poškodbe na ljudeh, lastnini in okolju.

Splošno merilo tveganja zaradi posebnega (neželenega) dogodka se določi z enačbo:

tveganje zaradi dogodka = pogostost dogodka × posledica dogodka (1)

Varnost izhaja iz presoje o sprejemljivosti tveganja: aktivnost se oceni za varno, če je njeno tveganje ocenjeno kot sprejemljivo.

Individualno tveganje ali tveganje za posameznika ( $TP$ ) je verjetnost, da lahko oseba v bližini nevarnega objekta umre zaradi morebitnih neželenih dogodkov na tem objektu. Takšno tveganje se določi ali oceni s kvantitativno oceno tveganja. Mejna sprejemljiva vrednost tveganja za posameznika je navadno določena s pravilniki in v je večini evropskih držav  $TP = 1 \cdot 10^{-6}$ /leto.

Kvantitativna ocena tveganja je sestavljena iz treh poglavitnih delov, ki so:

- 1) poznavanje objekta ali sistema, na katerem se tveganje ocenjuje, in iz tega izhajajoča določitev obsega analize;
- 2) analiza tveganja, ki omogoča oceniti tveganje na objektu ali sistemu, in je sestavljena iz štirih stopenj:
  - identifikacije nevarnosti: tu poteka ugotavljanje, prepoznavanje in definiranje mogočih neželenih dogodkov, ki se lahko pojavijo na sistemu,
  - analize posledic: sestavlja jo modeliranje posledic nevarnega dogodka, npr. tlačni udar pri eksploziji plina in njegov vpliv na ljudi in okolje,
  - analize pogostosti: določa pogostost pojava neželenih dogodkov, in sicer z uporabo podatkov o podobnih objektih iz preteklih let ali z analizo drevesa napak in dogodkov,

– ocene tveganja: postopek, v katerem se za kvantifikacijo tveganja združijo pogostosti in posledice dogodkov;

3) vrednotenje tveganja, ki omogoča določiti sprejemljivost ocenjenega tveganja.

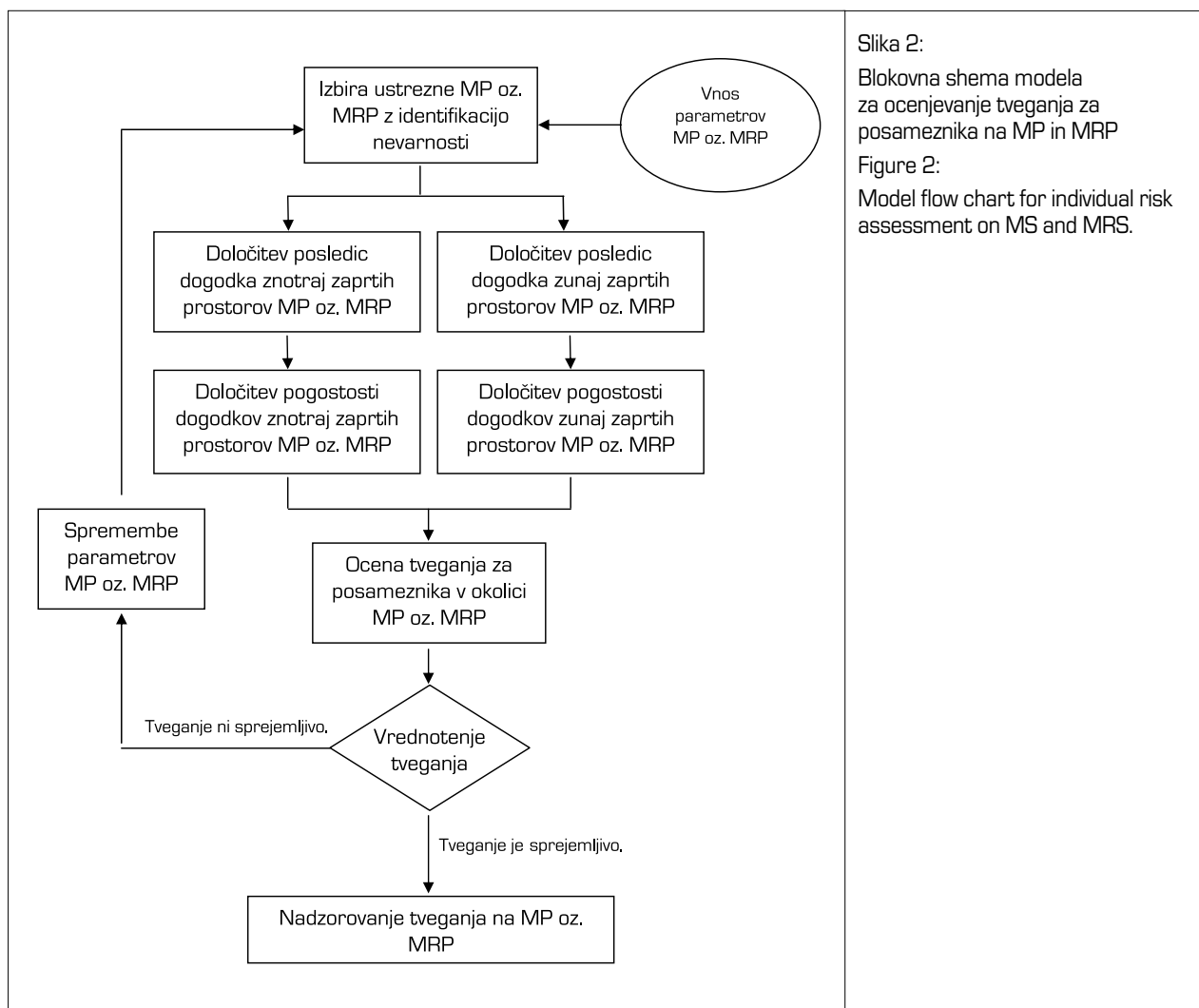
Na sliki 2 je skladno s prej navedenim grafično predstavljena shema modela kvantitativnega ocenjevanja tveganja na MP in MRP.

Analiza tveganja je osrednji in bistveni del kvantitativnega ocenjevanja tveganja. Pri tem so pomembni predvsem identifikacija nevarnosti ali določitev vseh neželenih dogodkov, analiza posledic in pogostosti ter ocena tveganja, ki iz tega izhaja.

Identifikacija nevarnosti (neželeni izpust plina iz delov postaje in njegov vžig) je v splošnem za plinske napeljave znana (CPR 18E, 1999; CSChE, 2004; CPR 14E, 2005; IGEM, 2010), zato je že vključena v izbiro posamezne postaje v shemi na sliki 2.

Pri izbiri posamezne MP ali MRP je v oceni tveganja za posameznika treba določiti njene parametre (meje in gabarite, parametre plina, elemente postaje in ventilacijo). Neželeni dogodki se na odprtem delu postaje kažejo predvsem kot goreč curek plina, podobno kot pri prenosnih cevovodih za zemeljski plin (Bajcar in sod., 2012), v zaprtih prostorih pa kot eksplozija gorljive mešanice zemeljskega plina in zraka. Pri tem velja poudariti, da je vpliv neželenih dogodkov na zunanjem (odprtem) delu postaje na tveganje za posameznika v okolici postaje majhen v primerjavi z eksplozijo v notranjem delu postaje. To je deloma posledica omejitve dostopa tretjim osebam k plinskim cevovodom znotraj zaščitne ograje, saj so te osebe poglaviti vzrok neželenih dogodkov na cevovodih (Bajcar in sod., 2012). Po drugi strani pa imajo dogodki na odprtem zaradi napak v obratovanju postaje (npr. vžig plinskega curka iz izpušnega voda varnostnega izpustnega ventila) omejen doseg, običajno ne večji kot 15 metrov. To je po veljavni zakonodaji za regulacijske postaje na prenosnem omrežju (Uradni list RS, 2010) tudi meja, do katere se smejo postajam MP ali MRP približati stanovanjski objekti. Pri obratovalnih tlakih pod 16 barov (distribucijske mreže) pa je ta doseg približno dvakrat manjši in se še manjša s padanjem obratovalnega tlaka, po pravilniku pa je najmanjši dovoljeni odmik objektov od meje (ograje) takšne postaje 4–15 metrov (Uradni list RS, 2002), zato se prispevek osredotoča na nevarnost eksplozije v notranjem delu MP in MRP kot največjem tveganju za posameznika, in sicer za ljudi, ki živijo ali se dalj časa zadržujejo v stanovanjskih in drugih objektih v okolici takšnih postaj. Prav tako v tej fazi ni upoštevan vpliv vžiga sredstva za odoriranje zemeljskega plina (tetrahidrotiofen – THT), ki sicer ni vedno prisoten (posebno na MP) in je običajno nameščen zunaj zgradbe, v kateri so merilne in regulacijske napeljave za zemeljski plin.

Posamezni koraki izračuna tveganja za posameznika so predstavljeni v nadaljevanju.



Slika 2:  
 Blokovna shema modela za ocenjevanje tveganja za posameznika na MP in MRP  
 Figure 2:  
 Model flow chart for individual risk assessment on MS and MRS.

## Analiza tveganja

### Identifikacija nevarnosti

Za identifikacijo nevarnosti se običajno uporablja analiza tveganja in obratovalnosti, tako imenovani hazard and operability analysis - HAZOP (CSCHE, 2004; CPR 14E, 2005; IGEM, 2010). Bistvo te analize je natančen in načrten pregled procesa ali obratovanja z namenom ugotavljanja, ali odkloni v procesu lahko vodijo k neželenim posledicam.

Nevarnost v prostorih MP ali MRP je predvsem neželena uhajanje plina iz elementov, ki plin vsebujejo. Takšna situacija lahko vodi do eksplozije (vžiga prostorsko omejene eksplozivne zmesi v prostoru MP ali MRP) s človeškimi žrtvami in materialnimi posledicami.

Rezultati analize HAZOP so podatki o vrsti in številu elementov, ki predstavljajo morebitne vire nevarnosti oziroma izvore neželenega puščanja plina v MP ali MRP (IGEM, 2010). To so pretežno krogelne pipe, manometrskie pipe, regulatorji tlaka, varnostno-zaporni ventili, varnostno-izpustni ventili, zaporne lopute ter prirobnične in navojne zveze.

## Analiza posledic

Namen analize posledic je oceniti velikost škode in poškodb ljudi ter objektov, če se nevarni dogodek (eksplozija oziroma tlačni udar pri eksploziji) zares zgodi.

Za oceno tveganja se posledice nevarnih ali neželenih dogodkov v MP in MRP modelirajo na primer z matematičnimi modeli. Vhodni podatki pri matematičnem modeliranju vključujejo fizikalne in kemične lastnosti zemeljskega plina in lastnosti sistema, ki ta plin vsebujejo.

Modeliranje posledic je v modelu tveganja sestavljeno iz treh korakov:

- 1) modeliranje izvora: tu se modelirajo količina in agregatno stanje zemeljskega plina, ki je ušel iz cevovoda, kot funkcija časa ter razvoj mogočih nevarnih dogodkov, ki sledijo izpustu;
- 2) modeliranje stopnje nevarnosti kot funkcija časa in izbrane lokacije ljudi ali objektov. Pri tem gre pri netoksičnih plinih (kot je zemeljski plin) za oceno učinka eksplozije;
- 3) modeliranje stopnje poškodb na ljudeh ali objektih: modelira se glede na stopnjo nevarnosti, določene na lokaciji sprejemnika oziroma receptorja.

## Modeliranje izvora

Pri modeliranju izvora model upošteva parametre plina v napeljavah ter predpisane ali priporočene velikosti odprtin na elementih, skozi katere izteka plin (CPR 18E, 1999; IGEM, 2010).

Smernice IGEM (IGEM, 2010) priporočajo v elementih za izračun količine neželenega iztekanja plina upoštevanje teh površin odprtin:

- 0,025 mm<sup>2</sup> (pri tlakih ≤ 100 mbar),
- 0,25 mm<sup>2</sup> (pri normalnih obratovalnih razmerah),
- 2,5 mm<sup>2</sup> (pri nenormalnih obratovalnih razmerah – vibracije, korozivna atmosfera itd.)

MP in MRP ne obratujejo v nenormalnih razmerah, zato prideta za oceno tveganja za izračun iztoka plina v poštev prvi dve vrednosti.

## Modeliranje stopnje nevarnosti in stopnje poškodb

Učinki tlačnega udara eksplozije so odvisni od najvišje vrednosti nadtlaka zaradi eksplozije na kraju, kjer se oseba nahaja. Če je oseba dovolj daleč od roba eksplozijskega oblaka, nadtlak ne povzroči neposredne smrtno poškodbe, pač pa jo lahko povzroči posredno (npr. tlačni val lahko poruši stavbo, ki se zruši na osebo, itn.). Za ljudi veljata dve mejni vrednosti nadtlaka pri eksploziji, in sicer (CPR 18E, 1999; CPR 14E, 2005):

- $p_{\max} \geq 0,3$  bara (100-odstotna verjetnost smrtnosti),
- $p_{\min} = 0,1$  bara (0-odstotna verjetnost smrtnosti za osebe zunaj stavb in 2,5-odstotna za osebe v stavbah).

Pri znani količini eksplozivne substance je treba s tako imenovano multienergijsko metodo (CPR 14E, 2005) določiti odmike ( $r$ ) od središča eksplozije do obeh mejnih tlakov, in sicer po enačbah:

$$r_{0,3\text{bar}} = 1,5 \cdot \left( \frac{E}{P_a} \right)^{1/3}, \quad (2\text{ a})$$

$$r_{0,1\text{bar}} = 3 \cdot \left( \frac{E}{P_a} \right)^{1/3}, \quad (2\text{ b})$$

pri čemer je  $p_a$  tlak okolice (atmosferski tlak),  $E$  pa kurilnost mase vnetljive mešanice gorljive snovi in zraka znotraj konture spodnje meje vnetljivosti ali eksplozivnosti. Količino oziroma maso zemeljskega plina ( $m_e$ ), ki sodeluje pri eksploziji, v konservativnem primeru lahko določimo s stehiometrijsko mešanico gorljivega plina in zraka, ki se lahko pojavi v dani prostornini (tj. prostornina zaprtega prostora zgradbe MP ali MRP):

$$m_e = \eta \cdot V \cdot \rho_{ng}, \quad (3)$$

pri čemer je  $\eta$  stehiometrično prostorninsko razmerje zemeljskega plina v zraku,  $V$  je prostornina notranjega dela zgradbe MP ali MRP,  $\rho_{ng}$  pa je gostota zemeljskega plina pri razmerah notranjega prostora MP ali MRP (tlak, temperatura). Zgradbe MP in MRP so običajno projektirane tako, da ob eksploziji popusti predvsem streha, s čimer naj bi se učinki eksplozije na okolico na nivoju tal ublažili. Enačbi 2 a in 2 b sta zato konservativni primer, pri katerem se ob eksploziji porušijo tudi zidovi zgradbe postaje.

## Analiza pogostosti

Pogostost neželenih dogodkov v zaprtih prostorih je v modelu za ocenjevanje tveganja neposredno povezana s pogostostjo prisotnosti vnetljive ali eksplozivne atmosfere na območju MP ali MRP, in sicer skladno s priporočili (Marangon in Carcassi, 2006; IGEM, 2010). Priporočila na tej podlagi razlikujejo tri osnovne (eksplozijske) cone, ki se razlikujejo glede na (letno) verjetnost  $P_c$  prisotnosti vnetljive atmosfere, in sicer:

- cona 0: verjetnost za prisotnost vnetljive atmosfere  $P_c > 0,1$  leto<sup>-1</sup>,
- cona 1: verjetnost za prisotnost vnetljive atmosfere  $0,1 \geq P_c > 0,001$  leto<sup>-1</sup>,
- cona 2: verjetnost za prisotnost vnetljive atmosfere  $0,001 \geq P_c > 0,00001$  leto<sup>-1</sup>.

Cona 0 so območja, na katerih je eksplozivna atmosfera, sestavljena iz zmesi zraka in vnetljive snovi v obliki plina, prisotna neprekinjeno ali za daljša obdobja ali pogosto. Prisotnost vnetljive atmosfere lahko traja skupno več kot en mesec.

Cona 1 so območja, na katerih lahko pri normalnem delovanju občasno nastane eksplozivna atmosfera.

Cona 2 pa so območja, na katerih se eksplozivna atmosfera pri normalnem obratovanju ne pojavi, če pa se pojavi zaradi nenormalnega obratovanja, je to za kratek čas. Vnetljiva atmosfera je prisotna v skupnem trajanju največ okrog 10 ur.

Posebna oblika cone 2 je cona 2NE, za katero veljajo enake značilnosti kot za cono 2, le da je velikost cone 2NE, če se pojavi, praktično zanemarljiva.

Verjetnost prisotnosti vnetljive atmosfere in s tem tudi vrsta cone sta v glavnem odvisni od:

- stopnje puščanja izvorov,
- števila in pogostosti puščanja posameznega elementa oziroma izvora,
- prezračevanja.

S stališča tveganja za posameznika je pomembno stremeti k vzpostavitvi eksplozijske cone 2 na območju MP ali MRP, saj ta v primerjavi z drugima dvema predstavlja najmanjšo možnost neželenega dogodka s posledicami za okoliško prebivalstvo.

## Stopnje puščanja izvorov

Priporočila IGEM (IGEM, 2010) delijo puščanje izvorov uhajajočega zemeljskega plina na napeljavah in postrojenjih (ne samo na MP in MRP) na tri stopnje glede na pogostost in trajanje puščanja, in sicer so to:

- trajni izvori puščanja: puščanje zemeljskega plina je neprestano ali v daljših časovnih obdobjih ali pa se pojavlja pogosto in v krajših časovnih obdobjih. Izvori, za katere je značilno takšno puščanje, so:
  - nekatere vrste aktuatorjev ventilov,
  - nekatere vrste analizatorjev,
  - nekatere vrste oddušnikov na opremi,
  - nekateri plinsko gnani krmilniki;
- primarni izvori puščanja: puščanje zemeljskega plina se lahko pri normalnem obratovanju pričakuje obdobjno ali občasno. Takšni izvori puščanja so:
  - oddušniki in čistilne odprtine, ki ne obratujejo pogosto,
  - izpuhi varnostnih izpustnih ventilov med obratovanjem,
  - oddušniki ali izpuhi opreme ali strojev, ki ne obratujejo pogosto,
  - tesnila na gredeh kompresorjev in črpalk,
  - tesnila in majhne reže hranilnikov plina;
- sekundarni izvori puščanja: puščanja zemeljskega plina pri normalnem obratovanju ni pričakovati, če pa se pojavi, se pojavlja redko in s kratko dobo trajanja. Med takšne izvore štejemo netesnosti, ki se pojavijo na teh elementih:
  - pari prirobnic,
  - vijačne zveze,
  - spoji,
  - membrane distribucijskih regulatorjev,
  - ventili.

Viri puščanja zemeljskega plina v notranjih prostorih MP in MRP so spoznani kot sekundarni (IGEM, 2010), pri čemer so lahko viri puščanja tako primarni kot sekundarni (npr. tesnila kompresorjev, črpalk in hranilnikov plina). Na območju MRP ni kompresorjev in hranilnikov plina, črpalka pa je navadno le pri napravi za odoriranje plina, če je nameščena na območju postaje.

Praviloma trajni viri izpuščanja povzročajo cono 0, primarni viri cono 1 in sekundarni cono 2 (IGEM, 2010). Kljub temu pa lahko na eksplozijsko cono, še posebej ob slabšem prezračevanju zaprtih prostorov, vplivajo tudi število in pogostost puščanja ter periodičnost pregledov posameznega potencialnega vira.

## Vpliv števila, pogostosti puščanja in pregledov posameznega izvora

Za vsak element MP in MRP, ki sodeluje pri transportu, regulaciji tlaka ali merjenju pretoka zemeljskega plina, obstaja statistična verjetnost puščanja. Zato je pri postajah z večjim številom elementov pričakovati pogostejše puščanje zemeljskega plina kot pri postajah z manj

Vrsta opreme	Verjetnost puščanja (leto <sup>-1</sup> )
membrana regulatorja	0,005
zasun oziroma dvizni ventil	0,005
krogelni ventil	0,001
vijačne zveze brez tesnila	0,001
vijačne zveze s tesnilom	0,0008
prirobnice	0,0005
kompresijski spoji	0,00005

Preglednica 1:	Statistična letna pogostost ali verjetnost puščanja posameznega elementa (vir: IGEM, 2010)
Table 1:	Statistical annual frequency or probability of unwanted gas releases for particular equipment elements (Source: IGEM, 2010).

elementi. Pri tem je pomemben tudi interval pregledov posameznega elementa, ki za cono 2 ne sme biti daljši od šest mesecev (IGEM, 2010).

Preglednica 1 prikazuje statistične vrednosti za letno pogostost okvare (puščanja zemeljskega plina) za posamezni element MRP ali MP (IGEM, 2010).

Z enačbo:

$$S = \sum_i (f_i \cdot \Delta t_i \cdot n_i), \quad (4)$$

v kateri so:  $i$  vrsta ali tip elementov, ki lahko puščajo (zveze, ventili, ipd.),  $f_i$  pogostost odpovedi (puščanja) elementov  $i$ ,  $\Delta t_i$  letni interval med pregledi elementov  $i$ ,  $n_i$  pa število vseh elementov tipa  $i$  v MP ali MRP, je mogoče določiti število istočasno (simultano) puščajočih elementov oziroma izvorov (IGEM, 2010).

Preglednica 2 prikazuje odvisnost števila simultano puščajočih sekundarnih izvorov od vsote  $S$ , ki omogočajo klasifikacijo prostora kot cono 2 (IGEM, 2010). Iz pregle-

Vrednost $S$	Število simultano puščajočih izvorov zemeljskega plina za klasifikacijo prostora kot cona 2
$\leq 0,001$	1
$> 0,001$ in $\leq 0,01$	2
$> 0,01$ in $\leq 0,05$	3
$> 0,05$ in $\leq 0,1$	4
$> 0,1$ in $\leq 1,0$	ves prostor je opredeljen kot cona 1
$> 1,0$	ves prostor je opredeljen kot cona 0

Preglednica 2:	Število simultano puščajočih elementov ali izvorov puščajočega zemeljskega plina glede na vrednosti vsote $S$ (vir: IGEM, 2010)
Table 2:	Number of simultaneous gas releases according to the sum $S$ (Source: IGEM, 2010).

Vrsta eksplozijske cone	Časovni interval med pregledi $\Delta t_i$
Cona 2	$\leq 6$ mesecev
Cona 1	$> 6$ mesecev in $\leq 12$ mesecev
Cona 0	$> 12$ mesecev

Preglednica 3: Vpliv časovnih intervalov med pregledi elementov MP in MRP na vrsto eksplozijske cone (vir: IGEM, 2010)

Table 3: Influence of inspection intervals for elements of MS/MRS on type of explosive zone (Source: IGEM, 2010).

dnice 2 je razvidno, da lahko vrednosti vsote  $S$  nad 0,1 (visoka frekvenca odpovedi, velik interval med pregledi in veliko število elementov, ki lahko puščajo) povzročijo, da prostor ne more biti obravnavan več kot cona 2, pač pa je frekvenca ali pogostost prisotnosti vnetljive atmosfere višja (cona 1 ali celo cona 0).

Medtem ko je pogostost odpovedi posameznega elementa  $f_i$  (statistično določena za posamezni tip elementa) ter število elementov  $n_i$  v MP ali MRP težko bistveno spremeniti, se vrednost vsote  $S$  lahko zmanjša s skrajšanjem intervalov pregledov  $\Delta t_i$ . Zato za posamezno eksplozijsko cono priporočila (IGEM, 2010) določajo največji dovoljeni interval med pregledi posameznih elementov ali izvorov puščanja na MP in MRP (preglednica 3).

Število simultano puščajočih izvorov iz preglednice 2 vpliva na količino, to je na masni tok zemeljskega plina, ki skozi puščajoče elemente (izvore) izhaja na prosto ali v zaprt prostor MP ali MRP. Po priporočilih (IGEM, 2010) se masni tok  $Q$  zemeljskega plina iz posameznega puščajočega elementa oziroma izvora določi z enačbama:

$$Q = 675 \cdot C_d \cdot A \cdot M^{0,5} \cdot T^{-0,5} \cdot (p + 1,013)^{1,05}$$

... za obratovalni tlak plina vsaj 850 mbar; (5)

$$Q = 1500 \cdot C_d \cdot A \cdot M^{0,5} \cdot T^{-0,5} \cdot p^{0,5}$$

... za obratovalni tlak plina pod 850 mbar; (6)

pri čemer so:  $M$  molska masa zemeljskega plina,  $T$  temperatura plina,  $p$  obratovalni nadtlak plina,  $C_d$  pa koeficient izpustne odprtine; pri tem za odprtine varnostnih izpušnih ventilov velja  $C_d = 0,97$ , za druge odprtine v elementih pa  $C_d = 0,8$ .  $A$  je presek odprtine, skozi katero uhaja zemeljski plin.

Vsota vrednosti  $Q$  po enačbah 5 ali 6 vseh simultano puščajočih elementov da skupni masni tok uhajajočega zemeljskega plina, ki je podlaga za oceno učinkovitosti prezračevanja.

## Vpliv prezračevanja

Prezračevanje je gibanje zraka skozi prostore in s tem nadomeščanje atmosfere v prostorih MP in MRP s sve-

žim zrakom. Gibanje zraka okoli elementov, ki lahko puščajo, in učinkovitost prezračevanja lahko bistveno vplivata na klasifikacijo prostora v eno izmed eksplozijskih con. Pri tem ločimo naravno in prisilno prezračevanje (z ventilatorji).

Objekti MP in MRP v Sloveniji so naravno prezračevani, kar pomeni, da gibanje zraka skozi prostore postaj in ob njih povzroči veter ali vzgon.

Priporočila (IGEM, 2010) delijo učinkovitost prezračevanja na štiri razrede ali stopnje:

- 1) *več kot zadovoljivo prezračevanje*: prezračevanje, ki omogoča, da koncentracija plina v prostoru pričakovano ne preseže 10 % spodnje meje vnetljivosti zemeljskega plina;
- 2) *zadovoljivo prezračevanje*: koncentracija plina v prostoru pričakovano ne preseže 25 % spodnje meje vnetljivosti zemeljskega plina;
- 3) *nezadovoljivo prezračevanje*: koncentracija plina v prostoru se pričakovano giblje od 25 % do kvečjemu 50 % spodnje meje vnetljivosti zemeljskega plina;
- 4) *slabo prezračevanje*: koncentracija plina v prostoru pričakovano preseže 50 % spodnje meje vnetljivosti zemeljskega plina.

V zaprtih prostorih MP in MRP sta najučinkovitejši stopnji prezračevanja (zadovoljivo oziroma več kot zadovoljivo prezračevanje) povezani z eksplozijsko cono 2 oziroma 2NE, nezadovoljivo prezračevanje s cono 1, slabo prezračevanje pa s cono 0.

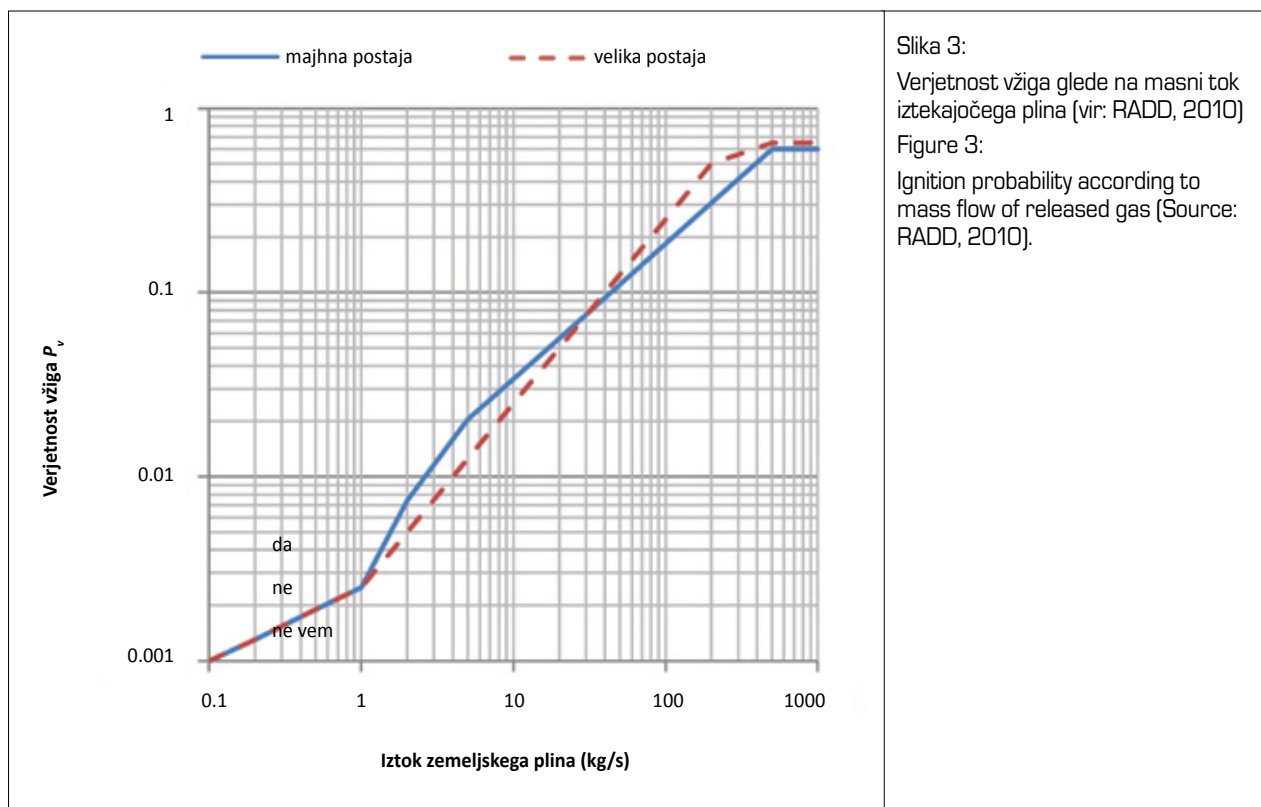
Najučinkovitejši stopnji prezračevanja za dosego cone 2 v prostorih MP in MRP, skladno s priporočili (IGEM, 2010), zahtevata ustrezne prezračevalne odprtine, kot je navedeno v preglednici 4.

Poleg tega mora biti prosta prezračevalna površina razdeljena na zgornje (streha) in spodnje dele prostora, pri čemer mora biti delitev na zgornje in spodnje prezračevalne površine izvedena v deležu med 33 in 67 odstotki skupne proste prezračevalne površine. Velja tudi, da morajo biti vsi izvori puščanja zemeljskega plina nižje od spodnjega dela najvišje prezračevalne odprtine.

Število sten, uporabljenih za prezračevanje	Delež proste prezračevalne površine v vsaki steni
4	$\geq 17 \% \leq 33 \%$
3	$\geq 22 \% \leq 44 \%$
2	$\geq 33 \% \leq 67 \%$
1	100 %

Preglednica 4: Merila za ustrezno izvedbo prezračevalnih odprtini za omogočanje eksplozijske cone 2 (vir: IGEM, 2010)

Table 4: Criteria for an appropriate ventilation design to achieve explosive zone 2 (Source: IGEM, 2010).



Slika 3:  
Verjetnost vžiga glede na masni tok iztekajočega plina (vir: RADD, 2010)  
Figure 3:  
Ignition probability according to mass flow of released gas (Source: RADD, 2010).

Naravno prezračevanje pri sorazmerno majhnih hitrostih vetra je v glavnem odvisno od vzgona. Velikost skupne proste prezračevalne površine podajajo priporočila (IGEM, 2010). Če je prezračevanje izvedeno vsaj na dveh stenah, mora biti zahtevana prosta prezračevalna površina  $A_p$  za dosego cone 2 velika vsaj toliko, kot mora biti površina za dosego zadovoljivega prezračevanja  $A_{b,25}$ :

$$A_p \geq A_{b,25} = 1964 \cdot Q \cdot L_h^{-0,5}, \quad (7)$$

kjer sta  $Q$  skupni masni tok uhajajočega plina iz simultano puščajočih izvorov (v kg/s),  $L_h$  pa navpična razdalja med centroma zgornje in spodnje prezračevalne odprtine (v metrih). Zgornja meja prezračevalne površine za dosego cone 2 je površina, ki je potrebna za več kot zadovoljivo prezračevanje  $A_{b,10}$ :

$$A_p \geq A_{b,10} = 7762 \cdot Q \cdot L_h^{-0,5}. \quad (8)$$

Takšna prezračevalna površina ustreza coni 2NE (IGEM, 2010). Vzgonsko prezračevanje je nezadovoljivo, vendar ne slabo (cona 1), kadar za velikost prezračevalnih odprtin  $A_p$  velja:

$$A_{b,25} > A_p \geq A_{b,50}, \quad (9)$$

pri čemer je  $A_{b,50}$  mejna površina prezračevalnih odprtin za slabo prezračevanje (pričakovana koncentracija plina 50 % spodnje meje vnetljivosti, cona 0). Za slabo prezračevanje in s tem za eksplozijsko cono 0 je zato značilna zveza:

$$A_p < A_{b,50} = 694 \cdot Q \cdot L_h^{-0,5}. \quad (10)$$

Poleg enačbe (10) velja, da je v prostoru slabo prezračevanje (ves prostor je eksplozijska cona 0), če je za celotno (skupno) prosto prezračevalno površino prostora  $A_p$  izpolnjen pogoj (IGEM, 2010):

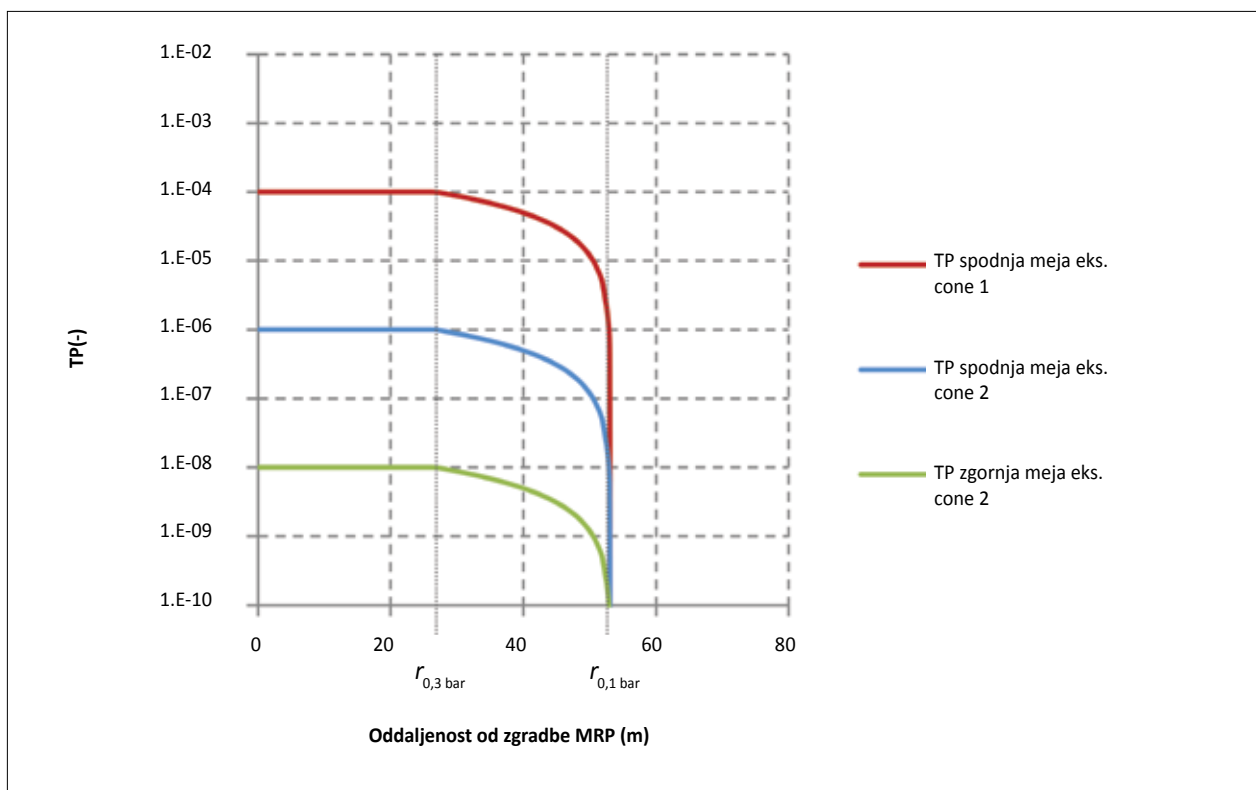
$$A_p < 0,02 \cdot A_F, \quad (11)$$

kjer je  $A_F$  tlorisna površina prostora. Med enačbama 10 in 11 velja za določitev meje cone 0 tista, katere rezultat je manjši.

## Verjetnost vžiga

Do posledic neželenega dogodka lahko pride le v primeru vžiga nevarne snovi (zemeljskega plina in zraka). Plin pri neželenem izpustu se ne vname vedno, kar je odvisno predvsem od prisotnosti virov vžiga ter masnega toka uhajajočega zemeljskega plina (CPR 18E, 1999, RADD, 2010). V splošnem velja, da v MP in MRP ni predvidenih virov vžiga. Kljub temu je treba predpostaviti občasno prisotnost virov vžiga zaradi okvar ali nepravilnega delovanja preostale opreme MP in MRP (npr. okvare električne opreme ali naprav, statična elektrika, strela ali celo človeški faktor).

Na sliki 3 je predstavljena verjetnost vžiga  $P_v$  iztekajočega plina za napeljave ali postrojenja (površine do 1200 m<sup>2</sup> ali nad 1200 m<sup>2</sup>) v odvisnosti od količine iztečenega plina v časovni enoti (RADD, 2010). Izbrani scenariji v navedeni literaturi veljajo tako za izpust plina kot utekočinjenega naftnega plina (LPG) in se nanašajo na izpuste gorljivih plinov, par ali kapljev, ki so pri normalnem atmosferskem tlaku nad točko vrelišča.



Slika 4: Potek tveganja za posameznika pri različnih stopnjah prezračevanja  
 Figure 4: Individual risk distribution for different levels of ventilation.

S slike 3 je razvidno, da je bistveni parameter količina izrečenega plina, medtem ko velikost postrojenja le v manjši meri vpliva na verjetnost vžiga. Vrednosti po sliki 3 se lahko uporabijo za oceno tveganja kot verjetnosti vžiga neželenega izpusta zemeljskega plina na območju MP ali MRP. Ker je potek verjetnosti vžiga  $P_v$  z masnim tokom izpusta plina monoton (slika 3) in ker so izpusti zemeljskega plina v MP ali MRP pri normalnem obratovanju običajno manjši od 0,1 kg/s, je pri izračunu konservativno upoštevana verjetnost  $P_v = 0,001$  za vse izpuste, ki so pod minimalno vrednostjo izpusta na diagramu na sliki 3.

Vrednosti  $r_{0,3 \text{ bar}}$  in  $r_{0,1 \text{ bar}}$  sta po sliki 4 enaki za vse primere prezračevanja, saj nanju bistveno vpliva le velikost notranjega prostora zgradbe MRP (enačbe 2 a, 2 b in 3) in ju za obstoječi objekt brez konstrukcijskih predelav ni mogoče spreminjati. Pač pa je povišana kakovost oziroma stopnja prezračevanja poglobilni zaščitni ukrep pri zmanjševanju tveganja, kar je razvidno tudi iz relativne primerjave potekov tveganja za posameznika. Ta se z ustreznim prezračevanjem lahko zmanjša za več dekad oziroma velikostnih redov.

## Tveganje za posameznika

Celotno tveganje za posameznika ( $TP$ ) zaradi bližine MP ali MRP je skladno z enačbo 2 enako:

$$TP = P \cdot P_c \cdot P_v \quad 12)$$

Slika 4 prikazuje primer poteka tveganja za posameznika zaradi eksplozije v vzorčni MRP oziroma njenem notranjem prostoru s prostornino  $V = 160 \text{ m}^3$  ( $P = f(V, r)$ ) ter masnim tokom izpusta zemeljskega plina  $Q \leq 0,1 \text{ kg/s}$  ( $P_v = 0,001$ ) pri različnih stopnjah prezračevanja oziroma pri prisotnosti različnih eksplozijskih con. Spodnjo mejo eksplozijske cone 1 predstavlja prezračevalna površina  $A_{b,50}$  ( $P_c = 1 \cdot 10^{-1} \text{ leto}^{-1}$ ), spodnjo mejo eksplozijske cone 2  $A_{b,25}$  ( $P_c = 1 \cdot 10^{-3} \text{ leto}^{-1}$ ), zgornjo mejo eksplozijske cone 2 pa  $A_{b,10}$  ( $P_c = 1 \cdot 10^{-5} \text{ leto}^{-1}$ ).

## Sklepne misli

V prispevku je predstavljen model ocene tveganja za posameznika na merilnih (MP) in merilno-regulacijskih postajah (MRP) za zemeljski plin. Pristop v bistvu temelji na evropskih priporočilih in smernicah IGEM in CPR, ki so jih sprejela ustrezna strokovna združenja, in na ustrezni zakonodaji. Osredotoča se predvsem na poglobilni neželeni dogodek – eksplozijo mešanice zemeljskega plina in zraka v zgradbi postaje. Model služi predvsem za olajšavo umeščanja takšnih objektov v okolje z vidika zagotavljanja sprejemljivega tveganja za posameznika.

Identifikacija nevarnosti je v modelu izvedena prek analize napak HAZOP, vzrokov in njihovih posledic na notranjem delu MP ali MRP. Vhodni parametri za oceno tveganja obsegajo geometrijske značilnosti in gabarite postaje, parametre plina in plinovodov v postaji, vrsto in število



posameznih elementov plinovoda v postaji ter parametre prezračevanja.

Pri določitvah posledic dogodkov so uporabljeni matematični modeli ter statistične metode določanja verjetnosti umrljivosti. Določanje pogostosti nesreč v modelu temelji predvsem na pogostosti odpovedi in postopkih iz priporočil IGEM ter podobne relevantne strokovne literature o plinskih napeljavah, procesni tehniki ter transportu in hranjenju nevarnih snovi. Predvidena je tudi verjetnost vžiga mešanice zemeljskega plina in zraka, predvsem glede na intenzivnost puščanja plina.

Ocena tveganja za posameznika s pomočjo predstavljenega modela pokaže, da je območje dosega neželenega dogodka povezano predvsem z gabariti zgradbe postaje, vendar je na vrednost tveganja mogoče vplivati z zaščitnimi ukrepi in tako zmanjšati tveganje na sprejemljivo raven. Ključni ukrep pri zmanjševanju tveganja za posameznika na MP in MRP je izboljšano prezračevanje v zaprtih prostorih zgradb teh postaj. Za celovito sliko pa je treba upoštevati tudi prisotnost prenosnih cevovodov v okolici postaje in njihov morebitni doprinos k skupnemu tveganju za posameznika (Bajcar in sod., 2012).

## Viri in literatura

1. Bajcar, T., Cimerman, F., Širok, B., 2012. Tveganje za posameznika na sistemu prenosnih cevovodov za zemeljski plin. *Ujma*, revija za vprašanje varstva pred naravnimi in drugimi nesrečami 26, 122–129.
2. CSChE, Risk Assessment – Recommended Practices for Municipalities and Industry, Ottawa, Canadian Society for Chemical Engineering, 2004.
3. CPR 14E Yellow Book, 2005. Methods for the calculation of physical effects. The Hague, Sdu Uitgevers.
4. CPR 18E Purple Book, 1999. Guidelines for quantitative risk assessment. The Hague, Sdu Uitgevers.
5. IGEM – Institution of Gas Engineers and Managers, 2010. Hazardous area classification of natural gas installations, IGEM/SR/25, Kegworth, IGEM.
6. Marangon, A., Carcassi, M. N. M., 2006. ATEX Directives: the new Approach – Classification of hazardous areas for the presence of flammable gas, 5<sup>th</sup> Conference on Risk Assessment and Management in the Civil and Industrial Settlements – VGR 2006, Pisa, 1–20.
7. Risk Assessment Data Directory (RADD), 2010. Ignition probabilities, Report No. 434 – 6.1, International Association of Oil & Gas Producers, London, OGP, 8–9.
8. Uradni list RS, 2002. Pravilnik o tehničnih pogojih za graditev, obratovanje in vzdrževanje plinovodov z delovnim tlakom do vključno 16 barov, Uradni list RS, št. 26/2002. Dodane spremembe Uradni list RS, št. 54/2002.
9. Uradni list RS, 2010. Pravilnik o tehničnih pogojih za graditev, obratovanje in vzdrževanje plinovodov z delovnim tlakom nad 16 bar ter o pogojih za posege v območjih njihovih varovalnih pasov, Uradni list RS, št. 12/2010.